

Observation des lichens



**Evaluation de la  
vulnérabilité  
environnementale et  
sanitaire d'un territoire  
en lien avec l'activité  
anthopique et la  
diversité des milieux**

Rapport d'avancement  
N°1



Annabelle Austruy  
Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions  
Centre de Vie La Fossette, RD268  
13270 Fos-sur-Mer  
[annabelle.austruy@institut-ecocitoyen.fr](mailto:annabelle.austruy@institut-ecocitoyen.fr)



**Le présent rapport est publié sous licence CC-BY-ND**

*Les données, les interprétations et les images présentes dans ce rapport sont la propriété de l'Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions et de ses partenaires (CEREGE, LCE, LPED et DYNAFOR), libres d'accès et d'utilisation à condition de citer les références du rapport et d'indiquer la source des données, photos, et graphiques ("Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions").*

*Il ne sera pas apporté de modifications à la version originale du rapport à des fins de diffusion. L'Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions ne pourra être tenu responsable de toute interprétation réalisée par un tiers et qui n'est pas explicitement détaillée dans ce rapport.*

*Pour citer ce rapport :*

*Annabelle Austruy. EVALVIE : Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires – Rapport d'avancement n°1. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 2022.*

## Table des matières

I. Introduction.....	5
II. Avancement tâches.....	7
II.1. Stratégie de communication (Tâche 1-3).....	7
II.2. Sélection des sites d'études (Tâche 1-2).....	8
II.3. Anthropisation des territoires (Tâche 3).....	11
II.4. Protocole de biosurveillance lichénique (Tâche 5-2 et 5-3).....	12
II.4.1. Méthode de relevé de Bioindication lichénique (Tâche 5-3).....	13
II.4.2. Protocole de bioaccumulation lichénique (Tâche 5-2).....	15
II.5. Protocole de prélèvements et caractérisation des sols (Tâche 5-1).....	16
II.6. Analyses chimiques (Tâche 5-4).....	17
II.6.1. Détermination des teneurs en métaux dans les échantillons de lichens.....	17
II.6.2. Détermination des teneurs en HAPs dans les échantillons de lichens.....	18
II.6.3. Développement analytique pour l'analyse des pesticides.....	18
II.7. Premiers résultats (Tâche 5).....	19
II.7.1. Bioaccumulation lichénique.....	19
II.7.2. Bioindication lichénique.....	28
II.7.3. Caractérisation des types de sol.....	33
III. Calendrier prévisionnel 2022-23.....	35
IV. Rapport sur les difficultés.....	37
V. Points d'attention pour l'ADEME.....	37
VI. Conclusions.....	38
VII. Références bibliographiques.....	39
Annexe 1 : Liste des pesticides.....	43

## Index des Figures

<b>Figure 1</b> : Cartographie des IRIS sélectionnés et des sites de prélèvement répartis sur les villes de Fos-sur-Mer (A), Saint-Martin-de-Crau (B) et Marseille (C).....	11
<b>Figure 2</b> : Méthode de relevé de bioindication sur le terrain.....	14
<b>Figure 3</b> : Photographie de <i>X. parietina</i> sur l'écorce d'un chêne vert ( <i>Quercus ilex</i> L., 1753) sur le site de prélèvement FOM (parc du Mazet Nord, Fos-sur-Mer, 15/03/2022).....	15
<b>Figure 4</b> : Teneurs en mg.kg <sup>-1</sup> MS des éléments majeurs (A) et traces (B) relevées dans les thalles de <i>X. parietina</i> (test de Wilcoxon ; n = 6 ; p < 0,05).....	20
<b>Figure 5</b> : Teneurs moyennes de As, Cd, Fe, Pb et Zn relevées dans les thalles de <i>X. parietina</i> , en mg.kg-1 MS et définies par IRIS des communes étudiées. La couleur des histogrammes est fonction du type d'habitat décrit sur l'IRIS.....	21
<b>Figure 6</b> : Cartographie de l'IPi à l'échelle des IRIS sélectionnés dans les différentes communes.....	24
<b>Figure 7</b> : Teneurs en HAP totaux des thalles de <i>X. parietina</i> , en µg.kg <sup>-1</sup> MS, moyennées par communes (A ; test de Wilcoxon ; n = 6 ; p < 0,05) et par IRIS (B).....	25
<b>Figure 8</b> : Profil moyen des congénères HAP exprimé en pourcentage et enregistré dans les différentes communes (n = 6).....	26
<b>Figure 9</b> : Cartographie des teneurs totales en HAP à l'échelle des IRIS.....	27
<b>Figure 10</b> : Histogramme de la richesse spécifique lichénique, de l'abondance lichénique, de l'indice de Shannon, l'IPA et de la VDL de chaque station classée par IRIS et communes.....	31
<b>Figure 11</b> : Cartographie de l'Indice de Pureté Atmosphérique (IPA) à l'échelle des IRIS sélectionnés dans les différentes communes.....	32
<b>Figure 12</b> : Prélèvements de sol et fosse pédologique réalisés sur le site MRS (MRS-502).....	34

## Index des Tableaux

<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques des IRIS étudiés.....	8
<b>Tableau 2</b> : Teneurs naturelles en métaux considérées comme le bruit de fond (BDF) lichénique.....	23
<b>Tableau 3</b> : Tableau des valeurs PI obtenus pour les métaux dont le bruit de fond lichénique est connu.....	23
<b>Tableau 4</b> : Liste des espèces de lichens avec leurs fréquences par station, leurs fréquences moyennes ainsi que le nombre de stations où ces espèces ont été retrouvées.....	28
<b>Tableau 5</b> : Paramètres physico-chimiques mesurés dans les horizons de sol du site MRS-502.....	34
<b>Tableau 6</b> : Diagramme de Gantt du projet EVALVIE réparti par trimestre sur 3 ans.....	35

## Introduction

Aujourd'hui, la vulnérabilité des territoires est une notion intégrée à la gestion du risque et notamment face aux risques environnementaux et sanitaires consécutifs à l'intensification des activités anthropiques et l'urbanisation croissante des territoires. C'est pourquoi, les futurs aménagements du territoire et les projets d'urbanisme sont dans l'obligation de respecter les directives imposées par la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (2004), par la loi Grenelle 2 (Loi n°2010-788 du 12/07/2010) et par plusieurs réglementations et législations du Code de l'Environnement. Ainsi, tout projet d'aménagement quelle que soit sa nature, doit considérer et respecter les milieux naturels et la biodiversité s'y trouvant. Cependant, il est parfois difficile d'estimer la vulnérabilité par manque d'indices ou de données permettant d'avoir une gestion appropriée de ces milieux sujets à un aménagement.

Pour répondre à ce manque de connaissance, le projet EVALVIE, porté par l'Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions (IECP) et regroupant un consortium de partenaires universitaires (LPED, LCE, CEREGE, DYNAFOR), a débuté en septembre 2021 pour une durée de trois ans avec le soutien financier de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Ce projet a pour but d'évaluer la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires en prenant en compte l'écologie des milieux, l'état environnemental, l'urbanisation et l'activité anthropique. Ainsi, ce travail permettra d'identifier un gradient de pressions anthropiques et de faire ressortir les zones les plus extrêmes, les plus critiques au regard de leur intérêt patrimonial, urbanistique et environnemental.

EVALVIE propose ainsi de définir une méthodologie pour construire un indice intégratif de vulnérabilité environnementale et sanitaire des milieux reproductible et applicable sur tous types de territoire en combinant les trois principaux enjeux (socio-économiques, environnementaux et écologiques). Il s'agit de construire une base de données des indicateurs multi-enjeux (environnementaux, écologiques, démographiques et socio-économiques) obtenus par l'analyse d'écosystèmes présentant des types de milieux et d'expositions environnementales contrastés. Une attention sera portée sur la prise en compte de la résilience des milieux, notion qui sera intégrée à l'analyse et à l'élaboration de l'indicateur intégratif de vulnérabilité.

La métropole Aix-Marseille-Provence (MAMP) (Fos-sur-Mer et Marseille) et la commune de Saint-Martin-de-Crau ont été choisies comme territoires d'étude pour l'élaboration de l'indice de vulnérabilité du fait de leur contraste paysagé et leurs activités passées et présentes (Atlas des paysages des Bouches-du-Rhône, 2022 ; Corinne Land Cover, 2012). Ces communes présentent autant de paysages naturels, urbains qu'industriels auxquels s'ajoutent d'importants axes routiers et maritimes. Fos-sur-Mer, abritant un complexe industrialo-portuaire, est une zone urbaine sous influence industrielle actuelle (Austruy et al., 2019, 2021 ; Daumalin, 2020), Marseille est une zone urbaine et péri-urbaine influencée par un passé industriel (Daumalin et Laffont-Schwob, 2016) et Saint-Martin-de-Crau est une commune rurale et agricole (Dutoit et al., 2011). Ce travail d'analyse s'effectue à l'échelle des unités de territoires appelées IRIS (Ilots regroupés pour l'information statistique). Ces unités ont été développées par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) dans le but d'avoir une diffusion homogène du recensement national. L'IRIS prend en compte les critères géographiques et démographiques du territoire et considère les communes supérieures à 5000 habitants. Il existe trois types d'IRIS (INSEE, 2016). On retrouve (i) les IRIS d'habitats qui regroupent entre 1800 et 5000 habitants et sont homogènes quant au type d'habitat, (ii) les IRIS d'activités regroupant plus de 1000 salariés et comptant deux fois plus d'emplois salariés que d'habitants et (iii) les IRIS divers correspondant à de grandes zones spécifiques peu habitées. L'étude de ces unités territoriales permettra de mieux visualiser les variations spatiales des résultats obtenus.

De manière générale, le projet EVALVIE permettra d'évaluer, à l'échelle des unités d'IRIS, les trois types d'enjeux : écologique, socio-économique et environnemental afin d'élaborer l'indice de vulnérabilité environnementale et sanitaire.

Au cours de cette première année du projet, le travail s'est, dans un premier temps, concentré sur le repérage et la sélection des sites d'études et sur les demandes d'autorisation d'accès et de prélèvements adressées aux propriétaires publics ou privés des différents sites. Cette partie a été complétée par une présentation du projet auprès des collectivités concernées (Métropole et villes) et du Grand Port Maritime de Marseille (GPMM), propriétaire d'une partie des terrains d'études. Après la validation des sites d'étude, le printemps 2022 a été consacré à l'approche environnementale. L'exposition environnementale a été évaluée dans les compartiments aériens et terrestres à partir de mesures de biosurveillance lichénique et de pollution diffuse des sols. Enfin, un travail a été

mené sur la caractérisation des activités socio-économiques et l'anthropisation des territoires d'études.

## **II. Avancement tâches**

### **II.1. Stratégie de communication (Tâche 1-3)**

La communication autour du projet est assurée par l'Institut Ecocitoyen.

Pour cette première année, celle-ci s'est appuyée d'une part sur une communication vers les collectivités (communes + métropole) à travers une présentation du projet aux différentes mairies et services techniques de chaque commune sous forme de réunion et d'un document de présentation rédigé et mis en forme au début du projet. De même, le document de présentation du projet a été transmis aux services de la Métropole Aix-Marseille-Provence (MAMP).

D'autre part, deux comités de pilotage (20/09/2021 et 19/09/2022), réunissant l'ensemble des partenaires du projet, et un comité de suivi (20/09/2022), composé des partenaires du projet ainsi que d'experts extérieurs et acteurs du territoire, ont été organisés depuis le début du projet. La composition du comité de suivi est la suivante :

- Ensemble des partenaires du projet ;
- Représentants des communes de Fos-sur-Mer, Saint-Martin-de-Crau et Marseille ;
- Représentant de la MAMP ;
- Rémi Durieux – ADEME PACA ;
- Guillaume Boulanger – Santé Publique France (SPF) ;
- Laurent Poumarat – Agence Régionale de Santé (ARS) PACA ;
- Patrick Couturier - DREAL PACA ;
- Représentants d'associations : Association de Défense et de Protection du Littoral du Golfe de Fos (ADPLGF) et Comité Santé Littoral Sud (CSLS).

Par ailleurs, plusieurs réunions informelles entre quelques partenaires ont été organisées pour échanger sur l'organisation des campagnes de terrain, la sélection des sites d'études ou sur l'implication de chaque partenaire dans les différentes tâches du projet. Enfin, plusieurs partenaires ont participé à des réunions organisées dans le cadre du projet OMISEP porté par l'INERIS et notamment relatives au choix des sites d'étude pour leur projet. De même,

une réunion a été effectuée pour échanger sur la mise en œuvre conjointe des enquêtes sociologiques relatives aux projets OMISEP et EVALVIE.

## II.2. Sélection des sites d'études (Tâche 1-2)

Trois communes du département des Bouches-du-Rhône ont été sélectionnées présentant des environnements et des activités anthropiques bien distinctes. Afin d'élaborer une méthode pour définir un indice de vulnérabilité environnementale et sanitaire du territoire, Saint-Martin-de-Crau (SMC), Fos-sur-Mer (FOS) et Marseille (MRS) ont été choisies (Figure 1).

Tableau 1. Caractéristiques des IRIS étudiés. Le code employé est obtenu par l'abréviation du nom des communes et du numéro des IRIS sélectionnés.

Code	N° IRIS	NOM IRIS	Villes	Types	Surface (km <sup>2</sup> )	Nombre de sites
<b>FOS-104</b>	104	Brûle Tabac-Roques-Gajelon	Fos-sur-Mer	Industriel	17,7	3 (CAB, GOU, TON)
<b>FOS-101</b>	101	Mazet nord-Pont du Roi-Salins	Fos-sur-Mer	Urbain-industriel	15,0	3 (ENG, FOA, FOM)
<b>MRS-101</b>	101	Château Bovis	Marseille	Urbain	1,1	2 (MN1, MN2)
<b>MRS-502</b>	502	Fontobscure	Marseille	Urbain	0,5	1 (MRS)
<b>MRS-303</b>	303	Campagne Pastré	Marseille	Urbain	2,3	2 (MS1, MS2)
<b>MRS-301</b>	301	La Verrerie	Marseille	Urbain	0,7	1 (MS3)
<b>SMC-102</b>	102	La Crau	St-Martin-de-Crau	Agricole	146,1	3 (ENT, SMO, TNT)
<b>SMC-103</b>	103	Caphan	St-Martin-de-Crau	Urbain-agricole	2,4	2 (CPH, SMN)
<b>SMC-105</b>	105	Le Lac	St-Martin-de-Crau	Urbain	0,6	1 (SME)

Source : Géoportail, INSEE

Le plan d'échantillonnage a été défini à partir des unités d'IRIS sélectionnées (Tableau 1, Figure 1). La sélection de ces IRIS a notamment été guidée par le type d'habitat afin d'avoir une diversité d'habitats suffisante pour développer l'indice de vulnérabilité et représentative des différents milieux rencontrés dans les Bouches-du-Rhône. Au sein des IRIS, le nombre et le choix des sites d'études ont été définis à partir de la superficie de chaque IRIS et de leur variabilité spatiale (Tableau 1). Chaque IRIS est caractérisé par son type d'environnement (agricole, urbain ou industriel). En fonction de la surface de ces IRIS, les points de prélèvement sont placés de la manière suivante :

- ➔ un point de prélèvement lorsque la surface de l'IRIS est inférieure à 1 km<sup>2</sup> ;
- ➔ deux points de prélèvement lorsque la surface est comprise entre 1 et 5 km<sup>2</sup> ;
- ➔ trois points de prélèvement lorsque la surface de l'IRIS est supérieure à 5 km<sup>2</sup>.

Le repérage des sites d'étude a été effectué en septembre 2021 avant la réalisation du premier Comité de pilotage du projet organisé le 20/09/21 en présence de l'ensemble des partenaires et de Rémi Durieux, représentant l'ADEME.

La localisation de chaque site au sein des IRIS est précisée dans la cartographie présentée en Figure 1. Au total, 18 sites répartis sur 9 IRIS ont été sélectionnés (Tableau 1 et Figure 1), soit :

- 2 IRIS et 6 sites sur la commune de Fos-sur-Mer ;
- 3 IRIS et 6 sites sur la commune de St-Martin-de-Crau ;
- 4 IRIS et 6 sites sur la commune de Marseille.

Pour l'accès aux sites, des demandes écrites d'autorisation et de prélèvements ont été effectuées auprès des propriétaires privés et publics. Ces demandes ont été complétées pour certains sites, notamment ceux de Fos-sur-Mer, par une Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DT-DICT) transmise aux propriétaires et services concernés. A ce jour, nous sommes toujours dans l'attente d'autorisation d'accès sur un site situé dans l'IRIS Verrerie au sud de Marseille, plusieurs demandes ont été envoyées à différents propriétaires pour des parcelles situées dans un même secteur (Figure 1C, site MS3<sub>1-4</sub>).

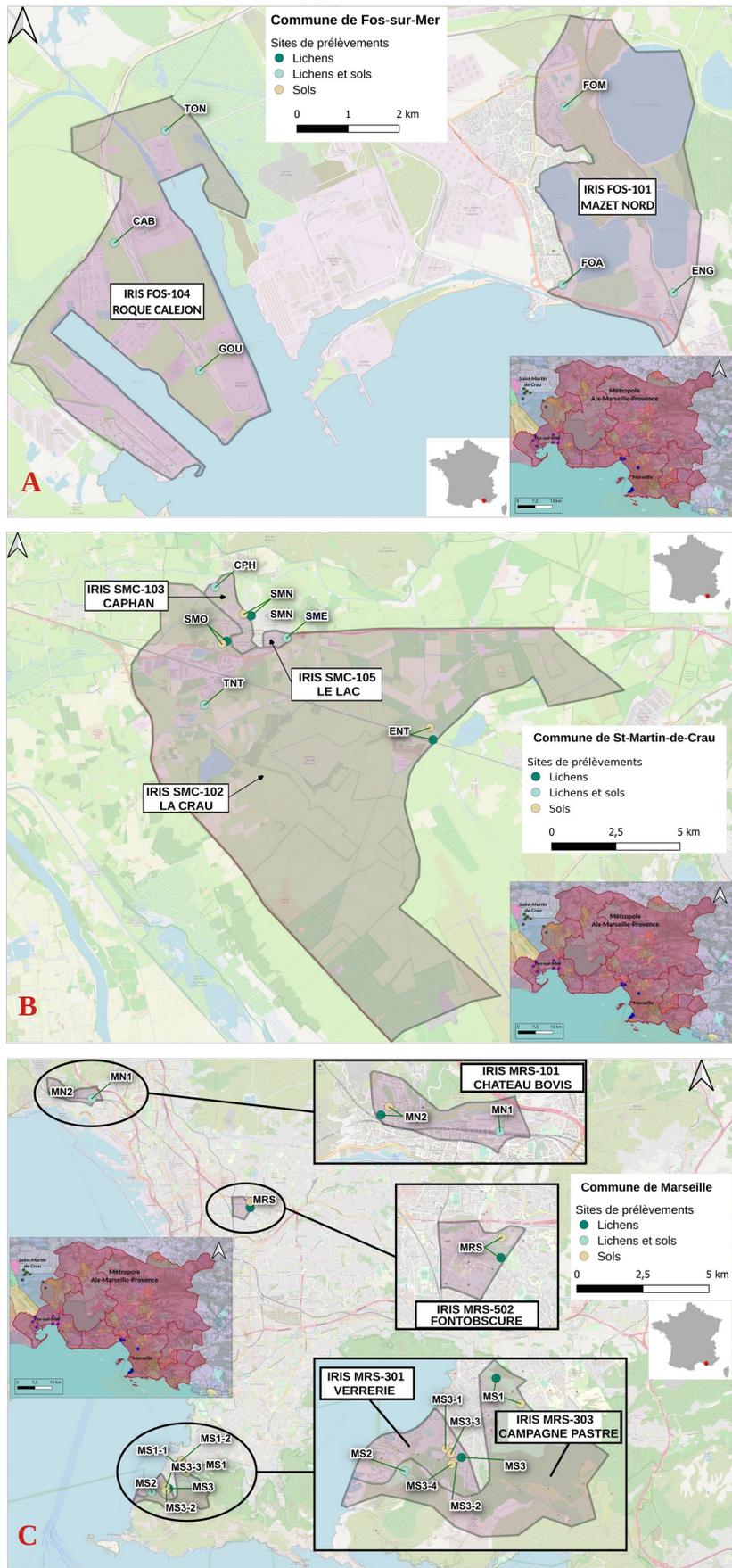


Figure 1. Cartographie des IRIS sélectionnés et des sites de prélèvement répartis sur les villes de Fos-sur-Mer (A), Saint-Martin-de-Crau (B) et Marseille (C)

### **II.3. Anthropisation des territoires (Tâche 3)**

Une base de données (BDD) regroupant l'ensemble des activités anthropiques des IRIS sélectionnés pour le projet est en cours de réalisation. Ce travail a été initié au cours du stage M2 réalisé à l'Institut Ecocitoyen (Caroline Dalquier – Master 2 BEE – Aix-Marseille Université) dans le cadre du projet EVALVIE. Il se base sur une analyse diachronique et prend en compte des données issues de BDD existantes telles que l'Inventaire Historique des Sites Industriels et Activités de Service (BASIAS), du Système Information Sol (SIS), de BASOL et du Registre des Emissions Polluantes (IREP), complété par un accès aux archives municipales, pour les informations non numérisées, et aux plans cadastraux de chaque ville pour notamment vérifier les données de géolocalisation. Les paramètres sélectionnés pour renseigner les activités émettrices de chaque IRIS au cours du temps sont les suivants : (i) le type d'activité, (ii) les dates de début et de fin d'activité, (iii) la situation actuelle du site (en activité, à l'arrêt ou en reconversion), (iv) les informations relatives à sa géolocalisation (coordonnées GPS ; données cadastrales) et son emprise au sol (prenant en compte la superficie totale des parcelles cadastrales occupées par le site) (v) et les polluants potentiellement émis et les matrices impactées (air, sol, eau). Concernant les activités agricoles, les mêmes types d'informations seront répertoriés (type d'activité, période, surface, parcelle cadastrale et géolocalisation) à partir des données publiées par la Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF-PACA). Cet aspect sera complété par les données acquises par l'INERIS dans le cadre de la Banque Nationale des Ventes de produits phytopharmaceutiques par les Distributeurs agréés (BNV-d) pour lesquelles une méthode de spatialisation a été développée (<https://aires-captages.fr/outils-methodes-dispositifs/m%C3%A9thode-de-spatialisation-de-la-bnv-d>).

Cette BDD est inspirée du travail de D'Amato (2020) lors de son stage M2 effectué en 2020 sous la responsabilité de plusieurs partenaires du projet (LPED, LCE, IECF). Elle a permis de décrire le passif industriel (1800 à 2000) des principales zones industrielles de la Métropole Aix-Marseille-Provence.

Plusieurs zones préservées, comme des réserves naturelles nationales (Coussouls de Crau), parc régional (Camargue) ou national (Parc National des Calanques), zones Natura 2000, terrains appartenant au Conservatoire du Littoral ou encore des sites classés, attestent de la présence de milieux remarquables (zones humides, pelouses steppiques, garrigues, etc.)

ainsi qu'une importante diversité en faune et flore dont de nombreuses espèces sont protégées.

Également, des zones de fortes activités industrielles, portuaires et urbaines (notamment pour FOS et MRS) sont présentes sur le territoire. En effet, historiquement, le sud de MRS (Calanques) a accueilli des usines de production de soude, soufre, acide sulfurique et acide tartrique (Montredon à Callelongue) ainsi que des usines de traitement du plomb argentifère (Montredon, Les Goudes et Escalette) et des fours à chaux (Saména) au début du XIX<sup>ème</sup> jusqu'au début XXI<sup>ème</sup> siècle (Daumalin et Laffont-Schwob, 2016 ; Heckenroth et al., 2017). Au nord de MRS, l'activité industrielle passée était orientée sur la métallurgie et comptait de nombreux établissements de tuilerie/briqueterie. De plus, le littoral présente plusieurs infrastructures de réparation navale, croisière/passagers, stockage de conteneurs ou stockage de marchandises solides et liquides.

La commune de FOS est caractérisée par une forte activité industrielle et urbaine. En effet, le Grand port maritime de Marseille-Fos (GPM) est la plus grande zone industrialo-portuaire d'Europe du Sud. Il regroupe le golfe de Fos (ZIP de Fos) à l'ouest, industrialisé à partir de 1966, et le bassin est avec la zone portuaire de Marseille. La ZIP de Fos regroupe des usines chimiques, pétrochimiques, gazières et sidérurgiques ainsi que des espaces de stockage, de traitements de déchets et des terminaux portuaires accueillant de grands navires transporteurs. Dans ces sites industriels, près de 12 sites sont jugés à « seuil élevé » SEVESO. Quant à la commune de SMC, la principale activité anthropique est l'agriculture et en particulier l'élevage ovin (Dutoit et al., 2011). La majorité des parcelles est utilisée pour le pâturage comme prairies (permanente et temporaire), estives ou présente des landes. En moindre proportions, on retrouve des parcelles de production de céréales, d'olives ou de fruits à coque, ainsi que des vergers et du maraîchage.

#### **II.4. Protocole de biosurveillance lichénique (Tâche 5-2 et 5-3)**

L'IECP a développé et mis en œuvre la biosurveillance lichénique sur près de 25 stations réparties sur le pourtour de l'Etang de Berre et le Golfe de Fos depuis 2012. Ce travail a permis de mettre en évidence des contrastes marqués en termes de bioaccumulation comme de biodiversité lichénique, selon la localisation géographique des sites d'étude (Dron et al., 2016 ; Ratier et al., 2018).

La biosurveillance lichénique développée dans le cadre du projet EVALVIE considère les mesures de bioaccumulation lichénique pour les familles de polluants HAP, métaux et pesticides ainsi que des relevés de bioindication lichénique. Ce travail est réalisé sur les 18 sites répartis sur les différents IRIS sélectionnés pour le projet (Figure 2). Lors de cette première année du projet EVALVIE, alors que les 18 sites ont été prélevés en octobre 2021 pour les mesures de bioaccumulation lichénique, les relevés de biodiversité lichénique ont pu être menés sur 12 sites au cours du printemps 2022, les 6 autres sites seront effectués au printemps 2023.

#### *II.4.1. Méthode de relevé de bioindication lichénique (Tâche 5-3)*

Un relevé de diversité lichénique consiste à réaliser un inventaire de la flore lichénique, c'est-à-dire à déterminer les différentes espèces présentes et leurs fréquences d'apparition. Les données d'abondance et de diversité lichénique acquises au cours de ces relevés permettent de calculer différents indices renseignant sur la qualité de l'air correspondante. Il s'agit d'une méthode de biosurveillance atmosphérique, aujourd'hui reconnue pour l'évaluation de la qualité de l'air en Europe (Directive 2008/50/EC10), qui informe sur la santé environnementale d'un milieu donné et renseigne sur la qualité de l'air. Elle met en œuvre des organismes indicateurs, dans le cas présent le lichen, pour mesurer l'effet des polluants atmosphériques sur l'environnement.

En effet, le lichen, résultant d'une association symbiotique entre une algue et un champignon, est un bioindicateur atmosphérique reconnu et pertinent de par ses spécificités biologiques (grande longévité, organisme ubiquiste, absence de racines, se nourrissant exclusivement des nutriments de l'air et sensible aux polluants atmosphériques). La capacité de tolérance des lichens à la pollution de l'air est fonction de l'espèce considérée. Celle-ci est souvent décrite en fonction des types de lichens, les lichens dits crustacés sont considérés comme les plus tolérants, les lichens fruticuleux sont généralement les plus sensibles.

Le relevé lichénique est réalisé selon un protocole d'échantillonnage défini par la norme européenne EN 16413. Il s'effectue sur 10 arbres, exclusivement des feuillus, en diversifiant les espèces d'arbres (phorophytes) afin d'améliorer la représentativité de la diversité lichénique. Le plan d'échantillonnage est fonction de la superficie de la placette et de la distribution des arbres à l'intérieur de celle-ci. Les arbres choisis doivent avoir une circonférence du tronc supérieur à 50 cm et une inclinaison maximale de 20 °. Le relevé est

effectué sur les quatre faces de chaque arbre à l'aide d'une grille d'observations composée de cinq mailles de 10 x 10 cm superposées verticalement (Figure 2).

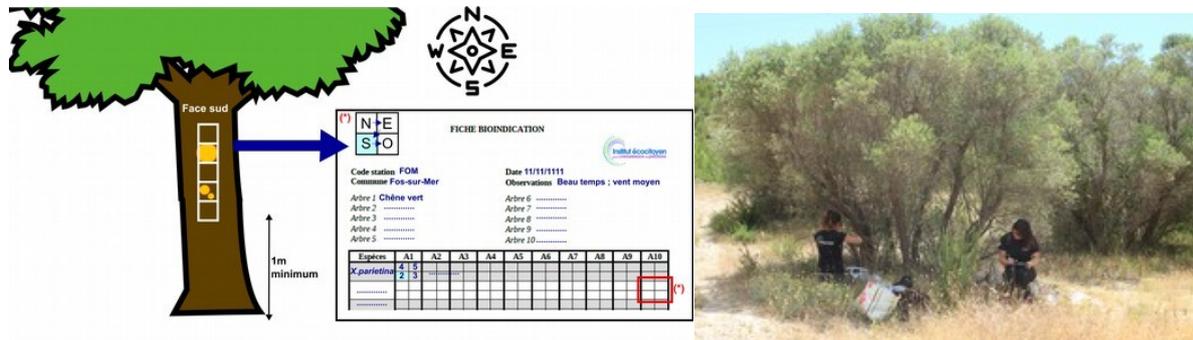


Figure 2. Méthode de relevé de bioindication sur le terrain (© IECP)

Les espèces lichéniques ne pouvant pas être identifiées avec certitude sur le terrain sont récoltées au couteau et conservées dans un sac en plastique. Une vérification est réalisée en laboratoire par des observations à la loupe binoculaire, voire au microscope pour caractériser les structures reproductrices. Des guides de détermination de référence (Van Haluwyn et al., 2009 ; Dobson, 2011 ; Tiévant, 2011) sont utilisés avec des clés de détermination se basant sur des critères morphologiques. Pour compléter la détermination, des tests chimiques sont utilisés pour provoquer des réactions colorées selon les composés présents dans les lichens.

Le traitement des données de diversité et d'abondance lichénique est réalisé par le calcul d'indices de pollution et notamment l'Indice de Pureté Atmosphérique (IPA) et la Valeur de Diversité Lichénique (VDL). L'IPA se calcule à partir du nombre, de la fréquence et de la valeur écologique des espèces rencontrées dans une station et renseigne sur le niveau de pollution de l'air, de très faible (IPA > 100) à très élevé (IPA < 20) (Eq.1). La VDL est basée sur la somme des fréquences des espèces lichéniques rencontrées sur une placette et illustre plus spécifiquement l'abondance lichénique de chaque station (Eq.2).

$$IPA = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (Q_i * F_i) \quad \text{Eq.1}$$

$$VDL = \frac{1}{10} * \sum_{i=1}^{10} f_i \quad \text{Eq.2}$$

Où  $i$  : espèce lichénique ;  $n$  : nombre total d'espèce dans une station ;  $Q_i$  : indice écologique de l'espèce  $i$  déterminé empiriquement à partir du nombre d'espèces accompagnantes sur

tous les sites étudiés divisé par le nombre total de sites ;  $F_i$  : coefficient de recouvrement de l'espèce  $i$  défini à partir des fréquences d'apparition ( $f_i$ ).  $f_i$  : fréquence d'apparition de l'espèce  $i$  correspondant au nombre de mailles sur chaque face des 10 arbres échantillonnés où l'espèce est rencontrée.

#### II.4.2. Protocole de bioaccumulation lichénique (Tâche 5-2)

Le choix de l'espèce s'est porté sur *Xanthoria parietina*. C'est une espèce très répandue en région méditerranéenne qui possède un thalle foliacé étendu jaune-orange vif facilement reconnaissable (Figure 3). Tolérante à la pollution azotée, elle est héliophile, nitrophile et peut être à la fois corticole et saxicole (Dobson, 2011 ; Tiévant, 2011). L'ensemble de ces caractères fait de *X. parietina* l'une des espèces de lichens les plus étudiées pour les mesures de bioaccumulation des polluants atmosphériques (Van Haluwyn et al., 2009 ; Augusto et al., 2013 ; Ratier et al., 2018). Dans ce projet, des mesures de bioaccumulation des teneurs en métaux et en Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été réalisées par le Laboratoire Chimie de l'Environnement (LCE). Pour l'analyse des pesticides dans les échantillons de lichens, un développement analytique est en cours toujours au LCE.



Figure 3. Photographie de *X. parietina* sur l'écorce d'un chêne vert (*Quercus ilex* L., 1753) sur le site de prélèvement FOM (parc du Mazet Nord, Fos-sur-Mer, 15/03/2022) (© Caroline Dalquier, 2022)

À chaque station, les thalles de *X. parietina* ont été récoltés sur des troncs d'arbres feuillus des différentes essences rencontrées sur la placette. Les prélèvements ont été effectués à un mètre de haut minimum afin d'éviter les interférences des poussières émanant du sol sur les teneurs en polluants (Ratier et al. 2018). L'échantillonnage des quatre faces des troncs

permettront d'avoir une meilleure représentativité de la qualité de l'air globale des sites étudiés. Les lichens ont été prélevés à l'aide d'un couteau en céramique et de gants de protection en nitrile évitant toutes altérations potentielles des échantillons. Entre chaque utilisation, le couteau était lavé à l'eau ultra pure. Les échantillons, de 10 à 20 g, ont été acheminés au laboratoire de préparation de l'IECP dans des flacons étiquetés en polyéthylène haute densité (HDPE) où ils ont été conservés au réfrigérateur à 4 °C dès leur arrivée dans l'attente de leur pré-traitement (maximum 24 h après leur prélèvement).

En laboratoire, les échantillons de lichens ont été triés avec du matériel non métallique lavé à l'eau ultra pure (pince en plastique ESD et couteau en céramique). Les poussières, débris végétaux, espèces de lichens non souhaitées et morceaux d'écorce des échantillons ont été retirés. Pour chaque site, les échantillons, triés à l'état frais, ont été pesés puis congelés à -30 °C pendant 24 h, ensuite ils ont été lyophilisés à -55 °C sous 0,035 mbar jusqu'à une perte de poids inférieure à 5 % en 24 h. La lyophilisation a été choisie de préférence par rapport au séchage en étuve car il y avait moins de risque de perte de composés organiques volatils (HAP et pesticides). Les échantillons ainsi triés et lyophilisés ont été broyés à l'aide d'un broyeur à billes (capsules et billes en zirconium) pendant 1min30 à une fréquence de 25 Hz (Retsch MM400). Les capsules et les billes ont été lavées entre chaque échantillon avec un protocole de nettoyage précis. Les échantillons broyés et lyophilisés ont été conservés dans des flacons (PPCO - 8 à 15 mL), étiquetés et placés dans un congélateur à -30 °C dans l'attente de la réalisation des analyses chimiques.

## **II.5. Protocole de prélèvements et caractérisation des sols (Tâche 5-1)**

La caractérisation des sols et de la pollution diffuse a été évaluée selon une méthode d'échantillonnage adaptée de celle définie dans le cadre du RMQS2 (Jolivet et al., 2018).

Elle repose sur la délimitation d'une placette de 20 m de côté dans laquelle huit prélèvements aléatoires de sol sont réalisés à la tarière manuelle dans l'horizon de surface et l'horizon inférieur pour la réalisation d'un échantillon composite par horizon. Au préalable, des mesures de terrain ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre portable de fluorescence X (Brucker S2 IV) pour s'assurer de l'homogénéité des teneurs en métaux sur l'ensemble de la parcelle. En amont des prélèvements de sol, un carottage de sol à l'aide d'un carotteur mécanique (Marteau à moteur essence Cobra TT équipé de gouges à percussion et de gouges fermées) est réalisé pour la description des horizons de sol. Sur les

terrains difficiles d'accès présentant des sols peu profonds, une fosse pédologique a été privilégiée. La détermination des teneurs en métaux dans ces deux horizons permettra d'évaluer un facteur d'enrichissement anthropique pour chaque métal. Les analyses des HAP et pesticides seront réalisées seulement dans l'horizon de surface.

Six sites du projet EVALVIE ont été investigués au printemps 2022 (site FOM à Fos-sur-Mer et tous les sites de Marseille sauf MS3).

Le pré-traitement des échantillons de sol a consisté en une lyophilisation jusqu'à une perte de masse inférieure à 5 % (-55 °C / 0,035 mbar, Christ-Alpha 1-4LD), un tamisage à 2 mm et à un broyage d'une partie de l'échantillon en particules fines.

Dans un premier temps, les analyses de sol, réalisées sur la fraction inférieure à 2 mm, ont porté sur les principaux paramètres physico-chimiques (pH, granulométrie, %CaCO<sub>3</sub>, matière organique, phosphore assimilable, azote total, C/N et salinité), jouant un rôle dans la spéciation et la forme chimique des polluants du sol. Les analyses sont en cours de réalisation et une partie a été externalisée (LDAR Aisne, en l'absence de possibilité au LAS INRAE pour cause de déménagement).

Par ailleurs, les analyses dans les échantillons de sol seront effectuées au CEREGE pour les métaux, avec l'engagement d'un stagiaire M2, et au LCE pour les HAP (16 congénères de la liste prioritaire de l'US-EPA, externalisées au Laboratoire d'Analyses Chimiques de la Faculté de Pharmacie de la Timone) et pesticides (liste en Annexe 1) au cours de l'automne-hiver 2022-23.

## **II.6. Analyses chimiques (Tâche 5-4)**

### *II.6.1. Détermination des teneurs en métaux dans les échantillons de lichens*

Les teneurs en métaux dans les lichens ont été dosées après minéralisation des échantillons et à partir de techniques de spectrométrie de masse (ICP-MS). Ces analyses ont été effectuées au LCE de Aix-Marseille-Université.

La minéralisation des échantillons (0,3 à 0,5 g) par digestion acide a été réalisée avec 6,5 mL de HNO<sub>3</sub> concentré (69 %) et 3 mL de HCl concentré (37 %). Chaque préparation, introduite dans des réacteurs en téflon, a été minéralisée au four micro-onde. Les préparations ont ensuite été diluées et filtrées à l'aide de filtres seringues de maille de 0,45 µm en acétate de cellulose. 15 mL de chaque échantillon ont été conservés dans l'attente des analyses par ICP-MS. Celles-ci ont été effectuées au cours de l'hiver 2022 au Laboratoire LCE. Pour chaque

session de minéralisation et d'analyse ICP-MS, des standards (REF-MET Lichen et STDCRM Ray Grass), qui ont suivis au préalable le protocole de pré-traitement, et des blancs ont été utilisés.

#### *II.6.2. Détermination des teneurs en HAPs dans les échantillons de lichens*

L'analyse des HAP s'est concentrée sur les 16 congénères de la liste prioritaire de la US Environmental Protection Agency (US-EPA) en raison de leur potentielle toxicité. Il s'agit du naphthalène (Nap), acénaphthylène (Acy), acénaphtène (Ace), fluorène (Flu), phénanthrène (Phe), anthracène (Ant), fluoranthène (FIA), pyrène (Pyr), benzo(a)anthracène (BaA), chrysène (Chr), benzo(b)fluoranthène (BbF), benzo(k)fluoranthène (BkF), benzo(a)pyrène (BaP), benzo(ghi)pérylène (Bpe), dibenzo(ah)anthracène (DBA) et indéno(1,2,3-cd)pyrène (Ipy). Ces 16 HAP sont les plus fréquemment recherchés et analysés dans les études de risque pour l'environnement (Rollin et al., 2005 ; Girard et al., 2011).

Ces analyses ont été externalisées par le LCE au Laboratoire d'Analyses Chimiques de la Faculté de Pharmacie de la Timone à Marseille. La méthode employée pour ces analyses est basée sur celle décrite par Sarrazin et al. (2006).

Les échantillons broyés et lyophilisés de 0,5 g ont été extraits à l'acétone au sein d'une cuve à ultrasons. De l'eau ultra pure a été ajoutée afin d'obtenir un mélange acétone/eau à 40 % en termes de volume. Ces extraits ont été purifiés à l'aide d'une cartouche C-18 d'un gramme. Les HAP ont ensuite été élués par de l'acétone et du méthanol.

Les extraits ainsi purifiés sont analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse (GC/MS - Shimazu GC-MS-QP 2010S). Les analyses ont été réalisées avec le mode SIM, c'est-à-dire que les ions spécifiques de chaque composé ont été utilisés pour les quantifier. L'étalonnage de l'appareil a été réalisé pour chacun des 16 composés à l'aide d'une solution dite "mix" standard à 200 µg/mL, diluée à différentes concentrations avec de l'hexane. Les étalons et les blancs étaient régulièrement analysés, ainsi que l'analyse d'échantillons de référence (mollusque marin, IAEA-451) et d'ajouts dosés, afin de s'assurer de la qualité et de la robustesse des résultats obtenus. Chaque échantillon a été analysé plusieurs fois dans le but de réduire l'incertitude autour de la mesure des composés ciblés. Enfin l'identification, l'intégration des pics de chromatographie et la détermination des concentrations des échantillons ont été calculées suivant la courbe d'étalonnage.

### II.6.3. Développement analytique pour l'analyse des pesticides

Les analyses des pesticides sur les échantillons de sols et lichens sont effectuées par le LCE qui a développé une méthode d'analyse des pesticides dans les particules atmosphériques (Désert et al., 2018). Elle est constituée de trois étapes : (i) l'extraction avec des solvants organiques dans un extracteur ASE, (ii) la concentration des échantillons par évaporation du solvant sous flux d'azote et (iii) l'analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem (GC-MS/MS). Cette méthode permet de mesurer des concentrations de l'ordre de  $1 \text{ ng.m}^{-3}$  pour 59 molécules couramment utilisées en agriculture et en usage domestique (Annexe 1). Les molécules analysées sont des herbicides (25), des fongicides (19) et des insecticides (15) choisis en croisant les données de toxicité des molécules, les quantités utilisées en région Sud-PACA (tonnage des ventes) et la probabilité de les trouver dans l'atmosphère (solubilité et pression de vapeur saturante). A partir de cette méthode d'analyse éprouvée pour des échantillons atmosphériques, des développements sont en cours afin de l'adapter aux échantillons de lichens et de sols. Alors que pour les sols la méthode développée pour les particules atmosphériques semble être adaptée, pour les lichens, la méthode d'extraction et de purification a été ré-évaluée et s'est appuyée sur les techniques récemment développées par les partenaires du projet (LCE et IECP) pour l'analyse des monosaccharides anhydres dans cette matrice (Dauphin et al., 2020).

## II.7. Premiers résultats (Tâche 5)

Les résultats et données récoltées sont en cours de traitement. Cette partie présente essentiellement des résultats présentés dans les rapports de stage M2 de Caroline Dalquier, en stage à l'Institut Ecocitoyen dans le cadre du projet EVALVIE, et celui de Wassim Menni, en stage M2 au CEREGE (financé par ITEM), qui a participé aux prélèvements de sols réalisés sur 6 sites du projet EVALVIE.

### II.7.1. Bioaccumulation lichénique

#### Concentrations en métaux

Les teneurs en éléments majeurs et traces relevées dans les thalles de *X. parietina* prélevés sur les communes FOS, MRS et SMC sont présentées dans la Figure 4.

Pour les éléments majeurs, les concentrations en Fe relevées sur les sites de FOS sont significativement supérieures à celles enregistrées sur MRS et SMC ( $n = 6, p = 0,006$ ). La même tendance est observée pour Al et Ca sans différence significative.

Pour les éléments traces, les teneurs relevées sur les sites de FOS sont significativement supérieures à celles relevées à SMC et MRS excepté pour Cu, Ni et Sb mais aussi As et Zn à MRS. Pour de nombreux éléments, les concentrations mesurées à MRS sont supérieures à celles relevées à SMC exceptées pour Al, Fe, Cr, Mn, Mo, Ti et V et des différences significatives sont relevées entre ces deux communes pour Mn et Pb ( $n = 6, p < 0,05$ ).

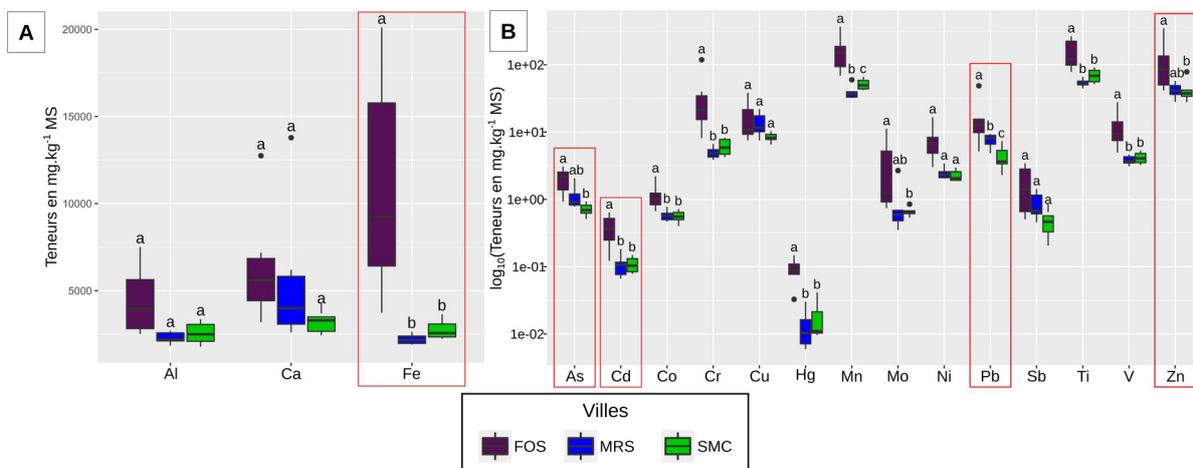


Figure 4. Teneurs en  $\text{mg.kg}^{-1}$  MS des éléments majeurs (A) et traces (B) relevées dans les thalles de *X. parietina* (test de Wilcoxon ;  $n=6$  ;  $p < 0,05$ ). Chaque teneur est représentée par un boxplot montrant la médiane, les 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles, les valeurs minimales et maximales

Une représentation à l'échelle de l'IRIS (Figure 5) a été réalisée pour les éléments encadrés en rouge dans la Figure 4. Ces éléments ont été sélectionnés pour leur importance dans les émissions anthropiques et leurs fortes variations observées entre les sites. Différents environnements ont été définis pour chaque IRIS en fonction de l'activité anthropique de ces territoires.

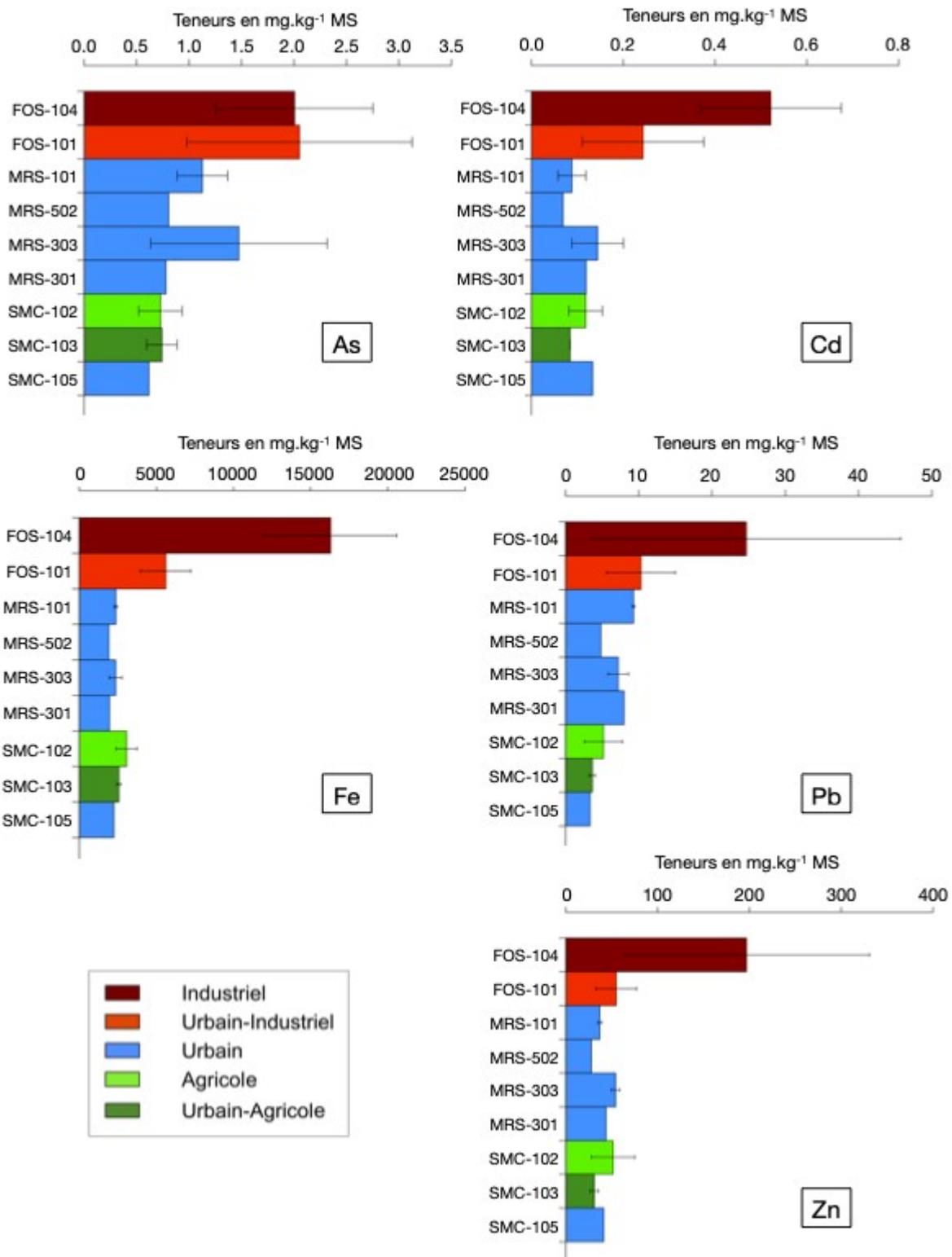


Figure 5. Teneurs moyennes de As, Cd, Fe, Pb et Zn relevées dans les thalles de *X. parietina*, en mg.kg<sup>-1</sup> MS et définies par IRIS des communes étudiées. La couleur des histogrammes est fonction du type d'habitat décrit sur l'IRIS (n=3 pour SMC-102, FOS-104 et FOS-101 ; n = 2 pour SMC-103, MRS-303 et MRS-101 ; n = 1 pour SMC-105, MRS-301 et MRS-502).

À FOS, deux IRIS ont été étudiés, un IRIS industriel dans la ZIP de Fos-sur-Mer (FOS-104) et un dans le cœur de commune considérée comme urbain-industriel par sa proximité avec la zone industrielle (FOS-101). D'importantes différences sont observées pour Cd, Fe, Pb ou Zn entre les deux IRIS, avec des teneurs plus élevées dans la zone industrielle. Au contraire, les teneurs moyennes en As sont homogènes entre FOS-104 et FOS-101 (2,0 et 2,1 mg.kg<sup>-1</sup>) mais largement supérieures à celles relevées dans les IRIS de SMC et dans une moindre mesure dans ceux de MRS (en moyenne respectivement 0,69 et 0,92 mg.kg<sup>-1</sup>). Il est à noter que pour Cd, Fe, Zn et dans une moindre mesure Pb, des teneurs largement plus élevées ont été relevées sur FOS-104, de contexte industriel, par rapport aux autres IRIS étudiés.

À MRS, quatre IRIS sous contexte urbain ont été sélectionnés, un IRIS situé dans le 16<sup>ème</sup> arrondissement (MRS-101) ainsi que deux IRIS dans le 8<sup>ème</sup> arrondissement (MRS-301 et MRS-303) présentent un lourd passé industriel, MRS-502 est situé dans une zone fortement urbanisée. Pour As, Cd et Zn, MRS-101 présente les plus fortes teneurs (respectivement 1,42, 0,15 et 50,65 mg.kg<sup>-1</sup>) et d'importantes variations intra-sites sont observées pour As. Pour ces éléments, la distribution des teneurs est homogène sur MRS-502, MRS-303 et MRS-301 (respectivement pour As 0,88, 1,06 et 0,96 mg.kg<sup>-1</sup> ; pour Cd 0,10, 0,07 et 0,11 mg.kg<sup>-1</sup> et pour Zn 51,0, 31,7 et 38,7 mg.kg<sup>-1</sup>). Pour Fe et Pb, la distribution des teneurs est relativement homogène pour l'ensemble des IRIS, une variation intra-site est relevée sur MRS-303 pour Pb. À noter, des teneurs plus élevées pour ces deux éléments ont été relevées sur MRS-301, qui inclue une importante friche industrielle non réhabilitée.

Enfin, SMC comporte des IRIS ayant des habitats de types agricole (102), urbain-agricole (103) et urbain (105). Les teneurs moyennes en As sont distribuées de manière homogène entre les différents IRIS (respectivement 0,73, 0,74 et 0,62 mg.kg<sup>-1</sup> pour SMC-102, SMC-103 et SMC-105) et présentent des variations intra-sites modérées. Pour Cd, les teneurs relevées sont proches de celles enregistrées sur MRS, SMC-102 et SMC-105 présentant les plus importantes teneurs moyennes (0,12 et 0,13 mg.kg<sup>-1</sup>) alors que SMC-103 présente une teneur moyenne de 0,08 mg.kg<sup>-1</sup>. Pour Fe et Zn, les teneurs relevées dans les IRIS de SMC sont relativement homogènes et comparables aux niveaux mesurés à MRS. Les teneurs en Pb mesurées dans les IRIS de SMC sont les plus faibles enregistrées sur l'ensemble des sites d'étude avec des teneurs comparables entre les différents IRIS.

A partir des teneurs en métaux mesurées dans les lichens, un indicateur permettant de décrire l'exposition atmosphérique des territoires d'étude en métaux a été défini. La

méthode s'est basée sur la création d'un indice de pollution intégré (IPI), inspirés des travaux de Wu et al. (2014) et Liu et al. (2016) sur les sols, adaptés aux mesures de bioaccumulation lichénique. L'IPI (Eq.3) s'obtient par la somme des indices de pollution (PI) de chaque métal, le tout divisé par le nombre total de métaux considérés. PI (Eq.4) est le résultat du rapport entre les teneurs mesurées dans les thalles de *X. parietina* prélevés dans nos différents sites et les teneurs dites naturelles relevées dans les thalles de *X. parietina* et décrits dans les travaux de Agnan et al. (2015), considéré comme le bruit de fond lichénique (Tableau 2).

$$IPI = \frac{\sum_{i=1}^n Pi}{n} \quad \text{Eq.3}$$

avec  $PI = \frac{[lichen]_{ech}}{[lichen]_{fond}}$  Eq.4

Où n : nombre total de métaux ; PI : Indice de pollution de chaque métal ; [lichens]<sub>ech</sub> : teneur du métal (i) dans les thalles de *X. parietina* ; [lichen]<sub>fond</sub> : bruit de fond lichénique mesuré chez *X. parietina* pour le métal (i)

Tableau 2. Teneurs naturelles en métaux considérées comme le bruit de fond (BDF) lichénique (Agnan et al., 2015).

Éléments	BDF lichénique (mg.kg <sup>-1</sup> )	Éléments	BDF lichénique (mg.kg <sup>-1</sup> )
Al	2320,0	Mn	66,0
As	0,85	Ni	3,18
Cd	0,25	Pb	5,99
Co	0,62	Sb	0,29
Cr	4,23	Ti	130,0
Cu	9,91	V	3,94
Fe	1330,0	Zn	44,8

Les valeurs PI fluctuent entre 0 (aucun enrichissement) et plus de 14 (enrichissement extrême ; Tableau 3). Sur l'ensemble des IRIS, ce sont FOS-104 et FOS-101 qui montrent les PI les plus élevés pour tous les métaux, sauf pour Cu où l'IRIS MRS-101 comporte un PI plus élevé (2,1) que FOS-101 (1,0) mais pour autant inférieur à celui de FOS-104 (2,5). Même cas de figure pour Sb où MRS-301 a un PI supérieur (4,7) à celui de FOS-101 (4,2) mais reste

inférieur également à celui FOS-104 (8,1). Il est à noter que FOS-101 et SMC-102 ont le même PI pour Zn (1,2). L'ensemble de ces PI permet de définir un IPI pour chaque IRIS reflétant l'exposition atmosphérique en métaux. Cet indice peut être défini comme un descripteur environnemental. Une première cartographie de l'IPI à l'échelle de l'IRIS a été réalisée pour visualiser l'exposition des territoires aux polluants métalliques (Figure 6). Les IPI mettent en évidence une exposition atmosphérique en métaux élevée sur FOS-104 (IPI=4,8), marquée sur FOS-101 (IPI=2,0) alors que de faibles expositions sont enregistrées pour les IRIS de MRS et SMC (IPI < 2).

Tableau 3. Tableau des valeurs PI obtenues pour les métaux dont le bruit de fond lichénique est connu (Agnan et al., 2015)

IRIS	PI													
	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Ti	V	Zn
<b>FOS-104</b>	2,1	2,4	2,1	2,3	14,3	2,5	12,3	3,7	3,1	4,1	8,1	1,3	4,3	4,4
<b>FOS-101</b>	1,7	2,4	1,0	1,4	3,3	1,0	4,2	1,5	1,7	1,7	4,2	1,2	2,0	1,2
<b>MRS-101</b>	1,0	1,7	0,6	1,0	1,3	2,1	1,7	0,7	0,9	1,3	3,7	0,4	1,0	1,1
<b>MRS-502</b>	1,2	1,1	0,4	1,0	1,3	1,1	1,8	0,6	0,8	1,6	2,1	0,5	1,1	0,9
<b>MRS-303</b>	0,9	1,2	0,3	0,8	0,9	0,9	1,6	0,5	0,7	1,2	1,8	0,4	0,9	0,7
<b>MRS-301</b>	0,9	1,0	0,4	1,0	1,2	1,3	1,5	0,6	0,8	1,0	4,7	0,4	0,9	1,1
<b>SMC-102</b>	1,2	0,9	0,5	1,0	1,5	0,9	2,3	0,8	0,8	0,9	1,8	0,6	1,1	1,2
<b>SMC-103</b>	1,1	0,9	0,3	0,9	1,5	0,8	1,9	0,8	0,6	0,6	1,2	0,5	1,0	0,7
<b>SMC-105</b>	0,9	0,7	0,5	0,8	1,1	0,8	1,7	0,7	0,6	0,6	1,9	0,5	0,9	0,9

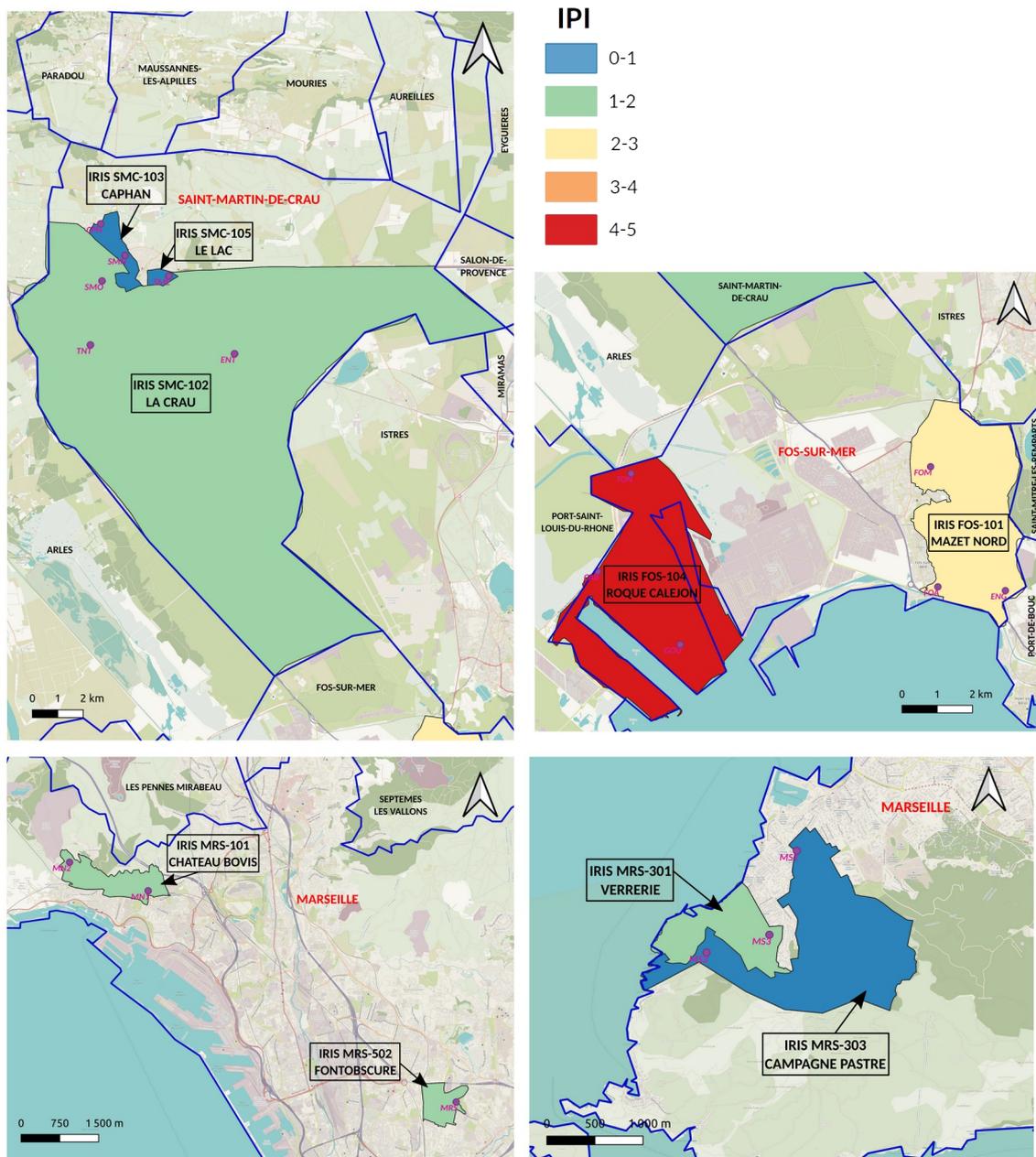


Figure 6. Cartographie de l'IPI à l'échelle des IRIS sélectionnés dans les différentes communes

### Concentrations en HAPs

Les teneurs en HAP totaux relevées dans les thalles de *X. parietina* prélevés dans les différents IRIS des communes de FOS, MRS et SMC sont présentées dans la Figure 7.

Les sites de FOS présentent comme pour les métaux les teneurs moyennes les plus élevées par rapport à MRS et SMC (respectivement 1625,4, 600,7 et 809,6  $\mu\text{g.kg}^{-1}$ ). Néanmoins FOS n'est pas significativement différent de MRS et SMC (Figure 7A), de fortes variations intra-sites étant relevées à FOS. En revanche MRS est significativement différent de SMC ( $p = 0,0013$ ) et présente des teneurs moyennes plus faibles que SMC.

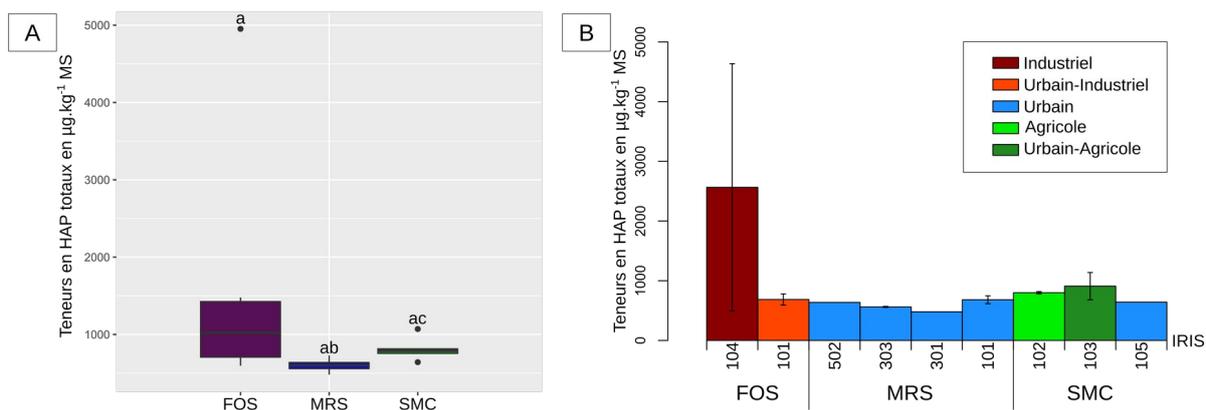


Figure 7. Teneurs en HAP totaux des thalles de *X. parietina*, en  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  MS, moyennées par communes (A ; test de Wilcoxon ;  $n = 6$  ;  $p < 0,05$ ) et par IRIS (B). En A, les boxplots représentent la médiane, les 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles, les valeurs minimales et maximales. En B, la couleur des histogrammes est fonction de l'habitat décrit sur l'IRIS.

À l'échelle des IRIS (Figure 7B), l'IRIS industriel 104 de FOS ( $n = 3$ ) présente les teneurs moyennes les plus élevées ( $2564,4 \mu\text{g.kg}^{-1}$ ) parmi tous les IRIS. FOS-101 (contexte urbain-industriel,  $n = 3$ ) montre des teneurs moyennes plus faibles ( $686,3 \mu\text{g.kg}^{-1}$ ) et comparables à celles observées sur les IRIS de SMC et MRS. À MRS, les quatre IRIS, situées dans un contexte urbain, présentent des teneurs moyennes homogènes et des variations intra-sites faibles. MRS-101, exposé aux émissions du trafic maritime du port de Marseille-Fos, enregistre les concentrations les plus élevées ( $681,8 \mu\text{g.kg}^{-1}$ ) de MRS. Il est à noter que les teneurs relevées sur MRS-301, situé dans le massif des Calanques et intégrant l'ancien site industriel Légré-Mante, sont les plus faibles. Enfin, à SMC, SMC-103, en contexte urbain-agricole, présente les teneurs moyennes les plus élevées ( $909,2 \mu\text{g.kg}^{-1}$ ), SMC-102 (contexte agricole) et SMC-105 (contexte urbain), enregistrent des teneurs moyennes plus faibles (respectivement  $799,1$  et  $641,6 \mu\text{g.kg}^{-1}$ ).

La mesure des teneurs moyennes des 16 congénères HAP dans les thalles de *X. parietina* a permis d'obtenir le profil des congénères HAP présenté en Figure 8. La répartition des HAP renseigne sur les sources d'émissions potentielles. Les profils des HAP relevés dans les échantillons de lichens prélevés dans les différentes communes montrent une dominance des HAP à quatre cycles, notamment FIA et Pyr. En effet, FIA est le principal HAP rejeté quel que soit le secteur d'activité anthropique (INERIS, 2015). Alors que SMC et MRS présentent

une plus grande proportion de HAP légers (deux à trois cycles) par rapport aux sites de FOS, de nombreux congénères lourds enregistrent des proportions plus importantes à FOS (Bpe, BaP ou BkF). Il est à noter les fortes variations intra-sites sur FOS. De même, des variations intra-sites importantes sont relevées pour certains congénères sur l'ensemble des communes, c'est le cas notamment de Phe, Pyr ou Ace. Au niveau des IRIS, c'est MRS-502, situé en zone fortement urbanisée à MRS, qui présente et rassemble les taux moyens les plus élevés pour les HAP à 2 et 3 cycles (Nap : 7,62 % ; Ace : 2,93 % ; Acy : 3,90 % ; Flu : 2,23 % ; Ant : 5,30 % ; Phe : 12,64 %) ainsi que pour le DBA (5,63 %).

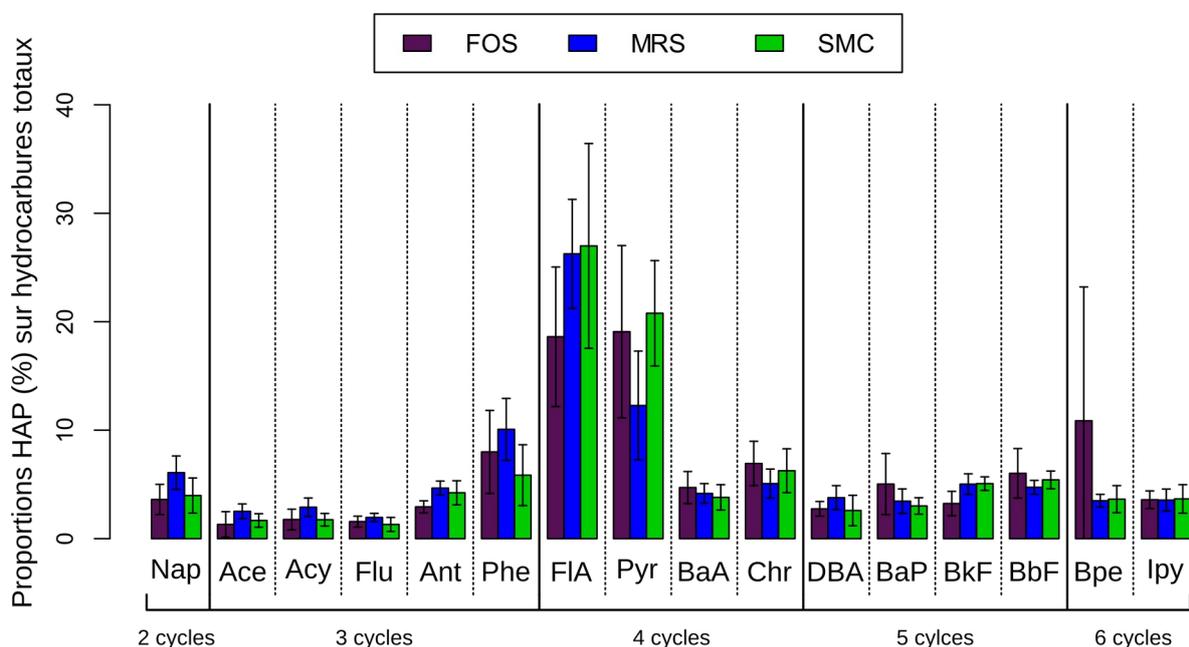


Figure 8. Profil moyen des congénères HAP exprimé en pourcentage et enregistré dans les différentes communes (n = 6).

Une représentation graphique à l'échelle de l'IRIS a été réalisée à partir des teneurs totales en HAP. Cette cartographie est présentée en Figure 9.

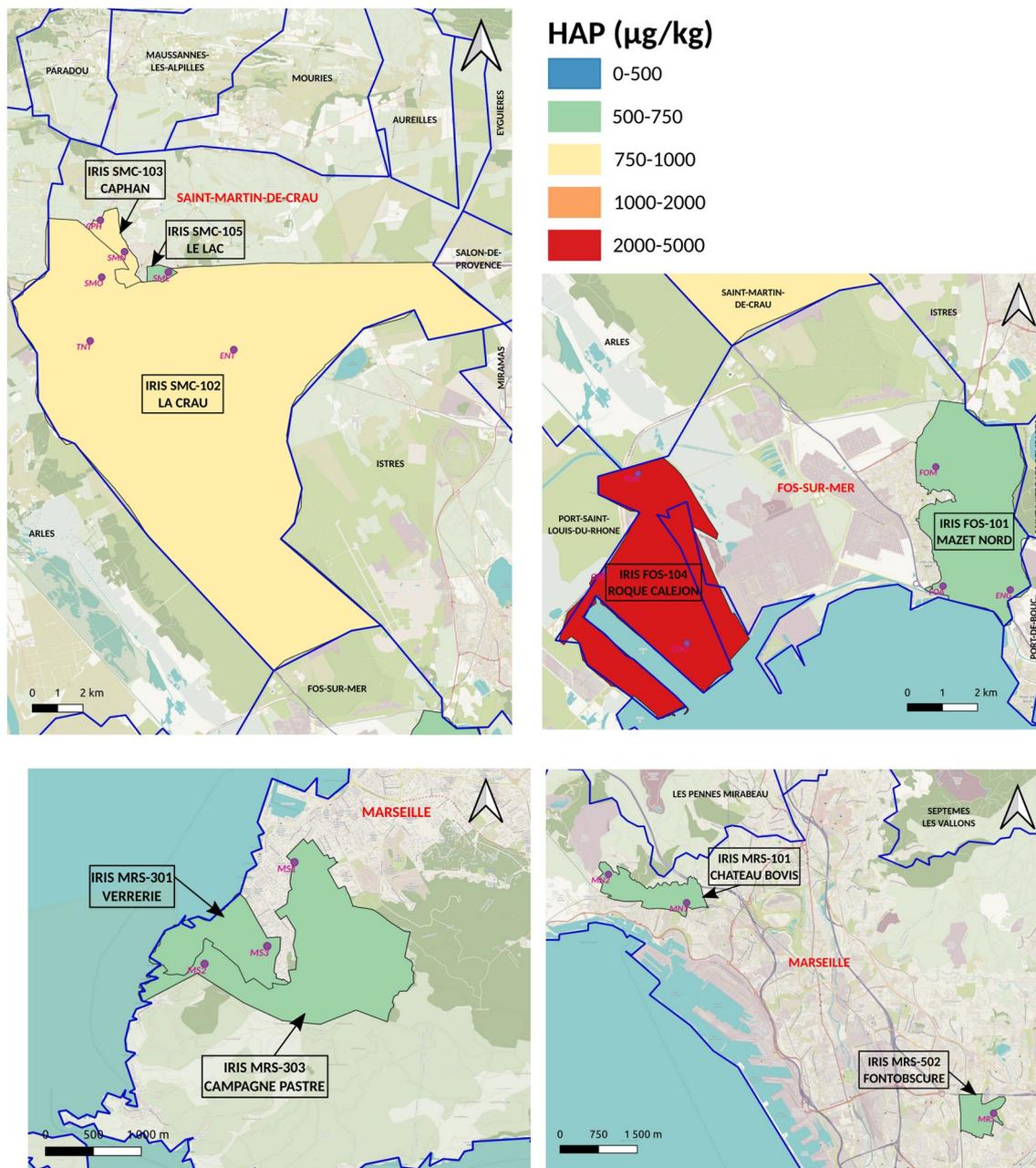


Figure 9. Cartographie des teneurs totales en HAP à l'échelle des IRIS

### II.7.2. Bioindication lichénique

Le Tableau 4 présente la liste des espèces lichéniques observées sur les stations de relevés, leurs fréquences par station, leur fréquence moyenne ainsi que le nombre de stations où ont été observées ces espèces. Globalement, 53 espèces sont dénombrées sur l'ensemble des stations. A FOS, un total de 32 espèces dont 19 espèces à thalle crustacé, 11 à thalle foliacé et 2 espèces de fruticuleux ont été relevés. À MRS, 39 espèces ont été caractérisées sur l'ensemble des 4 sites dont 26 espèces à thalle crustacé, 12 espèces à thalle foliacé et une espèce à thalle fruticuleux. Enfin, à SMC, un total de 41 espèces a été identifié sur les 4 sites

dont 23 crustacés, 16 foliacés et 2 fruticuleux. Ainsi, une plus forte diversité est rencontrée sur la commune de SMC et dans une moindre mesure de MRS. Il est à noter que le nombre d'espèces à thalle crustacé est plus grand que celui des espèces à thalle foliacé et des espèces à thalle fruticuleux dans l'ensemble des communes.

Tableau 4. Liste des espèces de lichens avec leurs fréquences par station, leurs fréquences moyennes ainsi que le nombre de stations où ces espèces ont été retrouvées. Les couleurs des espèces indiquent le type de lichens (crustacé : violet ; foliacé : bleu ; fruticuleux : vert).

IRIS	FOS-104		FOS-101		SMC-103		SMC 105	SMC 102	MRS 303	MRS 502	MRS-101		Fréquence moyenne	Nombre de stations
	TON	CAB	FOM	FOA	CPH	SMN	SME	SMO	MS1	MRS	MN2	MN1		
<i>Acrocordia gemmata</i>	0,095												0,008	1
<i>Amandinea punctata</i>	0,025	0,155	0,080	0,195							0,305		0,063	5
<i>Anisomeridium bifforme</i>	0,660			0,045	0,115	0,160							0,082	4
<i>Arthonia punctiformis</i>		0,050	0,245	0,275	0,015		0,145			0,170			0,075	6
<i>Arthonia radiata</i>			0,030			0,135		0,200					0,030	3
<i>Arthopyrenia punctiformis</i>					0,020		0,115	0,045		0,010			0,016	4
<i>Buellia griseovirens</i>					0,070					0,175			0,020	2
<i>Caloplaca cerina</i>										0,080			0,007	1
<i>Caloplaca ferruginea</i>	0,095	0,015	0,125		0,025	0,330				0,010			0,050	6
<i>Caloplaca luteoalba</i>	0,065	0,260	0,220	0,070	0,275	0,050	0,265	0,235	0,060				0,125	9
<i>Candelaria concolor</i>	0,065	0,205	0,260	0,375	0,380	0,155	0,080	0,340	0,020	0,175			0,171	10
<i>Candelariella vitellina</i>							0,070						0,006	1
<i>Chrysothrix candelaris</i>		0,140	0,010							0,025	0,020		0,016	4
<i>Cliostomum griffithii</i>	0,035		0,020										0,005	2
<i>Diploicia canescens</i>	0,135	0,010	0,005						0,010	0,020			0,015	5
<i>Evernia prunastri</i>						0,005							0,000	1
<i>Flavoparmelia caperata</i>	0,010	0,090	0,045	0,015	0,040	0,005			0,020				0,019	7
<i>Flavoparmelia soledians</i>			0,025										0,002	1
<i>Graphis elegans</i>			0,145										0,012	1
<i>Graphis scripta</i>		0,135	0,045						0,040				0,018	3
<i>Hyperphyscia adglutinata</i>	0,765	0,285	0,965	0,285	0,970	0,930	0,625	0,970	0,515	0,290	0,230	0,940	0,648	12
<i>Lecania naegelii</i>			0,200			0,010				0,015			0,019	3
<i>Lecanora allophana</i>					0,035								0,003	1
<i>Lecanora carpinea</i>	0,035	0,020	0,025	0,030				0,080		0,035			0,019	6
<i>Lecanora chlarotera</i>	0,055	0,065	0,035	0,030	0,045	0,015	0,015	0,035	0,185	0,030			0,043	10
<i>Lecanora conizacoïdes</i>						0,015							0,001	1
<i>Lecanora expallens</i>										0,120			0,010	1

<i>Lecanora hagenii</i>		0,040	0,010			0,140		0,035	0,019	4
<i>Lecanora horiza</i>		0,005				0,015		0,020	0,003	3
<i>Lecidella elaeochroma</i>	0,035 0,025	0,305	0,060 0,205	0,090	0,095	0,020	0,250	0,160	0,104	10
<i>Lepraria incana</i>	0,010	0,240						0,135 0,070	0,038	4
<i>Opegrapha atra</i>	0,115						0,035		0,013	2
<i>Opegrapha pulicaris</i>			0,125		0,155	0,025			0,025	3
<i>Opegrapha lichenoides</i>		0,105	0,040	0,020				0,250	0,035	4
<i>Parmelia laevigata</i>				0,050					0,004	1
<i>Parmotrema perlatum</i>								0,005	0,000	1
<i>Pertusaria amara</i>								0,010	0,001	1
<i>Pertusaria pertusa</i>			0,070		0,020	0,050		0,075 0,005	0,018	5
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>		0,185 0,195	0,360 0,740	0,900	0,415	0,315	0,580	0,170 0,415	0,356	10
<i>Physcia adscendens</i>	0,500 0,305	0,885 0,420	0,875 0,750	0,355	0,740	0,280	0,595	0,120 0,695	0,543	12
<i>Physcia aipolia</i>	0,130		0,155		0,235	0,090			0,051	4
<i>Physcia biziana</i>	0,210	0,010 0,290	0,030	0,050		0,125	0,280	0,055 0,160	0,101	9
<i>Physcia tenella</i>				0,020		0,255			0,023	2
<i>Physconia grisea</i>	0,055	0,040	0,035	0,055	0,040	0,045		0,045	0,026	7
<i>Pleurosticta acetabulum</i>					0,005				0,000	1
<i>Porina aenea</i>		0,175 0,415	0,090						0,057	3
<i>Punctelia borreri</i>	0,020		0,035	0,015	0,015				0,007	4
<i>Punctelia subrudecta</i>		0,015	0,005	0,005					0,002	3
<i>Pyrenula macrospora</i>						0,025			0,002	1
<i>Ramalina farinacea</i>		0,025						0,010	0,003	2
<i>Rinodina pyrina</i>				0,060					0,005	1
<i>Teloschiste chrysophthalmus</i>		0,005	0,005	0,010					0,002	3
<i>Xanthoria candelaria</i>			0,020 0,370	0,170	0,180	0,005	0,030	0,005	0,065	7
<i>Xanthoria parietina</i>	0,945 0,625	0,570 0,770	0,920 0,840	0,530	0,895	0,680	0,530	0,705 0,595	0,717	12
<b>Nombre d'espèces</b>										
<b>Sites</b>	15 12	18 15	25 16	25	22	23	15	16	27	
<b>IRIS (moy)</b>	13,5	16,5	20,5	25,0	22,0	23,0	15,0	21,5		
<b>Villes (moy)</b>	15,0		22,0			20,3				

L'espèce la plus observée sur les différentes stations est *X. parietina* avec une fréquence de 0,72 en moyenne sur l'ensemble des stations de relevés. Cette espèce à thalle foliacé est nitrophile, héliophile et toxitolérante. Les espèces à thalle foliacé *Hyperphyscia adglutinata* et *Physcia adscendens* sont retrouvées également sur l'ensemble des stations avec des fréquences moyennes moindres que *X. parietina* (respectivement 0,65 et 0,54). Ces espèces sont tolérantes à la pollution de l'air et rencontrées en abondance dans les zones urbanisées.

Peuvent être aussi cités les taxons *Phaeophyscia orbicularis*, *Candelaria concolor*, *Lecanora chlorotera* ou *Lecidella elaeochroma* régulièrement relevées sur de nombreuses placettes (10 au total) mais à des fréquences plus faibles.

Comme indiqué précédemment, sur l'ensemble des IRIS, il y a une plus grande proportion d'espèces à thalle crustacé (sauf pour SMC-102 et SMC-105 à SMC). Ce type de lichen présente pour la majorité des espèces, une grande facilité à tolérer la pollution atmosphérique de son milieu.

Quelques espèces à thalles fruticuleux ont été relevées sur les différentes communes. *Ramalina farinacea* a été retrouvée sur FOS-101 et MRS-101. *Teloschiste chrysophthalmus* a également été identifié sur FOS-101 mais aussi sur SMC-103 et SMC-105. *Evernia prunastri* a été relevée sur SMC-102. Relativement sensibles à la pollution atmosphérique, leur présence indique des zones plus faiblement exposées.

Les espèces lichéniques rencontrées sur ces trois communes sont représentées en majorité par quatre cortèges lichéniques : *Xanthorion parietinae* (*Xanthoria* sp., *C. concolor*, *Physcia* sp., *Caloplaca* sp., *T. chrysophthalmus*), *Hyperphyscietum adglutinatae* (*H. adglutinata*, *P. adscendens*, *Caloplaca* sp.), *Lecanorion carpineae* (*Lecanora* sp., *L. elaeochroma*, *Caloplaca* sp.) et *Amandineum punctatae* (*A. punctata*, *L. elaeochroma*). Excepté *Xanthorion parietinae*, ce sont des associations pionnières répandues en région méditerranéenne notamment en milieu forestier sec et aéré et dans les écotones (clairières, lisières, bordures de voies). Les groupements *Amandineum punctatae* et *Lecanorion carpineae*, dominés par les thalles crustacés de teinte grisâtre et jaunâtre, sont des cortèges toxitolérants (caractère plus marqué pour *Amandineum punctatae*), thermophiles et assez nettement héliophiles et xérophiles. Ce sont deux groupements communs dans les massifs des Bouches-du-Rhône et dans le couloir rhodanien. Alors qu'*Amandineum punctatae* est présent seulement sur certains sites de FOS (CAB, TON et FOA), les plus proches des zones d'émissions de la ZIP de Fos, *Lecanorion carpineae* est présent dans tous les sites. Le groupement *Hyperphyscietum adglutinatae* succède aux associations précédentes lors du vieillissement du phorophyte et de l'altération croissante de l'écorce. Outre certaines espèces crustacées rémanentes des groupements plus anciens (*L. elaeochroma* ou *Caloplaca* sp.), il se caractérise par l'abondance d'espèces foliacées de petites tailles (*H. adglutinanta*, *P. adscendens*). Il est cependant considéré comme un peuplement pionnier et présente un caractère thermophile et héminitrophile. Il se rencontre dans des milieux éclairés souvent en bordure de massif

boisé. On le retrouve sur l'ensemble des sites étudiés. *Xanthorion parietinae* est un cortège non-pionnier rencontré principalement sur arbres isolés. Il est nitrophile, subneutrophile (pH compris entre 5 et 7) et toxitolérant. Bien que non halophile, ce groupement est favorisé par l'imprégnation de sel. Il est présent sur toutes les stations exceptées FOA et TON à FOS où seuls des peuplements pionniers dominés par les crustacés sont présents.

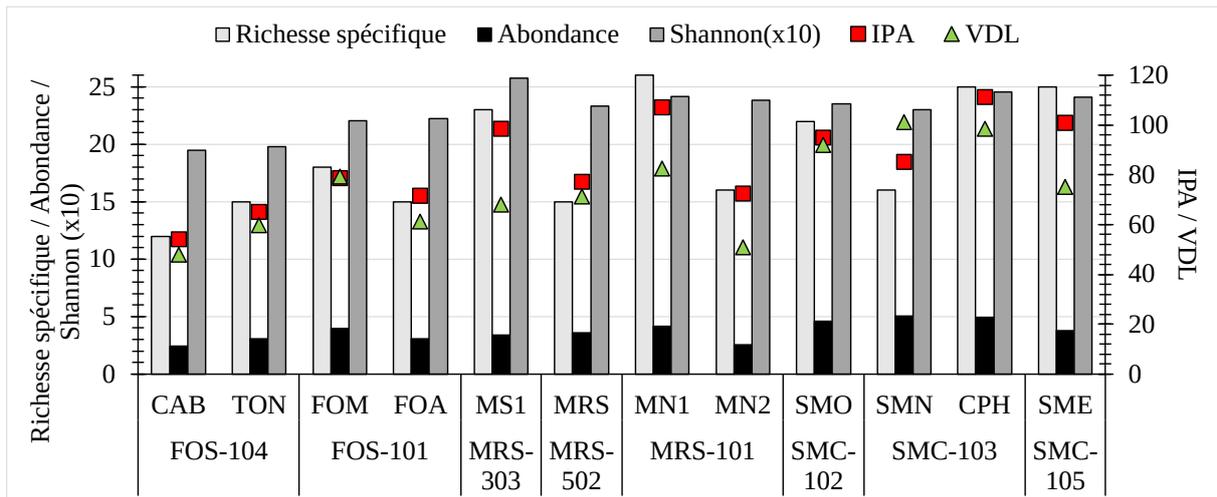


Figure 10. Histogramme de la richesse spécifique lichénique, de l'abondance lichénique, de l'indice de Shannon, l'IPA et de la VDL de chaque station classée par IRIS et communes. L'ordonné à gauche donne les valeurs de biodiversité, d'abondance et de l'indice de Shannon (\*10) et l'ordonnée à droite donne les valeurs de l'IPA et la VDL

La biodiversité lichénique (Figure 10) varie en moyenne de 12 à 18 espèces par station pour FOS (15 espèces en moyenne), de 15 à 26 espèces pour MRS (une moyenne de 20 espèces) et de 16 à 25 pour SMC (22 espèces en moyenne). FOS présente moins d'espèces que MRS et SMC. FOS présente également une abondance, un indice de Shannon, un IPA et une VDL moyens plus faibles (respectivement 3,12, 2,09, 67,36 et 61,95) que MRS (respectivement 3,40, 2,43, 88,79 et 68,08) et SMC (respectivement 4,85, 2,38, 97,99 et 91,65). Les plus faibles abondances, indice de Shannon, IPA et VDL sont mesurés sur un site de FOS, situé au cœur de la zone industrielle (CAB, respectivement 2,4, 1,95, 54,21, 48), synonyme d'une qualité de l'air dégradée. L'abondance et la VDL les plus élevées sont mesurées au nord de SMC (SMN, respectivement 5,05 et 101), mettant en avant une bonne qualité de l'air sur ce secteur. L'IPA le plus élevé est mesuré sur le site CPH (111,11) et l'Indice de Shannon le plus élevé est retrouvé dans le sud de MRS (MS1, 2,57). Ces données mettent en avant que la

commune de FOS, ayant un habitat majoritairement de type industriel, présente les plus faibles indices écologiques comparés à ceux de MRS (habitat urbain) et de SMC (habitat agricole), confirmant une pollution de l'air relativement élevée sur ce secteur.

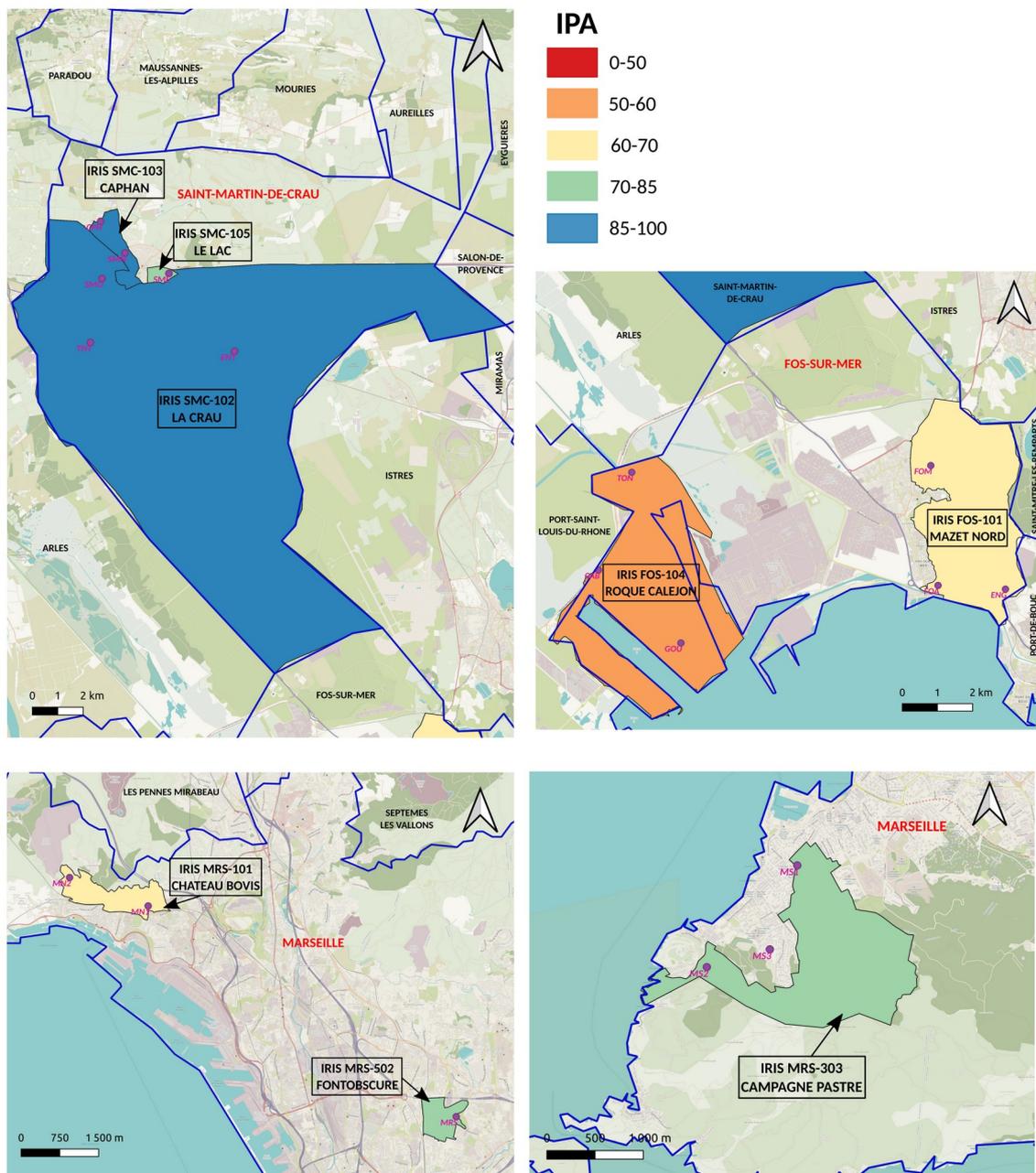


Figure 11. Cartographie de l'Indice de Pureté Atmosphérique (IPA) à l'échelle des IRIS sélectionnés dans les différentes communes

Comme pour la bioaccumulation lichénique, les mesures de bioindication lichénique ont été utilisées pour calculer l'IPA, défini comme un indice de qualité de l'air (Gombert et al., 2004 ; Van Haluwyn et al., 2011 ; Dron et al., 2016). Il est représentatif de la diversité et de

l'abondance de la communauté lichénique, considérée comme bioindicateur d'effet. Il a donc été sélectionné sur la base de nos résultats comme descripteur environnemental et cartographié (Figure 11).

### II.7.3. Caractérisation des types de sol



Figure 12. Prélèvements de sol et fosse pédologique réalisés sur le site MRS (MRS-502)

Six sites ont été prélevés dans le cadre de l'étude de sol proposée par le projet EVALVIE en 2022. Dans un premier temps, la caractérisation des types de sol s'est basée sur la

réalisation manuelle d'une fosse pédologique (1 m de profondeur maximum) ou d'un carottage (sol plus profond) à l'aide d'un carotteur mécanique. Ce travail a permis de décrire le profil de sol et la succession des horizons et de définir les profondeurs de prélèvements. Des prélèvements ont ainsi été réalisés dans l'horizon de surface et l'horizon inférieur (H2). Pour compléter la caractérisation des sols, différents paramètres physico-chimiques ont été analysés (pH, granulométrie, %CaCO<sub>3</sub>, matière organique, phosphore assimilable, azote total, C/N et salinité) par un prestataire extérieur. Les analyses des concentrations en métaux seront effectuées prochainement par le CEREGE, les HAPs et pesticides par le LCE.

La Figure 12 présente la description de la fosse pédologique réalisée sur le site MRS (MRS-502), en contexte urbain, prélevé au printemps 2022. En plus de la fosse pédologique, un carottage de sol a été effectué avec le carotteur mécanique afin de pouvoir ramener une carotte complète au Laboratoire. La fosse pédologique a servi à valider les épaisseurs des deux horizons et la profondeur de l'horizon « inférieur » à prélever à la tarière pour les analyses de polluants métalliques. Seules les analyses des paramètres pédochimiques ont pour l'instant été réalisées et sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Paramètres physico-chimiques mesurés dans les horizons de sol du site MRS-502.

	Prof	C org	N total	C/N	P Olsen	CaCO <sub>3</sub> total	Argile	Limons	Sables
	cm	g kg <sup>-1</sup>					g kg <sup>-1</sup>		
<b>Profil</b>	0-12	45,1	4,63	10	0,129	298	252	341	408
<b>Profil</b>	12-25	6,4	0,67	10	0,110	409	181	361	457
<b>Profil</b>	25(50)-95(90)	2,5	0,16	16	0,098	658	89	243	669
<b>Profil</b>	95-100	0,9	0,03	30	0,019	432	30	88	882
<b>Tarière</b>	0-12	52,1	5,67	9	0,131	312	210	357	433
<b>Tarière</b>	30-40	6,7	0,61	11	0,060	442	149	357	492

### III. Calendrier prévisionnel 2022-23

D'après le diagramme de Gantt (Tableau 6) proposé pour le projet et au vu du travail réalisé cette année, le travail en 2022-23 se focalisera sur les tâches 2, 3, 4 et 5.

Tableau 6. Diagramme de Gantt du projet EVALVIE réparti par trimestre sur 3 ans

Tâches	Description des tâches	Année		A2					A3				A4			Dépendance
		Semestre	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12		
<b>Tâche 1</b>	<b>Coordination de projet</b>															
1-1	Organisation scientifique	CP			R	CS-L	CP		R	CS-L		R	CP-L			
1-2	Repérage et sélection des sites	L														1-1
1-3	Communication collectivités					R					R			R-L		1-1/1-2
1-4	Valorisation scientifique et publique								L				L	R-L		Ens tâches
<b>Tâche 2</b>	<b>Description écologique des milieux</b>															
2-1	Description et inventaire des habitats										L					1-2/5-3&4
2-2	Etude phytosociologique										L					1-2/2-1/5-3&4
<b>Tâche 3</b>	<b>Activité socio-économique et anthropisation</b>															
3-1	Description activités anthropiques										L					1-2/5-1&2
3-2	Polluants potentiellement émis										L					3-1/5-1&2
3-3	Descripteurs démographiques										L					3-1
<b>Tâche 4</b>	<b>Etudes sociologiques</b>															
4-1	Création d'un focus groupe	R														1-2/3-1
4-2	Validation et réalisation du questionnaire									L-R						4-1/1-2/3-3
4-3	Analyse et interprétation des résultats										L					4-2&3
4-4	Formations citoyennes et relevés citoyens							R						L		1-2/4-1/3-3
<b>Tâche 5</b>	<b>Expositions environnementales</b>															
5-1	Caractérisation des types de sols		R			L										1-2/2-1/3-1&2
5-2	Bioimprégnation lichénique					L										1-2/2-1/3-1&2
5-3	Bioindication lichénique										L					1-2/2-1&2/5-2
5-4	Développement analytiques et analyses					L										
<b>Tâche 6</b>	<b>Détermination indice global de vulnérabilité</b>															
6-1	Création des bases de données					R						L				2/3/4/5
6-2	Détermination indicateur par type d'enjeux												L			2/3/4/5
6-3	Traitements cartographiques								R					L		2/3/4/5
6-4	Conception indicateur intégratif de vulnérabilité									R				L		2/3/4/5
6-5	Croisements des BDD EVALVIE et OMISEP												CP	L		2/3/4/5

R = Réunion ; L = Livrables et documents produits ; CP : Comité de pilotage ; CS : Comité de suivi

Dans le cadre de la tâche 2, un stage M2 sera réalisé à partir de février 2023 pour accompagner le LPED dans la description écologique des milieux. La première étape de ce travail se déroulera à l'échelle des IRIS. Elle consistera à se baser sur les référentiels existants (Corine Land Cover, CRIGE PACA, cartes de végétation historiques) pour une identification préliminaire des différents types d'habitats rencontrés dans les IRIS sélectionnés pour chaque commune, complété par l'inventaire des réseaux hydrologiques adjacents (proximité

littoral, nappe phréatique, eaux continentales, ...) avant d'en faire un état des lieux actualisé. Ainsi dans chaque IRIS, des données quantitatives et qualitatives pourront être générées à partir de la typologie de milieux (diversité et dimensions des habitats/IRIS, etc...) prenant en compte des facteurs de vulnérabilité tels que : la présence d'espèces d'intérêt patrimonial (rares et menacées (liste rouge), protégées (niveau national, régional, par arrêté préfectoral, etc...)) et la proximité des réseaux hydrologiques. Ces descripteurs permettront aussi d'identifier les principales voies de transfert de pollution et d'intégrer ces informations dans l'indice de vulnérabilité écologique. A une échelle plus fine, celles des placettes d'étude, le travail de terrain consistera à réaliser un inventaire et une description des unités phytosociologiques présentes et à évaluer leur proportion au sein de la placette, le nombre/placette, la taille relative/placette ainsi que d'y attribuer une valeur écologique/placette basée sur les enjeux écologiques croisés de la mosaïque d'unités phytosociologiques recensées. Une attention sera portée sur les espèces patrimoniales et inféodées aux habitats dont la présence est avérée et documentée dans la littérature. Leur présence sera documentée sur le terrain lors des campagnes de terrain (en accord avec la phénologie des espèces). Les données obtenues seront comparées autant que possible aux données historiques de relevés phytosociologiques pour en avoir une vision dynamique et notamment évaluer les dynamiques régressives de certaines unités pour ainsi établir un descripteur qui sera intégré dans la notion de vulnérabilité écologique des milieux.

La tâche 3, sous la responsabilité du LCE, s'attache à décrire l'activité anthropique des territoires. Une partie du travail a été initiée au printemps 2022, et sera finalisé courant 2023.

Plusieurs réunions avec les partenaires du projet OMISEP ont déjà eu lieu en 2022 dans le cadre de la tâche 4 relative à l'enquête sociologique. En effet, celle-ci est mise en place conjointement entre les deux projets avec le recrutement d'un seul et même groupe de participants pour la réalisation des deux enquêtes menées au sein des deux projets. Un focus groupe sera mis en place début 2023 avec des volontaires de l'Observatoire Citoyen de l'Environnement de l'Institut Ecocitoyen (VOCE) pour la conception et la validation des questionnaires. La réalisation des questionnaires s'effectuera à partir du printemps 2023. Un

stagiaire de niveau M2 sera recruté en 2023 par DYNAFOR pour être en charge de cette tâche.

Concernant la tâche 5, les campagnes d'échantillonnage relatives aux mesures d'expositions environnementales se poursuivront en 2023. Pour se faire, un stagiaire de niveau M2 sera recruté à l'hiver 2023 par le CEREGE pour prendre en charge les prélèvements et analyses de sol. Ce travail sera complété par la finalisation des campagnes de terrain de bioindication lichénique menées par l'Institut Ecocitoyen qui reprendront au printemps 2023.

Enfin, à partir de septembre 2023, un ingénieur d'étude sera recruté à l'Institut Ecocitoyen pour le traitement statistique et le croisement des données en vue de la détermination de l'indice de vulnérabilité environnementale et sanitaire (tâche 6).

#### **IV. Rapport sur les difficultés**

Sur cette première année, les difficultés ont concerné la validation administrative de ce projet entre l'ADEME et les différents partenaires entraînant d'importants retards dans la signature des conventions de financement. Ces retards ont empêché le déblocage des budgets des partenaires universitaires limitant leur action et leur possibilité de recrutement sur cette première année. Les retards engendrés seront récupérés en 2023.

De plus, quelques difficultés sont apparues pour l'obtention des autorisations d'accès sur certains secteurs et notamment Marseille-Sud. Un site reste encore à valider dans cette zone (MS3), un repérage sera à nouveau nécessaire pour sélectionner un nouveau site en cette fin d'année 2022.

#### **V. Points d'attention pour l'ADEME**

Nous n'avons pour l'instant aucun point d'attention à formuler à l'ADEME.

#### **VI. Conclusions**

Le travail présenté ici a permis d'élaborer les premières étapes vers la construction d'un

indice de vulnérabilité des territoires. Sur le plan environnemental, l'emploi de méthodes de biosurveillance atmosphérique, tel que la bioindication et la bioaccumulation lichénique, a montré tout sa pertinence pour évaluer l'exposition et les variations spatiales des multi-expositions atmosphériques à l'échelle des unités d'IRIS et leurs effets sur l'environnement en croisant les niveaux de bioaccumulation aux relevés de biodiversité lichénique. A partir de ces mesures de biosurveillance atmosphérique, des descripteurs environnementaux ont été décrits (IPI, HAP totaux, IPA) et seront complétés par la caractérisation et les niveaux de pollution diffuse des sols. In fine, ces descripteurs environnementaux seront intégrés avec les descripteurs écologiques et socio-économiques afin de définir l'indice de vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires. Leur cartographie permettra par ailleurs, de visualiser précisément ces différents indicateurs, en lien avec l'anthropisation des territoires et la diversité des habitats.

## VII. Références bibliographiques

Agnan, Y., Séjalon-Delmas, N., Claustres, A., Probst, A. (2015). Investigation of spatial and temporal metal atmospheric deposition in France through lichen and moss bioaccumulation over one century. *Science of the Total Environment*, 529, 285-296.

Augusto, S., Máguas, C., Branquinho, C. (2013). Guidelines for biomonitoring persistent organic pollutants (POPs), using lichens and aquatic mosses—a review. *Environmental pollution*, 180, 330-338.

Austruy, A., Yung, L., Ambrosi, J. P., Girardclos, O., Keller, C., Angeletti, B., Chalot, M. (2019). Evaluation of historical atmospheric pollution in an industrial area by dendrochemical approaches. *Chemosphere*, 220, 116-126.

Austruy, A., Roulier, M., Angeletti, B., Dron, J., Dauphin, C.E., Ambrosi, J.P., Keller, C., Chamaret, P. (2021). Concentrations and transportation of metal and organochlorine pollutants in vegetables and risk assessment of human exposure in rural, urban and industrial environments (Bouches-du-Rhône, France). *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45), 64253-64267.

D'Amato, L. (2020) Comment abonder de façon intégrative dans le temps et dans l'espace des pollutions industrielles dans les Bouches-du-Rhône et leurs effets sur l'environnement et la santé humaine ?. Mémoire de Master 2, Aix-Marseille Université, Marseille

Dauphin, C.E., Durand, A., Lubonis, K., Wortham, H., Dron, J. (2020). Quantification of monosaccharide anhydrides by gas chromatography/mass spectrometry in lichen samples. *Journal of Chromatography A*, 1612.

Daumalin, X., Laffont-Schwob, I., Barthélemy, C., Desrousseaux, M., Heckenroth, A., Masotti, V., Raveux, O. (2016). Les calanques industrielles de Marseille et leurs pollutions- Une histoire au présent. Ref<sup>2</sup>C.

Daumalin, X. (2020). La création du Secrétariat permanent pour les problèmes de pollutions industrielles Fos/étang de Berre. Tournant environnemental ou optimisation d'une ambition industrielle (1971 1985). Rives méditerranéennes, (61), 69-102.

Dobson, F.S. (2011). Lichens: An illustrated Guide to the British and Irish Species.

Dron, J., Austruy, A., Agnan, Y., Ratier, A., Chamaret, P. (2016). Utilisation de la biosurveillance lichénique sur la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer: retour sur trois ans de suivi à l'échelle d'un territoire intercommunal. 2268-3798.

Dron, J., Ratier, A., Austruy, A., Revenko, G., Chaspoul, F., Wafo, E. (2021). Effects of meteorological conditions and topography on the bioaccumulation of PAHs and metal elements by native lichen (*Xanthoria parietina*). Journal of environmental sciences, 109, 193-205.

Dutoit, T., Buisson, E., Fadda, S., Henry, F., Coiffait-Gombault, C., Jaunatre, R. (2011). Dix années de recherche dans une pseudo-steppe méditerranéenne: impacts des changements d'usage et restauration écologique. Science et changements planétaires/Sécheresse, 22(2), 75-85.

AFNOR-CEN (2012) Biosurveillance à l'aide de lichens - Évaluation de la diversité des lichens épiphytes. Norme NF EN 16413.

Girard, M.C., Walter, C., Rémy, J.C., Berthelin, J., Morel, J.L. (2011). Sols et environnement- 2e édition-Cours, exercices et études de cas-Livre+ compléments en ligne: Cours, exercices corrigés et études de cas. Dunod.

Gombert, S., Asta, J., Seaward, M.R.D. (2004). Assessment of lichen diversity by index of atmospheric purity (IAP), index of human impact (IHI) and other environmental factors in an urban area (Grenoble, southeast France). Science of the total environment, 324(1-3), 183-199.

Heckenroth, A., Rabier, J., Monsara, P., Pecheux, L.L.M., 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.

INSEE – Institut national de la statistique et des études économiques – Métadonnées – Définitions – IRIS (2016). URL <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523> [dernier accès : 25/08/2022 à 14:32]

Liu, D., Ma, J., Sun, Y., Li, Y. (2016). Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China. *Catena*, 139, 53-60.

Ratier, A., Dron, J., Revenko, G., Austruy, A., Dauphin, C. E., Chaspoul, F., Wafo, E. (2018). Characterization of atmospheric emission sources in lichen from metal and organic contaminant patterns. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8364-8376.

Rollin, C., Quiot, F., Denys, S. (2005). Hydrocarbures aromatiques polycycliques– Acquisition des données d'entrée des modèles analytiques ou numériques de transfert dans les sols et les eaux souterraines. Guide méthodologique, Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).

Sarrazin, L., Diana, C., Wafo, E., Pichard-Lagadec, V., Schembri, T., Monod, J.L. (2006). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in marine, brackish, and river sediments by HPLC, following ultrasonic extraction. *Journal of liquid chromatography & related technologies*, 29(1), 69-85.

Tiévant, P. (2011). Guide des lichens: 350 espèces de lichens d'Europe. Delachaux et Niestlé.

Van Haluwyn, C., Asta, J., Gavériaux, J.P. (2009). Guide des lichens de France : lichens des arbres, Paris, Belin, 231 p.

Van Haluwyn, C. (2008). Méthodes normalisées ou méthodes brevetées en biosurveillance

de la qualité de l'air. 2268-3798.

Wu, J., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., Jiao, X. (2014). Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. PloS one, 9(11), e112917.

## Annexe 1 : Liste des pesticides analysés dans ce projet

Pesticides
2,4D
2,4MCPA
Aclonifen
Amitrole
Chlorpropham
Chlorpyrifos Ethyl
Cymoxanil
Cypermethrin
Cyprodinil
Deltamethrin
Diclofop-methyl
Difenoconazole
Diflubenzuron
Diflufenican
Dimethomorph
Esbiothrin
Fenhexamid
Fenoxycarb
Fenpropimorph
Fipronil
Flazasulfuron
Flurochloridone
Fluroxypyr
Flusilazole
Folpet
Imidaclopride
Kresoxim-methyl
Lambda-cyhalothrin
Lindane
Linuron
Metazachlor
Oxadiazon
Permethrin
Pendimethalin
Piperonyl Butoxide (PBO)
Pirimicarb
Propyzamide
Prosulfocarb
Pyrimethanil
Sulcotrione
Tebuconazole
Terbuthylazine
Tetraconazole

Légende	
Pesticide	
molécule	Herbicide
molécule	Insecticide
molécule	Fongicide
molécule	molécule analysée par GC/MS <sup>2</sup>
molécule	molécule analysée par LC/MS <sup>2</sup>