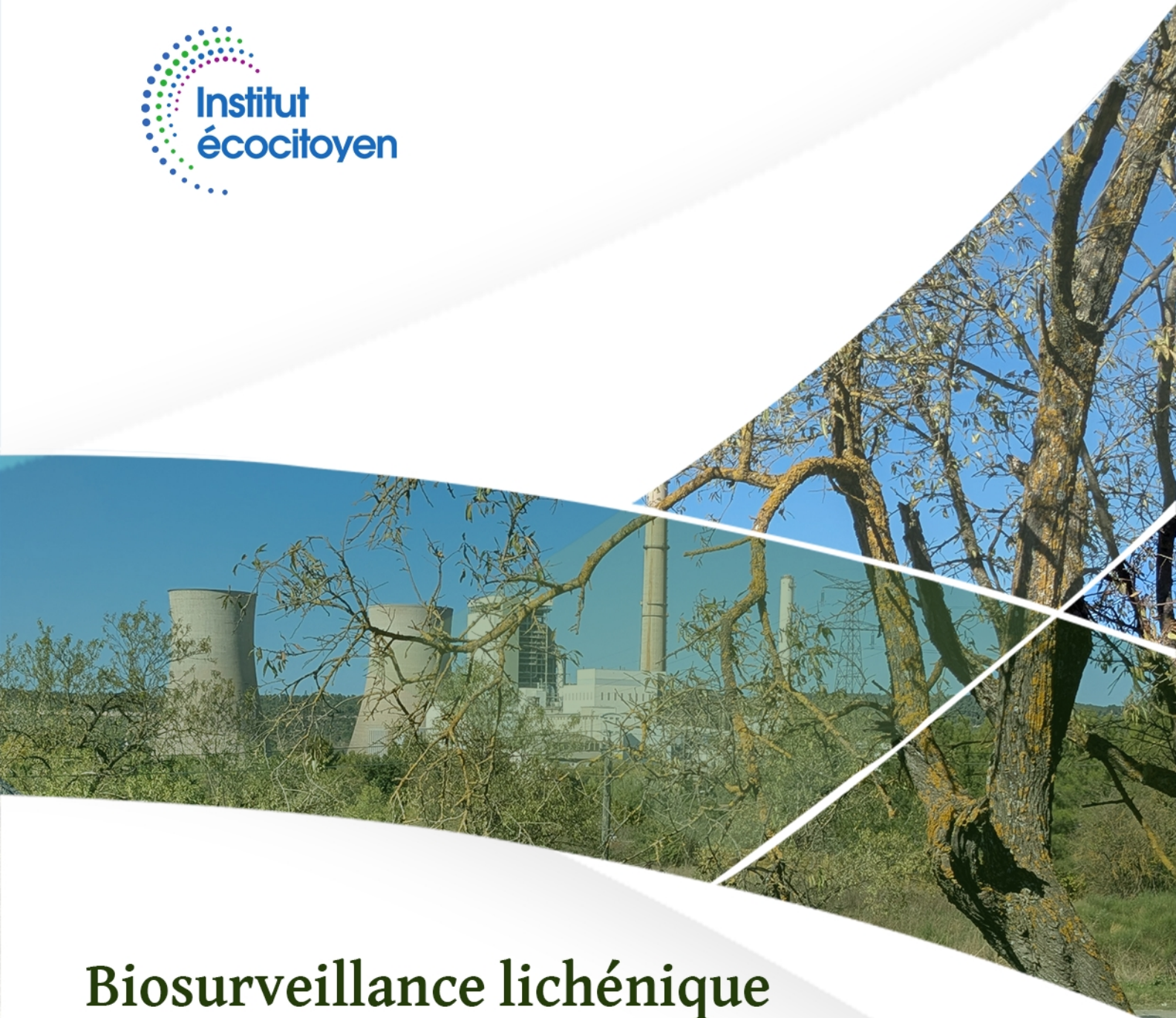




Biosurveillance lichénique

Exposition atmosphérique
de la ville de Gardanne

2026



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 :

M. Reuillard, A. Austruy, J. Dron. Biosurveillance lichénique : exposition atmosphérique de la ville de Gardanne. Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, 2026.

Contacts :

mathilde.reuillard@institut-ecocitoyen.fr - julien.dron@institut-ecocitoyen.fr

*Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions
RD268 – Centre de Vie la Fossette – 13270 Fos-sur-Mer*

04.90.55.49.94 – www.institut-ecocitoyen.fr

Remerciements

L'Institut Écocitoyen adresse ses remerciements amicaux à Amandine Durand (Laboratoire Chimie Environnement, Aix-Marseille Université), ainsi qu'à Emmanuel Wafo et Florence Chaspoul (Faculté de Pharmacie, Aix-Marseille Université) pour leurs accompagnements techniques dans les analyses chimiques. L'Institut Écocitoyen remercie également la ville de Gardanne pour son soutien dans la réalisation de cette étude.

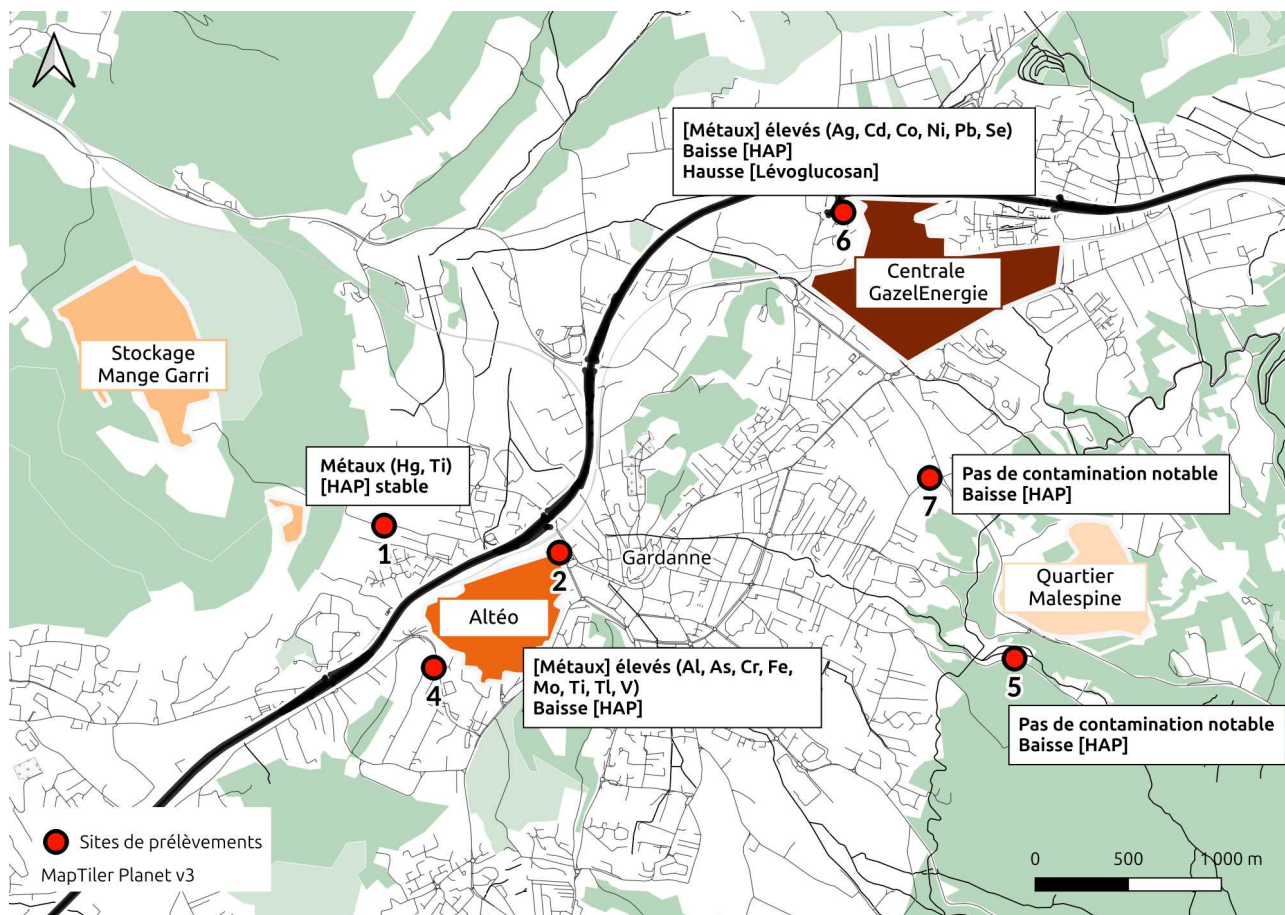
Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés avec le soutien financier de la Métropole Aix-Marseille-Provence et de la ville de Gardanne.

Table des matières

Synthèse.....	6
I. Introduction et contexte.....	8
II. Méthodologie.....	9
II.1. Principe.....	9
II.2. Prélèvement et traitement des échantillons.....	9
III. Résultats.....	12
III.1. Métaux.....	12
III.1.a. Concentrations et évolutions temporelles.....	12
III.1.b. Répartition géographique et signatures.....	15
III.2. Dioxines et furanes (PCDD/F).....	19
III.3. HAP et lévoglucosan.....	22
Bibliographie.....	26

Synthèse

Ce rapport présente les mesures de biosurveillance lichénique réalisée en octobre 2025 sur la commune de Gardanne. Cette campagne de mesure est la deuxième menée sur ce territoire et propose de suivre les concentrations de divers contaminants (métaux, PCDD/F, HAP) dans l'air.



Les concentrations mesurées et leur répartition géographique ont mis en évidence une exposition atmosphérique marquée de la ville de Gardanne aux métaux, principalement concentrée autour des deux principaux pôles industriels du territoire : la Centrale thermique de Provence (GazelEnergie) et l'usine d'alumine (Altéo). En raison de leurs activités très différentes, les éléments retrouvés aux alentours de ces deux pôles diffèrent et révèlent une signature caractéristique propre à chacun. Ainsi les sites 1, 2 et 4, aux abords d'Altéo, présentaient de fortes concentrations d'aluminium (Al), arsenic (As), chrome (Cr), fer (Fe), molybdène (Mo), étain (Sn), titane (Ti), thallium (Tl), vanadium (V). Le site 6, situé au pied de la Centrale GazelEnergie, se distinguait quant à lui par des niveaux particulièrement élevés d'argent (Ag), cadmium (Cd), cobalt (Co), nickel (Ni), plomb (Pb) et selenium (Se). Ces signatures restent en cohérence avec celles observées lors de la campagne de 2023.

Des concentrations particulièrement élevées d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les lichens avaient été mesurées en 2023 témoignant d'un impact marqué des activités anthropiques (industrielles, routières, résidentielles). Celles-ci ont presque toutes diminuées en 2025, à l'exception du site 1 (route vers Mange Garri). Cette évolution ne suit pas celle du lévoglucosan, marqueur spécifique de la combustion de biomasse végétale, dont les niveaux sont comparables entre 2023 et 2025. Il est possible que l'impact réel du fonctionnement de la centrale GazelEnergie ne soit pas encore totalement perceptible dans les lichens. En effet, son redémarrage à régime normal n'a eu lieu qu'au début de l'année 2025, après une période d'activité dégradée depuis 2018. Il serait donc pertinent de renouveler cette campagne dans quelques années, le temps que les lichens s'équilibrent avec la nouvelle exposition, d'autant plus que les HAP sont très sensibles aux variations régionales et interannuelles.

Enfin, comme en 2023, les niveaux de dioxines et furanes obtenus restent faibles, bien que le rapprochement du site 5 vers la zone d'activité de la Malespine ait entraîné une augmentation de la proportion de furanes qui y était mesuré, probablement en lien avec des activités locales (déchetterie, ...).

I. Introduction et contexte

Les villes de Gardanne et Meyreuil sont marquées par une pression anthropique forte, du fait de la présence d'importants sites industriels, d'un réseau autoroutier dense et d'exploitations agricoles sur leur territoire. Ces différentes activités génèrent l'émission de divers contaminants dans l'atmosphère, posant la question de l'exposition des habitants et de leur environnement.

Pour y répondre, une première étude de biosurveillance lichénique a été menée en 2023-2024 par l'Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions (IECP) à la demande des deux communes (Reuillard et al. 2024). Les résultats obtenus avaient montré l'impact durable de la présence des industries sur la qualité de l'air du territoire, avec notamment une importante contamination en métaux et HAP, centrée sur les deux pôles industriels présents sur le territoire, à savoir la Centrale thermique de Provence (GazelEnergie) et l'usine d'alumine (Altéo). La répartition géographique des contaminants avait alors permis d'identifier des signatures distinctes en métaux, propres à chacun de ces pôles. D'autres influences, plus locales et difficilement interprétables, avaient également été visibles sur les résultats en PCB, dioxines et furanes (PCDD/F), notamment à l'est de la ville. Ces résultats avaient été présentés à un large panel d'acteurs fin 2024, dans le cadre de l'observatoire local de la qualité de l'air mis en place par les villes de Gardanne et Meyreuil.

Cette première étude avait donc permis de constituer un « point zéro » de suivi temporel, à l'aube du redémarrage de la centrale thermique GazelEnergies à un régime normal en 2025. La présente étude propose de compléter les données déjà acquises via une nouvelle campagne de prélèvements de lichens, en parallèle du redémarrage de la centrale thermique en janvier 2025, à raison de 4 000 h de fonctionnement par an (soit environ 50%), avec une production essentiellement anticipée en automne-hiver. À noter cependant que les prélèvements ont eu lieu le 6 octobre 2025. Ils témoigneront d'un éventuel impact à relativement court terme (9 mois) mais pas encore sur le long terme. La campagne doit aussi permettre de suivre l'évolution des concentrations observées précédemment sur l'ensemble du bassin, tout en complétant la cartographie des expositions et des impacts associés, grâce à de nouveaux points de prélèvements dans de nouveaux secteurs d'intérêts (quartier Clapiers, quartier de la Malespine).

II. Méthodologie

II.1. Principe

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 ; Agnan, 2013). Elle se décline en plusieurs outils de diagnostics environnementaux, dont les mesures de bioaccumulation utilisées ici. Il s'agit de mesures d'exposition consistant à déterminer les concentrations en éléments chimiques bioaccumulés dans un ou plusieurs organismes vivants en réponse à une exposition plus ou moins diffuse.

Les organismes utilisés dans cette étude sont les lichens qui, de par leurs particularités anatomiques, sont particulièrement adaptés à l'étude des contaminants atmosphériques (Nimis *et al.*, 2002 ; Dron *et al.*, 2016 ; Ratier *et al.*, 2018). En effet, ils forment des populations stables et pérennes tout en ayant une activité biologique quasi-annuelle. Ils sont dépourvus de cuticule, de système racinaire et de système d'excrétion. Ils sont donc incapables de réguler leurs échanges gazeux avec l'atmosphère et exposés en permanence aux contaminants présents dans l'air ambiant. Le phénomène de bioaccumulation résulte ainsi d'un équilibre entre les concentrations atmosphériques et lichéniques, ce qui fait des lichens de bons indicateurs des niveaux de polluants dans l'air ambiant. La bioaccumulation de divers composés peut être mesurée chez certaines espèces de lichens, comme *Xanthoria parietina*, à partir de prélèvements de thalles suivis d'analyses chimiques. Cette méthodologie est aussi décrite dans une norme française (NF X43-904 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 » AFNOR, 2013).

La longue expérience de l'Institut Ecocitoyen et ses travaux de recherche dans le domaine, menés depuis 2011 sur le territoire de la Métropole Aix-Marseille-Provence, ont permis de consolider certains aspects de la méthodologie (Ratier *et al.*, 2018), d'évaluer la portée de sa fiabilité, et de préciser la durée d'intégration des lichens en fonction des conditions climatiques (Dron *et al.*, 2021). La durée d'intégration est généralement considérée de 6 à 12 mois, mais peut varier en fonction des conditions d'exposition, notamment présenter une plus forte inertie après des changements importants d'exposition. La variabilité des mesures est estimée à 30 % pour les mesures de bioaccumulation, incluant l'ensemble des phases (prélèvement, tri, préparation, analyse chimique).

II.2. Prélèvement et traitement des échantillons

Pour cette étude, des échantillons de lichens ont été prélevés le 6 octobre 2025 sur 6 sites répartis au sein de la commune de Gardanne (Figure 1 et Tableau 1).

La répartition de ces sites a été définie afin d'assurer le suivi des secteurs d'intérêts identifiés lors des campagnes précédentes (sites 1, 2, 4 et 6), tout en investiguant de nouveaux secteurs de la ville afin de compléter la cartographie des expositions (sites 5 et 7).

Tableau 1 : Description des sites d'étude et types de mesures réalisées

N° site	Lieu	Coordonnées		Types de mesures			
		Latitude	Longitude	Métaux	HAP	Lévo.	PCDD/F
1	Fontvenelle	43°27'25.5"N	5°27'08.3"E	X	X	X	
2	Pôle d'échanges	43°27'20.8"N	5°27'50.2"E	X	X	X	
4	Av. des Chasséens	43°27'00.9"N	5°27'20.2"E	X	X	X	X
5	Ch. du Vallon St Pierre	43°27'02.4"N	5°29'39.0"E	X	X	X	X
6	Ch. des Jardins Miniers	43°28'19.8"N	5°28'58.1"E	X	X	X	
7	Ch. des Clapiers	43°27'33.8"N	5°29'18.7"E	X	X	X	X

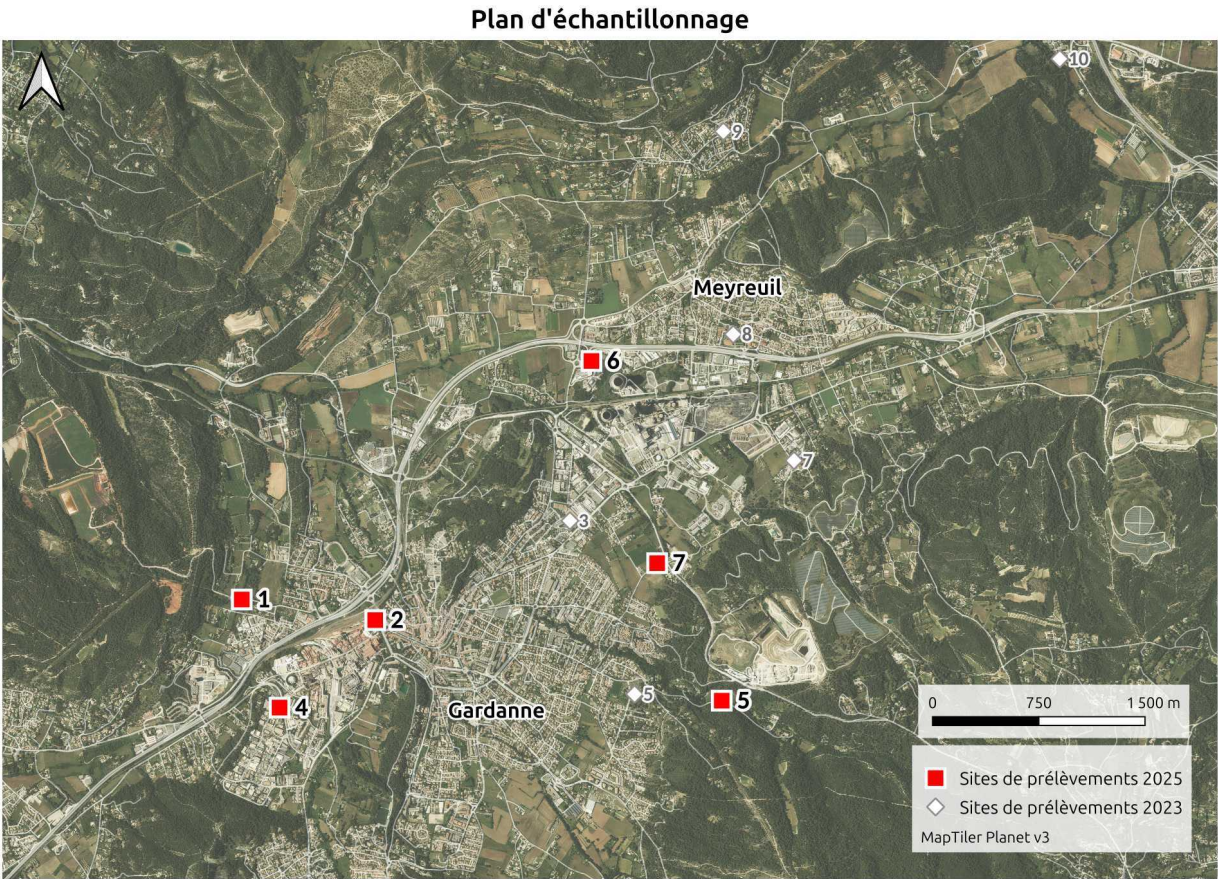


Figure 1 : Plan d'échantillonnage des sites d'étude

Les mesures de bioaccumulation ont été réalisées à partir d'échantillons de *X. parietina*, espèce de lichen foliacé nitrophile, héliophile, toxitolérante et ubiquiste. Pour cela, sur chaque site, des thalles entiers de cette espèce ont été prélevés sur plusieurs troncs d'arbres feuillus. Puis, au laboratoire, les échantillons ont été triés pour ne garder que les tissus de lichens. Ils ont ensuite été lyophilisés et broyés avant la réalisation des analyses chimiques. Ces étapes sont détaillées dans l'**Annexe A**.

Compte-tenu des émissions attendues et des résultats des campagnes précédentes, les mesures de bioaccumulation ont porté sur :

- Les **métaux** : principalement émis lors de procédés industriels (fonderie, sidérurgie...) et lors de la combustion de pétrole, charbon ou déchets ménagers, ainsi que par le trafic routier ;
- Les **hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)** : produits par tout type de combustion (chauffage, transport, production d'énergie, industrie...) ;
- Le **lévoglucosan** : traceur de la combustion de biomasse.

Certains contaminants étant moins attendus, ils n'ont été recherchés que sur trois sites (sites 4, 5 et 7) :

- Les **dioxines et furanes** (PCDD/F) : polluants organiques persistants, produits lors de processus de combustion, lors de l'incinération de déchets et dans un grand nombre de procédés de fabrication industriels (métallurgie, blanchiment des pâtes à papier, et dans certains pesticides).

Les données obtenues ont été traitées avec les logiciels Libreoffice et R (version 4.3, R Core Team, 2024) avec l'aide des packages RStudio 2024.12.0+467 et FactoMineR pour les traitements statistiques, ainsi que le logiciel QGIS 3.22 pour les cartographies.

III. Résultats

III.1. Métaux

Les métaux et métalloïdes sont principalement émis lors de procédés industriels (fonderies, usines sidérurgiques et métallurgiques...), mais aussi lors de la combustion de pétrole, de charbon ou de déchets ménagers. Le trafic routier contribue également à leur émission, tout comme les envols de poussières de sols contaminés. Dans une moindre mesure, des émissions naturelles (feux de forêt, éruptions volcaniques, matériaux parentaux) s'ajoutent à ce panel de sources.

20 éléments ont été analysés dans les lichens : aluminium (Al), antimoine (Sb), argent (Ag), arsenic (As), cadmium (Cd), calcium (Ca), chrome (Cr), cobalt (Co), cuivre (Cu), étain (Sn), fer (Fe), manganèse (Mn), mercure (Hg), molybdène (Mo), nickel (Ni), plomb (Pb), thallium (Tl), titane (Ti), vanadium (V) et zinc (Zn).

III.1.a. Concentrations et évolutions temporelles

Les concentrations de métaux observées dans les lichens en 2025 sont détaillées dans le Tableau 2. Les principales statistiques par éléments sont présentées dans le Tableau 3. Les résultats obtenus lors de précédentes campagnes y figurent pour faciliter la comparaison. En effet, en plus de l'étude dédiée en 2023, la zone de Gardanne avait été intégrée dans les campagnes de mesures trisannuelles de l'Institut Ecocitoyen, réalisées sur l'ensemble de la Métropole Aix-Marseille-Provence, en 2021 (1 site) et 2024 (2 sites).

Les résultats obtenus témoignent de l'exposition atmosphérique du territoire de Gardanne aux métaux. En effet, la comparaison des mesures réalisées entre 2021 et 2025 avec les valeurs de bruit de fond de Cecconi et al. (2019), moyennant les données de 11 études de bioaccumulation des métaux par *X. parietina* dans 5 régions italiennes, montre que ce dernier est dépassé pour la quasi totalité des éléments sur toute la période (notamment Al, As, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) ou uniquement en 2025 (Ti). Seules les concentrations en Cd et Ni y sont globalement égales ou inférieures, mais avec des valeurs hautes plus fortes.

En 2025, les niveaux de titane (**Ti**) sont ceux présentant la hausse la plus remarquable depuis 2023, avec une médiane qui a augmenté d'un facteur 15. Les sites les plus impactés étant les sites 1, 2 et 4, où les concentrations sont semblables à ce qui avait été observé en 2021 dans les sites urbains-industriels, dont le site 2 de Gardanne. Aucune explication n'a pu éclairer ces fortes variations, il reste toutefois clairement lié au site d'Altéo, quelque soit le niveau de bioaccumulation. Une augmentation des niveaux de fer (**Fe**), molybdène (**Mo**), nickel (**Ni**) et étain (**Sn**) est également observable.

Les sites les plus impactés sont ceux proches des grandes installations industrielles : sites 2 et 4 - Altéo) et site 6 (GazelEnergie), avec des concentrations maximales semblables voire supérieures aux moyennes rencontrées dans les sites de la Métropole en 2021, de type industriel (Mo, Sn) ou

urbain-industriel (Fe, Ni). Aussi, les concentrations en cobalt (**Co**) et manganèse (**Mn**) ont globalement augmenté depuis 2023, leurs maximales étant sur le site 6, à proximité de la centrale GazelEnergie.

Les niveaux d' aluminium (**Al**) et mercure (**Hg**) observés ont diminué au fil des années, cependant, ils restent très élevés comparés au reste du territoire métropolitain. Presque toutes les mesures réalisées à Gardanne en 2025 pour ces deux éléments sont supérieures à la moyenne obtenue dans les sites industriels de la Métropole en 2021. Leurs moyennes y sont donc largement supérieures (pour Al : 6 474 µg/g à Gardanne contre 3 960 µg/g sur les sites industriels métropolitains ; pour Hg : 0,16 contre 0,07 µg/g).

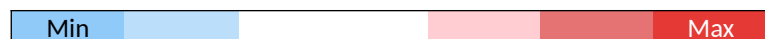
Concernant le plomb (**Pb**) et le cadmium (**Cd**), les concentrations les plus importantes ont encore été retrouvées au niveau des sites 6 (Pb, Cd) et 5 (Cd) où leurs valeurs ont peu évolué, contrairement à celles obtenues pour les autres sites, qui ont augmenté dans le cas du Pb et diminué pour le Cd.

Quant aux mesures en calcium (**Ca**), chrome (**Cr**), antimoine (**Sb**) et zinc (**Zn**), elles ont diminué en 2025. De même pour l'arsenic (**As**) et le vanadium (**V**), dont les concentrations les plus élevées en 2023, rencontrées sur les sites 2 et 4 (autour d'Altéo), étaient très supérieures aux moyennes métropolitaines. Celles-ci sont dorénavant du même ordre de grandeur que la moyenne obtenue dans les sites industriels en 2021 et restent donc élevées.

Parmi les sites étudiés, le site 2 a fait l'objet d'un suivi régulier puisqu'il est inclus dans les campagnes de mesures sur le territoire métropolitain de l'Institut Ecocitoyen. Ainsi, en 2021, le site 2 présentait des concentrations les plus élevées de la Métropole en Al et V, ainsi que des concentrations importantes en As, Cr, Fe, Ti (Reuillard et al., 2023). En 2023, sur ce même site, les concentrations de ces éléments, bien qu'en diminution, étaient restées très élevées, et des niveaux notables de Cd, Hg, Sb et Tl avaient été révélés. L'année suivante, les concentrations de la majorité des éléments (As, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sn, Ti, Zn) ont augmenté, quand celles en Al, Cr, Tl, V ont continué à décroître, mais tout en restant malgré tout à des niveaux élevés.

Tableau 2 : Concentrations en métaux (en µg/g) relevées dans les thalles de *X. parietina* de chaque site étudié entre 2021 et 2025 et bruit de fond de Cecconi et al. (2009)

(µg/g)	2021	2023										2024		2025						BdF Cecconi*
	Site 2	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Site 2	Site 7	Site 1	Site 2	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	
Ag	< LQ	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	< LQ	< LQ	0,05	< LQ	< LQ	< LQ	0,11	< LQ	-
Al	28900	4744	22295	3668	15106	3321	3557	3968	2305	2032	3410	18676	1272	4520	13732	9325	3689	4278	3300	372
As	3,87	0,82	2,55	0,91	4,45	0,68	1,72	1,25	0,49	0,53	0,57	3,25	0,45	0,65	1,33	1,47	0,65	1,27	0,63	0,15
Ca	550	1499	2581	2628	5402	2058	4763	4086	1808	2607	2423	306	320	630	611	1623	1060	1179	752	-
Cd	< LQ	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,09	0,06	0,02	0,09	0,03	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,08	0,07	< LQ	0,07
Co	0,88	0,19	0,38	0,25	0,36	0,21	0,70	0,50	0,21	0,42	0,31	0,67	0,47	0,45	0,67	0,60	0,55	0,97	0,53	-
Cr	73,0	11,1	43,0	6,30	21,6	4,90	28,9	2,00	2,81	2,37	1,84	30,8	3,0	8,61	19,1	10,9	5,04	13,40	4,73	1,41
Cu	15,5	7,55	14,5	11,7	17,5	9,03	21,3	11,5	8,92	9,70	10,7	19,7	8,6	7,10	13,6	10,1	5,99	12,1	8,24	4,45
Fe	12300	1946	5872	1682	3368	1367	3063	1756	1111	1257	1688	8848	1150	3661	7770	2987	2727	4006	2633	-
Hg	< LQ	0,23	0,16	0,33	0,29	0,25	0,28	0,16	0,16	0,18	0,16	0,21	0,21	0,29	0,15	0,05	0,16	0,19	0,09	0,04
Mn	62,0	24,0	31,0	23,0	47,0	19,0	35,0	33,0	15,0	44,0	31,0	48,9	24,0	33,6	47,5	57,4	33,9	49,1	37,8	-
Mo	6,80	0,92	2,51	0,76	5,39	1,13	1,56	0,89	0,87	0,57	1,27	4,84	1,13	0,94	2,20	4,12	3,39	1,26	1,19	-
Ni	3,70	0,63	1,27	1,10	1,78	0,78	8,30	1,25	0,79	0,77	1,10	4,34	1,90	1,51	2,55	1,19	2,23	5,49	1,84	1,64
Pb	7,45	1,94	4,29	2,67	4,81	1,78	8,50	3,57	1,74	4,43	2,34	7,80	2,06	2,60	4,90	4,48	2,33	8,31	2,23	1,00
Sb	< LQ	0,28	1,13	0,39	0,82	0,24	0,87	0,57	0,28	0,49	0,70	0,39	0,37	0,15	0,29	0,36	0,13	0,36	0,24	-
Sn	1,02	0,61	0,83	0,54	0,85	0,47	0,86	0,87	0,43	0,94	0,65	3,20	1,35	1,06	2,71	2,45	1,06	2,00	1,55	-
Ti	175	15,0	16,6	4,72	17,1	5,02	5,84	5,52	4,44	6,70	5,68	85,5	41,0	95,0	101,0	87,0	50,0	66,0	43,0	37,3
Tl	< LQ	0,01	0,12	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,10	< LQ	< LQ	0,12	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	-
V	81,0	6,50	37,0	3,80	13,60	3,20	5,20	4,70	2,30	2,80	3,70	26,8	2,4	6,91	16,0	8,39	4,38	6,25	4,08	-
Zn	55,0	21,9	60,1	30,3	45,2	23,1	96,5	36,7	22,0	36,9	32,5	74,9	42,1	25,0	49,0	43,0	35,0	55,0	26,0	21,3
Se	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,82	2,73	0,61	1,67	3,18	2,27	-
Te	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,37	0,19	0,56	< LQ	0,52	0,11	-



(*) Cecconi et al. (2019) New interpretative scales for lichen bioaccumulation data: the Italian proposal

Tableau 3 : Statistiques des concentrations en métaux (en µg/g) par année relevées dans les thalles de *X. parietina* sur l'ensemble des sites étudiés sur les communes de Gardanne et Meyreuil entre 2023 et 2025

	2023 (n=10)				2024 (n=2)				2025 (n=6)			
	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max
Ag	0,02	0,02	0,01	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,11
Al	6441	3613	2032	22295	9974	9974	1272	18676	6474	4399	3300	13732
As	1,40	0,87	0,49	4,45	1,85	1,85	0,45	3,25	1,00	0,96	0,63	1,47
Ca	2986	2594	1499	5402	313	313	306	320	976	906	611	1623
Cd	0,05	0,04	0,02	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,08
Co	0,35	0,34	0,19	0,70	0,57	0,57	0,47	0,67	0,63	0,58	0,45	0,97
Cr	12,5	5,60	1,84	43,0	16,9	16,9	2,98	30,8	10,3	9,75	4,73	19,1
Cu	12,2	11,1	7,55	21,3	14,1	14,1	8,63	19,7	9,52	9,19	5,99	13,6
Fe	2311	1722	1111	5872	4999	4999	1150	8848	3964	3324	2633	7770
Hg	0,22	0,21	0,16	0,33	0,21	0,21	0,21	0,21	0,16	0,16	0,05	0,29
Mn	30,2	31,0	15,0	47,0	36,4	36,4	24,0	48,9	43,2	42,6	33,6	57,4
Mo	1,59	1,03	0,57	5,39	2,98	2,98	1,13	4,84	2,18	1,73	0,94	4,12
Ni	1,78	1,10	0,63	8,30	3,12	3,12	1,91	4,34	2,47	2,04	1,19	5,49
Pb	3,61	3,12	1,74	8,50	4,93	4,93	2,06	7,80	4,14	3,54	2,23	8,31
Sb	0,58	0,53	0,24	1,13	0,38	0,38	0,37	0,39	0,26	0,27	0,13	0,36
Sn	0,71	0,74	0,43	0,94	2,27	2,27	1,35	3,20	1,81	1,78	1,06	2,71
Ti	8,66	5,76	4,44	17,1	63,3	63,3	41,0	85,5	73,7	76,5	43,0	101
Tl	0,03	0,02	0,01	0,12	0,07	0,07	0,05	0,10	0,04	0,03	0,03	0,12
V	8,28	4,25	2,30	37,0	14,61	14,61	2,38	26,83	7,66	6,58	4,08	15,98
Zn	40,5	34,6	21,9	96,6	58,5	58,5	42,2	74,9	38,8	39,0	25,0	55,0
Se	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,05	2,05	0,61	3,18
Te	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,29	0,28	0,03	0,56

III.1.b. Répartition géographique et signatures

La répartition géographique des concentrations (Figure 2 et Annexe C1) met en évidence l'impact des activités industrielles sur l'exposition atmosphérique du territoire. En effet, les mesures les plus élevées ont été réalisées à proximité des principales installations industrielles, soit au niveau des sites 2 et 4, proches de l'usine d'alumine Altéo, ainsi que du site 6, proche de la centrale thermique GazelEnergie. Les sites 1, 5 et 7 étant beaucoup moins impactés.

Deux signatures se distinguent avec, comme en 2023, des niveaux plus élevés de Al, As, Cr, Fe, Mo, Sn, Ti, Tl, V au niveau des sites 2 et 4, proches de Altéo. Quant au site 6, au pied de GazelEnergie on y trouve des concentrations plus élevées de Ag, Cd, Co, Ni, Pb et Se. Sa signature a donc très peu évolué par rapport à 2023 (Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn).

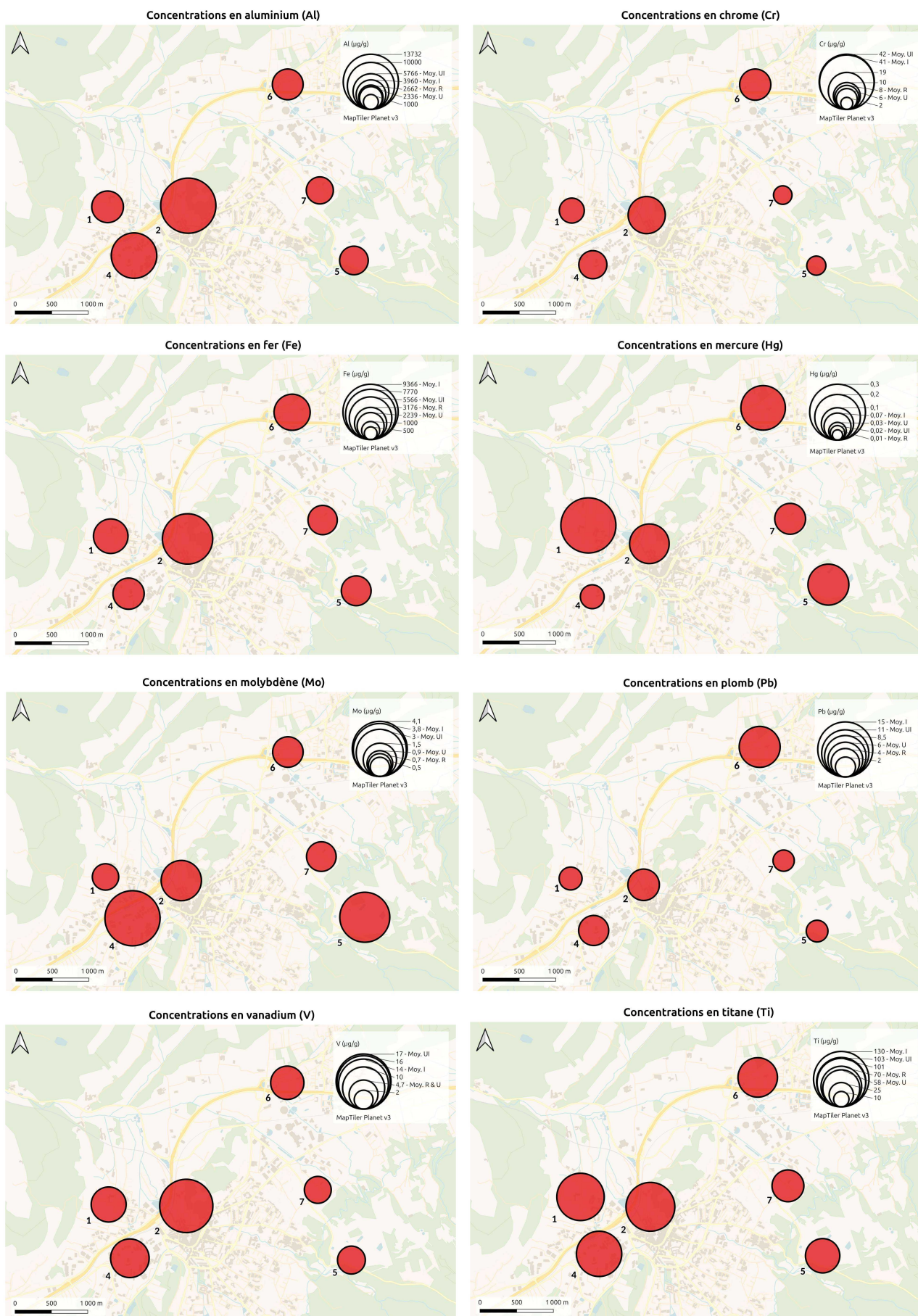


Figure 2 : Répartition géographique des concentrations en Al, Cr, Fe, Hg, Mo, Pb, Ti et V (en µg/g)
 (Dans la légende → Moy. : concentrations moyennes mesurées lors de la campagne 2021 de l'IECP sur le territoire de la MAMP selon les catégories de sites avec I : industriel ; UI : urbain-industriel ; U : urbain ; R : rural)

Ces signatures ont été vérifiées via la réalisation d'une Analyse en Composantes Principales (ACP – Figure 3). Cette méthode statistique « multivariée » permet de simplifier un ensemble de données complexes et d'en résumer l'information. Pour cela, elle décrit la variance des observations (ici, les sites) par des « composantes principales » correspondant à la contribution de chaque paramètre à ces observations. Ici, les paramètres étudiés sont les concentrations en métaux et la proximité des sites de prélèvements avec deux points de repère : l'usine d'alumine d'Altéo et la centrale GazelEnergie. Cette proximité a été calculée à partir de l'inverse de la distance mesurée entre celle-ci et le centre de chacune des deux installations industrielles ($1/\text{distance}$ en km) afin de décrire la proximité comme une valeur proportionnelle à la distance.

L'application de la méthode statistique ACP requiert un nombre important de données et d'observations pour en tirer des indications fondées, en général un minimum de 12-15 observations est nécessaire pour avoir une fiabilité exploitable en sciences environnementales, si possible même plus de 20-25 selon ce que l'on cherche à caractériser et l'hétérogénéité attendue des données. Le nombre de sites étudiés en 2025 est donc faible, cependant l'ACP qui a été réalisée à titre indicatif (Annexe D) reste comparable avec celle de 2023 (Reuillard et al., 2024), malgré le passage récent à la biomasse de la centrale. Quoi qu'il en soit, cela conforte l'intégration des données 2025 avec l'ensemble des autres années étudiées pour affiner la caractérisation des signatures qui permet d'atteindre 19 observations sur 12 sites différents.

Les deux premières composantes de l'ACP regroupant l'ensemble des résultats obtenus de 2021 à 2025 en métaux, résument 61 % de la variance totale et mettent bien en évidence les deux signatures identifiées plus tôt. En effet, le premier axe, qui représente 41 % (Dim 1, Figure 3) de la variabilité des données, est associé positivement à la variable « proximité d'Altéo » (en rouge), elle-même fortement corrélée aux éléments Al, As, Cr, Fe, Mo, Sn, Ti, Tl et V, identifiés précédemment. Cela confirme l'influence de l'usine d'alumine sur les émissions de ces éléments dans l'air. Aussi, les éléments Co, Cu, Mn, Pb, Te et Zn contribuent positivement à cet axe mais leur corrélation avec la proximité de Altéo est moins évidente, montrant que cette installation n'en est pas la seule émettrice. Pour finir, à l'opposé, on trouve l'élément Hg qui présente une contribution négative à l'axe 1, indiquant une origine distincte, sachant que la principale source anthropique d'émissions de cet élément en union européenne est la combustion de charbon (United Nations Environment Programme, 2019).

Le deuxième axe, qui explique 19 % (Dim 2, Figure 3) de la variabilité des données, est lié positivement à la variable « proximité de la Centrale » (en bleu), ainsi qu'aux éléments Ag, Ca, Cd, Ni, Sb et Se. De 2021 à 2025, la centrale thermique aurait donc influencé les concentrations de ces éléments dans l'air. Toutefois son influence semble donc deux fois moins importante que celle d'Altéo dont la composante associée explique le double de variance (41 % pour Dim 1) comparé à celle associée à Gazel Energies (19 % pour Dim 2). Les éléments associés à la proximité d'Altéo

contribuent négativement à cet axe, confortant l'hypothèse de deux signatures métalliques distinctes sur ce territoire, en lien avec les deux installations identifiées.

Il deviendra intéressant avec le temps de vérifier les éventuelles évolutions de la signature, en plus des niveaux de concentrations en métaux, notamment autour de GazelEnergie dont le procédé a radicalement changé.

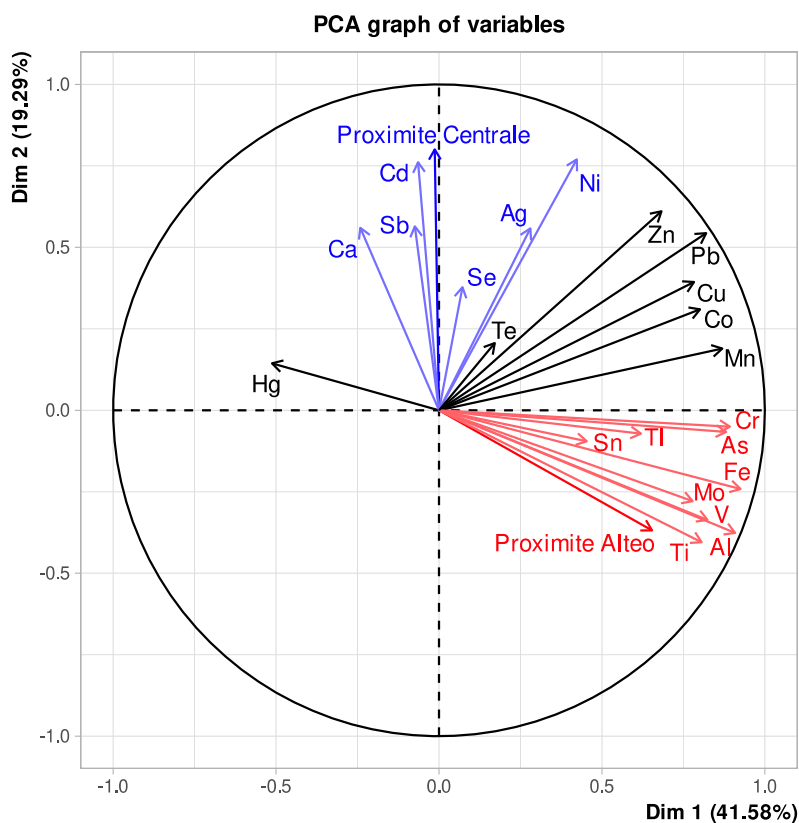


Figure 3 : Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée sur les données de concentrations en métaux et la proximité des sites de mesures avec des installations industrielles de l'usine d'alumine Altéo et de la Centrale thermique de Provence (n=19)

III.2. Dioxines et furanes (PCDD/F)

Les dioxines et furanes sont des polluants organiques persistants produits lors de processus de combustion. Les principales sources d'exposition à ces polluants sont les incinérateurs d'ordures ménagères et un grand nombre de procédés de fabrication (métallurgie, blanchiment des pâtes à papier ainsi que certains pesticides). Les dioxines sont des composés chimiques peu volatils, peu solubles dans l'eau, mais avec une stabilité chimique et métabolique importante, ce qui explique leur forte persistance dans l'environnement.

Plusieurs cartes (Figure 4) ont été réalisées afin de visualiser la répartition géographique de la contamination en dioxines et furanes en 2025, avec :

- Les concentrations de dioxines et furanes totales (PCDD/F) ;
- L'équivalent toxique international (I-TEQ) : obtenu en multipliant la concentration de chaque composé par son facteur d'équivalent toxique (INERIS, 2018). Il permet d'évaluer le niveau de toxicité associé aux PCDD/F ;
- Le rapport furanes/dioxines (PCDF/PCDD) : il a été observé que les furanes étaient préférentiellement émis par les procédés industriels (Ratier et al., 2018 ; Dauphin et Dron 2020), un rapport PCDF/PCDD élevé indique donc une contribution importante des émissions industrielles aux dioxines et furanes observées.

Les résultats par congénère sont détaillés dans l'Annexe C2. Les principales statistiques produites entre 2021 et 2025 sont présentées dans le Tableau 4.

Les résultats obtenus en 2025 montrent une exposition faible à modérée du territoire en dioxines et furanes, confirmant les résultats de la campagne 2023, avec globalement une baisse des concentrations. Ainsi, les niveaux en dioxines et furanes totaux varient entre 15,45 (site 4) et 38,83 ng/kg (site 5).

Par site, les niveaux les plus importants ont été observés sur le site 5, avec un rapport furanes/dioxines conséquent de 67 %. Celui-ci est plus élevé qu'en 2023, où il était de 39 %, principalement suite à la diminution d'un facteur deux des mesures de ses congénères dioxines majoritaires (OCDD et PCDD6). Ce site possède également un I-TEQ légèrement plus élevé que les autres sites, proche de la moyenne observée dans les sites industriels métropolitains en 2021, bien que plus faible qu'en 2023 (2,0 contre 3,2). Ces variations restent très limitées et il faut noter que le point de prélèvement du site 5 en 2025 est différent de celui de 2023, à la fois plus proche de la zone de la Malespine (abritant une décharge) mais aussi plus éloigné du centre urbain.

Le point de prélèvement du site 7 a également été déplacé en 2025 sur le chemin des Clapiers. Or, les niveaux mesurés sur ce site en 2025 ont été diminués de moitié. Les niveaux des sites 4 et 7

sont d'ailleurs inférieurs à la moyenne des sites ruraux de la Métropole Aix-Marseille-Provence, montrant l'absence de contamination notable dans ce secteur.

Il convient toutefois de noter que la représentativité de ces résultats demeure limitée, puisqu'ils ne reposent que sur trois sites de mesures. Néanmoins, les niveaux observés ainsi que leur évolution temporelle suggèrent qu'à l'avenir, le renouvellement systématique de tous les points de mesures ne serait pas forcément pertinent, et qu'une mesure unique à des fins de surveillance pourrait suffire.

Tableau 4 : Statistiques des concentrations en PCDD/F par année relevées dans les thalles de X. parietina sur l'ensemble des sites étudiés sur les communes de Gardanne et Meyreuil entre 2023 et 2025

	2021 (n=1)	2023 (n=6)				2024 (n=2)				2025 (n=3)			
		Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max
I-TEQ (ng/kg)	1,27	1,69	1,46	1,09	3,20	1,25	1,25	0,96	1,53	1,03	0,57	0,49	2,03
PCDD/F total (ng/kg)	69,0	108	59,1	33,4	354	37,7	37,7	37,6	37,8	25,4	21,8	15,5	38,8
PCDD total (ng/kg)	56,1	96,1	45,6	26,5	340	26,7	26,7	25,3	28,1	17,6	17,9	11,7	23,2
PCDF total (ng/kg)	12,9	12,42	12,87	6,89	17,89	11,0	11,0	9,64	12,3	7,76	3,93	3,75	15,6
PCDF/PCDD (%)	23,0	24,0	23,0	4,00	39,0	42,0	42,0	34,0	49,0	40,0	32,0	22,0	67,0

Équivalents toxiques (I-TEQ) des PCDD/F

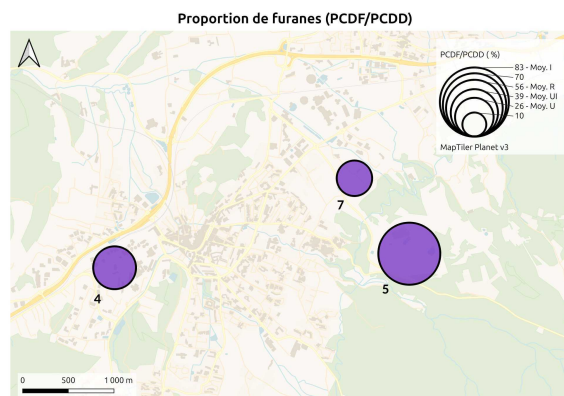
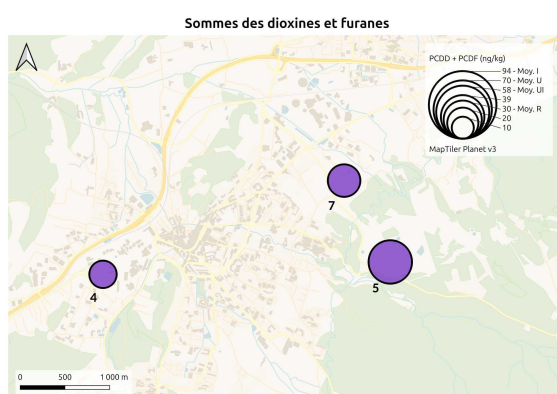
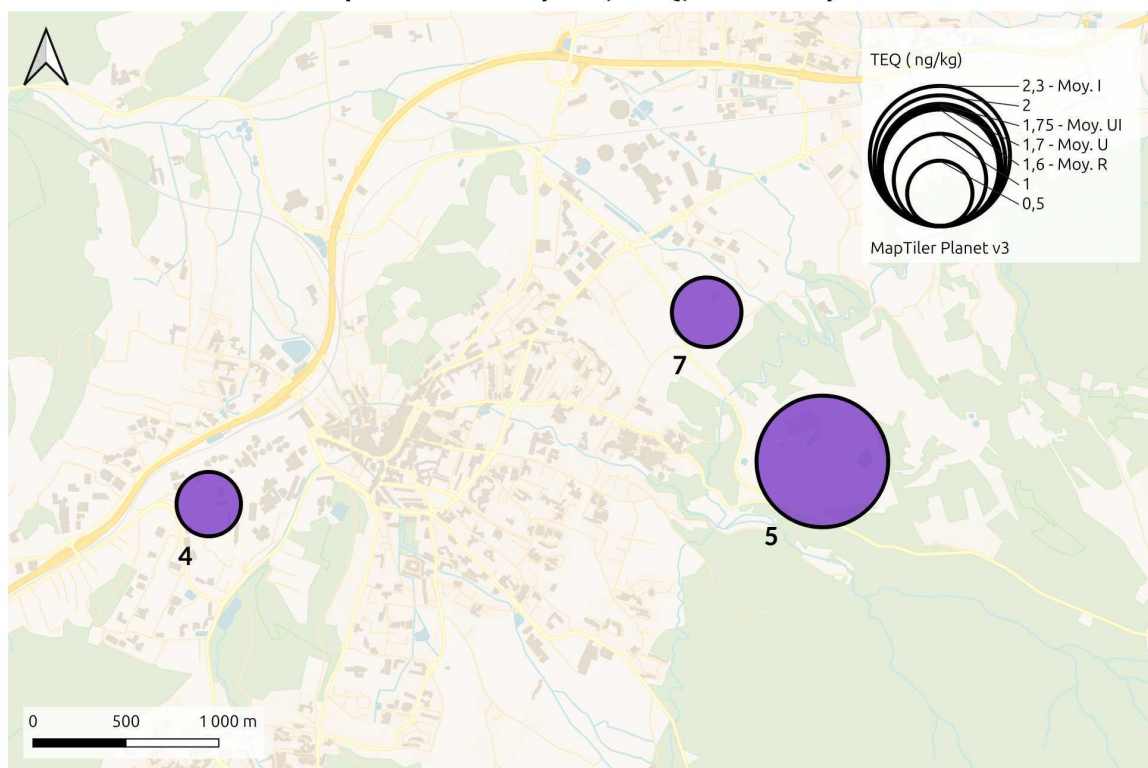


Figure 4 : Répartition géographique des concentrations en équivalent toxique (I-TEQ) (en ng/kg), des concentrations totales en PCDD/F (en ng/kg) et du rapport PCDF/PCDD (en %) mesurées dans les lichens (Dans la légende → Moy. : concentrations moyennes mesurées lors de la campagne 2021 de l'IECP sur le territoire de la MAMP selon les catégories de sites avec I : industriel ; UI : urbain-industriel ; U : urbain ; R : rural)

III.3. HAP et lévoglucosan

Les HAP sont majoritairement formés lors de la combustion incomplète de matière organique, pouvant être d'origine naturelle (feux de forêts, éruptions volcaniques) ou anthropique avec des émissions issues de l'utilisation de combustibles de type « biomasse » (combustion de bois pour le chauffage ou la cuisine, ou encore certaines activités industrielles telles que l'incinération, la production d'énergie à partir de biomasse...), ou de combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon) que ce soit pour les transports, le chauffage, la production d'énergie ou l'industrie.

Le lévoglucosan est un sucre issu de la combustion de la cellulose et donc un marqueur spécifique de la combustion de biomasse végétale. La présence de ce composé dans les lichens permet donc d'estimer la part de ce facteur dans la contamination de l'air.

La répartition géographique des concentrations en HAP totaux entre 2023 et 2025 est présentée dans la Figure 6 et celle en lévoglucosan dans la Figure 7. Les concentrations par congénère de HAP mesurées en 2025 sont détaillées dans l'Annexe C3 et les principales statistiques par nombre de cycles entre 2021 et 2025 sont présentées dans le Tableau 5. Les principales statistiques pour le lévoglucosan sont dans le Tableau 6. Le détail des concentrations en lévoglucosan, mannosan et galactosan obtenues en 2025 est présenté dans l'Annexe C4.

Les résultats montrent une baisse globale des concentrations de HAP en 2025 par rapport à 2023 avec, pour l'ensemble des sites, une concentration moyenne de HAP totaux de 1 595 µg/kg en 2023 contre 619 µg/kg en 2025. Cette nouvelle moyenne est proche de celle observée en 2021 sur les sites urbains métropolitains (691 µg/kg), montrant l'impact des activités anthropiques (industrielles, routières, résidentielles) sur les niveaux observés. La plus forte concentration a été observée au niveau du site 1 (1235 µg/kg), seul site où le niveau en HAP est resté stable. Les plus faibles concentrations ont été trouvées au niveau des sites 4 (380 µg/kg) et 5 (398 µg/kg). Les congénères majoritaires sont les HAP à 4 cycles, suivis de ceux à 3 cycles (Figure 5). On observe une proportion plus importante de HAP à 4 cycles et moins importantes de HAP à 5 et 6 cycles au niveau des sites 1 et 2, proches d'Altéo.

Concernant le lévoglucosan, les concentrations mesurées en 2025 sont relativement homogènes et varient entre 350 µg/kg (site 7) et 550 µg/kg (site 2). La majorité des sites présentent des niveaux comparables à ceux mesurés en 2023 (sites 1, 4, 5 et 7). Une hausse des concentrations est toutefois observée sur le site 2 et, plus particulièrement, sur le site 6 situé à proximité de la centrale GazelEnergie (de 150 à 480 µg/kg). Cette hausse pourrait être liée au redémarrage de la tranche biomasse de la centrale, le lévoglucosan étant un marqueur spécifique de la combustion de biomasse végétale, mais cela reste à confirmer dans le temps et sur les autres sites alentours.

En effet, le lévoglucosan est un traceur spécifique de la combustion de biomasse et n'était donc pas émis lors de la combustion de charbon. Quant aux HAP, les émissions de ces composés associés aux installations fonctionnant à la biomasse sont généralement inférieures à celles des centrales à charbon pour des chaudières comparables (caractéristiques techniques).

Toutefois, cet écart peut varier selon les conditions de combustion ou le type et les caractéristiques de la biomasse utilisée (Wielgosinski et al., 2017 ; Krumal et al., 2019).

Or, les concentrations de HAP rencontrées en 2023 étaient particulièrement élevées et ont globalement diminué en 2025, contrairement à celles du lévoglucosan. Leurs évolutions semblent donc peu corrélées, bien que la combustion de biomasse produise ces deux catégories de composés. Il est possible que les HAP mesurés dans les lichens à des niveaux très élevés en 2023 soient le résultat d'une persistance de l'exposition passée aux émissions de la centrale lorsqu'elle fonctionnait au charbon exclusivement. En effet, depuis sa conversion et la mise en service de la tranche biomasse en 2018, la centrale a connu une activité très dégradée, avec des arrêts prolongés en 2019, 2020, 2021 et 2024, et un fonctionnement partiel les autres années. Cette baisse d'activité a pu entraîner une baisse des concentrations en HAP observées dans les lichens. À l'inverse, l'augmentation des concentrations en lévoglucosan pourrait être liée à la nouvelle utilisation de biomasse. Les résultats obtenus pourraient ainsi correspondre à une phase transitoire au cours de laquelle l'influence des émissions historiques liées au charbon s'atténue tandis que celle de la combustion de biomasse devient plus perceptible.

Dans ce contexte, il serait particulièrement intéressant de poursuivre le suivi des concentrations de ces deux familles de composés au cours des prochaines années, afin d'observer leur évolution et de suivre l'impact du fonctionnement de la centrale à biomasse comparé aux niveaux passés sur l'accumulation des polluants dans les organismes vivants que sont les lichens.

Par ailleurs, seules les concentrations de HAP et de lévoglucosan rencontrées au niveau du site 1 sont restées relativement constantes entre 2023 et 2025. Or, ce site est situé à proximité du site de stockage de Mange-Garri, utilisé depuis plusieurs décennies pour des activités de stockage de résidus de bauxite par Altéo. Ces résidus, aussi appelés boues rouges, peuvent impacter la qualité de l'air via l'émission de poussières, cependant, elles contiennent principalement des métaux et ne constituent donc pas une source directe de HAP (Patel et al., 1986 ; Gelencser et al., 2011 ; Liu et al., 2014). L'interprétation des résultats sur ce site reste donc difficile. Étant également situé à proximité d'habitations et de parcelles agricoles, les concentrations de HAP et de lévoglucosan qui y sont retrouvées pourraient donc être plutôt issues du chauffage résidentiel et/ou de brûlage agricole.

Pour finir, contrairement à 2023, le mannosan a été détecté dans tous les échantillons (Annexe C3). L'étude des autres sucres issus de la combustion de cellulose (mannosan et galactosan) est encore en cours d'étude à l'Institut Ecocitoyen, et n'a jamais été réalisée à ce jour par d'autres scientifiques. L'Institut Ecocitoyen est d'ailleurs pionnier dans la mesure de l'accumulation de lévoglucosan dans les lichens comme biomarqueurs de la combustion de biomasse. Ces travaux, en partenariat avec le Laboratoire Chimie Environnement (Aix-Marseille Université) ont été reconnus scientifiquement par la publication d'un article dans une revue internationale (Dauphin et al., 2020).

Tableau 5 : Statistiques des concentrations en HAP par nombre de cycles et par année relevées dans les thalles de *X. parietina* sur l'ensemble des sites étudiés sur les communes de Gardanne et Meyreuil entre 2021 et 2025

(µg/kg)	2021 (n=1)	2023 (n=10)				2024 (n=2)				2025 (n=6)			
		Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max
2 cycles	41,5	47,2	43,5	19,0	88,3	19,3	19,3	14,2	24,3	28,1	26,4	20,9	42,9
3 cycles	187	404	362	241	694	69,4	69,4	64,2	74,6	158	129	86,1	322
4 cycles	424	784	743	447	1134	152	152	130	174	303	200	155	698
5 cycles	130	247	198	139	421	79,9	79,9	79,4	80,3	88,3	86,4	67,9	123
6 cycles	47,8	126	118	80,7	175	35,3	35,3	30,5	45,8	41,2	39,5	35,1	48,2
Total	830	1595	1453	978	2422	356	356	338	373	619	487	380	1235

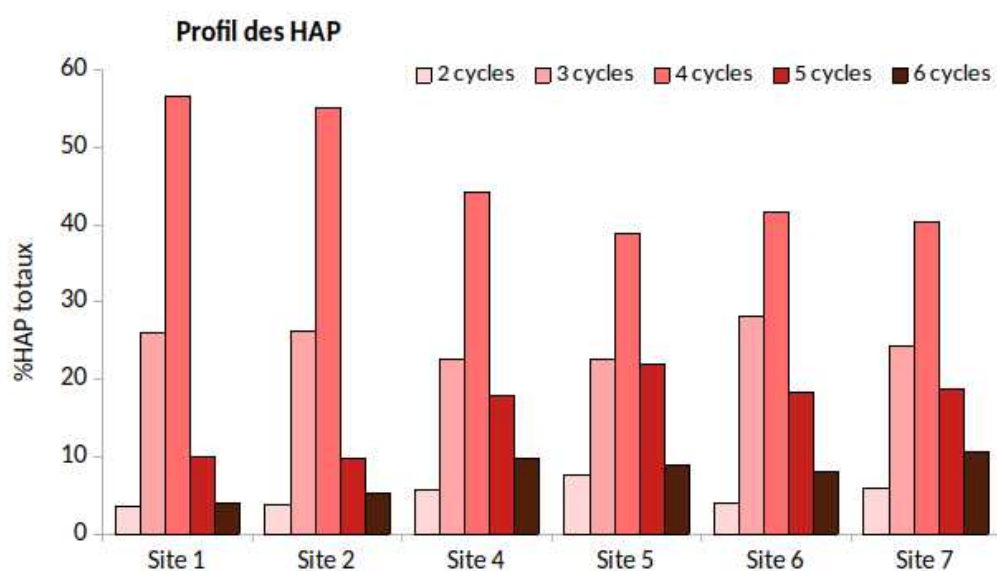


Figure 5 : Profils des HAP de chaque site étudié, regroupés par nombre de cycles

Tableau 6 : Statistiques des concentrations en lévoglucosan par année relevées dans les thalles de *X. parietina* sur l'ensemble des sites étudiés sur les communes de Gardanne et Meyreuil entre 2021 et 2025

	2021 (n=1)	2023 (n=6)				2024 (n=2)				2025 (n=3)			
		Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max
Lévoglucosan (ng/kg)	1149	320	295	150	570	563	563	487	638	442	435	350	550

Concentrations en HAP (2023 - 2025)

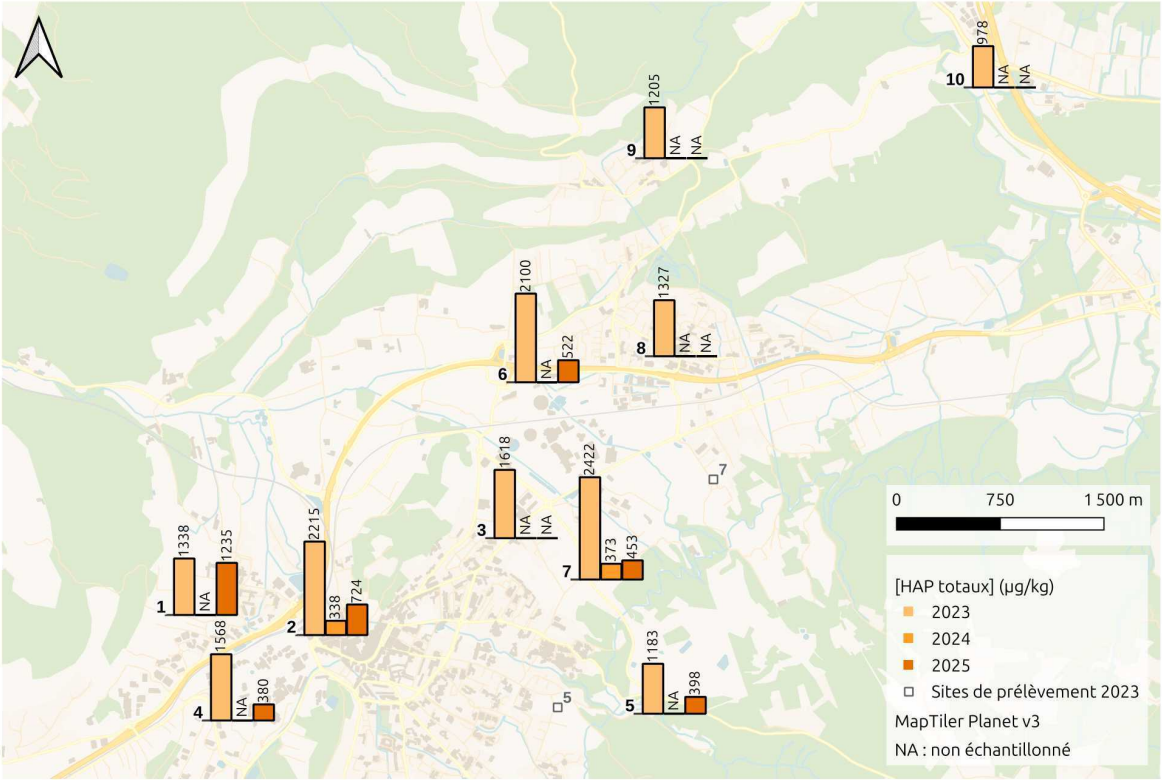


Figure 6 : Répartition géographique des concentrations en HAP totaux (en µg/kg) mesurées dans les lichens entre 2023 et 2025

Concentrations en lévoglucosan (2023 - 2025)

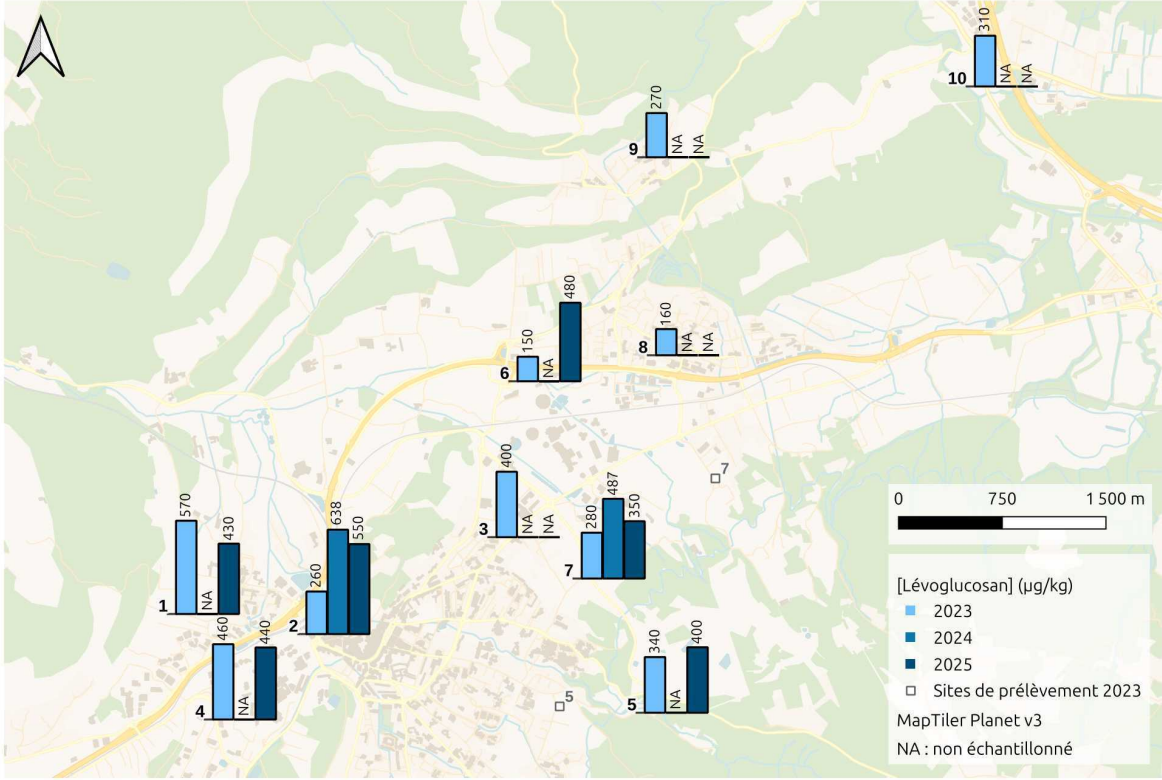


Figure 7 : Répartition géographique des concentrations en lévoglucosan (en µg/kg) mesurées dans les lichens entre 2023 et 2025

Bibliographie

Agnan, Y. (2013). Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France: sources, mécanismes et facteurs d'influence (Doctoral dissertation).

Augusto, S., Máguas, C., & Branquinho, C. (2009). Understanding the performance of different lichen species as biomonitors of atmospheric dioxins and furans: potential for intercalibration. *Ecotoxicology*, 18, 1036-1042.

Cecconi, E., Fortuna, L., Benesperi, R., Bianchi, E., Brunialti, G., Contardo, T., ... & Tretiach, M. (2019). New interpretative scales for lichen bioaccumulation data: the Italian proposal. *Atmosphere*, 10(3), 136.

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, 460675.

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.

FactoMineR (2024). (<http://factominer.free.fr/index.html>)

Gelencsér, A., Kováts, N., Turóczy, B., Rostási, Á., Hoffer, A., Imre, K., ... & Pósfai, M. (2011). The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust. *Environmental science & technology*, 45(4), 1608-1615.

INERIS. (2018). Caractérisation des émissions de dioxines et furanes bromés des incinérateurs de déchets non dangereux.

Křůmal, K., Mikuška, P., Horák, J., Hopan, F., & Krpec, K. (2019). Comparison of emissions of gaseous and particulate pollutants from the combustion of biomass and coal in modern and old-type boilers used for residential heating in the Czech Republic, Central Europe. *Chemosphere*, 229, 51-59.

Liu, W., Chen, X., Li, W., Yu, Y., & Yan, K. (2014). Environmental assessment, management and utilization of red mud in China. *Journal of Cleaner Production*, 84, 606-610.

Nimis, P. L., Scheidegger, C., & Wolseley, P. A. (2002). Monitoring with lichens—monitoring lichens: an introduction. Springer Netherlands (pp. 1-4).

Patel, C. B., Jain, V. K., & Pandey, G. S. (1986). Micro pollutants in red mud waste of aluminium plant. *International journal of environmental analytical chemistry*, 25(4), 269-274.

QGIS (2026). (<https://qgis.org/>)

R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (<https://www.R-project.org/>).

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, 8364-8376.

Ratier, A., Dron, J. (2018). Bioaccumulation de polluants dans les lichens, étude des effets saisonniers, de l'incertitude liée au prélèvement et comparaison de deux espèces. Rapport d'étude, Institut Écociroyen pour la Connaissance des Pollutions.

Reuillard, M. (2023). Biosurveillance atmosphérique de la Métropole Aix-Marseille-Provence : Campagne lichens 2021. Rapport d'étude, Institut Écociroyen pour la Connaissance des Pollutions.

Reuillard, M., Austruy, A., Dron, J. (2024). Biosurveillance lichénique : exposition atmosphérique des territoires de Gardanne et Meyreuil. Institut Écociroyen pour la Connaissance des Pollutions.

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.

United Nations Environment Programme. (2019). Global Mercury Assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland.

Van Haluwyn C, Cuny D, Garrec J-P. (2011). Introduction générale – Définitions, concepts et enjeux généraux de la biosurveillance de la qualité de l'air. *Pollution Atmosphérique*, Numéro spécial : 7-13.

Wielgosiński, G., Łechtańska, P., & Namiecińska, O. (2017). Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. *Journal of the Energy Institute*, 90(5), 787-796.

ANNEXE A

Méthodologie – Mesures de bioaccumulation lichénique

Choix de l'espèce *Xanthoria parietina*

X. parietina est un lichen foliacé composé d'un thalle jaune, pouvant tendre vers le vert lorsqu'il est à l'ombre ou vers l'orange lorsqu'il est en plein soleil. C'est une espèce nitrophile, héliophile et toxitolérante. Elle se développe sur tout type de substrat, tels que l'écorce des arbres ou sur de la roche, et préférentiellement sur des substrats à pH élevés. Elle est dite « polluo-tolérante » (tolérante à la pollution), on peut donc la retrouver sur les sites pollués. Cette espèce est commune partout en France et dans la plupart des régions du monde. Elle est donc utilisée dans de nombreux travaux scientifiques et c'est l'une des plus étudiées en biosurveillance de la qualité de l'air (Augusto *et al.*, 2009 ; Agnan, 2013 ; Ratier *et al.*, 2018).

Prélèvements des échantillons de *Xanthoria parietina*

Les prélèvements de *X. parietina* ont été effectués le 6 octobre 2025. Pour chacun des sites, des thalles entiers de *X. parietina* ont été prélevés sur des troncs d'arbres feuillus, à au moins 1 m de hauteur, pour s'affranchir de l'influence du sol qui pourrait interférer sur la composition de l'échantillon. Aussi, les prélèvements ont été faits sur l'ensemble des orientations du tronc et sur un maximum d'espèces d'arbres différentes, afin que l'échantillonnage soit représentatif de la qualité de l'air globale sur site (tableau des espèces de phorophytes échantillonnées ci-dessous).

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 et les gants changés. Les échantillons obtenus faisaient entre 10 et 15 g et ont été stockés dans des flacons en HPDE préalablement étiquetés, et immédiatement conservés à 4 °C en attendant leur préparation en laboratoire.

N° site	Espèces de phorophytes échantillonnées
1	7 <i>Prunus sp.</i> 2 <i>Quercus robur</i>
2	4 <i>Ulmus sp.</i> 3 <i>Celtis australis</i>
4	4 <i>Acer negundo</i>
5	1 <i>Malus sp.</i> 1 <i>Populus sp.</i> 3 <i>Ulmus sp.</i> 1 <i>Robinia pseudoacacia</i>
6	5 <i>Prunus sp.</i> 1 <i>Quercus sp.</i> 1 <i>Populus sp.</i>
7	7 <i>Prunus sp.</i>

Préparation des échantillons

Au laboratoire, les échantillons de lichens ont été triés dans les trois jours suivant leur prélèvement avec du matériel non métallique préalablement lavé à l'eau ultra-pure (pince en HPDE et couteau en céramique). Ce tri permet de retirer délicatement les poussières, débris de végétaux, espèces non souhaitées et morceaux d'écorce des thalles, pour ne garder que les tissus de *X. parietina*. Pour chaque site, environ 10 g de lichens triés ont été ainsi obtenus, lesquels ont été stockés dans des flacons en HPDE à -45 °C. Puis, ils ont 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 à 7 %, rincées à l'eau ultra-pure, lavées à l'acétone puis à nouveau rincées à l'eau ultra-pure.

Le matériel a ensuite été séché à l'étuve à 50 °C, et refroidi à température ambiante avant d'être réutilisé. Après le broyage, la fine poudre a été récupérée dans des flacons NALGENE® préalablement étiquetés, puis stockés à -45 °C en attendant la réalisation des analyses chimiques.

Analyse chimique des échantillons

➤ Métaux

Au total, 20 éléments métalliques et métalloïdes ont été analysés dans les lichens.

Liste des métaux analysés

Abréviation	Nom
Ag	Argent
Al	Aluminium
As	Arsenic
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
Co	Cobalt
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
Fe	Fer
Hg	Mercure
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
Ni	Nickel
Pb	Plomb
Sb	Antimoine
Sn	Étain
Ti	Titane
Tl	Thallium
Zn	Zinc

Ces analyses ont été faites au Laboratoire d'Analyses Chimiques de la Faculté de Pharmacie de la Timone à Marseille. Pour chaque échantillon, 300 mg de lichens ont été mis en solution dans 10 mL d'eau régale (7,5 mL d'acide nitrique à 65 % + 2,5 mL d'acide chlorhydrique à 37 %). La minéralisation a été réalisée à l'aide d'un système micro-ondes (Ethos advanced μ -wave labstation) pendant 20 min à 180 °C. Les échantillons ont ensuite été dilués 5 fois dans de l'eau ultra-pure et analysés par ICP/MS (spectrométrie de masse, détection par plasma induit par couplage). À noter que le mercure a été minéralisé différemment des autres éléments : environ 300 mg d'échantillon sec ont été mis en solution dans de l'acide nitrique 65 % (5 mL) et une solution d'or (100 μ L) afin de créer un complexe Hg-Au permettant d'éviter toute perte de mercure par volatilisation. Cette solution a été laissée au repos pendant 72 h à température ambiante avant d'être analysée par ICP/MS. Aussi, l'analyse d'un échantillon de lichen certifié (IAEA 336) a permis de vérifier la fiabilité des résultats (Annexe B1).

➤ **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)**

L'analyse des HAP a porté sur les 16 composés définis comme prioritaires par l'agence américaine de l'environnement (US-EPA) au Laboratoire d'Analyses Chimiques de la Faculté de Pharmacie de La Timone à Marseille, sur la base de leur méthode exposée par Sarrazin *et al.* (2006).

Liste des HAP analysés

Liste des 16 HAP définis comme prioritaires par l'US-EPA		
Abréviation	Nom	Nombre de cycles
Nap	Naphtalène	2
Ace Acy Flu Ant	Acénaphthylène Acénaphtène Fluorène Anthracène	3
Phe FIA Pyr BaA Chr	Phénanthène Fluoranthène Pyrène Benzo(a)anthracène Chrysène	4
DBA BaP BkF BbF	Dibenzo(a,h)anthracène Benzo(a)pyrène Benzo(k)fluoranthène Benzo(b)fluoranthène	5
Bpe Ipy	Benzo(ghi)pérylène Indeno(1,2,3-cd)pyrène	6

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.

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. Enfin, l'analyse d'échantillons certifiés (mollusques marin, IAEA 451) et d'ajouts dosés ont permis de s'assurer de la fiabilité des résultats (Annexe B2).

➤ **Lévoglucosan**

Cette analyse porte sur trois sucres anhydres (lévoglucosan, mannosan et galactosan). Sa méthodologie a été développée conjointement par le Laboratoire Chimie Environnement de Aix-Marseille Université et l'Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions.

Une prise d'essai d'environ 0,5 g a été effectuée sur les échantillons de lichens. Le lévoglucosan 13C6 a été utilisé comme étalon interne (dopage avec 25 µL d'une solution à 50 mg/L). L'extraction des composés d'intérêt a été réalisée par ultrasons à l'aide d'un solvant organique (le dichlorométhane) avec trois cycles d'extraction de 10 minutes et 10 mL de dichlorométhane par cycle. Les extraits ont été filtrés sur membrane PTFE 0.45 µm puis recombinaés et concentrés à un volume d'environ 5 mL. L'extrait a été ensuite soumis à une étape de purification sur cartouche SPE (Discovery DSC-Si, 1 g, 6 mL, Sigma-Aldrich) afin d'éliminer un maximum de composés interférents. L'étape de lavage de la cartouche a été réalisée avec 6 mL d'hexane puis 6 mL de dichlorométhane. 6 mL d'acétone ont été utilisés pour l'élution. L'extrait purifié a été récupéré, transféré dans l'acétonitrile et évaporé jusqu'à un volume final de 500 µL. Une étape de dérivation a été réalisée afin de rendre les composés polaires plus volatils. Pour cela, 50 µL d'échantillon ont été mélangés avec 50 µL de pyridine et 75 µL de BSTFA+1%TMCS, puis placés à l'étuve à 70°C pendant 90 min. Après réaction, les échantillons ont été immédiatement analysés par chromatographie gazeuse (Trace GC1300, Thermo Scientific) équipée d'une colonne TG-5MS (30 m x 0.25 mm x 0.25 µm, Thermo Scientific) et couplée à un détecteur de masse de type simple quadripôle (ISQ7000, Thermo Scientific) opérant simultanément en mode fullscan et en mode SIM ciblé sur les ions des composés d'intérêt.

La méthode a également été appliquée à un matériau de référence certifié IAEA 451 (mollusque marin), pour lequel il n'existe pas de valeur de référence connue pour le lévoglucosan et ses isomères.

Les limites de détection (LOD) et de quantification (LOQ) ont été déterminées conformément à l'approche de l'US-EPA, à partir de l'analyse répétée ($n = 6$) d'un étalon à faible concentration. L'écart-type (s) des concentrations calculées a été déterminé. La LOD a été estimée selon la relation $LOD = t \times s$, où t correspond à la valeur de la loi de Student pour un niveau de confiance de 99 % et $n - 1$ degrés de liberté ($t = 3,143$). La LOQ a été estimée selon la relation $LOQ = 10 \times s$. Ces limites ayant été déterminées à partir d'une solution étalon, elles ne prennent pas en compte les effets de matrice susceptibles d'affecter la réponse analytique. En conséquence, les valeurs de LOD et LOQ obtenues sont probablement sous-estimées par rapport à celles qui seraient obtenues dans des échantillons réels.

➤ **Dioxines et furanes (PCDD/F)**

L'analyse des PCDD/F a été effectuée au Laboratoire Départemental de la Drôme à Valence, accrédité COFRAC, sur les 17 congénères de dioxines (PCDD) et furanes (PCDF) de la liste établie par l'OMS.

Liste des PCDD/F analysés

Liste des 7 PCDD (dioxines) et 10 furanes (PCDF) définis comme prioritaires par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)	
Abréviations	Nom
PCDD1	2,3,7,8 Tetrachlorodibenzodioxine
PCDD2	1,2,3,7,8 Pentachlorodibenzodioxine
PCDD3	1,2,3,4,7,8 Hexachlorodibenzodioxine
PCDD4	1,2,3,6,7,8 Hexachlorodibenzodioxine
PCDD5	1,2,3,7,8,9 Hexachlorodibenzodioxine
PCDD6	1,2,3,4,6,7,8 Heptachlorodibenzodioxine
OCDD	1,2,3,4,6,7,8,9 Octachlorodibenzodioxine
PCDF1	2,3,7,8 Tetrachlorodibenzofurane
PCDF2	1,2,3,7,8 Pentachlorodibenzofurane
PCDF3	2,3,4,7,8 Pentachlorodibenzofurane
PCDF4	1,2,3,4,7,8 Hexachlorodibenzofurane
PCDF5	1,2,3,6,7,8 Hexachlorodibenzofurane
PCDF6	2,3,4,6,7,8 Hexachlorodibenzofurane
PCDF7	1,2,3,7,8,9 Hexachlorodibenzofurane
PCDF8	1,2,3,4,7,8,9 Heptachlorodibenzofurane
PCDF9	1,2,3,4,6,7,8 Heptachlorodibenzofurane
OCDF	1,2,3,4,6,7,8,9 Octachlorodibenzofurane

Ils ont été analysés suivant la méthode mise au point par le LABERCA (LABERCA/DGAI/DPCB-al.1.02). Celle-ci est basée sur un traitement au cuivre (pour enlever le soufre) et l'ajout de traceurs ^{13}C pour la quantification et l'acidification des échantillons de lichens. Après ajout des standards internes, une purification sur cartouche a été réalisée (Florisil : séparation des PCDD/F et PCB ; charbon-célite 18 % : séparation des congénères de PCDF et PCDD). Par la suite, les échantillons ont été analysés en GC/HRMS (chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse haute résolution). Les dioxines et furanes ont été séparées sur une colonne apolaire (RTX – PCB 40 m x 0.18 mm x 0.18 μm) avec de l'hélium comme gaz vecteur, à 1 mL/min. Un volume de 2 μL a été injecté à 300 °C en mode splitless. Le programme de température du chromatogramme était séparé en 3 étapes : à l'état initial la température était de 140 °C puis augmentait jusqu'à 210 °C dans un premier temps ; puis atteignait le second palier à 250 °C, et enfin augmentait jusqu'à atteindre 310 °C. La détection a été réalisée par un spectromètre de masse à haute résolution (HRMS), à double focalisation (Jeol 800D). L'effet toxique de ces composés sur les organismes a été évalué en additionnant la toxicité des 17 composés listés par l'OMS. Pour ce faire, on utilise la toxicité relative de chacun des composés (facteurs de toxicité définis au niveau international par l'OMS, I-TEF), exprimée en équivalents de toxicité (I-TEQ, International-Toxicity Equivalent Quantity). La dioxine dite de Seveso (2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine ou TCDD) est ainsi classée au niveau de toxicité 1.

ANNEXE B

Résultats des contrôles de qualité et des analyses de matériels certifiés

Annexe B1 : Métaux

	IAEA-336 mesuré (n = 2)	IAEA-336 valeurs certifiées
Ag	< LQ	/
Al	673	570 - 790
As	0,61	0,55 - 0,71
Ca	320	/
Cd	0,05	0,10 - 0,13
Co	0,31	0,24 - 0,34
Cr	1,14	0,89 - 1,23
Cu	3,78	3,10 - 4,10
Fe	526	380 - 480
Hg	0,17	0,16 - 0,24
Mn	79,0	56,0 - 70,0
Mo	0,05	/
Ni	0,89	/
Pb	4,57	4,30 - 5,50
Sb	0,05	0,06 - 0,08
Se	< LQ	/
Sn	0,41	/
Te	< LQ	/
Ti	21,0	/
Tl	< LQ	/
V	1,65	1,25 - 1,69
Zn	30,0	27,0 - 33,8

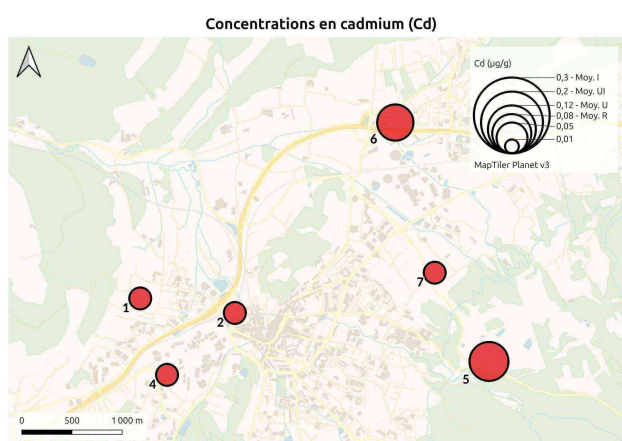
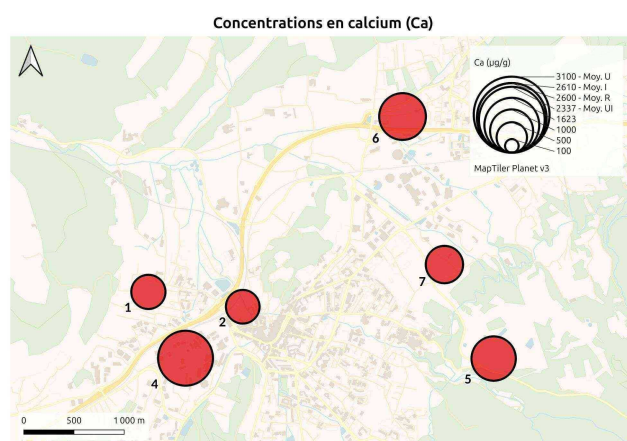
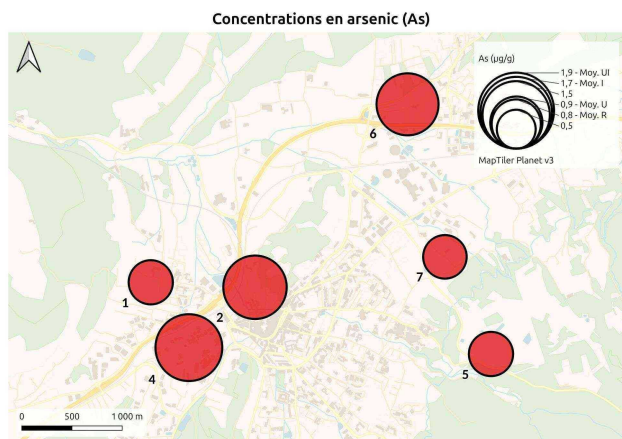
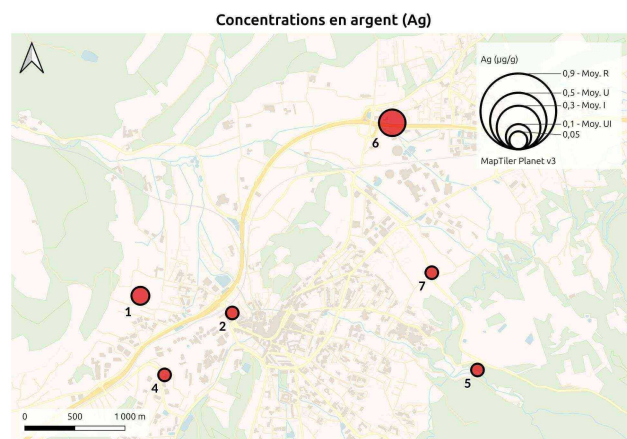
Annexe B2 : HAP

	IAEA-451 mesuré (n = 6)	IAEA-451 valeurs certifiées
Nap	14,2	14,8 ± 1,2
Ace	3,02	/
Acy	2,08	/
Fle	2,89	/
Phe	18,4	15,8 ± 5,6
Ant	6,11	/
FlA	49,4	49,3 ± 3,2
Pyr	39,7	40,0 ± 4,6
BaA	17,9	19,2 ± 1,3
Chr	24,4	26,9 ± 2,0
BbF	37,1	35,8 ± 6,2
BkF	15,4	14,7 ± 3,2
BaP	15,5	18,2 ± 2,4
DBA	6,13	5,3 ± 1,4
Ipy	21,0	/
Bpe	17,3	19,5 ± 2,4

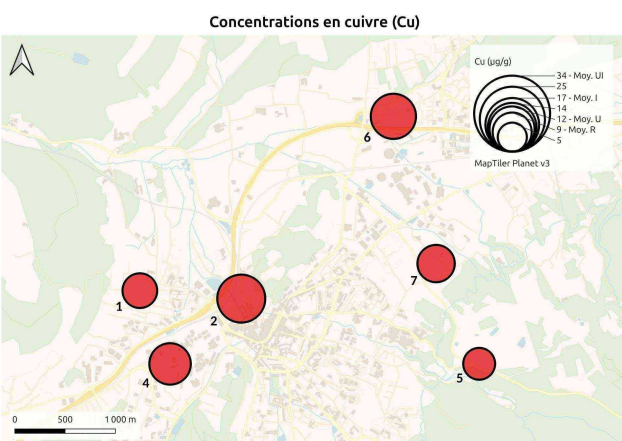
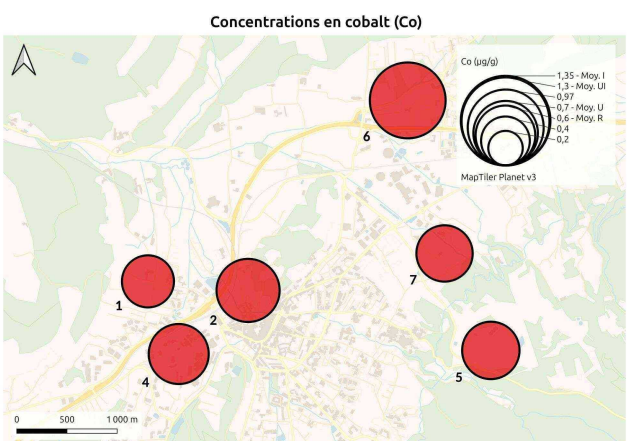
ANNEXE C

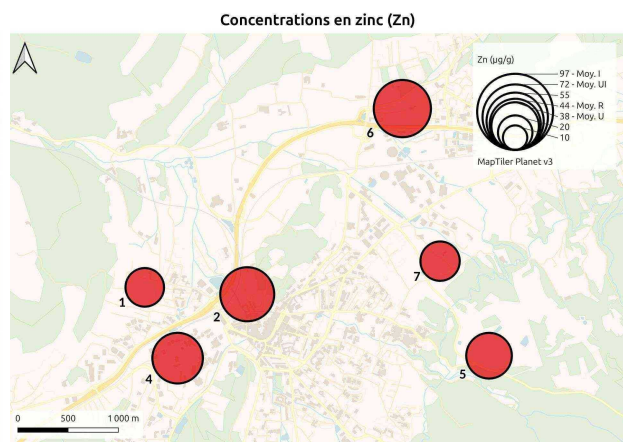
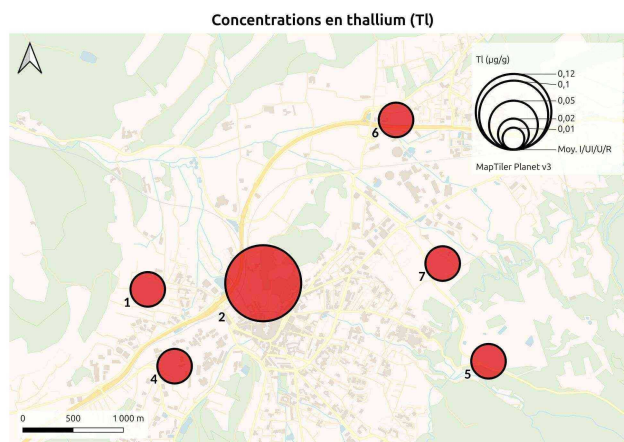
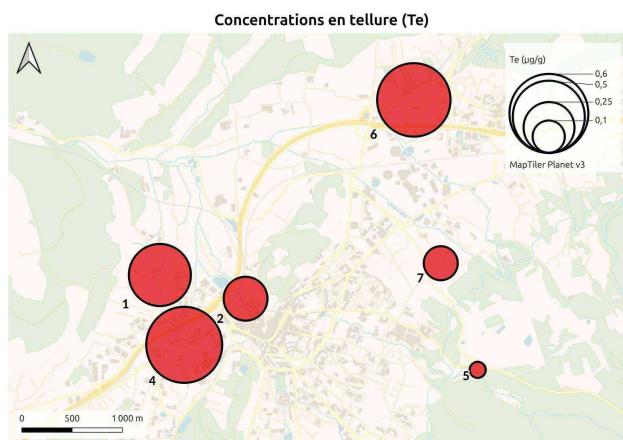
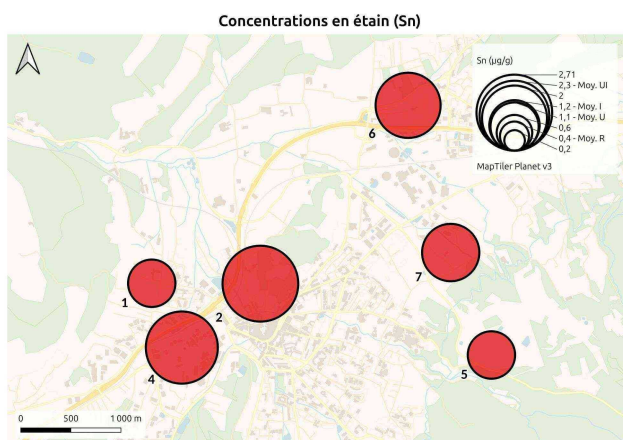
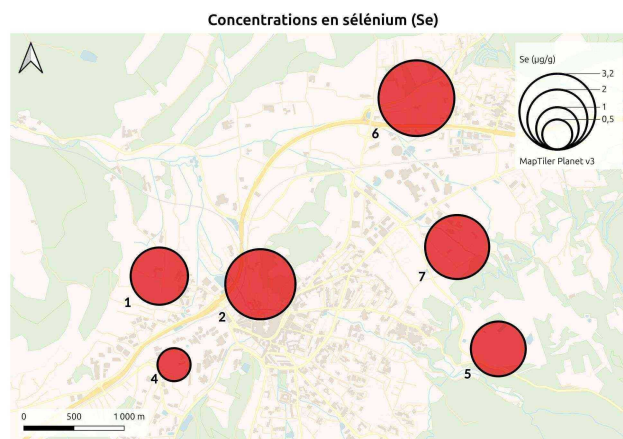
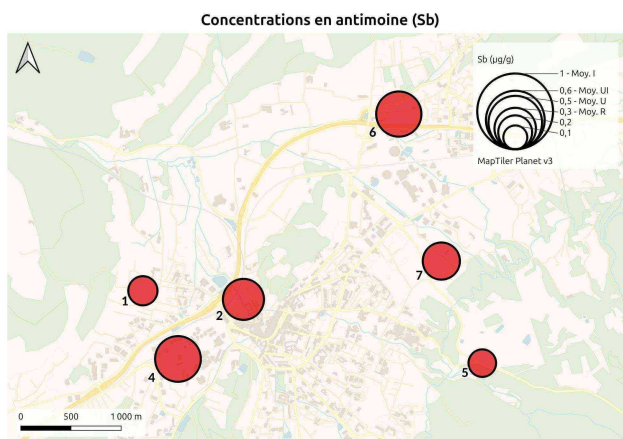
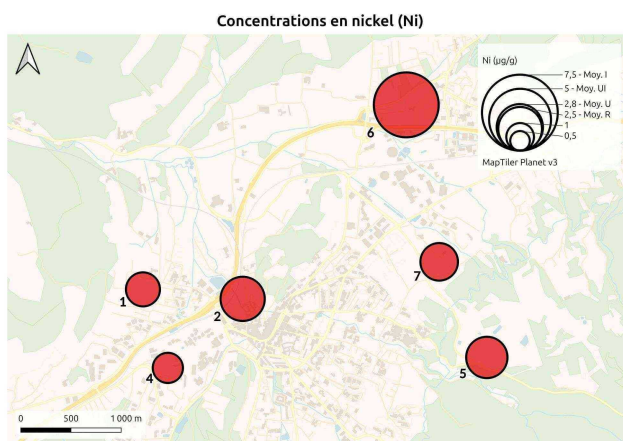
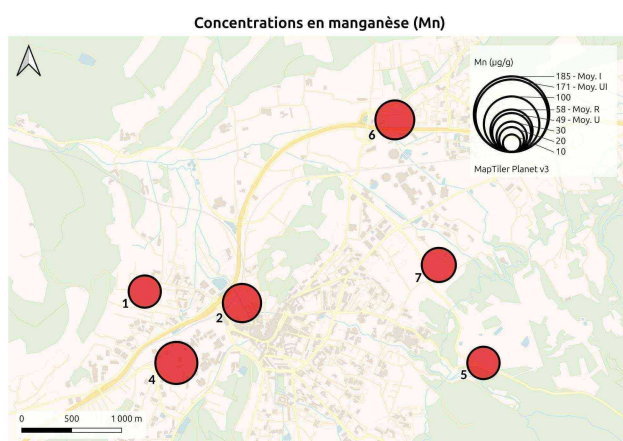
Résultats détaillés des mesures de concentrations dans les lichens

Annexe C1 : Métaux



Résultats





Annexe C2 : Dioxines et furanes

	Site 4	Site 5	Site 7
TEQ	0,49	2,03	0,57
PCDD1	< LQ	< LQ	< LQ
PCDD2	0,1	0,67	0,18
PCDD3	< LQ	0,25	< LQ
PCDD4	0,22	0,9	0,3
PCDD5	0,24	0,62	0,3
PCDD6	2,48	4,87	3,01
OCDD	8,57	15,89	14
PCDD totaux	11,71	23,24	17,9
PCDF1	0,42	1,27	0,53
PCDF2	0,44	3,1	0,36
PCDF3	0,3	1,35	0,3
PCDF4	0,26	1,39	0,28
PCDF5	0,26	1,31	0,29
PCDF6	0,18	1,28	0,22
PCDF7	< LQ	< LQ	< LQ
PCDF8	< LQ	0,34	< LQ
PCDF9	1,01	3,45	0,96
OCDF	0,78	2,06	0,89
PCDF totaux	3,75	15,59	3,93

Annexe C3 : HAP

	Site 1	Site 2	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7
Nap	42,92	26,42	21,62	30,42	20,85	26,35
Ace	15,91	9,66	8,18	9,23	6,63	14,08
Acy	13,57	7,15	6,91	9,63	9,48	12,99
Fle	17,02	21,50	14,74	15,13	20,57	17,93
Phe	251,92	139,08	45,09	45,49	98,50	54,19
Ant	23,83	12,91	11,18	10,53	12,20	10,97
FIA	333,46	171,69	45,88	31,08	65,89	44,97
Pyr	249,98	77,34	49,05	48,35	73,37	55,24
BaA	26,22	25,12	25,36	22,06	32,49	21,89
Chr	88,78	125,02	47,54	53,59	44,96	61,15
BbF	27,44	25,40	21,31	17,26	25,22	14,50
BkF	51,53	14,57	17,72	32,82	25,47	34,36
BaP	26,23	19,44	12,78	26,17	32,73	21,55
DBA	18,03	11,08	16,06	11,16	11,92	14,98
Ipy	28,15	16,24	22,74	13,21	27,01	22,78
Bpe	20,00	21,34	14,28	21,92	14,38	25,19
Total	1234,98	723,97	380,42	398,05	521,69	453,13

Annexe C4 : Lévo-glucosan

	Site 1	Site 2	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7
Lévo-glucosan	0,43	0,55	0,44	0,40	0,48	0,35
Mannosan	0,11	0,22	0,12	0,11	0,16	0,12
Galactosan	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ

ANNEXE D

Analyse en Composantes Principales

