Institut écocitoyen

evalvie



Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire d'un territoire

Evalvie - Rapport Final

2025

AIX MARSEILLE PROVENCE

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE

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 (IECP) 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, Catherine Keller, Isabelle Laffont-Schwob, Camille Dumat, Pascale Prudent, Amandine Durand, Julien Dron, Bernard Angeletti, Henri Wortham, 2025. Projet EVALVIE : Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires – Rapport final. ADEME AAP IMPACTS - Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 2025.

Ce projet a reçu le soutien financier de l'ADEME

Numéro de contrat : 22ESD0002

Etude réalisée par IECP, LCE, CEREGE, LPED, DYNAFOR co-financée par l'ADEME.
Projet de recherche coordonné par Annabelle AUSTRUY
Appel à projet de recherche : IMPACTS – édition 2020
Coordination technique – ADEME : Hélène Desqueyroux – Coordinatrice recherche en Santé-Environnement

SOMMAIRE

INTRODUCTION....1
PARTIE I : SUIVI DU PROJET....3
I. difficultés rencontrées....3
II. Atteinte des objectifs, livrables....3
III. Verrous et perspectives....6
IV. Points d'attention pour l'ADEME....6
PARTIE 2 : Méthodologie et principaux résultats....7
I. Développement méthodologique....7
I.1. Définition de l'échelle territoriale et sites d'étude....7
I.2. Enjeux écologiques....10
I.2.1. Définition du descripteur habitat....11
I.1.1.1. Evaluation du statut de protection des IRIS....11
I.1.1.2. Intégration des inventaires de biodiversité....14
I.1.1.3. Calcul du descripteur biodiversité (BioD)....15
I.2.2. Définition du descripteur hydrologique....17
I.2.2.1. Réseau hydrographique et densité de drainage....18
I.1.2.2. Détermination de la part de recouvrement des surfaces en eau....19
I.1.2.3. Détermination du périmètre de littoral marin par IRIS....19
I.1.2.4. Calcul du descripteur hydrologique....20
I.2.3. Calcul de l'indice écologique....21
I.3. Enjeux socio-économiques....23
I.3.1. Définition du descripteur des activités anthropiques....24
I.2.2. Définition du descripteur démographique....25
I.2.3. Calcul de l'indice de vulnérabilité socio-économique....26
I.4. Enjeux environnementaux....28
I.4.1. Etat des sols....28
I.4.1.1. Méthode de prélèvements....28
I.4.1.2. Pré-traitement et analyses des sols....29
I.4.1.3. Définition des valeurs de références et calcul d'indice de pollution....31
I.4.2. Biosurveillance lichénique....33
I.4.2.1. Principe et intérêt de la biosurveillance lichénique....33
I.4.2.2. Prélèvement et pré-traitement des lichens....35

I.4.2.3. Détermination des teneurs en métaux dans les échantillons de lichens.....37
I.4.2.4. Détermination des teneurs en HAPs dans les échantillons de lichens.....37
I.4.2.5. Développement analytique pour l'analyse des pesticides.....38
I.4.2.6. Définition du bruit de fond et calcul de facteur de bioaccumulation.....39
I.4.2.7. Méthode de relevé de bioindication lichénique.....41
I.4.3. Calcul des descripteurs atmosphérique et édaphique.....43
I.4.4. Calcul de l'indice de vulnérabilité environnementale (IVen).....46
I.5. Calcul de l'indicateur global de vulnérabilité environnementale et sanitaire (IgV).....47
I.6. Traitements statistiques.....47
I.7. Méthodologie enquête sociologique.....48
II. Résultats.....52
II.1. Indice écologique.....52
II.2. Indice socio-économique.....59
II.3. Indice environnemental.....62
II.3.1. Exposition environnementale en métaux.....62
II.3.2. Exposition environnementale en HAP.....64
II.3.3. Exposition environnementale en pesticides.....67
II.3.4. Evaluation des indicateurs d'impacts et de qualité.....72
II.3.5. Détermination et interprétation des descripteurs et de l'indice environnemental….75
II.4. Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires.....78
II.5. Premiers résultats de l'enquête sociologique.....81
II.5.1. Rôle des politiques publiques et interactions entre les acteurs du territoire.....81
II.5.2. Implication citoyenne et adaptation des pratiques.....83
II.5.3. Préconisations.....87
CONCLUSIONS &PERSPECTIVES.....89
Références bibliographiques.....93
ANNEXES.....104

Index des Figures

Figure 1 : Schéma présentant les thématiques et variables d'intérêt associées à l'évaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires.....2

Figure 2 : Cartographie des IRIS sélectionnés et des sites de prélèvement répartis sur les villes de Fos-sur-Mer, Saint-Martin-de-Crau et Marseille.....9

Figure 3 : Carte des espaces naturels protégés et des parcs urbains référencés sur le département des Bouches-du-Rhône.....13

Figure 4 : Carte présentant les données BDTopo8 portant sur le réseau et les surfaces hydrographiques à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau.....17

Figure 5 : 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).....35

Figure 6 : Méthode de relevé de bioindication sur le terrain.....42

Figure 7 : Stratification géographique de l'enquête quantitative. Chaque groupe de codes postaux (A, B, C et D) compte ¼ des résidences principales de l'ensemble des enquêtés.....50

Figure 8 : Cartographie (A) du nombre d'espèces recensées et statut de protection et (B) selon la répartition des groupes taxonomiques identifié dans chaque IRIS à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau 53

Figure 9 : Cartographie (A) de la densité de drainage du réseau hydrographique, (B) de la part de recouvrement des surfaces hydrographiques calculée à partir de BD_Topo et (C) de la longueur du littoral d'après les données BDTopo8 sur les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau.....54

Figure 10 : Carte du descripteur biodiversité (BioD) hydrologique (HydD) et de l'indice écologique (IVec) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau.....56

Figure 11 : Cartographie des sols inscrits dans la base de données Secteurs d'Information des Sols (SIS) dans les IRIS sélectionnés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau.....60

Figure 12 : Carte du descripteur démographique (DemD), d'activités anthropiques (ActD) et de l'indice socio-économique (IVse) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau.....61

Figure 13 : Cartographie des valeurs du PI pour les métaux à l'échelle des sites et des IRIS des différentes villes étudiées.....64

Figure 14 : Cartographie des valeurs du PI pour les HAP à l'échelle des sites et des IRIS des différentes villes étudiées.....65

Figure 15 : Répartition géographique des concentrations en pesticides totaux, herbicides, fongicides et insecticides (ng/g) mesurées dans les lichens.....67

Figure 16 : Répartition géographique des concentrations en pesticides totaux et groupe de culture majoritaire.....70

Figure 17 : Répartition géographique des concentrations en pesticides totaux, herbicides, fongicides et insecticides (ng/g) mesurées dans les sols.....71

Figure 18 : Cartographie de la Valeur de diversité lichénique (VDL) calculée à l'échelle des sites et IRIS.....73

Figure 19 : Cartographie du stock de carbone établi pour chaque site et moyenné à la surface de l'IRIS.....75

Figure 20 : Carte du descripteur édaphique (SolD), atmosphérique (AirD) et de l'indice environnemental (IVen) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau.....77

Figure 21 : Carte de l'Indicateur global de vulnérabilité environnementale et sanitaire (IgV) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau.....79

Index des Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des IRIS étudiés. Le code employé est obtenu par l'abréviation du nom des communes et du numéro des IRIS sélectionnés.....8

Tableau 2 : Pondération appliquée sur les différents niveaux de menace de la Liste Rouge de l'UICN.....15

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des variables et de leur source du descripteur biodiversité.....16

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des variables du descripteur hydrologique et de leur source.....20

Tableau 5 : Description et coefficient de pondération de chaque variable composant les deux descripteurs BioD et HydD.....22

Tableau 6 : Variables sélectionnées et source de données pour la construction du descripteur des activités anthropiques.....25

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des variables du descripteur démographique et de leur source.....26

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des pondérations appliquées pour chaque variable de l'indice socio-économique.....27

Tableau 9 : Description des sites d'études utilisés pour le calcul du bruit de fond lichénique (BDF-L) en région méditerranéenne.....40

Tableau 10 : Valeur du BDF-L régional pour les métaux et HAP (n=34).....41

Tableau 11 : Variables sélectionnées pour chaque descripteur, description et source des données.....45

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des pondérations appliquées pour chaque variable de l'indice de vulnérabilité environnementale (IVen).....46

Tableau 13 : Présentation du public enquêté et leur numéro de référence correspondant.....49

Tableau 14 : Caractéristiques sociodémographiques des 515 enquêtés.....50

Tableau 15 : Valeur de chaque variable de l'indice écologique calculée à l'échelle des IRIS étudiés.....55

Tableau 16 : Valeur de chaque variable des descripteurs ActD et DemD et de l'IVse calculée à l'échelle 2 IRIS étudiés.....60

Tableau 17 : Valeur de chaque variable de l'indice environnemental calculée à l'échelle des IRIS étudiés....76

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 quatre ans avec le soutien financier de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (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 avec in fine la possibilité d'identifier un gradient de pressions anthropiques en fonction des enjeux et de faire ressortir les zones les plus extrêmes, les plus critiques au regard de leur intérêt patrimonial, urbanistique et environnemental. Cette méthodologie vise ainsi à faciliter l'application des nouvelles obligations légales en France en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme (à l'échelle locale).

Dans un contexte d'intensification des activités humaines et d'urbanisation croissante, 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 (Îlots 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'étude de ces unités territoriales permettra de mieux visualiser les variations spatiales des résultats obtenus.

De manière générale, le projet EVALVIE a pour objectif d'évaluer, à l'échelle des unités d'IRIS, la vulnérabilité à travers les trois types d'enjeux : écologique, socio-économique et environnemental afin d'élaborer l'indice de vulnérabilité environnementale et sanitaire. L'objectif est ainsi de déterminer la vulnérabilité des différents enjeux aux aléas liés à la contamination/perturbation des milieux en caractérisant précisément l'exposome (population et écosystèmes) (Figure 1).

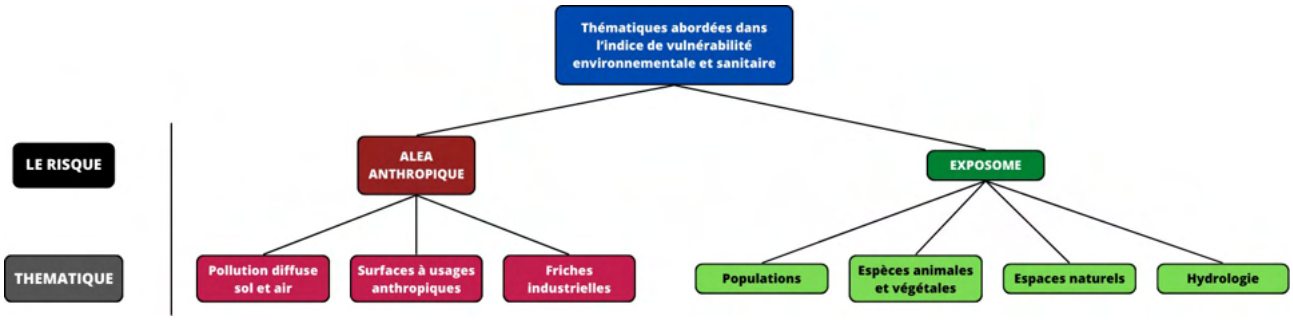


Figure 1 : Schéma présentant les thématiques et variables d'intérêt associées à l'évaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires

PARTIE 1

I. Difficultés rencontrées

Plusieurs points ont nécessité une attention particulière et un temps plus ou moins important de traitement. Au cours de la 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 derniers ont empêché le déblocage des budgets des partenaires universitaires limitant leur action et leur possibilité de recrutement sur cette première année. Les retards ont été répercutés sur les années suivantes et ont abouti à une demande de prolongement d'un an du financement pour finaliser le projet et sa restitution publique dans de bonnes conditions.

Par ailleurs, quelques difficultés sont apparues pour l'obtention des autorisations d'accès sur certains secteurs et notamment à Marseille-Sud. La recherche de site et l'obtention des autorisationd d'accès et de prélèvements se sont étalées sur une année.

Le traitement des données brutes (BD_Topo, IGN, INSEE, INPN, UICN) avec le logiciel Q-GIS, leur croisement et leur automatisation ont demandé beaucoup d'investissement au cours du projet, qui n'avait pas été entièrement anticipé. Ce travail a été réalisé grâce à l'implication et aux compétences de Eliot Pierreuse recruté en tant que stagiaire M2 puis ingénieur géomaticien sur le projet de 2022 à 2024.

Enfin, des données parcellaires sur les nappes souterraines ou les inventaires de biodiversité ouvrent la possibilité d'apporter des modifications sur les jeux de données utilisés pour le calcul de l'Indice écologique en fonction de l'évolution des jeux de données en libre accès.

Les quelques difficultés et imprévus ont donc tous pu être surmontés lors du projet.

II. Atteinte des objectifs, livrables

L'ensemble des livrables prévus au projet ont été produits ou sont en cours de publication notamment pour les articles scientifiques. A noter, que nous sommes toujours en cours de discussion avec les services de la Métropole Aix-Marseille-Provence (MAMP) pour l'intégration des données acquises sur la plateforme métropolitaine des données. Un travail similaire pourra être mise en œuvre pour l'intégration des données dans les BDD nationales type BD-Sol-U.

Pour la communication du projet sur le territoire (collectivités, acteurs associatifs, industriels, service de l'État, …), un document de présentation a été conçu et diffusé très largement. Une communication

vers l'ensemble des collectivités concernées par le projet a été réalisée (communes de Fos-sur-Mer, Marseille et Saint-Martin-de-Crau et MAMP) à travers une présentation du projet aux différentes mairies et aux services techniques de chaque commune.

Quatre comités de pilotage (20/09/2021, 19/09/2022, 18/09/2023, 09/10/2024), réunissant l'ensemble des partenaires du projet, et trois comités de suivi (20/09/2022, 22/09/2023 et 14/10/2024), composé des partenaires du projet ainsi que d'experts extérieurs et acteurs du territoire, ont été organisés depuis le début du projet. L'ensemble des comptes rendus de ces différentes réunions ont été transmis à l'ensemble des participants. 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).

Ils ont été complétés par plusieurs réunions informelles entre quelques partenaires 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, des réunions ont été effectuées pour échanger sur la mise en œuvre conjointe des enquêtes sociologiques relatives aux projets OMISEP et EVALVIE.

Une restitution publique du projet a été organisée et adressée à un public ciblé et invité (recherche universitaire et académique, collectivités, acteurs du territoire, association de citoyens, propriétaires des terrains investigués) le 12 juin 2025 au Palais du Pharo à Marseille en présence de l'ensemble des partenaires et financeurs du projet. 30 personnes étaient présentes sur 45 inscrits, et les échanges ont été suivis par 61 personnes en visioconférence. Pour accompagner cette restitution, un dossier de

presse a été préparé pour faciliter la compréhension du projet et de ces résultats auprès des médias (presse papier, radios, et internet).

Au delà de quelques articles de journaux présentant le projet et ces objectifs, plusieurs publications ont été mises en ligne à travers nos réseaux sociaux et une page internet dédiée à la présentation du projet EVALVIE a été ouverte sur le site internet de l'IECP (https://www.institut-ecocitoyen.fr/page.php?idp=37&idt=3).

Dans le cadre du suivi du projet deux rapports d'avancement ont été rédigés ainsi que ce rapport final. Ces rapports sont complétés par quatre rapports de stage effectués dans les différentes structures partenaires du projet (CEREGE, LPED, DYNAFOR et IECP). De plus, le projet EVALVIE et les premiers résultats associés ont été présentés dans le cadre d'un webinaire organisé le 20/03/2024 et rassemblant près de 80 personnes en visioconférence, principalement des agents, élus des collectivités et des structures professionnelles (bureau d'étude recherche académique).

La valorisation scientifique en cours a déjà fait l'objet d'un article publié dans la revue « Science of The Total Environment » en 2024 portant sur le développement analytique pour l'analyse des pesticides dans les lichens (https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177286). Un article a été récemment soumis à « Nature Sciences et Sociétés » concernant les résultats de l'enquête sociologique. Par ailleurs, deux articles sont en cours de rédaction autour des enjeux écologiques et environnementaux. Enfin, une présentation a été effectuée au Congrès International ICOBTE-ICHMET organisé en Corée du Sud en septembre 2025 par Catherine Keller.

La mise en ligne des bases de données et cartographies produites pourra être mise en œuvre à partir de 2026 après validation de la démarche sur un site internet dédié ou via la plateforme des données de la MAMP.

Enfin, le questionnaire dédié à l'enquête sociologique est disponible en Annexe 2. Dans le cadre de cette approche sociologique, un focus groupe a été organisé en 2023 à l'IECP à travers son réseau de Volontaires pour l'Observation Citoyen de l'Environnement (VOCE) qui compte près de 150 personnes (https://www.institut-ecocitoyen.fr/voce.php). Par ailleurs, deux formations sur les relevés de diversité lichénique ont été réalisées dans le cadre de ce projet à destination de 16 personnes qui pour la majorité aujourd'hui poursuivent leur action dans le suivi citoyen de la diversité lichénique du territoire métropolitain. Les rapports d'étude de ces suivis citoyen de la diversité lichénique sont disponibles sur le site internet de l'Insitut Ecocitoyen.

III. Verrous et perspectives

Suite à la validation de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires définie enjeu par enjeu, un travail d'intégration des données sur l'ensemble de la MAMP est envisagée notamment pour les enjeux écologiques et socio-économiques définis à travers des jeux de données en libre accès sur internet (INSEE, OCSOL, UICN, CASIAS, BASOL, SIS, IGN, …). Ce travail nécessiterait un investissement dans le domaine de la géomatique à l'IECP en relation étroite avec les services de la MAMP pour la mise à disposition et l'utilisation des données au sein de la collectivité. Concernant les enjeux environnementaux, et plus précisément l'approche par biosurveillance lichénique, l'intégration des données à l'échelle de la MAMP nécessitera un travail plus lourd et fera l'objet de recherche de financements (dont l'AAP ADEME AQACIA prévu en 2026). Il portera sur une analyse robuste des données de biosurveillance acquises par l'IECP depuis 2011 accompagnée de modélisations incluant les des facteurs biotiques et abiotiques (météo, topographie, émissions, …) et des croisements avec les données et modèles Atmosud pour permettre une caractérisation des expositions à l'échelle des IRIS sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Des réflexions ont récemment été lancées entre les partenaires EVALVIE pour le développement d'un outil de calcul automatisé des indices par enjeu et de l'indicateur global de vulnérabilité. Cet outil serait disponible pour la communauté scientifique et les acteurs locaux et hébergé sur les sites internet partenaires ou sur un site dédié.

Enfin, un croisement des méthodes EVALVIE et OMISEP est envisagé avec l'INERIS et les partenaires du projet EVALVIE permettant de compléter l'évaluation de la vulnérabilité par le calcul des risques cumulés. Les données environnementales acquises dans le cadre d'EVALVIE et la description des écosystèmes associés pourraient être utilisées comme données d'entrée du modèle OMISEP permettant d'affiner les résultats obtenus à l'échelle des IRIS. Il permettrait de surcroît de préciser les scenarii d'exposition à travers les variables d'entrée de l'indice écologique et d'appliquer la méthode à d'autres voies d'exposition (inhalation). La comparaison des deux approches et des résultats obtenus au sein des mêmes territoires d'étude pourrait s'avérer pertinente pour améliorer la qualité des modèles et les pondérations définies dans EVALVIE.

IV. Points d'attention pour l'ADEME

Nous restons à l'écoute des appel à projets publiés par l'ADEME et espérons trouver un écho favorable dans les perspectives envisagées pour le projet EVALVIE et son croisement avec le projet OMISEP.

PARTIE 2 : Développement méthodologique et résultats

I. Développement méthodologique

I.1. Définition de l'échelle territoriale et sites d'étude

L'outil d'aide à la décision élaboré dans ce travail se construit à l'échelle des Îlots regroupés pour l'information statistique (IRIS). Cette unité spatiale créée par l'INSEE découpe le territoire français en maille infra-communale respectant des critères d'homogénéité géographique et démographique appliquée aux communes supérieures à 5 000 habitants. Trois types d'IRIS existent :

- Les IRIS d'habitat : leur population se situe en général entre 1 800 et 5 000 habitants. Ils sont homogènes quant au type d'habitat et leurs limites s'appuient sur les grandes coupures du tissu urbain (voies principales, voies ferrées, cours d'eau…).
- Les IRIS d'activité : ils regroupent plus de 1 000 salariés et comptent au moins deux fois plus d'emplois salariés que de population résidente.
- Les IRIS divers : il s'agit de grandes zones spécifiques peu habitées et ayant une superficie importante (parcs naturels, zones portuaires, forêts…).

Afin d'élaborer une méthode pour définir un indice de vulnérabilité environnementale et sanitaire applicable à tous types de territoire, trois communes du département des Bouches-du-Rhône ont été sélectionnées présentant des environnements et des activités anthropiques bien distinctes (Figure 2) :

- Saint-Martin-de-Crau (SMC) : commune d'une superficie très étendue (214,9 km² – 13 962 habitants) avec des surfaces agricoles importantes et traversée par l'autoroute A54 avec un trafic dense et régulier ;
- Fos-sur-Mer (FOS) : zone urbanisée de moyenne importance (92,3 km² - 15 694 habitants) abritant un port industriel majeur. Deuxième ville de France possédant le plus d'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) soumises à la directive européenne Seveso (14 sites et 43 aux alentours), formant le plus important port de commerce français. Cette implantation s'accompagne de flux logistiques importants tant maritimes que routiers rendant cette zone urbanisée particulièrement exposée aux émissions atmosphériques ;

- Marseille (MRS) : ville portuaire étendue et densément peuplée (240,6 km² - 877 215 habitants) présentant un passé industriel lourd (fonderie de plomb, usine de soude, usine chimique, tuilerie et cimenterie, …) ayant entraîné une contamination des sols importante dans certains secteurs de la ville.

Dans chaque ville, plusieurs IRIS ont été sélectionnés pour couvrir divers types de contextes environnementaux et d'habitats et représenter l'hétérogénéité du territoire départemental. Au total, neuf IRIS ont été choisis représentant la diversité des contextes territoriaux (Tableau 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/Contexte	Surface (km²)	Nombre de sites
FOS-104	104	Brûle Tabac-Roques-Gajelon	Fos-sur-Mer	Activité/ Industriel	17,7	3 (CAB, GOU, TON)
FOS-101	101	Mazet nord-Pont du Roi-Salins	Fos-sur-Mer	Habitat/ Urbain-industriel	15,0	3 (ENG, FOA, FOM)
MRS-101	101	Château Bovis	Marseille	Habitat/Urbain	1,1	2 (MN1, MN2)
MRS-502	502	Fontobscure	Marseille	Habitat/Urbain	0,5	1 (MRS)
MRS-303	303	Campagne Pastré	Marseille	Habitat/Urbain	2,3	2 (MS1, MS2)
MRS-301	301	La Verrerie	Marseille	Habitat/Urbain	0,7	1 (MS3)
SMC-102	102	La Crau	St-Martin-de-Crau	Divers/Agricole	146,1	3 (ENT, SMO, TNT)
SMC-103	103	Caphan	St-Martin-de-Crau	Habitat / Urbain-agricole	2,4	2 (CPH, SMN)
SMC-105	105	Le Lac	St-Martin-de-Crau	Habitat/Urbain	0,6	1 (SME)

Source : Géoportail, INSEE

Pour les enjeux écologiques et socio-économiques, une méthodologie d'évaluation a été développée à l'échelle des IRIS avec la sélection de variables dont les BDD sont en libres accès (INSEE, BDOcSol, IGN, BASOL, …).

Les enjeux environnementaux ont été déterminés à partir de campagne de terrains permettant d'évaluer la qualité des sols et l'exposition atmosphérique par IRIS. Pour se faire, un plan d'échantillonnage a été défini à partir des unités d'IRIS caractérisées par leur type d'environnement (agricole, urbain ou industriel) (Figue 2). Ainsi, le nombre et le choix des sites d'études par IRIS ont été définis à partir de la superficie de chaque IRIS et de leur variabilité spatiale :

- un point de prélèvement lorsque la surface de l'IRIS est inférieure à 1 km² ;
- deux points de prélèvement lorsque la surface est comprise entre 1 et 5 km² ;
- trois points de prélèvement lorsque la surface de l'IRIS est supérieure à 5 km².

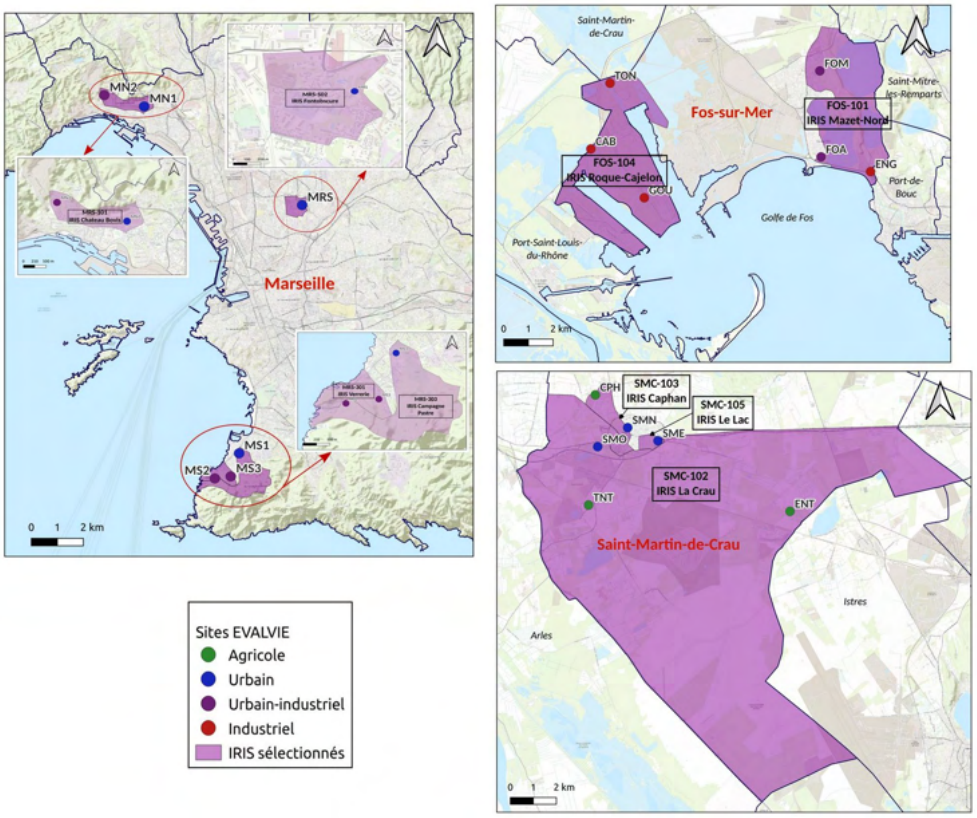


Figure 2. Cartographie des IRIS sélectionnés et des sites de prélèvement répartis sur les villes de Fos-sur-Mer, Saint-Martin-de-Crau et Marseille (Fond de carte : IGN – Austruy, 2023 – EVALVIE - ADEME).

Au total, 18 sites répartis sur 9 IRIS ont été sélectionnés (Tableau 1 et Figure 2), 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.

Le repérage des sites d'étude a été effectué en septembre 2021 avant la réalisation des campagnes de terrain en 2022 et 2023.

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. Les résultats acquis par parcelle (rédigés sous forme de fiche étude) ainsi que le rapport final du projet sera transmis à l'ensemble des propriétaires des terrains échantillonnés.

I.2. Enjeux écologiques

La méthode développée a pour but de définir et sélectionner un certain nombre de variables écologiques permettant le calcul de l'indicateur de vulnérabilité écologique. Il a été réalisé à l'échelle de l'IRIS sur les 3 communes sélectionnées pour le projet EVALVIE, Marseille, Saint-Martin-de-Crau et Fos-sur-Mer.

L'indice de vulnérabilité écologique vise à évaluer la vulnérabilité du patrimoine naturel à une éventuelle source de pollution. Cet enjeu repose sur deux piliers distincts : (i) l'aspect écologique des écosystèmes, incluant les aires protégées et les espèces, (ii) l'hydrologie et les voies de transfert. Ainsi, pour élaborer l'indice écologique, il s'agit de construire étape par étape les descripteurs : le descripteur biodiversité (BioD) et le descripteur hydrologique (HydD).

Le descripteur biodiversité vise à évaluer le patrimoine écologique de l'espace étudié, à travers la biodiversité (faune et flore) (Lorant-Plantier, 2014 ; Escobar-Camacho et al., 2021), les habitats naturels protégés (Le Berre et al., 2011 ; Lorant-Plantier, 2014 ; Ashimova et al., 2023) et les habitats naturels urbains (Ives et al., 2016 ; Aronson et al., 2017). Cette notion de biodiversité des espèces et des espaces est souvent intégrée aux indicateurs de vulnérabilité environnementale (Mingwu et al., 2010 ; Lorant-Plantier, 2014 ; Ebner, 2017). Une biodiversité élevée est un facteur aggravant de vulnérabilité. En effet, plus le nombre d'espèces animales et végétales recensées sur un territoire est important, plus le nombre d'espèces susceptibles d'être affectées par la pollution est élevé.

Il est complété par le descripteur hydrologique, afin de prendre en compte le transferts des polluants via le réseau hydrographique (Hilal et al., 2015 ; Boko et al., 2017 ; Fraixedas et al., 2019), mais également les surfaces en eau (Sola et al., 2024) et le littoral (Crouteix, 2021) en tant qu'espaces naturels fragiles et abritant de nombreuses espèces. En effet, les zones humides et cours d'eau constituent des réserves de biodiversité et des aires naturelles sensibles (UNESCO, 1971), particulièrement abondantes sur le littoral méditerranéen (Fraixedas et al., 2020). Le rôle

majeur dans le cycle de l'eau et les transferts, la sensibilité et la grande richesse de ces milieux accentuent leur vulnérabilité vis-à-vis des contaminations anthropiques.

La sélection des données et des variables s'est appuyée sur la littérature existante ainsi que sur la disponibilité et la qualité des jeux de données. Ces derniers devaient être disponibles à l'échelle des IRIS. De plus, l'objectif était de créer un indicateur réutilisable dans tout le Département des Bouches-du-Rhône, voire à l'échelle nationale. Les données devaient donc être disponibles sur l'ensemble du territoire français. Elles devaient également être en accès libre, téléchargeables gratuitement et sans autorisation. La méthodologie aboutit à la création de nouvelles bases de données, les traitements et modélisations appliqués permettront de croiser ces descripteurs pour définir un indice écologique.

La description détaillée de ce travail est présentée dans le rapport de stage de Eliot Pierreuse, en stage de Master 2 au LPED de Aix-Marseille Université de février à août 2023 (Pierreuse, 2023) et fait l'objet de la rédaction d'un article scientifique en cours de finalisation.

I.2.1 Définition du descripteur biodiversité (BioD)

I.2.1.1. Evaluation du statut de protection des IRIS

Le site de l'INPN (Inventaire National du Patrimoine Naturel) s'est avéré très complet concernant les données partagées sur les espaces naturels. Ce portail de la biodiversité et de la géodiversité inventorie les richesses écologiques, faunistiques, floristiques, géologiques, minéralogiques et paléontologiques françaises et d'outre-mer. Ce site met ainsi à disposition de nombreuses données en libre accès sur les périmètres des espaces naturels protégés et sur certains inventaires d'espèces à l'échelle nationale. Afin d'organiser les espaces naturels, ils seront présentés selon leur type de protection différencié par l'UICN.

Les espaces naturels sous protection foncière (la maîtrise foncière) consiste à « acquérir des terrains afin d'assurer la protection définitive d'un espace naturel remarquable. Cette approche est privilégiée dans les zones menacées par l'urbanisation ou, à l'inverse, marquées par l'abandon de pratiques agricoles et pastorales favorables à la biodiversité » (UICN France, 2013). Ces mesures ont pour avantage d'être pérennes mais ne garantissent pas forcément une protection très stricte sur l'espace en question. Elles favorisent au contraire souvent des aménagements et une gestion durable du milieu. Sont distingués comme espaces naturels sous protection foncière :

- Espaces Naturels Sensibles ;

- Terrains acquis des Conservatoires d'Espaces Naturels ;
- Terrains acquis des Conservatoires du Littoral.

Les espaces sous protections réglementaires consistent à « encadrer voire interdire des activités humaines qui peuvent perturber les milieux naturels. Elles se traduisent par la mise en place de réglementations strictes en matière de gestion de la faune, de la flore et des écosystèmes » (UICN France, 2013). Ces réglementations peuvent être très fortes et interdire toute activité humaine sur l'espace protégé, mais ont parfois le désavantage de ne pas durer dans le temps. La protection peut en effet disparaître sous la pression de divers acteurs. Quatre espaces naturels sont répertoriés sous protection réglementaire :

- Réserves naturelles nationales et régionales ;
- Réserves biologiques ;
- Arrêté de protection du biotope ;
- Espaces naturels sous convention européenne ou internationale.

Enfin, un espace naturel peut être sous protection contractuelle. Cela consiste à « déléguer à un tiers pour une durée déterminée, la gestion de cet espace dans le cadre d'une convention de maîtrise d'ouvrage » (UICN France, 2013).

Le niveau de protection de l'environnement est souvent évalué en additionnant les différents types d'aires naturelles protégées présentes dans la zone d'étude (Ashimova et al., 2023 ; Ebner, 2017 ; Le Berre et al., 2011 ; Lorant-Plantier, 2014). Cette méthode permet de mettre en évidence la diversité et le nombre de périmètres de protection et repose sur le principe que plus une région comporte de différentes aires protégées superposées, plus son patrimoine écologique est riche. Cette méthode s'appuie souvent sur une pondération pour classer ces différentes aires naturelles protégées. D'autres méthodes existent telles que le calcul de la part de superficie entre les aires naturelles protégées et l'environnement étudié (Leberger et al., 2020). Cette variable permet de calculer l'importance de la superficie de ces périmètres protégés, mais pas leur cumul. En conséquence, la méthodologie développée dans ce travail repose sur l'évaluation du niveau de protection en additionnant les parts de superficie de chaque type d'aire naturelle protégée dans l'IRIS (Eq.1). Cette méthode, qui combine les deux précédemment présentées, permet d'estimer simultanément le cumul des périmètres de protection et leur importance, en termes de superficie dans l'IRIS. Cela signifie qu'un IRIS peut avoir une part de recouvrement supérieure à 100 % s'il est recouvert en grande partie par plusieurs périmètres de projections différents. Cette méthode

permettra de donner plus d'importance aux IRIS fortement protégés, tant en surface qu'en nombre de périmètres différents (Figure 3).

Les environnements urbains sont naturellement mis à l'écart des données précédentes. Il y a en effet peu de chances pour qu'un inventaire de biodiversité ou un espace naturel protégé se trouve au cœur du tissu urbain. Le Parc National des Calanques à Marseille est bien inclu dans le périmètre de la ville mais une grande partie est couverte par des zones non habitées (IRIS divers) et ne peut donc pas être considérée comme tissu urbain. Comptabiliser la présence de parcs urbains, via leur part de recouvrement sur l'IRIS, permet ainsi de considérer les enjeux écologiques dans les zones urbaines, et notamment la biodiversité urbaine. En effet, ces espaces verts urbains sont importants pour la protection de la biodiversité et abritent de nombreuses espèces menacées (Aronson et al., 2017 ; Ives et al., 2016), ils présentent donc un intérêt écologique et leur part de recouvrement sur l'IRIS est donc intégrée au calcul de l'indice écologique (Figure 2). Ce paramètre, dont les données proviennent de la BD OCSOL-2019, repose sur le même calcul que pour la part de recouvrement des espaces de protection (Eq.1).

$$Part\ recouvrement = \frac{\sum surface\ zone\ protection\ et\ /\ ou\ parc\ urbain}{surface\ IRIS} \qquad \text{Eq.1}$$

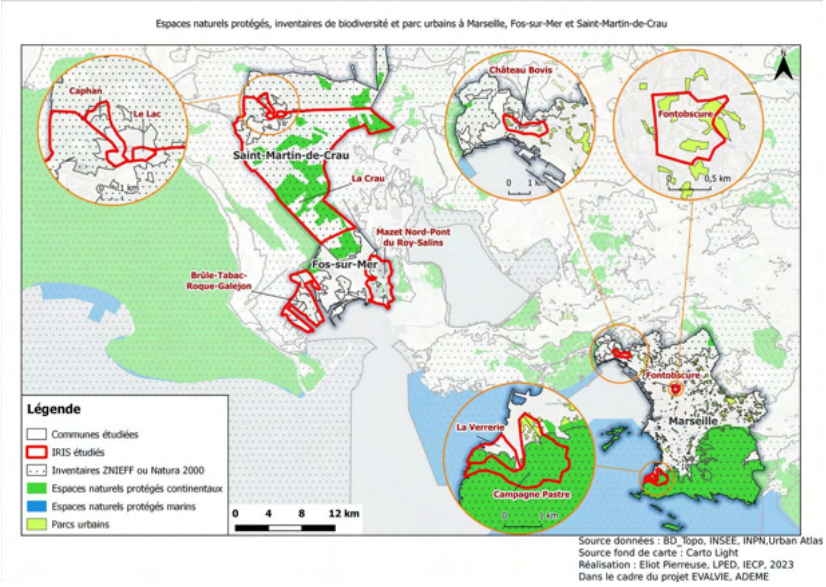


Figure 3 : Carte des espaces naturels protégés et des parcs urbains référencés sur le département des Bouches-du-Rhône. (Source données : BD_Topo, INPN, INSEE, Urban Atlas – Source fond de carte : Carto Light – Réalisation : Pierreuse, 2023, projet EVALVIE – ADEME).

I.2.1.2. Intégration des inventaires de biodiversité

Différents inventaires d'habitats et d'espèces ont été étudiés pour prendre en compte la biodiversité dans la conception du descripteur. L'inventaire CarHab, qui cartographie les habitats sur le territoire national, aurait pu convenir, mais les données ne sont pas encore disponibles sur le territoire des Bouches-du-Rhône et ne sont donc pas analysables. En revanche, les inventaires de biodiversité des sites ZNIEFF et Natura 2000 sont disponibles au téléchargement sur le site de l'INPN sur tout le territoire français. Les inventaires officiels considérés sont les suivants :

- Les inventaires des Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) qui recensent les espèces déterminants l'intérêt patrimonial de la zone ainsi que d'autres espèces présentes dans cet espace ;
- Les Zones de Protection Spéciales (ZPS) et les Zones Spéciales de Conservation (ZSC) ;
- Les inventaires Natura 2000 recensent les espèces annexées à la directive européenne oiseaux et à la directive européenne habitats-faune-flore ;
- La Liste Rouge nationale de l'UICN est un classement des espèces présentant un risque avéré d'extinction globale (Tableau 2).

Ces inventaires ne sont pas complètement exhaustifs, il recense uniquement les espèces d'importance communautaires et/ou déterminantes du milieu. Au total, 14 bases de données différentes ont été croisées afin de construire cette base de données, elles permettront de comptabiliser le nombre d'espèces potentiellement présentes sur le territoire de chaque IRIS étudié et leur niveau de menace.

Ainsi, pour intégrer les inventaires de biodiversité, la méthodologie appliquée vise à importer dans les IRIS étudiés les espèces recensées ainsi que leur niveau de menace selon la Liste Rouge nationale de l'UICN. Pour faciliter le traitement, il a été considéré que si la totalité ou une partie du périmètre d'un inventaire d'espèces se situe dans l'un des IRIS, toutes les espèces recensées pouvaient potentiellement y être présentes. L'objectif final est d'obtenir une base de données recensant chaque espèce, son niveau de menace, le site ZNIEFF ou Natura 2000 dans lequel elle a été recensée et l'IRIS dans lequel elle peut potentiellement se trouver.

Les données de ces inventaires ont été intégrés aux périmètres des IRIS étudiés après une étape de fiabilisation de la data (tri de certaines espèces dont le code n'était plus à jour, suppression d'éventuels doublons, etc.). Au delà du nombre d'espèces identifiées dans chaque IRIS, pour ne pas surévaluer les IRIS de petite taille, la densité de la richesse des espèces est intégrée à l'équation.

Ainsi, deux IRIS juxtaposés de taille différente dont les périmètres sont croisés par les mêmes inventaires auront donc un nombre d'espèces recensées identique mais une densité d'espèces différente.

Le niveau de menace de chaque espèce est couplé à ces données afin de considérer la présence des espèces menacées d'extinction en appliquant une pondération exponentielle pour chaque niveau de menace (Lorant-Plantier, 2014 ; Escobar-Camacho et al., 2021). Plus une espèce est vulnérable selon la Liste Rouge nationale de l'UICN, plus elle aura de poids dans le calcul. Cette liste classe les espèces risquant de s'éteindre à l'échelle nationale en fonction de nombreux critères : abondance de l'espèce, variation de la population, mode de reproduction, zone d'occupation, etc. (UICN, 2012). La pondération appliquée en fonction du niveau de menace est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Pondération appliquée sur les différents niveaux de menace de la Liste Rouge de l'UICN (Lorant-Plantier, 2014)

Abréviation	Signification	Pondération
LC	Préoccupation mineure	0
NT	Quasi-menacé	0,5
VU	Vulnérable	1
EN	En danger	3
CR	En danger critique	6
NA	Non applicable	0
NE	Non évalué	0
DD	Données insuffisantes	0

I.2.1.3. Calcul du descripteur biodiversité (BioD)

Le calcul du descripteur biodiversité, noté BioD dans l'équation, prend ainsi appui sur cinq variables résumées dans le Tableau 3 :

- La richesse des espèces potentiellement présentes dans l'IRIS, noté « A » ;
- La densité de cette richesse d'espèces, noté « B » ;
- La richesse des espèces menacées selon la Liste Rouge nationale de l'UICN avec leur pondération, noté « C » ;

- La part de recouvrement des périmètres de protection des espaces naturels sur l'IRIS, noté « D » ;
- La part de recouvrement des espaces verts urbains notée « E ».

Pour les variables B et C, concernant le nombre d'espèce et leur densité, des logarithmes sont utilisés pour ramener les valeurs sous un même ordre de grandeur. Cette fonction permet de mettre en valeur la présence ou non d'inventaires d'espèces sur le territoire, quand bien même le nombre d'espèces recensées dans celui-ci n'était pas très important.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des variables et de leur source du descripteur biodiversité

Thématique abordée	Variable	Code	Source des données
Richesse des espèces	Logarithme 10 du nombre d'espèces distinctes recensées	**A**	Natura 2000, Znieff
Densité de la richesse d'espèces	Logarithme 10 du nombre d'espèces distinctes recensées rapportée à la surface de l'IRIS	**B**	Natura 2000, Znieff
Richesse des espèces menacées	Total du nombre d'espèces menacées distinctes, pondérées selon leur niveau de menace	**C**	Natura 2000, Znieff, UICN
Espaces naturels protégés	Superficie cumulée de chaque type d'espaces naturels protégés dans l'IRIS rapportée à la superficie de l'IRIS	**D**	INPN
Espaces verts urbains	Superficie des parcs urbains dans l'IRIS rapportée à la superficie de l'IRIS	**E**	BD OCSOL 2019

Le descripteur biodiversité s'est appuyé sur les travaux proposés par Lorant-Plantier (2014) portant sur la vulnérabilité écologique des milieux, il est défini par l'Eq.2.

$$BioD = 0{,}50 * (\log(A))norm + 0{,}25 * (\log(B))norm + Cnorm + 0{,}50 * Dnorm + 0{,}25 * Enorm \quad \text{Eq.2}$$

Une normalisation min-max ((xn – xmin)/(xmax – xmin)) est appliquée à chaque variable pour obtenir des valeurs comprises entre 0 et 1 et permettre leur pondération en fonction du poids attribué à chacune. La normalisation linéaire min-max est une méthode courante qui a été

appliquée à la méthodologie EVALVIE (Tate, 2012). Elle consiste à ramener l'échelle de toutes les variables entre 0 et 1.

I.2.2. Définition du descripteur hydrologique

Les données open-source sur l'hydrologie en France disponible sur le portail IGN, via BD Topo8, ont été utilisées pour le calcul du descripteur hydrologique. Le jeu de données « Tronçons hydrographiques » permet d'appréhender le réseau hydrographique d'un espace. Il correspond à « l'axe du lit d'une rivière, d'un ruisseau ou d'un canal, homogène pour ses attributs et ses liens et n'incluant pas de confluent en dehors de ses extrémités » (IGN, 2021). Concernant les plans d'eau, le jeu de données « Surfaces hydrographiques » de BD Topo offre les informations nécessaires. Une surface hydrographique est « une zone d'origine naturelle ou artificielle, temporaire ou permanente, couverte d'eau continentale de surface, douce ou salée ou couverte de glace persistante » (IGN, 2021). On y retrouve ainsi les retenues d'eaux artificielles ou naturelles comme les lacs et les étangs, mais également toutes les mares, marais, etc.

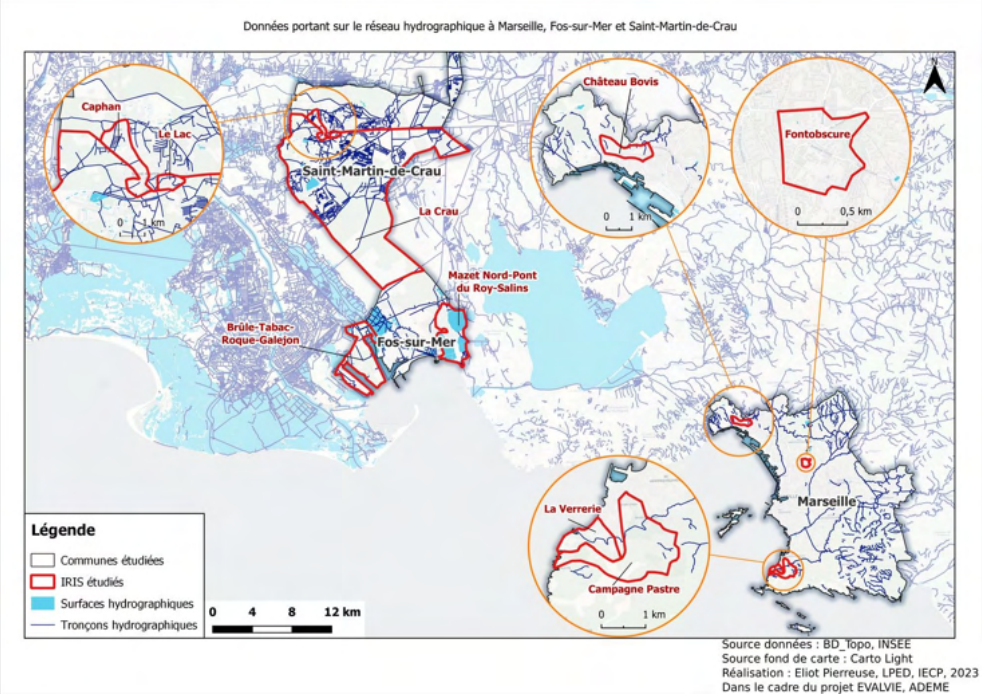


Figure 4 : Carte présentant les données BDTopo8 portant sur le réseau et les surfaces hydrographiques à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau (Source données : BD_Topo, INSEE – Source fond de carte : Carto Light – Pierreuse, 2023, EVALVIE – ADEME).

Ces deux jeux de données, disponibles sur tout le territoire français, ont été préalablement triés afin de ne pas surévaluer le réseau hydrographique redondant. Dans le détail, un léger tri a été effectué sur les données de BD_Topo « Tronçons hydrographique » pour considérer seulement les réseaux en eau au moins une partie de l'année. Les bras secondaires de certains écoulements, considérés comme « morts » ont été supprimés. Il en est de même pour les parties du réseau considérées comme « sèches » tout au long de l'année. La Figure 4 récapitule les deux jeux de données bruts présentés ci-dessus dans les communes étudiées. Ces deux bases de données ont été traitées puis combinées afin de créer le descripteur hydrologique. Elles sont complétées par les données intégrant le calcul du périmètre du littoral méditerranéen pour chaque IRIS.

L'objectif est de faire ressortir les IRIS les plus exposés à une éventuelle pollution de l'eau et abritant des zones humides qui jouent un rôle majeur pour la biodiversité et le cycle de l'eau.

Ainsi, trois variables sont utilisées pour calculer ce descripteur :

- La densité de drainage du réseau hydrographique;
- La part de recouvrement des surfaces hydrographique dans l'IRIS ;
- La longueur du littoral par rapport à la surface de l'IRIS.

I.2.2.1. Réseau hydrographique et densité de drainage

Le réseau hydrographique est considéré comme d'une part une voie de transfert des potentiels contaminants et d'autre part un milieu de vie riche. Il est donc à ce titre un enjeu écologique majeur (Fraixedas et al., 2019 ; Zhang et al., 2023) et un milieu potentiellement vulnérable à la pollution (Hilal et al., 2015).

La densité de drainage du réseau hydrographique de chaque IRIS a été mesurée. Elle correspond à la longueur du réseau de drainage (en km) rapportée à la surface totale de l'IRIS (en km²) (Eq.3). La longueur du drainage est issue de la donnée « Tronçons hydrographiques » créée par l'IGN dans BD Topo. Pour la calculer, tous les tronçons hydrographiques de BD_Topo ont été regroupés puis intersectés avec les périmètres de l'IRIS afin de calculer la longueur de l'ensemble des segments.

$$Densité\ drainage(F) = \frac{a1}{d1} \qquad \text{Eq.3}$$

d1 : longueur cumulée des différents cours d'eau présents sur l'IRIS en km

a1 : surface de l'IRIS en km²

I.2.2.2. Détermination de la part de recouvrement des surfaces en eau

L'intégration des surfaces hydrographiques (étangs, mare, marais, tourbières etc.) permet de prendre en compte l'importance des zones humides, hot spot de biodiversité, et leur fragilité face aux perturbations anthropiques. Les surfaces en eaux sont représentées dans BD_Topo sous le nom de « Surfaces hydrographiques ». Un tri des données a été réalisé afin de ne pas surévaluer les surfaces en eau dans le périmètre de l'IRIS. Dans un premier temps, toutes les surfaces hydrographiques directement liées à l'écoulement, comme les canaux et autres écoulements naturels, ont été supprimées pour ne pas être redondant avec les données du réseau de drainage. De même, toutes les retenues portuaires et digues ont également été supprimées. Par ailleurs, les retenues d'eau ayant un usage exclusivement anthropique ont aussi été supprimées, relatif au faible enjeu écologique associé. Cela correspond aux retenues à usage industriel comme les plans d'eau de gravière, les plans d'eau de mine et les réservoirs-bassins (les bassins d'épurations, bassins de décantation, bassins de filtrage, bassins de lagunage, bassins ostréicoles, cressonnières, écrêteurs de crues, réservoirs d'eau à ciel ouvert, bassins de stockage incendie, bassins récréatifs). Pour évaluer les surfaces en eau, la part de recouvrement des surfaces hydrographiques sur la surface de l'IRIS a été calculée. La méthodologie est la même que celle des espaces naturels, c'est à dire additionner la part de recouvrement de chaque surface hydrographique par rapport à la surface de l'IRIS.

I.2.2.3. Détermination du périmètre de littoral marin par IRIS

La présence et l'importance du littoral dans un IRIS, en tant que milieu sensible récepteur des polluants (du fait de sa position en aval), ont été intégrées au calcul du descripteur hydrologique. Le périmètre du littoral marin a été calculé pour chaque IRIS à partir du jeu de données « Limite Terre-Mer » accessible sur BD_Topo.

Le logarithme du périmètre de littoral marin a ensuite été rapporté au logarithme de la surface de l'IRIS et normalisé. L'utilisation du logarithme permet de représenter des phénomènes très variables, et met en évidence les variations relatives. En amplifiant les variations proches de 0, les logarithmes mettent donc en valeur la présence d'une limite côtière, tout en prenant en compte sa longueur. Cette valeur rapportée au logarithme de la surface de l'IRIS permet ainsi de ne pas sur évaluer les grands IRIS.

I.2.2.4. Calcul du descripteur hydrologique

Ainsi, trois jeux de données sont traités et intégrés pour constituer le descripteur hydrologique, noté HydD dans l'équation (Tableau 4) :

- La densité de drainage du réseau hydrographique par IRIS, noté F ;
- La part de recouvrement des surfaces hydrographiques des IRIS, noté G ;
- Le périmètre de littoral marin par IRIS noté H.

Ce descripteur se construit de manière similaire à celle appliquée au descripteur habitat, c'est-à-dire en normalisant les valeurs et en donnant un coefficient à chaque partie du descripteur, méthode couramment utilisée dans la définition de descripteur (Gaucherel, 2003). Ce descripteur a pour objet l'évaluation des réseaux hydrographiques, jouant un rôle important dans la caractérisation et la sensibilité des milieux et l'identification des potentielles voies de transfert des pollutions chimiques par exemple (Cuartas et al., 2012). Les jeux de données réseaux et surfaces hydrographiques continentaux sont des systèmes fermés complètement intégrés dans le périmètre de l'IRIS contrairement au périmètre du littoral marin, dimension qui caractérise la présence d'une masse d'eau en périphérie de l'IRIS. De plus, les eaux continentales sont des sources d'apport pour le milieu marin et ont donc une importance majeure dans la caractérisation des milieux sensibles ou dans le transfert de contaminants. Nous avons donc considéré une pondération de 0,5 pour le descripteur littoral marin et un poids de 1 pour les descripteurs réseaux et surfaces hydrographiques.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des variables du descripteur hydrologique et de leur source

Thématique abordée	Variable	Code	Source des données
Réseau hydrographique	Densité de drainage	**F**	IGN
Zones humides	Superficie des surfaces hydrographiques dans l'IRIS rapportée à la superficie de l'IRIS	**G**	IGN
Littoral	Logarithme 10 de la longueur du littoral divisé par le logarithme 10 de la superficie de l'IRIS	**H**	IGN

Etant donné que ce descripteur sera combiné avec BioD, il est important que leur poids total soit identique. Ainsi, comme pour BioD, la somme des coefficients de HydD doit aussi être égale à 2,5 selon l'Eq. 4.

$$HydD = \left(\frac{F_n - F_{min}}{F_{max} - F_{min}}\right) + \left(\frac{G_n - G_{min}}{G_{max} - G_{min}}\right) + 0{,}5 * \left(\frac{\log\left(H_n - H_{min}\right)}{\log\left(H_{max} - H_{min}\right)}\right) \quad \text{Eq.4}$$

Les nappes phréatiques seraient aussi une donnée intéressante à intégrer, mais est dépendante de la qualité des données que l'on réussira à récolter. Pour le moment, il reste difficile de trouver les périmètres précis de ces nappes.

Dans le cas où cette donnée serait intégrée au calcul de l'indicateur, la pondération du descripteur sera amenée à être modifiée.

I.2.3. Calcul de l'indice écologique

Dans la littérature scientifique, la plupart des indicateurs de vulnérabilité environnementale ou écologique sont calculés par agrégation additive (Le Berre et al., 2011 ; Tate, 2012 ; Lorant-Plantier, 2014 ; Nadeem et al., 2022 ; Ashimova et al., 2023), une méthode que nous avons également appliquée pour l'indice écologique (IVec) (Eq.5). Les deux descripteurs présentés précédemment fonctionnent de la même manière : plus la valeur est élevée, plus elle traduit une forte vulnérabilité. Il est donc possible de les combiner en les additionnant pour créer l'IVec.

Le traitement des variables définies dans les descripteurs (Tableau 5) ont été calculées à l'aide de deux logiciels principaux, pgAdmin 4 pour interroger de grandes bases de données avec le langage SQL et QGIS pour le traitement des données géographiques et la cartographie. Le langage SQL a été principalement utilisé pour croiser les données entre la Liste rouge des espèces menacées de l'UICN et les inventaires d'espèces ZNIEFF et Natura 2000. La création de cette base de données a nécessité un important travail de traitement afin de corriger les identifiants de certaines espèces dans les différentes tables utilisées, de rétablir leur niveau de menace et de les importer dans les polygones ZNIEFF et Natura 2000 de QGIS. Au final, 14 tables de données différentes ont été croisées pour calculer les différentes variables. Les opérations de géo-traitement des données ont été complétées avec QGIS 3.28.5 et 3.36.3. Deux extensions ont été téléchargées pour le calcul des variables : « Group Stats », qui permet de créer des tableaux statistiques simples dans QGIS, et « DB Manager », qui permet de créer des scripts SQL directement dans QGIS avec des données géolocalisées.

Tableau 5 : Description et coefficient de pondération de chaque variable composant les deux descripteurs BioD et HydD

Descripteur	Variable	Code	Poids des variables	Poids des descripteurs
Biodiversité et habitats (BioD)	Richesse spécifique	A	0,50	2,50
	Densité d'espèce	B	0,25	
	Niveau de menace	C	1,00	
	Aire naturelle protégée	D	0,50	
	Parc urbain	E	0,25	
Hydrologie (HydD)	Réseau hydrographique	F	0,75	2,50
	Surface en eau	G	0,75	
	Littoral	H	1,00	

Comme précisé pour chaque descripteur, les huit variables différentes ont été normalisées afin de pouvoir les comparer et les agréger. Ainsi, les deux descripteurs ont été agrégés avec le même poids comme souvent observé pour calculer un indicateur hiérarchique (Tate, 2012).

Les cartographies des descripteurs et de l'Iec ont été effectuées avec le logiciel QGIS 3.36.3. Les extensions « Mask » et « MapTiler » ont été téléchargées pour cette étape. L'extension « Mask » permet de mettre en évidence les villes étudiées par rapport aux autres territoires. L'extension « MapTiler » donne accès à de nombreux fonds de carte vectoriels. Ce format présente l'avantage d'être modifiable. La méthode de classification des ruptures naturelles de Jenks a été utilisée pour la cartographie de l'Iec. Cette méthode permet de réduire la variance intra-classes et de maximiser la variance inter-classes.

$$IVec = BioD + HydD \quad \text{Eq.5}$$

Etant donné que chaque descripteur a un poids de 2,5 (Tableau 5), la valeur maximale de l'Iec est 5 et le minium 0. Plus la valeur de l'Iec est élevée plus l'IRIS présente une forte vulnérabilité. Un IRIS

ayant un indicateur maximum signifie que, d'après les données traitées, l'IRIS présente une forte vulnérabilité écologique vis-à-vis de la perturbation/contamination anthropique.

I.3. Enjeux socio-économiques

Les enjeux socio-économiques sont aujourd'hui largement intégrés dans les calculs de risque et de vulnérabilité territoriale (Occelli et al., 2013 ; Zhang et al., 2023 ; Hellequin et Rican, 2024).

De premiers travaux réalisés en 2020 et impliquant plusieurs partenaires du projet (LPED, LCE et IECP) ont permis de créer une base de données regroupant l'ensemble des activités anthropiques sur la période s'étalant de 1800 à 2000 des trois bassins industriels de la Métropole Aix-Marseille-Provence (bassin minier de Gardanne, zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer et massif des Calanques dans le sud de Marseille) à partir des BDD existantes telles que l'Inventaire Historique des Sites Industriels et Activités de Service (BASIAS), le Système Information Sol (SIS), BASOL et le 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. L'objectif était d'établir une première évaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires, en considérant les bassins de population proches, l'anthropisation des territoires et les polluants potentiellement présents dans l'environnement (D'Amato, 2020). Ce travail a montré une diversification progressive des activités industrielles au cours du temps (1800-2000) avec la disparition ou la forte diminution de certaines activités (minier, fonderie, …), une mutation et urbanisation de certains territoires (massif des Calanques, secteur Gardanne). Les polluants principalement émis par les activités anthropiques recensées sur les territoires étudiés sont les COVNM, les métaux et métalloïdes et les HAP. L'analyse de l'occupation des sols a mis en évidence une proximité des zones industrielles avec des zones urbanisées ou naturelles et protégées (forestières, zones humides, agricoles, …) qui se trouvent ainsi potentiellement impactées.

L'évaluation des enjeux socio-économiques à l'échelle des IRIS s'est basée sur cette première approche. L'indice socio-économique (Ise) repose sur la caractérisation des activités anthropiques de chaque IRIS à travers le calcul de la part de recouvrement des surfaces à usage anthropique et complété par la prise en compte des anciens sites industriels sans activité et non reconvertis, définissant le descripteur anthropique (ActD). Il est complété par la prise en compte de la démographie des territoires et des niveaux de vulnérabilité sociale en s'appuyant sur des

indicateurs établis et pertinents, définissant le descripteur démographique (DemD) (Occelli, 2014 ; Hellequin et Rican, 2024).

I.3.1. Définition du descripteur des activités anthropiques

Le descripteur activités (ActD) a pour principal objectif de décrire et intégrer le poids des activités anthropiques passées et actuelles sur le territoire (D'amato, 2020 ; Barthélémy et al., 2023).

Une base de données (BDD) regroupant l'ensemble des activités anthropiques des IRIS sélectionnés pour le projet a été réalisée. Ce travail a été initié au cours du stage M2 réalisé à l'IIECP (Caroline Dalquier – Master 2 BEE – Aix-Marseille Université) dans le cadre du projet EVALVIE. Il se base sur une analyse diachronique en s'appuyant sur le travail de D'Amato et al. (2020) et prend en compte des données issues de BDD existantes. Les paramètres sélectionnés pour renseigner les activités émettrices de chaque IRIS au cours du temps étaient 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 ont été 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 est 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).

Après une lecture et analyse statistique de ces deux jeux de données, le calcul du descripteur anthropique (ActD) a été réalisé à partir de la sélection et le traitement de cinq variables. (Tableau 6). Quatre variables intégrant la part de recouvrement des IRIS à usages des activités anthropiques, et reprenant la BDD des activités anthropiques à l'échelle cadastrale (Dalquier, 2022), sont définies et permettent d'estimer les surfaces artificialisées qui influent sur la vulnérabilité des territoires et répond à l'objectif « zéro artificialisation nette (ZAN) » voté en 2023 dans la loi climat et résilience (loi n°2023-630). Le foncier pollué sans activité répertorié a été intégré à ce descripteur en tant

que surface artificialisée mais aussi potentiellement impactante pour les milieux proches et les populations riveraines et nécessitant dépollution et reconversion pour répondre au besoin de développement et d'aménagement des territoires (BRGM, 2017 ; D'Amato, 2020). Pour considérer ces sites et sols pollués dans le descripteur, la densité de friches industrielles dans l'IRIS a été calculée à partir des bases de données CASIAS, BASOL et SIS.

Tableau 6 : Variables sélectionnées et source de données pour la construction du descripteur des activités anthropiques.

Thématique abordée	Variable	Code	Source des données
Industrie	Surface de l'IRIS à usage des activités économiques et industrielles rapportée à la superficie de l'IRIS	**N**	BD OCSOL 2019
Transport	Surface de l'IRIS à usage des transports routiers et ferroviaires rapportée à la superficie de l'IRIS	**O**	BD OCSOL 2019
Agriculture	Surface de l'IRIS à usage des activités agricoles rapportée à la superficie de l'IRIS	**P**	BD OCSOL 2019
Habitat	Surface de l'IRIS à usage de l'habitat rapportée à la superficie de l'IRIS	**Q**	BD OCSOL 2019
Sites et sols pollués	Densité de friches industrielles dans l'IRIS	**R**	CASIAS, SIS, BASOL

Le calcul de ActD est détaillé dans l'Eq.6.

$$ActD = 0{,}75 \cdot N^{norm} + 0{,}75 \cdot O^{norm} + 0{,}5 \cdot P^{norm} + 0{,}5 \cdot Q^{norm} + 0{,}5 \cdot R^{norm} \quad \text{Eq.6}$$

I.3.2. Définition du descripteur démographique

Le descripteur démographique (DemD) cible la vulnérabilité de la population et sa capacité de résilience (Occelli et al., 2013 ; Bah, 2021 ; Hellequin et Rican, 2024) en intégrant des variables descriptives. Cinq variables sont sélectionnées et calculées (Tableau 7) :

- Densité de population ;
- Population à risque, comprenant les plus de 65 ans et les moins de 18 ans ;
- Indice de dévalorisation sociale (FDEP), indice géographique du désavantage social spécifiquement adapté aux études de santé sur la population française, il intègre les

variables taux de chômage, taux d'ouvriers, taux de bacheliers et revenu médian par unité de consommation (Bah, 2021) ;

- La distance en décimale d'heure pour un trajet en voiture a été calculée entre les IRIS et l'hôpital le plus proche, permettant d'intégrer une dimension de résilience.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des variables du descripteur démographique et de leur source

Thématique abordée	Variable	Code	Source des données
Population	Densité de population	I	INSEE
Population vulnérable	Part des plus de 65 ans	J	INSEE
	Part des moins de 18 ans	K	INSEE
	Indice de Défavorisation Sociale (FDEP)	L	INSERM
Accès aux soins	Distance-temps entre le carreau de 200m/200m le plus peuplée de l'IRIS et l'hôpital le plus proche	M	INSEE, IGN, openrouteservice

Le FDEP prend en compte quatre variables (INSERM, 2021) : le taux de chômage, le taux d'ouvrier dans la population active, le taux de bacheliers et le revenu médian. Plus le FDEP est faible, plus l'IRIS est favorisé d'un point de vue social, et sera donc moins vulnérable aux effets d'une pollution.

La distance en décimale d'heure pour un trajet en voiture a été calculée entre les IRIS et l'hôpital le plus proche. L'API openrouteservice, via l'extension ORS Tools sur QGIS, a permis de mesurer ces temps de trajet pour chaque IRIS. Afin de se rapprocher de la situation réelle de la majorité des personnes habitant dans l'IRIS, cette distance a été calculée à partir du centre du carreau de 200m/200m le plus peuplé de l'IRIS. Cette dernière donnée est tirée du carroyage Filosofi de l'INSEE.

Le calcul de DemD est détaillé dans l'Eq.7.

$$DemD = 1 \cdot I^{norm} + 0{,}25 \cdot J^{norm} + 0{,}25 \cdot K^{norm} + 0{,}5 \cdot L^{norm} + 0{,}5 \cdot M^{norm} \quad \text{Eq.7}$$

I.3.3. Calcul de l'indice de vulnérabilité socio-économique

L'indice de vulnérabilité socio-économique (Ivse) repose sur les descripteurs Activités (ActD) et Démographique (DemD).

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des pondérations appliquées pour chaque variable de l'indice socio-économique.

Descripteur	Variable	Code	Pondération	Pondération totale du descripteur
Démographique (DemD)	Densité de population	**I**	1	2,50
	Part des plus de 65 ans	**J**	0,25	
	Part des moins de 18 ans	**K**	0,25	
	Indice de Défavorisation Sociale (FDEP)	**L**	0,50	
	Distance-temps entre le carreau de 200 m² le plus peuplée de l'IRIS et l'hôpital le plus proche	**M**	0,50	
Activités anthropiques (ActD)	Superficie de l'IRIS à usage des activités économiques et industrielles rapportée à la superficie de l'IRIS	**N**	0,75	2,50
	Superficie de l'IRIS à usage des transports routiers et ferroviaires rapportée à la superficie de l'IRIS	**O**	0,75	
	Superficie de l'IRIS à usage des activités agricoles rapportée à la superficie de l'IRIS	**P**	0,5	
	Superficie de l'IRIS à usage de l'habitat rapportée à la superficie de l'IRIS	**Q**	0,5	
	Densité de friches industrielle dans l'IRIS	**R**	0,5	

L'ensemble des variables calculées et les coefficients de pondération appliqués, définis à travers les tests de corrélations et de hiérarchisation, sont présentés dans le Tableau 8. Comme pour l'indice écologique, la méthode de normalisation min-max a été utilisée pour chacune des variables.

Les deux descripteurs (DemD et ActD) sont compris entre 0 et 2,50. L'indicateur de vulnérabilité socio-économique (IVSe – Eq.8) a été calculé en additionnant les deux descripteurs. Il sera donc compris entre 0 et 5. Plus la valeur d'un IRIS est élevée, plus l'IRIS est vulnérable sur le plan économique et social vis-àvis des perturbations/contaminations anthropiques.

$$IVSe = DemD + ActD \qquad \text{Eq.8}$$

I.4. Enjeux environnementaux

I.4.1. Etat des sols

I.4.1.1. Méthode de prélèvements

La caractérisation des sols et de la pollution diffuse a été réalisée sur les différents sites identifiés pour le projet dans le but de caractériser la qualité des sols de chaque IRIS. Elle a été évaluée selon une méthode d'échantillonnage adaptée de celle définie dans le cadre du RMQS2 (Jolivet et al., 2018).

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 sur l'ensemble de la parcelle des teneurs en métaux, considéré comme indicateur de potentielles pollutions anthropiques concentrées (Austruy et al., 2016 ; Liu et al., 2024). 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 jusqu'à 1 m de profondeur pour la description des horizons de sol et l'identification des profondeurs de prélèvements par horizon. Sur les terrains difficiles d'accès présentant des sols peu profonds, une fosse pédologique a été privilégiée.

La méthode de prélèvement repose sur la délimitation d'une placette de 20 m de côté dans laquelle huit échantillons 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. L'horizon inférieur correspond à l'horizon le plus profond caractérisé dans la zone insaturée jusqu'à 1 m de profondeur. En complément des échantillons composites prélevés à la tarière manuelle, un prélèvement de sol par horizon a été réalisé dans le carottage ou la fosse pédologique pour comparer les méthodes de prélèvements, en particulier pour l'évaluation des contaminations diffuses de surface en métaux.

La campagne d'échantillonnage des sols s'est étalée de 2022 à 2023 pour la réalisation des 18 sites identifiés pour le projet.

La constitution d'un échantillon composite de sol par horizon à partir d'une placette de 20 m de côté considérée comme homogène en végétation et substrat est une méthode pertinente, facile à mettre en œuvre et à reproduire et permet de surcroît de considérer l'hétérogénéité des terrains souvent observée en milieux urbains et industriels. Cependant, dans le cas de la présence de nombreux éléments grossiers ou d'une hétérogénéité dans l'épaisseur des horizons relevée dans le

carottage ou la fosse, par exemple observée sur des sols faiblement profonds (plaine de Crau, Massif des Calanques ou de la Nerthe), un échantillonnage des différents horizons dans la fosse pédologique ou la carotte de sol peut s'avérer plus pertinent et adapté à la problématique.

I.4.1.2. Pré-traitement et analyses des sols

Au laboratoire, les échantillons de sol ont été homogénéisés (émottage) puis quartés afin de sélectionner 100 g de chaque prélèvement pour obtenir un échantillon composite de sol par site et par horizon d'environ 800 g MF (Norme AFNOR NF X31-100). Après la détermination de leur masse fraîche, ils ont été conservés à -30 °C le temps de leur pré-traitement.

Les échantillons composites congelés ont été introduits dans des flacons spécifiques et lyophilisés pendant 72 h (−55 °C / 0,035 mbar, Christ-Alpha 1-4 LD), c'est-à-dire jusqu'à ce que leur perte de masse n'excède pas 5 % en 24 h. Après détermination de la matière sèche pour le calcul de la teneur en eau, les échantillons composites ont été quartés pour la réalisation des différentes analyses :

- Une part a été tamisée à 2 mm pour l'analyse des HAP, pesticides et des paramètres physico-chimiques ;
- Une part a été tamisée à 2 mm puis broyée en particules fines avec un mortier en agate pour l'analyse des métaux, du carbone et de l'azote.

Chaque fraction a été conditionnée dans des flacons en PEHD et conservée à 4 °C.

Les analyses des paramètres physico-chimiques (pHeau, granulométrie 5 fractions, carbone organique total, azote total, C/N, phosphore assimilable, % $CaCO_3$ et conductivité) ont été réalisées au CEREGE dont une partie a été externalisée (LDAR Aisne, en l'absence de possibilité au LAS INRAE pour cause de déménagement). Ces analyses ont été effectuées selon les normes AFNOR suivantes :

- NF X13-117 pour le pH ;
- NF ISO 10694 pour le Carbone organique total (COT) ;
- NF ISO 13878 pour l'azote total ;
- NF X31-107 pour la granulométrie 5 fractions ;
- NF ISO 10693 pour les carbonates totaux ;

- NF ISO 11263 pour le phosphore assimilable.

L'analyse des métaux (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V, Zn) a été effectuée au CEREGE après minéralisation à l'eau régale (norme AFNOR NF ISO 11466) et filtration, par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, Perkin Elmer NexIon 300X). D'autres métaux ont aussi été analysés sur l'ensemble des échantillons de sol mais non pas été intégrés dans le projet EVALVIE (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, S, Sc, Sn, U, Y). Pour le contrôle qualité, un blanc et un standard certifié (sol limoneux ERM-CC141), sont inclus dans chaque série d'analyses.

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 naphtalène (Nap), acénaphtylène (Acy), acénaphtène (Ace), fluorène (Flu), phénanthrène (Phe), anthracène (Ant), fluoranthène (FlA), 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).

Les analyses des HAP contenus dans les échantillons de sols ont été externalisées par le LCE au Laboratoire d'Analyses Chimiques de la Faculté de Pharmacie de la Timone à Marseille. Une extraction solide/liquide à haute pression et haute température (ASE 350 Dionex) a été réalisée sur les matrices sols. Un étalon interne (anthracène d10) a été ajouté à la prise d'essai avant l'extraction afin de compenser les incertitudes expérimentales et analytiques. La prise d'essai a été mélangée à de la terre de diatomée afin d'augmenter l'efficacité d'extraction. L'extraction a été réalisée à 100 °C, 100 bars avec un mélange dicholométhane/acétone (1:1). Les extraits récupérés ont été concentrés et transférés dans l'hexane pour atteindre un volume final de 500 µL puis ils ont été filtrés sur filtre PTFE 0,45 µm. Les analyses des HAP ont été réalisées par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur par spectrométrie de masse (GC/MS). L'appareil GC/MS (modèle GC/MSD, Agilent Technologies) est équipé d'une colonne capillaire DB5 (J&W, 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm). Le gaz vecteur utilisé était l'hélium à une vitesse de 26 cm/s. Les analyses ont été réalisées en mode SIM (Single Ion Monitoring), c'est à dire que des ions spécifiques à chaque composé ont été utilisés pour la quantification. L'étalonnage de l'appareil a été réalisé pour chacun

des 16 HAP avec une solution « mix » standard à 200 µg/mL (Interchim), diluée à différentes concentrations avec de l'hexane. Les étalons et les blancs étaient régulièrement analysés, ainsi que l'analyse d'échantillons de référence (sédiment, IAEA-383) 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. L'identification, l'intégration des pics chromatographiques et la détermination des concentrations dans les échantillons suivant la droite d'étalonnage ont été effectués sous le logiciel Empower pro.

L'analyse des pesticides dans les sols a été effectuée par le LCE qui a développé une méthode d'analyse des pesticides dans les particules atmosphériques (Désert et al., 2018). Cette méthode d'analyse, éprouvée pour des échantillons atmosphériques, a été validée pour les échantillons de sol. Elle permet l'analyse de 48 molécules (20 herbicides, 17 fongicides et 11 insecticides) et 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 GC-MS/MS. La prise d'essai était de 0,5 g de sol, la méthode d'extraction est détaillée dans les travaux de Désert et al. (2018).

I.4.1.3. Définition des valeurs de références et calcul d'indice de pollution

Dans le cadre de l'évaluation des pollutions diffuses de sol, une revue de la littérature a été menée sur les différentes méthodes de calcul d'un indice de contamination diffuse et de qualité des sols (Guo et al., 2010 ; Dung et al., 2013 ; Occelli et al., 2013 ; Liu et al., 2014 ; Brady et al., 2015 ; Cai et al., 2015 ; Roudposhti et al., 2016 ; Couto et al., 2018, Liu et al., 2024). Plusieurs approches ont également été spécifiquement développées. L'ensemble de ces approches a été comparé pour l'évaluation de la contamination diffuse des 18 sites étudiés pour les métaux et métalloïdes et les 16 HAP.

Pour les pesticides, étant considérés comme des composés exclusivement anthropiques (Désert et al., 2018 ; Hulin et al., 2020), les concentrations totales des pesticides en surface et le nombre de molécules détectées sont les deux paramètres qui ont été considérés dans l'évaluation des niveaux de contamination.

Pour les éléments traces et HAP, des calculs ont été réalisés en considérant les teneurs dans les échantillons composites de sol des horizons de surface et inférieur construits à partir de huit

échantillons prélevés à la tarière manuelle. Pour les métaux et métalloïdes, des échantillons de sol des différents horizons prélevés directement dans la carotte de sol ou la fosse pédologique ont aussi été analysés et comparés aux prélèvements à la tarière manuelle.

Plusieurs indices ont été étudiés pour identifier les contaminations anthropiques de surface (Redon et al., 2013; Dung et al., 2013 ; Liu et al., 2024) :

- Le facteur d'enrichissement (FE – Eq.9), normalisé par rapport à l'aluminium (Al) ou au scandium (Sc) pour les éléments traces (ET) ;
- Le facteur de concentration (FC – Eq.10) représentant le rapport des teneurs en HAP ou éléments traces mesurées dans l'horizon de surface et l'horizon inférieur.

$$FE = \frac{[ET]surf / [ETref]surf}{[ET]FPGNouH2 / [ETref]FPGNouH2} \quad \text{Eq.9}$$

$$FC = \frac{[ET\ ou\ HAP]surf}{[ET\ ou\ HAP]H2} \quad \text{Eq.10}$$

Pour les métaux, les FE et FC ont aussi été calculés en remplaçant les teneurs mesurées dans l'horizon H2 par les valeurs du fond pédogéochimique naturel (FPGN) établi pour le territoire de la Métropole Aix-Marseille-Provence (Austruy et al., 2016). De même, les méthodes de prélèvements ont été comparées avec des analyses menées sur des échantillons composites prélevés à la tarière manuelle et des échantillons prélevés directement dans la carotte de sol ou la fosse pédologique pour les deux horizons. Ce travail et traitement des données fera l'objet d'une publication dans une revue scientifique et a été récemment présenté au Congrès International ICOBTE/ICHMET en septembre 2025 (Keller et al., 2025).

Le calcul des indices s'est concentré sur l'utilisation du facteur de concentration (FC) applicable aux éléments traces et HAP. Cet indice a été privilégié au facteur d'enrichissement (FE), normalisé par un élément de référence et permettant ainsi d'éviter une sous ou sur-estimation de la pollution en cas de migration des éléments (Keller et al., 2025) mais s'appliquant exclusivement qu'aux éléments traces. De même, l'utilisation du FPGN n'a pas été retenue pour les métaux et métalloïdes car il n'existe pas de référentiel régional comparable pour les HAP et de ce fait son utilisation pouvait entraîner un biais dans le calcul de l'indice environnemental avec une sur ou sous-estimation des pollutions organiques.

Un indice de pollution intégré a été calculé à partir des FC pour évaluer le niveau de contamination globale en surface par famille de contaminants, métaux et métalloïdes et HAP. La méthode choisie s'appuie sur l'indice de pollution de Nemerow (PI, Eq.11), considéré comme complet et le plus utilisé dans l'évaluation de la qualité des sols et sédiments (Liu et al., 2014 ; Brady et al., 2015).

$$PI = \sqrt{\frac{FCmoy^2 + FCmax^2}{2}} \qquad \text{Eq.11}$$

FCmoy étant la moyenne des facteurs de concentration de chaque élément considéré par famille (HAP et métaux) par site. FCmax correspond au FC maximum relevé sur chaque site.

Le PI fournit des informations sur la pollution diffuse moyenne des sites d'étude par les métaux et les HAP et permet de prendre en compte d'éventuelle pollution mono-élémentaire à travers l'intégration du FCmax.

I.4.2. Biosurveillance lichénique

I.4.2.1. Principe et intérêt de la biosurveillance lichénique

La biosurveillance lichénique est la méthode choisie pour évaluer l'exposition atmosphérique à l'échelle des IRIS dans le cadre du projet EVALVIE. Elle considère les mesures de bioaccumulation lichénique pour les familles de polluants HAP, métaux et pesticides, indicateur d'exposition, ainsi que des relevés de bioindication lichénique, indicateur d'impact. Ce travail est réalisé sur 18 sites répartis sur les différents IRIS sélectionnés pour le projet (Figure 1).

La biosurveillance concerne toute utilisation d'un organisme, ou d'un ensemble d'organismes, sensible au milieu environnant et donc pouvant faire état de ce dernier (Van Haluwyn et al., 2011), soit par prélèvement direct depuis le milieu (bioindication passive) soit par transplantation d'échantillons (bioindication active) (Agnan, 2013). Ainsi, la biosurveillance repose sur l'idée que les organismes vivants réagissent de manières différentes aux variations de leur environnement et donc en reflètent les changements et les altérations. Elle se décline en plusieurs outils de diagnostic environnemental (Van Haluwyn et al., 2008) :

- Biointégration : observation de changements structurels au niveau d'une population/communauté en réponse à un stress environnemental ;

- Bioindication : observation des réponses biologiques (morphologiques, physiologiques, tissulaires…) d'un ou plusieurs organismes vivants en réponse à un polluant ;
- Biomarqueur : utilisation de marqueurs au niveau de la biologie structurelle ou fonctionnelle (enzyme, physiologie, protéine…) indiquant une influence du milieu environnant sur les fonctions biologiques ;
- Bioaccumulation : détermination des teneurs en éléments chimiques bioaccumulés dans un ou plusieurs organismes vivants en réponse à une exposition plus ou moins diffuse.

Ainsi, de nombreux végétaux peuvent être utilisés pour la biosurveillance de la qualité de l'air, soit parce qu'ils présentent des réactions biologiques caractéristiques en réponse à certains polluants, soit parce qu'ils accumulent des polluants de l'air environnant dans leurs tissus (Castell, 2009).

Les caractéristiques biologiques des lichens (absence de racines, absence de cuticules de protection, absence d'un système d'excrétion et activité quasi annuelle) les rendent fortement dépendants de l'atmosphère, les exposant ainsi aux polluants atmosphériques, mais peu ou pas dépendants des sols ni de leurs supports. La détermination des teneurs en éléments accumulés dans les lichens est réalisée depuis une vingtaine d'années (Nimis et al, 2002). Le mécanisme de bioaccumulation des polluants dans les lichens le mieux décrit à priori concerne les métaux. L'ensemble des éléments chimiques de l'atmosphère va être directement absorbé/adsorbé par le thalle du lichen, avec un équilibre entre les concentrations atmosphériques et lichéniques. La méthodologie de prélèvement et de traitement des échantillons de lichens pour y mesurer la bioaccumulation de polluants fait l'objet d'une norme, la NF X43-904 (AFNOR, 2013), intitulée « Biosurveillance de l'air - Biosurveillance passive de la qualité de l'air à l'aide des lichens autochtones : de la récolte à la préparation des échantillons ».

L'lECP a engagé depuis 2011 une biosurveillance lichénique complète sur le territoire de la Métropole Aix-Marseille-Provence incluant la zone industrialo-portuaire (ZlP) de Fos ainsi que les villes alentour, afin d'établir une vision intégrée de la pollution de l'air à l'aide des lichens. Les résultats des différentes campagnes réalisées ont été rapportés en détails dans plusieurs documents écrits ces dernières années (Dron et al., 2016 ; Ratier et al., 2018 ; Dron et al., 2021 ; Reuillard, 2024 ; Durand et al., 2024). Le suivi réalisé depuis plusieurs années avec des campagnes de prélèvements effectuées tous les 3 ans depuis 2011 sur 30 à 50 sites répartis sur l'ensemble de la MAMP fournit une quantité d'informations conséquente, mettant en évidence d'importants contrastes de biodiversité lichénique et d'accumulation de contaminants et différentes typologies

suivant la localisation géographique des sites d'études (industriel, urbain-industriel, urbain, rural). Ainsi, la longue expérience de l'IECP et ses travaux de recherche dans le domaine ont permis de consolider certains aspects de la méthodologie (Ratier et al., 2018 ; Dron et al., 2016 et 2021), d'évaluer la portée de sa fiabilité, ou encore de préciser la durée d'intégration des lichens en fonction des conditions climatiques (Dron et al., 2021).

I.4.2.2. Prélèvement et pré-traitement des lichens

Les placettes d'étude ont une surface de 200 m² environ, parfois jusqu'à 500 m² lorsque les lichens sont peu abondants.

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 5). 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).



Figure 5. 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) (© IECP, 2022)

Pour chacun des sites, des thalles du lichen *Xanthoria parietina* ont été prélevés en octobre 2021 sur des troncs d'arbres à au moins 1 m de hauteur pour s'affranchir de l'influence du sol, pouvant interférer sur la composition de l'échantillon. La totalité du thalle lichénique a été prélevée du fait de l'incapacité à dater tout ou partie du thalle, le taux de croissance étant très variable même au sein d'une même espèce (Amstrong & Bradwell, 2011). Les prélèvements d'échantillons ont été

réalisés sur différentes espèces d'arbres phorophytes (principalement des peupliers, des frênes, des tilleuls et des robiniers pseudo-acacias), ce choix permettant d'augmenter la représentativité naturelle du milieu en s'affranchissant de la possible dépendance due à l'espèce considérée. Aussi, l'ensemble des orientations du tronc a été prélevé afin que l'échantillonnage soit représentatif de la qualité de l'air globale sur le site.

Les lichens ont été prélevés avec des gants de protection et un couteau en céramique (non métallique) pour éviter toute contamination externe. Le couteau a été lavé à l'eau ultra-pure après chaque utilisation. Les échantillons de 10 à 15 g ainsi obtenus ont ensuite été placés en glacière réfrigérée (environ 4 °C) et amenés jusqu'au laboratoire de préparation de l'IECP dans des flacons en HDPE préalablement étiquetés, où ils ont été immédiatement conservés à 4 °C en attendant leur préparation.

Au laboratoire, les échantillons de lichens ont été triés dans les 3 jours après leur prélèvement, avec du matériel non métallique préalablement lavé à l'eau ultra-pure (pince en PE et couteau en céramique), en retirant délicatement les poussières, les débris de végétaux, les espèces non souhaitées et les écorces. Environ 10 g d'échantillon humide de chaque site ont été ainsi triés, puis congelés à -42 °C pendant au moins 24 h. Ils ont ensuite été lyophilisés (-55 °C / 0,035 mbar, Christ-Alpha 1-4 LD) pendant 72 h. Cette méthode a été préférée au séchage à l'étuve puisqu'elle permet de limiter la perte d'éléments volatils. Par la suite, leur broyage a été effectué via un broyeur à billes (capsules et billes en zirconium, Retsch MM 400) durant 90 secondes à une fréquence de 25 Hz, afin d'obtenir une poudre très fine et homogène, sans échauffement et sans contamination externe. Entre chaque échantillon, les capsules et billes ont été lavées dans un bain acide 7 % (HNO_3), rincées à l'eau ultra-pure, lavées à l'acétone puis à nouveau rincées à l'eau ultra-pure. Elles ont ensuite été séchées à l'étuve à 40 °C, et refroidies à température ambiante avant d'être réutilisées. Après le broyage, la fine poudre a été récupérée dans des flacons NALGENE® préalablement étiquetés, puis stockés à -42 °C en attendant la réalisation des analyses chimiques.

Les échantillons ont été analysés par le Laboratoire Chimie de L'Environnement (LCE) pour déterminer les concentrations totales en métaux (As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Sb, Zn), Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, liste USEPA), ces derniers étant sous-traités au Laboratoire d'Analyses Chimiques de la Faculté de Pharmacie de la Timone, et pesticides (59 composés, Annexe 1) pour lesquels un développement analytique a été nécessaire (Durand et al., 2024).

I.4.2.3. 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).

La minéralisation des échantillons (0,3 à 0,5 g) par digestion acide a été réalisée avec 6,5 mL de HNO_3 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 IAEA-336 et STDCRM Ray Grass ERM-CD281), qui ont suivis au préalable le protocole de pré-traitement, et des blancs ont été utilisés.

I.4.2.4. Détermination des teneurs en HAP dans les échantillons de lichens

L'analyse des HAP (16 HAP classés prioritaires par l'US-EPA) a été externalisée 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). 0,5 g de chaque échantillon ont subi une extraction par de l'acétone dans une cuve à ultrasons. De l'eau ultra-pure y a ensuite été ajoutée jusqu'à obtenir un mélange acétone/eau à 40 % (v/v). Cet extrait a ensuite été purifié sur cartouche C-18 1 g (Bond Elut C18). Ainsi, seuls les HAP ont été retenus sur la cartouche, au contraire des impuretés qui ont été extraites. Les HAP ont ensuite été élués via de l'acétone et du méthanol. L'extrait purifié a alors été analysé par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur par spectrométrie de masse (GC/MS). L'appareil GC/MS (modèle GC/MSD, Agilent Technologies) est équipé d'une colonne capillaire DB5 (J&W, 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm). Le gaz vecteur utilisé était l'hélium à une vitesse de 26 cm/s. Les analyses ont été réalisées en mode SIM (Single Ion Monitoring), c'est à dire que des ions spécifiques à chaque composé ont été utilisés pour la quantification. L'étalonnage de l'appareil a été réalisé pour chacun des 16 HAP avec une solution « mix » standard à 200 µg/mL (Interchim), 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.

L'identification, l'intégration des pics chromatographiques et la détermination des concentrations dans les échantillons suivant la droite d'étalonnage ont été effectués sous le logiciel Empower pro.

I.4.2.5. Développement analytique pour l'analyse des pesticides

Les analyses des pesticides sur les échantillons de lichens ont été effectuées par le LCE qui a développé une méthode d'analyse des pesticides dans les particules atmosphériques (Désert et al., 2018). Comme pour les sols, 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 $ng.m^{-3}$ pour 48 molécules couramment utilisées en agriculture et en usage domestique (Annexe 1). Les molécules analysées sont des herbicides (20), des fongicides (17) et des insecticides (11) 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 analytiques ont permis de l'adapter aux échantillons de lichens. 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).

Dans le détail, 500 mg d'échantillon de lichen broyé et lyophilisé ont été mis dans une cellule ASE déjà à moitié remplie de billes de verre propres. Le lichen a ensuite été dopé avec 25 µL d'une solution de triphenyl phosphate (TPP) à 1 mg/L, qui servira d'étalon interne, avant de compléter le reste de la cellule avec des billes. Puis, les cellules ont été placées sur le porte cellule de l'ASE 350 (Thermo), avec des flacons de récupération en dessous. S'en est suivi une extraction solide/liquide, avec 4 cycles d'extraction à l'acétonitrile de 5 minutes chacun à 100 °C, 100 bars. Puis, les extraits ont été transvasés dans les cellules du Turbovap. Les flacons de récupération ont été rincés avec de l'acétonitrile et ce volume de rinçage a été ajouté dans les cellules. Afin de pré-concentrer les extraits, les cellules ont été placées dans un appareil (Biotage Turbovap II), avec un bain ajusté à 40 °C. L'évaporation du solvant a été réalisée sous flux d'azote à 15 psi et stoppée lorsque le volume d'échantillon atteignait environ 5 mL. Les échantillons ont ensuite été purifiés sur une

cartouche SPE (cartouche Oasis HLB 6 mL 150 mg (Waters)). Pour cela, les cartouches ont d'abord été conditionnées avec deux fois 3 mL d'acétonitrile, avant d'être chargées des échantillons concentrés pour qu'ils percolent dans des vials. Les cartouches ont ensuite été lavées avec 6 mL d'acétonitrile, également récupérés dans les vials. Ces extraits purifiés ont été transvasés dans les cellules du TurboVap. Les vials ont été rincés avec de l'acétonitrile et ce volume de rinçage a complété les cellules. Comme précédemment, le bain était réglé à 40 °C avec une circulation d'azote. Au cours de l'évaporation, deux volumes d'une pipette pasteur d'acétonitrile ont été ajoutés par cellule, afin de bien en rincer les parois. L'évaporation a été stoppée lorsque le volume final atteignait 0,5 mL. Les échantillons ainsi obtenus ont été filtrés via des seringues additionnées de filtres PTFE 0,45 µm. Pour finir, les échantillons ont été analysés par GC-MS/MS (Trace GC Ultra Thermo Scientific et MS TSQ Quantum Thermo Scientific). L'appareil a été équipé d'une colonne TG-5MS et le programme de température démarrait à 35 °C pendant 2 min, puis jusqu'à 180 °C avec une pente à 25 °C/min, puis de 200 °C à 300 °C avec une pente de 5 °C/min. Cette dernière température a été maintenue pendant 3 min. L'analyse a été réalisée en mode MRM (Multi Reaction Monitoring). La quantification a ensuite été réalisée par étalonnage interne avec le triphenyl phosphate comme étalon. Ce développement analytique a été publié dans la revue Science of The Total Environment en 2024 (Durand et al., 2024).

I.4.2.6. Définition du bruit de fond et calcul de facteur de bioaccumulation

A partir des concentrations en métaux et HAP mesurées dans les lichens par l'IECP depuis 2011 sur près de 50 sites répartis en région méditerranéenne, le bruit de fond lichénique régional (BDF-L) a été déterminé. Pour son calcul, seuls les sites éloignés de sources d'émissions anthropiques ont été considérés. Plusieurs critères, en lien avec les préconisations de la Norme AFNOR X43-910 (AFNOR, 2020) portant sur les lignes directrices pour l'établissement de valeurs repères en biosurveillance de l'air, ont été pris en compte pour la sélection de ces sites (Tableau 9) :

- L'absence de route 2*2 voies dans un rayon de 500 m (BD TOPO IGN) ;
- Une densité de population inférieure à 500 habitants/km² dans l'IRIS où est localisé le site (INSEE) ;
- L'absence de sites émetteurs dans un rayon de 1 km (IREP) ;
- Une proportion inférieure à 5 % (en superficie) de parcelles agricoles en itinéraire conventionnel dans un rayon de 500 m (BD OC-SOL, 2019 ; RGP, 2020) ;

- Etre localisé dans les Bouches-du-Rhône ou tout département limitrophe de la Méditerranée.

Un total de 9 sites respectent ces critères, leurs teneurs en HAP et métaux relevées entre 2011 et 2021 ont été intégrées pour le calcul du bruit de fond lichénique régional (BDF-L, Tableau 9). En s'appuyant sur les méthodes statistiques utilisées pour le calcul du fond pédogéochimique naturel en métaux dans les sols (Villaneau et al., 2008 ; Austruy et al., 2016), la méthode des Vibrisses de Tukey a été appliquée sur le jeu de données (n=34) et permis de définir les valeurs du BDF-L pour les métaux et HAP présentées dans le Tableau 10. Ce travail est en cours de publication dans une revue scientifique de rang A.

Tableau 9 : Description des sites d'études utilisés pour le calcul du bruit de fond lichénique (BDF-L) en région méditerranéenne

Sites	Communes	Latitude	Longitude	Densité population (hab/km^2)	Années de prélèvement
GRA	Grans	43,608708	5,066261	188	2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2021
COR	Cornillon-Confoux	43,566911	5,070497	101	2012, 2013, 2014, 2017, 2021
VIG	Arles	43,536053	4,752847	4	2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2021
DES	Mouries	43,717583	4,904778	89	2014
LBX	Les Baux de Provence	43,742667	4,813981	17	2014, 2017
AUR	Aureille	43,672333	4,933056	69	2014, 2017
ENT	Istres	43,607696	4,895236	8	2017, 2021
CPH	Saint-Martin-de-Crau	43,652778	4,788611	417	2021
TNT	Saint-Martin-de-Crau	43,611987	4,786914	137	2021

Pour chaque métal et congénère HAP analysé, un facteur de bioaccumulation (FB) est calculé. Le FB correspond à la teneur de l'élément relevée dans les lichens d'un site considéré sur la valeur du bruit de fond de cet élément calculé pour la région méditerranéenne (Eq.12).

$$FB = \frac{C_{site}}{C_{bdf}} \qquad \text{Eq.12}$$

Csite étant la concentration relevée sur les sites étudiés. Cbdf correspond au bruit de fond lichénique.

A partir des FB, comme pour les sols, le PI a été calculé (Eq.11) pour les métaux et HAP.

Pour les pesticides, ces contaminants étant exclusivement d'origine anthropique, aucun facteur de bioaccumulation n'a été calculé et seules les concentrations ont été intégrées dans la définition des variables pour le calcul de l'indice.

Tableau 10 : Valeur du BDF-L régional pour les métaux et HAP (n=34).

	BDF-L métaux (mg/kg)		BDF-L HAP (µg/kg)
As	0,80 (0,52-1,10)	**Nap**	26,52 (20,27-36,69)
Cd	0,15 (0,08-0,20)	**Ace**	13,03 (9,42-25,61)
Co	0,69 (0,52-0,86)	**Acy**	15,28 (6,71-31,33)
Cr	5,63 (4,42-6,91)	**Fle**	8,16 (5,57-11,20)
Cu	9,42 (7,45-12,1)	**Phe**	74,63 (46,54-117,76)
Mn	58,0 (41,8-65,5)	**Ant**	38,66 (15,28-61,94)
Ni	2,98 (2,46-3,43)	**FlA**	62,26 (32,83-105,35)
Pb	4,79 (3,89-7,56)	**Pyr**	116,29 (35,46-198,45)
Sb	0,42 (0,28-0,72)	**BaA**	17,02 (8,97-29,11)
V	4,49 (3,22-5,31)	**Chr**	22,72 (17,34-30,40)
Zn	34,3 (21,31-44,05)	**BbF**	20,21 (9,69-30,39)
		BkF	14,19 (5,91-27,51)
		BaP	20,93 (13,25-27,89)
		Ipy	29,35 (9,68-43,38)
		DBA	22,23 (9,52-33,68)
		Bpe	20,22 (10,78-29,02)

I.4.2.7. Méthode de relevé de bioindication lichénique

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 6).

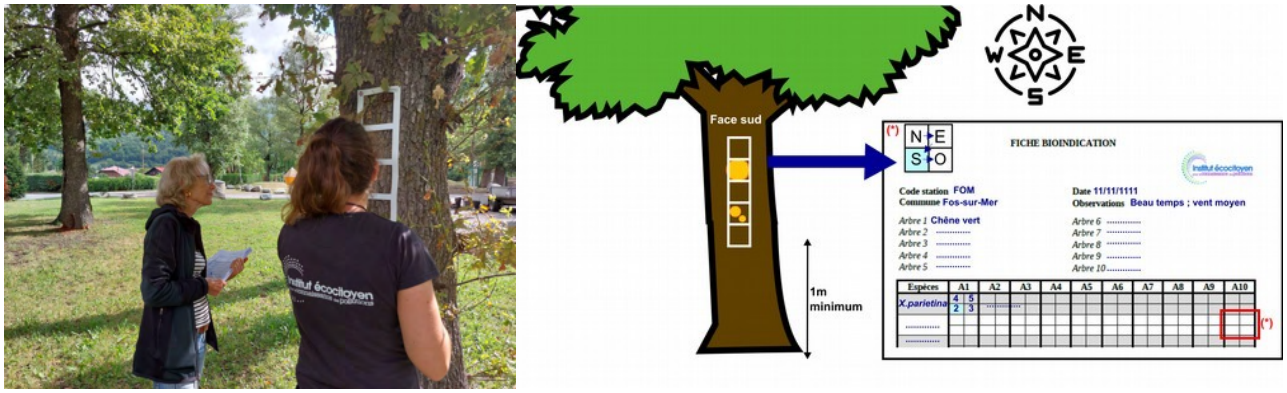


Figure 6 : Méthode de relevé de bioindication sur le terrain (© IECP)

Les espèces lichéniques ne pouvant pas être identifiées avec certitude sur le terrain sont récoltées au couteau et conservées dans un sac plastique. Une vérification est réalisée en laboratoire par des

observations à la loupe binoculaire, ou 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.13). 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.14).

$$IPA = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{n} (Qi * Fi) \qquad \text{Eq.13}$$

$$VDL = \frac{1}{10} * \sum_{i=1}^{10} fi \qquad \text{Eq.14}$$

Où i : espèce lichénique ; n : nombre total d'espèce dans une station ; Qi : 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 ; Fi : coefficient de recouvrement de l'espèce i défini à partir des fréquences d'apparition (fi). fi : fréquence d'apparition de l'espèce i correspondant au nombre de mailles sur chaque face des 10 arbres échantillonnés où l'espèce est rencontrée.

I.4.3. Calcul des descripteurs atmosphérique et édaphique

Comme précédemment le calcul de l'indice de vulnérabilité environnementale se construit avec la définition de deux descripteurs, le descripteur atmosphérique (AirD) et le descripteur édaphique (SolD).

Pour chaque descripteur, 3 aspects ont été considérés :

- ➔ Niveau d'exposition ;

➔ Cocktail de polluants / toxicité ;

➔ Indicateur d'impact et qualité.

Les données de concentrations en métaux, HAP et pesticides dans les lichens et les sols ont permis de définir 6 variables pour chaque matrice, caractérisant les niveaux d'exposition et le cocktail de polluant/toxicité. Ainsi pour les métaux et HAP ont été intégrés, sur chaque matrice, le PI (Eq.11) permettant d'évaluer les niveaux d'exposition via la prise en compte d'une pollution multi élément (moyenne des FC pour les sols et des FB pour les lichens) mais aussi de mettre l'accent sur une éventuelle pollution mono-élément dans l'IRIS étudié (FC max et FB max).

La deuxième variable intégrée pour ces descripteurs est la part des FC supérieurs à 2 (Eq.10) par famille de polluants, synonyme de pollution anthropique avérée pour l'élément considéré (Keller et al., 2025) et caractérisant le potentiel effet cocktail par matrice des pollutions anthropiques relevées.

Pour les pesticides, composés exclusivement d'origine anthropique, aucune valeur de bruit de fond régional n'a été considérée dans l'air et les sols. Ainsi, la concentration totale de l'ensemble des pesticides analysés, mesurée en ng/g, est intégrée comme variable d'exposition. Cette variable est complétée par le pourcentage de pesticides détectés parmi les pesticides recherchés lors des analyses permettant de considérer un éventuel effet cocktail dû à la présence de différentes molécules de pesticides.

Enfin pour chaque matrice, un indicateur d'impact/qualité a été intégré au calcul des descripteurs. Pour AirD, l'indicateur d'impact choisi s'est porté sur la Valeur de Diversité Lichénique (VDL, Eq.14) calculée indépendamment entre les différents sites. Il se base sur sur la diversité et l'abondance de lichen observés dans les sites d'étude. Plus cette valeur est élevée, moins l'impact des polluants sur la biodiversité est fort. Pour SolD, un indicateur de qualité a été sélectionné, il s'agit du stock de carbone déterminé à travers l'Eq.15 à partir des données pédochimiques (teneur en carbone organique horizon de surface, profondeur du sol fraction granulométrique fine).

$$\cos_{stock} = [\cos] * Da_{terrefine} * prof * \frac{1-(fraction>2\,mm)}{100} \qquad \text{Eq.15}$$

L'ensemble des variables est détaillé dans le Tableau 11.

Comme pour les enjeux écologiques et socio-économiques, les variables sont normalisées entre 0 et 1, puis pondérées pour chaque descripteur (Tableau 12).

A noter la normalisation des variables d'impact/qualité (**Y** et **Z**) se fait différemment. Ces variables sont normalisées de manière décroissante, étant donné qu'une valeur élevée signifie une vulnérabilité plus faible. L'équation de normalisation pour ces deux variables est donc légèrement différente, même si le principe général est le même (Eq.16).

$$x^{norm} = 1 - \left(\frac{x - x^{min}}{x^{max} - x^{min}}\right) \quad \text{Eq.16}$$

Tableau 11 : Variables sélectionnées pour chaque descripteur, description et source des données

Thématique abordée	Variable	Code AirD	Code SolD	Source des données
Concentration métaux	Indice de pollution (PI) des métaux	S_1	S_2	Campagne de terrain (IECP, CEREGE, LCE)
Effet « cocktail » métaux	Part des FC ou FB supérieurs à 2 parmi les métaux analysés	T_1	T_2	Campagne de terrain (IECP, CEREGE, LCE)
Concentration HAP	PI des HAP	U_1	U_2	Campagne de terrain (IECP, CEREGE, LCE)
Effet « cocktail » HAP	Part des FC ou FB supérieurs à 2 parmi les HAP analysés	V_1	V_2	Campagne de terrain (IECP, CEREGE, LCE)
Concentration Pesticides	Concentration totale des pesticides	W_1	W_2	Campagne de terrain (IECP, CEREGE, LCE)
Effet « cocktail » pesticides	Part des pesticides détectés parmi les pesticides analysés	X_1	X_2	Campagne de terrain (IECP, CEREGE, LCE)
Valeur d'impact/qualité	Valeur de Diversité Lichénique et stock de carbone	Y	Z	Campagne de terrain (IECP, CEREGE, LCE)

Les coefficients de pondérations ont été choisis de sorte que le poids total des descripteurs soit égal à 2,50 comme détaillé pour les autres enjeux étudiés. Chaque famille de polluants (métaux, HAP, pesticides) est représentée par une variable d'exposition complétée par une variable caractérisant le cocktail de pollution. Pour homogénéiser l'influence de chaque famille de contaminants, le même poids est défini pour ces variables (0,25) permettant d'obtenir un poids de 0,50 pour chaque famille de contaminant, pour un poids total de 1,5 pour les mesures d'exposition dans chaque descripteur. Les variables d'impact/qualité définies pour chaque descripteur (VDL ou stock de carbone) représentent ainsi un poids de 1 pour intégrer les impacts des expositions sur les écosystèmes.

Ainsi, chaque descripteur est calculé selon l'Eq.17, pour SolD et l'Eq.18 pour AirD.

$$AirD = 0{,}25 \cdot S_1^{norm} + 0{,}25 \cdot T_1^{norm} + 0{,}25 \cdot U_1^{norm} + 0{,}25 \cdot V_1^{norm} + 0{,}25 \cdot W_1^{norm} + 0{,}25 \cdot X_1^{norm} + 1 \cdot Y^{norm} \quad \text{Eq.17}$$

$$SolD = 0{,}25 \cdot S_2^{norm} + 0{,}25 \cdot T_2^{norm} + 0{,}25 \cdot U_2^{norm} + 0{,}25 \cdot V_2^{norm} + 0{,}25 \cdot W_2^{norm} + 0{,}25 \cdot X_2^{norm} + 1 \cdot Z^{norm} \quad \text{Eq.18}$$

I.4.4. Calcul de l'indice de vulnérabilité environnementale (IVen)

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des pondérations appliquées pour chaque variable de l'indice de vulnérabilité environnementale (IVen).

Descripteur	Variable	Code	Pondération	Pondération totale du descripteur
Atmosphérique (AtmD)	Indice de pollution (PI) des métaux	**S**	0,25	2,50
	Part des facteurs de concentration (CF) supérieurs à 2 parmi les métaux mesurés	**T**	0,25	
	PI des HAP	**U**	0,25	
	Part des CF supérieurs à 2 parmi les HAP mesurés	**V**	0,25	
	Concentration totale des pesticides	**W**	0,25	
	Part des pesticides détectés parmi les pesticides mesurés	**X**	0,25	
	Valeur de Diversité Lichénique	**Y**	1	
Édaphique (EdaD)	Indice de pollution (PI) des métaux	**S_2**	0,25	2,50
	Part des facteurs de concentration (CF) supérieurs à 2 parmi les métaux mesurés	**T_2**	0,25	
	PI des HAP	**U_2**	0,25	
	Part des CF supérieurs à 2 parmi les HAP mesurés	**V_2**	0,25	
	Concentration totale des pesticides	**W_2**	0,25	
	Part des pesticides détectés parmi les pesticides mesurés	**X_2**	0,25	
	Stock de carbone	**Z**	1	

I.5. Calcul de l'indicateur global de vulnérabilité environnementale et sanitaire (IgV)

L'indicateur de vulnérabilité environnementale et sanitaire reprend les trois indices décrivant les différents enjeux : écologique, socio-économique et environnemental. Une méthode additive a été utilisée pour son calcul comme proposé par plusieurs auteurs (Le Berre et al., 2011 ; Tate, 2012 ; Lorant-Plantier, 2014 ; Nadeem et al., 2022 ; Ashimova et al., 2023). Il est donc compris entre 0 et 15 (Eq.22).

$$IgV = IVec + IVse + IVen \quad \text{Eq.22}$$

Plus la valeur de l'IgV est élevée, plus l'IRIS présente une vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires au regard des perturbations/contaminations anthropiques. A ce stade, aucune échelle d'interprétation n'est proposée. Il s'agit d'une évaluation qualitative de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires qui permet par l'application d'une méthode commune avec des jeux de données homogénéisés, une comparaison objective des vulnérabilité territoriale.

Ces indicateurs aboutissent a une meilleure connaissance des territoires et des ces spécificités environnementales, socio-économiques et écologiques à travers l'application cartographique des descripteurs, indices et de l'indicateur global permettant leur visualisation et superposition.

Avec l'agrégation des différents indices, il est ainsi possible d'obtenir un seul et unique niveau de vulnérabilité par IRIS. Cependant, cette valeur unique de la vulnérabilité masquent des caractéristiques propres au territoire qui détermine sa vulnérabilité. C'est pourquoi, l'étude de la vulnérabilité enjeu par enjeu à travers les indices semblent tout aussi pertinente voir plus précise sur les facteurs caractérisant cette vulnérabilité.

I.6. Traitements statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (version 3.4 ou supérieure, R Core Team, 2020). Un regroupement hiérarchique (fonction « hclust » de R) a été utilisé pour définir les variables des différents enjeux en fonction des facteurs d'intérêt afin d'identifier des groupes représentatifs pour la construction des indices par enjeu. Ce regroupement a été effectué à partir de données standardisées, en utilisant les distances euclidiennes et le critère « ward.d2 »

(Murtagh et Legendre, 2014). La corrélation entre les variables sélectionnées pour les différents IRIS a été évaluée par analyse en composantes principales (ACP, fonction « prcomp » de R, données standardisées) et par régressions linéaires et multilinéaires (fonction « lm » de R). Une classification ascendante hiérarchiques complète les analyses de corrélation pour permettre d'affiner la catégorisation par enjeu.

I.7. Méthodologie enquête sociologique

Pour ce travail d'enquête sociologique, une méthodologie mixte a été adoptée qui combine deux approches :

- Enquêtes qualitatives de terrain (richesse interprétative) ;
- Enquêtes quantitatives en ligne à partir d'un questionnaire (pour la portée généralisable des données en lien avec le grand nombre de témoignages) réalisée auprès de 515 répondants des communes du pourtour de l'étang de Berre (âgés de 18 ans et plus).

Après un état de l'art sur la question de la vulnérabilité, l'adaptation des pratiques, les ressources mobilisées et les moyens d'actions, un protocole de recherche basé sur des entretiens individuels semi-directifs a été mis en place. Pour réaliser une enquête qualitative de terrain, les entretiens individuels semi-directifs semblent bien adaptés car ils « combinent attitude non-directive pour favoriser l'exploration de la pensée dans un climat de confiance et projet directif pour obtenir des informations sur des points définis à l'avance » (Berthier, 2008). L'objectif est de faire émerger les différentes problématiques et spécificités des territoires. « L'enquête par entretien est ainsi particulièrement pertinente lorsque l'on veut analyser le sens que les acteurs donnent à leurs pratiques, aux événements dont ils ont pu être les témoins actifs ; lorsque l'on veut mettre en évidence les systèmes de valeurs et les repères normatifs à partir desquels ils s'orientent et se déterminent. » (Blanchet et Gotman, 2007).

21 entretiens ont été réalisés avec différents acteurs du territoire : (i) des membres d'associations, (ii) des acteurs institutionnels, (iii) des exploitants agricoles, (iv) un représentant industriel et (v) des citoyens non engagés mais soucieux des problématiques environnementales (Tableau 14). Le recrutement a été facilité par le soutien et le réseau de l'Observatoire Citoyen de l'Environnement (VOCE), structure pilotée par l'IECP, afin d'accéder aux différents acteurs, sur les trois zones d'enquête. En complément de cela, une prospection a été réalisée sur les différents territoires afin de multiplier les témoignages, les visions et les attentes. Une mission de cinq semaines a été mise

en place, sur la Métropole d'Aix-Marseille-Provence, pour procéder aux entretiens en présentiel, en majorité au lieu de résidence des enquêtés. Le Tableau 13 présente les caractéristiques des différents enquêtés ainsi que leur numéro de référence, utilisés dans les citations.

Pour l'enquête quantitative en ligne, le questionnaire (Annexe 2) a été bâti à partir des résultats des enquêtes qualitatives et d'un focus groupe avec des participants du réseau VOCE de l'IECP, à Fos-sur-Mer. Cette enquête a été, administrée par une entreprise de sondage qui a recruté les répondants selon une stratification géographique sur le pourtour de l'étang de Berre par la méthode des quotas (Figure 7). Cinq aspects sont abordés par le questionnaire : sociodémographie, perceptions et représentations de l'exposition aux pollutions, pratiques face aux pollutions, moyens d'informations et d'accès aux données et exercice de « choix » pour évaluer le consentement à payer via la sélection de scénarios (préférences et compromis effectués).

Tableau 13 : Présentation du public enquêté et leur numéro de référence correspondant

Statut	Interviewé	Numéro de référence
Membres ou présidents d'associations de protection de l'environnement, d'aménagement du territoire ou d'aide à la décision publique	Membre d'association	A1
	Membre d'association	A2
	Membre d'association	A3
	Membre d'association	A4
	Membre d'association	A5
	Membre d'association	A6
	Membre d'association	A7
	Membre d'association	A8
	Membre d'association	A9
	Membre d'association	A10
Riverains non engagés dans des associations	Pourtour de l'Etang de Berre	R1
	Pourtour de l'Etang de Berre	R2
	Pourtour de l'Etang de Berre	R3
	Saint-Martin-de-Crau	R4
Entreprises agricoles	Exploitant agricole	EA1
	Exploitant agricole	EA2
	Exploitant agricole	EA3
Acteurs institutionnels	Organisme des Pouvoirs Publics	AI1
	Organisme des Pouvoirs Publics	AI2
	Elu	AI3
Représentant industriel	Association de représentant	RI1

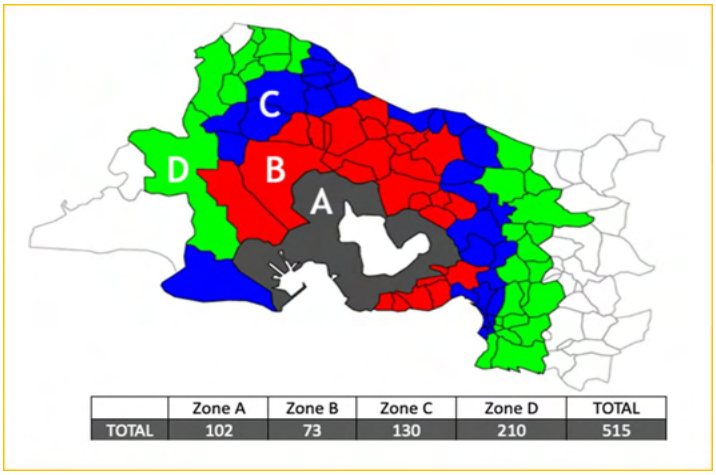


Figure 7 : Stratification géographique de l'enquête quantitative. Chaque groupe de codes postaux (A, B, C et D) compte ¼ des résidences principales de l'ensemble des enquêtés.

Tableau 14 : Caractéristiques sociodémographiques des 515 enquêtés

Variable	Modalités	Effectif et Pourcentage
Genre	Femme	291 (57%)
	Homme	224 (43%)
Age	18-29 ans	100 (19%)
	30-44 ans	146 (28%)
	45-59 ans	173 (34%)
	60-75 ans	96 (19%)
Catégorie socioprofessionnelle	Agriculteurs, exploitants	5 (1%)
	Artisans, commerçants, chef d'entreprise	19 (4%)
	Cadres et professions intellectuelles supérieures	66 (13%)
	Professions intermédiaires	71 (14%)
	Employés	202 (39%)
	Ouvriers	25 (5%)
	Retraités	71 (14%)
	Sans activité professionnelle	36 (7%)
	Étudiants	27 (5%)
Situation matrimoniale	Célibataire	154 (30%)
	Marié.e	204 (40%)
	Divorcé.e	48 (9%)
	Pacsé.e	27 (5%)
	Concubinage	69 (13%)
	Veuf, veuve	13 (3%)
Résidence	Propriétaire	280 (54%)
	Locataire	205 (40%)
	Occupant à titre gratuit	30 (6%)

L'échantillon des participants se compose majoritairement de femmes (56,5 %), avec une forte proportion d'actifs, principalement des employés (39,4 %), des cadres (26,4 %) (Tableau 14). Les répondants appartiennent surtout aux classes d'âge intermédiaires (30–59 ans), près de la moitié des ménages déclarant un revenu mensuel entre 1 500 et 3 500 €. 53,6 % des participants

disposent d’un diplôme de l’enseignement supérieur. Selon le concept d’habitant-usager conscient des risques qui l'entourent (Jaccoud et al, 1996), l’objectif de l’enquête quantitative était de questionner les individus sur leurs représentations et connaissances de leur environnement et les moyens mobilisés pour l’accès aux informations et les adaptations (pratiques) pour réduire les risques ainsi que leur implication dans la recherche (Jaeger, 2017).

II. Résultats

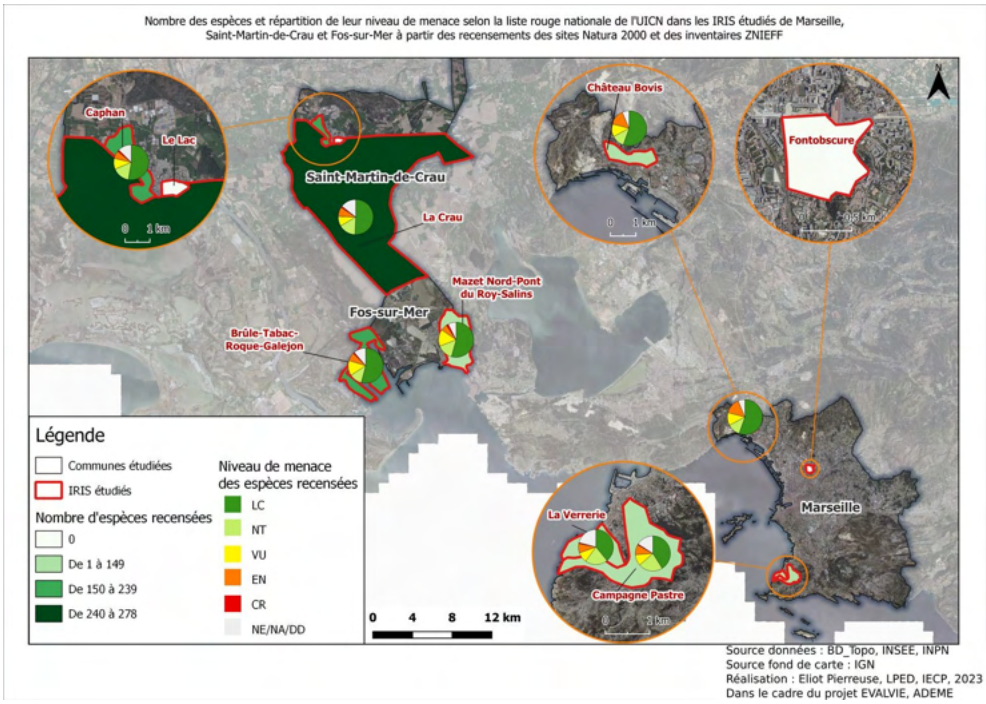
II.1. Indice écologique

Pour calculer le descritpeur BioD, un recensement des espèces par IRIS a été réalisé à travers les inventaires ZNIEFF et Natura2000 en intégrant le statut de protection des espèces de l'IUCN. La Figure 6A présente l'ensemble des jeux de données établis par IRIS pour caractériser la biodiversité faunistique et floristique des territoires, ceux-ci sont complétés par le calcul de la densité d'espèces par IRIS. La flore et l'avifaune sont les deux groupes les plus représentés dans les données de biodiversité comme décrit dans la Figure 6B. En effet, la biodiversité de ces deux groupes, caractéristiques des zones humides méditerranéennes, a connu une augmentation significative depuis les années 1970 (Fraixedas et al., 2019), notamment permis par la présence de nouvelles espèces, considérées pour un grand nombre comme exotiques et entraînant des changements majeurs dans la structure des communautés des différents groupes taxonomiques (Terrin et al., 2014 ; Carboneras et al., 2018). Par ailleurs, les écosystèmes de zones humides, largement représentés sur Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau, sont un milieu favorable pour la reproduction de l'avifaune et des suivis réguliers et pérennes sont effectués depuis de nombreuses années et apportent un jeu de données plus complet par rapport à d'autres groupes taxonomiques.

Pour compléter BioD, les périmètres de protection sont croisés avec les mesures de biodiversité. La cartographie des espaces protégés intégrant, pour les zones urbaines, les parcs et jardins publics est présentée dans la Figure 3. Ces données permettent de caractériser les écosystèmes protégés pour leur haute valeur environnementale mais aussi pour leur fragilité vis-à-vis des perturbations anthropiques et des changements majeurs (Figure 8). La part des espaces protégés au niveau national est un des indicateurs de suivis pour les objectifs de développement durable établis par l'Agence Générale de l'ONU en 2015 et visant la période 2015-2030 (ODD, 2015).

De la même manière, la Figure 9 présente les valeurs des variables par IRIS utilisées pour le calcul du descripteur HydD. Elle intègre la notion de milieu récepteur et de vecteur des contaminations anthropiques ainsi que leur importance dans le fonctionnement et la connexion des écosystèmes (Janse et al., 2015). D'après ces jeux de données, les IRIS les plus recouverts par des surfaces en eau à enjeu sont mis en valeur (Figure 9).

Les résultats de calcul de l'ensemble des variables utilisées pour le calcul des descripteurs BioD et HydD et de l'IVec sont présentés dans le Tableau 15.



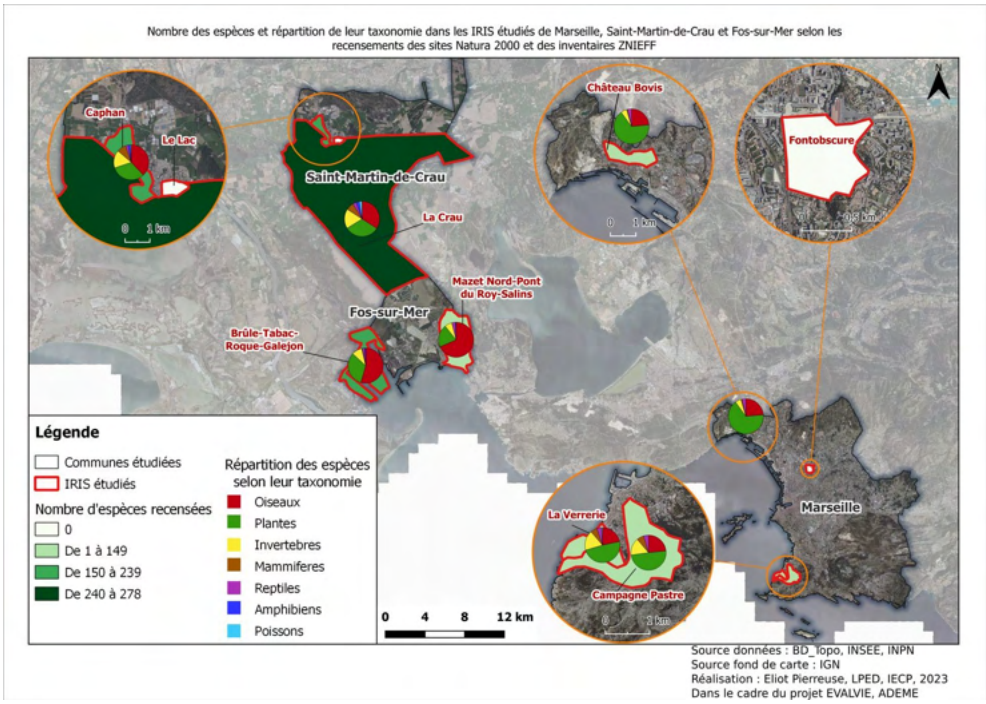


Figure 8 : Cartographie (A) du nombre d'espèces recensées et statut de protection et (B) selon la répartition des groupes taxonomiques identifié dans chaque IRIS à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau (Source données : BD_Topo, INPN, INSEE – Source fond de carte : IGN – Réalisation : Pierreuse, 2023, EVALVIE – ADEME).

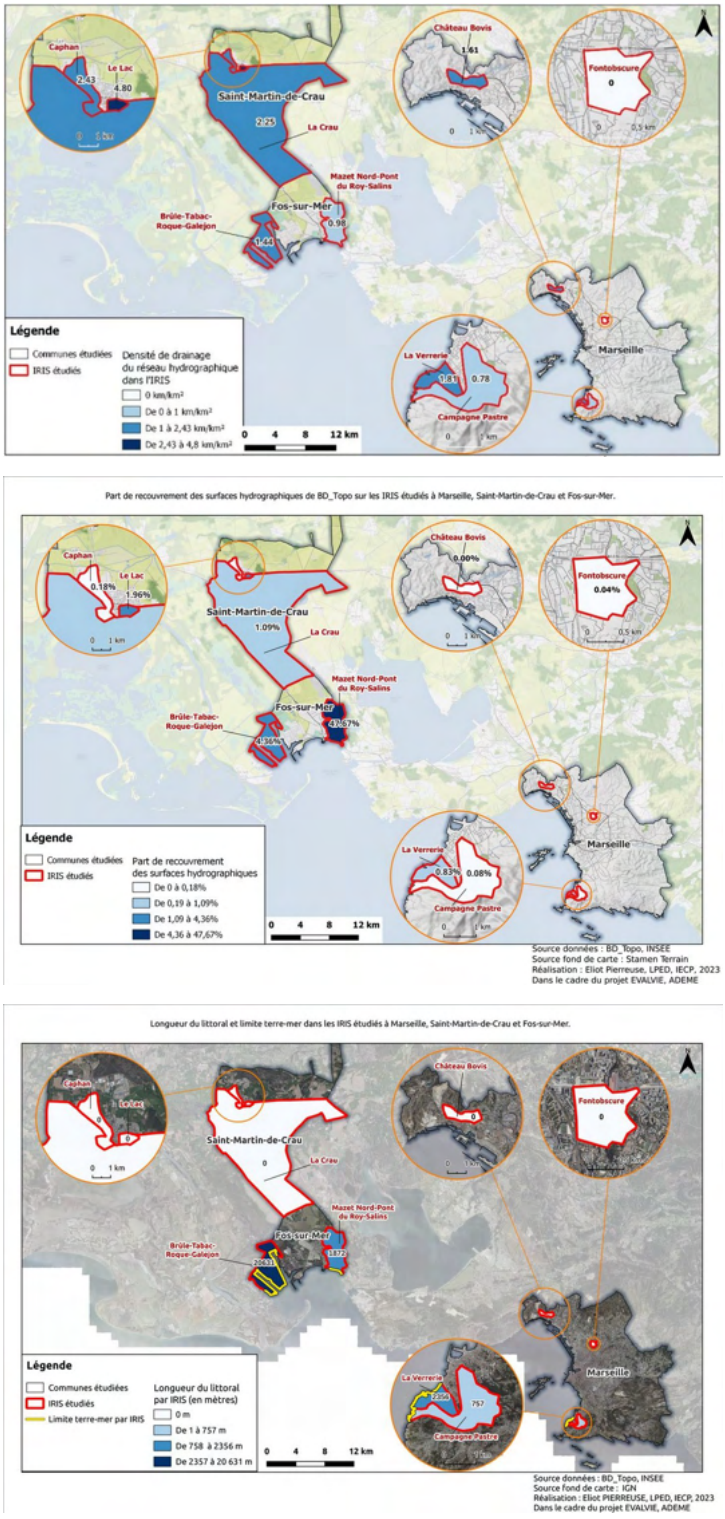


Figure 9 : Cartographie (A) de la densité de drainage du réseau hydrographique, (B) de la part de recouvrement des surfaces hydrographiques calculée à partir de BD_Topo et (C) de la longueur du littoral d'après les données BDTopo8 sur les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau (Source données : BD_Topo, INSEE – Source fond de carte : Stamen terrain – Pierreuse, 2023, EVALVIE – ADEME).

Tableau 15 : Valeur de chaque variable de l'indice écologique calculée à l'échelle des IRIS étudiés

IRIS / Index (code)	A	B	C	D	E	F	G	H
	Log10 (nb d'espèces)	Log10 (nb esp/km²)	Pondération espèces menacées	Somme des parts de surface protégée (%)	Part de recouvrement des parcs urbains	Densité de drainage km/km²	Part des surfaces en eau (%)	Log10 (longueur littoral) / Log10 (superficie IRIS)
MRS-101	2,041	2,021	76,5	0,00	0,00	1,61	0,00	0,00
MRS-301	2,061	2,232	59,0	116,90	0,00	1,81	0,83	0,58
MRS-303	2,029	1,686	59,0	199,37	4,60	0,78	0,08	0,45
MRS-502	0,000	0,000	0,0	0,00	16,18	0,00	0,04	0,00
FOS-101	2,173	1,011	80,0	1,47	0,33	0,98	47,67	0,46
FOS-104	2,346	1,110	124,5	0,00	0,00	1,44	4,36	0,60
SMC-102	2,444	0,280	153,0	45,57	0,01	2,25	1,09	0,00
SMC-103	2,378	1,997	128,0	0,00	3,10	2,43	0,18	0,00
SMC-105	0,000	0,000	0,0	0,00	4,95	4,80	1,96	0,00

Après normalisation des données, les descripteurs BioD et HydD ainsi que l'IVec sont calculés selon les Eq. 2, 4 et 5. La Figure 10 présente la cartographie des descripteurs BioD et HydD ainsi que l'IVec. L'ensemble des données et calculs sont résumés dans l'Annexe 3.

Le descripteur BioD permet de mettre en valeur les IRIS abritant une biodiversité riche, menacée et protégée par des périmètres de protection d'espaces naturels. La valeur du descripteur est forcément comprise entre 0, qui correspond à une vulnérabilité faible et 2,5 qui correspond à une vulnérabilité forte. Ainsi, les IRIS ayant un descripteur élevé disposent, au vu des données utilisées, d'un patrimoine écologique fort à préserver (Figure 10). Assez logiquement, les IRIS situés dans les Calanques à Marseille ont un descripteur BioD élevé (BioD = 1,56 pour MRS-303 et 1,35 pour MRS-301). Cela s'explique par une très forte concentration de périmètres d'espaces naturels protégés, qui compense un nombre d'espèces recensées relativement faible au vu de la valeur patrimoniale de ces espaces. En effet, seuls 3 inventaires ZNIEFF sont situés sur ces territoires.

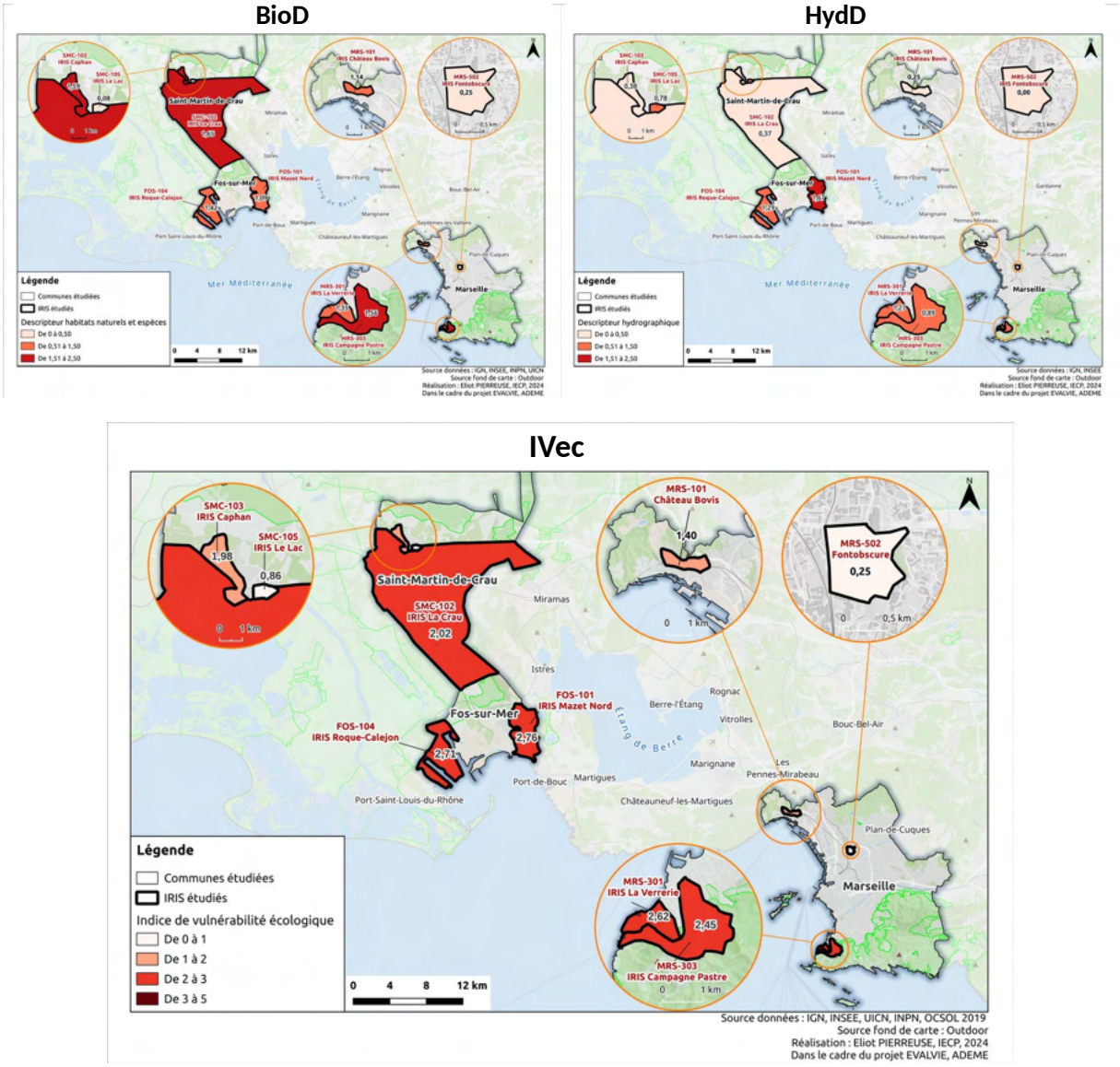


Figure 10 : Carte du descripteur biodiversité (BioD) hydrologique (HydD) et de l'indice écologique (IVec) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau (Source données : BD_Topo, INSEE – Source fond de carte : IGN – Réalisation : Pierreuse, 2023, EVALVIE – ADEME).

L'IRIS SMC-102 fait également partie des IRIS les plus vulnérables sur le plan écologique (BioD = 1,65). La présence des steppes arides dans cet IRIS, milieu unique en France et en Europe, est sans doute un facteur favorisant des recensements de biodiversité. En dépit d'un contexte très industriel, l'IRIS FOS-104 (IRIS Activité) à Fos-sur-Mer a un descripteur BioD relativement élevé (BioD = 1,42), comparable à celui de l'IRIS MRS-301 et SMC-103 (BioD = 1,59) malgré des contextes plus naturels ou agricoles pour ces derniers. En effet, une grande partie de l'IRIS FOS-104 est classé

comme ZNIEFF continental de type 2, ce qui témoigne d'une certaine richesse environnementale du fait de la présence de zone humide d'intérêt. Ainsi, les IRIS les plus vulnérables sont majoritairement compensées par de nombreux types d'aires naturelles protégées, telle que le Parc National des Calanques pour les IRIS MRS-303 et MRS-301 et les Réserves Naturelles du Coussoul de Crau pour SMC-102. De fait, la présence de points chauds de biodiversité, tels que les criques rocheuses de Marseille, les steppes arides de Saint-Martin-de-Crau ou les zones humides de Fos-sur-Mer, encourage la mise en place d'aires protégées et d'inventaires des espèces. A l'inverse, il met en contraste les zones urbaines et les zones plus naturelles ou agricoles, les IRIS SMC-105 et MRS-502 présentent les valeurs les plus faibles du descripteur de biodiversité (BioD = 0,08 et 0,25 respectivement). Ceci s'explique par l'absence d'inventaire des espèces et d'aires naturelles protégées dans ces IRIS. Leur valeur est uniquement due aux parcs présents dans ces deux IRIS urbaines. La disponibilité des données dans certains biomes limite ainsi la capacité à opérationnaliser nombre de ces variables et contraint le calcul d'indice (Fraixedas et al., 2019) en accentuant dans le cas présent la faible biodiversité des milieux urbains.

La carte du descripteur HydD est illustrée dans la Figure 9. Une valeur élevée de HydD traduit d'un réseau hydrographique dense et/ou de nombreuses et vastes surfaces hydrographiques et/ou une bordure littorale importante (Figure 8) qui accentuent la vulnérabilité hydrologique. Les quatre IRIS les plus vulnérables sont situées sur le littoral (MRS-301, MRS-303, FOS-101, FOS-104). Le littoral contribue donc de manière significative à la vulnérabilité hydrologique, compte tenu de son importance. A noter que les deux IRIS de Fos-sur-Mer présentent la vulnérabilité hydrologique la plus élevée (HydD = 1,67 et 1,29 respectivement pour FOS-101 et FOS-104). Au delà d'un périmètre côtier important, ces territoires abritent des surfaces en eau et zones humides d'importance (étangs Lavalduc, de l'Estomac et de l'Engrenier et les salins du Caban). Les autres IRIS présentent un score de vulnérabilité comparativement plus faible, à l'exception de SMC-105 (HydD = 0,78). Cette petite IRIS urbaine est traversée par la rivière « La Capellette » et abrite un plan d'eau, ce qui se traduit par une forte densité de drainage et une importante superficie de surface en eau.

Ces deux descripteurs ont été combinés pour obtenir l'Indice de Vulnérabilité Écologique (IVec), cartographié dans la Figure 9. L'IRIS FOS-101 à Fos-sur-Mer présente l'IVec le plus élevé (2,76). Une vulnérabilité justifiée par la présence cumulée d'espaces protégés et d'une surface hydrographique élevée associés à une importante bordure littorale. Les IRIS des Calanques (MRS-301 et MRS-303) à

Marseille disposent d'un indice de vulnérabilité écologique assez proche (2,62 et 2,45 respectivement) caractérisé principalement par de nombreux espaces et espèces protégés et un périmètre littoral important. L'IRIS de la Crau (SMC-102) présente un indice de 2,02 qui traduit une superficie importante d'espace protégé représentée par le Coussoul de Crau (steppes arides), la présence d'espèces protégées et un réseau hydrographique dense. Enfin, l'IRIS de Fontobscure (MRS-502) à Marseille a un indice de vulnérabilité faible (IVec = 0,25), compte tenue de l'absence d'espaces et d'espèces protégés et d'un réseau hydrographique inexistant.

A noter que les quatre IRIS présentant la plus forte vulnérabilité écologique sont situées sur le littoral. En effet, le littoral, intégré comme une variable dans HydD, influence aussi indirectement d'autres variables. En effet, la Méditerranée est considérée comme un haut lieu de la biodiversité, ce qui a accru la probabilité de réaliser des inventaires d'espèces et de créer des aires naturelles protégées (Medail & Quezel, 1999 ; Crouteix, 2021). De la même manière, la présence de périmètre de protection est couplée à des suivis de biodiversité souvent plus importants.

Pour construire IVec, une part importante du travail a consisté à rechercher et combiner toutes les données utiles disponibles pour construire cette méthodologie. Ce travail a abouti à la création de nouvelles bases de données, l'une d'elles croise les inventaires d'espèces (ZNIEFF et Natura 2000), leur niveau de menace et la table IRIS (Annexe 3). Cette table constitue une nouvelle source de connaissances pouvant être utile pour d'autres projets.

Certaines limites sont apparues dans la construction de cet indice. D'une part, la définition de BioD s'est basée sur les inventaires ZNIEFF et Natura 2000, considérés comme fiables, mais qui ne recensent que certaines espèces « importantes » ou vivant dans des « sites d'importance communautaire » (INPN, 2023 ; Natura2000, 2023). De ce fait, toutes les espèces présentes dans les périmètres Natura 2000 ou ZNIEFF ne sont pas répertoriées. Par ailleurs, l'intégralité du territoire de la zone d'étude n'est pas couverte par ces inventaires. Ainsi, certaines IRIS étudiées (MRS-502 et SMC-105) ne présentent aucune espèce recensée. Or, ces deux IRIS urbaines présentent un intérêt pour la biodiversité, compte tenu de leurs espaces verts urbains respectifs et/ou de leur surface en eau. L'intégration des données de sites web communautaires d'inventaires d'espèces, tels que INaturalist, pourrait permettre de pallier ce manque. Cependant, ces nouvelles bases de données n'ont pas suffi à rééquilibrer les données : seules 3 espèces étaient répertoriées dans INaturalist pour le parc urbain IRIS MRS-502 et aucune dans SMC-105. Au delà des schémas spatiaux statiques, l'exploration de nouvelles approches et méthodologies dans la

modélisation de la distribution des espèces pour caractériser leur dynamique de distribution à travers la prise en compte de la diversité des habitats et de leur connectivité pourrait s'avérer intéressante et plus complète en terme d'inventaire (Sola et al., 2024).

Une autre limite est apparue pour la construction de HydD concernant l'intégration des nappes souterraines. En effet, les eaux souterraines sont utilisées pour l'eau potable, l'agriculture et l'industrie. Elles sont néanmoins sujettes à la pollution, d'origines diverses : industrielle, agricole et domestique (Fried, 1975 ; Stefanakis et al., 2017). Toutefois, les données ouvertes sur les eaux souterraines ne précisent pas leurs limites. Faute de données de qualité, cette variable n'a pas été intégrée à l'IVec. L'ajout d'une variable sur le type d'entité hydrogéologique présente sur l'IRIS intégrant l'utilisation de la ressource et sa vulnérabilité à la pollution pourrait être une première approche, des réflexions sont toujours en cours sur ce sujet.

II.2. Indice socio-économique

L'indice socio-économique se construit en prenant en compte la démographie des territoires et les activités anthropiques associées. Deux descripteurs ont été définis : (i) le descripteur démographique (DemD) et (ii) le descripteur activités anthropiques (ActD).

Le descripteur démographique évalue le potentiel impact de la pollution sur la population en évaluant la vulnérabilité de cette dernière et sa capacité de résilience (individus jeunes et âgés, densité, offre de soin) (Pornet et al., 2012). L'indice français de désavantage social complète les variables sélectionnées pour ce descripteur (Taux de chômage, taux d'ouvriers, taux de bacheliers, revenu médian par unité de consommation) (Bah, 2021).

Le descripteur des activités anthropiques estime le poids des activités humaines sur le territoire, que ce soit activités passées ou actuelles, agricoles et urbaines ainsi que le transport routier et ferroviaire (D'amato, 2020 ; Barthélémy et al., 2023). La prise en compte des sites à l'arrêt et/ou en reconversion permet d'intégrer les territoires potentiellement requalifiables et aménageables dans le cadre des politiques publiques (Cerema, 2023). La construction de ActD s'est appuyée sur la définition des espaces artificialisés proposée par la BDD OCSOL-2019 intégrant les espaces urbains, agricoles et naturels à travers les données des images satellitaires SPOT6, complété par la nomenclature définie par le CRIGE-PACA et de nombreuses données exogènes issues notamment de la BDTopo et du Scan25 de l'IGN, du plan cadastral, de la RPG et des bases de données locales (MOS). Ainsi, les différents espaces artificialisés définis pour le projet se déclinent comme suit :

habitats, réseau routier et industries et entreprises. Ils sont complétés par la prise en compte de la part des surfaces agricoles. Une attention spécifique a été portée aux inventaires des sites et sols pollués sans activité faisant l'objet d'une variable spécifique. Pour cette variable, la BDD Secteurs d'Information des Sols (SIS) et BASOL ont été utilisées pour répertorier les friches industrielles polluées sans activité à l'échelle de l'IRIS comme illustré dans la Figure 11.

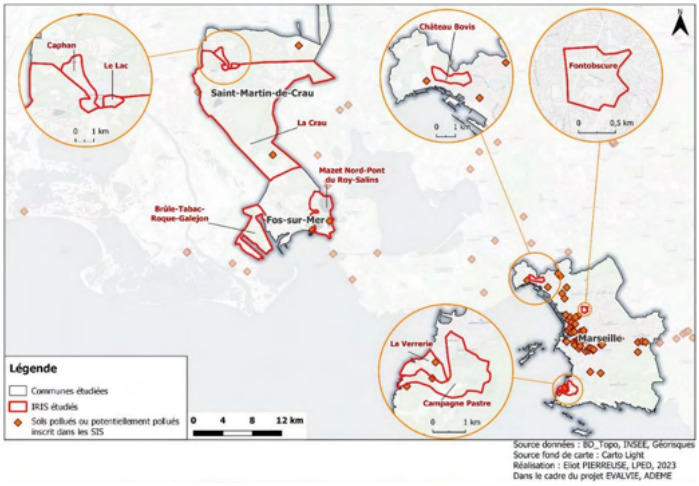


Figure 11 : Cartographie des sols inscrits dans la base de données Secteurs d'Information des Sols (SIS) dans les IRIS sélectionnés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau

Tableau 16 : Valeur de chaque variable des descripteurs ActD et DemD et de l'IVse calculée à l'échelle des IRIS étudiés

IRIS / Index (code)	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	Démographie population (km²)	Part + 65 ans (%)	Part – 18 ans (%)	FDEP	Hopital le + proche (décimal heure)	Part surf activité (%)	Part réseau routier (%)	Part surf agricole (%)	Part surf habitat (%)	Nbre sites pollués/km²*
MRS-101	1773	0,19	0,23	0,258	0,239	0,211	0,066	0,000	0,538	0,00
MRS-301	3126	0,21	0,15	0,608	0,135	0,046	0,011	0,000	0,432	4,45
MRS-303	166	0,26	0,19	-1,824	0,099	0,043	0,002	0,000	0,055	0,00
MRS-502	5972	0,16	0,24	1,557	0,075	0,261	0,061	0,000	0,516	0,00
FOS-101	256	0,13	0,25	0,766	0,417	0,051	0,020	0,006	0,054	0,07
FOS-104	0	0,00	0,00	NULL	0,239	0,604	0,059	0,000	0,000	0,12
SMC-102	23	0,17	0,24	0,842	0,246	0,081	0,021	0,428	0,012	0,02
SMC-103	1064	0,32	0,16	-0,452	0,321	0,125	0,031	0,261	0,460	1,25
SMC-105	2955	0,40	0,14	0,323	0,323	0,035	0,023	0,026	0,812	0,00

*Nombre de sites pollués à l'arrêt ou en cours de reconversion (SIS, BASOL, 2024)

Après normalisation des données, les deux descripteurs (DemD et ActD) calculés (Eq. 6 et 7) sont compris entre 0 et 2,50. L'indicateur de vulnérabilité socio-économique (IVse) a été calculé en additionnant ces deux descripteurs (Eq. 8), sa gamme de valeur s'étale de 0 à 5. Plus la valeur de l'IVse est élevée, plus l'IRIS est vulnérable sur le plan économique et social comparativement aux autres IRIS.

Les résultats de calcul de l'ensemble des variables utilisées pour le calcul des descripteurs DemD et ActD et de l'IVsec sont présentés dans le Tableau 16. La Figure 12 présente la cartographie des descripteurs DemD et ActD ainsi que l'IVse. L'ensemble des données et calculs sont résumés dans l'Annexe 4.

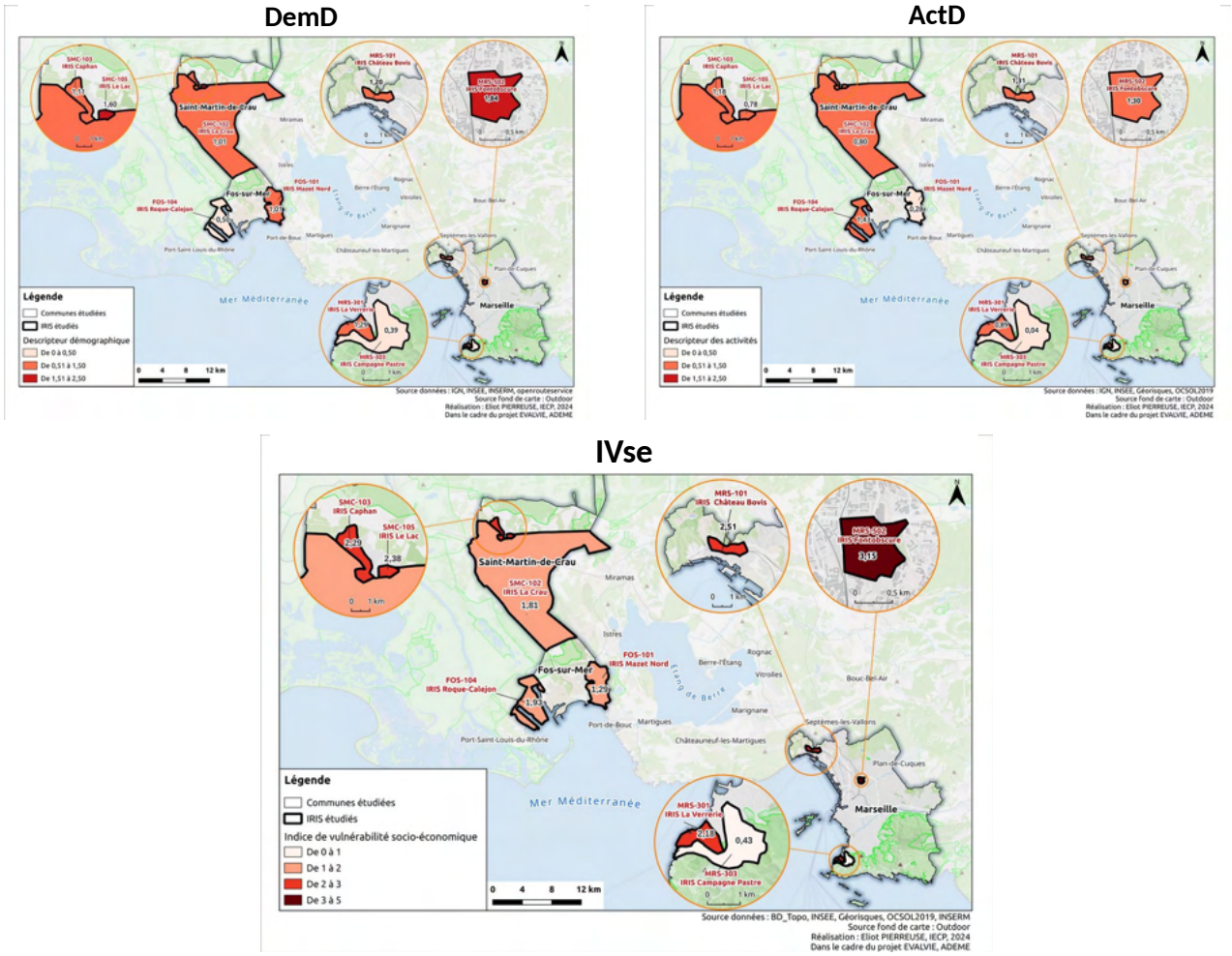


Figure 12 : Carte du descripteur démographique (DemD), d'activités anthropiques (ActD) et de l'indice socio-économique (IVse) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau (Source données : BD_Topo, INSEE – Source fond de carte : IGN – Réalisation : Pierreuse, 2023, EVALVIE – ADEME).

Les résultats mettent en évidence une forte vulnérabilité socio-économique pour plusieurs territoires urbains (MRS-502, MRS-101 et dans une moindre mesure MRS-301) présentant une densité de population importante constituée d'une part élevée de population considérée à risque (plus de 65 ans ou moins de 18 ans) accentué par un réseau routier dense et des surfaces majoritairement artificialisées. L'IRIS 303 à Marseille, dont une part importante est couverte par le périmètre du PNC (cf BioD), présente l'IVse le plus faible de l'ensemble des territoires étudiés en lien avec une faible densité de population, un niveau social élevé et peu d'activité potentiellement émettrices. Dans la ZIP de Fos, l'absence de zone d'habitation limite les vulnérabilités sanitaires des expositions environnementales potentielles. L'IRIS FOS-101, situé en périphérie de zone urbaine présente de nombreux espaces naturels et par conséquent une densité de population relativement faible limitant la vulnérabilité sociale de ce territoire. A Saint-Martin-de-Crau, territoire dominé par l'agriculture, des situations contrastées sont observées. Alors que l'IRIS SMC-102, essentiellement agricole et rural présente une faible vulnérabilité socio-économique, l'IRIS SMC-103 et SMC-105 en zone urbanisée présente une vulnérabilité socio-économique modérée du fait d'un bassin de population relativement important, avec une part importante de population âgée et un accès à des centres de soins assez distant.

II.3. Indice environnemental

II.3.1. Exposition environnementale en métaux

Les teneurs en éléments majeurs et traces ont été relevées dans les lichens et les sols des différents sites d'études. Les résultats par site et par IRIS sont détaillés dans l'Annexe 5. La Figure 13 présente la cartographie à l'échelle des IRIS et des sites de l'Indice de Pollution (PI) calculé pour les lichens, précisant les niveaux de pollution atmosphérique en métaux, et dans les sols pour établir la contamination diffuse métallique de surface.

Dans l'air, à l'échelle des sites, les valeurs de PI fluctuent entre 1,00 (aucun enrichissement), relevé sur un site agricole en itinéraire biologique à Saint-Martin-de-Crau (SMN) à 16,64 enregistré sur un site localisé dans la zone industrialo-portuaire de Fos (ZIP de Fos - GOU) proche d'un incinérateur de déchets domestiques et caractéristique d'une contamination diffuse atmosphérique en métaux élevée, notamment marqué par Cr, Pb et Zn (Annexe 5). L'exposition atmosphérique reflète les émissions actuelles des activités anthropiques et relève des impacts plus marqués en zone industrielle qu'en zone urbaine et agricole. En effet, alors qu'à Fos-sur-Mer tous les sites sauf FOM

(le plus éloigné de la ZIP) présentent des PI dans les lichens supérieurs à 2 synonyme d'une pollution métallique diffuse d'origine anthropique avérée, les sites de Saint-Martin-de-Crau et Marseille, exceptés les sites MRS (PI = 2,57) et MN2 (PI = 2,91), indiquent des PI inférieurs à 2 traduisant l'absence d'une pollution diffuse métallique significative. Le calcul des PI à l'échelle des IRIS confirme ces premiers résultats et met en évidence une pollution marquée et élevée de l'IRIS d'activité FOS-104 situé dans la ZIP (PI = 9,04), largement supérieure à celle relevée dans les zones urbaines de Fos-sur-Mer (PI = 3,11) ou les IRIS de Marseille (PI compris entre 1,40 à 2,57) ainsi qu'en zone agricole à Saint-Martin-de-Crau (PI compris entre 1,18 et 1,66). Autre indicateur des niveaux de pollution atmosphérique en métaux, plus de 75 % des FC de l'IRIS FOS-104 fortement industrialisé sont supérieurs à 2, synonyme de pollution anthropique significative pour la majorité des métaux étudiés. En comparaison, un taux proche de 40 % est relevé pour les FC de la zone urbaine de Fos-sur-Mer. Au contraire, à Saint-Martin-de-Crau et Marseille, plusieurs IRIS présentent aucun FC supérieurs à 2 pour l'ensemble des métaux étudiés.

Pour les sols, bien que des niveaux relativement élevés ont été relevés pour de nombreux métaux dans la ZIP de Fos, le territoire le plus impacté se situe dans le sud de Marseille avec un PI atteignant 17,16 sur le site MS3 proche d'ancienne friche industrielle abritant par la passé d'ancienne fonderie de Pb, principalement influencé par deux métaux particulièrement en excès, Pb (FC = 23,83) et Cd (FC = 10,35). Contrairement à l'exposition atmosphérique marqueur des impacts des activités actuelles sur l'environnement, l'étude de la pollution diffuse des sols met en évidence des pollutions métalliques caractéristiques des pollutions passées. Comme pour l'exposition atmosphérique, les pourcentages des FC supérieurs à 2 les plus élevés sont relevés dans les territoires industrialisés en activité ou en reconversion (activité passée) et mettent en évidence le potentiel effet cocktail lors de contamination multiple. Les résultats moyennés à l'IRIS permettent de faire ressortir une pollution diffuse en métaux principalement dans les zones urbaines et industrielles (ensemble des IRIS de Marseille et IRIS activités de Fos-sur-Mer) comme relevé dans différents travaux (Austruy et al., 2019 ; Diaz-Sanz et al., 2020), et une absence de contamination significative en zone agricole.

A noter pour les métaux, de faibles variations intra-sites ont été observées au sein des IRIS permettant de mettre en évidence une bonne représentativité des territoires d'étude.

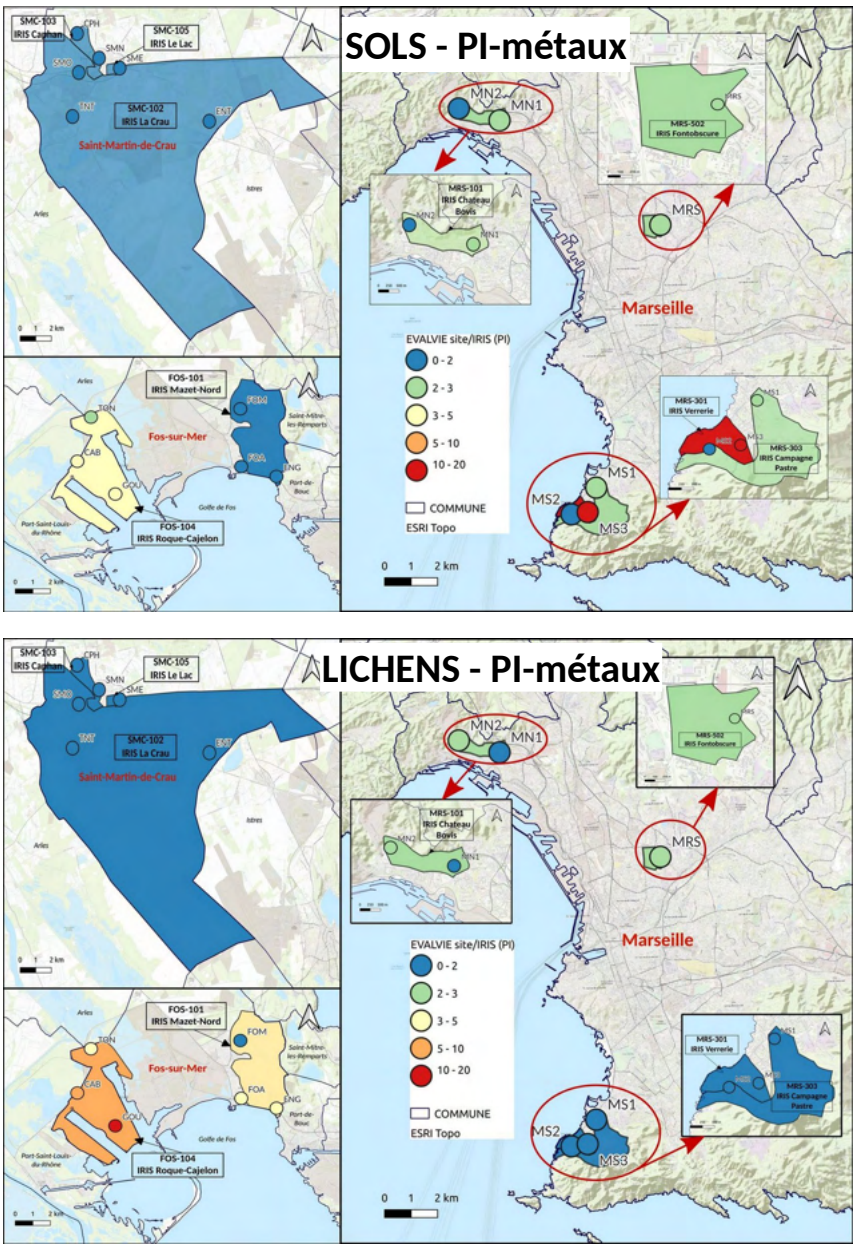


Figure 13 : Cartographie des valeurs du PI pour les métaux à l'échelle des sites et des IRIS des différentes villes étudiées

II.3.2. Exposition environnementale en HAP

Les teneurs en HAP ont été analysées dans les lichens et les sols des différents sites d'études. Les résultats par site et par IRIS sont détaillés dans l'Annexe 6. Comme pour les métaux, à partir des teneurs en HAP dans les sols et les lichens, les PI ont été calculés permettant de considérer la contamination en HAP en intégrant avec le même poids l'ensemble des congénères. La Figure 14 présente la cartographie à l'échelle des IRIS et des sites de l'Indice de Pollution (PI) calculé pour les

lichens, précisant les niveaux de pollution atmosphérique en HAP, et dans les sols pour établir la contamination diffuse en HAP de surface.

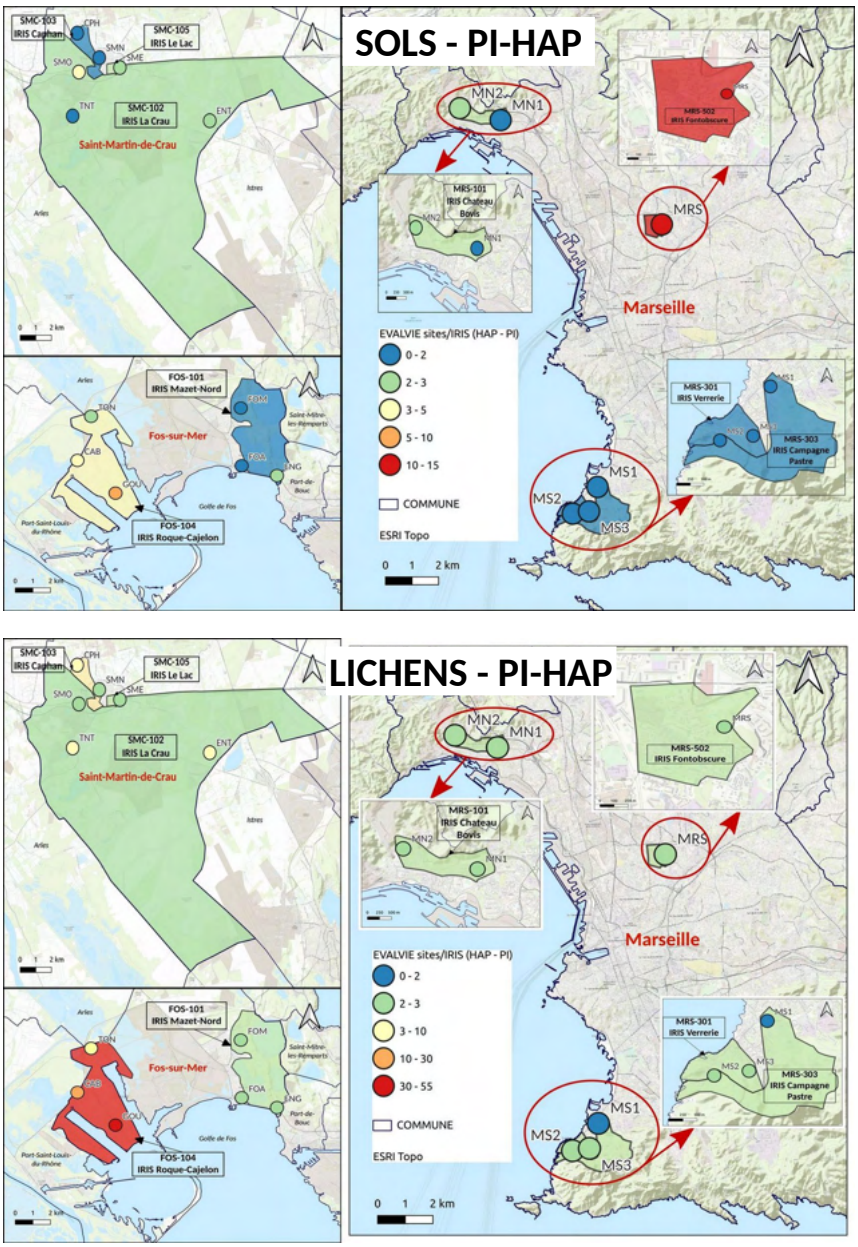


Figure 14 : Cartographie des valeurs du PI pour les HAP à l'échelle des sites et des IRIS des différentes villes étudiées

Comme pour les métaux, les territoires industrialisés de Fos-sur-Mer (FOS-104) présentent les plus fortes valeurs de PI à l'échelle des sites au niveau atmosphérique (PI = 4,82, 11,79, 54,76 respectivement pour les sites TON, CAB et GOU). Par ailleurs, au niveau atmosphérique l'ensemble des sites montre des PI > 2 pour les HAP indiquant une pollution diffuse en HAP généralisée sur

l'ensemble des territoires. Au regard des PI, compris entre 1,94 et 3,02 sur l'ensemble des sites exceptés ceux de la ZIP de Fos et le site CPH à Saint-Martin-de-Crau, des teneurs en HAP relativement homogènes sont rencontrées sur l'ensemble des territoires étudiés, semblant mettre en avant une source d'exposition régionale faible à modérée tel que le trafic routier (Sylvestre et al., 2017 ; Reuillard, 2024 ; Karakas et al., 2025). Sur le site CPH, situé en plein cœur d'une zone rurale, la pratique de l'écobuage sur les résidus de culture pourrait influencer les niveaux relativement élevés retrouvés. L'homogénéité des valeurs se décline au niveau des IRIS avec des valeurs de PI comprises entre 2,01 (MRS-303) et 3,86 (SMC-103) confirmant une pollution faible à modérée au niveau régional potentiellement influencée par le trafic routier relativement dense dans les Bouches-du-Rhône (INSEE, 2024). La ZIP de Fos enregistre les niveaux les plus élevés d'HAP, se traduisant pour l'IRIS FOS-104 par un PI élevé, près de 10 fois supérieur à la moyenne régionale (PI = 23,79). Sur l'ensemble des IRIS, entre un et trois congénères sont présents en excès (FC > 2), c'est notamment le cas de BkF et FlA pour la majorité des sites, régulièrement cités dans les principaux congénères émis par le trafic routier (Saraga et al., 2024 ; Karakas et al., 2025) et les activités anthropiques plus généralement (INERIS, 2015). A noter, sur la ville de Marseille, l'IRIS MRS-101, exposé aux émissions du trafic maritime du port de Marseille-Fos, enregistre le PI le plus élevé dans l'air (PI = 2,38).

Contrairement à l'air, près de la moitié des sites montrent une absence de contamination en HAP dans les sols, avec un PI inférieur à 2. Dans le détail, neuf sites présentent des PI supérieurs à 2. On retrouve les sites industriels de la ZIP de Fos (IRIS FOS-104) dont les activités de chimie et pétrochimie proches, en plus du trafic routier et maritime associés, semblent impactés sur le long terme l'environnement (PI de 2,20, 2,63, 3,60 et 7,73 respectivement pour ENG, TON, CAB et GOU). Peuvent aussi être cités les sites urbains proches de grands axes routiers comme à Marseille, avec les sites MRS et MN2 respectivement à proximité de l'A7 et l'A55, mais aussi à Saint-Martin-de-Crau avec les sites SMO et SME situés en bordures de l'A54. A l'échelle des IRIS, ces résultats se traduisent par des niveaux relativement élevés en HAP dans les sols de la ZIP de Fos mais aussi dans les IRIS du centre et du nord de Marseille fortement exposés au trafic routier et maritime et dans une moindre mesure dans les IRIS de Saint-Martin-de-Crau traversé par l'autoroute A54 (SMC-102 et SMC-105). Ainsi, contrairement aux métaux où le contexte environnemental (agricole, urbain ou industriel) se caractérise par des expositions spécifiques dans les sol et l'air avec des profils de contaminations assez différents, les teneurs et expositions en HAP semblent plus

homogènes sur le territoire, notamment dans l'air, principalement influencée par le trafic routier et maritime.

II.3.3. Exposition environnementale en pesticides

La répartition géographique à l'échelle des sites et des IRIS des concentrations en pesticides totaux, herbicides, fongicides et insecticides dans l'air est illustrée dans la Figure 15.

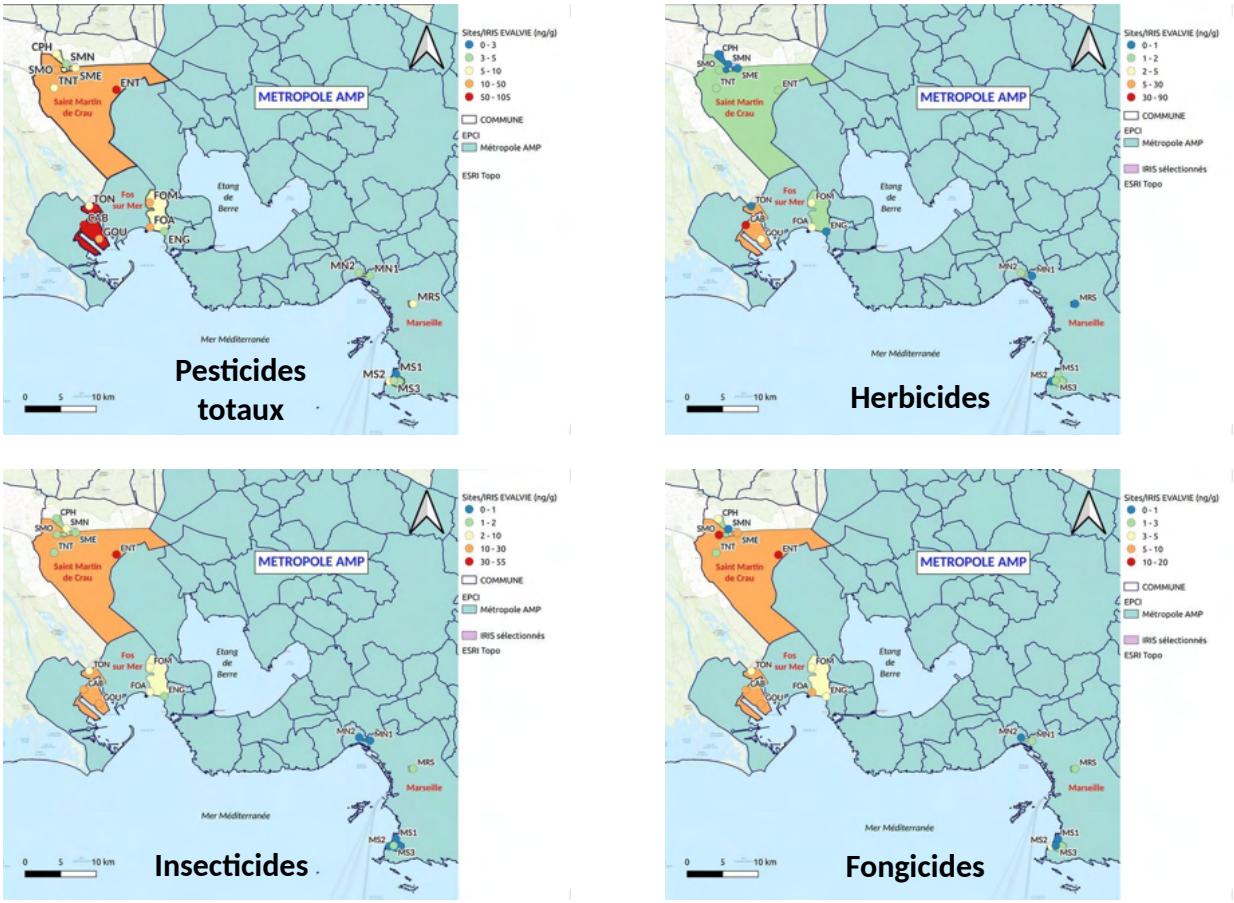


Figure 15 : Répartition géographique des concentrations en pesticides totaux, herbicides, fongicides et insecticides (ng/g) mesurées dans les lichens

Les concentrations en pesticides totaux dans les licens relevées sur l'ensemble des sites étudiés varient de 2,70 ng/g sur le site MS1 dans le sud de Marseille (IRIS MRS-303) à 108,18 ng/g sur le site CAB dans la ZIP de Fos (IRIS FOS-104). Sur les 48 pesticides analysés, 15 ont été détectés sur au moins un site. Parmi eux, 13 pesticides sont considérés comme des substances prioritaires à surveiller dans l'air ambiant, et deux pesticides sont actuellement interdits par la législation

européenne. Les fongicides étaient les plus fréquemment mesurés, avec un taux de détection de 18 %, suivis des insecticides (13 %) et des herbicides (6 %). Les concentrations individuelles de pesticides variaient de 0,3 ng/g à 64,8 ng/g, la concentration maximale étant observée pour le diflufenican sur le site CAB (IRIS FOS-104). Le lindane, le diflufénican, le difénoconazole et le boscalid étaient les pesticides les plus répandus, puisqu'ils ont été détectés sur tous les sites. Malgré son interdiction en 1998 et 2007 pour des usages agricoles et biocides respectivement, le lindane a été retrouvé dans 100 % des échantillons de lichens en raison de sa persistance dans l'environnement. Ce résultat corrobore les analyses de lindane réalisées entre 2012 et 2017 en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, qui ont montré une fréquence de détection de 99 % dans l'air ambiant sur des échantillons prélevés quotidiennement sur filtres (Désert et al., 2018). Il est donc cohérent de trouver du lindane dans les lichens où son accumulation se produit sur plusieurs mois. Le lindane était réparti de manière relativement homogène entre les sites (concentrations quantifiées allant de 1,2 à 4,0 ng/g), ce qui est également cohérent avec une distribution à l'échelle régionale, associée à une dispersion ancienne sans utilisation récente. Le difénoconazole est un fongicide largement utilisé pour lutter contre les maladies de nombreux fruits, légumes, céréales et autres cultures à grains. Son large éventail d'applications combinée à sa longue durée de vie atmosphérique (Socorro et al., 2016), pourrait expliquer le taux de détection et les concentrations élevées. Le boscalid est un fongicide carboximide à large spectre efficace, utilisé pour lutter contre les agents pathogènes des plantes lors de la production de nombreuses cultures et fruits, notamment sous serre. Le diflufénican, quant à lui, est l'un des herbicides les plus utilisés, aux applications multiples, y compris pour le désherbage urbain (voiries et parcs). Différentes études ont rapporté la détection fréquente de ces pesticides dans des échantillons d'air en France et leur potentiel de transport atmosphérique, ce qui pourrait expliquer leur présence sur tous les sites d'échantillonnage (Schummer et al., 2010 ; Désert et al., 2018 ; Durand et al., 2024). Outre le lindane, le chlorpyrifos, pesticide plus récemment interdits a été détecté de manière sporadique, sur deux sites de la ZIP de Fos (GOU et CAB) et sur le site ENT en zone agricole. Ce résultat souligne l'importance de ne pas négliger la surveillance des pesticides interdits, car ils peuvent encore être utilisés à des fins domestiques ou pour écouler d'anciens stocks. Des quantités significatives de pyréthroïdes (cyperméthrine et deltaméthrine), de l'herbicide s-métolachlore et du fongicide tébuconazole ont été trouvées sur plusieurs sites, tandis que la présence de pendiméthaline a été clairement identifiée sur le site CAB dans la ZIP de Fos. Enfin, le pyriméthanile et le tétraconazole ont été détectés, mais en deçà des limites de quantification, sur différents sites. Tous ces composés

ont également été fréquemment quantifiés lors de l'étude menée dans cette zone entre 2012 et 2017 (Désert et al., 2018), ce qui confirme un usage préférentiel de ces pesticides à l'échelle régionale.

Les études disponibles dans la littérature scientifique portant sur l'utilisation des lichens pour la surveillance des pesticides dans l'atmosphère sont rares et se limitent principalement aux anciens pesticides organochlorés. Les concentrations moyennes de lindane et de chlorpyrifos rapportées dans les études les plus récentes variaient de 0,15 ng/g à 10,06 ng/g pour le lindane et de 1,71 à 2,25 ng/g pour le chlorpyrifos, des niveaux similaires aux valeurs obtenues dans cette étude (1,7 ng/g et 0,2 ng/g en moyenne pour le lindane et le chlorpyrifos, respectivement) (Schrlau et al., 2011 ; Herzig et al., 2019). Des études antérieures ont fourni des données historiques sur la biosurveillance du lindane dans l'atmosphère, avec des concentrations atteignant 130 ng/g lorsque son utilisation était encore autorisée, puis une diminution progressive jusqu'aux niveaux actuels (Villeneuve et al., 1988 ; Herzig et al., 2019). Étant donné que ces études ont été menées sur différentes espèces de lichens, dans différentes régions, à différentes périodes et sans protocoles d'échantillonnage et d'analyse harmonisés, toute interprétation doit être faite avec prudence. Toutefois, ces résultats soulignent la pertinence de la biosurveillance des pesticides par les lichens et la nécessité d'étendre ces mesures à d'autres sites, grâce à l'élaboration de protocoles standardisés qui faciliteront la comparaison des résultats entre les études.

Pour une meilleure interprétation de ces résultats, une cartographie du régime parcellaire graphique (RPG) de 2020 est proposé dans la Figure 16 pour identifier les groupes de cultures majoritaires situés aux alentours des sites de prélèvements. Elle permet de constater qu'il n'y a pratiquement pas de cultures autour des sites de Fos-sur-Mer et de Marseille, au contraire de Saint-Martin-de-Crau. Les niveaux très élevés de pesticides totaux enregistrés dans la ZIP de Fos sur deux sites proches de sites industriels d'importance (GOU et CAB) et en zone agricole proche de vergers (pêcher, abricotier, oliveraie) sur le site ENT (65,55 ng/g) présentent donc des origines diverses. Dans le détail, sur le site CAB, traversée par les voies ferrées desservant les complexes industriels, une forte concentration en herbicides est observée (notamment le diflufenican utilisé principalement dans le traitement des voiries et espaces verts), ils représentent près de 83 % des pesticides totaux. Le désherbage et l'entretien des voies ferrées pourraient expliquer les concentrations retrouvées. Le site GOU est localisé sur une zone en friche herbacée, les composés mesurés sont principalement des insecticides, notamment la deltamethrine utilisée pour les

traitements anti-moustiques dans le secteur et la cypermethrine utilisée pour le traitement du bois notamment. En zone agricole, le site d'Entressen (ENT), est entouré de différents types de cultures (Figure 16), notamment plus de vergers que les autres sites (au nord, sud et sud-ouest) ainsi que des vignes et des oliviers. Or, ces cultures sont réputées pour faire appel à de plus grandes quantités de pesticides (Ahmad et al., 2024 ; Durand et al., 2024), contrairement à celles des cultures de foin (prairies) qui dominent autour de Saint-Martin-de-Crau. Ce contexte pourrait expliquer les concentrations plus élevées en pesticides retrouvées sur ce site. La majorité de ceux-ci est composée d'insecticides, à 86 %.

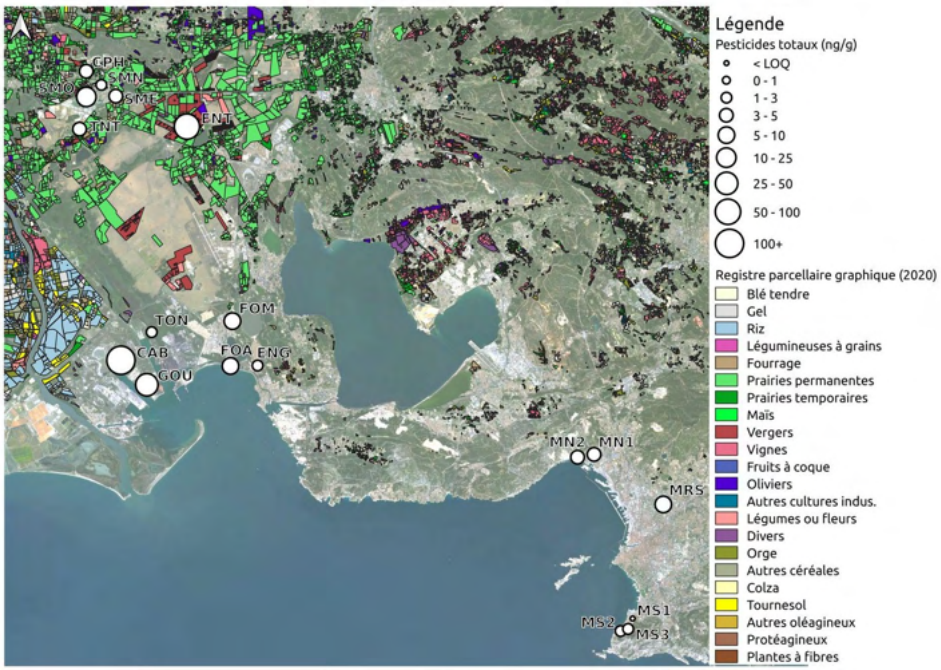


Figure 16 : Répartition géographique des concentrations en pesticides totaux et groupe de culture majoritaire - Source : Registre parcellaire graphique (RPG, 2020)

La Figure 17 représente la cartographie dans les sols des concentrations en pesticides totaux, herbicides, insecticides et fongicides à l'échelle des sites et des IRIS. Les concentrations en pesticides totaux relevées dans les sols varient de 0,1 ng/g sur le site MS2 à 262,14 ng/g sur le site FOA. Un plus grand nombre de congénères a été relevé dans les sols par rapport aux lichens avec 30 molécules détectées dans les sols sur l'ensemble des sites. Comme pour les lichens, les fongicides étaient plus fréquemment détectés avec 12 molécules, suivis des herbicides (11) et des insecticides (7). Les teneurs les plus élevées dans les sols ont été mesurées pour le Folpet sur le site FOA à Fos-sur-Mer (135,2 ng/g), fongicide à large spectre utilisé dans de nombreuses

applications. Il est aussi relevé à des niveaux significatifs sur quatre autres sites, deux en contexte industriel (29,9 ng/g à TON et 16,7 ng/g à GOU), un en contexte agricole (48,5 ng/g sur CPH) et un en zone urbaine (42,1 ng/g à MS3). Seul le lindane, interdit d'utilisation en France depuis 1998, a été détecté sur tous les sites. Outre le lindane, quatre pesticides plus récemment interdits ont été détectés à des niveaux plus ou moins élevés. Il s'agit du chlorpyrifos, du chlorprophame, du flusilazole et de l'epoxiconazole. Alors que le chlorpyrifos, le flusiazole et l'epoxiconazole ont été mesurés à des niveaux sporadiques sur plusieurs sites, le chlorprophame a été relevé en forte concentration sur un seul site (103 ng/g sur SMO). La présence d'un terrain de golfe à proximité de SMO pourrait expliquer les teneurs élevées enregistrées dans le sol, cet herbicide relativement persistant étant principalement utilisé dans les cultures ornementales et maraîchères. A noter les niveaux importants de l'insecticide cypermethrine enregistrés sur plusieurs sites dont le site FOA (110,0 ng/g) qui présente aussi les teneurs maximales en Folpet.

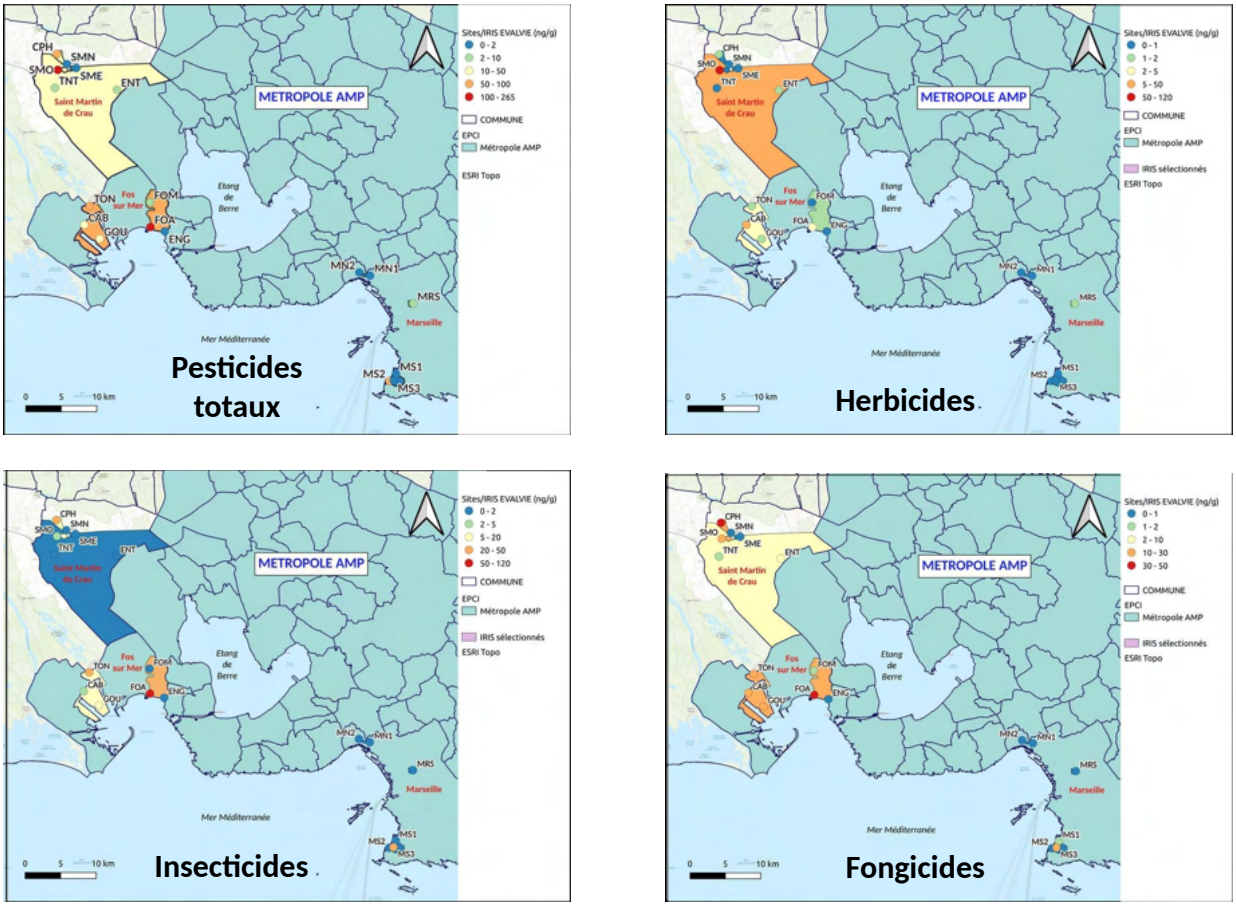


Figure 17 : Répartition géographique des concentrations en pesticides totaux, herbicides, fongicides et insecticides (ng/g) mesurées dans les sols

Ainsi, une plus forte hétérogénéité est relevée en moyenne dans les sols par rapport aux teneurs dans les lichens reflétant l'impact des utilisations et activités passées. Considérés comme exclusivement d'origine anthropique, l'intégration de ces expositions dans les descripteurs édaphique et atmosphérique a été effectuée à travers les concentrations totales en pesticides et le nombre de molécules détectées pour chaque site.

La caractérisation des expositions édaphiques et atmosphériques en pesticides à l'échelle de l'IRIS met en évidence des niveaux plus importants dans les zones industrielles et agricoles bien que des variations importantes peuvent être observées en fonction du contexte local et des types d'utilisation à proximité.

Le choix du PI comme variable pour les expositions environnementales en métaux et HAP dans le calcul des descripteurs atmosphérique et édaphique est pertinente pour la prise en compte des enjeux environnementaux. Il permet en effet de considérer les niveaux de l'ensemble des métaux et HAP considérés et met en avant d'éventuelle pollution mono (FC ou FB max) ou multi-élémentaire (FC ou FB moy). Il répond au contexte environnemental des territoires étudiés et permet de mettre en avant dans les sols comme dans l'air les niveaux de contamination par famille de contaminants (métaux, HAP) (Brady et al., 2015 ; Weissmannova et Pavlovsky, 2017 ; Keller et al., 2025). Pour chaque site échantillonné, une fiche de présentation des résultats a été rédigée et transmise à chaque propriétaire public ou privé ayant mis à disposition leur terrain (Annexe 7).

De plus, la caractérisation des expositions atmosphériques et édaphiques pour les trois familles de polluants permet de considérer les pollutions passées accumulées dans les sols sur le long terme (Austruy et al., 2016 ; Sarkar et al., 2021), telle que la pollution métallique des sols dans le sud de Marseille, et les pollutions atmosphériques actuelles marqueurs plus spécifiquement des activités récentes et en cours, comme observé sur l'IRIS FOS-104 de la ZIP de Fos. Le sol joue ainsi le rôle de puits de contaminants mais aussi de source secondaire pour l'atmosphère à travers les processus d'altération, de lixiviation ou de bioaccumulation dans la chaîne trophique (Besse et al., 2016 ; Austruy et al., 2021), qui implique une gestion de ces contaminations pour réduire l'exposition édaphique et donc environnementale des territoires.

II.3.4. Evaluation des indicateurs d'impacts et de qualité

A travers la caractérisation des expositions atmosphériques, un indicateur d'impact a été intégré au calcul du descripteur atmosphérique (AirD). Il s'agit de la Valeur de diversité lichénique (VDL)

établie à partir des relevés de diversité et d'abondance de flore lichénique réalisés sur les différents sites et présentés en Annexe 8.

La Figure 18 présente la cartographie de la VDL à l'échelle des sites et IRIS étudiés.

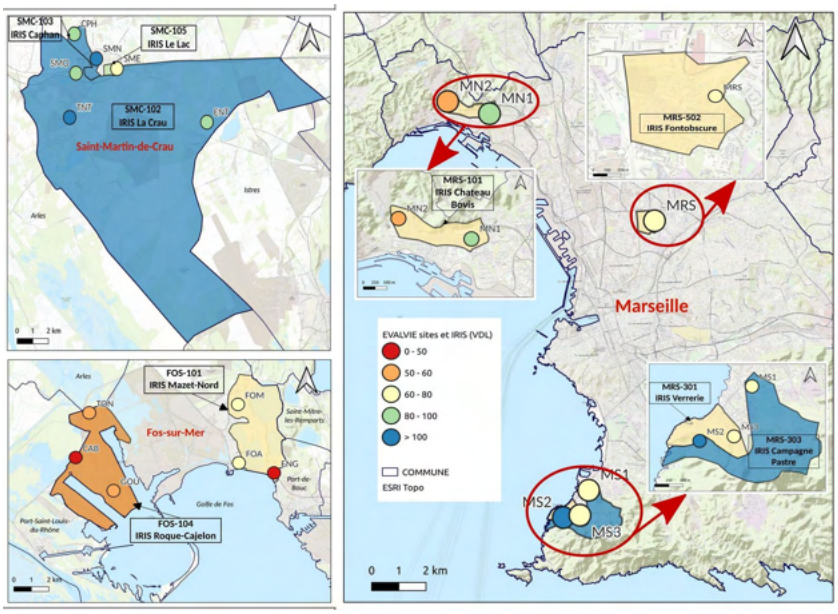


Figure 18 : Cartographie de la Valeur de diversité lichénique (VDL) calculée à l'échelle des sites et IRIS

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, justifiant en partie son prélèvement pour les mesures de bioaccumulation lichénique. 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, Annexe 8). 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 chlarotera* 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 impactées.

La biodiversité lichénique (Annexe 8) varie ainsi en moyenne de 8 à 18 espèces par station pour FOS (14 espèces en moyenne), de 15 à 26 espèces pour MRS (une moyenne de 20 espèces) et de 16 à 25 pour SMC (21 espèces en moyenne). FOS présente moins d'espèces que MRS et SMC. FOS présente également une abondance, un IPA et une VDL moyens plus faibles (respectivement 2,91, 60,35 et 57,92) que MRS (respectivement 3,77, 89,44 et 75,37) et SMC (respectivement 4,80, 95,85 et 96,05). Les plus faibles abondances, IPA et VDL sont mesurés sur les sites de la ZIP de Fos (IRIS FOS-104), synonyme d'une qualité de l'air dégradée et d'un impact de celle-ci sur la biodiversité lichénique et plus largement sur l'environnement. L'abondance et la VDL les plus élevées sont mesurées sur un site agricole de Saint-Martin-de-Crau (TNT, respectivement 5,87 et 117,30), mettant en avant une bonne qualité de l'air sur ce secteur. L'IPA et la diversité la plus élevée sont mesurés à Marseille respectivement sur le site MS2 situé à l'entrée du Parc Naturel des Calanques et le site MN1 dans le nord de Marseille. 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.

Le calcul de la VDL à travers les mesures de bioindication lichénique a permis d'établir un indicateur d'impact de la qualité de l'air, déjà éprouvé dans plusieurs travaux de recherche (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 variables d'impacts dans le descripteur atmosphérique (Figure 18).

En parallèle, un indicateur de qualité des sols a été sélectionné pour intégrer le descripteur édaphique. Il s'agit du stock de carbone dans les sols, une représentation cartographique est présentée à l'échelle des sites et IRIS dans la Figure 19.

Ainsi, l'intégration des paramètres pédochimiques (densité apparentes, teneur en carbone, granulométrie) ont permis le calcul du stock de carbone dans tous les sols échantillonnés. Les résultats montrent une hétérogénéité du stockage du carbone en fonction des types (collinaires,

fersialsol, zones humides) et des occupations de sol. Ainsi, des stocks de carbone plus importants sont caractérisés dans les sols prairiaux (CPH, TNT, ENG, MRS, MS1) et cultivés (MN1, ENT).

L'estimation du stock de carbone dans les sols est aujourd'hui un indicateur pertinent de santé des sols et de leur valeur écosystémique (Ceschia et al., 2023 ; Launay et al., 2025). Les sols sont considérés comme des puits de carbone, le stockage du carbone dans les sols représentent ainsi un enjeu climatique et de sécurité alimentaire majeur qui justifie l'intégration de cette variable dans le calcul du descripteur édaphique (SolD).

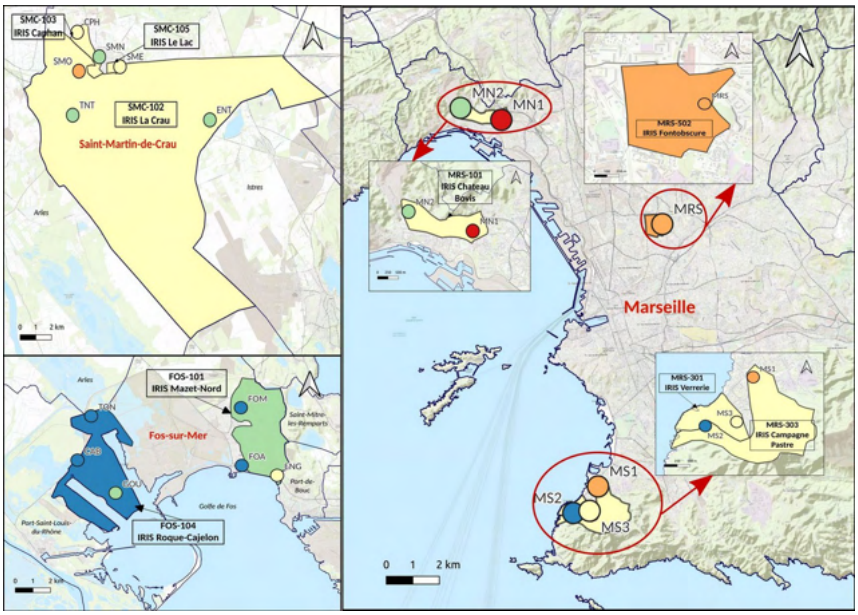


Figure 19 : Cartographie du stock de carbone établi pour chaque site et moyenné à la surface de l'IRIS

II.3.5. Détermination et interprétation des descripteurs et de l'indice environnemental

Les résultats de calcul de l'ensemble des variables utilisées pour le calcul des descripteurs AirD et SolD et de l'IVen sont présentés dans le Tableau 17.

Après normalisation des données, les descripteurs SolD et AirD ainsi que l'IVen sont calculés selon les Eq. 17, 18 et 19. La Figure 20 présente la cartographie des descripteurs SolD et AirD ainsi que l'IVen.

La valeur des descripteurs est comprise entre 0, qui correspond à une vulnérabilité faible et 2,5 qui correspond à une vulnérabilité forte. Ainsi, les IRIS ayant un descripteur AirD ou SolD élevé sont

caractérisés par des pollutions diffuses de l'air et/ou des sols potentiellement impactantes pour l'environnement (Figure 20).

Tableau 17 : Valeur de chaque variable de l'indice environnemental calculée à l'échelle des IRIS étudiés

IRIS / Index (code)	S		T		U		V		W		X		Z	Y
	$PI_{métaux}$		$CF_{métaux}$ > 2 (%)		PI_{HAP}		CF_{HAP} > 2 (%)		Pesticides totaux		Pesticides détectés (%)		SOC	VDL
Matrice	SOL	AIR	SOL	AIR	SOL	AIR	SOL	AIR	SOL	AIR	SOL	AIR	SOL	AIR
MRS-101	2,24	2,45	22,73	18,18	2,15	2,38	15,63	15,63	1,07	4,01	15,63	8,33	5,58	66,55
MRS-301	17,16	1,77	45,45	0,00	0,99	2,34	50,00	12,50	83,54	3,55	16,67	10,42	5,01	67,40
MRS-303	2,15	1,40	9,09	0,00	0,82	2,01	0,00	9,38	1,00	4,01	8,33	10,42	4,39	90,20
MRS-502	2,57	2,57	36,36	9,09	10,17	2,03	0,00	6,25	2,47	5,67	8,33	10,42	6,91	71,30
FOS-101	1,75	3,11	6,06	39,39	1,15	2,28	2,08	14,58	88,25	8,61	15,97	11,11	2,22	61,53
FOS-104	3,40	9,04	36,36	75,76	4,65	23,79	35,42	60,42	50,10	51,19	29,86	18,06	1,82	54,30
SMC-102	1,45	1,66	0,00	3,03	2,36	2,93	10,42	25,00	47,36	29,11	26,39	13,89	4,34	100,57
SMC-103	0,96	1,18	0,00	0,00	1,53	3,86	6,25	25,00	45,14	5,04	11,46	10,42	4,28	99,80
SMC-105	0,97	1,28	0,00	0,00	2,29	2,43	6,25	12,50	0,32	9,48	6,25	14,58	4,40	75,00

Le descripteur SolD renseigne sur l'état des sols et illustre plus spécifiquement les contaminations passées du territoire. Il permet de mettre en valeur des impacts marqués en milieu industriel dense comme observé dans l'IRIS FOS-104 situé dans la ZIP de Fos abritant une forte diversité industrielle (sidérurgie, pétrochimie, chimie, cimenterie, terminaux minéralier/pétrolier/méthanier/céréalier/conteneur, …) à l'origine de contamination multiple mis en avant par des variables T, V et X élevées. Sur ce territoire, AirD est plus élevé que SolD indiquant un potentiel plus fort impact de l'exposition atmosphérique sur l'environnement. Ces émissions industrielles ont des répercutions sur les enjeux environnementaux des territoires urbains proches tel que observé dans l'IRIS FOS-101 situé dans la zone urbanisée de Fos-sur-Mer. En milieu urbain, les pressions environnementales portent plus spécifiquement sur l'état des sols, puits de contaminants, qui enregistre les pollutions passées notamment dans le nord et le sud de Marseille qui hérite d'un lourd passé industriel (IRIS MRS-101 et MRS-301). Sur Saint-Martin-de-Crau, abritant de nombreuses zones agricoles, une plus faible exposition est relevée dans l'air comme dans les sols témoignant d'un plus faible nombre de sources d'émissions anthropiques. Cependant,

les traitements phytosanitaires apportés aux cultures peuvent impacter la qualité de l'air et des sols mais à des échelles très localisées.

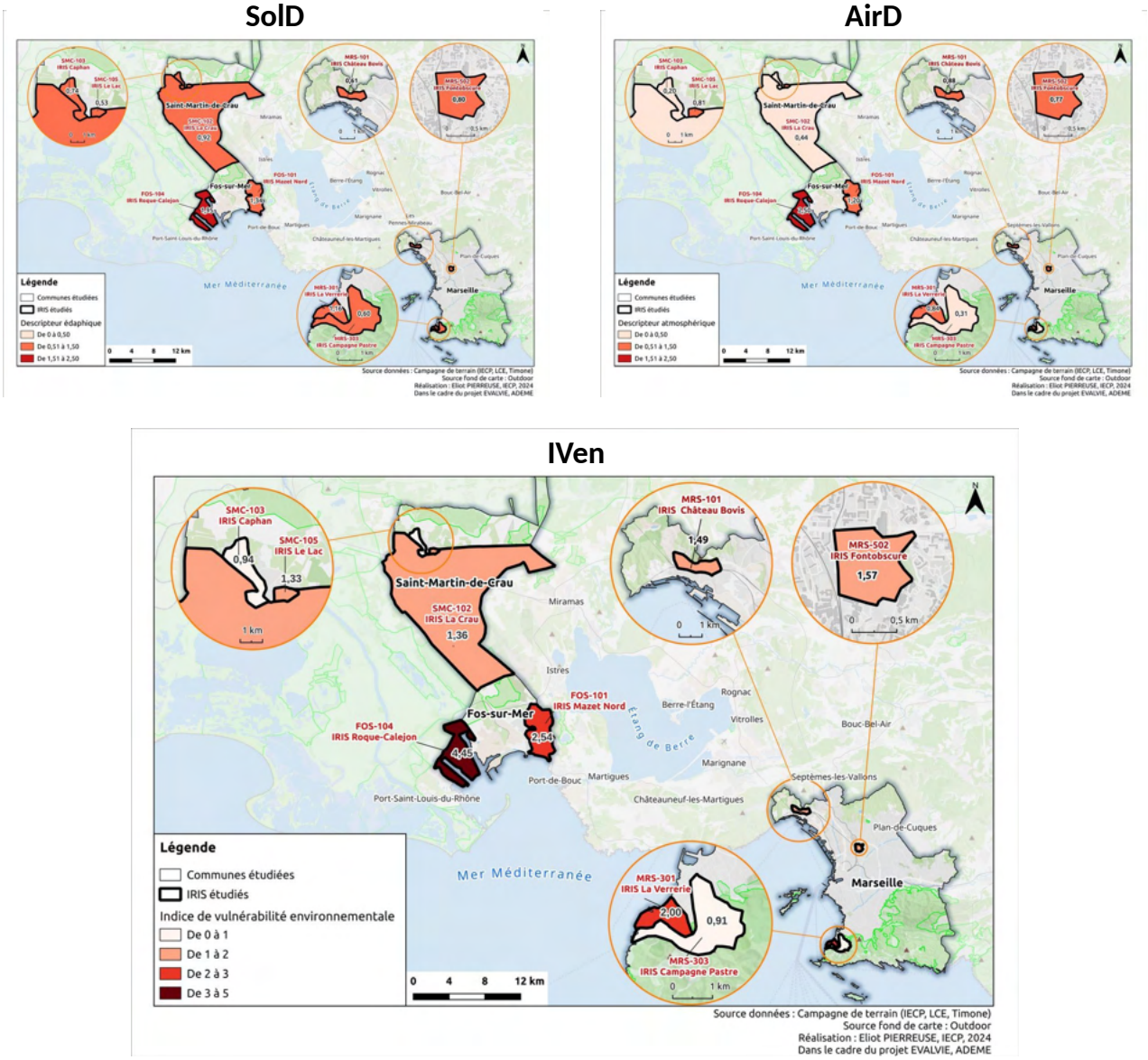


Figure 20 : Carte du descripteur édaphique (SolD), atmosphérique (AirD) et de l'indice environnemental (IVen) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau (Source données : BD_Topo, INSEE – Source fond de carte : IGN – Réalisation : Pierreuse, 2023, EVALVIE – ADEME).

Ces deux descripteurs ont été combinés pour obtenir l'Indice de Vulnérabilité Environnementale (IVen), cartographié dans la Figure 20. Logiquement, l'IRIS FOS-104 à Fos-sur-Mer présente l'IVen le plus élevé (4,45). Une vulnérabilité justifiée par des pollutions diffuses pour de nombreux

éléments relevées dans l'air et les sols. Comme relevé dans le descripteur AirD, ces émissions industrielles impactent aussi de manière plus modérée les territoires urbains proches (IRIS FOS-101, IVen = 2,54). En milieu urbain, une hétérogénéité des pressions environnementales est enregistrée avec des impacts marqués en lien avec l'historique industrielle du territoire et de faibles enjeux environnementaux identifiés dans les territoires périphériques moins urbanisés et proches d'espaces naturels protégés. Enfin, les territoires ruraux de Saint-Martin-de-Crau présente une faible vulnérabilité environnementale principalement caractérisée par l'utilisation de pesticides en zone agricole impactant l'air et les sols. La présence de grands axes routiers, comme sur les territoires urbains de Marseille, peut aussi être considérée comme une source d'exposition potentielle au regard des variables et indices calculés.

Ce travail a permis de définir des variables pertinentes pour l'évaluation des enjeux environnementaux avec pour objectif la caractérisation de l'exposition (variables S, U, W), du mélange de contaminants (variables T, V, X) et des impacts associés aux matrices environnementales d'intérêt (variables Y et Z). Il pourra être complété par l'intégration de la notion de disponibilité des éléments, dont les fractions considérées comme biodisponibles ont été analysées pour les métaux (extraction DTPA). Un travail autour de la prise en compte de la toxicité de chaque élément en considérant les Valeurs toxicologiques de référence (VTR) a été mené mais pour l'instant pas mis en œuvre dans le calcul des descripteurs et de l'IVen.

II.4. Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires

Les différents indices, compris entre 0 et 5, ont été combinés par addition pour obtenir l'Indicateur global de vulnérabilité environnemental et sanitaire (IgV), dont la gamme de valeur varie de 0 à 15. La Figure 21 présente la cartographie de cet indicateur à l'échelle des IRIS sélectionnés pour le projet EVALVIE.

Les résultats de l'IgV mettent en évidence une vulnérabilité environnementale et sanitaire élevée pour les territoires industriels. En effet, malgré l'absence d'exposome humain, l'IRIS le plus vulnérable est FOS-104 (IgV = 8,89), situé en plein cœur de la ZIP de Fos. Sa forte exposition environnementale aux émissions anthropiques associée à la présence d'habitats sensibles de zones humides et une importante bordure littorale accentuent la vulnérabilité de ce territoire. Sur ce territoire, les principales problématiques ont été caractérisées portant principalement sur la nécessité de réduire les émissions de polluants atmosphériques impactant la qualité des milieux et

sur un effort dans les mesures de protection des ressources et de la biodiversité remarquable de ce territoire. L'IRIS FOS-101, situé dans la zone urbaine de Fos-sur-Mer, enregistre aussi une vulnérabilité environnementale et sanitaire significative (IgV = 6,58), mettant en avant un impact diffus et marqué des émissions industrielles sur l'environnement et la santé des populations. Les anciens territoires industriels, localisés notamment au sud de Marseille (IRIS MRS-301, IgV = 6,86), sont aussi identifiés comme vulnérables d'un point de vue environnemental et sanitaire du fait d'une contamination marquée des sols aux regards des activités industrielles passées et de la forte urbanisation de ce secteur. Ainsi, les territoires industriels passés et actuels sont considérés comme fortement vulnérables d'un point de vue environnemental et sanitaire et nécessitent une attention particulière.

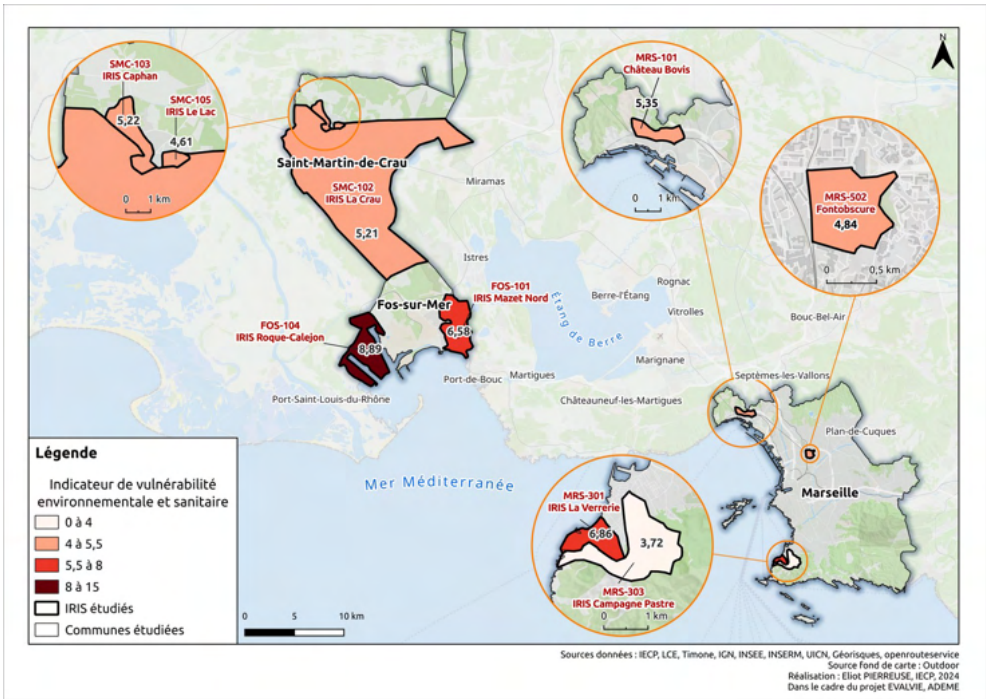


Figure 21 : Carte de l'Indicateur global de vulnérabilité environnementale et sanitaire (IgV) calculé dans les IRIS étudiés à Marseille, Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau (Source données : BD_Topo, INSEE – Source fond de carte : IGN – Réalisation : Pierreuse, 2023, EVALVIE – ADEME).

Les zones agricoles et urbaines, comme à Saint-Martin-de-Crau et Marseille, présentent une vulnérabilité modérée. D'une part, dans les territoires ruraux, elle est caractérisée par la présence d'habitats remarquables et sensibles (zones humides et Coussoul de Crau) et une faible densité de population mais un accès aux soins limités. D'autre part, les zones urbaines telles que Marseille

sont confrontées à des densités de population élevées et potentiellement à risque au regard de la pyramide des âges (population agée et/ou jeune public) et de l'indice de dévalorisation social (FDEP) et à une forte artificialisation des sols par le réseau routier, l'habitat et les diverses activités anthropiques recensées.

Un accès à l'information et la mise en place d'une politique de prévention à destination des populations est un premier axe de travail pour répondre aux problématiques soulevées dans ce travail. La mise en place de l'Observatoire Citoyen de l'Environnement (VOCE) par l'Institut Ecocitoyen à partir de 2012 a pour objectif de faciliter l'accès à la connaissance scientifique et favorise l'implication citoyenne à différentes étapes des projets de recherche menés sur le territoire métropolitain (discussion des axes de recherche, participation à la définition des plans d'échantillonnage, collecte de données, interprétation, diffusion des informations) (Jeanjean et al., 2023). En ce sens, il est une approche pertinente pour réduire la vulnérabilité des populations face aux problématiques environnementales des territoires (Dauphin et Gramaglia, 2017 ; Gramaglia et al., 2023) et répondre à leur intérêt pour la protection de l'environnement et la santé des populations.

Ce travail a ainsi permis d'identifier les problématiques de chaque territoire enjeu par enjeu. Le croisement de ces enjeux et l'élaboration de grilles d'analyse et d'évaluation permettent aux décideurs d'augmenter leurs connaissances des vulnérabilités locales (Tableau 19). Les applications cartographiques interactives facilitent la visualisation et la superposition des données et indices produits et améliorent la connaissance du territoire et de ces spécificités environnementales, socio-économiques et écologiques.

Différents indicateurs de vulnérabilité ou d'impact existent en fonction des aléas étudiés (risques incendies, inondations, séismes, réchauffement climatique). Cependant, les indicateurs composites présentent des limites en termes de reflet de vulnérabilité/impacts/expositions. La principale difficulté concerne l'interprétation et la quantification. En effet, l'utilisation d'indice correspond à une évaluation qualitative des territoires étudiés et permet la définition d'une échelle commune de comparaison entre territoires. Mais l'interprétation de ces indicateurs basés sur des variables prédéfinies doit intégrer la complexité et spécificités des territoires.

Par ailleurs, les connaissances encore limitées sur la définition et l'importance de certains facteurs tel que l'effet cocktail des substances peut biaiser leur influence et pondération.

Ainsi, pour une meilleure adaptation à la dynamique des territoires aux changements environnementaux et sociaux, le poids et le choix de chaque indice peuvent être discutés et adaptés en fonction des thématiques, objectifs et projets d'aménagement (aménagement espace public, évaluation des territoires, reconversion de friches).

L'IgV et la BDD associée sont donc un outil opérationnel et évolutif d'aide à la décision en matière de gestion locale du risque et des potentialités d'usage des territoires. Cet outil permet la prise en compte des interactions écosystèmes-systèmes socio-économiques, avec une jeu de données homogénéisées à l'échelle des IRIS. La simplicité de calcul de l'indicateur, sa souplesse dans le choix et le poids des indices et descripteurs et sa transparence à travers la standardisation des valeurs de chaque indice facilite son utilisation, l'interprétation des données obtenues et l'élaboration de grilles d'analyses permettant aux décideurs d'augmenter leurs connaissances des vulnérabilités locales.

II.5. Premiers résultats de l'enquête sociologique

II.5.1. Rôle des politiques publiques et interactions entre les acteurs du territoire

Durant cette enquête, l'objectif était d'amener une réflexion sur les perceptions et les pratiques citoyennes vis-à-vis des risques sanitaires et environnementaux et leurs places sur le territoire. De fait, ces prérogatives ne peuvent être analysées sans une prise en compte des politiques publiques environnementales. En effet, ces dernières conditionnent les différents échanges entre les acteurs du territoire, en fonction des spécificités des secteurs d'activité, de la capacité et des volontés de mettre en discussion les enjeux. Cependant, il est important de noter que malgré une image d'unicité via la mise en place de réglementation au niveau national, voire supranationale, les politiques publiques en matière d'environnement n'échappent pas aux spécificités locales. Cela signifie qu'il existe un espace de négociation (sur le fond et/ou sur la forme) de l'application des dispositifs entre les acteurs. Ces « arrangements » sont permis par l'obligation des collectivités territoriales d'assurer le développement économique des territoires et qui doivent faire coïncider les intérêts d'un groupe constitué et ceux d'un public diffus.

Une telle tension peut être à l'origine d'une « captation du régulateur » : situation où les intérêts de l'industrie exercent une influence prédominante sur les actions de l'agence régulatrice » (Reich, 2010). Cet espace, plus ou moins formalisé, est le fruit de la multiplicité des acteurs, ayant des

objectifs et des attentes plus ou moins différents et tentant d'influencer la prise de décision. À travers ce point, c'est l'interdépendance des acteurs qui peut être mis en avant.

Concernant la participation/concertation citoyenne dans l'élaboration des politiques publiques environnementales, cette enquête a permis de mettre en lumière plusieurs prérogatives. Tant sur le fond que sur la forme, la mise en place d'une concertation citoyenne doit être comprise et acceptée par l'ensemble des acteurs afin d'assurer son bon déroulement, ainsi que sa légitimité. Cependant, nos recherches ont mis en évidence un manque de reconnaissance ressenti par une partie des acteurs, amenant une forme de hiérarchisation entre les « sachants » et les « profanes ». Cette distinction peut amener une défiance vis-à-vis des recommandations et préconisations scientifiques et politiques, considérées comme « déconnectées » du réel. En effet, les acteurs semblent dans l'ensemble en accord avec les préconisations scientifiques, mais la mauvaise communication ainsi que la non prise en compte de l'expertise citoyenne peut amener une rupture dans l'organisation d'une concertation citoyenne. La prise en compte du ressenti et du vécu des riverains semble fondamentale afin de favoriser la communication. De plus, il est également important de prendre en considération les choix et décisions du passé dans la construction du territoire, car ces derniers influencent la perception des acteurs.

Durant notre enquête, l'objectif était de comprendre l'organisation des pratiques, repérer les stratégies citoyennes pour se prémunir des risques et les logiques d'actions mobilisées. De fait, loin d'être naturel, l'engagement des citoyens est le résultat d'une construction sociale, pouvant prendre des formes différentes. De manière individuelle, les acteurs tentent de se protéger par l'adaptation des pratiques (alimentaires, déplacements…) afin de créer un environnement proche plus sain. Cependant, l'engagement est majoritairement souvent associé à une résolution plus grande de protection de l'environnement dans son ensemble. En effet, on retrouve une pensée tournée vers l'extérieur avec la protection de la biodiversité, mais aussi une volonté de transmettre aux générations futures une planète habitable. On peut noter un tournant à partir des années 2010, avec une augmentation du recours en justice, on passe d'une logique de demande d'action (protéger l'environnement) à une logique de sanction (contre l'inaction des autorités publiques).

Pour revenir sur la construction sociale du risque, on peut noter que celui-ci est négocié, les populations des territoires concernés ont un rôle à jouer et une parole à porter au sein d'espaces de participation afin de co-construire le devenir de leur territoire. Selon Sintomer (2011) « la démocratie procédurale » permet à tous les acteurs qui le souhaitent de s'exprimer, de tracer et

hiérarchiser les propositions, ainsi que d'inclure de façon générale le plus de citoyens possibles dans les phases de concertation et de décision. Elle serait donc adaptée pour favoriser la co-construtution des usages pertinents du territoire (Mottis et al., 2022). Cependant, cette notion de co-construction du territoire peut amener à nous questionner sur la co-responsabiltés des choix. En effet, à travers cette volonté de prise en compte des attentes citoyennes, nous pouvons nous interroger sur la responsabilité de ces derniers dans l'évaluation des politiques publiques, le fait d'inclure les citoyens ne peut-il pas être vu comme un désengagement des autorités publiques et une augmentation de la responsabilité individuelle ?

II.5.2. Implication citoyenne et adaptation des pratiques

La perception et le ressenti des acteurs vis-à-vis du risque sont illustrés par les résultats de l'enquête en ligne : deux personnes sur trois (65 %) ont l'impression d'être fortement exposées aux polluants. En effet, la représentation du territoire conditionne le discours et hiérarchise la construction sociale du risque. Pour faire valoir leurs revendications, les citoyens développent des stratégies afin de se placer aussi comme experts, via une reconnaissance de leur expérience et vécu comme une « compétence pratique » (Salman et Topçu, 2015) ou savoir « d'usage » qui peut contredire ou compléter un savoir scientifique (Sintomer, 2008). Ce recours à l'expérience et au vécu du territoire est vu par les « profanes » comme un atout issu d'une meilleure connaissance des spécificités locales (l'histoire, les caractéristiques, les attentes…). Contrairement aux expertises scientifiques « traditionnelles » (systémiques) non connectées au territoire (Lah, 2025), la connaissance du territoire intègre aussi un engagement affectif, représentant une forme de stabilité identitaire et conditionnant la capacité des acteurs à agir. La co-construction des risques environnementaux et sanitaires par les acteurs du territoire permet de garantir l'éthique de l'habitabilité (Breviglieri, 2006). Cette question du ressenti et de l'influence des représentations est également comprise par les professionnels du territoire, qui tentent de véhiculer une meilleure image de leurs activités.

« J'ai travaillé sur le projet de parc national avec les îles du Frioul, donc ma prise de conscience sur mon environnement était aussi liée à mon boulot : qualité de l'air, de la mer, des écogestes. J'étais même formée, ça ne m'est pas tombé du ciel, hein » (A6).

La construction sociale du risque est influencée par les événements passés, notamment les accidents industriels. À l'instar de Seveso (1976) ou Tchernobyl (1986), les habitants mobilisent ces

accidents pour dénoncer la nature imprévisible du secteur industriel et les limites des expertises scientifiques censées garantir la sécurité du territoire. Les accidents portés par les médias, amènent une prise de conscience de la part des citoyens sur les dangers auxquels ils sont possiblement exposés. Cette conscientisation s'effectue également sur les choix de mode de vie pouvant avoir un impact néfaste sur la biodiversité. Ces interrogations demandent un effort supplémentaire pour les industriels en termes de communication sur la sécurité et le respect des normes (Bernier, 2007). Cette prise en compte du risque ne se cantonne pas au secteur industriel, le même cheminement de pensée est présent au niveau agricole, comme le cas de la « vache folle » dans les années 1990 ou récemment, les controverses sur l'utilisation des néonicotinoïdes. Des événements et choix passés sur le territoire sont aussi mobilisés par les citoyens pour la construction sociale du risque. Ces références peuvent être politiques par la contestation de choix passés, comme l'industrialisation et l'artificialisation des sols du pourtour de l'étang de Berre (années 1970), ou l'installation de l'incinérateur de Fos-sur-Mer (2010). Ces choix politiques ont déclenché de vives contestations dénonçant une absence de prise en compte des attentes de certains habitants et une accumulation de décisions leur étant défavorables, ainsi que des accidents comme l'explosion au lieudit de la Dynamite à Saint-Martin-de-Crau. L'objectif est d'éclairer le recours aux événements passés, qu'ils émanent d'une construction, d'une représentation individuelle ou qu'ils soient ancrés dans la mémoire collective du territoire, car ces derniers influencent la perception des acteurs.

« Il y a eu un morceau de rail (en 1961), de chemin de fer, parti à 1,2 km. Ça pèse 60 kilos, un truc comme ça. Vous voyez la force de l'explosion. Une chance que ça n'ait pas été sur la ville, mais ça aurait fait quoi si ça tombe sur un immeuble.». (A8)

L'engagement résulte d'un processus complexe. Individuellement, il requiert une série d'étapes menant à la prise de conscience de son statut. Collectivement, il demande la mise en groupe de cas isolés en une cause collective, soutenue par des acteurs associatifs, administratifs ou judiciaires (Jouzel et Prete, 2015). Cette conscientisation et le rapprochement des citoyens auprès d'organisations compétentes est le résultat d'une série d'étapes pouvant trouver son origine dans des situations différentes. La santé est mobilisée, par une partie des citoyens (par exemple, connaître une victime d'une maladie pouvant être imputée à l'exposition aux pollutions) pour s'engager, et selon Busca et al. (2023) dans la mise à l'agenda des problématiques

environnementales. L'approche sanitaire du risque permet pour les citoyens d'enrôler des experts afin d'appuyer leurs argumentaires (Busca, Lewis et al, 2019).

« Moi je suis très sensible à la pollution de l'air car je suis asthmatique bronchitique et il y a 20 ans, j'ai développé un cancer du poumon, qui a été soigné et opéré, traité et guéri. Je suis toujours en soin, hyper surveillée, avec des moments de rechute. Cet hiver, je viens d'avoir 4 mois d'infection pulmonaire. Donc je regarde d'un sale œil les bateaux ». (A6)

Un autre facteur d'engagement concerne l'impact d'une décision politique ou technologique sur sa situation personnelle. L'industrialisation massive des années 1970 sur le pourtour de l'Etang de Berre a ainsi produit une montée des contestations. Outre l'argument sanitaire d'une exposition à une forte concentration d'industries, des riverains dénoncent une perte de qualité de vie liée à ces changements (bruit, embouteillages, etc.) en mobilisant le concept « Nimby », Not in My BackYard (Burningham, 2000). Cela signifie qu'une partie des acteurs, pouvant être en principe en accord avec les objectifs des projets, s'engagent pour modifier leurs emplacements vis-à-vis de leur situation personnelle. Le Nimbysme a cependant été remis en question par Fast (2013) considérant qu'il réduit la complexité du social, sans prise en compte des significations symboliques et émotionnelles. De plus, ces phénomènes sont limités à un territoire donné, en fonction des enjeux (Bell et al., 2005). A travers les entretiens, apparaît chez les habitants une volonté de sauvegarder leur territoire et une demande d'équité dans la mise en œuvre des projets (Wolsink, 2007), disqualifiant un engagement simplement de défense d'intérêt personnel.

« C'est moi qui ai entamé la démarche, avec mes voisins, on a créé l'association. On s'est battu contre le terminal méthanier ou plutôt son emplacement […] Voilà comment ça s'est fait. Et si aujourd'hui on est plus emmerdé là, sur la circulation de la plage, c'est bien grâce à mon association, qui a obtenu au moins ça ». (A8)

Une adaptation des pratiques est parfois développée pour se prémunir des potentielles expositions aux pollutions et respecter l'environnement et la biodiversité, avec la volonté de transmettre aux générations futures une planète habitable. Cet entrecroisement (individuel et collectif) des raisons de l'engagement éclaire la réflexion des acteurs autour des problématiques environnementales. L'engagement ne se manifeste pas seulement par le militantisme via les associations, mais aussi dans les pratiques quotidiennes comme l'utilisation des transports en commun. Cette adaptation des pratiques mêle une prise de conscience des problématiques environnementales et la recherche d'une meilleure qualité de vie (Bernier, 2007). Mais, le

sentiment d'exposition aux pollutions n'amène pas toujours à un changement de pratique. Plusieurs facteurs expliqueraient ces résistances : la peur d'une diminution de la valeur des biens immobiliers, la peur de l'inconnu et de ne pas réussir à s'adapter aux changements (Balogun et al., 2005). 60 % des citoyens interrogés en ligne déclarent ne pas être influencés par l'exposition aux pollutions dans la pratique de leurs activités, et 88 % ne sont pas engagés dans des associations. 30 % adaptent cependant leurs pratiques pour limiter les risques. Ils se distinguent par un profil statistiquement plus favorisé : revenus et diplômes plus élevés, âge plus jeune, proportion accrue de cadres/chefs d'entreprise, et engagement renforcé. Ces résultats quantitatifs confirment les tendances de l'enquête qualitative, avec une révision à la baisse. Différentes actions ont ainsi été répertoriées : se protéger par une diminution de la fréquentation des lieux considérés comme impactés (52 % fréquentent moins l'étang de Berre), une modification des pratiques quotidiennes comme l'utilisation des transports en commun (37 %) ou le développement d'actions considérées plus saines (39 % consomme plus d'eau minérale).

« On avait fait un atelier dans un lycée pour faire un montage électrique d'un capteur, ça met une super dynamique. Après, au lieu de faire de la sensibilisation, on vous passe des diapos et on vous explique. À partir de quelques diapos qui lançaient la discussion, on a eu un échange avec eux et après je suis allée faire des micros entretiens de 3/4 minutes individuels ou à 2/3 et j'en ai fait un petit article qui est sur le site pour donner la parole » (A7)

Une autre forme d'engagement observée est le recours en justice, qui a connu une évolution dans sa représentation, passant d'une défense de la biodiversité, de la souveraineté environnementale et d'une transition écologique ancrée dans les territoires (2000), à une volonté depuis 2015, avec la prise de conscience de l'urgence climatique, de sanctionner l'inaction de l'État (Laigle, 2019).

« Quand je suis arrivée ici, j'ai accepté de faire prendre en charge par mon assurance juridique une plainte contre l'État pour n'avoir pas pris des mesures pour s'occuper de la pollution de Legré Mante (usine). » (A3).

Une interdépendance fonctionnelle et stratégique des acteurs est donc souhaitable, car les politiques environnementales sont le produit d'une gouvernance multi-niveaux, dans laquelle aucun acteur n'a la capacité, seul, de définir et d'appliquer des réponses efficaces. Cette interdépendance repose sur : les compétences croisées (scientifiques, réglementaires, techniques, économiques) ; la circulation de l'information et de l'expertise (laboratoires publics, agences, ONG,

entreprises) ; la nécessité d'une légitimation sociale des décisions, en particulier dans des contextes conflictuels ou incertains (Hedlund et al., 2025).

II.5.3. Préconisations

À partir des données recueillies dans l'enquête et sur le terrain, quelques préconisations peuvent être proposées et mises en place sur notre territoire de recherches.

Un questionnement autour de la place et du rôle de l'expertise dans la construction des politiques publiques semble nécessaire pour comprendre le rapport des citoyens aux recommandations et préconisations scientifiques et politiques. Ce dernier point amène une réflexion autour de l'acculturation des citoyens aux recherches scientifiques. En effet, il semble y avoir un décalage entre certaines recommandations et préconisations scientifiques et la représentativité du terrain par les riverains. Cette différence peut être réduite par l'augmentation des échanges entre ces deux groupes via l'organisation de rencontres sur le territoire, une plus grande communication de la part du monde scientifique, mais également par des interventions au sein du système éducatif sur les problématiques environnementales du territoire afin de favoriser les connaissances.

De plus, il semble important de faciliter l'accès aux données scientifiques pour l'ensemble de la population, basé sur l'exemple de la qualité de l'air, très apprécié par les citoyens, la mise en place d'un site internet regroupant l'ensemble des données avec des explications pour interpréter les résultats. Dans la continuité, il est important de faire accepter le doute aux citoyens, « une acculturation au doute et à l'idée que la connaissance ne se confond pas avec l'accumulation de toutes faites ; ce qui suppose aussi une certaine acceptation du droit à l'erreur pour le politique » (Theys, 1996). Les médias ont également un rôle à jouer sur le traitement de l'information, de la collecte des données à la restitution des informations aux citoyens. Il semble y avoir une attente de la part des riverains sur le traitement médiatique des spécificités locales.

Concernant la participation citoyenne, il est important de mettre en place des règles afin de faciliter les prises de paroles et les échanges. Tout d'abord, il faut définir les rôles, les temps de parole, la nature de la réunion et les objectifs des différentes parties afin que chacun connaisse les règles, les objectifs et puisse s'exprimer en connaissance de cause. Définir les rôles permet de sortir des termes génériques comme « expert », peu compréhensible et pouvant amener une distance entre les acteurs. En définissant plus précisément sa fonction, cela permet de comprendre d'où parle l'interlocuteur et de limiter son intervention à son domaine de recherche. Les

collectivités territoriales ont également un rôle à jouer dans l'amélioration de la participation citoyenne. En effet, il est important de prendre en compte l'expertise citoyenne dans le débat, le ressenti et le vécu des citoyens, même si ces derniers peuvent être à l'encontre des volontés politiques, la mise en œuvre de « démocratie procédurale » (Sintomer, 2011) peut nuancer la position de certains acteurs dans une opposition systématique. Plaider pour une démocratisation de la mise en débat, des enjeux et des solutions pourrait être une des possibilités, en allant recueillir la parole de ceux qui s'expriment le moins (Mottis et al., 2022). Nous pouvons reprendre l'idée d'une « démocratie technique » (Barthe et al., 2014) ou encore du « Parlement des choses » (Latour, 2018), basé sur le modèle politique, scientifique et administratif, afin de faciliter les échanges, « à la politique il emprunte son modèle fondamental : la représentation incertaine et le rapport de porte-parole, en évinçant donc ainsi le vieux modèle épistémologique des sciences qui parlait de vérité et d'adequatio rei et intellectus. À la recherche il emprunte ce qui est probablement son modèle fondamental, l'organisation systématique de l'épreuve expérimentale et de son enregistrement. Il évince donc le modèle de l'action politique en termes de conflit dénonciateur, de valeur permanente et de certitude morale [...] À la technocratie, le Parlement emprunte son modèle fondamental de gestion systématique des archives et des procédures, d'évaluation et d'enregistrement. Ce faisant, il évince de la technocratie son modèle ancien de décision politique dissimulée sous des raisons techniques et de raisons techniques habillées par des décisions politiques » (Latour, 2018). À travers ce « parlement des choses », l'objectif est de mettre en place un climat de confiance via la mise en place de cadre définie. De manière plus concrète, la mise en place de comités d'éthiques avec des personnes sélectionnées en amont par l'ensemble des parties prenantes et chargées d'organiser le débat permet à l'ensemble des parties d'être représentées et de pouvoir s'exprimer.

Une dernière action pouvant être mis en place repose sur le concept d'« équité locale, c'est-à-dire une situation où toutes les parties prenantes d'un projet de développement territorial sont d'accord pour compenser les externalités identifiées collectivement comme injustes » (Bourdin, 2020). Même si ce type de dispositif peut permettre de sortir de situations conflictuelles, il ne parait pas efficace sur le long terme car il ne traite pas les problématiques environnementales de fond. Pour finir, il serait intéressant d'approfondir les recherches concernant la représentation du territoire, les pratiques et les modes d'actions mobilisés en fonction des générations. En effet, nous ne disposons pas du matériel nécessaire pour développer ce raisonnement, mais certains enquêtés insistent sur la différence de représentation du territoire en fonction de l'âge.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Le projet EVALVIE est motivé par la constatation d'un manque de connaissance et de prise en compte dans son ensemble des spécificités écologiques, environnementales et socio-économiques des territoires dans les décisions et projets d'aménagement. Le croisement de base de données regroupant des informations existantes et des observations de terrains sur les enjeux écologiques, environnementaux et socio-économiques et la création de cet indice global de vulnérabilité environnementale et sanitaire permet de faciliter la concertation entre les scientifiques et les décideurs en charge de la gestion durable des territoires. On peut par exemple souligner :

- La quasi non prise en compte de la qualité des sols dans les documents d'urbanisme et une méconnaissance scientifique et sociétale de ce que sont les sols urbains et/ou très anthropisés ;
- Les difficultés à apprécier les interactions écosystèmes-société indispensable en vue de la transition écologique des territoires dans un contexte de changement climatique, de pressions anthropiques fortes et d'implication et demande citoyenne pour la préservation de l'environnement ;
- D'une manière générale, les espaces urbains continuent à s'étendre et sont amenés à évoluer dans le futur, la définition d'un indice global de vulnérabilité permet d'accompagner cette transition des territoires en lien avec les préoccupations sociétales et la préservation de l'environnement ;
- L'idée de prendre en compte la vulnérabilité environnementale et sanitaire d'un territoire pour une meilleure gestion de l'occupation du sol et la construction de PLU plus respectueux des enjeux de chaque territoire répond à une question émergente en ce moment.

Ainsi, le travail mené dans l'évaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires a mis en lumière une vulnérabilité accrue des territoires industriels et urbains causée par de nombreuses sources d'émissions, une qualité des sols dégradés, une part de surface artificialisée élevée et une population dense caractérisant plus spécifiquement le risque. Il permet ainsi de cibler les efforts et actions permettant de réduire cette vulnérabilité et in fine le risque environnemental et sanitaire. Par exemple, concernant les territoires urbains de Marseille, il existe un fort potentiel de reconversion des anciennes friches industrielles permettant de réhabiliter des territoires dégradés et potentiellement source de pollution pour les habitants. Cette initiative

répondrait par ailleurs à la pression foncière toujours plus accrue au fil des années. De même, DemD a permis de compiler des jeux de données sur la démographie des territoires à l'échelle de l'IRIS et identifier les axes de travail autour de la forte densification du réseau routier et la nécessité pour certains secteurs comme MRS-502 ou MRS-101 de développer des moyens de transport en commun plus performants pour réduire le temps de déplacements et le trafic routier.

Sur les enjeux écologiques, ce travail a abouti à la création de nouvelles bases de données qui permettent de croiser les inventaires d'espèces (ZNIEFF et Natura2000), les espaces naturels, leur niveau de menace et la table IRIS. Cette BDD constitue une nouvelle source de connaissances unique, potentiellement utile pour d'autres projets. Certaines limites sont apparues autour des BDD de recensement des espèces fiables mais centrées sur quelques espèces « importantes » (endémique par exemple) ou vivant dans des « sites d'importance communautaire » négligeant d'une certaine manière la biodiversité locale. Ce constat établi à travers ce travail permet de cibler nos efforts pour améliorer les connaissances en milieu urbain ou industriel sur lesquels les données de biodiversité sont relativement parcellaires, tel que les IRIS MRS-502 et SMC-105. Des travaux sont aujourd'hui menés notamment en milieu urbain afin de recenser les espèces locales et inféodées à ces secteurs, notamment à travers l'élaboration des Atlas de Biodiversité Communale (ABC), ainsi qu'autour des sites web communautaires d'inventaire d'espèces. Dans un temps proche, ces recensements pourront être intégrés à l'IVec. Enfin, certains facteurs comme la présence et l'intérêt des nappes souterraines ne sont pas aujourd'hui inclus dans le calcul de l'indice, un travail spécifique pourra être mené sur ce sujet.

Le travail exploratoire mené sur les enjeux environnementaux a permis de définir des indices pertinents (FC, FB, PI) pour l'évaluation des niveaux de contaminations des sols et de l'air pour trois familles de contaminants (métaux, HAP, pesticides). S'appuyant sur l'expertise et les données antérieures de l'Institut Ecocitoyen, l'utilisation de la biosurveillance lichénique a montré toute sa pertinence dans ce travail pour évaluer l'exposition atmosphérique des territoires pour plusieurs familles de polluants. Facile à mettre en œuvre, reproductible et peu coûteuse, cette méthode permet de couvrir un large territoire avec des données qualitatives facilement interprétables. Une poursuite du travail est envisagée en biosurveillance lichénique pour poursuivre l'acquisition des données avec des campagnes sur le territoire de la MAMP organisées tous les 3 ans, complétées par un effort sur la modélisation des données afin d'obtenir un modèle applicable à l'échelle des IRIS. Les campagnes de mesures sur l'état des sols ont permis d'améliorer et tester les différents

protocoles de prélèvements et d'établir les limites et contraintes de mise en œuvre permettant d'adapter les méthodes en fonction des milieux et des objectifs recherchés. La comparaison des différents indices existants pour l'évaluation de la pollution diffuse des sols (CF, EF, PI, IPI, …) a permis de valider et de conforter les choix effectués pour le calcul de l'IVen.

Ce travail contribue à la connaissance et à la prise en compte des interactions écosystèmes-systèmes socio-économiques afin de fournir les « outils » aux décideurs pour pouvoir faire des choix urbanistiques « éclairés » des potentialités d'usage de leur territoire. Ces « outils » n'existaient pas à l'heure actuelle car la réflexion sur la vulnérabilité environnementale et sanitaire avec la prise de conscience des notions d'aléas/risques, de résilience et de vulnérabilité au travers des caractéristiques environnementales et sanitaires sont des concepts récents. La création de base de données intégrées regroupant les différents enjeux environnementaux, écologiques et socio-économiques, leur représentation cartographique ainsi que la définition d'un indice global de vulnérabilité répond au besoin de connaissance sur les interactions humains-environnement et permet d'adapter la dynamique des territoires aux changements environnementaux.

Les contraintes du projet Evalvie confèrent à sa méthodologie toute sa force et son intérêt. L'IgV devant être réutilisable sur l'ensemble du territoire de France métropolitaine, toutes les données nécessaires à son élaboration, excepté celles acquises à travers des campagnes de mesure pour l'IVen, sont disponibles sur l'ensemble du territoire, téléchargeables librement et sans autorisation particulière. Une part importante du travail a consisté à rechercher et combiner toutes les données utiles disponibles pour construire cette méthodologie. Par ailleurs, ce travail vise la reproductibilité afin d'être applicable à tous types de territoire. Ainsi, chaque étape de la construction de la méthodologie mise en place dans le cadre de ce projet a été minutieusement détaillée, avec pour objectifs la sélection de variables d'intérêt et leur pondération, afin de la rendre accessible et facile à utiliser pour les décideurs (Balica & Wright, 2010). Cet outil est un système d'aide à la décision qui doit être précisément décrit pour permettre son adaptation et son utilisation par les instances décisionnelles en matière de gestion locale du risque (Papathoma-Köhle et al., 2019). A ce stade, aucune échelle de valeur n'a été définie pour les différents descripteurs, indices et indicateur produits, la méthodologie développée permet ainsi d'utiliser et d'interpréter ces données en fonction des objectifs et du contexte de chaque territoire et ne se limite pas à une évaluation qualitative de la vulnérabilité. Ainsi, à travers ces mesures de vulnérabilité des territoires, des

préconisations peuvent être faite enjeu par enjeu, en priorisant sur certains territoires plus impactés ou défavorisés, afin de réduire leur vulnérabilité et de limiter les risques associés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

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.

Ahmad, M.F., Ahmad, F.A., Alsayegh, A.A., Zeyaullah, M., AlShahrani, A.M., Muzammil, K., Saati, A.A., Wahab, S., Elbendary, E.Y., Kambal, N., Abdelrahman, M.H., Hussain, S., 2024. Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. Heliyon. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128

Armstrong, R. A., & Bradwell, T. (2011). Growth of foliose lichens: a review. Symbiosis, 53, 1-16.

Aronson, M. F., Lepczyk, C. A., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., MacIvor, J. S., Nilon, C. H., & Vargo, T. (2017). Biodiversity in the city : Key challenges for urban green space management. Frontiers in Ecology and the Environment, 15(4), 189-196. https://doi.org/10.1002/fee.1480

Ashimova, B., Beisenova, R., Menéndez-Pidal, I., Jumabayev, S., Zhupysheva, A., Tazitdinova, R., 2023. Environmental Hazards of the Railway Infrastructure of Kazakhstan. Sustainability, 15(2), https://doi.org/10.3390/su15021321

Assemblée des Départements de France, 2015. ESPACES NATURELS SENSIBLES : Une politique des Départements en faveur de la nature et des paysages. http://www.departements.fr/wp-content/uploads/2016/11/ENS_2015V1_0.pdf

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., Dron, J., Charbonnier, E., Babaguela, N., Miche, H., Keller, C., Chamaret, P., 2016. Teneurs naturelles et apports anthropiques en éléments traces dans les sols à l'ouest de l'étang de Berre. Etude et gestion des sols, 23 (1), p. 125-142. hal-03532602v1

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.

Austruy, A., 2022. EVALVIE : Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires – Rapport d'avancement n°1. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 44 p.

Austruy, A., 2023. EVALVIE : Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire des territoires – Rapport d'avancement n°2. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 47 p.

Bah, T., 2021. Indice français de désavantage social (FDEP). Elfe.

Barthe, Y., Callon, M., Lascoumes, P., 2014. Agir dans un monde incertain: Essai sur la démocratie technique. Le Seuil.

Berthier, N., 2008. Les techniques d'enquête en sciences sociales : méthodes et exercices corrigés. CiNii Research. https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270530313984

BESSE, J., DAVID, B., DALLEAU, N., BRULFERT, G., 2016. Sols contaminés, une source secondaire de polluants pour l'atmosphère ? Le cas des HAP, des pesticides et de l'arsenic. Pollution atmosphérique, 231-232. URL : http://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/5875

Blanchet, A., Gotman, A., 2007. L'entretien (2e éd.). Armand Collin.

Boko, B. A., Konaté, M., & Adamou, R. (2017). Influence du système de drainage sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères du bassin de Tim Mersoï, Nord Niger.

Bourdin, S., 2020. Le NIMBY ne suffit plus! Étude de l'acceptabilité sociale des projets de méthanisation. L'Espace Politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique, 38.

Brady, J., Ayoko, G., Martens, W., Goonetilleke, A., 2015. Development of a hybrid pollution index

for heavy metals in marine and estuarine sediments. Environmental Monitoring and Assessment, 187 (5), 3061-14. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4563-x

Cai, C., Xiong, B., Zhang, Y., Li, X., Nunes, L.M., 2015. Critical Comparison of Soil Pollution Indices for Assessing Contamination with Toxic Metals. Water Air Soil Pollut, 226-352. DOI 10.1007/s11270-015-2620-2

Ceschia, É., Arnaud L., Ihasusta A. et al., 2023. Rapport final du projet Soccrop : Durée de couverture des sols agricoles et stockage de carbone. INRAE ; CESBIO. ⟨hal-04128813⟩

Conservatoire des Espaces Naturels, 1989. Charte des Conservatoires des Espaces Naturels. https://reseau-cen.org/wp-content/uploads/charte-des-cen-2023.pdf

Couto, R.D.R., Faversani, J., Ceretta, C.A., Ferreira, P.A.A., Marchezan, C., Basso Facco, M., Garlet, L.P., Souza Silva, J., Comin, J.J., Bizzi, C.A., Moraes Flores, E.M., Brunetto, G., 2018. Health risk assessment and soil and plant heavy metal and bromine contents in field plots after ten years of organic and mineral fertilization. Ecotoxicology and Environmental Safety, 153, 142–150. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.046

Crouteix, O. (2021). Protéger la biodiversité marine : Regard sur la Méditerranée au prisme des outils de l'UICN. VertigO, Volume 21 Numéro 1. https://doi.org/10.4000/vertigo.30674

Cuartas, L.A., Tomasella, J., Nobre, A.D., Nobre, C.A., Hodnett, M.G., Waterloo, M.J., Mota de Oliveira, S., De Cassia Von Randow, R., Trancoso, R., Ferreira, M., 2012. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. Journal of Hydrology 462, 15-27.

Dalquier, C., 2022. EVALVIE : Évaluation de l'exposition atmosphérique des territoires de la Métropole Aix-Marseille-Provence par biosurveillance lichénique – Rapport de stage. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 45 p.

D'amato, L., 2020. Comment aborder de façon intégrative dans le temps et l'espace des pollutions industrielles dans les Bouches-du-Rhône et leurs effets sur l'enironnement et la santé humaine ? https://www.lamsade.dauphine.fr/~jrouchier/pomoterri/Laetita_D_Amato_2020.pdf

Díaz-Sanz, J., Robert, S., Keller, C., 2020. Parameters influencing run-off on vegetated urban soils: A case study in Marseilles, France. Geoderma, 376, 114455.

https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114455.

Dauphin, C.E., Gramaglia. G., 2017. Toucher la pollution industrielle du doigt grâce aux lichens : ethnographie d'une observation scientifique et citoyenne de l'environnement à Fos-sur-Mer. Techniques & culture, Paris: Maison des sciences de l'homme, 2 (68), 22 p. hal-02607074

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. Ref²C.

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.

Département Bouches-du-Rhône, 2018. Livret de la biodiversite : Nature en Provence. departement13.fr.
https://www.departement13.fr/fileadmin/uploads/publications/livrets_nature/pdf/livret_biodiversite.pdf

Département Bouches-du-Rhône, & UICN Comité français, 2022. Tableau de bord départementale des aires protégées—Bouches-du-Rhône. departement13.fr. https://uicn.fr/wp-content/uploads/2022/12/tableau_de_bord_cd13_vff.pdf

Désert, M., Ravier, S., Gille, G., Quinapallo, A., Armengaud, A., Pochet, G., Savelli, J.L., Wortham, H., Quivet, E., 2018. Spatial and temporal distribution of current-use pesticides in ambient air of Provence-Alpes-Côte-d'Azur Region and Corsica, France. Atmospheric Environment, 192, 241-256. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.054.

Dobson, F.S. (2011). Lichens: An illustrated Guide tothe British and Iris 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.

Dung, T.T.T., Cappuyns, V., Swennen, R., Ky Phung, N., 2013. From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. Rev Environ Sci Biotechnol, 12, 335–353. DOI 10.1007/s11157-013-9315-1

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.

Ebner, F., 2017. Évaluation et cartographie de la vulnérabilité des côtes face aux pollutions par les hydrocarbures : Le cas du littoral des Pays de la Loire et de la côte Est de la mer d'Azov [These de doctorat, Nantes]. https://www.theses.fr/2017NANT2004

Escobar-Camacho, D., Rosero, P., Castrejón, M., Mena, C. F., & Cuesta, F. (2021). Oceanic islands and climate : Using a multi-criteria model of drivers of change to select key conservation areas in Galapagos. Regional Environmental Change, 21(2), 47. https://doi.org/10.1007/s10113-021-01768-0

Fraixedas, S., Galewski, T., Ribeiro-Lopes, S., Loh, J., Blondel, J., Fontes, H., Grillas, P., Lambret, P., Nicolas, D., Olivier, A., Geijzendorffer, I.R., 2019. Estimating biodiversity changes in the Camargue wetlands: An expert knowledge approach. PLOS ONE. 14. e0224235. 10.1371/journal.pone.0224235.

Fraixedas, S., Burgas, D., Robson, D., Camps, J., Barriocanal, C., 2020. Benefits of the European Agri-Environment Schemes for Wintering Lapwings: A Case Study from Rice Fields in the Mediterranean Region. Waterbirds, 43(1), 86-93. https://doi.org/10.1675/063.043.0109

Gaucherel, C., 2003. Pertinence de la notion d'indicateur pour la caractérisation du bassin-versant. L'Espace géographique, 2003/3 (tome 32), p. 265-281. DOI : 10.3917/eg.323.0265.

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.

Guo, W., Liu, X., Liu, Z., Guofeng Li, G., 2010. Pollution and Potential Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin. International Society for Environmental Information Sciences, Annual Conference (ISEIS). doi:10.1016/j.proenv.2010.10.084

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.

Hellequin, A.P., Rican, S., 2026. Pour une démarche géographique en santé environnementale. Bulletin de l'association de géographes français. DOI : https://doi.org/10.4000/13cvd

Herzig, R., Lohmann, N., Meier, R., 2019. Temporal change of the accumulation of persistent organic pollutants (POPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lichens in Switzerland between 1995 and 2014. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 11, 10562–10575. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04236-9.

Hilal, I., Azouagh, A., Messari, J. S. E., Mansour, M. R. A., & Draoui, M. (2015). Cartographie de la vulnérabilité à la contamination des eaux du barrage 9 Avril 1947 (Maroc, Septentrional). 10(1).

INPN. (2023, septembre 20). L'inventaire ZNIEFF.

Hulin, M., Leroux, C., Mathieu, A., Gouzy, A., Berthet, A., et al., 2021. Monitoring of pesticides in ambient air: prioritization of substances. Sci. Total Environ. 753, 141722. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141722.

INDIQUASOL, Base de Données Indicateurs de la Qualité des Sols, 2016. http://www.gissol.fr/programme/bdiqs/bdiqs.php

IGN, 2021. BD TOPO® Version 3.0—Descriptif de contenu.

INPN. (s. d.-a). Espaces protégés—Présentation générale. Consulté 25 avril 2023, à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/programme/espaces-proteges/presentation

INPN. (s. d.-b). L'inventaire ZNIEFF. Consulté 20 septembre 2023, à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/programme/inventaire-znieff/presentation

Insee, 2023. Définition—IRIS. Consulté 24 septembre 2023, à l'adresse https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523

Ives, C. D., Lentini, P. E., Threlfall, C. G., Ikin, K., Shanahan, D. F., Garrard, G. E., Bekessy, S. A., Fuller, R. A., Mumaw, L., Rayner, L., Rowe, R., Valentine, L. E., & Kendal, D. (2016). Cities are hotspots for threatened species. Global Ecology and Biogeography, 25(1), 117-126. https://doi.org/10.1111/geb.12404

Janse, JH, Kuiper, JJ, Weijters, MJ, Westerbeek, EP, Jeuken, MHJL, Bakkenes, M, et al., 2015. GLOBIO-Aquatic, a global model of human impact on the biodiversity of inland aquatic ecosystems. Environ Sci Policy., 48, 99–114.

Jeanjean, M., Dron, J., Allen, B.L., Gramaglia, C., Austruy, A., Lees, J., Ferrier, Y., Periot, M., Dotson, M.P., Chamaret, P., Cohen, A.K., 2023. Participatory environmental health research: A tool to explore the socio-exposome in a major european industrial zone. Environmental Research, 218, https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114865.

Jolivet, C., Falcon, J.L., Berche, P., Boulonne, L., Fontaine, M., Gouny, L., Lehmann, S., Maitre, B., Ratié, C., Schellenberger, E., Soler-Dominguez, N., 2018. Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS): RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine 2016-2027.

Karakaş, D., Berberler, E., Demir, T., Bayramoğlu Karşı, M.B., Yenisoy, S., 2025. Source identification and quantification of real-world PAH contributions from traffic-related exhaust and non-exhaust emission sources using the EFECT method. Chemosphere, 374, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144237.

Keller, C., Oukhattar, M., Reuillard, M., Angeletti, B., Wafo, E., Durand, A., Austruy, A., 2025. Assessment of soil pollution with indices: pros and cons and proposal for improvement. ICOBTE-ICHMET, BUSAN, BEXCO, 22-25th Sept 2025.

Latour, B., 2018. Esquisse d'un parlement des choses. Ecologie, 56(1), 47-64.

Launay C., Constantin J., Houot S. et al. (2021). Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling. Global Change Biology. https://doi.org/10.1111/gcb.15512

Leberger, R., Geijzendorffer, I. R., Gaget, E., Gwelmami, A., Galewski, T., Pereira, H. M., & Guerra, C. A. (2020). Mediterranean wetland conservation in the context of climate and land cover change. Regional Environmental Change, 20(2), 67. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01655-0

Le Berre, I., Hariz, M. R., David, L., & Nogues, L. (2011). Des indices pour hiérarchiser la sensibilité du littoral aux pollutions marines par les hydrocarbures : 104L'exemple normand. Norois. Environnement, aménagement, société, 219, Article 219. https://doi.org/10.4000/norois.3607

Lorant-Plantier, É., 2014. Un indicateur global d'évaluation de la vulnérabilité écologique du milieu le long de grandes infrastructures linéaires : Pourquoi ? Comment ? Cybergeo: European Journal of Geography. https://doi.org/10.4000/cybergeo.26362

Liu, E., Yan, T., Birch, G., Zhu, Y., 2014. Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China. Science of the Total Environment, 476–477, 522–531. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.055

Liu, W., Yuan, C., Farooq, H.T., Chen, P., Yang, M., Ouyang, Z., Fu, Y., Yuan, Y., Wang, G., Yan, W., Wang, J., 2024. Pollution index and distribution characteristics of soil heavy metals among four distinct land use patterns of Taojia River Basin in China. Gondwana Research, 135, 198-207, https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.07.024.

Mingwu, Z., Haijiang, J., Desuo, C., & Chunbo, J. (2010). The comparative study on the ecological sensitivity analysis in Huixian karst wetland, China. Procedia Environmental Sciences, 2, 386-398. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.043

Mottis, T., Dumas, C., Berry, S., Lebot, B., Baills, A., Andriamasinoro, F., & Bellenfant, G., 2022. Ecologisation de la gestion des sites post-mines: Co-construction des connaissances et usages. Du décloisonnement de l'expertise à la dimension relationnelle des activités techniques. Pour, revue du Groupe Ruralités, Éducation et Politiques, 244, 111-122.

Nadeem, F., Jacobs, B., & Cordell, D. (2022). Mapping agricultural vulnerability to impacts of climate events of Punjab, Pakistan. Regional Environmental Change, 22(2), 66. https://doi.org/10.1007/s10113-022-01918-y

Occelli, F., Cuny, M.A., Devred, I., Deram, A., Quarré, S., Cuny, D., 2013. Étude de l'imprégnation de l'environnement de trois bassins de vie de la région Nord-Pas-de-Calais par les éléments traces métalliques : Vers une nouvelle utilisation des données de biosurveillance lichénique. Pollution atmosphérique, 220.

Pierreuse, E., 2023. Conception d'un outil d'aide à la décision permettant d'évaluer la vulnérabilité environnementale et sanitaire d'un milieu. Projet EVALVIE, ADEME, Aix-Marseille Université, 107 p.

Pornet, C., Delpierre, C., Dejardin, O., Grosclaude, P., Launay, L., Guittet, L., Lang, T., Launoy, G., 2012. Construction of an adaptable European transnational ecological deprivation index: the French version. Journal of Epidemiology & Community Health, 66(11), 982–989. doi:10.1136/jech-2011-200311.

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.

Redon, P.O., Bur, T., Guiresse, M., Probst, J.L., Toiser, A., Revel, J.C., Jolivet, C., Probst, A., 2013. Modelling trace metal background to evaluate anthropogenic contamination in arable soils of south-western France. Geoderma, 206, 112–122. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.023

Reich, M.R., 2010. Science, politique et environnement: le cas de la pollution du Michigan par le PBB. Sur la piste environnementale: menaces sanitaires et mobilisations profanes. Paris: Presse des Mines.

Roudposhti, G.M., Karbassi, A., Baghvand, A., 2016. A Pollution Index for Agricultural Soils. Archives of Agronomy and Soil Science. DOI: 10.1080/03650340.2016.1154542

Saraga D, Pachoulis M, Dasopoulou M, Panagopoulos P, Balla D, Bairachtari K, Maggos T., 2024. Source Profile Analysis, Source Apportionment, and Potential Health Risk of Ambient Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Areas of Specific Interest. Atmosphere. 15(8):938. https://doi.org/10.3390/atmos15080938

Sarkar, B., Mukhopadhyay, R., Ramanayaka, S., Bolan, N., Sik Ok, Y., 2021. The role of soils in the disposition, sequestration and decontamination of environmental contaminants. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci , 376 (1834): 20200177. https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0177

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.

Schrlau JE, Geiser L, Hageman KJ, Landers DH, Simonich SM., 2011. Comparison of lichen, conifer needles, passive air sampling devices, and snowpack as passive sampling media to measure semi-volatile organic compounds in remote atmospheres. Environ. Sci. Technol., 45, 24, 10354-10361.

Schummer, C., Mothiron, E., Appenzeller, Brice M.R., Rizet, A.L., Wennig, R., Millet, M., 2010. Temporal variations of concentrations of currently used pesticides in the atmosphere of Strasbourg, France. Environ. Pollut. 158, 576-584.

Sintomer, Y., 2008. Du savoir d'usage au métier de citoyen?. Raisons politiques, (03), 115-133.

Socorro, J., Gligorovski, S., Wortham, H., Quivet, E., 2015. Heterogeneous Reactions of Ozone with Commonly Used Pesticides Adsorbed on Silica Particles. Atmos. Environ. 100, 66–73.

Solà, O., Aquilué, N., Fraixedas, S., Brotons, L., 2024. Evaluating the influence of neighborhood connectivity and habitat effects in dynamic occupancy species distribution models. Ecography, e06985. doi: 10.1111/ecog.06985

Stefanakis, A.I., Zouzias, D., Marsellos, A., 2017. Groundwater Pollution : Human and Natural Sources and Risks. Water Pollution, 4.

Sylvestre, A., Mizzi, A., Mathiot, S., Masson, F., Jaffrezzo, J. L., Dron, J., Mesbah, B., Wortham, H., Marchand, N., 2017. Comprehensive chemical characterization of industrial PM2.5 : Steel plant activities. Atmos. Environ. 2017, 152, 180-190.

Tate, E. (2012). Social vulnerability indices : A comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. Natural Hazards, 63(2), 325-347. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0152-2

Theys, J., 1996. L'expert contre le citoyen? le cas de l'environnement (Doctoral dissertation, Centre national de l'entrepreneuriat (CNE))

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.

Villeneuve, J.P., Fogelqvist, E., Cattini, C., 1988. Lichens as bioindicators for atmospheric pollution by chlorinated hydrocarbons. Chemosphere 17 (2), 399–403. https://doi.org/10.1016/0045-6535(88)90230-5.

UICN, 2012. Categories et criteres Liste rouge.

https://uicn.fr/wp-content/uploads/2016/06/UICN_2012_Categories_et_criteres_Liste_rouge.pdf

UICN France, 2013. Les espaces naturels protégés en France : Une pluralité d'outils au service de la conservation de la biodiversité.

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.

Zhang, S., Wu, T., Guo, L., Zhao, Y., 2023. Assessing ecological risk on the Qinghai-Tibet Plateau based on future land use scenarios and ecosystem service values. Ecological Indicators, 154, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110769.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des pesticides analysés dans les échantillons de sols et lichens……105

Annexe 2 : Questionnaire OMISEP/EVALVIE réalisé dans le cadre de l'enquête sur la perception, les pratiques et le consentement……107

Annexe 3 : Jeux de données et calculs de variables appliqués par IRIS pour le calcul de l'IVec……120

Annexe 4 : Jeux de données et calculs de variables appliqués par IRIS pour le calcul de l'IVse……122

Annexe 5 : Teneurs en métaux mesurées dans les sols et lichens des différents sites échantillonnés……124

Annexe 6 : Teneurs en HAP mesurées dans les sols et lichens des différents sites échantillonnés……126

Annexe 7 : Fiche de présentation des résultats par site à destination des propriétaires privés et publics (site TON)……128

Annexe 8 : Relevés de bioindication lichénique réalisés sur les différents sites d'étude du projet EVALVIE……134

Annexe 1 : Liste des pesticides analysés dans les échantillons de sols et lichens

Nom	Interdiction (Fr)	Principales utilisations
Aclonifen		Maïs, tournesol, pois, légumes, domestiques
Chlorprophame	2020	Pommes de terre
Clomazone		Oleagineuse
Diclofop methyl		Cultures vivrières et fourragères
Diflufenican		Céréales, voiries, espaces-verts/jardins
Dimethenamid-P		Maïs, colza, tournesol, betterave, …
Flazasulfuron		Espaces verts et jardins, viticultures
Flumioxazine		Viticultures, pommiers
Flurochloridone		Tournesol
Isoproturon		Céréales, lavandes
Lenacil		Betterave, lin, porte-graine
Linuron	2018	Maraîchages
Metazachlore		Colza, tournesol, plantes aromatiques
Oxadiazon		Arboriculture, pépinière, domestiques
Pendimethaline	2024	Céréalières, arboriculture, viticulture, maraîchage
Propyzamide		Oléagineuse, légumineuse, maraîchage, viticulture, …
Prosulfocarbe		Céréales, pommes de terres, maraîchages, ornement
S-metolachlore	2024	Maïs, tournesol, …
Terbuthylazine		Viticulture, arboriculture, pépinière
Triallate		Betteraves, orge, tournesol, maraîchage, légumineuse
Boscalid		Céréales, colza, viticulture, maraîchage, …
Cyprodinil		Viticulture, maraîchage et arboriculture
Difenoconazole		Viticultures, Arboricultures, maraîchage
Dimethomorphe		Viticulture, ornement, maraîchage
Epoxiconazole	2019	Céréales, betteraves, maraîchage
Fenhexamide		Viticulture
Fenpropimorphe		Céréales, betteraves, maraîchage
Fluazinam		Viticulture, pomme de terre
Flusilazole	2009	Céréales
Folpet		Blé, tomates, viticultures
Iprodion	2017	Ail, asperges, aubergine, arboriculture, …
Kresoxym methyl		Pommiers, poiriers, viticulture

Pyrimethanil		Viticulture
Spiroxamine		Viticulture
Tebuconazole		Bois, nombreux usages agricoles et domestiques
Tetraconazole	2026	Céréales, betteraves, arboricultures, viticulture
Tolylfluanid	2007	Viticulture
Chlorpyriphos-ethyl		Blé, colza, viticultures, maraîchages
Chlorpyriphos_methyl	2020	Céréales, oléagineuse, pommes de terre
Cypermethrine		Bois, usages agricoles divers et non agricoles
Deltamethrine		Usages agricoles et anti-moustique
Fenoxycarbe	2021	Arboriculture, viticulture
Fipronil	2013	Usage domestiques (cafard/termite) et vétérinaires
Lambda cyhalothrine		Arboriculture
Lindane	1998	Usage domestique et agricole
Permethrine		Stockage des denrées
PBO (Pipéronyl Butoxyde)		Légumineuses, céréales
Pirimicarbe		Céréales, betteraves, pommes de terre, colza, …

En vert : herbicides ; en beige : fongicides ; en violet : insecticides

Annexe 2 : Questionnaire OMISEP/EVALVIE réalisé dans le cadre de l'enquête sur la perception, les pratiques et le consentement

Message de présentation générale de l'enquête

Bonjour,

Nous vous remercions d'accepter de participer à cette enquête de recherche exploratoire, menée conjointement par IECP, INERIS, INRAE et URCA et financé par l'ADEME. Ce questionnaire anonyme, d'une durée de 20 minutes, a pour objectif de recenser vos perceptions, pratiques et connaissances sur les risques de pollution et de vous faire participer à une méthode de sélection de scénarios de gestion dans le secteur des Bouches-du-Rhône.

Quelques questions sur vous

Vous êtes :

Veuillez choisir une réponse

Femme

Homme

Ne se prononce pas

Vous êtes :

Une seule réponse possible

Français.e

Européen.ne

Autres nationalités

Ne se prononce pas

Quel est votre âge :

Votre lieu de résidence :

Une seule réponse possible

Liste déroulante des communes de l'enquête

Depuis combien de temps ?

Une seule réponse possible

Moins de 1 an

Entre 1 et 5 ans

Entre 5 et 10 ans

Entre 10 et 15 ans

Entre 15 et 20 ans

Entre 20 et 25 ans

Plus de 25 ans

Quelle est votre situation matrimoniale :

Une seule réponse possible

Célibataire

Marié.e

Divorcé.e

Pacsé.e

Concubinage

Veuf, veuve

Combien de personnes vivent dans votre logement et âgées de :

0 – 3 ans

4 – 14 ans

14 – 18 ans

Plus de 18 ans

Diplôme le plus élevé obtenu :

Une seule réponse possible

Aucun diplôme ou certificat d'études primaires

Brevet des collèges

CAP/BEP ou équivalent

Baccalauréat, brevet professionnel ou équivalent

Bac +2

Bac + 3 et 4

Bac + 5 et plus

Votre catégorie socioprofessionnelle :

Une seule réponse possible

Agriculteurs, exploitants

Artisans, commerçants, chef d'entreprise

Cadres et professions intellectuelles supérieures

Professions intermédiaires

Employés

Ouvriers

Retraités

Sans activité professionnelle

Étudiants

Dans quelle tranche de revenus mensuels nets (salaire, pension et autres revenus, allocations familiales etc.) se situe votre ménage ?

Une seule réponse possible

Moins de 500 €/mois

De 501 à 1500 €/mois

De 1501 à 2500 €/mois

De 2501 à 3500 €/mois

De 3501 à 4500 €/mois

Plus de 4500 €/mois

Je préfère ne pas répondre

Vous vivez…

Une seule réponse possible

Dans un appartement

Dans une maison

Autres

Concernant votre logement principal, êtes-vous…

Une seule réponse possible

Propriétaire

Locataire

Occupant à titre gratuit

Avez-vous accès à un jardin (privé ou partagé) dans votre logement ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

Quel type de jardin possédez-vous ?

Une seule réponse possible

Jardin d'agrément

Jardin potager

Jardin d'agrément et potager

Autres

Quel est votre niveau de fréquentation ?

Une seule réponse possible

Jamais

Plusieurs fois par an

Plusieurs fois par mois

Plusieurs fois par semaine

Plusieurs fois par jour

A quelle fréquence vous rendez-vous dans une de ces communes ? (c'est-à-dire Vitrolles, Saint–Mitre–les–Remparts, Saint–Chamas, Rognac, Port–Saint–Louis, Port–de–Bouc, Miramas, Martigues, Marignane, Istres, Fos–sur–Mer, Châteauneuf–les–Martigues ou Berre–l'Étang)

Une seule réponse possible

(Seulement pour les personnes ayant pas répondu une de ces communes dans la question du lieu de résidence)

Jamais

Plusieurs fois par an

Plusieurs fois par mois

Plusieurs fois par semaine

Plusieurs fois par jour

Pour quels types d'activité

Plusieurs réponses possibles

Travail

Loisirs

Autres

Quelques questions sur vos perceptions des pollutions de votre commune

Sur votre commune, avez-vous l'impression d'être fortement exposé aux pollutions ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

Ne se prononce pas

Comment qualifiez-vous la pollution sur votre commune ?

Très peu importante / Peu importante / Importante / Très importante

Une seule réponse possible par pollution

Pollution de l'air

Pollution des eaux souterraines (forages et puits)

Pollution des eaux de surfaces (rivières, étangs, pluies…)

Pollution des sols (respiration de poussières, contact…)

Concernant votre santé, l'exposition aux pollutions sur votre commune est pour vous ?

Très peu inquiétante / Peu inquiétante / Inquiétante / Très inquiétante

Une seule réponse possible par pollution

Pollution de l'air

Pollution des eaux souterraines (forages et puits)

Pollution des eaux de surfaces (rivières, étangs, pluies…)

Pollution des sols

Comment qualifiez-vous la prise en compte de vos préoccupations citoyennes dans la mise en place des actions publiques contre la pollution sur votre commune ?

Une seule réponse possible

Très insatisfaisante

Insatisfaisante

Satisfaisante

Très satisfaisante

Vos pratiques

Êtes-vous engagé dans une association de protection de l'environnement ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

L'exposition aux pollutions influence-t-elle vos activités ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

de quelles natures ?

Plusieurs réponses possibles

Diminution des balades/randonnées autour de l'Étang de Berre

Utilisation des transports en commun

Achats de produits agricoles locaux

Achat d'eau minérale

Jardinage et autoconsommation

Activités de chasse, pêche ou cueillette

Brûlage de déchets

Achats de produits biologiques

Autres

Vos activités ont-elles évolué en faveur d'une plus grande prise en compte des problématiques environnementales ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

Connaissez-vous des initiatives de participation citoyenne pour acquérir des données environnementales (air, eau, sol, biodiversité…) ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

lesquelles ?

Aimeriez-vous participer à ce type d'initiative citoyenne sur les problématiques environnementales ?

Une seule réponse possible

Très peu intéressé

Peu intéressé

Intéressé

Très intéressé

Pensez-vous que participer aux expérimentations pourrait faciliter votre compréhension des problématiques liées aux pollutions ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

Vos moyens d'information et d'accès aux données des pollutions

Avez-vous accès aux données sur les pollutions dans votre commune ?

Une seule réponse possible

Oui

Non

Quel est votre ressenti sur les actions mises en place pour améliorer la qualité de votre environnement local ?

Très insatisfaisantes / Insatisfaisantes / Satisfaisantes / Très satisfaisantes

Une seule réponse possible par pollution

Pollution de l'air

Pollution des eaux souterraines (forages et puits)

Pollution des eaux de surfaces (rivières, étangs, pluies…)

Pollution des sols

Est-ce que vous notez une amélioration dans le traitement de la problématique environnementale / des pollutions ?

Une seule réponse possible

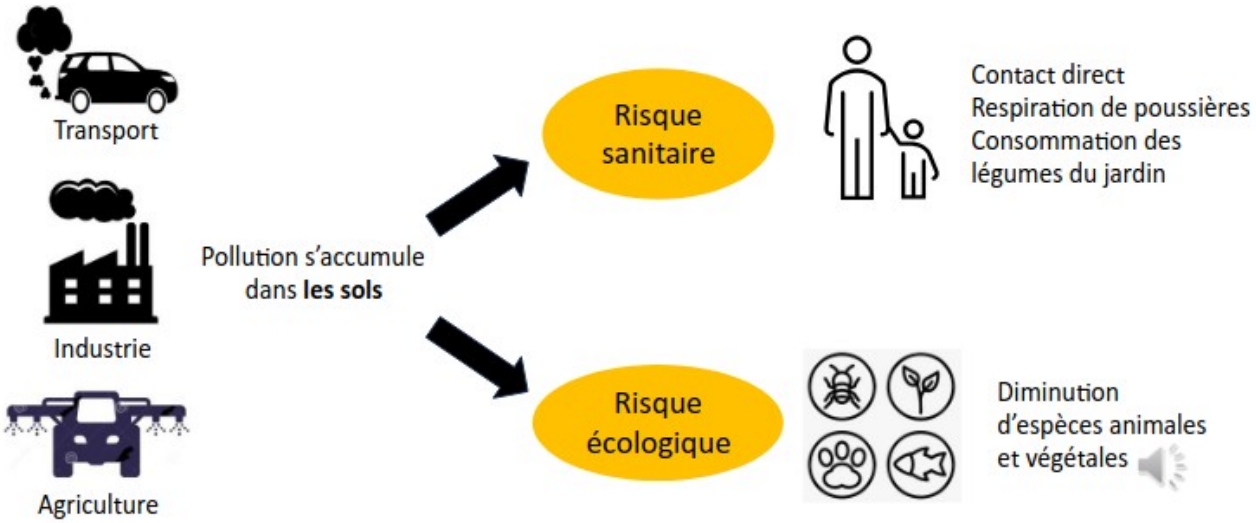
Oui

Non

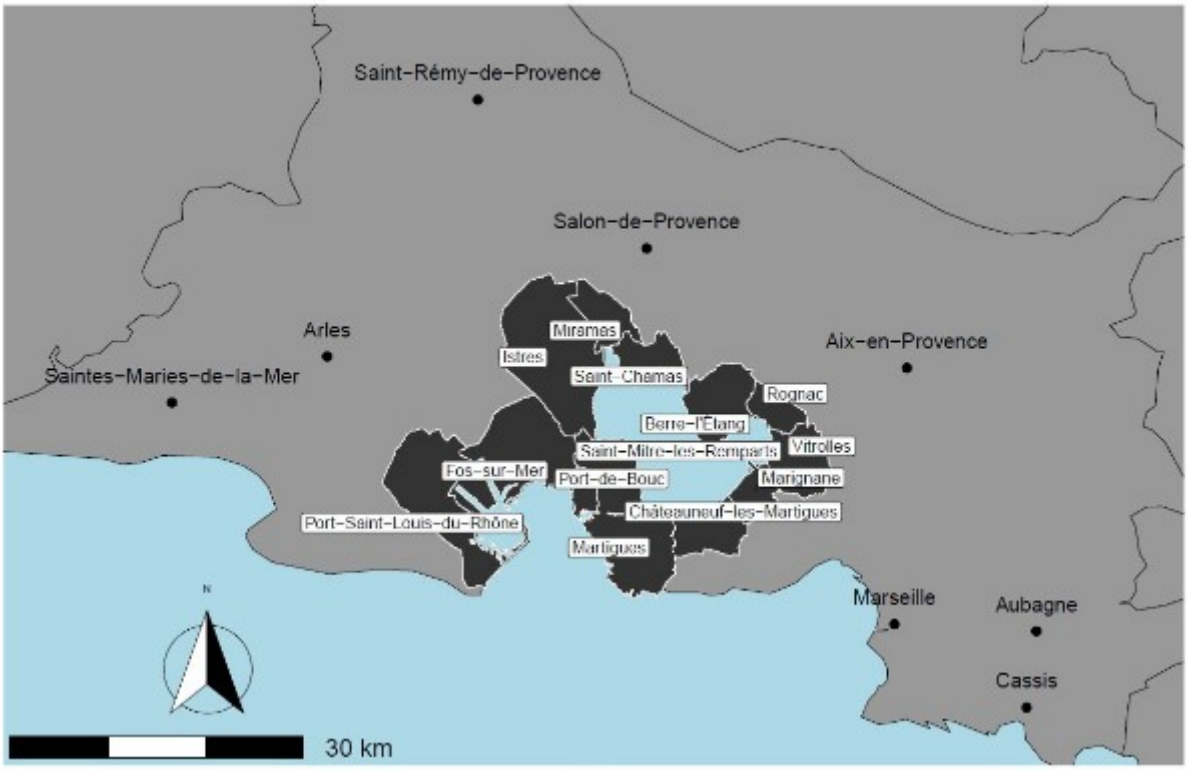
Quelle sont vos opinions, vos ressentis, vos pratiques et/ou vos attentes par rapport aux pollutions dans les Bouches-du-Rhône ? (Note : question libre et rendre non obligatoire)

Vos préférences en matière de réduction des risques liés aux pollutions des sols

Les risques des pollutions des sols sur la santé humaine et la biodiversité



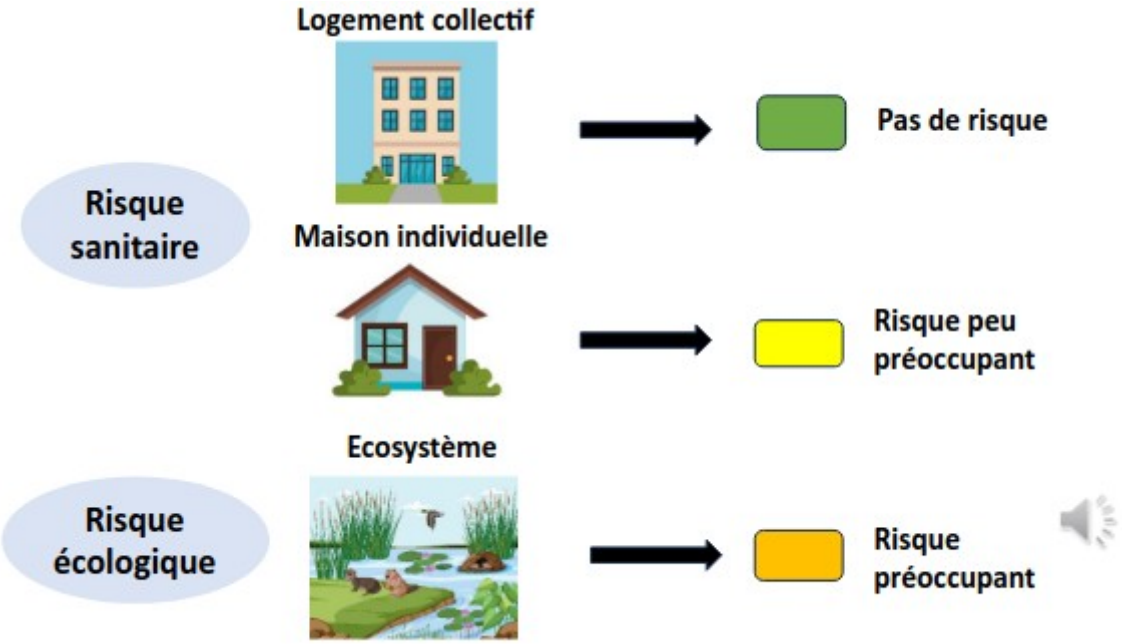
Etude sur les risques dans 13 communes autour de l'Étang de Berre



Résultats théoriques de l'étude menée sur les 13 communes :

Le risque varie surtout en fonction de l'habitat et des usages

(contact avec les sols et consommation des légumes du jardin)



De niveaux de risques à plans de gestion ?

Pas de risque → Pas de besoins

Risque peu préoccupant → Besoins de diagnostics des sols

Risque préoccupant → Besoins de dépollutions et réhabilitations

Résultats actuels très incertains (pas de diagnostics approfondis)

Besoin de **diagnostics** approfondis pour mettre en place des **plans d'actions** sur **les 13 communes**

Contribution financière serait demandée à **l'ensemble des ménages des Bouches du Rhône**



Plans de gestion → Améliorer les connaissances
Diminuer les risques liés à l'exposition aux pollutions des sols

Plans de gestion → Propose des améliorations et des compromis concernant votre foyer

Résidant des Bouches-du-Rhône, vous avez l'opportunité d'influencer le plan d'action pour les 13 communes de l'Etang de Berre !

Différents plans de gestions possibles, lequel préférez -vous ?

	Situation actuelle des 13 communes		Options alternatives des 13 communes
Diagnostic terrain construit Diagnostic espace naturel	Pas de diagnostic (risques incertains)		Diagnostics approfondis possibles
Risque sanitaire Appartement 	Pas de risque		Plus ou moins de risques
Risque sanitaire Maison 	Risque peu préoccupant		
Risque écologique 	Risque préoccupant	OU	
Risque **visible** dans le diagnostic immobilier	NON		POSSIBLE
Qui paie ? Diagnostic/Dépollution/Réhabilitation	Aucun contributeur		Différents contributeurs possibles
Coût supplémentaire pour VOTRE MENAGE 	Pas de coût		Différents coûts possibles

Vous avez la possibilité de donner vos préférences !

⬇

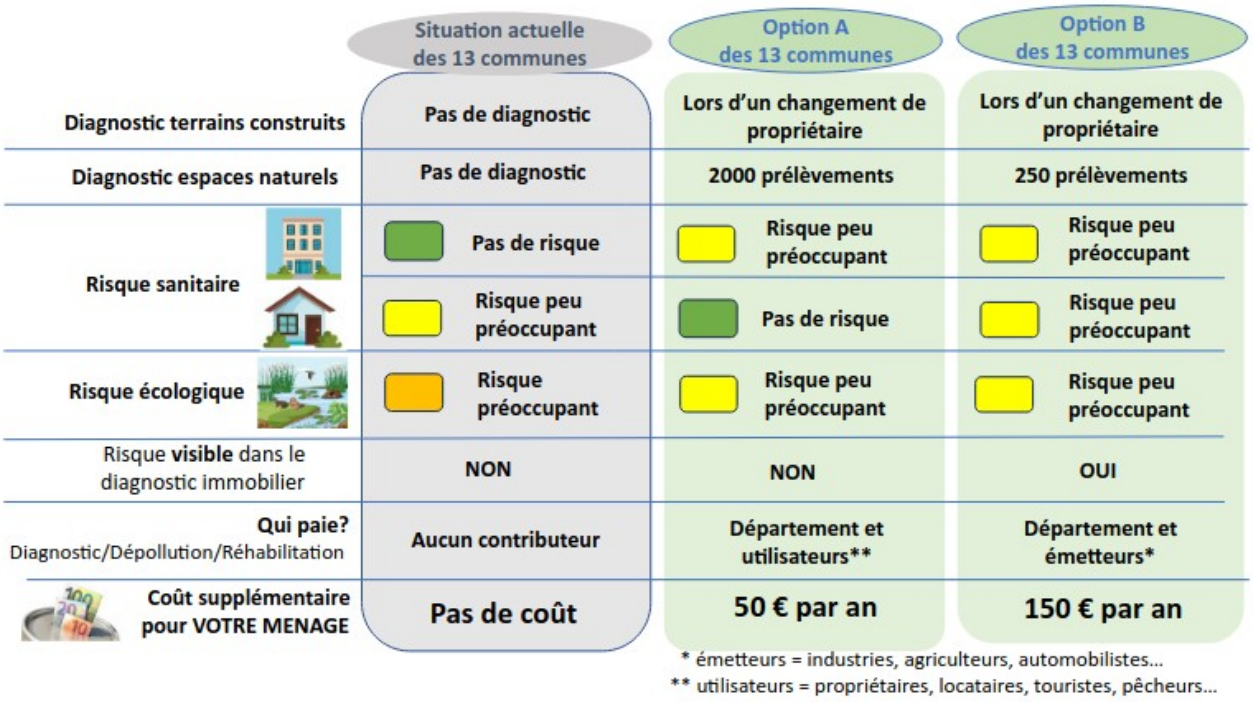
Nous allons vous proposer plusieurs fois 2 plans de gestion possibles et la situation actuelle

⬇

Pour chaque situation
Choisissez **votre préférée**

A VOUS DE JOUER !

Veuillez regarder les 3 options ci-dessous de plans de gestion pour les 13 communes autours de l'Etang de Berre.



Quelle option choisiriez-vous ?

Attention : Les niveaux de risques sanitaires et écologiques dans l'option « situation actuelle » sont très incertains : les niveaux réels pourraient être différents. Seul le diagnostic du terrain pourrait réduire cette incertitude.

Une seule réponse possible

Je choisirais la situation actuelle

Je choisirais l'option A et paierais le montant indiqué

Je choisirais l'option B et paierais le montant indiqué

Êtes-vous certain.e de votre choix ?

Une seule réponse possible

(Note : échelle de 1 = très peu certain.e à 5 = très certain.e)

1

2

3

4

5

Vous avez choisi l'option « situation actuelle », veuillez indiquer la raison :

Une seule réponse possible

(Condition : seulement pour ceux qui auraient choisi « situation actuelle dans la question précédente)

Aucune des 2 options A et B ne me convient

Je refuse de contribuer financièrement aux plans de gestion

Je n'ai pas confiance dans l'efficacité des mesures mises en place

J'estime que les pollutions des sols dans les 13 communes de l'Étang de Berre ne sont pas préoccupantes

Autres (question ouverte) ……

Répétez les questions ci-dessous de la même manière 5 fois

Veuillez sélectionner la fréquence avec laquelle vous avez effectué les actes suivants ?

Une seule réponse possible par proposition

Jamais / Une fois / Plus d'une fois / Souvent / Très souvent

J'ai indiqué la direction à un inconnu dans la rue

J'ai donné de l'argent à un inconnu qui en avait besoin (ou qui me l'avait demandé)

J'ai fait un don (argent, biens, vêtements, …) à un organisme de charité ou à une association à but non lucratif

J'ai fait du bénévolat pour un organisme de charité ou pour une association à but non lucratif

J'ai permis à quelqu'un de me devancer dans une file d'attente (au supermarché, devant une photocopieuse, dans un fast-food…)

J'ai proposé d'aider un inconnu en situation de handicap ou âgé de traverser la rue

J'ai offert ma place dans un bus ou un train à un inconnu qui était debout

J'ai aidé une connaissance à déménager

J'ai fait un don de sang

Avez-vous des remarques/suggestions ?

Question ouverte et rendre non obligatoire

Merci pour votre participation !

Annexe 3 : Jeux de données et calculs de variables appliqués par IRIS pour le calcul de l'IVec

	Jeux de données													Variables calculées							
Sigle IRIS	Nb esp	Superficie IRIS (km²)	Périmètre IRIS (m)	Densité espèce par km²	Nb esp NT	Nb esp VU	Nb esp EN	Nb esp CR	Nb espaces naturels protégés	Surface espaces naturels protégés (m²)	Surface parc urbains (m²)	Longueur reseau hydro (km)	Surface hydro (m²)	Longueur littoral (m)	LOG10 (nb esp)	LOG10 (densité esp)	Pondération LR	Part espaces naturels protégés (%)	Parc urbains (%)	Densité de drainage (km/km²)	Part surf eau (%)	Log longueur littoral / log surface
MRS-303	107	2,20	9138	48,58	24	11	10	1	3	4391544	101298	1,72	1693,6	757	2,029	1,686	59,0	199,37	4,60	0,78	0,08	0,45
MRS-301	115	0,67	4134	170,58	24	11	10	1	3	788130	0	1,22	5595,7	2356	2,061	2,232	59,0	116,90	0,00	1,81	0,83	0,58
MRS-502	0	0,57	3345	0,00	0	0	0	0	0	0	92656	0,00	203,9	0	0,000	0,000	0,0	0,00	16,18	0,00	0,04	0,00
MRS-101	110	1,05	5394	104,89	13	13	17	1	0	0	0	1,68	0,0	0	2,041	2,021	76,5	0,00	0,00	1,61	0,00	0,00
FOS-104	222	17,25	33779	12,87	29	32	18	4	0	0	0	24,89	752762,6	20631	2,346	1,110	124,5	0,00	0,00	1,44	4,36	0,60
FOS-101	149	14,54	19800	10,25	24	23	9	3	2	213956	47263	14,23	6930815,0	1872	2,173	1,011	80,0	1,47	0,33	0,98	47,67	0,46
SMC-102	278	145,95	70915	1,90	44	26	25	5	4	66515547	13538	328,88	1597137,6	0	2,444	0,280	153,0	45,57	0,01	2,25	1,09	0,00
SMC-103	239	2,41	9135	99,35	38	25	18	5	0	0	74497	5,85	4214,9	0	2,378	1,997	128,0	0	3,10	2,43	0,18	0,00
SMC-105	0	0,56	3033	0,00	0	0	0	0	0	0	27585	2,67	10892,7	0	0,000	0,000	0,0	0,00	4,95	4,80	1,96	0,00

	Variables normalisées								Descripteurs		Indice
Sigle IRIS	Nb espèce log	Densité espèces log	Espèces menacées	Part espaces protégés	Parcs urbains (%)	Densité de drainage	Part surface hydrique	log L littoral / log surface	BioD	HydD	IVec
MRS-303	0,83	0,76	0,39	1,00	0,28	0,16	0,00	0,76	1,561	0,885	1,822
MRS-301	0,84	1,00	0,39	0,59	0,00	0,38	0,02	0,97	1,350	1,266	1,694
MRS-502	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,250	0,001	0,000
MRS-101	0,84	0,91	0,50	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	1,144	0,251	1,311
FOS-104	0,96	0,50	0,81	0,00	0,00	0,30	0,09	1,00	1,418	1,294	1,614
FOS-101	0,89	0,45	0,52	0,01	0,02	0,20	1,00	0,77	1,089	1,669	1,688
SMC-102	1,00	0,13	1,00	0,23	0,00	0,47	0,02	0,00	1,646	0,370	1,949
SMC-103	0,97	0,89	0,84	0,00	0,19	0,51	0,00	0,00	1,595	0,383	1,802
SMC-105	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	1,00	0,04	0,00	0,077	0,781	0,521

Annexe 4 : Jeux de données et calculs de variables appliqués par IRIS pour le calcul de l'IVse

	Jeux de données et variables calculées																	
IRIS	**Sites pollués arrêt**	**Nb site arret/km²**	**Superficie IRIS (m²)**	**Surface activité (m²)**	**Part activité (%)**	**Surface res_rout (m²)**	**Part res_rout (%)**	**Surface agricole**	**Part agricole (%)**	**Surface habitats m²**	**Part habitat (%)**	**Demo pop**	**Densité pop / km²**	**Nb + 65 ans**	**Part + 65 ans (%)**	**Nb - 18 ans**	**Part - 18 ans (%)**	**FDEP**	**Hôpital le plus proche (décimale d'heure)**
MRS-303	*0*	*0,00*	2 202 698	94 435	0,043	3 463	0,002	0	0,000	120 292	0,055	366	166	77	0,21	70	0,19	-1,824	0,099
MRS-301	*3*	*4,45*	674 165	31 240	0,046	7 298	0,011	0	0,000	291 287	0,432	2107	3126	538	0,26	323	0,15	0,608	0,135
MRS-502	*0*	*0,00*	572 701	149 252	0,261	35 064	0,061	0	0,000	295 730	0,516	3420	5972	548	0,16	807	0,24	1,557	0,075
MRS-101	*0*	*0,00*	1 048 684	220 820	0,211	69 701	0,066	0	0,000	564 124	0,538	1860	1773	345	0,19	429	0,23	0,258	0,239
FOS-104	*2*	*0,12*	17 248 498	10 411 841	0,604	1 017 688	0,059	0	0,000	0	0,000	0	0	0	0,00	0	0,00	NULL	0,417
FOS-101	*1*	*0,07*	14 539 493	743 714	0,051	293 449	0,020	92 396	0,006	780 531	0,054	3717	256	497	0,13	914	0,25	0,766	0,246
SMC-102	*3*	*0,02*	145 949 443	11 881 507	0,081	3 119 329	0,021	62 480 160	0,428	1 720 307	0,012	3369	23	585	0,17	818	0,24	0,842	0,252
SMC-103	*3*	*1,25*	2 405 639	299 892	0,125	73 862	0,031	628 411	0,261	1 105 525	0,460	2559	1064	820	0,32	418	0,16	-0,452	0,321
SMC-105	*0*	*0,00*	557 124	19 603	0,035	13 037	0,023	14 468	0,026	452 387	0,812	1646	2955	654	0,40	226	0,14	0,554	0,323

	Variables normalisées										Descripteur		Indice
IRIS	Part activité	Part routier	Part agricole	Part surf habitat	Nbre friche/km²	Densité pop	FDEP	Part > 65 ans	Part < 18 ans	Distance hôpitaux	Descripteur activité	Descripteur démographique	Indice socio-économique
MRS-303	0,01	0,00	0,00	0,07	0,00	0,03	0,00000	0,530	0,779	0,071	0,04	0,390	0,434
MRS-301	0,02	0,14	0,00	0,53	1,00	0,52	0,71946	0,643	0,623	0,177	0,89	1,288	2,176
MRS-502	0,40	0,92	0,00	0,64	0,00	1,00	1,00000	0,403	0,960	0,000	1,30	1,841	3,146
MRS-101	0,31	1,00	0,00	0,66	0,00	0,30	0,61597	0,467	0,938	0,479	1,31	1,196	2,508
FOS-104	1,00	0,88	0,00	0,00	0,03	0,00		0,000	0,000	1,000	1,43	0,500	1,927
FOS-101	0,03	0,29	0,01	0,07	0,02	0,04	0,76622	0,337	1,000	0,502	0,28	1,011	1,295
SMC-102	0,08	0,31	1,00	0,01	0,00	0,00	0,78859	0,437	0,987	0,517	0,80	1,013	1,812
SMC-103	0,16	0,45	0,61	0,57	0,28	0,18	0,40583	0,807	0,664	0,719	1,18	1,108	2,291
SMC-105	0,00	0,34	0,06	1,00	0,00	0,49	0,70326	1,000	0,558	0,725	0,78	1,599	2,381

Annexe 5 : Teneurs en métaux mesurées dans les sols et lichens des différents sites échantillonnés

SOLS

	Concentration (mg/kg) en surface											CF										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	V	Zn	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	V	Zn
MS1	8.36	0.37	5.70	52.86	24.15	589.82	18.42	93.16	1.54	37.13	175.19	0,87	1,49	0,95	0,87	1,31	0,92	0,78	1,57	1,17	0,91	3,47
MS2	10.25	0.38	6.91	42.35	46.86	497.59	31.00	138.93	1.40	50.92	158.47	0,25	0,42	0,63	0,77	1,83	0,73	0,85	2,19	0,52	0,73	1,13
MS3	70.64	1.77	10.76	63.92	39.98	858.69	37.16	1063.10	14.20	77.08	272.22	2,34	10,35	0,81	0,77	1,82	1,76	0,69	23,83	3,35	0,73	3,56
MRS	11.39	0.56	7.44	44.07	44.17	759.68	28.95	116.25	2.84	46.39	183.90	1,12	2,79	1,05	1,16	1,41	1,51	1,28	3,17	2,16	1,06	2,76
MN1	21.63	0.51	11.90	57.60	63.75	681.40	31.30	125.66	2.62	75.67	245.47	0,99	2,66	0,89	0,88	2,44	1,03	0,94	3,61	1,46	0,79	2,21
MN2	26.34	0.59	9.60	45.90	16.50	732.10	30.56	61.13	1.81	61.54	75.51	0,52	0,24	1,22	2,16	0,53	1,75	1,26	0,29	0,36	1,70	0,90
GOU	10.19	0.33	6.95	66.14	9.06	581.23	24.96	17.88	0.73	50.21	114.41	1,01	4,72	1,05	1,70	1,82	1,19	1,24	2,28	2,03	1,24	2,04
CAB	6.91	0.26	7.33	107.16	22.82	502.70	32.64	29.29	1.13	47.37	176.79	1,12	3,69	1,54	4,22	4,09	1,43	2,07	3,80	2,59	1,36	5,64
TON	6.98	0.14	4.73	43.82	5.37	592.57	18.69	15.99	0.47	37.82	58.12	0,76	1,80	0,83	1,14	1,14	1,15	0,93	2,74	1,63	0,89	1,29
FOM	13.48	0.16	10.89	74.68	31.20	574.65	33.87	25.96	0.61	66.45	89.99	1,56	0,77	1,75	1,92	1,25	1,22	1,58	0,38	0,71	1,49	0,68
FOA	8.83	0.27	4.22	32.59	10.00	554.88	17.04	21.76	1.17	36.72	70.73	0,81	1,43	1,04	1,16	1,71	1,10	1,07	1,47	1,51	1,14	1,96
ENG	14.14	0.28	5.68	39.26	9.97	501.74	20.03	23.00	1.52	44.74	50.28	1,52	2,10	0,94	1,00	1,27	1,10	0,92	1,76	2,41	0,93	1,32
ENT	13.24	0.31	10.28	64.22	23.24	970.34	42.60	22.77	0.90	60.73	65.42	1,35	1,33	0,98	0,96	1,18	1,24	1,01	1,37	1,57	0,87	0,99
SMO	4.79	0.22	5.36	43.78	12.46	784.25	22.80	18.55	0.37	39.99	61.89	1,26	1,50	1,04	0,93	1,20	1,53	0,96	1,62	1,28	0,99	1,11
TNT	15.14	0.34	11.96	80.98	23.00	940.98	46.03	32.97	0.32	76.34	78.41	0,88	1,12	0,96	1,00	1,04	0,93	0,98	1,30	1,85	1,01	1,09
SMN	6.46	0.11	4.69	35.62	10.99	323.76	21.54	11.85	0.39	32.09	40.73	0,34	0,39	0,31	0,30	0,32	0,31	0,32	0,37	0,35	0,31	0,31
CPH	13.16	0.57	11.99	80.64	21.50	1095.60	45.15	21.04	0.73	74.21	80.61	0,91	1,89	0,95	0,95	1,07	0,95	0,96	1,00	1,52	0,95	1,06
SME	8.68	0.27	9.45	60.17	20.90	722.66	35.42	20.66	0.70	63.52	76.95	1,01	0,85	0,94	0,88	0,94	0,91	0,94	0,84	1,00	0,94	0,95

LICHENS

	Concentration (mg/kg)											FB										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	V	Zn	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	V	Zn
MS1	0.81	0.07	0.49	3.88	9.97	32.01	2.06	4.84	0.46	3.62	27.96	1.01	0.46	0.71	0.69	1.06	0.55	0.69	1.01	1.09	0.81	0.82
MS2	1.30	0.07	0.53	4.13	7.51	32.40	2.24	9.19	0.61	3.78	35.48	1.62	0.45	0.78	0.73	0.80	0.56	0.75	1.92	1.44	0.84	1.03
MS3	0.96	0.11	0.62	5.63	10.54	40.09	2.63	9.38	0.62	4.49	38.69	1.20	0.73	0.90	1.00	1.12	0.69	0.88	1.96	1.47	1.00	1.13
MRS	0.88	0.10	0.61	5.03	12.96	38.39	2.42	6.20	1.35	3.42	51.04	1.10	0.70	0.89	0.89	1.38	0.66	0.81	1.29	3.21	0.76	1.49
MN1	0.78	0.12	0.47	4.65	21.87	35.05	2.04	7.99	0.73	3.09	43.77	0.98	0.79	0.67	0.83	2.32	0.60	0.68	1.67	1.74	0.69	1.28
MN2	2.07	0.18	0.78	6.66	19.24	59.69	3.42	8.17	1.43	4.62	57.54	2.59	1.23	1.13	1.18	2.04	1.03	1.15	1.71	3.40	1.03	1.68
GOU	2.68	0.64	2.22	118.51	38.38	368.96	16.70	48.71	3.09	27.78	346.80	3.35	4.27	3.21	21.05	4.07	6.36	5.60	10.17	7.35	6.19	10.11
CAB	2.13	0.58	1.31	39.82	25.88	198.06	8.41	15.91	3.44	15.40	155.07	2.67	3.84	1.90	7.07	2.75	3.41	2.82	3.32	8.20	3.43	4.52
TON	1.20	0.35	0.79	22.55	9.16	158.22	4.68	9.42	0.51	7.32	88.71	1.50	2.32	1.14	4.01	0.97	2.73	1.57	1.97	1.21	1.63	2.59
FOM	0.93	0.12	0.67	8.16	9.61	68.63	3.03	5.18	0.59	4.94	41.56	1.16	0.82	0.97	1.45	1.02	1.18	1.02	1.08	1.40	1.10	1.21
FOA	2.17	0.38	0.98	14.07	12.31	137.13	5.43	11.28	2.15	8.05	80.58	2.71	2.57	1.42	2.50	1.31	2.36	1.82	2.35	5.11	1.79	2.35
ENG	3.06	0.22	1.04	19.88	7.52	82.69	8.15	14.39	0.91	11.02	42.82	3.83	1.48	1.50	3.53	0.80	1.43	2.73	3.00	2.18	2.45	1.25
ENT	0.51	0.08	0.40	4.24	7.66	41.98	1.88	2.30	0.21	3.22	78.55	0.64	0.52	0.58	0.75	0.81	0.72	0.63	0.48	0.49	0.72	2.29
SMO	0.74	0.13	0.66	7.16	8.06	55.04	2.72	5.90	0.58	4.93	33.92	0.93	0.85	0.95	1.27	0.86	0.95	0.91	1.23	1.37	1.10	0.99
TNT	0.93	0.15	0.72	8.27	10.33	66.27	2.98	7.34	0.75	5.32	42.19	1.16	1.00	1.04	1.47	1.10	1.14	1.00	1.53	1.79	1.19	1.23
SMN	0.64	0.08	0.50	4.64	6.56	43.61	1.92	3.38	0.39	3.65	27.83	0.80	0.56	0.72	0.82	0.70	0.75	0.64	0.71	0.93	0.81	0.81
CPH	0.84	0.08	0.60	8.00	9.54	59.84	2.20	3.94	0.31	4.51	34.25	1.06	0.56	0.87	1.42	1.01	1.03	0.74	0.82	0.74	1.01	1.00
SME	0.62	0.13	0.51	4.82	8.38	44.31	1.92	3.37	0.56	3.47	41.36	0.77	0.89	0.74	0.86	0.89	0.76	0.64	0.70	1.32	0.77	1.21

Annexe 6 : Teneurs en HAP mesurées dans les sols et lichens des différents sites échantillonnés

SOLS

	Concentration en surface (µg/kg)																FC													
	Nap	Acy	Ace	Fluo	Phe	Ant	FlA	Pyr	BaA	Chr	BdF	BkF	BaP	Ipy	DBA	Bpe	Nap	Acy	Ace	Fluo	Phe	Ant	FlA	Pyr	BaA	Chr	BdF	BkF	BaP	Ipy	DBA	Bpe
MS1	20.4	2.3	9.5	4.7	17.8	1.5	15.7	15.5	8.7	18.0	24.7	10.1	13.6	21.2	14.8	16.3	1.01	0.16	0.31	0.20	0.37	0.09	0.19	0.12	0.20	0.16	0.54	0.43	0.60	0.73	1.20	0.98
MS2	19.6	3.0	10.5	4.5	20.5	2.3	16.1	23.4	14.1	15.8	21.9	13.6	19.9	13.4	4.1	9.6	0.85	0.20	0.36	0.27	0.43	0.16	0.12	0.12	0.19	0.10	0.28	0.41	0.54	0.38	0.22	0.36
MS3	35.6	15.7	20.8	14.1	195.4	17.5	281.9	229.5	104.7	149.4	225.0	68.8	102.9	112.4	27.7	101.1	0.63	0.69	0.63	0.44	1.14	0.36	0.63	0.55	0.42	0.48	0.77	0.54	0.47	0.54	0.42	0.50
MRS	28.0	6.2	11.6	6.5	51.6	4.7	151.1	115.1	76.5	138.1	220.3	62.8	111.7	119.8	17.8	106.7	1.16	0.44	0.47	0.40	1.12	0.93	4.52	1.38	2.61	2.68	9.72	3.43	7.56	11.45	1.67	13.27
MN1	48.8	14.8	12.5	10.2	123.4	15.6	255.1	183.1	73.3	169.7	245.6	52.3	130.7	126.3	21.3	130.1	1.31	0.92	0.49	0.57	1.06	0.60	1.64	1.43	0.61	1.15	2.04	1.03	2.11	2.17	0.80	2.19
MN2	24.9	3.6	14.0	8.7	30.6	3.0	50.8	51.1	22.4	54.1	60.3	21.3	20.5	35.5	20.7	34.8	0.62	0.66	0.82	1.17	0.50	0.21	0.47	0.45	0.67	0.99	1.00	1.30	0.72	1.26	2.97	1.30
GOU	48.9	3.6	9.9	9.3	87.8	4.6	36.8	49.3	28.9	49.0	48.1	13.3	23.8	23.7	21.9	36.9	1.35	0.64	0.71	1.50	2.20	0.85	2.24	3.03	6.46	9.65	4.45	1.68	5.84	7.83	4.61	4.88
CAB	19.2	2.6	5.5	5.5	30.8	2.5	23.4	20.4	10.0	23.5	25.4	13.5	20.7	19.2	14.8	22.2	0.36	0.15	0.11	0.23	0.97	0.54	1.61	0.20	0.30	0.38	2.10	1.86	2.10	3.75	1.93	4.73
TON	30.8	3.1	12.8	5.6	20.0	1.4	9.6	8.1	4.0	16.1	20.1	11.2	12.5	10.2	9.1	8.2	3.02	1.35	2.61	0.63	0.49	0.24	0.33	0.11	0.51	1.07	1.93	0.64	1.70	3.22	1.45	1.92
FOM	22.1	1.8	10.0	4.4	14.5	0.5	8.9	11.0	4.1	13.9	23.9	6.1	6.4	8.0	7.4	4.5	0.72	0.13	0.22	0.16	0.20	0.04	0.13	0.08	0.11	0.18	0.66	0.29	0.36	0.45	0.74	0.33
FOA	24.6	5.1	9.2	5.8	29.2	2.5	26.4	23.4	12.6	22.6	41.9	9.5	14.4	15.4	8.0	14.5	0.56	0.39	0.24	0.30	0.60	0.11	0.25	0.16	0.26	0.31	0.75	0.50	0.36	0.38	0.59	0.40
ENG	25.0	2.9	8.6	4.7	26.1	1.1	16.1	19.1	6.9	19.0	29.7	6.4	13.5	9.0	6.8	14.2	0.50	0.39	0.35	0.34	0.99	0.12	1.36	0.41	0.51	1.07	1.88	0.31	1.54	0.84	0.74	2.84
ENT	24.7	4.0	12.6	7.1	26.8	1.0	14.7	16.9	4.5	9.5	15.9	12.5	12.8	8.5	7.8	6.1	2.14	1.06	1.98	0.73	0.79	0.14	0.43	0.26	0.89	0.83	1.55	0.98	2.75	1.82	0.96	0.80
SMO	21.4	4.0	8.8	4.3	29.2	0.7	15.9	19.7	5.5	12.6	14.7	8.3	18.0	7.6	8.7	15.7	0.44	0.37	0.32	0.22	1.05	0.09	1.38	0.37	0.42	0.38	2.32	1.13	2.95	1.47	1.91	5.04
TNT	12.5	2.8	7.9	4.4	9.6	1.5	14.8	11.4	7.0	14.9	19.0	11.2	45.4	14.3	8.4	9.9	0.19	0.23	0.25	0.28	0.25	0.13	0.24	0.18	0.19	0.26	0.39	0.42	1.39	0.45	0.76	0.35
SMN	22.6	7.2	12.1	9.4	63.8	5.2	17.9	16.7	4.2	9.7	18.6	8.1	9.4	5.5	6.5	27.0	0.54	1.01	0.41	0.52	2.54	0.81	0.57	0.48	0.16	0.30	1.19	0.67	0.79	0.43	0.84	2.41
CPH	8.6	1.9	5.3	5.1	4.6	1.1	2.8	4.4	3.5	6.3	5.4	12.9	10.8	5.7	7.2	4.1	0.21	0.28	0.20	0.28	0.12	0.15	0.06	0.04	0.17	0.20	0.34	0.98	1.40	0.73	1.11	0.64
SME	13.1	5.5	12.5	7.8	26.7	2.8	26.1	36.8	12.5	32.5	35.8	19.5	33.6	14.6	11.4	14.4	1.15	0.48	3.07	1.02	0.74	0.19	0.33	0.65	0.32	0.58	0.56	0.52	0.75	0.40	0.69	0.34

LICHENS

	Concentration en surface (µg/kg)																FB													
	Nap	Acy	Ace	Fluo	Phe	Ant	FlA	Pyr	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	Ipy	DBA	Bpe	Nap	Acy	Ace	Fluo	Phe	Ant	FlA	Pyr	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	Ipy	DBA	Bpe
MS1	28.8	11.8	9.1	8.1	37.7	16.7	142.1	47.7	24.9	16.3	24.3	33.0	26.6	17.0	19.2	17.0	1.08	0.77	0.70	0.99	0.50	0.43	2.28	0.41	1.46	0.72	1.20	2.33	1.27	0.58	0.86	0.84
MS2	35.7	14.1	14.5	14.1	38.8	28.7	151.9	79.3	14.3	35.5	24.6	26.1	20.6	16.4	19.9	21.2	1.34	0.92	1.11	1.72	0.52	0.74	2.44	0.68	0.84	1.56	1.22	1.84	0.98	0.56	0.90	1.05
MS3	29.8	15.9	8.7	9.1	70.1	26.4	179.4	37.3	23.7	24.9	25.8	29.0	20.2	21.0	23.1	23.6	1.12	1.04	0.67	1.11	0.94	0.68	2.88	0.32	1.39	1.10	1.28	2.04	0.96	0.72	1.04	1.17
MRS	48.6	24.8	18.7	14.2	80.5	33.8	129.7	65.0	24.9	37.1	36.3	26.9	17.4	18.5	35.9	24.7	1.83	1.63	1.43	1.74	1.08	0.87	2.08	0.56	1.46	1.63	1.80	1.90	0.83	0.63	1.62	1.22
MN1	26.1	13.0	20.2	12.0	55.6	35.0	211.3	154.2	35.2	28.7	27.9	33.3	19.0	20.1	17.6	19.5	0.99	0.85	1.55	1.47	0.75	0.90	3.39	1.33	2.07	1.26	1.38	2.35	0.91	0.69	0.79	0.96
MN2	48.5	24.8	21.4	13.0	82.5	29.1	124.9	73.0	27.3	41.5	30.7	29.6	16.4	34.8	18.9	18.5	1.83	1.62	1.64	1.59	1.11	0.75	2.01	0.63	1.61	1.82	1.52	2.09	0.79	1.19	0.85	0.91
GOU	173.2	25.0	22.9	88.6	660.6	151.9	480.5	509.9	241.2	243.9	251.4	137.4	158.1	186.4	91.6	1530.0	6.53	1.63	1.76	10.86	8.85	3.93	7.72	4.38	14.17	10.73	12.44	9.68	7.56	6.35	4.12	75.67
CAB	27.6	29.6	7.5	13.4	45.0	38.2	203.8	235.1	38.4	132.4	122.1	34.0	154.7	44.9	29.7	322.5	1.04	1.93	0.58	1.64	0.60	0.99	3.27	2.02	2.26	5.83	6.04	2.39	7.39	1.53	1.34	15.95
TON	43.0	13.4	6.1	21.7	112.3	35.2	240.4	276.5	83.3	125.5	118.4	22.8	58.5	34.8	37.6	32.5	1.62	0.88	0.47	2.66	1.50	0.91	3.86	2.38	4.89	5.52	5.86	1.61	2.79	1.18	1.69	1.61
FOM	36.1	19.5	17.2	13.9	55.1	22.0	168.7	65.7	22.3	35.0	26.9	27.6	20.1	26.3	21.5	17.3	1.36	1.27	1.32	1.71	0.74	0.57	2.71	0.56	1.31	1.54	1.33	1.95	0.96	0.90	0.97	0.85
FOA	26.8	14.4	18.7	8.1	64.1	22.7	147.4	174.9	29.8	44.6	24.1	24.6	21.0	19.9	20.1	21.5	1.01	0.94	1.44	0.99	0.86	0.59	2.37	1.50	1.75	1.96	1.19	1.73	1.00	0.68	0.90	1.06
ENG	22.7	12.8	6.1	11.6	31.6	16.6	150.2	231.9	47.4	41.8	41.9	33.5	42.4	36.3	24.1	30.2	0.86	0.84	0.47	1.42	0.42	0.43	2.41	1.99	2.79	1.84	2.07	2.36	2.03	1.24	1.08	1.50
ENT	25.1	11.5	15.3	10.0	42.7	32.9	256.1	161.4	27.3	55.0	40.4	37.3	21.7	15.8	7.2	20.8	0.95	0.75	1.17	1.22	0.57	0.85	4.11	1.39	1.60	2.42	2.00	2.63	1.04	0.54	0.32	1.03
SMO	41.7	15.2	12.9	13.6	70.0	39.2	177.7	164.9	29.7	63.6	34.6	34.4	16.7	26.3	33.3	24.3	1.57	1.00	0.99	1.67	0.94	1.01	2.85	1.42	1.74	2.80	1.71	2.43	0.80	0.90	1.50	1.20
TNT	31.3	11.8	13.7	8.9	62.5	21.9	225.8	146.2	36.1	66.5	42.3	43.8	21.3	25.6	15.5	45.6	1.18	0.77	1.05	1.09	0.84	0.57	3.63	1.26	2.12	2.93	2.09	3.08	1.02	0.87	0.70	2.26
SMN	15.9	11.7	6.7	4.8	17.5	30.1	165.4	225.5	16.8	50.7	49.6	36.4	30.5	36.0	25.3	24.9	0.60	0.76	0.51	0.58	0.23	0.78	2.66	1.94	0.99	2.23	2.46	2.56	1.46	1.23	1.14	1.23
CPH	31.5	13.0	13.2	8.2	29.2	38.7	449.7	199.2	34.6	32.7	65.0	53.3	29.1	33.1	13.8	26.2	1.19	0.85	1.01	1.00	0.39	1.00	7.22	1.71	2.03	1.44	3.22	3.76	1.39	1.13	0.62	1.30
SME	41.8	18.2	17.2	15.2	52.4	38.0	97.2	107.2	36.6	29.4	32.9	39.4	24.3	36.1	25.0	30.6	1.57	1.19	1.32	1.87	0.70	0.98	1.56	0.92	2.15	1.29	1.63	2.78	1.16	1.23	1.12	1.51

Annexe 7 : Fiche de présentation des résultats par site à destination des propriétaires privés et publics

Propriétaire

Mr Franck Labourayre

FICHE DESCRIPTIVE ANALYSES DE SOL et BIOSURVEILLANCE LICHENIQUE

Commune: Fos-sur-Mer **N° de placette** : TON **Date prélèvement** : 21/03/2023

Interprétations / Observations

Le sol présente une texture sablo-limoneuse sur l'ensemble du profil. Sans structure et élément grossier, il s'agit d'un sol assez battant qui peut-être sujet à de grands risques d'asphyxie, en témoigne les nombreuses traces d'hydromorphie dans les horizons inférieurs. Le taux de carbone organique est élevé en surface (38,1 g/kg), relatif à l'utilisation du site en zone de pâturage pour les chevaux. Le pH indique un sol très alcalin en surface (9,0). Des efflorescences salines sont observées en surface en l'absence de végétation.

Dans les sols, les concentrations en métaux et HAP ont été mesurées dans l'horizon de surface (H1 = 0-5 cm), pour évaluer d'éventuels apports anthropiques, et en profondeur (H2 = 35-50 cm), permettant de déterminer les teneurs naturelles résultant de l'altération de la roche mère et de la dégradation des matières organiques notamment. Par ailleurs, les teneurs en pesticides, exclusivement d'origine anthropique et regroupant 48 composés cibles classés par grandes familles (herbicides, fongicides et insecticides), ont été analysées dans l'horizon de surface. Alors qu'aucune contamination en HAP n'est relevée, les résultats mettent en évidence une légère contamination diffuse de surface pour Pb. Par ailleurs, des niveaux importants de fongicides et insecticides ont été relevés. Ainsi, sont relevés en quantité la cypermethrine, insecticide principalement utilisé dans le traitement du bois dont un stockage est présent à proximité, et du folpet, un fongicide organochloré utilisé en agriculture (viticulture, tomates, …) mais aussi dans l'industrie pour le traitement de certaines peintures et matières plastiques. A noter, la présence de deux composés interdits d'utilisation en agriculture au cours de ces dernières années, le lindane, interdit depuis 1998 mais relevé sur l'ensemble des sols étudiés, et le pipéronyl butoxyde interdit en agriculture biologique depuis 2017. La présence de ces composés dans les sols met en évidence l'effet persistant de ces produits probablement utilisés dans le secteur par le passé.

L'exposition atmosphérique du site a été évaluée par des méthodes de biosurveillance lichénique sur les trois même familles de contaminants (métaux, HAP et pesticides). Les mesures de bioaccumulation lichénique mettent en avant une contamination atmosphérique diffuse en Cr, Zn, Fe, HAP totaux et dans une moindre mesure Pb et V, potentiellement apportés par les émissions industrielles de la ZIP de Fos. Contrairement au sol, les teneurs en pesticides atmosphériques sont relativement faibles semblant indiquer une pollution historique des sols pour ces composés. A noter là encore, la présence de lindane dans l'air mettant en évidence sa forte persistance et sa probable utilisation non déclarée en domestique ou dans la formulation d'autres produits utilisés en agriculture.



Profil de sol

Parcelle cadastrale : AC 0044

Occupation du sol : Zone humide maritime - pâturage chevaux

Situation : IRIS Brûle-Tabac-Roque-Galejon (104) - Zone du Tonkin

Coordonnées géographiques : N 43°27'42,85'' E 004°51'16,97''

Météo : Ensoleillé – faible vent

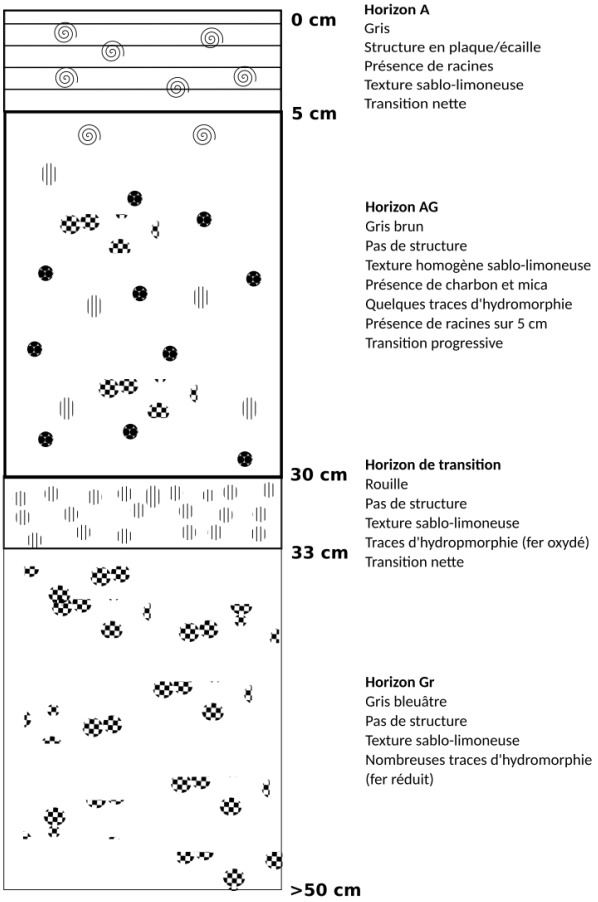
Température de l'air : 17,5 °C

Végétation : Végétation prairiale naturelle

Description synthétique du profil : Sol sablo-limoneux à caractère d'hydromorphie - Salisols

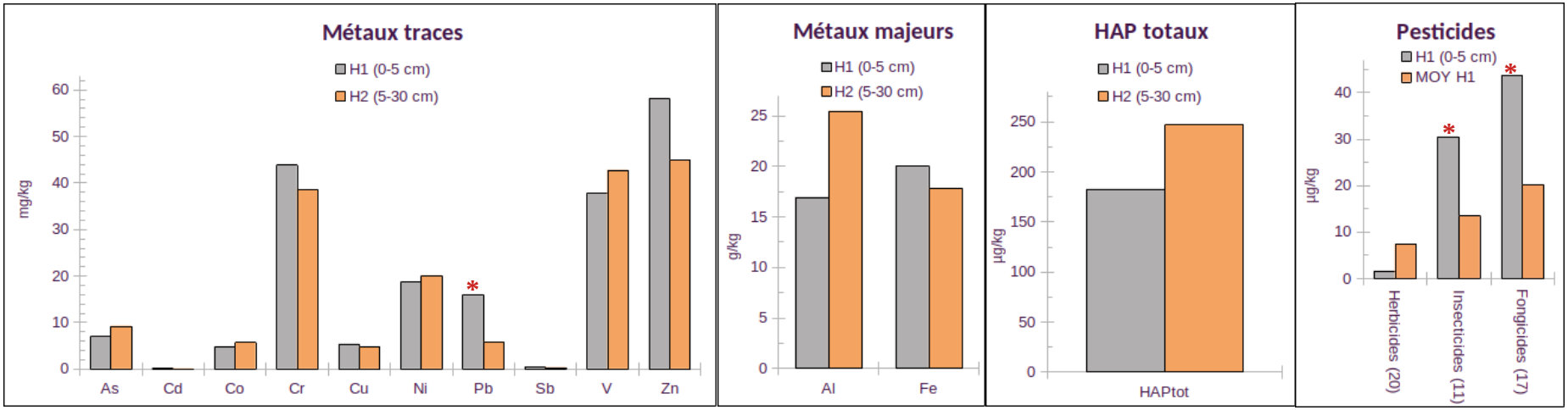
Roche mère : Colluvions limoneuses

Présence ou non d'une nappe/profondeur : oui / 1 m

Photo du profil	*Schéma d'interprétation du profil*
	

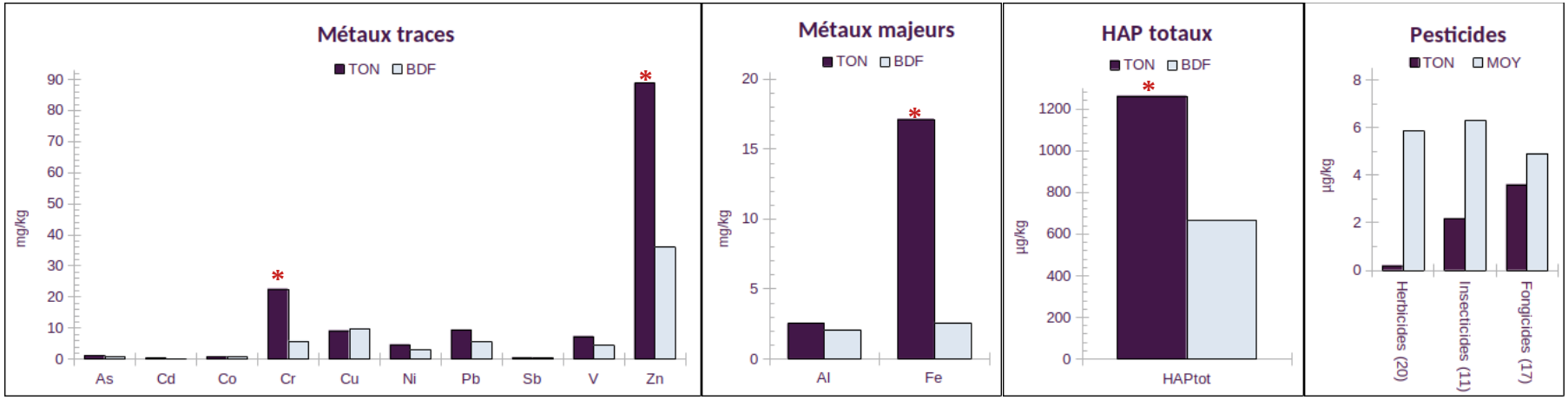
Contamination des sols

Teneurs en métaux, HAP et pesticides relevées dans l'horizon 1 (H1) et 2 (H2) du sol du site TON.



Exposition atmosphérique par biosurveillance lichénique

Teneurs en métaux, HAP et pesticides relevées dans les lichens prélevés sur le site TON et comparé aux valeurs bruit de fond de la Métropole Aix-Marseille-Provence (BDF). (*) indique les contaminants relevant d'une contamination atmosphérique.



Le projet EVALVIE

Ce projet intitulé « Evaluation de la vulnérabilité environnementale et sanitaire d'un territoire en lien avec l'activité anthropique et la diversité des milieux (EVALVIE) » a pour objectif de définir une méthodologie pour construire un indice intégratif de vulnérabilité environnementale et sanitaire des milieux reproductible et applicable sur tous types de territoire. Il se base sur la prise en compte des enjeux environnementaux, écologiques et socio-économiques à travers l'analyse de l'exposition environnementale et humaine aux polluants émis par les activités anthropiques actuelles et passées (pollution diffuse des sols et biosurveillance lichénique), en fonction de l'intérêt écologique des milieux et des espèces qu'ils abritent et des niveaux d'urbanisation et d'anthropisation des territoires.
Le travail a été mis en œuvre sur trois communes Marseille et Fos-sur-Mer et Saint-Martin-de-Crau, avec un total de 18 sites sélectionnés. Sur chacun de ces sites, des prélèvements de sol et de lichens ont été réalisés afin d'analyser les teneurs en HAP, métaux et pesticides, polluants représentatifs des activités anthropiques du territoire (urbaine, agricole et industrielle).
Porté par l'Institut Ecocitoyen et regroupant un consortium de partenaires universitaires (LPED, LCE, CEREGE, DYNAFOR), ce projet a débuté en septembre 2021 et se termine fin 2025 et est soutenu financièrement par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

Contaminants étudiés

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
Les HAP sont des composés organiques neutres, apolaires et constitués d'au moins deux cycles aromatiques. Au sens strict, ils ne contiennent que des atomes de carbone et d'hydrogène. Certains représentent un danger sanitaire, ainsi 16 HAP couramment analysés sont classés comme polluants prioritaires par l'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis (US-EPA), ce sont les congénères analysés dans cette étude.
Ils ont des origines diverses, pouvant être regroupées en trois catégories :

- HAP pyrolytiques : formation issue de combustion incomplète de matière organique d'origine naturelle ou anthropique
- HAP pétrogéniques : formation à partir de produits pétroliers ou de leurs dérivés
- HAP diagénétiques : formation par biosynthèse de la matière organique

Eléments traces métalliques
Désignés couramment sous le terme de métaux, ils regroupent 80 éléments chimiques constituants de la croûte terrestre et représentent 0,6 % du total alors que les 12 éléments majeurs (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P et Mn) interviennent pour 99,4 %. Ainsi, sont désignés comme éléments traces métalliques des composés métalliques potentiellement toxiques et dont la teneur naturelle moyenne dans les sols est inférieure à 1 $g.kg^{-1}$. Ce sont des éléments non biodégradables, présentant une forte stabilité chimique et une mobilité relativement forte en fonction de leur interaction et complexation avec les constituants du sol. Les sources anthropiques des métaux sont nombreuses (activités industrielles, agricoles, trafic routier, secteur résidentiel, …).

Pesticides
Les pesticides ont été choisis en fonction de leur quantité commercialisée, de leur toxicité, de leur présence dans l'atmosphère et de leur adéquation à la méthode d'analyse. Au total, 48 substances actives ont été sélectionnées, dont 20 herbicides, 17 fongicides et 11 insecticides, dont un synergiste d'insecticides. L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a classé 34 de ces substances comme molécules actives prioritaires à surveiller dans l'air ambiant en France. Parmi eux, certains sont interdits depuis des années.

Contaminants ciblés et analysés dans les sols et lichens prélevés sur les différents sites

HAP	*Symbole*
Naphtalène	**Nap**
Acénaphtylène	**Acy**
Acénaphtène	**Ace**
Fluorène	**Fle**
Anthracène	**Ant**
Phénanthrène	**Phe**
Fluoranthène	**FlA**
Pyrène	**Pyr**
Benzo(a)anthracène	**BaA**
Chrysène	**Chr**
Benzo(a)pyrène	**BaP**
Benzo(b)fluoranthène	**BbF**
Dibenzo(ah)anthracène	**DBA**
Benzo(k)fluoranthène	**BkF**
Benzo(ghi)pérylène	**Bpe**
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	**Ipy**

Métaux	*Symbole*
Aluminium	**Al**
Fer	**Fe**
Arsenic	**As**
Cadmium	**Cd**
Cobalt	**Co**
Chrome	**Cr**
Cuivre	**Cu**
Nickel	**Ni**
Plomb	**Pb**
Antimoine	**Sb**
Vanadium	**V**
Zinc	**Zn**

Herbicides	*Insecticides*	*Fongicides*
Aclonifen	Chlorpyriphos ethyl	Boscalid
Chlorpropham	Chlorpyriphos_methyl	Cyprodinil
Clomazone	Cypermethrine	Difenoconazole
Diclofop methyl	Deltamethrine	Dimethomorph
Diflufenican	Fenoxycarbe	Epoxiconazole
Dimethenamid-P	Fipronil	Fenhexamide
Flazasulfuron	Lambda cyhalothrine	Fenpropimorph
Flumioxazine	Lindane	Folpet
Flurochloridone	Permethrine	Fluazinam
Isoproturon	Piperonyl butoxyde	Flusilazole
Linuron	Pirimicarbe	Iprodion
Lenacil		Kresoxym methyl
Metazachlore		Pyrimethanil
S-Metolachlore		Spiroxamine
Oxadiazon		Tebuconazole
Pendimethaline		Tetraconazole
Propyzamide		Tolyfluanid
Prosulfocarbe		
Terbuthylazine		
Triallate		

*En rouge, les pesticides interdits en France. En orange, les composés interdits en agriculture biologique

Biosurveillance lichénique

La biosurveillance est l'utilisation d'un ou plusieurs organismes biologiques afin d'évaluer l'altération du milieu environnant.
Parmi ces organismes figurent les lichens, qui sont formés à partir de la symbiose entre un champignon et une algue ou une cyanobactérie. Les caractéristiques biologiques des lichens (absence de racine, absence de cuticule de protection, absence d'un système d'excrétion et activité quasi annuelle), les rendent fortement dépendant de l'atmosphère, les exposant aux polluants atmosphériques, mais peu ou pas dépendant des sols ni de leurs supports. Ils peuvent ainsi être utilisés en tant que bio-indicateurs, leur diversité et leur abondance renseignant sur la qualité de l'air. Il est également possible de mesurer les concentrations de polluants bioaccumulés dans les lichens, métaux, HAP et pesticides dans cette étude, afin de quantifier les concentrations présentes dans l'air et de mettre en évidence des sources locales de pollution et/ou leur zone d'influence.



Photo de Xanthoria parietina prélevé pour les mesures de bioaccumulation

Projet EVALVIE soutenu par

Partenaires

Annexe 8 : Relevés de bioindication lichénique réalisés sur les différents sites d'étude du projet EVALVIE

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).

Villes	**Fos-sur-Mer**						**Saint-Martin-de-Crau**							**Marseille**												
IRIS	**FOS-104**			**FOS-101**			**SMC-103**		**SMC-105**	**SMC-102**				**MRS-303**			**MRS-301**	**MRS-502**	**MRS-101**			**Fréquence totale**	**Nombre de stations**			
Sites	**TON**	**CAB**	**GOU**	**FOM**	**FOA**	**ENG**	**CPH**	**SMN**	**SME**	**TNT**	**ENT**	**SMO**	**MS1**	**MS2**	**MS3**	**MRS**	**MN1**	**MN2**								
Acrocordia gemmata	0,095																					0,095	1			
Amandinea punctata	0,025	0,155			0,080	0,050	0,195			0,170	0,110			0,510	0,305		0,305					1,905	10			
Anisomeridium biforme		0,660				0,080	0,045		0,115			0,160			0,600							1,660	6			
Arthonia punctiformis			0,375	0,050		0,875	0,245	0,275	0,015	0,195			0,145				0,170					2,345	9			
Arthonia radiata							0,030				0,490	0,135				0,200						0,855	4			
Arthopyrenia punctiformis									0,020				0,115			0,045	0,010					0,190	4			
Buellia griseovirens						0,125			0,070										0,175			0,370	3			
Caloplaca cerina																			0,080			0,080	1			
Caloplaca ferruginea	0,095		0,345	0,015				0,125			0,245	0,025	0,330	0,205	0,005		0,010					1,400	10			
Caloplaca luteoalba		0,065			0,260	0,070	0,220		0,070			0,275	0,050			0,265	0,060	0,235				1,570	10			
Caloplaca pyracea														0,050								0,050	1			
Candelaria concolor		0,065		0,205			0,260	0,375	0,380	0,235	0,050	0,155	0,080		0,100	0,340	0,175	0,020				2,440	13			
Candelariella vitellina													0,070									0,070	1			
Chrysothrix candelaris				0,140	0,010	0,010				0,065	0,030						0,020	0,025				0,300	7			

Cliostomum griffithii	0,035			0,020							0,055	2
Diploicia canescens	0,135		0,010 0,005				0,010	0,005	0,010	0,020	0,195	7
Evernia prunastri						0,005					0,005	1
Flavoparmelia caperata	0,010		0,090	0,045	0,015	0,140 0,040	0,005 0,120	0,095		0,020	0,580	10
Flavoparmelia soredians				0,025							0,025	1
Graphis scripta	0,810		0,135	0,145 0,045			0,050			0,040	1,225	6
Hyperphyscia adglutinata	0,765 0,285 0,180		0,965 0,285 0,235	0,970 0,930	0,625	0,940 0,980 0,970	0,515 0,800	0,490	0,290	0,940 0,230	11,395	18
Lecania sp.				0,200		0,010	0,295			0,015	0,520	4
Lecanora carpinea	0,035 0,020			0,025	0,030		0,150	0,020	0,080	0,035	0,395	8
Lecanora chlarotera	0,055		0,065	0,035 0,030	0,045	0,030 0,015	0,015 0,085		0,035	0,030 0,185	0,625	12
Lecanora compallens	0,010		0,240			0,060	0,175			0,070 0,135	0,690	6
Lecanora conizacoïdes						0,035 0,015					0,050	2
Lecanora expallens								0,090		0,120	0,210	2
Lecanora hagenii	0,020		0,040 0,025	0,010			0,140			0,035	0,270	6
Lecanora horiza			0,005		0,035	0,025 0,020	0,015 0,235	0,155		0,020	0,510	8
Lecidella elaeochroma	0,035 0,025		0,305	0,060 0,205	0,090	0,195 0,085 0,095	0,020 0,545	0,275	0,250	0,160	2,345	14
Melanelixia subaurifera						0,075					0,075	1
Opegrapha atra	0,115					0,190			0,035		0,340	3
Opegrapha pulicaris			0,105 0,015	0,040 0,125	0,020	0,060 0,150 0,155	0,025 0,145			0,250	1,090	11
Parmelina tiliacea						0,010					0,010	1
Parmotrema perlatum										0,005	0,005	1
Pertusaria amara										0,010	0,010	1
Pertusaria pertusa				0,070		0,020	0,050 0,125	0,065		0,075	0,405	6
Phaeophyscia hirsuta					0,050						0,050	1

Phaeophyscia orbicularis			0,045	0,185	0,195	0,145	0,360	0,740	0,900	0,745	0,330	0,415	0,315	0,145	0,310	0,580	0,415	0,170	5,995	16
Physcia adscendens	0,500	0,305		0,885	0,420	0,155	0,875	0,750	0,355	0,830	0,650	0,740	0,090	0,675	0,560	0,595	0,695	0,120	9,200	17
Physcia aipolia		0,130						0,155				0,235	0,280						0,800	4
Physcia biziana	0,210			0,010	0,290	0,040	0,030		0,050	0,525	0,435		0,125	0,355	0,095	0,280	0,160	0,055	2,660	14
Physcia tenella									0,020				0,255	0,130					0,405	3
Physconia grisea	0,055		0,020		0,040		0,035		0,055	0,345	0,055	0,040	0,045				0,045		0,735	10
Pleurosticta acetabulum												0,005							0,005	1
Porina aenea				0,175	0,415	0,055	0,090			0,075			0,025	0,055					0,890	7
Punctelia borreri	0,020							0,035	0,015	0,035	0,010	0,015							0,130	6
Punctelia subrudecta				0,015			0,005		0,005										0,025	3
Ramalina farinacea				0,025										0,025			0,010		0,060	3
Rinodina pyrina									0,060										0,060	1
Teloschiste chrysophthalmus				0,005			0,005		0,010										0,020	3
Xanthoria candelaria							0,020	0,370	0,170	0,385	0,025	0,180	0,005			0,030	0,005		1,190	9
Xanthoria parietina	0,945	0,625	0,970	0,570	0,770	0,340	0,920	0,840	0,530	0,535	0,920	0,895	0,680	0,740	0,200	0,530	0,595	0,705	12,310	18
Nombre d'espèces																				
Sites	15	12	8	18	15	14	25	16	25	22	17	22	23	22	16	15	26	16		
IRIS	11,7			15,7			20,5		25,0	20,3			22,5		16,0	15,0	21,0			
Villes	13,7						21,2						19,7							