



Pont-Ver(t)s

Qualité des sols, végétaux cultivés
et approches citoyennes

2025

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, 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 - Fos sur Mer").

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

Pour citer ce rapport :

Annabelle Austruy. Ponts-ver(t)s – Qualité des sols et végétaux cultivés et approches citoyennes. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 2025.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à ce projet.

Dans un premier temps, nous adressons nos remerciements au Citron Jaune, Centre National des Arts de la Rue et de l'Espace Public, et à toute leur équipe pour leur proposition et sollicitation de partenariat, leur confiance et leur enthousiasme tout au long du projet.

Nous remercions également le Laboratoire Terana Drôme en charge des analyses HAP et métaux dans les échantillons de sols et végétaux.

Enfin, nous remercions l'ensemble des habitants ayant participé à ce projet.

Résumé

A travers les travaux de l’Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions (IECP) menés sur ce territoire depuis plus de 10 ans, une contamination historique des sols en HAP a été mis en évidence à Port-saint-Louis-du-Rhône avec un impact marqué sur la qualité de l’air par envol de poussières.

La participation de l’IECP dans le cadre du projet Pont-ver(t)s vise à évaluer la qualité des sols et des végétaux cultivés dans des vergers participatifs installés à Port-Saint-Louis-du-Rhône. Les objectifs sont (i) de mesurer la capacité de bioaccumulation des métaux et des Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les espèces végétales cultivées sur les zones de culture, appelées balises nourricières, définies pour le projet, (ii) de déterminer les principales voies d’exposition des végétaux (racinaire, foliaire), (iii) d’évaluer la qualité des fruits et denrées produites, et (iv) d’accompagner les habitants par des actions de médiation scientifique.

Trois sites composent les « balises nourricières » du Projet Pont-ver(t)s : le site CRO (Ambroise Croizat) composé de diverses espèces fruitières (oliviers, citronnier, cerisier, amandier, figuier) avec un travail du sol et l’apport d’amendements organiques, le site REV (Parc de la Révolution) et le site MED (Médiathèque intercommunale) regroupant plusieurs oliviers. Sur chaque site, des prélèvements de sols et de végétaux (feuilles et fruits) ont été effectués et analysés (HAP, métaux, paramètres physico-chimiques), accompagnés de mesure de respiration des sols et complétés par des actions de sciences participatives avec les habitants.

Les principaux résultats ont mis en évidence une bonne qualité agronomique des sols de culture, notamment le sol CRO pour lequel des amendements organiques ont été apportés en surface qui ont amélioré significativement la respiration des sols témoignant d’un activité biologique accrue. L’analyse des HAP dans les sols a montré une contamination diffuse sur l’ensemble des sols. De même, certains métaux présentent localement des enrichissements d’origine anthropique (Pb, Cr, Zn). L’installation d’un couvert végétal au pied des arbres du site CRO, associé à l’apport d’amendements organiques a permis de stabiliser le sol et de dégrader une partie des HAP présents dans le sol (réduction de 31,7 % des teneurs totales en HAP). La capacité de bioaccumulation des végétaux dépendait du type d’espèces considérées, de la matrice étudiée (feuille, fruit) et des polluants considérés (métaux, HAPs). Alors qu’un faible transfert a été observé pour les HAPs lourds et intermédiaires à partir du sol, les HAPs dits légers étaient fortement bioaccumulés dans les feuilles des végétaux. L’accumulation des HAPs dans les fruits des espèces cultivées sur les différents sites (olivier, figuier, citronnier, amandier, cerisier) était

préférentiellement effectuée par voie aérienne par adsorption à la surface des fruits, avec une plus grande proportion de HAPs intermédiaires dans les fruits par rapport aux feuilles. Les métaux plus mobiles dans le sol et disponibles pour les plantes montrent des capacités de transfert dépendant notamment de l'acidité du sol, avec une plus forte bioaccumulation constatée sur les oliviers du site REV. La comparaison des différentes essences cultivées sur le site CRO met en évidence une plus forte bioaccumulation des éléments non essentiels (Cr, Ni et Pb) dans le figuier, connu pour son caractère métallophyte et testé de par sa tolérance dans les procédés de phytostabilisation.

Le calcul des doses journalières d'exposition relative à la consommation de ces fruits a permis de montrer l'absence de risque sanitaire avéré et l'intérêt du travail du sol sur le site CRO (revégétalisation, amendements organiques) qui a limité fortement les transferts vers les végétaux consommés. Le sol reste une voie d'exposition possible, il est donc recommandé de travailler sur un sol humidifié pour réduire l'envol de poussières et de porter des équipements de protection individuelle (EPI) pour protéger les voies respiratoires et éviter le contact. Les temps de médiation scientifiques et de participation citoyenne autour de l'observation et de la préservation de l'environnement ont facilité l'appropriation de ces notions par les habitants et leur implication dans la réalisation, l'entretien et la récolte de ces balises nourricières.

Table des matières

I. Introduction.....	8
II. Méthodologie.....	10
II.1. Définition des balises nourricières.....	10
II.2. Prélèvements et pré-traitements des sols.....	11
II.3. Prélèvements et pré-traitements des végétaux.....	12
II.4. Analyses chimiques.....	13
II.4.1. Analyses des paramètres pédochimiques.....	13
II.4.2. Analyses des métaux.....	14
II.4.3. Analyses des Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	15
II.5. Détermination et calcul d'indices.....	17
II.6. Calcul de la dose journalière d'exposition (DJE).....	17
II.7. Mesure de respiration des sols.....	18
II.7.1. Objectifs.....	18
II.7.2. Méthode.....	18
II.8. Sciences participatives et formations citoyennes.....	20
III. Résultats & discussions.....	21
III.1. Paramètres physico-chimiques des sols.....	21
III.2. Respiration des sols in-situ.....	21
III.3. Contamination des sols de culture en HAPs et métaux.....	22
III.4. Bioaccumulation des métaux et HAPs dans les végétaux.....	25
III.5. Evaluation des risques sanitaires en lien avec la consommation des fruits.....	30
III.6. Retour sur les actions de médiations.....	31
IV. Conclusion et perspectives.....	33
V. Bibliographie.....	35
VI. Annexes.....	41

Index des Figures

Figure 1 : Installation de vergers collectifs et participatifs dans des quartiers classés Territoire de Veille Active (TVA) sur les sites REV, CRO et MED.....	10
Figure 2 : Echantillons végétaux pré-traités (lyophilisés et broyés).....	12
Figure 3 : LI-COR 6400-09.....	19
Figure 4 : Ordinateur du LI-COR 6400-09.....	19
Figure 5 : Mesures de respiration des sols sur le sol CRO avec (CRO-C) et sans (CRO-N) amendement.....	22
Figure 6 : Profil des congénères HAP relevés dans les différents sols de culture.....	24
Figure 7 : Teneurs en métaux (à gauche) et HAPs totaux (à droite) dans les feuilles d'oliviers cultivés dans les différents sites.....	26
Figure 8 : Teneurs en métaux (à gauche) et HAPs totaux (à droite) dans les feuilles des différentes essences cultivées.....	27
Figure 9 : Profil des congénères HAP relevés dans les feuilles (à gauche) et les fruits (à droite) des différentes essences cultivées sur CRO.....	28
Figure 10 : Facteur de translocation (FT) des métaux et HAPs des feuilles vers les fruits calculés pour les différentes espèces ayant produits des fruits (oliviers sur les 3 sites et citronniers et figuier sur CRO).....	29
Figure 11 : Retour en image sur les temps de médiation scientifique et les évènements partagés avec les riverains.....	32

Index des Tableaux

Tableau 1 : Liste et noms des échantillons végétaux récoltés sur les balises nourricières de Ponts-ver(t)s.....	12
Tableau 2 : Classes des facteurs d'enrichissement (Tessier, 2012).....	15
Tableau 3 : Liste des 16 HAPs analysés.....	16
Tableau 4 : Paramètres physico-chimiques des sols de culture.....	21
Tableau 5 : Teneurs en métaux et HAP dans les différents sols de culture.....	23
Tableau 6 : Doses journalières d'exposition (DJE) calculées pour la consommation de 100 g de fruits frais produits sur chaque site et doses journalières admissibles (DJA) définies pour chaque composé étudié exprimée en $\mu\text{g}/\text{kgPC}/\text{j}$	30
PONTs-VER(T)S – Qualité des sols et végétaux cultivés	7

I. Introduction

Depuis plus de 10 ans, l’Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions (IECP) mène des travaux sur la qualité des sols et végétaux cultivés sur le territoire de la Métropole Aix-Marseille-Provence selon une méthode novatrice qui consiste à établir une passerelle entre les acteurs territoriaux (collectivités, exploitants, citoyens...) et les acteurs de la recherche, pour produire une connaissance adaptée aux enjeux locaux et destinée à améliorer les conditions environnementales. Ainsi, de précédents travaux de l’IECP ont mis en évidence une exposition marquée de Port-Saint-Louis-du-Rhône aux Hydrocarbures Aromatiques Polycyliques (HAPs) dans l’air et les sols. Parmi eux, le projet HAPSIS (2019-2021, <http://www.institut-ecocitoyen.fr/page.php?idp=27&idt=3>) a montré que cette exposition est issue d’apports de sources diverses (activités portuaires et industrielles, chauffage au bois...) et des envols de poussières de sols contaminés de la ville. Les zones les plus exposées sont le centre-ville, le Canal Saint-Louis et la Presqu’île du Mazet (Austruy et Reuillard, 2021). Ensuite, le projet CARE, de 2022 à 2024 (Reuillard et Austruy, 2022 et 2024) a permis, d’une part, de compléter la cartographie de la contamination des sols notamment dans les zones les plus exposées identifiées dans le projet HAPSIS. D’autre part, il avait pour but de mettre en place des essais de revégétalisation pour tester différents couverts végétaux adaptés aux caractéristiques des sols salins hydromorphes de ce secteur et tolérants aux HAPs. Le suivi de cette revégétalisation a donc permis d’apprécier son efficacité, avec les micro organismes associés, sur la dégradation des HAPs et la réduction des envols de poussières et, *in fine*, l’exposition des habitants aux poussières contaminées en HAP.

Le projet « Ponts-ver(t)s » est une commande du Citron Jaune à l’artiste arboriculteur Thierry Boutonnier. Ce dernier accompagné par Laury Huard et Eva Habasque crée depuis 2022 des vergers collectifs et participatifs, à Port-Saint-Louis-du-Rhône à destination des habitants des quartiers classés Territoire de Veille Active (TVA). En 2022, la démarche a été amorcée à Ambroise Croizat pour se poursuivre dans le quartier Marcel Baudin en 2023. L’action se traduit par la plantation d’arbres fruitiers en pied d’immeuble avec les habitants. Ce jardin arboré, rassemblant 10 à 20 espèces comestibles, est imaginé pour permettre une cueillette libre et ouverte à tous. A terme, il doit déboucher sur une production de produits transformés, issus de la collecte des fruits (ex huile d’olive). Tout le processus est ponctué par des temps de médiations culturelles et scientifiques dont les dates sont définies en fonction du calendrier de croissance des plantes et des actions menées. Ces moments conviviaux s’organisent autour de jeux, spectacles, repas partagés, formation citoyenne et ateliers de jardinage ludiques dans le verger.

Au sein du consortium du Projet Ponts Ver(t)s, l'IECP s'est engagé à mettre à disposition son expertise et ses connaissances de terrain dans la caractérisation des zones de cultures (sols et végétaux), appelées balises nourricières, avec l'objectif de mesurer la capacité de bioaccumulation des métaux et HAPs dans les végétaux cultivés et consommés, ainsi que de proposer ses formations et compétences à travers l'Observatoire Citoyen de l'Environnement VOCE, l'entité chargée d'animer les actions de recherche participative (<https://www.institut-ecocitoyen.fr/index.html>, Jeanjean *et al.*, 2023). Ce travail a pour but d'évaluer la qualité des végétaux et sols cultivés, de réaliser un transfert de connaissances vers le grand public et de développer la connaissance sur la bioaccumulation des HAPs et des métaux dans les végétaux en fonction des expositions environnementales. Au delà des données de bioaccumulation d'éventuels contaminants dans les sols et végétaux, l'apport scientifique est mis en œuvre à travers la co-définition de la palette végétale avec les habitants, la mise en place de formations en scientifiques participatives et la transmission de savoir-faire arboricoles à destination des participants. L'ensemble de ces actions permettra de valider les choix des espèces et des sites de cultures, d'adapter les modalités de plantation, d'entretien et de consommation des cultures et de sensibiliser les habitants quant aux démarches à entreprendre pour s'adapter aux expositions environnementales.

II. Méthodologie

II.1. Définition des balises nourricières



Figure 1 : Installation de vergers collectifs et participatifs dans des quartiers classés Territoire de Veille Active (TVA) sur les sites REV, CRO et MED

La mise en place de modèle d'agriculture urbaine nécessite d'évaluer l'impact des éventuelles sources de contaminations anthropiques sur la qualité des sols et végétaux (Schwartz, 2009 et 2012 ; Austruy et al., 2021). La ville de Port-Saint-Louis-du-Rhône présente une pollution historique en HAPs dans de nombreux sols et peut être exposée à des apports atmosphériques de HAPs ou de métaux (chauffage domestiques, trafic routier et maritime, zone industriello-portuaire de Fos) (Ratier et al., 2018 ; Dron et al., 2021 ; Austruy et al., 2021 ; Austruy et Reuillard, 2021).

Les vergers collectifs et participatifs, appelés balises nourricières, rassemblant différentes espèces comestibles et créés à Port-Saint-Louis-du-Rhône à destination des habitants des quartiers classés Territoire de Veille Active (TVA) dans le cadre du projet Ponts-ver(t)s, ont été installés sur trois sites à partir de 2022 (Figure 1) :

- Vergers collectifs de la Résidence Ambroise Croizat regroupant oliviers, amandiers,

citronniers, cerisiers, figuiers (site CRO)

- Plantations d'oliviers au Parc de la Révolution (site REV)
- Plantation d'oliviers à la Médiathèque intercommunale (site MED)

Sur le site CRO, un travail du sol et un apport de fumier de cheval au sol (750 kg sur une surface d'environ 300 m²) a été effectué et complété par l'ajout de BRF en surface avant l'installation des cultures. Un couvert herbacé composé principalement de graminées (ray-grass italien, fétuque élevée) et de légumineuses (luzerne, trèfle violet) et complété par de la phacélie (boraginacée) a été semé (environ 8 kg/Ha) au pied des arbres fruitiers mises en cultures. Ce couvert, avec les micro-organismes associés, a montré son efficacité à dégrader les HAPs et à limiter l'envol de poussières de sols (Reuillard et Austruy, 2024). La préparation du sol et les différents traitements apportés aux cultures sont présentés en Annexe 1.

Enfin, les oliviers cultivés sur les différents sites ont été traités au printemps 2024 et 2025 avec de l'argile Kaolinite pour limiter le développement de la mouche des olives (Annexe 1).

Afin d'évaluer la qualité des sols et végétaux produits dans les balises nourricières du projet Ponts-ver(t)s, les concentrations en métaux et HAPs ont été mesurées dans différents compartiments (sols, feuilles et fruits) prélevés en avril 2024 (sols) et septembre 2024 (feuilles et fruits). Ces analyses ont été complétées par la détermination des principaux paramètres pédochimiques des sols.

II.2. Prélèvements et pré-traitements des sols

La campagne d'échantillonnage des sols a eu lieu le 17 avril 2024 en présence des équipes du Citron Jaune, des artistes arboriculteurs et de quelques habitants.

Sur chaque parcelle de culture, 5 prélèvements ont été réalisés de manière aléatoire. Les prélèvements d'environ 250 cm³ ont été effectués à la surface (0-15 cm) à l'aide d'une tarière manuelle.

Sur le site CRO, deux types de sols ont été prélevés, le sol naturel (CRO-N) sans amendement et un sol amendé et travaillé avant l'implantation des cultures (CRO-C).

Au laboratoire, ils ont ensuite été homogénéisés puis quartés afin de sélectionner 100 g de chaque prélèvement pour obtenir un échantillon composite de sol par parcelle. 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 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.

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

II.3. Prélèvements et pré-traitements des végétaux

La campagne d'échantillonnage des végétaux a eu lieu le 18 septembre 2024 en présence des équipes du Citron Jaune, des artistes arboriculteurs et de quelques habitants.

Sur chaque site, l'ensemble des espèces végétales cultivées ont été échantillonnées, le détail est présenté dans le Tableau 1. Les amandiers et cerisiers du site CRO, encore trop jeunes, n'ont pas produit de fruits.

Tableau 1 : Liste et noms des échantillons végétaux récoltés sur les balises nourricières.

Sites	Olivier		Amandier		Citronnier		Cerisier		Figuier	
	Feuille	Fruit	Feuille	Fruit	Feuille	Fruit	Feuille	Fruit	Feuille	Fruit
CRO	CRO-OI-f	CRO-OI-fr	CRO-Am-f		CRO-Ci-f	CRO-Ci-fr	CRO-Ce-f		CRO-Fi-f	CRO-Fi-fr
MED	MED-OI-f	MED-OI-fr								
REV	REV-OI-f	REV-OI-fr								

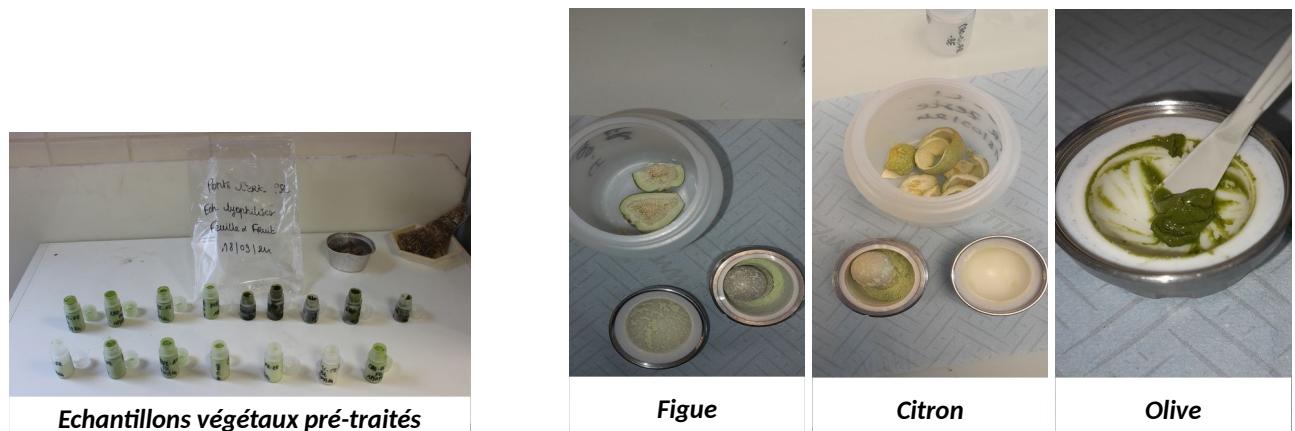


Figure 2 : Echantillons végétaux pré-traités (lyophilisés et broyés)

Pour chaque espèce et chaque tissus échantillonné, un échantillon composite a été réalisé et analysé. Les échantillons de feuilles et de fruits ont été pesés puis rincés à deux reprises dans un bac en aluminium avec de l'eau miliQ. Ils ont ensuite été placés dans des flacons en PEHD puis congelés avant d'être lyophilisés pendant 72 h (-55 °C / 0,035 mbar, Christ-Alpha 1-4 LD). Après détermination de la matière sèche pour le calcul de la teneur en eau, ils ont été broyés à l'aide d'un broyeur à billes équipé de capsules et billes en zirconium (Retsch MM 400) durant 2 min à une fréquence de 25 Hz, afin d'obtenir une poudre très fine et homogène (Figure 2). Après le broyage, la poudre a été récupérée dans des flacons en PPCO puis stockée à -30 °C dans l'attente des analyses.

II.4. Analyses chimiques

II.4.1. Analyses des paramètres pédochimiques

Les analyses des paramètres physico-chimiques ont été réalisées par le Laboratoire Développement Méditerranée à Alès (Accréditation COFRAC n°1-5865) sur la fraction inférieure à 2 mm pré-traitée. 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 X31-130 pour la Capacité d'échanges cationiques (CEC) ;
- NF X31-107 pour la granulométrie 5 fractions.

Le rapport C/N a été calculé à partir de la concentration en azote total et en COT. De même, à partir de la teneur en COT, la concentration en matière organique a été calculée selon l'Eq. 1.

$$\text{Matière organique (g/kg)} = \text{COT} \times 1,71 \quad \text{Eq. 1}$$

Le calcul de la teneur en eau a été effectué à partir de la détermination de la matière fraîche (MF) et sèche (MS) de chaque échantillon de sols et végétaux (Eq. 2).

$$\text{Teneur en eau} = \frac{(MF - MS)}{MS} * 100 \quad \text{Eq. 2}$$

II.4.2. Analyses des métaux

Les métaux traces sont des éléments minéraux constituant la croûte terrestre dont la concentration est, pour chacun d'entre eux, inférieure à 0,1 % (Baize, 1997). Ainsi, les éléments traces, qui regroupent 80 constituants chimiques, représentent à eux tous 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs (Al, Fe, etc.) interviennent pour 99,4 %. Parmi l'ensemble des métaux traces, une vingtaine sont indispensables aux processus physiologiques majeurs des plantes, en particulier la respiration, la photosynthèse, les processus moléculaires ou l'assimilation des macronutriments (Kabata-Pendias, 2001).

L'analyse des métaux traces sur les matrices sols et végétales s'est focalisée sur 10 éléments : arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), mercure (Hg), nickel (Ni), plomb (Pb), zinc (Zn). L'analyse du fer (Fe) et de l'aluminium (Al) complètent ces données.

Concernant les échantillons de sols, la minéralisation pseudo-totale des échantillons broyés en particules fines a été réalisée dans un four micro-onde (Mars 5 CEM) par voie acide à l'«eau régale» (norme AFNOR X 31-151) composée d'acide nitrique (HNO_3 – 1/3) et d'acide chlorhydrique (HCl – 2/3). Un échantillon de sol certifié, ERM CC 141 (sol limoneux), et un blanc ont été réalisés pour chaque série. Dans l'attente de l'analyse, les échantillons sont conservés à 4 °C.

La minéralisation totale des échantillons végétaux broyés (feuilles et fruits), inspirée par la méthode proposée par Barbaste (2004), a été réalisée avec de l'acide nitrique (HNO_3 – 67 %) et du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2 – 30 %) sur bloc chauffant. Un échantillon de Ray-grass certifié, ERM CD 281, et un blanc ont été réalisés pour chaque série de minéralisation.

L'analyse des concentrations en métaux dans les échantillons de sol et végétaux a été réalisée par ICP-MS au Laboratoire Départemental d'Analyses de la Drôme à Valence.

A partir des teneurs en métaux dans un sol, des facteurs d'enrichissement peuvent être déterminés pour identifier des contaminations anthropiques de surface. Ils sont calculés en comparant les teneurs relevées en surface aux teneurs dites naturelles mesurées dans les horizons profonds et héritées de l'altération de la roche mère (Redon et al., 2013 ; Dung et al., 2013 ; Austruy et al., 2016). Ces teneurs naturelles en métaux dans un sol sont appelées Fond pédogéochimique naturel (FPGN), il a été défini à l'échelle de la Métropole Aix-Marseille-Provence en 2016 (Austruy et al., 2016). Pour intégrer la distribution naturelle des métaux dans le profil de sol, un élément conservatif présentant une concentration relativement constante avec la profondeur en milieu naturel dans de nombreux sols (Sterckeman et al., 2012) est pris en compte dans le calcul. C'est le cas de l'aluminium (Al), qui a ainsi été choisi comme élément de référence dans cette étude (Eq. 3).

$$FE = \frac{[\text{métal}]/[\text{Al}](\text{Horizon de surface})}{[\text{métal}]/[\text{Al}](\text{Horizon profond})} \quad \text{Eq.3}$$

Lorsque FE est inférieur à 2, l'enrichissement anthropique est considéré comme inexistant ou très faible, lorsque le FE est supérieur à 2 une pollution diffuse significative est avérée de modéré à extrême. Ainsi, les facteurs d'enrichissement peuvent être regroupés en 5 classes (Tableau 2).

Tableau 2 : Classes des facteurs d'enrichissement (Tessier, 2012)

EF < 2	Enrichissement inexistant ou faible
2 < EF < 5	Enrichissement modéré
5 < EF < 20	Enrichissement significatif
20 < EF < 40	Enrichissement très fort
EF > 40	Enrichissement extrême

II.4.3. Analyses des Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Cette famille de contaminants comporte plus d'une centaine de composés organiques neutres, apolaires et constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène mais dont la structure comprend au moins deux cycles aromatiques (Rollin *et al.*, 2005). Les origines des HAPs sont diverses et peuvent être regroupées en trois catégories. La principale catégorie concerne les HAPs pyrolytiques issus de la combustion incomplète de matière organique pouvant être d'origine naturelle (feux de forêts ou éruptions volcaniques) (Eva *et al.*, 2000) ou anthropique avec des émissions issues de l'utilisation de combustibles solides (bois, tourbe, charbon), de carburants fossiles et de certains procédés industriels (domaines de la fonte, métallurgie, production d'énergie, industries chimiques, production de coke, produits chlorés, pâte à papier, incinération des produits ménagers) (Brignon et Soleille, 2006). On retrouve ensuite les HAPs pétrogéniques formés à partir de produits pétroliers ou de leurs dérivés (non brûlés), avec des émissions localisées chroniques (activité portuaire, raffinerie, lessivage des infrastructures routières) ou accidentelles (marée noire) (Brignon et Soleille, 2006) et les HAPs diagénétiques produits naturellement par biosynthèse de la matière organique par les êtres vivants (Krauss, 2005).

À ce jour, environ 130 HAPs ont été identifiés et 16 ont été retenus comme prioritaires par l'agence environnementale américaine (US-EPA) (Tableau 3) en raison de leur potentielle toxicité. Parmi les HAPs, le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé le benzo(a)pyrène (BaP) comme cancérogène pour l'humain (Groupe 1), le chrysène (Chr), le Benzo(a)anthracène (BaA) et

le benzo(b)fluoranthène (BbF) comme possiblement cancérogènes pour l'humain (Groupe 2B) (CIRC, 2010). Les analyses effectuées portent donc sur ces 16 HAPs, qui sont les plus fréquemment recherchés et analysés dans les études de risque pour l'environnement.

Les analyses des HAPs contenus dans les échantillons de sols et de végétaux (feuilles et fruits) ont été réalisées par le Laboratoire Terana Drôme à Valence. Après lyophilisation et broyage des échantillons de végétaux (0,5 g), l'extraction des HAP a été réalisée à partir d'une solution d'acétone/eau à 40 % (v/v). L'extrait purifié a ensuite été analysé par chromatographie liquide à haute performance (HPLC) reliée à un détecteur UV et un détecteur de fluorescence. L'acénaphthylène a été détecté par UV et les 15 autres HAP par fluorescence. Des blancs sont inclus dans les analyses pour assurer la qualité des résultats. Les échantillons ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse (Agilent Technologies, GC-MSD), équipé d'une colonne capillaire DB5 J&W (30 m x 0,25 mm x 0,25 µm). Les analyses ont été réalisées en mode « SIM (Single Ion Monitoring) » pour la quantification.

Tableau 3 : Liste des 16 HAPs analysés

Nom	Symbol	Nombre de cycles	Formule chimique
Naphtalène	Nap	2	C ₁₀ H ₈
Acénaphthylène	Acy		C ₁₂ H ₈
Acénaphtène	Ace		C ₁₂ H ₁₀
Fluorène	Fle	3	C ₁₃ H ₁₀
Anthracène	Ant		C ₁₄ H ₁₀
Phénanthrène	Phe		C ₁₄ H ₁₀
Fluoranthène	FIA		C ₁₆ H ₁₀
Pyrène	Pyr	4	C ₁₆ H ₁₀
Benzo(a)anthracène	BaA		C ₁₈ H ₁₂
Chrysène	Chr		C ₁₈ H ₁₂
Benzo(a)pyrène	BaP		C ₂₀ H ₁₂
Benzo(b)fluoranthène	BbF	5	C ₂₀ H ₁₂
Dibenzo(ah)anthracène	DBA		C ₂₂ H ₁₄
Benzo(k)fluoranthène	BkF		C ₂₀ H ₁₂
Benzo(ghi)pérylène	Bpe	6	C ₂₀ H ₁₂
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	Ipy		C ₂₂ H ₁₂

II.5. Détermination et calcul d'indices

Facteur de translocation (FT)

Le facteur de translocation (FT) représente le transfert du polluant des racines vers les parties aériennes de la plante (Tremel-Schaub et Feix, 2005) ou des feuilles vers les fruits dans le cas présent. Il est calculé à partir des concentrations en métaux et HAPs mesurées dans les différents organes de la plante (Eq. 4).

$$FT = \frac{[\text{métaux ou HAP}]_{\text{fruits}} (\text{mg/kg MS})}{[\text{métaux ou HAP}]_{\text{feuilles}} (\text{mg/kg MS})} \quad \text{Eq.4}$$

Ces facteurs peuvent aussi être calculés à partir des stocks (en mg ou µg) en HAPs et/ou métaux contenus dans chaque tissu végétal.

Les facteurs de bioaccumulation (FB)

Pour mesurer l'accumulation d'un composé dans un système biologique déterminé, on utilise le «facteur de bioconcentration» (FB aussi appelé facteur de bioaccumulation) défini par Bliefert et Perraud en 2001 (Eq. 5).

$$FB = \frac{\text{Concentration d'un composé dans un être vivant}}{\text{Concentration du même composé dans milieu environnant}} \quad \text{Eq.5}$$

Dans ce cas, « être vivant » représente les feuilles du végétal, « le milieu environnant » étant le sol. La bioaccumulation est ainsi définie comme le processus d'assimilation et de concentration d'un élément dans le végétal.

II.6. Calcul de la dose journalière d'exposition (DJE)

A partir des concentrations en métaux et HAPs contenues dans les parties consommables des végétaux (fruits), il est possible de déterminer les doses journalières d'exposition (DJE), correspondant à la quantité de polluant ingérée par une personne quotidiennement. Ce calcul est effectué à partir de la quantité moyenne de végétaux ingérée par jour (Q), fixée à 100 g de fruit frais (AFSSA, 2009) (Eq. 6).

$$DJE = \frac{[\text{métaux ou HAP}](\text{mg/kgMF}) \times Q}{\text{poids corporel moyen (kg)}} \quad \text{Eq. 6}$$

Ces doses sont exprimées en mg par kg de poids corporel et par jour.

Ces DJE sont ensuite comparées aux valeurs de références, correspondant aux doses journalières admissibles (DJA) déterminées pour chaque contaminant. Ces dernières correspondent aux quantité de substance pouvant être consommée quotidiennement au cours d'une vie sans présenter de risque appréciable pour la santé, elles sont données par les organismes d'expertise en santé publique et en sécurité alimentaire (OMS, EFSA, ANSES, ...). En France, c'est l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) qui valide et définit ces valeurs de référence (ANSES, 2022).

II.7. Mesure de respiration des sols

II.7.1. Objectifs

On appelle respiration d'un sol le flux de CO₂ libéré au niveau de l'interface sol-atmosphère. Ce CO₂ est le résultat des activités biologiques des sols, mais peut aussi être dû à l'oxydation chimique des composés carbonés, ou encore à la dissolution des carbonates présents dans les sols (Granier *et al.*, 2000). La contribution de chacun de ces processus est difficile à établir. En effet, plusieurs études ont montré une contribution de la respiration racinaire et microbienne allant de 10 à 90 %, les sources cataboliques d'émission de CO₂ étant multiples (respiration des racines, activité de la flore rhizosphérique et de la faune, décomposition de la matière organique ...) (Hanson *et al.*, 2000 ; Berard *et al.*, 2016). Cependant, la mesure globale de ce flux de CO₂ entre le sol et l'atmosphère apporte une information claire directement liée au fonctionnement biologique du sol (Guérrini *et al.*, 2016).

II.7.2. Méthode

La mesure de la respiration des sols s'effectue à l'aide d'un LI-COR 6400-09 (Figure 3), un appareil portable permettant de mesurer les échanges de CO₂ entre différents types d'interfaces, notamment l'interface sol/atmosphère. Simultanément, il réalise également des mesures de température, d'humidité relative (air et sol) et de pression atmosphérique. Cet appareil possède une chambre spécifique aux mesures de respiration de sol, ainsi qu'un ordinateur qui analyse, traite et met en forme les mesures effectuées par la chambre sol (Figure 4).

À l'échelle mondiale, la respiration peut présenter une variation d'un facteur 10 suivant l'écosystème et la localisation, puisque la variabilité spatiale conditionne le type de sol et de biosphère, ainsi que le climat (Schlesinger et Andrews, 2000). De nombreux facteurs biotiques et abiotiques impactent la respiration des sols, tels que la température, l'humidité, les paramètres physico-chimiques du sol (teneur en matière organique, pH, ...) et sa diversité biologique. En effet, la pédofaune associée à la microflore participe à l'amélioration et la stabilisation de l'organisation structurale du sol et a donc une action sur la respiration du sol (Bahn *et al.*, 2008).



Figure 3 : LI-COR 6400-09



Figure 4 : Ordinateur du LI-COR 6400-09

Ainsi, le flux de CO₂ est très sensible aux fluctuations de pression. Une chambre non ventilée fermée induirait des augmentations de pression significatives qui pourraient être amplifiées par l'évaporation de l'eau dans les sols, ainsi que par le réchauffement de l'air dans la tête de la chambre. Donc, pour éviter toute perturbation du flux de CO₂, la chambre est ventilée et établit un équilibre dynamique entre les pressions à l'intérieur et à l'extérieur de celle-ci. En utilisant ce système, le flux de CO₂ mesuré dans les sols dépend de la concentration en CO₂ dans la chambre de mesure. Cette concentration avec son delta est définie à partir de la mesure de la concentration atmosphérique en CO₂ et est établie à 400 ± 10 ppm. Pour maintenir des conditions stables, des colliers en PVC ont été installés aux points de mesure 24 heures avant.

Les mesures de respiration des sols ont été réalisées sur les sols de culture du site CRO au printemps 2024 lors du prélèvements des sols (17 avril 2024), selon la condition avec (CRO-C) et sans (CRO-N) amendements et BRF, avec 5 points de mesure par condition. Sur chaque point, l'appareil a effectué 20 cycles en un temps compris entre 1 et 2 minutes, suivant le temps de stabilisation de la concentration en CO₂ dans la chambre.

Ces valeurs ont été récupérées et traitées afin d'obtenir une valeur moyenne pour chaque variable mesurée (flux de CO₂, température du sol et de l'air, humidité relative du sol et de l'air).

II.8. Sciences participatives et formations citoyennes

En parallèle de l'étude sur la qualité des sols et végétaux cultivés, l'IECP a mené à différents temps du projet des ateliers de sensibilisation scientifique sur la pollution des sols et plus généralement de l'environnement.

Porté par l'IECP, l'Observatoire citoyen de l'environnement (VOCE) créé en 2013 propose d'intégrer une participation citoyenne dans les études scientifiques menées sur le territoire. Cette démarche participative, labellisée en 2014 par la commission pluraliste REPERE du Ministère en charge de l'Environnement, intègre les citoyens dans une réelle approche scientifique et permet de questionner ensemble les enjeux environnementaux spécifiques. Afin de réaliser un suivi citoyen de la pollution de l'air sur le territoire de la Métropole Aix-Marseille-Provence (MAMP), une formation citoyenne propose d'observer un groupe d'organismes sensibles aux polluants atmosphériques, les lichens. Ce suivi citoyen de la diversité lichénique est associé à des travaux en biosurveillance lichénique pour le suivi de la qualité de l'air menés par l'équipe scientifique de l'IECP depuis 2011 (Austruy, 2018 ; Dron et al., 2016 et 2021). Il a pour objectif de :

- Faire bénéficier les citoyens volontaires d'une formation scientifique conçue pour être accessible à tous, sans condition de connaissance préalable.
- Mettre en place et pérenniser un dispositif de biosurveillance de la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire.

Ainsi, des formations citoyennes sur la biosurveillance lichénique ont été proposées aux habitants et partenaires du projet avec la mise en place de suivi annuel de la diversité lichénique, le protocole VOCE lichen est présenté en Annexe 2.

Pour compléter les actions de médiation scientifique, l'équipe de l'IECP a participé à plusieurs événements publics :

- Fête de la Science en octobre 2024 avec l'équipe du Citron Jaune,
- Fête du verger aux mois de juin 2024 et 2025 organisé par le Citron Jaune,
- Lotolive en octobre 2025.

III. Résultats & discussions

III.1. Paramètres physico-chimiques des sols

Les paramètres physico-chimiques des sols de culture sont présentés dans le Tableau 4. Les sols de cultures présentent une texture à tendance limoneuse à argilo-limoneuse. Ils sont riches en matière organique et présentent un rapport C/N relativement élevé notamment sur les sols REV et CRO-C, indiquant un excès de matière organique en surface. Pour le sol CRO-C, ces résultats reflètent l'apport d'amendements organiques en surface (fumier de cheval et BRF). La capacité d'échange cationique (CEC), qui correspond à la quantité de cations qu'un sol peut retenir sur son complexe absorbant, présente des valeurs légèrement élevées mais conformes aux mesures relevées dans les sols de culture. Enfin, ces sols sont légèrement alcalins en surface (pH compris entre 7,6 et 8,4), condition favorable à l'activité microbienne. De fait, l'étude des paramètres physico-chimiques des sols met en évidence des sols de bonne qualité agronomique et plus particulièrement le sol CRO-C enrichi et travaillé en surface.

Tableau 4 : Paramètres physico-chimiques des sols de culture

	pH	MO*	C/N	CEC	Salinité	Texture
	-	%	-	meq/100g	g/kg	
CRO-N	8,4	3,9	8,5	22,1	0,227	Limono-argilo-sableuse
CRO-C	8,0	9,5	17,6	19,6	0,303	
MED	8,1	6,1	10,6	-	0,077	Limono-sablo-argileuse
REV	7,6	11,0	12,7	21,3	1,033	Argilo-limoneuse
Valeurs ref	6,0-7,0	1,0-10,0	8,5-10,5	11,0-19,0	0,02-0,07	-

* MO : Teneur en matières organiques

III.2. Respiration des sols *in-situ*

La Figure 5 présente les flux de CO₂ moyens mesurés pour les sols de culture avec ou sans amendement (CRO-C et CRO-N respectivement), environ un an après l'apport de fumier de cheval et de BRF sur le sol CRO-C.

Ces mesures de respiration des sols montrent une influence positive de l'apport de matière organique. En effet, le flux de CO₂ moyen mesuré sur le sol amendé est significativement plus important que celui relevé sur sol non amendé ($p < 0,005$).

L'ajout de matière organique a donc stimulé l'activité biologique des sols. En effet, cet apport a facilité le développement du couvert végétal et l'activité biologique des sols (micro-organismes, pédofaune) comme observé dans de nombreux travaux (Bahn *et al.*, 2008 ; Guerrini *et al.*, 2016 ; Berard *et al.*, 2016). Par ailleurs, il a amélioré la structuration du sol, permettant une meilleure aération et capacité de fixation des éléments nutritifs, ce qui favorise la vie du sol et les échanges gazeux.

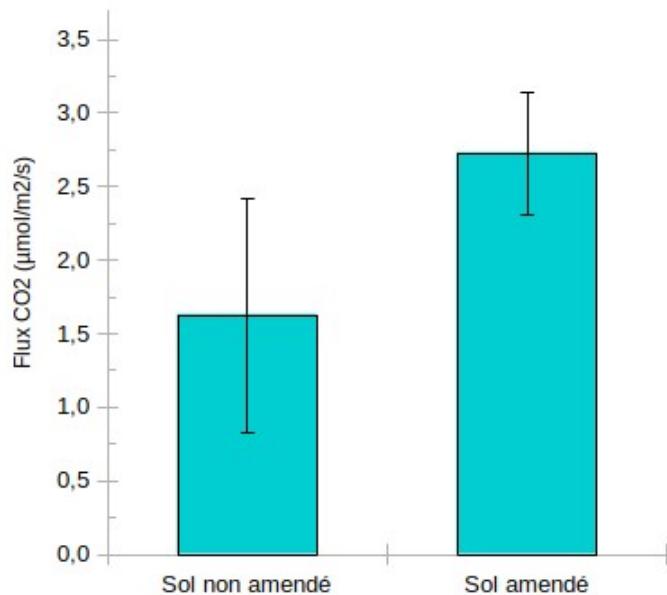


Figure 5 : Mesures de respiration des sols sur le sol CRO avec (CRO-C) et sans (CRO-N) amendement (T °C moyenne des sols : 22,5 °C et humidité relative : 37 %)

III.3. Contamination des sols de culture en HAPs et métaux

Les concentrations en métaux (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) et des 16 HAPs définis comme prioritaires par l'US-EPA (Tableau 3) ont été mesurées dans les différents sols de culture. La somme des concentrations des 16 HAPs et les teneurs en métaux rencontrées sont présentées dans le Tableau 5.

Les teneurs en HAP totaux mesurées varient de 1260 µg/kg sur CRO-C à 6865 µg/kg dans le sol MED, des valeurs supérieures aux teneurs naturelles (incendie, volcanisme, pyrosynthèse de la matière organique) relevées dans les sols français, comprises entre 100 et 1000 µg/kg (INERIS, 2005). Ces résultats mettent en évidence une pollution diffuse en HAP sur l'ensemble des sols. Ces résultats sont en adéquation avec les précédents travaux menés par l'IECP sur Port-Saint-Louis-du-Rhône portant sur la contamination des sols en HAPs (Reuillard et Austruy, 2024 ; Austruy et Reuillard, 2021). Comme décrit dans ces travaux, les concentrations en HAPs mesurées dans les

sols de cette commune sont principalement influencés par des apports anthropiques de surface (activité industrielle, urbaine et agricole, envol de poussières, apport par le Rhône) et marquées par le passé industriel de la ville (Austruy et Reuillard, 2021). A noter que les niveaux de HAPs relevés à Port-Saint-Louis-du-Rhône sont comparables aux niveaux observés dans les sols de la banlieue de Nanjing (en moyenne 1680 µg/kg), ville chinoise de plus de 6 millions d'habitants située à l'estuaire du Yangzi Jiang, le plus grand fleuve de Chine (Wang et al., 2015).

Sur le sol CRO, deux conditions sont analysées avant/après le travail du sol et apport d'amendements organiques, respectivement CRO-N et CRO-C. Par ailleurs, sur le sol CRO-C, un couvert végétal a été installé composé principalement de graminées et de légumineuses. Les résultats montrent une réduction de 31,7 % des concentrations en HAPs dans le sol CRO-C par rapport à CRO-N (Tableau 1). Le couvert herbacé et les micro-organismes associés, stimulés par les amendements organiques apportés au sol, ont permis de réduire les teneurs en HAPs relevées, confirmant la capacité de la végétation installée à dégrader les HAPs (Reuillard et Austruy, 2024).

Tableau 5 : Teneurs en métaux et HAPs dans les différents sols de culture

	Unités	CRO-N	CRO-C	MED	REV	Valeur ref*
As	mg/kg	11,0	11,4	11,1	18,4	0,1-33,9
Cd		0,3	0,2	0,4	1,2	0,1-0,9
Cr		97,1	62,4	55,5	43,0	1,0-67,1
Cu		23,4	23,3	33,1	20,1	0,1-29,2
Hg		0,05	0,05	0,08	<LQ	0,02-0,1
Ni		31,6	33,6	25,6	25,7	0,1-55,1
Pb		25,2	22,1	102,1	39,9	0,1-33,1
Zn		82,8	79,1	173,4	90,6	1,0-88,8
HAPtot	µg/kg	1659,2	1259,6	6864,5	5657,9	100-1000

*Valeurs de référence

Métaux : Fond pédogéochimique naturel déterminé sur la Métropole Aix-Marseille-Provence (Austruy et al., 2016)

HAP : Teneurs naturelles mesurées dans les sols français (INERIS, 2005)

A noter que les concentrations en benzo(a)pyrène (BaP), classé comme probable cancérogène (catégorie 2) par l'Union Européenne (Official Journal of the European Communities, 2004), sont toujours supérieures aux concentrations ubiquitaires relevées dans les sols français qui sont de l'ordre de 2 µg/kg (INERIS, 2005). En effet, les concentrations en BaP relevées sur les différents sols échantillonnés varient de 12,4 µg/kg dans CRO-C à 727,0 µg/kg dans MED. Pour comparaison, les

niveaux relevés en BaP dans les sols du réseau RMQS dans le nord de la France (région Normandie et Hauts de France), présentant un contexte industriel et urbain similaire au sud de la France, ne dépassent pas les 250 µg/kg (Gissol, 2008).

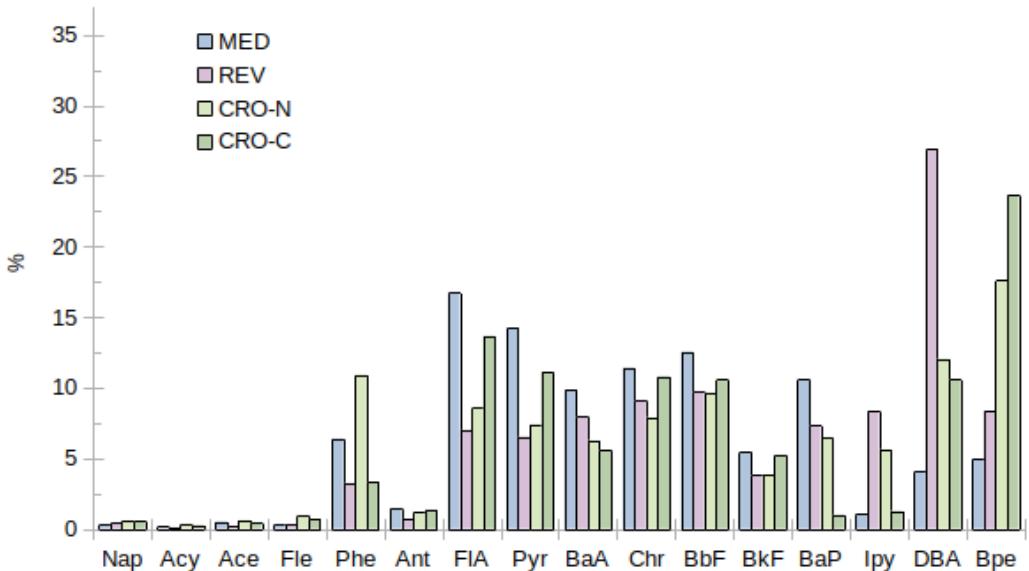


Figure 6 : Profil des congénères HAPs relevés dans les différents sols de culture

Comme observé dans la Figure 6, l'ensemble des congénères HAPs est relevé sur tous les sols. Dans le détail, le profil des congénères HAPs dans les 4 sols montre une forte contribution des HAPs intermédiaires et lourds, comportant plus de 4 cycles, témoignant d'une pollution historique et confirmant les résultats des études précédentes (Austruy et Reuillard, 2021 ; Reuillard et Austruy, 2022 et 2024). En effet, les processus de vieillissement tels que la lixiviation (solubilisation), l'évaporation, la volatilisation et la biodégradation peuvent modifier la distribution des HAP dans le sol (Wilcke, 2000) avec notamment des HAPs de faible poids moléculaire plus volatils et plus sensibles à la dégradation microbienne. Ainsi, les HAPs majoritairement rencontrés sur l'ensemble des sols sont le fluoranthène (FIA), le pyrène (Pyr), le benzo(a)anthracène (BaA) et le chrysène (Chr), HAPs intermédiaires à 4 cycles, le benzo(b)fluoranthène (BbF), le benzo(a)pyrène (BaP) et le dibenzo(a,h)anthracène (DBA), HAPs lourds à 5 ou 6 cycles. Ils sont tous considérés comme des HAPs pyrolytiques (Vane et al., 2014). Quelques spécificités sont observées entre les différents sites. D'une part, sur le site REV, une surreprésentation du DBA, HAP lourd à 5 cycles, est relevée avec des teneurs atteignant 1520,9 µg/kg représentant plus de 25 % des concentrations en HAP totaux sur ce site. Faiblement volatil et peu mobile, ce congénère est produit lors de combustion incomplète de matières organiques ou de combustibles fossiles, telle que l'industrie sidérurgique

et métallurgique, le trafic routier ou à l'échelle locale la cuisson d'aliment et la consommation de cigarette ou de cannabis (California OEHHA, 2024).

D'autre part, la réduction observée sur les teneurs totales en HAPs entre le sol CRO sans (CRO-N) et avec amendements (CRO-C) ne se concentre que sur certains congénères, tels que Phe, BaA, BaP, Ipy et DBA, conséquence de la capacité de dégradation des végétaux accentuée par un effet dilution du fait de l'apport d'amendements organiques.

Les teneurs en métaux relevées dans les différents sols sont présentées dans le Tableau 5. Certains métaux présentent des concentrations dans les sols de surface supérieures aux teneurs naturelles relevées sur le territoire (Austruy et al., 2016) et appelées Fond pédogéochimique naturel (FPGN). C'est le cas du Pb, Cr et Zn et dans une moindre mesure du Cd et Cu. A travers ces mesures des pollutions diffuses de surface significatives sont ainsi caractérisées, avec des FE supérieurs à 2 synonymes d'apports anthropiques de surface significatifs, pour le sol MED en Pb et Zn et pour le sol CRO-N pour Cr. Les niveaux légèrement supérieurs au FPGN du Cu dans le sol MED et du Cd, Zn et Pb dans le sol REV ne permettent pas d'établir une pollution diffuse, les FE calculés étant inférieurs à 2.

Concernant le sol CRO-C, un effet dilution est observé pour Cr par rapport à CRO-N permettant de réduire les niveaux relativement importants relevés pour cet élément dans CRO-N. La capacité de bioaccumulation de la végétation herbacée pour Cr pourrait aussi être étudiée et expliquée en partie la réduction des teneurs pour cet élément. Pour les autres métaux, les teneurs sont similaires voire légèrement supérieures pour As et Ni. Malgré l'absence d'effets sur les teneurs totales en métaux dans le sol, l'apport d'amendements organiques a pu modifier la spéciation et la distribution des métaux dans les différentes phases du sol et réduire leur disponibilité par adsorption sur les matières organiques apportées (Austruy, 2012).

III.4. Bioaccumulation des métaux et HAPs dans les végétaux

La Figure 7 présente les teneurs en métaux et HAPs relevées dans les feuilles d'oliviers cultivés dans les différents sites. Pour les métaux, à noter la non détection du Cd, Hg et As dans l'ensemble des oliviers cultivés sur les différents sites. Éléments peu concentrés naturellement dans l'environnement, les concentrations mesurées dans le sol, proches des niveaux de fonds pour ces éléments n'ont pas entraîné de bioaccumulation significative de ces métaux dans les végétaux. Les teneurs les plus importantes sont relevées pour les composés classés oligoéléments (Cu et Zn), dont les traitements apportés aux oliviers (argile blanche) ont pu faciliter leur accumulation dans les feuilles. Excepté pour Ni, les teneurs les plus faibles pour les éléments toxiques (Cr, Pb) sont

mesurées dans les oliviers cultivés sur le sol CRO. Il en est de même pour les HAPs, dont les teneurs les plus faibles concernent les oliviers cultivés sur le sol CRO. Au delà de l'effet dilution enregistré pour certains composés, les apports organiques, facilitant l'adsorption des polluants organiques et métalliques et réduisant leur disponibilité pour les plantes (Austruy et al., 2013, 2021 ; Ukalska-Jaruga et Smreczak, 2020) et la revégétalisation du site CRO avec des espèces herbacées au pied des arbres, espèces métallophytes accumulatrices (Raklami et al., 2019), semblent avoir limités le transfert d'éléments non-essentiels (HAP, Cr, Pb) et facilités l'absorption des oligoéléments Cu et Zn.

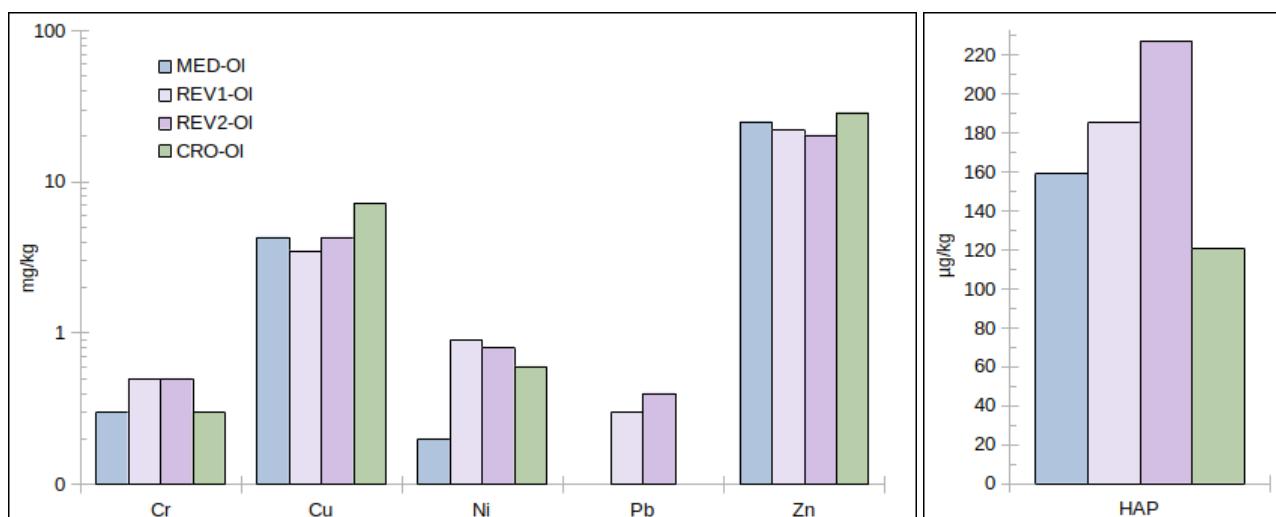


Figure 7 : Teneurs en métaux (à gauche) et HAPs totaux (à droite) dans les feuilles d'oliviers cultivés dans les différents sites (échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées sur le graphique des métaux)

Sur le sol REV, les oliviers présentent les plus fortes concentrations de HAPs, Cr, Ni et Pb, considérés comme des éléments non essentiels pour la plante. Le pH plus acide peut faciliter la mobilité des composés métalliques et justifier les plus fortes teneurs relevées dans les oliviers sur ce site (Austruy et al., 2013, 2021). Pour les HAPs, le pH plus faible de ce sol peut limiter la présence d'acides humiques, principaux composant de la matière organique, facilitant l'adsorption des HAPs (Gabet, 2004), et ainsi justifier une disponibilité plus importante des HAP dans le sol REV et donc un plus fort transfert vers les oliviers par rapport à MED.

De manière générale, les teneurs en métaux observées dans les feuilles des oliviers cultivés sur les différents sites sont comparables voire inférieures à celles mesurées dans des feuilles d'oliviers provenant d'une ancienne zone industrielle du sud-ouest de l'Espagne (Madejon et al., 2006).

A noter, l'absence de Pb dans les oliviers cultivés sur le site MED, malgré les teneurs en Pb relativement élevées dans le sol. Cet élément est peu mobile dans le sol (Baize, 2010 ; Kotoky et al., 2015 ; Austruy et al., 2021), dans de nombreux cas il est donc peu disponible pour les plantes et faiblement absorbé.

Les teneurs en HAPs et métaux dans les feuilles des différents fruitiers cultivés sur le site CRO sont présentées dans la Figure 8. Alors que les expositions (air et sols) peuvent être considérées comme identiques pour l'ensemble des espèces cultivées sur ce site, des différences dans la bioaccumulation des composés ciblés sont observées.

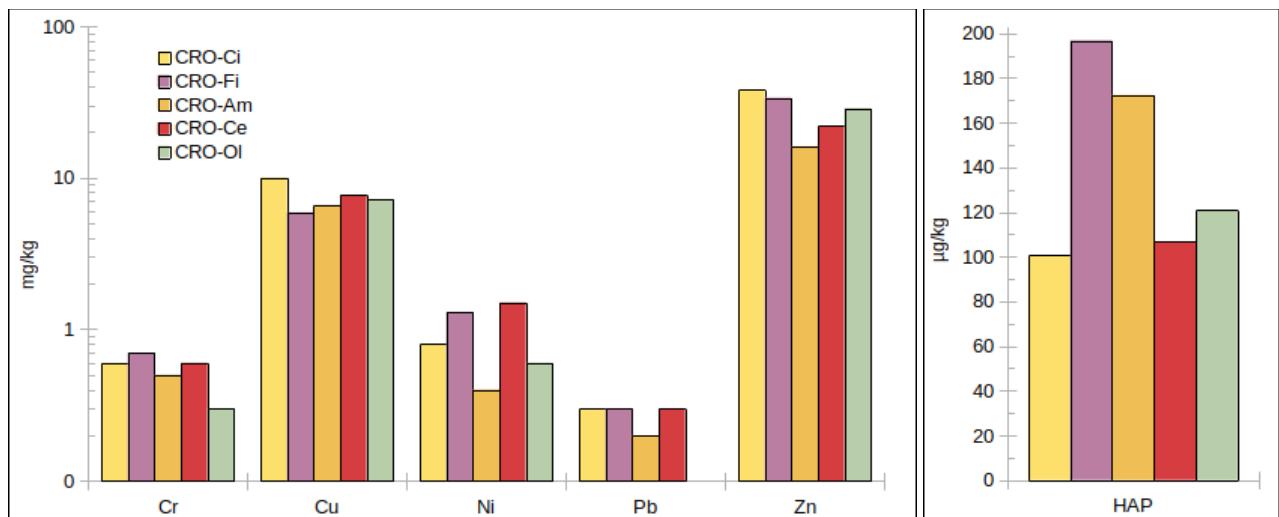


Figure 8 : Teneurs en métaux (à gauche) et HAPs totaux (à droite) dans les feuilles des différentes essences cultivées (échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées sur le graphique des métaux)

Les niveaux de HAPs dans les feuilles varient de 100,6 µg/kg pour le citronnier à 196,9 µg/kg pour le figuier, des teneurs cohérentes avec les niveaux enregistrés dans les végétaux dans différentes études menées en zones urbaines et industrielles en Europe et dans le monde (Samsøe-Petersen et al., 2002 ; Wang et al., 2008 ; Kacálková et Tlustoš, 2011 ; De Nicola et al., 2015 ; Paris et al., 2018). Dans le détail, le profil des congénères HAPs bioaccumulés dans les feuilles (Figure 9) montre la dominance de HAPs de faibles poids moléculaires, notamment Nap et Phe, et l'absence pour certaines espèces (citronniers, figuiers et oliviers) d'HAPs lourds à 6 cycles dans les feuilles malgré leur prédominance dans le sol. Ce résultat met en évidence la faible capacité de transfert via le système racinaire des HAPs intermédiaires et lourds du fait de leur taille et de leur poids moléculaire plus importants (Paris et al., 2018 ; Cao et al., 2024 ; Papludis et al., 2025). Ceci est confirmé par des facteurs de bioaccumulation inférieurs à 1 (concentration plus importante dans le

sol par rapport à la plante) pour tous les congénères intermédiaires et lourds quelle que soit l'espèce considérée excepté pour BaP dans les oliviers et figuiers du site CRO (Annexe 3). A l'inverse, les facteurs de bioaccumulation sont supérieurs à 1 (concentration plus importante dans la plante que dans le sol) pour plusieurs HAPs légers, pour Nap et Ace pour toutes les espèces cultivées sur le site CRO, pour Ace et Fle pour les amandiers, Ace et Phe pour les figuiers et Fle pour les citronniers.

Les teneurs en métaux dans les feuilles des différents fruitiers cultivés sur le site CRO (Figure 8) sont plus homogènes que les HAPs même si certaines différences et tendances sont aussi observées. Comme précédemment pour les oliviers, les deux éléments les plus bioaccumulés sont Cu et Zn pour l'ensemble des espèces (Annexe 3). Les citronniers présentent la meilleure capacité de bioaccumulation pour ces oligoéléments. A l'inverse, comme pour les HAPs, le figuier présente les plus fortes capacités de transfert pour les métaux non essentiels (Cr, Ni, Pb), mettant en évidence son caractère métallophyte (Papludis et al., 2025). Cependant, les teneurs relevées dans les figuiers sont proches de celles enregistrées dans la littérature pour des sites urbains ou industriels (Nawab et al., 2016, Ugulu et al., 2016).

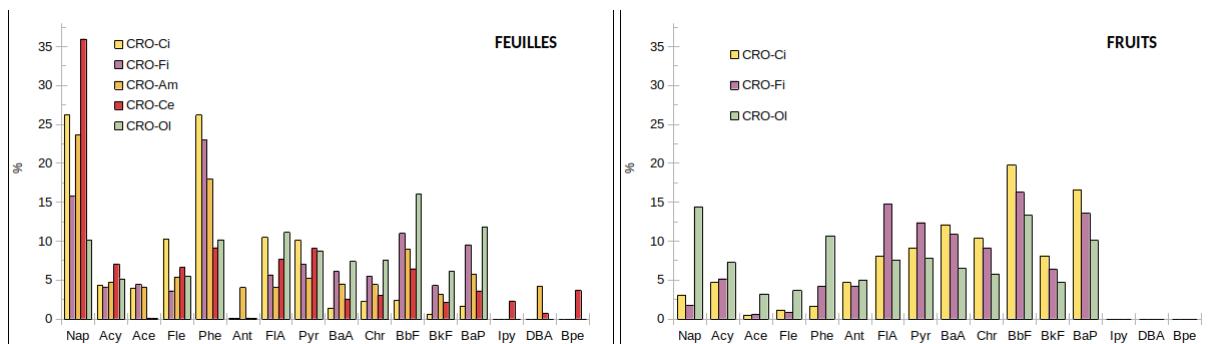


Figure 9 : Profil des congénères HAPs relevés dans les feuilles (à gauche) et les fruits (à droite) des différentes essences cultivées sur CRO

Le transfert des contaminants métaux et HAPs des feuilles vers les fruits est caractérisé par le calcul des facteurs de translocations (FT, Figure 10). Un FT supérieur à 1 signifie que les concentrations relevées dans les fruits sont supérieures à celles mesurées dans les feuilles.

Sur CRO, c'est le cas des HAPs pour l'ensemble des essences cultivées ayant produit des fruits. Au regard des congénères HAPs relevés dans les fruits en comparaison aux feuilles (Figure 9), il est constaté une plus forte proportion de HAPs intermédiaires et lourds dans les fruits, suggérant une

absorption par dépôt atmosphérique à la surface des fruits (Jia et al., 2021 ; Jiris et al., 2022 ; Jiang et al., 2025). C'est notamment le cas de BaA, Chr, BbF, BkF et BaP.

Pour les métaux, seul Cu pour l'ensemble des espèces excepté le citronnier et Ni pour le figuier présente un FT supérieur à 1 entre la feuille et le fruit, capacité de translocation pouvant être accentuée par les apports atmosphériques. Les figuiers présentent, comme pour les HAP, les FT les plus élevés pour l'ensemble des métaux excepté Cu, confirmant son caractère métallophyte (Papludis et al., 2025). Les teneurs relevées dans les fruits pour la majorité des métaux sont comprises dans les gammes de valeurs recensées au niveau national (BDD BAPPET, 2025) exceptées pour Zn et Cu pour lesquelles des teneurs plus élevées sont observées dans les fruits. A noter, l'absence d'accumulation de Pb dans les fruits et du Cr, excepté dans le figuier, sur le site CRO.

Enfin, alors qu'une plus faible translocation est observée entre les feuilles et les fruits pour les métaux dans les oliviers cultivés sur CRO par rapport aux deux autres sites, l'inverse est constaté pour les HAP avec un FT plus élevé pour les oliviers cultivés sur CRO. Cette observation peut être la conséquence de l'exposition atmosphérique et de l'environnement des différents sites qui peuvent justifier d'un dépôt et d'une absorption plus importants de certains contaminants à la surface des fruits en fonction du contexte (bord de route, résidence ou quartier résidentiel) (Austruy et al., 2021 ; Jia et al., 2021).

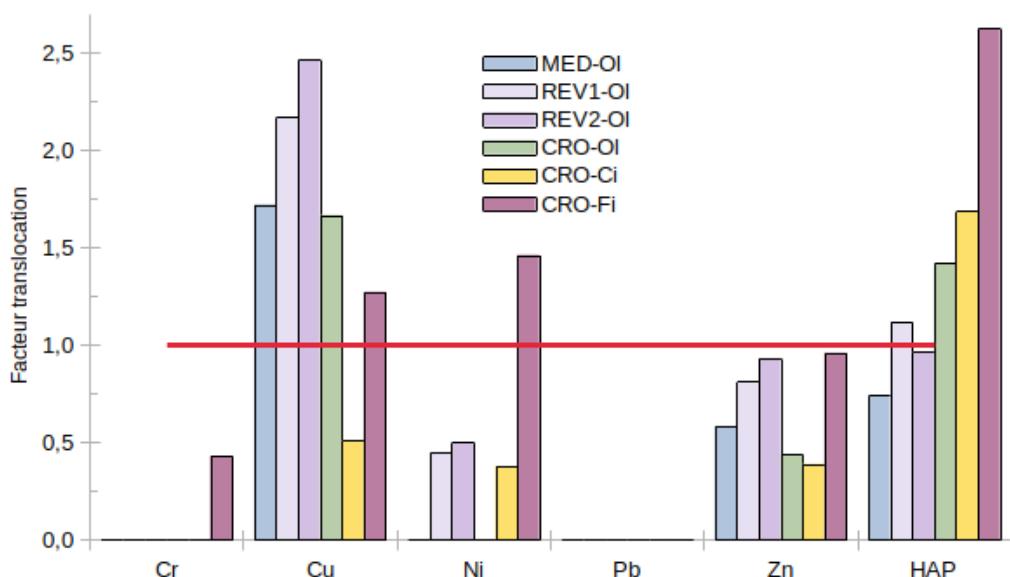


Figure 10 : Facteur de translocation (FT) des métaux et HAPs des feuilles vers les fruits calculés pour les différentes espèces ayant produits des fruits (oliviers sur les 3 sites et citronniers et figuiers sur CRO)

III.5. Evaluation des risques sanitaires en lien avec la consommation des fruits

Les doses journalières d'exposition (DJE) pour l'ingestion des fruits frais produits ont été calculées pour un enfant et sont présentées dans le Tableau 6.

Pour le calcul de ces DJE, la quantité de fruits frais consommée a été estimée à 100 g par jour pour chaque fruit (AFSSA, 2009) pour un enfant présentant un poids moyen de 35 kg. Les DJE sont comparées aux doses journalières admissibles (DJA) définies par l'ANSES et mises à jour en 2024 (ANSES, 2017). Le rapport DJE/DJA permet de calculer un quotient de danger (QD = DJE/DJA) pour chaque élément à partir duquel peut être déduit la quantité maximale de fruits pouvant être consommée sans risque pour la santé en déterminant les composés limitant pour chaque fruit.

Tableau 6 : Doses journalières d'exposition (DJE) calculées pour la consommation de 100 g de fruits frais produits sur chaque site et doses journalières admissibles (DJA) définies pour chaque composé étudié exprimées en $\mu\text{g}/\text{kgPC}/\text{j}$.

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Nap	Ace	Fle	Phe	Ant	FIA	Pyr	Chr	BbF	BkF	BaP
Med-OI	0,00	5,53	0,00	0,00	10,84	3,4 10^{-2}	2,0 10^{-3}	7,4 10^{-3}	1,6 10^{-2}	2,4 10^{-3}	6,4 10^{-3}	7,2 10^{-3}	1,8 10^{-3}	2,4 10^{-3}	1,0 10^{-2}	2,2 10^{-3}
REV-OI	0,00	6,84	0,34	0,00	15,15	4,6 10^{-2}	2,6 10^{-3}	9,2 10^{-3}	2,4 10^{-2}	7,4 10^{-3}	1,2 10^{-2}	1,3 10^{-2}	1,0 10^{-2}	2,2 10^{-2}	7,6 10^{-3}	1,5 10^{-2}
CRO-OI	0,00	8,03	0,00	0,00	8,36	1,6 10^{-2}	3,6 10^{-3}	4,2 10^{-3}	1,2 10^{-2}	5,8 10^{-3}	8,6 10^{-3}	9,0 10^{-3}	6,6 10^{-3}	1,5 10^{-2}	5,4 10^{-3}	1,2 10^{-2}
CRO-Ci	0,00	2,09	0,19	0,00	6,02	1,6 10^{-3}	2,0 10^{-4}	6,0 10^{-4}	8,0 10^{-4}	2,4 10^{-3}	4,4 10^{-3}	5,0 10^{-3}	5,6 10^{-3}	1,1 10^{-2}	4,4 10^{-3}	9,0 10^{-3}
CRO-Fi	0,13	3,17	0,80	0,00	13,62	3,6 10^{-3}	1,2 10^{-3}	1,8 10^{-3}	9,2 10^{-3}	9,0 10^{-3}	3,2 10^{-2}	2,8 10^{-2}	2,0 10^{-2}	3,6 10^{-2}	1,4 10^{-2}	3,0 10^{-2}
DJA	300	140	2,80	3,50	300	40	60	40	40	40	40	30	50	5	5	0,3

Quel que soit l'élément et le fruit considéré, aucune DJE dépasse la DJA pour la consommation de 100 g de fruit frais par jour. A fortiori, considérant que les fruits représentent 12 % de notre alimentation quotidienne (AFSSA, 2009) et considérant la quantité d'ingestion de 100 g de fruit frais par jour, aucune DJE calculée pour les différents contaminants n'atteint les 12 % de la DJA excepté pour Ni pour les figues du site CRO et les olives du site REV. Ainsi, excepté pour Ni sur certains fruits et parcelles, aucun apport excessif pour ces contaminants est caractérisé au regard de la part de fruit dans l'alimentation humaine.

A partir des DJA, représentatives de la toxicité de chaque élément, et des DJE calculées, Ni est l'élément limitant pour l'ensemble des fruits étudiés, le QD pour cet élément présentant les plus fortes valeurs. Ces résultats permettent de recalculer les quantités de chaque fruit pris séparément

qui peuvent être ingérées par jour sans risque pour la santé en considérant aucune autre source d'apport de contaminant :

- Olives : 800 g en masse fraîche ;
- Citrons : 1500 g en masse fraîche ;
- Figues : 300 g en masse fraîche.

La figue, qui présente la plus forte capacité de bioaccumulation pour de nombreux contaminants étudiés, présente les plus faibles quantités pouvant être ingérées sans risque pour la santé.

Ces résultats mettent ainsi en évidence un faible risque sanitaire en cas d'ingestion de fruits produits sur les balises nourricières du projet Ponts-Ver(t)s.

III.6. Retour sur les actions de médiations.

A différents temps du projet, des ateliers de sensibilisation scientifique sur la pollution des sols et plus généralement de l'environnement ont été organisés avec les équipes du Citron Jaune et de l'IECP.

Ces ateliers ont notamment été axés sur des formations autour de l'observation de l'environnement, des techniques culturales, des méthodes de prélèvement et d'analyse d'échantillons de sol et végétaux, des notions de bioaccumulation et enfin autour des solutions pour limiter l'exposition des populations et l'adaptation des cultures dans un environnement dégradé de zone urbaine.

Ces moments d'échanges ont aussi été l'occasion d'ouvrir le réseau de l'Observatoire Citoyen de l'Environnement (VOCE) aux habitants de Port-Saint-Louis-du-Rhône. Ainsi, deux sessions de formations au protocole VOCE lichen (Annexe 2) ont été organisées au mois de novembre 2023 dans les locaux de l'IECP à Fos-sur-Mer et en juin 2025 au Citron Jaune à Port-Saint-Louis-du-Rhône. Un total de 18 personnes ont pu découvrir le protocole de science participative sur la bioindication lichénique de la qualité de l'air et apprendre les méthodes de relevés et d'identification des lichens. Au cours de ces journées un tout premier relevé de bioindication lichénique a pu être réalisé à Port-Saint-Louis-du-Rhône et servira de point de départ pour suivre l'évolution de la flore lichénique sur cette zone du territoire via les relevés réalisés par le réseau VOCE. Ce protocole permet aux participants d'adhérer et de s'impliquer dans les actions de recherche territoriale mises en place.

Un retour en image sur ces moments d'échange et de transmission est proposé dans la Figure 11.



Action de médiation : fête du verger, COPIL, fête de la science



Action de médiation : formation à l'observation de l'environnement, VOCE lichen



Action de médiation : prélèvement des sols, pollution et activité biologique



Action de médiation : récolte des végétaux

Figure 11 : Retour en image sur les temps de médiation scientifique et les évènements partagés avec les riverains (© E. Habasque et IECP)

IV. Conclusion et perspectives

Ce travail, réalisé dans le cadre du projet Ponts-Ver(t)s, fait suite à plusieurs études menées par l'IECP sur l'état des sols et l'exposition atmosphérique aux HAPs de Port-Saint-Louis-du-Rhône.

Comme déjà soulevé dans les précédents travaux, une contamination diffuse en HAPs mais aussi en certains métaux (Cr, Cu, Pb et Zn) a été relevée sur plusieurs sols de culture reflétant le passé industriel de la ville. Cependant, l'apport d'amendements organiques et la revégétalisation avec une végétation herbacée (composée principalement de graminées et légumineuses) au pied des arbres sur le sol du site CRO ont permis d'améliorer la qualité agronomique des sols de culture, de dégrader les HAPs présent dans le sol et de réduire le transfert des contaminants vers les végétaux cultivés. De surcroît, cette revégétalisation limite l'envol de poussières, une des principales sources d'exposition atmosphérique en HAP sur la ville.

Les résultats ont montré que la capacité de bioaccumulation des végétaux dépendait du type d'espèces considérées, de la matrice étudiée (feuille, fruit) et des polluants considérés (métaux, HAPs). Alors qu'un faible transfert a été observé pour les HAPs lourds et intermédiaires à partir du sol, les HAPs dits légers étaient fortement bioaccumulés dans les feuilles des végétaux. L'accumulation des HAPs dans les fruits des espèces cultivées sur les différents sites (olivier, figuier, citronnier, amandier, cerisier) était préférentiellement effectuée par voie aérienne par adsorption à la surface des fruits, avec une plus grande proportion de HAPs intermédiaires dans les fruits par rapport aux feuilles. Les métaux plus mobiles dans le sol et disponibles pour les plantes montrent des capacités de transfert dépendant notamment de l'acidité du sol, avec une plus forte bioaccumulation constatée sur les oliviers du site REV. La comparaison des différentes essences cultivées sur le site CRO met en évidence une plus forte bioaccumulation des éléments non essentiels (Cr, Ni et Pb) dans le figuier, connu pour son caractère métallophyte et testé de par sa tolérance dans les procédés de phytostabilisation. A l'inverse, Cu et Zn sont préférentiellement accumulés dans les citronniers avec un stockage majoritaire dans les feuilles ($FT < 1$).

En conséquence, il n'y a pas de risque sanitaire avéré à la consommation de ces fruits et l'adaptation des cultures sur CRO (revégétalisation, amendements organiques) a permis de limiter fortement les transferts vers les végétaux consommés. Le sol reste une voie d'exposition possible, il est donc recommandé de travailler sur un sol humidifié pour réduire l'envol de poussières et de porter des équipements de protection individuelle (EPI) pour protéger les voies respiratoires et éviter le contact.

Pour finir, les temps de médiation scientifiques et de participation citoyenne autour de l'observation et de la préservation de l'environnement ont permis aux habitants de s'approprier ces notions et de s'impliquer dans la réalisation, l'entretien et la récolte de ces balises nourricières.

V. Bibliographie

AFSSA, 2009. Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 2 (INCA 2, 2006-2007). Rapport d'étude. 228 p.

ANSES, 2017. Valeurs toxicologiques de référence – mise à jour 2024.

Austruy, A., 2012. Aspects physiologiques et biochimiques de la tolérance à l'arsenic chez les plantes supérieures dans un contexte de phytostabilisation d'une friche industrielle. Thèse de l'Université Blaize Pascal, 300 p.

Austruy, A., Wanat, N., Moussard, C., Vernay, P., Joussein, E., Ledoigt, G., Hitmi, A., 2013. Physiological impacts of soil pollution and arsenic uptake in three plant species : *Agrostis capillaris*, *Solanum nigrum* and *Vicia faba*. *Ecotox. Environ. Safe.*, 90, pp. 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.008>

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](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03532602v1)

Austruy, A., 2018. Biodiversité lichénique – CAPM. Rapport scientifique - Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 40 p.

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. DOI: [10.1007/s11356-021-14604-z](https://doi.org/10.1007/s11356-021-14604-z)

Austruy, A., Reuillard, M., 2021. HAPs atmosphériques à Port-Saint-Louis-du-Rhône : suivi intégré et sources. Rapport scientifique - Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 70 p.

Baize, D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Editions Quae, 408 p.

Barbaste, M., 2004. Analyse des teneurs en métaux dans les végétaux - Pratiques de laboratoire d'analyses. USRAVE, Bordeaux, 2 p.

Bahn, M., Rodeghiero, M., Anderson-Dunn, M., Dore, S., Gimeno, C., Drösler, M., Williams, M., Ammann, C., Berninger, F., Flechard, C., Jones, S., Balzarolo, M., Kumar, S., Newesely, C., Priwitzer, T., Raschi, A., Siegwolf, Ruoto, S., Tenhunen, J., Wohlfahrt, G., Cernusca, A., 2008. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply. *Ecosystems*, 11(8), 1352-1367. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9198-0>

Baize, D., 2010. Teneurs totales en plomb en fonction de la profondeur dans les sols « naturels ». *ArchéoSciences*, 34. URL : <http://archeosciences.revues.org/2709>

Bérard, A., Capowiez, L., Mombo, S., Schreck, E., Dumat, C., Deola, F., & Capowiez, Y. (2016). Soil microbial respiration and PICT responses to an industrial and historic lead pollution: a field study. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 4271-4281. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5089-z>

Bliefert, C., Perraud, R., 2001. Chimie de l'environnement air, eau, sols, déchets 2e éd. De Boeck Ed., Louvain-La-Neuve, Belgique, 477 p.

Brignon, J.M., Soleille, S., 2006. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France: HAP. Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).

California OEHHA. "Dibenz[a,j]anthracene". oehha.ca.gov. Retrieved 2024-02-01.

Cao, C., Wu, Y.Y., Lv, Z.Y., Wang, J.W., Wang, C.W., Zhang, H., Wang, J.J., Chen, H., 2024. Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from PAH-contaminated soils to carrots and Chinese cabbages under the greenhouse and field conditions. *Chemosphere*, 360, 142405. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142405>

De Nicola, F., Baldantoni, D., Sessa, L., Monaci, F., Bargagli, R., Alfani, A., 2015. Distribution of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in holm oak plant-soil system evaluated along urbanization gradients. *Chemosphere*, 134, 91-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.069>

Denys, S., Douay, F., Roussel, H., Dumat, C., Pourrut, B., Marot, F., Deportes, I., Vumont, V., Pinet, C., 2012. Base de données sur les teneurs en éléments traces métalliques de plantes potagères (BAPPET). Projet Plant-Eval.

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.

<https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.03.045>

Dung, T.T.T., Cappuyns, V., Swennen, R., Phung, N.K., 2013. From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. Rev. Environ. Sci. Biotechnol., 12, p. 335-353. DOI: [10.1007/s11157-013-9315-1](https://doi.org/10.1007/s11157-013-9315-1)

Eva, L. G., 2000. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans l'air ambiant (HAP). INERIS - Direction des Risques Chroniques.

Gabet, S., 2004. Remobilisation d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l'aide d'un tensioactif d'origine biologique. Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, 186 p.

Gis Sol, RMQS, 2008 ; Anses, programme POP-RMQS, 2009 ; IGN, Geofla®, 2008

Granier, A., Ceschia, E., Damesin, C., Dufrêne, E., Epron, D., Gross, P., ... & Saugier, B., 2000. The carbon balance of a young Beech forest. Functional ecology, 14(3), 312-325. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00434.x>

Guerrini, X., 2016. Mesure de la respiration des sols comme bioindicateur de la qualité des sols. Rapport scientifique – Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions., 43 p.

Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., Andrews, J.A., 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. Biogeochemistry, 48, 115-146. <https://doi.org/10.1023/A:1006244819642>

INERIS, 2005. Hydrocarbures aromatiques polycycliques – Guide méthodologique. Rapport d'étude N)66244 – DESP – R01, 99 p.

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>

Jia, J., Bi, C., Jin, X., Zeng, Y., Deng, L., Wang, X., Chen, Z., 2021. Uptake, translocation, and risk assessment of PAHs in contaminated soil-air-vegetable systems based on a field simulation experiment. Environmental Pollution, 271, 116361. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116361>.

Jiang, Q.X., Wang, Z.X., Zhou, X., Cao, Q.F., Hu, S.Q., Luo, J.N., Deng, W.W., Li, H., 2025. Dynamic distribution and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in *Pueraria lobata* during growth based on field experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 291, 117850, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117850>

Jiries, A., Al-Nasir, F., Hijazin, T.J., Al-Alawi, M., El Fels, L., Mayyas, A., Al-Dmour, R., Al-Madanat, O.Y., 2022. Polycyclic aromatic hydrocarbons in citrus fruit irrigated with fresh water under arid conditions: Concentrations, sources, and risk assessment. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(9), 104027. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104027>

Kabata-Pendias, A., 2001. *Trace Elements in Soils and Plant*, CRC Press, Boca Raton.

Kacalkova, L., Pavel, T., 2011. The uptake of persistent organic pollutants by plants. *Cent. Eur. J. Biol.*, 6(2), 223-235. DOI: [10.2478/s11535-010-0116-z](https://doi.org/10.2478/s11535-010-0116-z)

Kotoky, P., Bora, B.J., Baruah, N.K., Baruah, J., Baruah, P., Borah, G.C., 2003. Chemical fractionation of heavy metals in soils around oil installations, Assam. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 15(4), 115-126. <https://doi.org/10.3184/095422903782775181>

Krauss, M., Wilcke, W., Martius, C., Bandeira, A. G., Garcia, M. V., Amelung, W., 2005. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment. *Environmental Pollution*, 135(1), 143-154. DOI: [10.1016/j.envpol.2004.09.012](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.09.012)

Madejon, P., Maranon, T., Murillo, J.M., 2006. Biomonitoring of trace elements in the leaves and fruits of wild olive and holm oak trees. *Science of the Total Environment*, 355, 187 - 203. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2005.02.028](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.028)

Nawab, J., Li, G., Khan, S., Sher, H., Aamir, M., Shamshad, I., Khan, A., Khan, M.A., 2016. Health risk assessment from contaminated foodstuffs: a field study in chromite mining-affected areas northern Pakistan. *Environment Science and Pollution Research*. DOI: [10.1007/s11356-016-6379-9](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6379-9)

Papludis, A.D., Alagić, S.Č., Milić, S.M., Nikolić, J.S., Jevtović, S.Č., Stankov Jovanović, V.P., Stojanović, G.S., 2025. Chemometric Evaluation of 16 Priority PAHs in Soil and Roots of *Syringa vulgaris* and *Ficus carica* from the Bor Region (Serbia): An Insight into the Natural Plant Potential for Soil Phytomonitoring and Phytoremediation. *Environments*, 12, 256. <https://doi.org/10.3390/environments12080256>

Paris, A., Ledauphin, J., Poinot, P., Gaillard, J.L., 2018. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fruits and vegetables: Origin, analysis, and occurrence. *Environmental Pollution*, 234, 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.028>

Raklami, A., Oufdou, K., Tahiri, A.I., Mateos-Naranjo, E., Navarro-Torre, S., Rodríguez-Llorente, I.D., Meddich, A., Redondo-Gómez, S., Pajuelo, E., 2019. Safe cultivation of *Medicago sativa* in metal-polluted soils from semi-Arid regions assisted by heat- and metallo-Resistant PGPR. *Microorganisms*, 7(7), 212. DOI: [10.3390/microorganisms7070212](https://doi.org/10.3390/microorganisms7070212)

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. DOI: [10.1007/s11356-017-1173-x](https://doi.org/10.1007/s11356-017-1173-x)

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>

Reuillard, M., Austruy, A., 2022. Cartographie et revégétalisation de sols contaminés aux HAPs : CARE Phase I. Rapport scientifique - Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 23 p.

Reuillard, M., Austruy, A., 2024. Cartographie et revégétalisation de sols contaminés aux HAP : CARE Phase II. Rapport scientifique - Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 49 p.

Rollin, C., Quiot, F., Denys, S., 2005. Hydrocarbures aromatiques polycycliques – Acquisition des données d'entrée des modèles analytiques ou numériques de transfert dans les sols et les eaux souterraines : Guide méthodologique, INERIS, DRC – 66244 – DESP – R01, 99 p.

Samsoe-Petersen, L., Larsen, E.H., Larsen, P.B., Bruun, P., 2002. Uptake of trace elements and PAHs by fruit and vegetables from contaminated soils. *Environment Science Technology*, 36, 3057-3063. DOI: [10.1021/es015691t](https://doi.org/10.1021/es015691t)

Schlesinger, W.H., & Andrews, J.A., 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7-20. <https://doi.org/10.1023/A:1006247623877>

Schwartz, C., 2009. Sols urbains et péri-urbains. In *Le Sol*, Editions Quae, Paris. p. 142-145. ISBN 978-2-7592-0301-7.

Schwartz, C., 2012. Jardins associatifs urbains et ville durable (Projet JASSUR). Présentation du projet réalisé pour le compte de l'ANR.

Sterckeman, T., Villanneau, E., Bourennane, H., Douay, F., Ciesielski, H., King, D., Baize D., 2012. Les éléments en traces dans les sols agricoles du Nord-Pas de Calais. II. Cartographie des enrichissements dans les horizons de surface. *Étude et Gestion des Sols*, 19, 3-4, p. 163-178. [hal-01000031v1](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01000031v1)

Tessier, E., 2012. Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la Rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité. Thèse de l'Université du Sud Toulon-Var. 291 p.

Tremel-Schaub, A., Feix, I., 2005. Contaminations des sols - Transfert des sols vers la plantes. EDP Sciences, ADEME Ed., Angers, 413 p.

Ugulu, I., Unver, M., Dogan, Y., 2016. Determination and comparison of heavy metal accumulation level of *Ficus carica* bark and leaf samples in Artvin, Turkey. *Oxidation Communication*, 39(1), 765-775.

Ukalska-Jaruga, A., Smreczak, B., 2020. The impact of organic matter on Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) availability and persistence in soils. *Molecules*, 25(11), 2470. DOI: [10.3390/molecules25112470](https://doi.org/10.3390/molecules25112470)

Vane, C.H., Kim, A.W., Beriro, D.J., Cave, M.R., Knights, K., Moss-Hayes, V., Nathanail, P.C., 2014. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and polychlorinated biphenyls (PCB) in urban soils of Greater London, UK. *App. Geochem.*, 51, 303-314.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.013>

Wang, Y.B., Liu, C.W., Kao, Y.H., Jang, C.S., 2015. Characterization and risk assessment of PAH-contaminated river sediment by using advanced multivariate methods. *Sc. Tot. Environ.*, 524, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.019>

Wang, Y.Q., Tao, S., Jiao, X.C., Coveney, R.M., Wu, S.P., Xing, B.S., 2008. Polycyclic aromatic hydrocarbons in leaf cuticles and inner tissues of six species of trees in urban Beijing. *Environmental Pollution*, 151, 158-164. DOI: [10.1016/j.envpol.2007.02.005](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.02.005)

Wilcke, W., 2000. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil – a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 163, p. 229-248. DOI: [10.1002/1522-2624\(200006\)163:3<229::AID-JPLN229>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200006)163:3<229::AID-JPLN229>3.0.CO;2-6)

VI. Annexes

Annexe 1 : Préparation de la parcelle CRO-C et traitement des cultures.....	42
Annexe 2 : Protocole Citoyen VOCE lichens.....	45
Annexe 3 : Concentrations dans les sols, les feuilles et les fruits en métaux et HAPs et facteurs de bioaccumulation (FB) entre le sol et les feuilles pour chaque espèce et chaque site.....	47

Annexe 1 : Préparation de la parcelle CRO-C et traitements des cultures

Balises nourricières de Croizat (CRO)

Décembre 2022 - Travail du sol et plantations

- Décompactage du sol au tracteur avec une herse rotative - Profondeur de 20 cm
- Amendement de fumier de cheval, 750 kg sur toute la surface
- Semis d'engrais vert, environ 10kg/hectare de chaque espèce (phalécie, luzerne, trèfle blanc, trèfle incarnat)
- Préparation des fosses de plantations, 40 cm de diamètre, 40 à 50 cm de profondeur jusqu'à percer la semelle d'argile
- Mélange (dans les fosses de plantation) de fumier (1/2), et de sol naturel (1/2)
- Plantation des fruitiers (amandiers, citronniers, cerisiers, figuiers)
- Paillage de BRF (environ 5 cm d'épaisseur) sur tous les arbres et modelage de la cuvette

Mars 2023 – Plantations boutures d'oliviers

- Plantation en pleine terre de boutures d'oliviers avec apport de terre végétale et de BRF

Mai 2023 - Butte maraîchère

- Mise en place d'une butte maraîchère à partir de BRF et de terre végétale
- Plantation de semis de concombre et de tomate sur la butte

Février 2024 – Installation mini serre et semis d'engrais verts

- Décompactage du sol à la pioche
- Apport de fumier de cheval et vache (ferme du tadorne) environ 1,5 m³
- Semis d'engrais vert, environ 8 kg/Ha par espèce (phacélie, luzerne, ray-grass italien, fétuque élevée, trèfle violet)
- Déplacement de la butte maraîchère dans les mini serres
- Semis de fleurs épars au verger et dans les mini serres

Juin 2024 – Entretien de la parcelle

- Faible apport de BRF et de laine de mouton en paillage autour des arbres
- Fauche à la débroussailleuse des engrais verts

- Application au pulvérisateur dorsal d'environ 5 litres de bouillie d'argile Kaolinite (environ 100g/L) sur les 2 oliviers matures présents.

Septembre 2024 – Aménagement et entretien

- Création des cheminements en BRF (selon schéma de plantations page 5)
- Apport en BRF autour des arbres.
- Application au pulvérisateur dorsal d'environ 5 litres de bouillie d'argile Kaolinite (environ 100g/L) sur les 2 oliviers matures présents.

Février 2025 – Nouvelles plantations

- Préparation des fosses de plantations, 40 cm de diamètre, 40 à 50 cm de profondeur jusqu'à percer la semelle d'argile
- Plantations de 6 nouveaux oliviers, d'une haie brise vent formé par 3 cyprès, d'un grenadier, d'un poirier et d'un figuier, ainsi que de végétaux de massif (Ciste, Teucrium, etc.)
- Installation de la cabane à outil / récupérateur d'eau de pluie
- Plantation d'un jasmin et d'une vigne aux abords de la cabane
- Transplantation d'un olivier récupérer chez Michel, enseignant au Conservatoire
- 3 m³ de BRF et 1 m³ de compost végétal utilisés pour les plantations et en paillage des nouveaux arbres (environ 5 cm d'épaisseur de BRF).
- Environ 50 g de corne et sang séché par fosse de plantation.

Mars 2025 – Semis couvert herbacée

- Semis de luzerne, environ 40kg/Ha, sur les espaces sans couvert végétal du verger

Juin 2025 – Entretien

- Paillage de tous les arbres du verger (environ 5 cm d'épaisseur une fois tassé par un arrosage) avec de la paille
- Fauche à la faux des engrains verts (surtout de la luzerne)

Balises nourricières de la Médiathèque (MED)

Juin 2023, Juin 2024, Septembre 2024, Septembre 2025 – Traitement des oliviers

- Application au pulvérisateur dorsal d'environ 5 litres de bouillie d'argile Kaolinite (environ 100g/L) sur les 2 oliviers matures présents.

Balises nourricières du Parc de la Révolution (REV)

Juin 2023, Juin 2024, Septembre 2024, Septembre 2025 – Traitement des oliviers

- Application au pulvérisateur dorsal d'environ 5 litres de bouillie d'argile Kaolinite (environ 100g/L) sur les 2 oliviers matures présents.

Annexe 2 : Protocole Citoyen VOCE lichens

Un protocole de science participative est mis en œuvre depuis 2018 par l'IECP pour le suivi de la diversité lichénique par les citoyens volontaires. Ce protocole est réalisable par les volontaires, sans faire appel au matériel scientifique utilisé habituellement pour les déterminations d'espèces (microscope, loupe binoculaire, produits chimiques, ...). La méthodologie développée fournit des résultats exploitables avec une rigueur scientifique satisfaisante [6].

La méthode consiste à mesurer la fréquence d'un nombre réduit d'espèces. Les volontaires réalisent le relevé de diversité sur les 4 faces de 5 arbres feuillus avec une grille d'observations, composée de 5 mailles de 10 x 10 cm superposées verticalement et disposée à au moins 1 m de hauteur. Ce protocole d'observations se divise en deux parties bien distinctes :



$$\begin{array}{r} 1 \text{ grille de 5 mailles par face} \\ \times \\ 4 \text{ faces par arbre} \\ \times \\ 5 \text{ arbres par station} \\ = \\ \text{Estimation de} \\ \text{l'abondance d'un groupe} \\ \text{de lichens : } x/100 \end{array}$$

- Présence ou l'absence des types de lichens (crustacés, foliacés et fruticuleux).
- Identification de quatre espèces indicatrices de lichens sélectionnées au préalable.

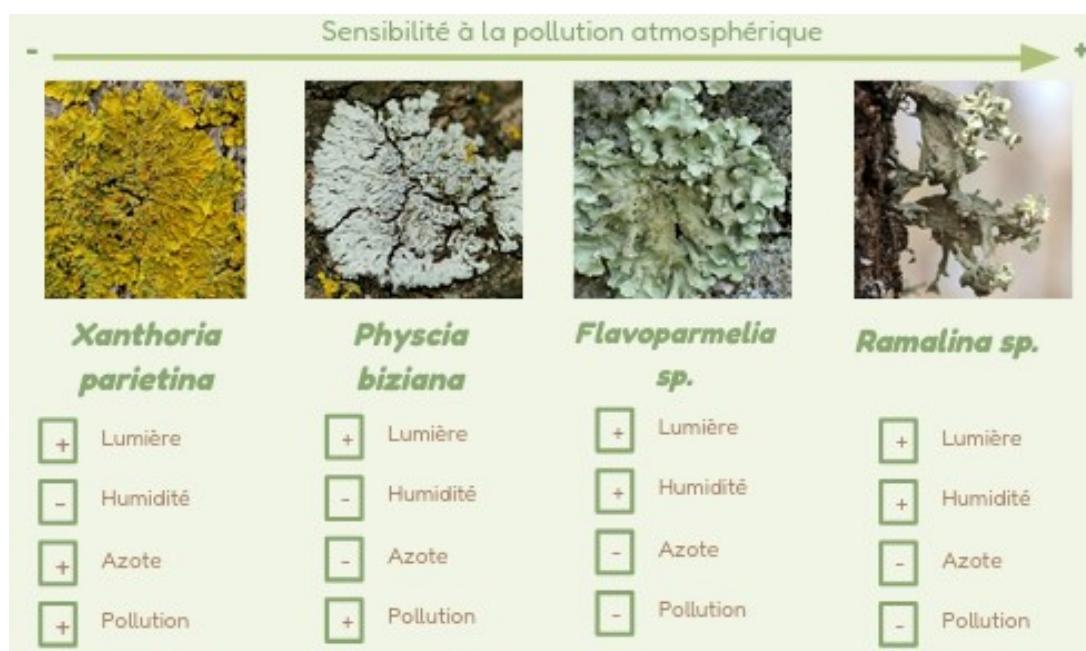
La fréquence varie de 0 (espèce absente) à 5 (espèce présente dans toutes les mailles). La fréquence de chaque espèce et type lichénique est ainsi calculée à partir du nombre de mailles (Notée « x ») où ils ont été identifiés, parmi un total de 100 mailles observées.

Les relevés lichéniques citoyens nous permettent ainsi d'observer à la fois la fréquence des différents types de lichens sur chaque station, mais également la fréquence des quatre espèces cibles ayant des sensibilités à la pollution atmosphérique bien distinctes ; les **fruticuleux** étant les plus sensibles à la pollution atmosphérique et les **crustacés** les moins sensibles.

Espèces cibles

L'IECP a engagé depuis 2018 une biosurveillerance lichénique complète sur le territoire de la MAMP. Sur les 51 sites d'études, l'IECP recense entre 8 et 30 espèces par site en fonction de leur localisation (rurale, industrielle, ...) avec une moyenne de 19 espèces par site et un total sur l'ensemble du territoire métropolitain de 63 espèces répertoriées. Dans le monde il existe environ 20 000 espèces de lichens et 3 000 en France.

L'identification de ces espèces peut donc être longue et fastidieuse et nécessite du matériel scientifique coûteux. Afin de rendre ce protocole accessible, et en complément de la reconnaissance, les 4 espèces cibles ont été sélectionnées en fonction de leur sensibilité à la pollution atmosphérique et de leur représentativité sur le territoire.



Quatre espèces sont ciblées avec une sensibilité différente à la pollution :

1. ***Xanthoria parietina*** est une espèce de lichen foliacé nitrophile, c'est à dire tolérant à une atmosphère riche en azote, considéré comme peu sensible à la pollution atmosphérique
2. ***Physcia biziana*** est un lichen foliacé peu sensible à la pollution de l'air, très présent en zone urbanisée, elle est cependant moins nitrophile que *X. parietina*
3. ***Flavoparmelia sp.*** est une espèce foliacé la plus sensible à la pollution atmosphérique.
4. ***Ramalina sp.*** un lichen de type fruticuleux considéré comme très sensible à la pollution atmosphérique.

Annexe 3 : Concentrations dans les feuilles et les fruits en métaux (mg/kg MS) et HAPs (µg/kg MS) et facteurs de bioaccumulation (FB) entre le sol et les feuilles pour chaque espèce et chaque site

	MED-OI	REV-OI	CRO-OI	CRO-Ci	CRO-Fi	CRO-Am	CRO-Ce
Teneurs dans les feuilles							
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,30	0,50	0,30	0,60	0,70	0,50	0,60
Cu	4,30	3,90	7,20	10,00	5,90	6,60	7,70
Hg	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,20	0,85	0,60	0,80	1,30	0,40	1,50
Pb	0,00	0,35	0,00	0,30	0,30	0,20	0,30
Zn	24,90	21,20	28,70	37,90	33,60	16,10	21,90
Nap	54,55	27,62	12,25	26,36	30,99	40,76	38,34
Acy	6,13	8,27	6,24	4,35	8,04	8,04	7,51
Ace	0,10	1,30	0,10	3,91	8,72	7,06	0,10
Fle	9,14	6,90	6,64	10,35	7,12	9,27	7,03
Phe	22,90	29,64	12,30	26,35	45,28	31,01	9,74
Ant	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	6,94	0,10
FIA	14,88	25,13	13,42	10,54	11,14	7,03	8,14
Pyr	11,69	20,83	10,58	10,19	13,83	8,96	9,64
BaA	5,38	12,61	8,94	1,43	11,97	7,78	2,71
Chr	6,51	13,57	9,15	2,28	10,79	7,65	3,21
BbF	10,71	22,40	19,37	2,41	21,63	15,36	6,87
BkF	3,79	7,94	7,39	0,62	8,46	5,40	2,26
BaP	4,51	15,10	14,30	1,68	18,74	9,92	3,83
Ipy	3,81	9,39	NA	NA	NA	NA	2,45
DBA	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	7,23	0,78
Bpe	5,10	8,97	0,00	0,00	0,00	0,00	3,91
HAPtot	159,30	206,03	120,78	100,57	196,81	172,41	106,62
Teneurs dans les fruits							
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-

Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	-	-
Cu	7,40	9,10	12,00	5,10	2,70	7,50	-	-
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Ni	0,00	0,40	0,00	0,00	0,30	1,90	-	-
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Zn	14,50	18,40	12,50	14,70	12,90	32,20	-	-
Nap	44,56	39,16	24,67	4,01	6,46	8,73	-	-
Acy	5,71	15,51	12,42	6,16	11,50	26,65	-	-
Ace	2,80	2,69	5,50	0,65	0,10	3,02	-	-
Fle	9,83	9,37	6,26	1,53	2,23	4,30	-	-
Phe	21,02	25,01	18,29	2,15	5,98	21,58	-	-
Ant	3,22	9,22	8,57	6,10	9,02	21,48	-	-
FlA	8,47	14,91	12,96	10,57	22,05	76,31	-	-
Pyr	9,70	16,38	13,35	11,97	18,66	63,91	-	-
BaA	2,51	13,11	11,08	15,89	22,35	56,03	-	-
Chr	2,43	12,06	9,90	13,64	23,29	47,13	-	-
BbF	3,23	24,96	22,77	25,94	42,31	84,12	-	-
BkF	1,32	8,68	8,05	10,65	16,32	33,11	-	-
BaP	3,01	16,97	17,29	21,78	27,87	70,24	-	-
Ipy	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	-
DBA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
Bpe	0,00	4,58	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
HAPtot	117,81	212,58	171,11	131,04	208,14	516,61	-	-
Facteur de bioaccumulation (FB - sol-feuille)								
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cr	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	
Cu	0,13	0,19	0,31	0,43	0,25	0,28	0,33	
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Ni	0,01	0,03	0,02	0,02	0,04	0,01	0,04	
Pb	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	
Zn	0,14	0,23	0,36	0,48	0,42	0,20	0,28	
Nap	2,60	1,19	1,75	3,77	4,43	5,82	5,48	
Acy	0,58	1,32	1,89	1,32	2,44	2,44	2,28	
Ace	0,00	0,11	0,02	0,74	1,65	1,33	0,02	

Fle	0,44	0,38	0,76	1,19	0,82	1,07	0,81
Phe	0,05	0,16	0,29	0,63	1,08	0,74	0,23
Ant	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,41	0,01
FIA	0,01	0,06	0,08	0,06	0,06	0,04	0,05
Pyr	0,01	0,06	0,08	0,07	0,10	0,06	0,07
BaA	0,01	0,03	0,13	0,02	0,17	0,11	0,04
Chr	0,01	0,03	0,07	0,02	0,08	0,06	0,02
BbF	0,01	0,04	0,15	0,02	0,16	0,12	0,05
BkF	0,01	0,04	0,11	0,01	0,13	0,08	0,03
BaP	0,01	0,04	1,15	0,14	1,51	0,80	0,31
Ipy	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
DBA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01
Bpe	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
HAPtot	0,02	0,04	0,10	0,08	0,16	0,14	0,08

En gris et italique : teneurs en métaux et congénères HAPs mesurés dans le zeste de citron

En rouge, les FB > 1 indiquant des concentrations plus élevées dans les feuilles par rapport au sol