



UFR Sciences
2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS Cedex 01



AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Briec, CS 84 215, BP 35042 -
RENNES Cedex
Université de Rennes I
1, 2 rue du Thabor, CS 46510 - 35065 RENNES
Cedex



Fonderie LEMER
3 rue de l'Europe
44470 Carquefou

Mémoire de Fin d'Etudes

Master 2 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal

Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées / Option : Filières de l'Horticulture et du Végétal Urbain

Année universitaire : 2016 - 2017

**CONDUITE DU PROJET « VEGETALISATION DU MILIEU INDUSTRIEL » AU SEIN D'UNE
FONDERIE DE PLOMB AFIN D'AMELIORER LA QUALITE DE L'AIR**

Par : Marine RENAUDON

Soutenu à Angers le : 19 septembre 2017

Maître de stage : Maggy CONSTANTIN

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

M2 ProTeV

2016-2017

Je, soussigné (e) :

Marine Renaudon

déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caract ris e.

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilis es pour ce rapport, rédigé au cours de mon master 2 ProTeV.

Je m'engage également à respecter les consignes données pour la rédaction de ce rapport.

A : Nantes

Le : 28/08/17

Signature :



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier la fonderie, et notamment M. Lécole, qui a cru en ce projet. Travailler dans cet environnement et avec les différentes équipes a été un enrichissement autant professionnel que personnel, : le plateau et ses nombreuses pauses café ensoleillées accompagnées de distribution de bonbons et viennoiseries quotidiennes, la mécanique pour leur humour décapant en toute circonstance, l'atelier pour leur grand intérêt à l'égard de mon projet, le magasin pour la bonne humeur, et enfin la « nurserie » pour leurs blagues, leurs aventures et leur super aquarium). Une pensée toute particulière à ma maître de stage, Maggy Constantin, et son « tapis volant » sans qui ce projet n'aurait jamais germé, et avec qui les journées pleines de bonne humeur ne se ressemblaient pas.

Je remercie enfin les partenaires du LPG et d'Agrocampus, Thierry Lebeau, René Guenon, Pierre Gaudin, Etienne Chantoiseau, et ceux qui ont collaboré d'un peu plus loin, avec qui j'ai pu échanger de nombreux avis, et qui m'ont fourni les moyens techniques et scientifiques de réaliser ce projet.

GLOSSAIRE/ABBREVIATIONS

Ab/dsorption : mécanismes de sorption des molécules par la couche externe des feuilles. L'adsorption correspond à l'agglomération des molécules à la surface, alors que l'absorption correspond à l'internalisation des molécules au travers de la couche (Birbaum *et al.*, 2010).

BSE: Black-Scattered Electron ; technique d'imagerie équivalente à la MEB à effet de champ (Koch *et al.*, 2008).

Cire : dépôt de polymères à la surface de la cuticule et ayant pour fonction de limiter les pertes d'eau de la plante (Kerstiens, 1996 ; Petit, 2013).

Creuset : creux en métal ou autre matériau servant à la fusion du plomb et de ses alliages (Source interne).

Cuticule : matrice recouvrant l'épiderme et associant des molécules de type polysaccharides ainsi que d'autres polymères comme la cutine (acides gras et glycérol) ou encore la cutane (Kerstiens, 1996 ; Petit, 2013).

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement soumise à autorisation (Site gouvernemental)

ICP-OES : Spectromètre d'Emission Optique Couplé à Plasma Inductif ; technique analytique permettant de quantifier la teneur en éléments d'un matériau ou substrat. L'émission optique s'appuie sur l'excitation thermique des ions du plasma qui vont émettre des photons à des longueurs d'ondes différentes. Ces longueurs d'onde étant caractéristiques de chaque élément, ces derniers peuvent être quantifiés (*EAG Laboratories*).

Minéralisation : masse solide (sol, plante ou autre) mise en solution, sous forme liquide, par co-action d'acides et de micro-ondes (Protocole LPG Nantes)

Phyllosphère : zone aérienne de la plante qui est colonisée par des microbes (bactéries, champignons...) (Lindow et Brandl, 2003).

Ppm : parties par million ; unité de mesure (1 ppm = 1 mg/kg)(AIRPARIF).

PM: Particulate Matter ; particule présente dans l'environnement qui se classe en différentes tailles liées à l'aérodynamisme d'une sphère dans l'air (μm)(AIRPARIF).

Rhizosphère : communauté d'organismes qui colonisent le réseau racinaire de la plante (Enseignement).

ROS : Reactive Oxygen Species, produits formés lors de la dégradation de molécules lors de stress oxydatif au sein des cellules (Cours M1 Biovigpa)

Trichome : émergence épidermique, qui peut être simple ou ramifié (poil foliaire) (Enseignement).

LISTE DES ANNEXES

Annexe I. Photographies des différents emplacements de collectes de particules.

Annexe II. Photographie d'un collecteur.

Annexe III. Calculs utilisés pour l'estimation de l'efficacité de sorption du plomb.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Coupe transversale d'une feuille de chou (*Brassica oleracea*) avec une cuticule réduite par traitement à l'acide trichloracétique TCA

Figure 2. Photographies en Microscopie Electronique à Balayage (MEB) des cires épicuticulaires

Figure 3. Microphotographie BSE de l'ultrastructure de la cire épicuticulaires de *Ginkgo biloba*

Figure 4. Relations entre les différents facteurs environnementaux et phénotypiques dans la fixation du plomb par les plantes

Figure 5. Photos satellites de l'entreprise

Figure 6. Disposition des points de collecte des particules atmosphériques au sein l'atelier.

Figure 7. A : *Helixine soleirolii*. B : *Aloe vera*. C : *Sinningia speciosa*. D : *Spathiphyllum wallisii*

Figure 8. Localisation et visuel des emplacements des plantes dans l'atelier.

Figure 9. Protocole schématique du dosage du plomb dans les parties aériennes.

Figure 10. Quantité moyenne de plomb (mg) déposée par cm² au bout de 32 jours sur les collecteurs.

Figure 11. Cinétique de la masse moyenne de plomb (mg) déposée pour chaque espèce.

Figure 12. Masse moyenne de plomb (mg) déposée en fonction de la zone au bout de 20 jours (gauche) et 42 jours (droite) d'exposition.

Figure 13. Masse moyenne de plomb (mg) déposée pour chaque espèce au bout de 42 jours avec ou sans lavage des feuilles.

Figure 14. Observations au microscope numérique d'une feuille d'*Helixine soleirolii*

Figure 15. Observations au microscope numérique de poils foliaires d'une feuille d'*Helixine soleirolii*

Figure 16. Observations au microscope numérique de poils foliaires d'une feuille de *Sinningia speciosa*

Figure 17. Observations au microscope numérique de la face supérieure d'une feuille de *Spathiphyllum*

Figure 18. Observation au microscope numérique en lumière rasante d'une feuille d'*Aloe vera*

Figure 19. Plan et chiffrage du prototype de structure verticale végétalisée

Tableau I. Descriptif des points de collecte des particules atmosphériques.

Contexte actuel

La pollution de l'air est un problème majeur accompagnant une urbanisation croissante. Avec l'augmentation de l'urbanisation, l'activité qui y est liée (circulation de véhicules, industries) croît également, contribuant à la production de polluants notamment métalliques et par extension à l'exposition à ces polluants. Parmi ces polluants tels que le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) ou le nickel (Ni), le plomb (Pb) abonde dans les airs depuis le XX^{ème} siècle où il est utilisé comme antidétonant dans les carburants, ou dans les peintures par exemple. Depuis, la réglementation a permis de faire baisser sa présence dans l'environnement en interdisant ces composés plombés. Il reste néanmoins très répandu et présente des risques sérieux pour la santé lorsqu'il est assimilé par les voies respiratoires ou par ingestion (Bismuth *et al.*, 2000 ; Dumat C., 2003) puisqu'il a été classé substance d'intérêt majeur par l'European REACH (Uzu *et al.*, 2009).

Les principales sources d'émissions de particules atmosphériques ou « *particulate matter* » (PM) proviennent de l'activité routière et de fonderies en relarguant dans l'air du plomb, cuivre, zinc ou encore du cadmium . Bien que les différents secteurs d'activité aient baissé leurs émissions dans l'air (Citepa, avril 2016) et que les systèmes de filtration augmentent en efficacité, ils laissent toujours s'échapper les plus fines particules dont la granulométrie est classée selon le diamètre aérodynamique d'une particule sphérique (AIRPARIF, 2008):

- PM₁₀ (10µm) considérées comme particules fines,
- PM_{2.5} (2.5µm) considérées comme très fines,
- PM_{0.1} (0.1µm) considérées comme nanoparticules (ou ultrafines).

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses recherches se sont intéressées à la pollution en bordure de routes, montrant la forte contamination en polluants issus des émissions aériennes par les véhicules (Casselles, 1998 ; Djingova *et al.*, 2002 ; Krolak, 2003 ; Yang *et al.*, 2016). D'autres s'intéressent également à la pollution que peut engendrer le secteur de l'industrie (Rao *et al.*, 1992 ; Dappe *et al.*, 2014 ; Schreck *et al.*, 2012ab ; Uzu *et al.*, 2009). Schreck *et al.* (2012) ont notamment montré qu'une fonderie de recyclage de batterie de voiture aux alentours de Toulouse pouvait émettre jusqu'à 328kg de particules en une année, dont 91% faisaient moins de 10µm. Par conséquent, il est important de trouver des alternatives afin de capter les particules dans l'atmosphère.

La solution du végétal

Parmi les solutions, il est connu depuis longtemps que les plantes sont capables de capter les éléments en suspension dans l'atmosphère (Little et Wiffen, 1976 ; Little, 1977 ; Ward, 1990). De nombreux exemples ont été vérifiés dans le cas d'arbres en centre-ville en Chine (Wang *et al.*, 2015), d'arbres et arbustes de bords de route en Inde (Bhattacharya *et al.*, 2011), sur des espèces consommables comme la laitue (*Lactuca sativa*), le persil (*Petroselinum crispum*), et même le ray-grass (*Lolium perenne* L.) (Schreck *et al.*, 2012b), ou encore sur des espèces plus communes comme le plantain (*Plantago lanceolata*) et le pissenlit (*Taraxacum officinale*) (Djingova *et al.*, 2003).

Les végétaux accumulent les particules issus des émissions, que ça soit par le sol lors des retombées atmosphériques, via la rhizosphère ; ou dans l'air, via la phyllosphère (Schreck *et al.*, 2012b). La voie aérienne est une voie intéressante d'assimilation des particules puisque la plupart de ces dernières peuvent être relativement peu mobiles dans le sol et donc peu captées par le système racinaire. Par le biais de cette voie aérienne, un ensemble de facteurs vont impacter la capture des particules. Concernant ces particules, leur concentration dans l'air ainsi que leur taille sont des facteurs majeurs. En effet, plus la concentration sera élevée, plus la probabilité que des particules soient fixées est élevée, bien qu'en conséquence l'efficacité de captation diminue proportionnellement avec la quantité de particules fixées. Ensuite, la taille des particules va influencer le type de sorption : les plus grosses ($>10\mu\text{m}$, 2.5, 2.0 et $1\mu\text{m}$) peuvent être agglomérées entre elles à la surface de la feuille alors que les plus petites qui sont qualifiées de nanoparticules ($<1\mu\text{m}$) peuvent être incorporées dans les couches de la feuille (Wang *et al.*, 2015). L'intégration de nanoparticules a été testée partiellement par Birbaum *et al.* (2010) avec des particules de cérium sur du maïs (*Zea mays*). Il a été montré, lors d'immersion de feuilles dans une solution de cérium, que l'accumulation se faisait toujours même après 12h (jusqu'à 80mg Ce/kg MS). L'accumulation de particules aurait dû cesser si les particules avaient seulement saturé la surface. Or, dans ce cas-ci, ils en ont déduit que les particules pénètrent dans la cuticule. Le cas de nanoparticules polymérisées incorporées dans l'épiderme, et notamment dans les stomates de *Vicia faba*, a également été rapporté (Eichert *et al.*, 2008). Zehnder *et al.* (1995) ont testé le transfert du radiocésium par contamination aérienne et ont observé que 60 à 66 % de la radioactivité peut être éliminée après lavage, sauf pour des contaminations antérieures à deux mois. Ces résultats indiqueraient qu'au-delà d'une certaine durée, le césium serait transféré dans les tissus. Encore, Dappe *et al.* (2014) ont montré que le plomb, même après lavage des feuilles, reste présent dans des feuilles de choux avec ou sans cuticule. Des coupes transversales de ces feuilles observées en microscopie électronique ont

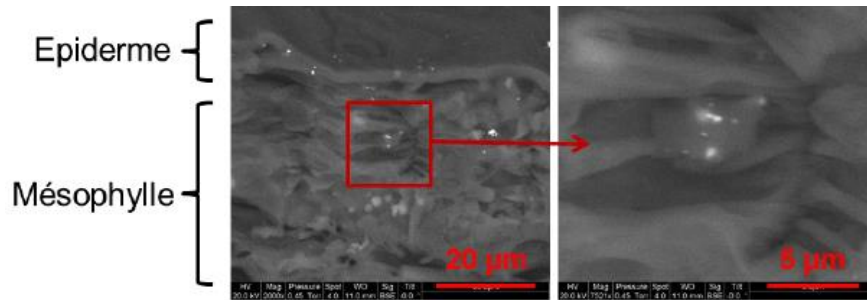


Figure 1. Coupe transversale d'une feuille de chou (*Brassica oleracea*) avec une cuticule réduite par traitement à l'acide trichloracétique TCA. Des particules de plomb sont détectées au microscope électronique à balayage dans la cuticule et le mésophylle (Dappe *et al.*, 2014).

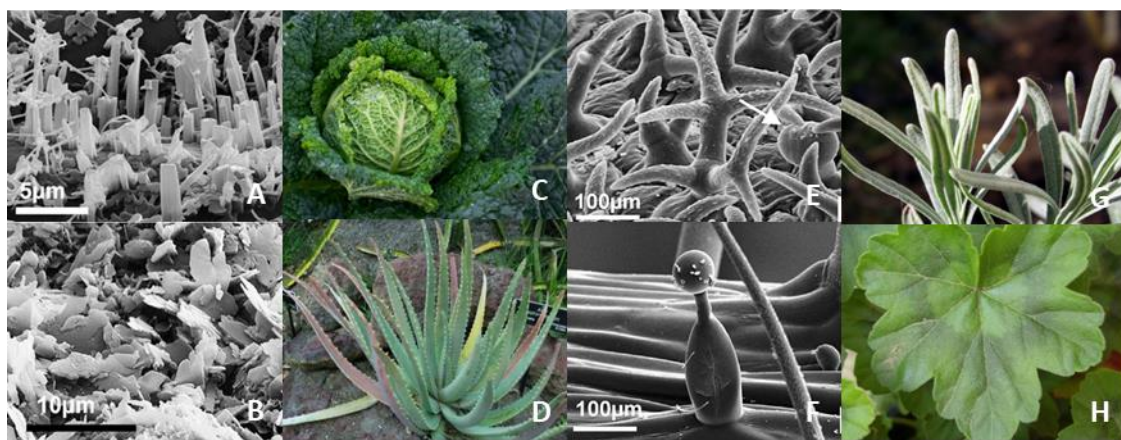


Figure 2. Photographies en Microscopie Electronique à Balayage (MEB) des cires épicuticulaires de (A) *Brassica oleracea* en forme de balai et (B) *Aloe porphyrostachys* en forme de plaques. Photographies MEB d'appendices foliaires de (E) *Lavandula angustifolia* en forme de poils ramifiés et (F) *Pelargonium zonale* en forme de poils glandulaires. Photographies de feuilles à l'échelle macroscopique de (C) *Brassica oleracea*, (D) *Aloe porphyrostachys*, (G) *Lavandula angustifolia*, (H) *Pelargonium zonale* (Koch *et al.*, 2008).

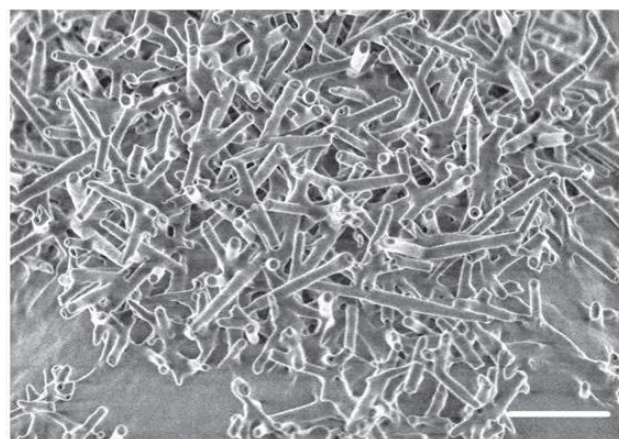


Figure 3. Microphotographie BSE de l'ultrastructure de la cire épicuticulaires de *Ginkgo biloba* (bar = 1 μm) (Wang *et al.*, 2015).

révélé la présence de fines particules dans les tissus plus profonds. Il pourrait alors y avoir un transfert au-delà de l'épiderme et vers le mésophylle palissadique (Fig. 1).

Le transfert au travers de la cuticule peut se faire par différentes voies. Les particules peuvent être dissoutes dans la cuticule, ou être transloquées après passage par les stomates. La cuticule forme une matrice de polysaccharides et de polymères (cutine, cutane ...) qui recouvre les cellules épidermiques (Kerstiens, 1996). Cette matrice plus ou moins épaisse selon les espèces et l'environnement, peut elle-même être recouverte par un dépôt de cires (cires épicuticulaires) ou intégrer des éléments cireux (cires intracuticulaires). L'agencement et la composition de ces cires (plaquettes, tubules...), qui sont classés en 23 groupes (Barthlott *et al.*, 1998), vont par conséquent influencer le dépôt des particules à la surface des feuilles.

En ce qui concerne la dissolution, Wang *et al.* (2015) ont montré que le *Ginkgo biloba* avait une ultrastructure cireuse complexe faite de fines tubules (Fig. 3). Le fait que la cire soit tubuleuse et non lisse influence l'aire d'interface des particules avec la cire. L'accumulation de PM en était donc réduite pour le ginkgo (de 1 à 2.5×10^6 particules/mm²) par rapport à l'Orme (jusqu'à plus de 4×10^6 particules/mm²).

Le rôle des stomates, quant à lui, a été mis en évidence notamment par Liang *et al.* (2017), où il est montré que le nombre et la taille de ces structures influencent la concentration en particules accumulées. Les tests ont par exemple montré que *Platanus acerifolia*, qui possédait la plus grande densité stomatique, était un des plus grands accumulateurs de particules atmosphériques (Cu : 6.37mg/kg MS ; Pb : 0.85mg/kg MS). Dans les stomates, le plomb pourrait aussi se stocker dans les cellules stomatiques et former des nécroses. D'autres particularités morphologiques des feuilles peuvent impacter la capture des particules. Les trichomes aideraient à la capture en fixant les particules entre elles (Räsänen *et al.*, 2013) (Fig. 2C). Des poils glandulaires, en sécrétant des substances collantes comme chez le Géranium, participeraient aussi à la fixation des PM (Fig. 2F). Saebo *et al.* (2010) ont d'ailleurs démontré une corrélation entre l'accumulation de PM et la quantité de poils et de surfaces cireuses sur les feuilles.

En se basant sur de nombreuses études ayant utilisé des espèces variées ainsi que sur des connaissances générales en besoins des espèces, quatre d'entre elles sont sélectionnées : l'hélixine (*Helxine soleirolii*), le spathiphyllum, le gloxinia (*Sinningia speciosa*) et l'aloë (*Aloe vera*). L'hélixine est choisie pour son caractère buissonnant, et sa grande densité de feuillage bien que ses feuilles soient relativement petites. Shahid *et al.* (2017) explique que des petites feuilles rugueuses sont plus efficaces pour la fixation de particules que de grandes feuilles

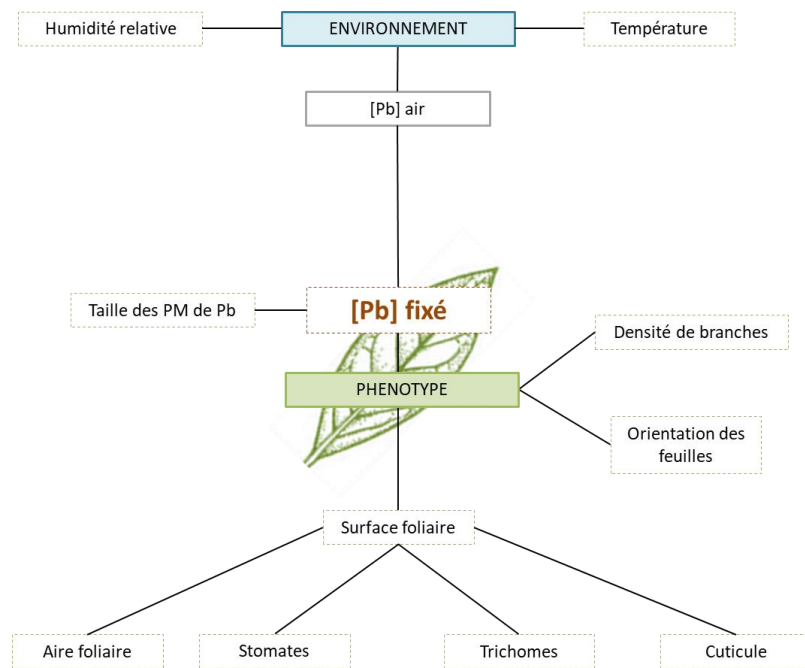


Figure 4. Relations entre les différents facteurs environnementaux et phénotypiques dans la fixation du plomb par les plantes (Source personnelle). Des paramètres environnementaux comme l'humidité relative et la température vont influencer la teneur en plomb dans l'air. Des températures plus chaudes et une faible hygrométrie participeront favorablement à la suspension des particules dans l'air. De ce fait, la quantité de plomb assimilé par les feuilles va dépendre des particules en suspension mais aussi de leur taille, selon laquelle le plomb sera plus ou moins retenu. Le plomb fixé est également dépendant du phénotype foliaire. Plusieurs paramètres interviennent dans le phénotype : stomates (nombre, taille), trichomes, cuticule (ultrastructure), aire foliaire (dépendante de la taille de feuille et du nombre de feuilles). En parallèle, la structure générale de la plante peut intervenir, comme l'orientation des feuilles par rapport aux vents, ainsi que la densité de branchages.

lisses. Le spathiphyllum est choisi car il présente de grandes feuilles à l'aspect cireux. L'ultrastructure plate de ses cires ainsi que ses stomates particuliers pourraient faire de cette espèce une bonne accumulatrice de particules (Sutter, 1985). Le gloxinia est sélectionné pour la pilosité de ses feuilles. L'aloë est sélectionné pour sa forte épaisseur de cuticule (Sriprapat *et al.*, 2014).

La capacité des plantes à accumuler les particules dépend donc de l'espèce et de ses caractéristiques foliaires associées. Pourront y être ajoutés des caractères plus généraux comme la densité de branchage ou encore l'orientation des feuilles. Une espèce à ramification multiplie son feuillage et augmente sa surface foliaire. Quant aux feuilles orientées verticalement, Shahid *et al.* (2017) ont démontré qu'elles présentaient un désavantage pour le dépôt des particules. Concernant les paramètres environnementaux que sont ici la température et l'hygrométrie, ils influencent aussi la capacité de sorption des plantes, en jouant notamment sur l'ouverture et la fermeture des stomates (Schreck *et al.*, 2012a).

Globalement, tous ces facteurs sont liés les uns aux autres, et vont influencer les performances de fixation/accumulation des particules atmosphériques. Les interactions peuvent être schématisées simplement afin de comprendre ce qui est à prendre en compte pour le choix des espèces lors de l'expérience (Fig. 4).

Le projet « Végétalisation du Milieu Industriel »

L'amélioration par les plantes de la qualité de l'air intérieur est un sujet en vogue actuellement. En parallèle, la capacité des plantes à capter les particules métalliques dans l'air est aussi prouvée. A la croisée de ces deux concepts, l'idée d'intégrer des plantes qui pourraient accumuler le plomb présent dans un espace intérieur, via leurs parties aériennes, a été évoquée au sein de l'entreprise LEMER. La société basant son activité sur la fonte du plomb pour divers secteurs (nautique, pêche, nucléaire), elle est par conséquent catégorisée comme une entreprise polluante (Autorisation préfectorale : ICPE). En installant des végétaux dans ses locaux, la fonderie souhaite dépolluer l'air tout en donnant une image « verte » de l'entreprise. Le projet « Végétalisation du Milieu Industriel » (VMI) est donc élaboré en partenariat scientifique avec le Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique (LPG) de l'Université de Nantes, ainsi qu'avec l'équipe EPHor à l'Agrocampus d'Angers. Le LPG-Nantes apporte son expertise pour l'analyse des métaux dans différentes matrices (eau, sol, plante) et en dépollution de matrices environnementales par l'utilisation de plantes (phytoextraction). La seconde équipe, quant à elle, maîtrise les sujets tels que les besoins des végétaux en éclairage, l'écologie des sols/substrats ou encore la microclimatologie. L'objectif principal du

projet est donc de savoir si des plantes peuvent être intégrées dans un atelier de fonderie de plomb, et si oui, lesquelles seraient les plus efficaces pour fixer (voire accumuler) les particules en suspension dans l'air.

Pour répondre au projet, de nombreuses questions ont été posées et des contraintes sont rapidement apparues : l'atelier présente peu de sources lumineuses ainsi que des variations de températures au cours de l'année allant de 2-3°C à 40°C. En parallèle, le contexte de l'industrie du plomb impose l'interdiction de tout contact entre l'eau et le métal en fusion. Enfin, l'aspect social s'avère aussi être une part non négligeable, la communication (affiches, discussions) étant donc nécessaire au bon déroulement du projet. Cependant, le contexte en intérieur n'apporte pas que des contraintes, mais permet aussi de se soustraire de certains paramètres comme la pluie et le vent qui pourraient modifier le taux de déposition de particules sur les feuilles.

Afin de répondre à l'objectif, plusieurs étapes de tests sont mises en place. La première phase vise à estimer le dépôt potentiel des particules sur des collecteurs répartis dans l'atelier. Ces premiers résultats permettront d'estimer la quantité de plomb déposée sur une surface et sur une durée donnée, ainsi que de localiser les zones les plus contaminées de l'atelier. La deuxième phase vise quant à elle à tester le potentiel de sorption des particules de plomb de différentes espèces végétales en pot. En choisissant quatre espèces à caractères morphologiques différents, il sera possible de tester quelles caractéristiques d'une plante constituent un bon « filtre à particules ». En complément de tester des caractères phénotypiques, il sera intéressant de savoir si le plomb s'accumule en surface seulement, où s'il est également internalisé au sein des tissus foliaires. Afin de différencier le Pb sorbé de celui assimilé, les feuilles subiront un traitement permettant d'éliminer le Pb sorbé, et ne laissant que la part qui a été internalisée dans les feuilles. Ces résultats permettront de savoir si la fixation du plomb sera limitée par une saturation de la surface foliaire, ou si le plomb pourra être transféré dans les couches cellulaires plus profondes et donc être sorbé en plus grande quantité.

L'aboutissement de ces deux phases doit entraîner par la suite le design d'un système de végétalisation verticale. La validation des expérimentations devra permettre d'adapter ce qui a été fait à une plus grande échelle, de façon à rendre réellement viable un système végétal dépolluant.

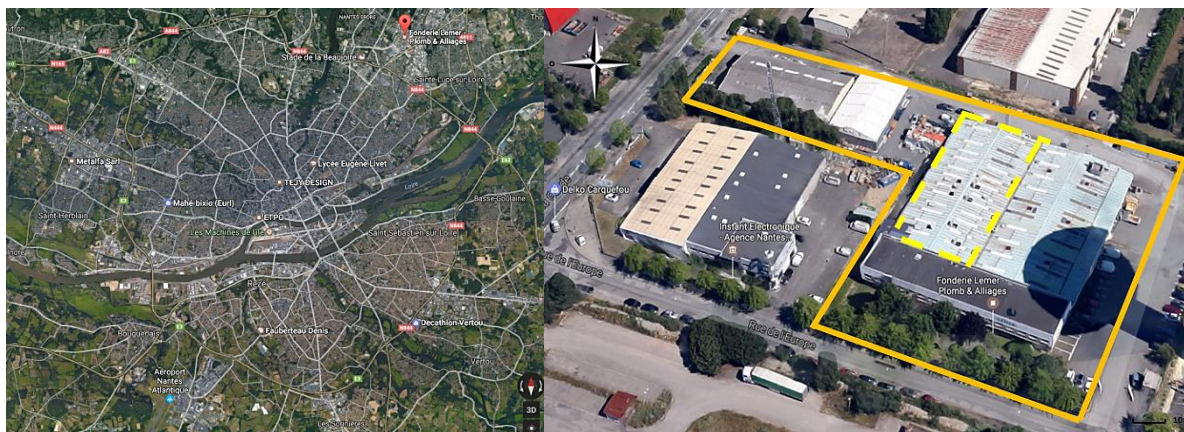


Figure 5. A : Photo satellite de la ville de Nantes et localisation du site de Carquefou de l'entreprise LEMER. **B :** Photo satellite des locaux du site de Carquefou de l'entreprise LEMER (orange) et surface de l'atelier (tirets jaunes) (Google Earth, 03/04/2017).

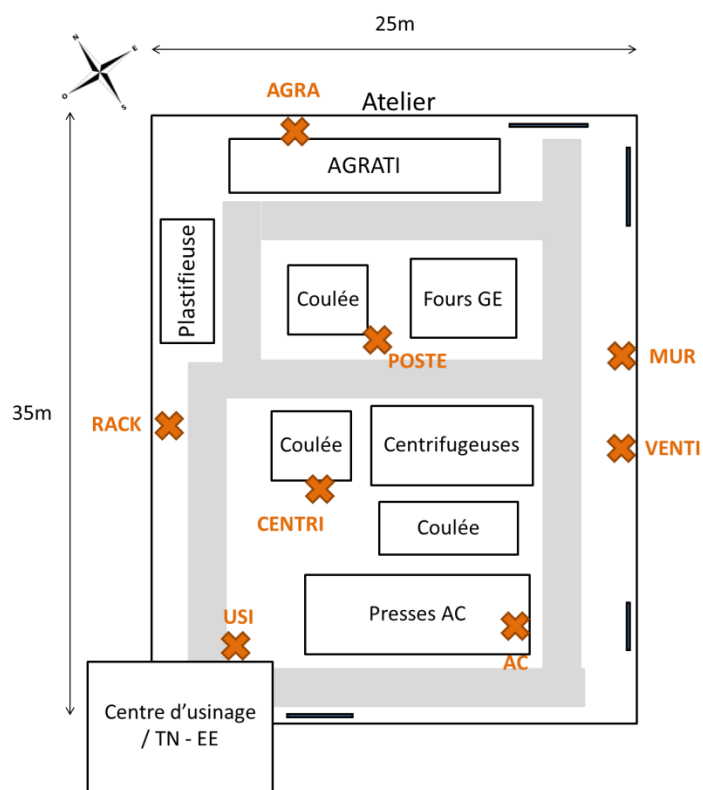


Figure 6. Disposition des points de collecte des particules atmosphériques au sein l'atelier.

Description du site

Localisation géographique de l'entreprise

Le siège de l'entreprise est localisé à la frontière entre Carquefou et Nantes (3 rue de l'Europe, 44470 Carquefou). Les locaux se situent en périphérie de la ville dans la zone industrielle au nord-est (47°15'43N, 1°30'23W) (Fig. 5A).

Le site de Carquefou est composé de trois bâtiments : le bâtiment principal comportant les bureaux, l'atelier et le magasin ; le hangar de stockage où sont entreposés les stocks ; et le « moulin » où sont réalisées la tampographie, la fissure des billes de plomb et la mise en boîte (Fig. 5B). La mise en place des expériences ne concerne que la partie « atelier » des bâtiments, puisque c'est là que l'entreprise souhaite tester l'amélioration de l'air par les plantes.

L'atelier

L'espace d'atelier, d'après les plans fournis, présente une surface de 850m². La hauteur de bâtiment est d'environ 5 mètres. Un système d'aspiration de l'air est installé dans l'atelier afin de récupérer la chaleur dégagée ainsi qu'une partie des poussières liées au travail des métaux. Des mesures de température et d'humidité relatives sont réalisées au sein de l'atelier afin d'avoir des indications sur les variations de ces paramètres. L'appareil utilisé est un *Thermopro modèle TP-50*. Les valeurs sont relevées tout au long de la journée par l'ensemble des employés, qui notent dans un tableau l'heure, la date, et les valeurs des paramètres affichées.

Déposition des particules atmosphériques de plomb

Matériel de collecte des particules

Des boîtes de Pétri carrée de dimension 120×120mm servent de collecteurs. Des carrés de tissu (grammage : ~3.5mg/cm²) sont découpés dans une bande, à la taille des boîtes. Les carrés sont collés à l'aide d'un morceau de scotch double-face sur le fond des boîtes et sur le couvercle afin d'optimiser la surface de collecte des particules (Annexe II). La surface échantillonnée est de 144cm² pour un carré de tissu.

Tableau I. Descriptif des points de collecte des particules atmosphériques.

| Point de mesure / Code | Hauteur (mètres) | Descriptif |
|------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AGRA | 1.95 | Sur une armoire de rangement, derrière les machines AGRATI, peu de passage |
| RACK | 2.30 | Sur le dessus d'un élément de rangement le long d'un mur, présence de bouche d'aération sur le haut du mur au-dessus |
| POSTE | 1.80 | Sur un poste de ponçage |
| USI | 2.00 | Sur le rayon supérieur d'un rack de stockage, à côté d'un passage entre le centre d'usinage et l'atelier |
| CENTRI | 1.95 | Sur une armoire électrique, près des machines de coulée |
| VENTI | 1.70 | Sur un élément ventilateur contre un mur |
| MUR | 2.00 2.80 | Sur des équerres en aluminium à différentes hauteurs |
| AC | 1.66 | Sur un boîtier de commande, proche d'une allée de passage |



Figure 7. A : *Helxine soleirolii*. B : *Aloe vera*. C : *Sinningia speciosa*. D : *Spathiphyllum wallisii*

Méthode de collecte des particules

Huit points de collecte sont repérés suite à une inspection de l'atelier, en veillant à trouver des endroits accessibles en hauteur, et le moins susceptibles d'être perturbés (Fig. 6). Un descriptif est renseigné afin de connaître l'environnement proche des points (Tab. I ; Annexe I).

Concernant le point de collecte MUR, plusieurs modalités sont choisies. Les collecteurs sont fixés à 2m et 2.80m.

Un seul collecteur est utilisé par point, et sont déposés aux différents emplacements. Fonds et couvercles de boîtes sont fixés à l'aide de scotch double-face. Pour le point MUR, les collecteurs sont fixés sur des équerres en aluminium, elles-mêmes fixées au mur par du scotch double-face. Les collecteurs sont déposés ouverts (31/03) de façon à ce que le tissu du fond et du couvercle soit exposé à l'air libre. Les fonds des collecteurs sont récupérés après 18 jours d'exposition (18/04), et les couvercles sont récupérés après 32 jours (02/05). Fonds et couvercles sont fermés à terme avec du film plastique afin d'éviter la resuspension des particules pendant le transport.

Déposition des particules atmosphériques de plomb sur les végétaux

Matériel végétal

Quatre espèces (Fig. 7) sont sélectionnées pour leurs caractères spéciaux de façon à tester quels critères peuvent être les plus efficaces.

L'helixine est choisie pour son caractère buissonnant, et sa grande densité de feuillage bien que ses feuilles soient relativement petites. Le spathiphyllum est choisi car il présente de grandes feuilles cireuses. Le gloxinia est sélectionné pour la pilosité de ses feuilles. L'aloë est sélectionné pour sa forte quantité de cuticule.

Méthode de collecte de particules via les végétaux

Pour chaque espèce, quatre plantes en pot sont disposées aux quatre emplacements dans l'atelier (Fig. 8).

Trois temps de prélèvements sont réalisés : à 0, 20 et 42 jours. Pour J0, 4 prélèvements aléatoires sur les pots sont réalisés, un pour chaque espèce. A J20 et J42, des prélèvements sont réalisés pour chaque espèce et pour chaque emplacement dans l'atelier. En plus, deux modalités de traitements sont distinguables pour 42 jours d'exposition : les feuilles sont lavées ou ne le sont pas. Le lavage est un rinçage à l'eau claire pendant 30 secondes, puis rinçage à

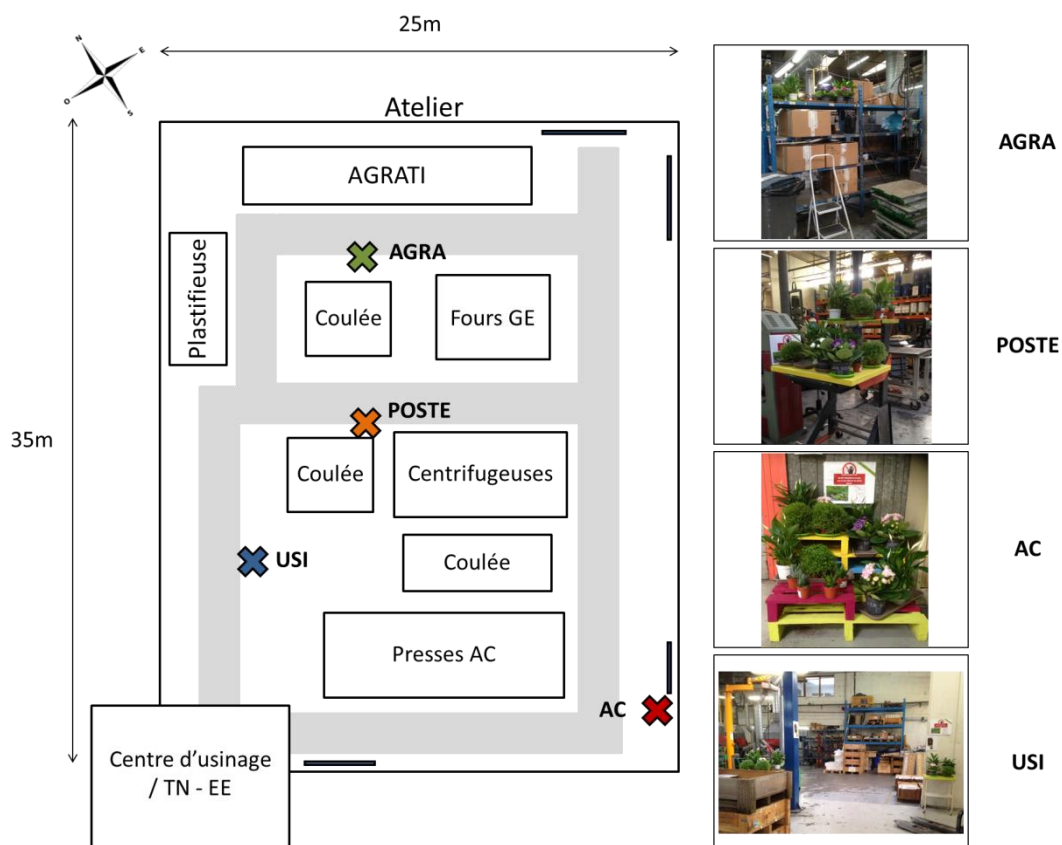


Figure 8. Localisation et visuel des emplacements des plantes dans l'atelier.

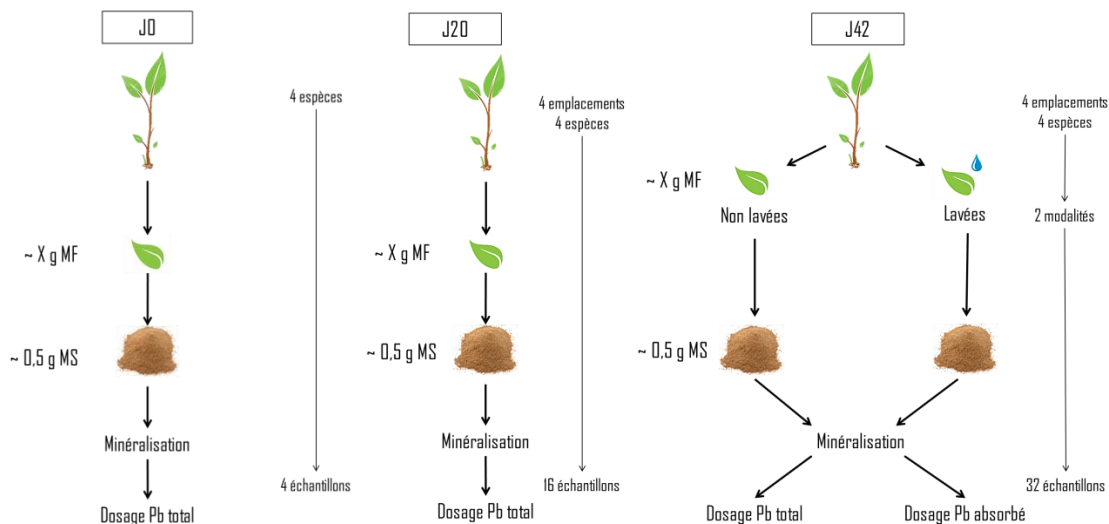


Figure 9. Protocole schématique du dosage du plomb dans les parties aériennes.

l'eau ultrapure pendant 1 minute. La masse fraîche est récoltée de façon à obtenir environ 0.5g de masse sèche pour chaque temps et chaque modalité. Les feuilles prélevées sont pesées séchées dans une étuve à 40°C pendant 5 jours. La matière sèche est réduite en poudre.

Dosage du plomb

Les quantifications en plomb sont réalisées au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (LPG) à l'Université de Nantes. Environ 500mg d'échantillons en poudre sont au préalable pesés et insérés dans des réacteurs pour subir une digestion par action d'acides nitrique (HNO_3), et peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Les échantillons sur tissus subissent en plus l'action d'acides chlorhydrique et fluorhydrique car beaucoup plus complexes à minéraliser. Les échantillons en solution suivent un cycle au micro-ondes automatisé (Mars6, CEM) atteignant les 170°C. Les minéralisats sont repris dans 25mL d'eau ultrapure et filtrés. Une fraction du filtrat est utilisée pour les analyses par ICP-OES (Spectromètre d'Emission Optique Couplé à Plasma Inductif). La concentration en plomb dans la solution est obtenue en coups par seconde (cps/s) et après traitement des données brutes, transformée en mg de plomb par kg de matière sèche (mg Pb/kg).

Les étapes du protocole expérimental pour la partie végétale sont schématisées par la figure 9.

Observation microscopique des feuilles

Les observations sont réalisées au Laboratoire de Planétologie et de Géodynamisme à l'Université de Nantes. L'appareil utilisé est un microscope numérique KEYENCE, relié à un moniteur VHX, et équipé d'un objectif VH-Z100R. Différents grossissements allant de $\times 100$ à $\times 1000$ sont utilisés afin de réaliser les images.

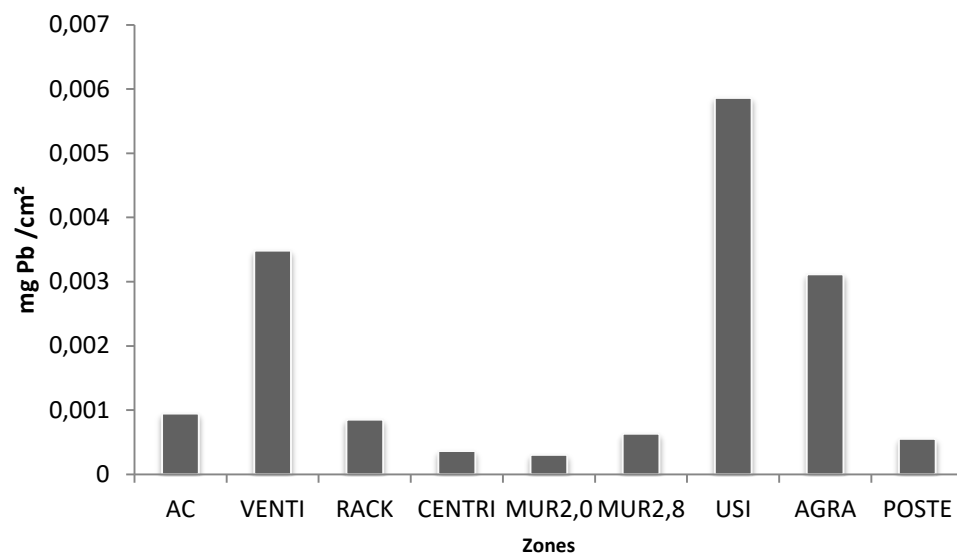


Figure 10. Quantité moyenne de plomb (mg) déposée par cm² au bout de 32 jours sur les collecteurs.

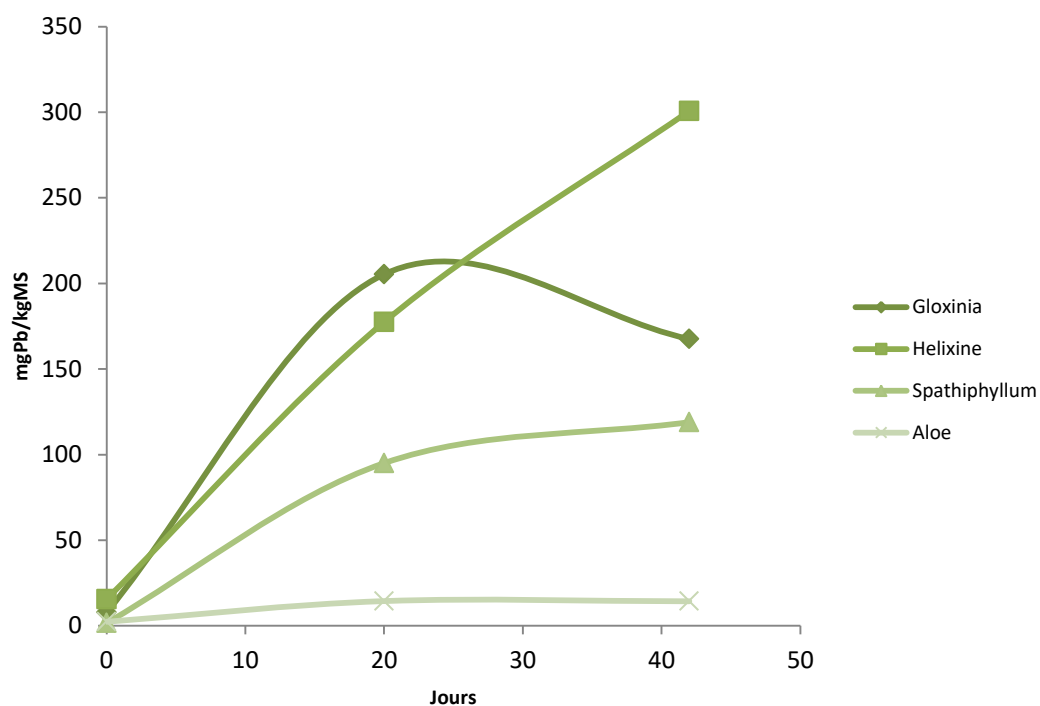


Figure 11. Cinétique de la masse moyenne de plomb (mg) déposée pour chaque espèce.

Déposition des particules atmosphériques

Les quantités de plomb déposées sur tissu permettent d'avoir une information qualitative sur la répartition des poussières dans l'atelier (Fig. 10). Il en ressort plusieurs zones intéressantes comme AC, VENTI, USI, AGR et POSTE.

Ces informations conditionnent en partie les zones sélectionnées pour la mesure du taux de déposition des particules sur les végétaux. Quatre zones sont retenues : AC, USI, AGRA et POSTE.

Déposition des particules atmosphériques de plomb sur les végétaux

Le but de cette série de mesures est d'évaluer si les espèces sont relativement efficaces dans la sorption des particules pour ces durées données (J20 et J42). Il est également intéressant d'estimer quelles zones sont les plus polluées, et donc à cibler pour une installation à plus grande envergure.

Cinétique de la déposition des particules en fonction des espèces

En comparant pour les quatre espèces les quantités de plomb accumulées en 42 jours (Fig. 11), il semblerait que l'helixine soit l'espèce présentant la plus forte quantité, pouvant atteindre 300.73mg Pb/kg. Au contraire, l'aloë semble être un mauvais accumulateur de particules avec seulement 14.34mg Pb/kg au bout de 42 jours. De plus, la masse de plomb stagne entre 20 et 42 jours. Pour le spathiphyllum, la quantité de masse accumulée semble approcher un plateau à 42 jours

En dissociant les deux temps, il est possible d'observer que l'accumulation du plomb n'est pas constante, et diffère selon les espèces. En 20 jours, le gloxinia semble être capable d'accumuler plus du double de plomb par rapport au spathiphyllum (205.33 contre 95.03 mg Pb/kg) ce qui en fait l'espèce la plus efficace à ce stade. Pourtant à 42 jours, l'écart se réduit entre ces deux espèces avec 167.55 et 118.97mg Pb/kg pour le gloxinia et le spathiphyllum. Le gloxinia a alors une quantité de plomb accumulée en 42 jours inférieure à celle accumulée en 20 jours. Ce résultat semble être incohérent, et pourrait s'expliquer par une manipulation des plantes qui aurait éliminé une partie des particules.

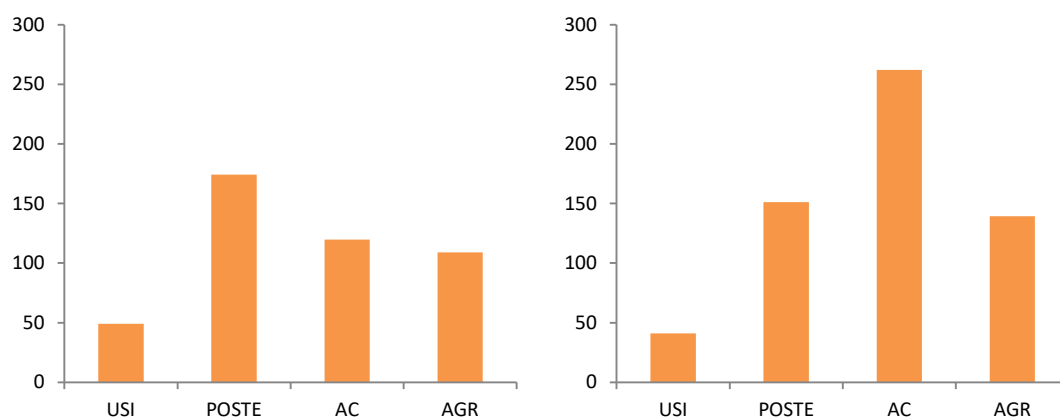


Figure 12. Masse moyenne de plomb (mg) déposée en fonction de la zone au bout de 20 jours (gauche) et 42 jours (droite) d'exposition.

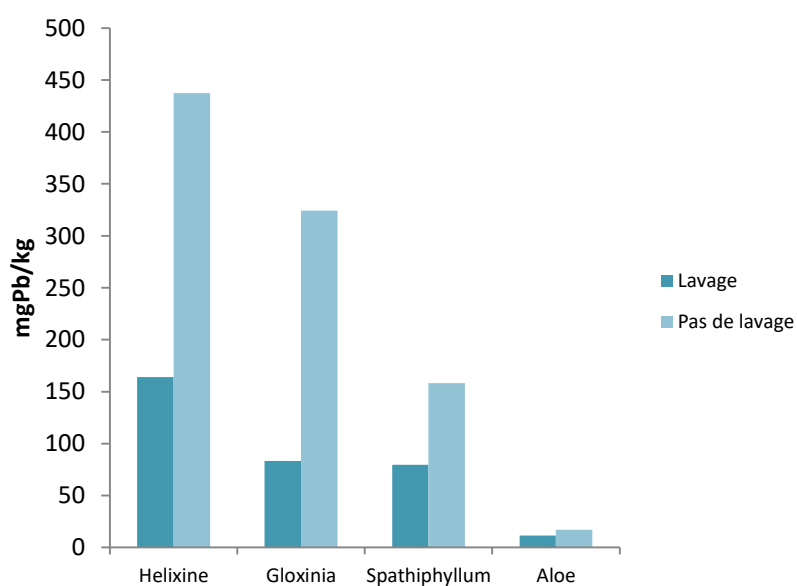


Figure 13. Masse moyenne de plomb (mg) déposée pour chaque espèce au bout de 42 jours avec ou sans lavage des feuilles.

Comparaison de la déposition de particules entre zones aux temps J20 et J42

A 20 jours d'exposition, les plantes présentes dans la zone « POSTE » ont accumulé le plus de particules (151.23mg Pb/kg). Les plantes en zones « AC » et « AGR » présentent des masses de particules sorbées relativement équivalentes (respectivement 119.76 et 109.05mg Pb/kg). A 40 jours d'exposition, c'est dans la zone « AC » que les plantes semblent avoir accumulées le plus de particules avec 261.98mg Pb/kg. La zone « POSTE » quant à elle, présente moins de particules sorbées qu'au bout de 20 jours. Cette incohérence pourrait venir du fait de la localisation de cette zone, située au cœur de l'atelier. La densité de circulation a provoqué des chutes de plantes, pouvant impacter le taux de déposition du plomb. La zone « USI » est dans les deux cas la moins favorable à la déposition des particules (<50mg Pb/kg)(Fig. 12).

Influence du lavage des feuilles

L'application d'un lavage sur les feuilles semble avoir un impact sur la quantité de particules accumulées à leur surface (Fig. 13). Dans les cas de l'helixine, le gloxinia et le spathiphyllum, le taux de rétention des particules s'élève à 38 %, 26% et 50% respectivement. Pour l'aloë, après lavage, 66% des particules accumulées sont toujours sorbées à la surface. Cette espèce serait la meilleure assimilatrice parmi celles testées.

En ne s'intéressant qu'aux feuilles lavées, l'helixine est l'espèce qui comporte le plus de plomb (164.04mg Pb/kg). Les feuilles lavées de gloxinia et de spathiphyllum comportent sensiblement la même quantité de plomb (83.19 et 79.74mg Pb/kg). Quant à l'aloë, une fois lavées, ses feuilles ne comportent que 11.44mg Pb/kg.

Estimation des capacités de sorption du plomb atmosphérique

Une estimation est réalisée pour la quantité de plomb présent dans l'air à partir des mesures de VLEP (Valeur Limite d'Exposition Professionnelle) prises par un prestataire. Les données indiquent une moyenne de 5% de la VLEP, c'est-à-dire qu'en moyenne, 5% de la quantité limite de plomb sont mesurés par la machine, la VLEP s'élevant à 0.1mg Pb/m³. Ces 5% sont atteints en 8h de prélèvement et pour 120L d'air, la quantité de plomb atteint alors 5.10⁻⁶g Pb/m³/h.

Le volume d'air présent dans l'atelier est ensuite estimé, en se basant sur une hauteur de 2m les tests sur tissus indiquant des valeurs faibles de plomb au-delà. Le volume d'air est de 1750m³. Ce volume permet d'estimer la quantité de plomb qui a été relargué dans l'air pendant ces 42 jours. Environ 9.1g de plomb sont estimés dans l'air de l'atelier.



Figure 14. Observations au microscope numérique de la face supérieure d'une feuille d'*Helixine soleiroliae* exposée à une atmosphère polluée au plomb (grossissements $\times 100$ à gauche et $\times 300$ à droite). La flèche blanche indique une les poils.



Figure 15. Observations au microscope numérique de poils foliaires sur la face supérieure d'une feuille d'*Helixine soleiroliae* exposée à une atmosphère polluée au plomb (grossissements $\times 400$ à gauche et $\times 800$ à droite). La flèche blanche indique une particule déposée à la base du poil.

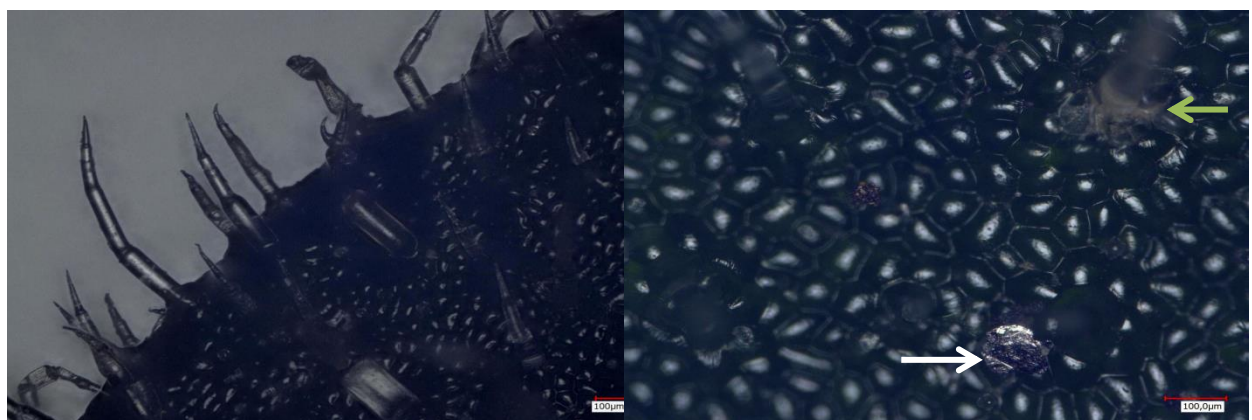


Figure 16. Observations au microscope numérique de poils foliaires sur la face supérieure d'une feuille de *Sinningia speciosa* (*Gloxinia*) exposée à une atmosphère polluée au plomb (grossissements $\times 400$ à gauche et $\times 800$ à droite). La flèche blanche indique une particule déposée à la base du poil, la flèche verte indique l'un des nombreux poils.

En parallèle, la masse sèche totale d'une plante appartenant à l'espèce *Helxine soleirolia* a été pesée, pour obtenir environ 9.5g. En extrapolant aux 64 plantes de l'expérience, il est possible de dire que 608g de plantes sèches sont disponibles pour la sorption des poussières dans l'atelier. En considérant que 0.3g de plomb est sorbé par kilogramme de plante sèche, pour l'ensemble des plantes utilisées, environ 0.2g pourront être sorbés. Ces 0.2g représentent 2% du plomb total présent dans l'air sur 42 jours.

En restant dans la même logique de calcul (Annexe III), l'objectif d'atteindre 5% de sorption pourrait être fixé par l'entreprise. Il faudrait alors accumuler 0.5g de plomb, en utilisant 1.5kg de masse sèche de plantes, soit 160 plantes.

Observation microscopique des feuilles

Les photographies réalisées à l'aide du microscope numérique ont permis d'apporter des éléments concernant la micromorphologie des feuilles. La surface foliaire de l'*helixine* s'avère être rugueuse et constituée de nombreuses petites cellules, parsemées de poils (Fig. 14). Quelques particules déposées ont pu être observées, notamment sorbées sur un des poils ou à leur base (Fig. 15).

La surface foliaire du *gloxinia* est comme attendu couverte de nombreux poils, entre lesquels sont retenus plusieurs particules (Fig. 16).

Concernant le *spathiphyllum*, les zooms larges ont permis de voir une structure relativement lisse de la couche cireuse. Quelques stomates en face supérieure sont observables, ainsi que quelques particules sorbées.

L'*aloe* présente une surface foliaire couverte d'une multitude de pores alignés, au creux desquels peuvent venir s'agglomérer les particules de plomb comme sur la figure 18.

Ces observations permettent également d'estimer les tailles de particules de plomb qui sont sorbées visibles à ces grossissements. Ces particules vont de 20 à 100µm de diamètre.

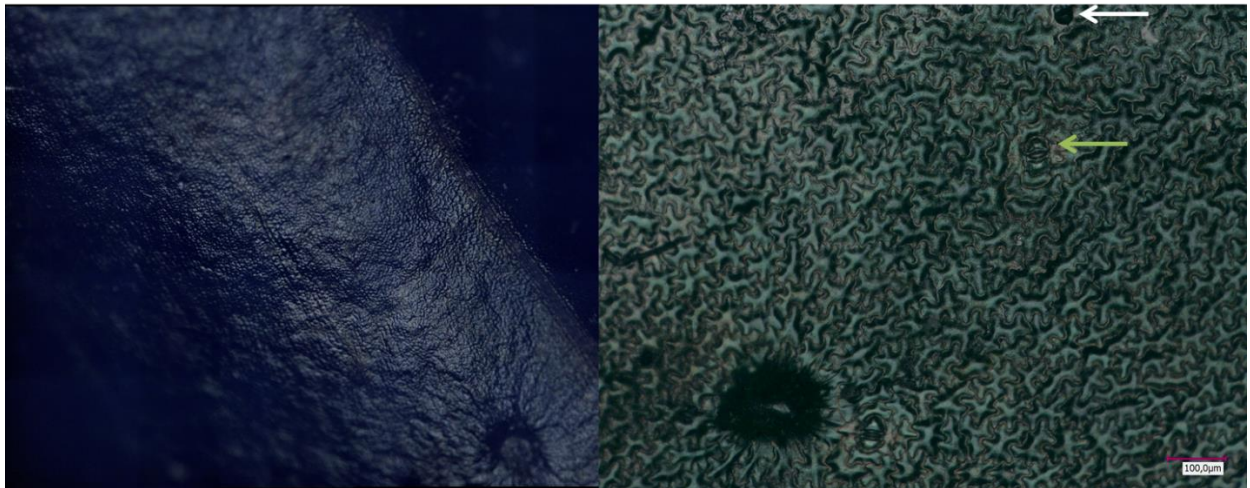


Figure 17. Observations au microscope numérique de la face supérieure d'une feuille de *Spathiphyllum* exposée à une atmosphère polluée au plomb (grossissements $\times 200$ à gauche et $\times 300$ à droite). La flèche blanche indique une particule déposée, la flèche verte indique un des stomates.



Figure 18. Observation au microscope numérique en lumière rasante de la face supérieure d'une feuille d'*Aloe vera* exposée à une atmosphère polluée au plomb, et d'une particule de plomb (grossissements $\times 400$ à gauche et $\times 800$ à droite).

Sorption des particules

La cinétique de sorption des particules de plomb par les quatre espèces semble indiquer des différences entre ces dernières. L'*Aloe vera* se révèle être un très mauvais accumulateur de particules. Elles ne sont que très peu adsorbées. Pourtant, c'est cette espèce qui présente le taux de rétention de plomb le plus fort (66%). Cette espèce avait été choisie pour sa grande quantité de cuticule. Or Dappe *et al.* (2014) ont démontré que le plomb pouvait être internalisé plus en profondeur, par conséquent, une plus grande quantité de cuticule permettrait une plus grande absorption des particules. Ici, l'espèce ne semble accumuler que très peu de plomb, mais la petite quantité sorbée est en grande partie absorbée plus en profondeur. Cette faible accumulation pourrait venir principalement de l'orientation de ses feuilles, plutôt verticale, limitant la surface d'exposition. La forme de ses feuilles peut aussi intervenir, puisqu'elles ne présentent pas une surface plane mais plutôt une forme à deux faces, l'une convexe (face inférieure) et l'autre concave (face supérieure). Par contre, la forte capacité d'absorption pourrait venir des multiples aspérités observées en surface, aidant à la fixation plus en profondeur.

La variété d'aloë fournie par le grossiste n'était pas la plus adaptée pour la déposition des particules. Le choix d'une variété à port de feuilles beaucoup plus horizontal aurait pu donner des résultats plus intéressants.

A l'opposé, l'helixine (*Helxine soleirolii*) montre les meilleurs résultats pour l'accumulation des particules (jusqu'à 300mg Pb/kg en moyenne, et jusqu'à 875mg Pb/kg pour la zone AC). Cette espèce a été sélectionnée pour ses petites feuilles créant un buisson dense. Ce caractère phénotypique permettrait de développer une large surface d'exposition aux particules retombant. Par ailleurs, la surface des feuilles semble être rugueuse de par les nombreuses petites cellules, mais elle présente aussi des poils qui n'étaient jusqu'alors pas visible à l'œil nu. Ces éléments pourraient aider à l'adhésion des poussières. Schreiber et Schönherr (1992) ont expliqué que de petites feuilles rugueuses sont plus efficaces dans l'accumulation de particules que de grandes feuilles lisses. Les poils ne feraient qu'accentuer ce phénomène.

Le gloxinia (*Sinningia speciosa*) présente une évolution de son accumulation incohérente. Les résultats à 20 jours d'exposition auraient pu laisser penser que l'espèce était la meilleure accumulatrice des quatre. Pourtant à 42 jours, un phénomène semble perturber la déposition des particules. Dans la littérature, Räsänen *et al.* (2013) ou encore Saebo *et al.* (2013) ont démontré le rôle favorable des trichomes dans l'accumulation des poussières. Le gloxinia aurait pu montrer de meilleurs résultats si un évènement extérieur comme une chute, ou un contact n'était pas arrivé. L'hypothèse de la saturation de la surface peut aussi être avancée. Le gloxinia étant une

plante à feuilles recouvertes de très nombreux trichomes, il se peut que les particules se soient rapidement accumulées entre les poils, empêchant le dépôt de nouveaux éléments. Pourtant, les observations de feuilles au-delà de 42 jours ne semblent pas montrer une saturation de la surface par les poussières visibles. L'impact d'un événement extérieur serait donc à privilégier.

Le *spathiphyllum* présente des valeurs moindres, qui semblent atteindre un plateau au bout de 42 jours d'exposition. Pour autant, cette espèce présente un taux de rétention des particules de 50%, valeur non négligeable. La surface de ses feuilles est plane, avec de nombreuses cellules qui semblent recouvertes d'une couche cireuse relativement lisse. Sutter (1985) avait déjà observé les cires épicuticulaires du *spathiphyllum* et avait déterminé un aspect lisse à légèrement ondulé. Cette morphologie pourrait gêner la sorption des particules en diminuant leur adhésion à cause de cette couche cireuse. Elles ne pourraient pas s'agglomérer dans des recoins et seraient rapidement remises en suspension. Madany *et al.* (1990) ont d'ailleurs démontré que des feuilles lisses étaient moins efficaces dans la capture des particules par rapport à d'autres feuilles rugueuses ou poilues. L'observation d'un plateau pourrait signaler un phénomène de saturation de la surface par les poussières, et celles sorbées seraient pour moitié absorbées. Ce phénomène de plateau semble incohérent avec le fait que peu de particules visibles seraient retenues par la surface. La supposition d'une saturation par les particules de tailles beaucoup plus fines est à envisager. Dans ce cas de microstructure relativement peu sinueux, seules les plus petites particules pourraient s'accumuler. La diminution du plomb accumulé au fil du temps pourrait également être liée non pas à la couche de cire, mais aux porosités des feuilles, et notamment aux stomates qui ont pu être observés sur la face supérieure. Liang *et al.* (2017) décrivent l'importance de la taille et du nombre de stomates à la surface des feuilles dans la sorption des particules. Le *spathiphyllum* est la seule espèce où des stomates ont pu être clairement observés en face supérieure. Si ces derniers représentent la voie principale d'assimilation du plomb chez cette espèce, leur rareté réduirait la surface de sorption efficace disponible, et ils pourraient être rapidement saturés. De plus, Schreck *et al.* (2012a) ont inclus dans leur modèle l'impact de l'environnement, notamment de l'humidité relative et de la température, dans l'ouverture des stomates. L'installation des plantes s'étant déroulée fin juin – juillet, les conditions étaient très variables. Les températures allaient de 20 à 38°C selon les jours et zones, et l'humidité variait de 16% à 60%. L'ouverture des stomates a pu être grandement perturbée par ces conditions peu favorables.

Dans la littérature, certaines études ont démontré l'intérêt du lavage dans l'élimination des particules, notamment dans le cas des végétaux consommables (laitue, persil ...) (Schreck *et al.*, 2014). Les espèces utilisées présentaient des taux de rétention de 71 à 75%, alors que ceux observés dans cette étude sont de 28 à 66%. Les conditions diffèrent entre les études, puisque dans celles déjà publiées, les perturbations favorisent par avance l'élimination des particules faiblement sorbées, ce qui impacte négativement la différence entre particules sorbées et

absorbées. La quantité de particules sorbée est voisine de celle des particules absorbées. Ceci explique pourquoi les taux de rétention obtenus seraient plus forts dans des conditions extérieures. L'idée-même d'absorption de poussières via l'appareil foliaire devient alors plus facile dans un contexte sans paramètres perturbateurs. L'intérêt, ici, d'avoir des taux de rétention élevés est que les particules absorbées ne sont pas remises en suspension et ne participent donc plus à l'augmentation de la toxicité de l'air ambiant.

La sorption des particules suit des mécanismes qui ne peuvent pas être appréhendés à l'échelle de cette étude. La taille des particules observées en général les classe dans la catégorie des particules fines ($>10\mu\text{m}$ ou PM_{10}). Les nanoparticules n'étant pas observables avec le microscope utilisé, il est impossible de se rendre compte des zones où peuvent s'agglomérer les poussières ultrafines. Or, Ottelé *et al.* (2010) expliquent que les PM_{10} sont assez rares, mais que l'on retrouve plus souvent des particules très fines, voire ultrafines ($\text{PM}_{0.1}$). Il est donc logique d'observer les particules de plomb à ces zooms là, de façon clairsemée. Les autres particules en grande majorité présentes et qui ne sont pas observables, échappent à la compréhension du mécanisme d'internalisation. Une granulométrie des particules atmosphériques réalisée par un prestataire aurait pu apporter une réponse sur la proportion des différentes taille de particules émises par la fonderie.

Localisation des particules

Les données recueillies en fonction des zones de l'atelier permettent de discriminer là où les particules sont les plus disponibles. La zone USI n'est pas propice à la déposition des particules, peut-être à cause de l'éloignement des lieux de fonte du plomb, mais aussi parce que les plantes étaient situées à l'aplomb d'une aération du plafond, créant des vents de temps en temps. Les particules sont alors plus facilement remises en suspension et n'ont pas le temps d'être absorbées. La zone POSTE par contre se révèle être la plus favorable à la déposition des particules au bout de 20 jours d'exposition. Lors de la récupération des collecteurs et des végétaux, cette zone située au centre de la production, présentait visuellement le plus de dépôt. De par sa situation géographique entre les creusets et les pièces sorties des machines, cette zone était attendue comme la plus polluée. Or au bout de 42 jours d'exposition, c'est la zone AC qui se retrouve la plus polluée. Si cette zone recueille le plus de particules, c'est probablement à cause de sa position près du sol. Les plantes étant disposées sur des palettes en bois, elles sont exposées au charriage des poussières au sol lors de passage.

Estimation de l'efficacité dépolluante

L'estimation de l'efficacité de l'expérience a permis de montrer que l'installation de plantes serait capable de capter 2% de ce que la production de pièces de plomb émet en même temps. Un biais est à prendre en compte du fait que les calculs sont basés sur la sorption moyenne d'*Helxine soleirolii*. L'efficacité réelle est donc légèrement différente, à cause des valeurs individuelles plus ou moins extrêmes des autres espèces (de 4mg Pb/kg pour l'aloë à 450mg Pb/kg pour le gloxinia), et de leur masse sèche totale également différente.

L'objectif fixé de 5% est calé sur la valeur mesurée en moyenne dans l'atelier. C'est-à-dire que la plupart des employés testés, respirent 5% des 0.100mg de plomb par m³ autorisés. Compenser cette valeur est par conséquent intéressant. Le fait de devoir disposer 160 plantes dans l'espace ne semble pas irréalisable, puisqu'il ne s'agit que d'un peu plus du double déjà installé.

CONCLUSION

L'expérience menée lors de ce stage avait pour objectif premier de savoir si la dépollution de contaminants tels que les ETM et dans ce cas-ci, le plomb, était possible par le biais des systèmes foliaires de différentes plantes, dans de telles conditions.

Avec ces quatre espèces aux caractères phénotypiques très différents, les résultats obtenus laissent penser que toutes les morphologies foliaires ne sont pas égales dans le domaine de la sorption de particules. Des feuilles orientées plus à la verticale seraient désavantagées pour la déposition de particules. De grandes feuilles recouvertes de trichomes seraient plus favorables que de grandes feuilles lisses et cireuses. Et de nombreuses petites feuilles légèrement rugueuses à légère pilosité seraient un atout majeur pour l'accumulation de ces particules. L'*helixine* serait donc à conserver pour la suite du projet, et l'aloë pourrait l'être, mais en sélectionnant des variétés à port de feuilles plus horizontal. Le gloxinia, bien qu'intéressant par sa pilosité, verra ses feuilles disparaître en hiver, créant un biais au cours de l'expérience, et une perte d'efficacité de l'installation. Il ne serait donc pas à conserver. Enfin le *spathiphyllum* est à débattre, car très moyen dans son efficacité de sorption, mais relativement résistant aux conditions de l'atelier.

Par ailleurs, le développement d'un modèle végétal dépolluant en contexte industriel nécessite de prendre en compte les conditions environnementales peu favorables à la survie des plantes. Ces dernières ont subi les aléas liées aux orages (fuites d'eau), et à la canicule (plus de

35°C), ainsi qu'à la proximité du travail d'industrie (humidité faible pour un bon développement végétatif des plantes, touchers inopinés, chutes). Pourtant, même dans de telles conditions, certaines plantes se sont développées sans encombre, comme l'aloë qui nécessitait peu d'eau, ou l'hélixine qui vit très bien sans lumière directe. L'installation de plantes dans ces conditions hostiles est donc possible en suivant de près leurs besoins. Cependant, les plantes n'ont été étudiées qu'en condition estivale. La période hivernale risque de créer d'autres soucis comme une luminosité encore plus faible, et une baisse des températures (quelques degrés seulement en plein hiver).

L'observation de la physiologie des plantes coordonnée aux dosages du plomb au fil de l'étude permet de déjà définir quelle(s) zone(s) sont à proscrire. La zone AC sera éliminée car trop pauvre en lumière (1 à 2W/m²). La zone USI, trop pauvre en particules, sera à terme supprimée également. La zone AGR, occupant des espaces de rangements en temps normal, sera certainement déplacée. Enfin, la zone POSTE sera la plus adaptée, d'abord parce qu'elle présente des valeurs satisfaisantes de masse de plomb accumulé, mais également parce que l'emplacement au sein de l'atelier est adéquat. La structure verticale occuperait une place centrale.

L'objectif secondaire était de l'ordre social, et avait pour but d'arriver à installer le projet dans les esprits de l'entreprise, et donc avec l'approbation de l'ensemble des employés. En effet, pour qu'un projet soit mené à bien, tous les intervenants de près ou de loin doivent s'entendre sur l'arrivée de nouveaux éléments. Tout l'enjeu résidait dans le fait de faire accepter l'arrivée de plantes dans un univers très industriel et masculin. Il aura donc fallu créer un lien et diffuser des informations au préalable sur comment le projet allait fonctionner : physiologie d'une plante, comment la plante peut dépolluer l'air, quelles espèces sont choisies et pourquoi, comment gérer leurs besoins). La communication et la diplomatie ont été essentielles, afin de montrer aux personnes que l'arrivée « du vert » dans leur lieu de travail ne pouvait qu'être bénéfique pour leur santé et leur moral.

Ces deux objectifs peuvent être considérés comme atteints : les plantes installées permettent de capter une partie des poussières, et si bien entretenues, survivent dans un environnement industriel, tout en étant très bien acceptées par les personnes évoluant dans le milieu, car elles participent à leur bien-être.

Ce projet ouvre de nombreuses portes concernant les sujets d'études à développer. Schreck *et al.* (2012b) ont trouvé des espèces chimiques du plomb différentes entre la laitue et le persil, avec pour la deuxième espèce végétale, une formation de cristaux en forme d'aiguilles dans lesquels sont emprisonnées les particules de plomb. L'étude de la phyllosphère de

plusieurs plantes est un élément intéressant. Elle permettrait peut-être la compréhension de mécanismes d'assimilation du plomb bien plus puissants que la simple adsorption par des voies telles que les stomates ou la dissolution dans les cires. Toujours en s'intéressant aux espèces chimiques du plomb, la fonte du plomb dans l'entreprise génère principalement des oxydes de plomb (PbO_x) (Barriet, 2017). Connaître les capacités d'assimilation de cette forme du plomb avec les surfaces foliaires est une piste à suivre, car les voies de transfert peuvent être multiples (stomates, pores aqueux, entre cellules de gardes et cellules compagnes, absorption avec les lipides de la cire...)(Birbaum *et al.*, 2010 ; Eichert *et al.*, 2008).

En outre, le projet vise à améliorer la santé des personnes travaillant au contact des poussières de plomb. Il serait judicieux de suivre également la santé des plantes, en observant l'état physiologique et morphologique des plantes si l'étude se poursuit. Le plomb dans les tissus pouvant créer des nécroses et stimuler la production de ROS, ainsi que l'obstruction de la surface d'échange avec le milieu extérieur, la longévité des plantes pourrait décroître rapidement.

SUITE DU PROJET AU SEIN DE L'ENTREPRISE (OPTIONNELLE)

Dans la continuité du projet, il est apparu évident de penser une structure portant le principe de dépollution de l'air par le biais des plantes, à une plus grande échelle et en apportant un côté esthétique. Dans ce but, un prototype de structure verticale végétalisée a été dessiné via Solidworks par Maggy Constantin, et chiffrée par différents sous-traitants.

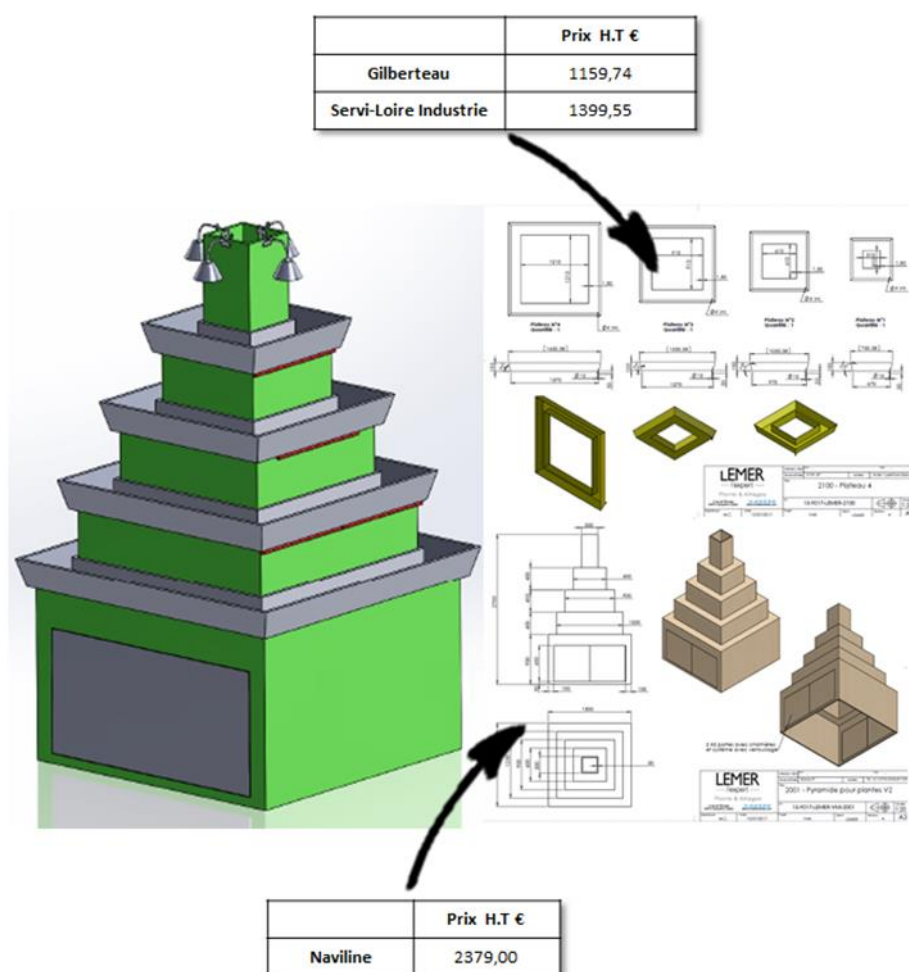


Figure 19. Plan et chiffrage du prototype de structure verticale végétalisée
(Maggy Constantin, Dessinatrice-conceptrice)

En parallèle, des mesures de luminosité (Watt/m^2) ont été relevées afin d'évaluer les besoins en éclairage artificiel à apporter en complément, surtout en période hivernale. Des systèmes d'arrosage ont été acquis, le tout dans le but de rendre la structure presque autonome.

Une note est laissée, concernant les gestes à avoir auprès de la structure, incluant le remplissage des réservoirs d'eau, l'entretien des plantes qui seront sélectionnées pour remplacer celles éliminées, ainsi que les analyses à poursuivre pour avoir un suivi de

l'expérience sur une durée beaucoup plus importante. Reste les futurs prestataires/partenaires à démarcher afin de réaliser les analyses et le traitement des données obtenues.

Un bilan « clé-en-main » est donc fourni à l'entreprise, lui permettant de décider, si oui ou non elle choisit d'investir dans la suite du projet.

Citepa, avril 2016. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2015/reperes-chiffres-cle-environnement-edition-2015.pdf (consulté le 14/03/17).

BIBLIOGRAPHIE

AIRPARIF – Surveillance de la Qualité de l’Air en Ile-de-France, Octobre 2008. Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l’air et des travaux d’AIRPARIF sur ces polluants.

Barriet P-A., 2017. Rapport d’alternance, DUT en SGM, à l’IUT de Nantes, 62p (Source interne).

Barthlott W., Neinhuis C., Cutler D., Ditsch F., Meusel I., Theisen I et Wilhelmi H., 1998. Classification and terminology of plant epicuticular waxes. Botanical Journal of the Linnean Society, Vol. 126: 237 – 260.

Bhattacharya T., Chakraborty S., Fadaru B et Bhattacharya P., 2011. Heavy metal concentrations in street and leaf deposited dust in Anand City, India. Research Journal of Chemical Sciences, Vol. 1: 61 – 65.

Birbaum K., Brogioli R., Schellenberg M., Martinoia E., Stark W. J., Günther D. et Limbach L. K., 2010. No evidence for cerium dioxide nanoparticles translocation in maize plants. Environmental Science & Technology, Vol. 44: 8718 – 8723.

Bismuth C., Baud F., Conso F., Dally S., Fréjaville J-P., Garnier R. et Jaeger A., 2000. Toxicologie Clinique. 5^{ème} édition, Flammarion Médecine-Sciences, Paris, 1092 p.

Caselle J., 1998. Levels of lead and other metals in Citrus alongside a motor road. Water, Air and Soil Pollution, Vol. 105: 593 – 602.

CENTRE D’EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2012. Terminologie recommandée pour l’analyse des métaux, 4e éd., Québec, Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs du Québec, 15 p.

Dappe V. Cuny D., Hanoune B., Dumez S. et Sobanska S., 2014. Relation entre la composition de particules industrielles et leur transfert dans les feuilles de plantes potagères. Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l’air. Villeneuve d’Ascq, 10 et 11 février 2014, 21 p.

Djingova R., Kovacheva P., Wagner G. et Markert B., 2003. Distribution of platinum group elements and other traffic related elements among different plants along some highways in Germany. Science of Total Environment, Vol. 308: 235 – 246.

Dumat-Thévenot C., 2003. Les métaux dans l’environnement. Journée technique « Le plomb ». Pau, 25 septembre 2003, 50 p.

Eichert T., Kurtz A., Steiner U. et Goldbach H. E., 2008. Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physologia Plantarum*, Vol. 13 : 151 – 160.

Kerstiens G., 1996. Cuticular water permeability and its physiological significance. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 47: 1813 – 1832.

Krolak E., 2003. Accumulation of Zn, Cu, Pb and Cd by Dandelion (*Taraxacum officinale* Web) in environments with various degrees of metallic contamination. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 12: 713 – 721.

Liang J., Fang H. L., Zhang T. L., Wang X. X. et Liu Y. D., 2017. Heavy metal in leaves of twelve plant species from seven different areas in Shanghai, China. *Urban Forestry and Urban Greening*. In Press.

Lindow S. E. et Brandl M. T., 2003. Microbiology of the phyllosphère. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 69: 1875 – 1883.

Little P., 1977. Deposition of 2.75, 5.0 and 8.5µm particles to plant and soil surfaces. *Environmental Pollution*, Vol. 12: 293 – 305.

Little P. et Wiffen D., 1976. Emission and deposition of petrol engine exhaust Pb-I. Deposition of exhaust Pb to plant and soil surfaces. *Atmospheric Environment*, Vol. 11: 437 – 447.

Madany I. M., Mahmood S. A., et Akhyer M. S., 1990. Assessment of lead in roadside vegetation in Bahrain. *Environmental International*, Vol. 16: 123 – 126.

Ottelé M., van Bohemen H. D., Fraaij A. L. A., 2010. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, Vol. 36: 154 – 162.

Petit Johann, 2013. Identification et validation fonctionnelle de gènes candidats contrôlant la composition de la cuticule chez le fruit de tomate. Doctorat en Biologie Végétale, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 270p.

Rao M. V. et Dubey P. S., 1992. Occurrence of heavy metals in air and their accumulation by tropical plants growing around an industrial area. *The Science of the Total Environment*, Vol. 126: 1 – 16.

Räsänen J. V., Holopainen T., Joutsensaari J., Ndam C., Pasaren P., Rinnan A. et Kivimäenpää, 2013. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees. *Environmental Pollution*, Vol. 183: 64 – 70.

Saebo A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H. M., Gawronska H. et Gawronski S. W., 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, Vol. 427-427: 347-354.

Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T et Niazi N. K., 2017. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 325: 36 – 58.

Schreck E., Bonnard R., Laplanche C., Leveque T., Foucault Y. et Dumat C., 2012(a). DECA: a new model for assessing the foliar uptake of atmospheric lead by vegetation, using *Lactuca sativa* as an example. *Journal of Environmental Management*, Vol. 112: 233 – 239.

Schreck E., Foucault Y., Sarret G., Sobanska S., Cécillon L., et Castrec-Rouelle M., 2012(b). Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: mechanisms involved for lead. *Science of the Total Environment*, Vol. 427-428: 253 – 263.

Sriprapat W., Suksabye P., Areephak S., Klantup P., Waraha A., Sawattan A. et Thiravetyan P., 2014. Uptake of toluene and ethylbenzene by plants: Removal of volatile indoor air contaminants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 102: 144 – 151.

Sutter E. G., 1985. Morphological, physical and chemical characteristics of epicuticular wax on ornamental plants regenerated in vitro. *Annals of Botany*, Vol. 55: 321 – 329.

Uzu G., Sobanska S. Sarret G., Muñoz M., et Dumat C., 2010. Foliar lead uptake by lettuce exposed to atmospheric fallouts. *Environmental Science & Technology*, Vol. 44: 1036 – 1042.

Uzu G., Sobanska S., Aliouane Y., Pradere P. et Dumat C., 2009. Study of lead phytoavailability for atmospheric industrial micronic and sub-micronic particles in relation with lead speciation. *Environmental Pollution*, Vol. 157: 1178 - 1185.

Wang L., Gong H., Liao W et Wang Z., 2015. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Science of the Total Environment*, Vol. 532: 420 – 434.

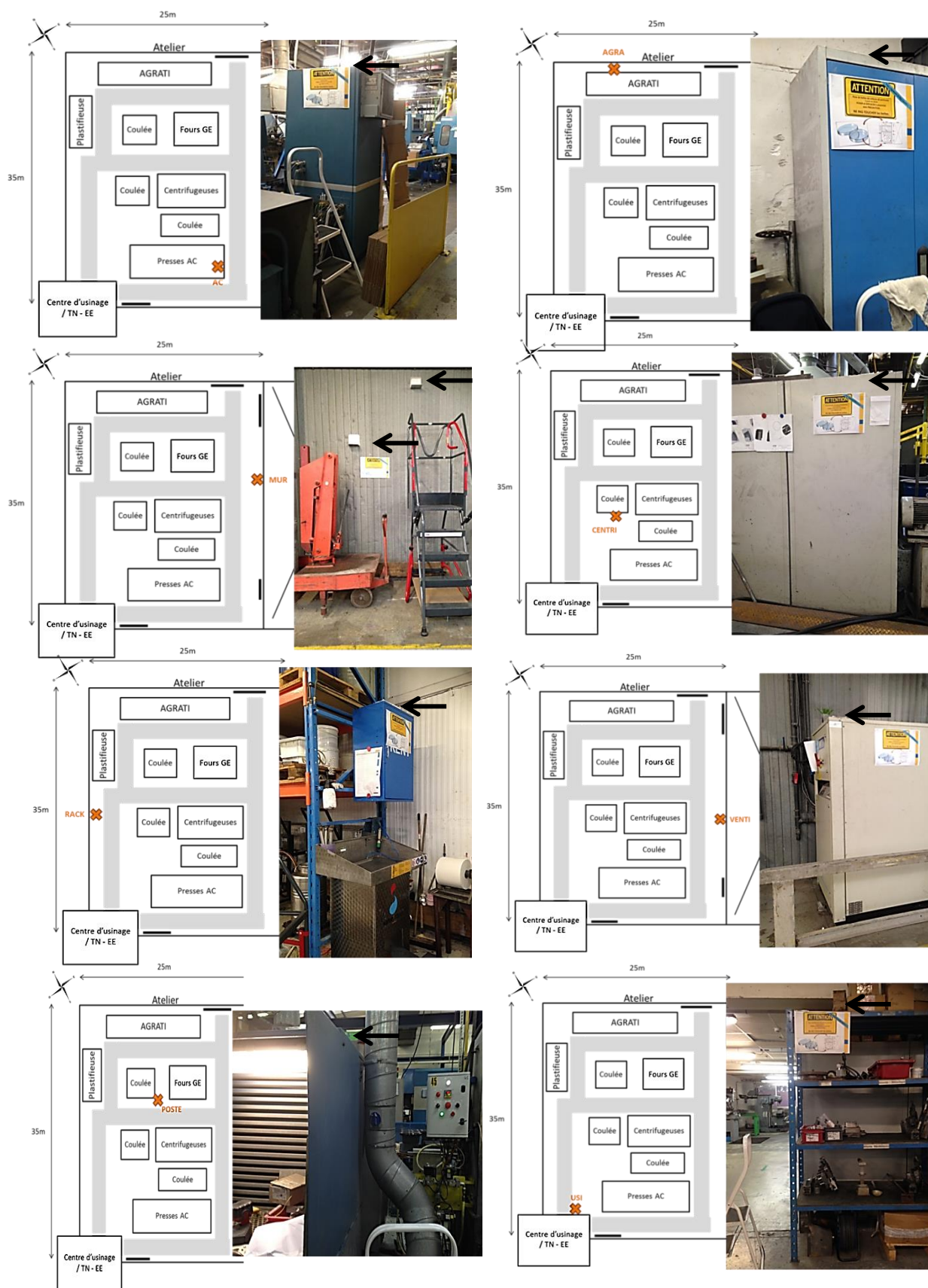
Ward N. I., 1990. Lead contamination of the London orbital (M25) motorway (since its opening in 1986). *Science of the Total Environment*, Vol. 93: 277 – 283.

Yang J., Teng Y., Song L et Zuo R., 2016. Tracing sources and contamination assessments of heavy metals in road and foliar dusts in typical mining city, China. *PLoS ONE*, Vol. 11: e0168528. doi:10.1371/journal.pone.0168528.

Zehnder H. J., Kopp P., Eikenberg J., Feller U. et Oertli J. J., 1995. Uptake and transport of radioactive cesium and strontium into grapevines after leaf contamination. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 46: 61 – 69.

ANNEXES

ANNEXE I. Photographies des différents emplacements de collectes de particules.



ANNEXE II. Photographie d'un collecteur.



ANNEXE III. Calculs utilisés pour l'estimation de l'efficacité de sorption du plomb

VLEP : $0.100\text{mg/m}^3 \rightarrow 5\%$ de la VLEP : $0.005\text{mg Pb/m}^3/\text{h} = 5 \cdot 10^{-6}\text{g Pb/m}^3/\text{h}$

Volume de l'atelier : 1750m^3

Masse de plomb dans l'atelier émise par heure : $1750 \times 5 \cdot 10^{-6} = \sim 0.009\text{g Pb/m}^3/\text{h}$

Masse de plomb dans l'atelier émise en 42 jours :

$$0.009\text{g Pb/m}^3/\text{h} \times 1008\text{h} = 9.1\text{g Pb total}$$

Masse sèche totale d'une helixine = $\sim 9.5\text{g}$

Nombre de plantes pour l'expérience : 64

Masse sèche disponible pour la sorption : $64 \times 9.5 = 608\text{g}$

En moyenne, 0.3g Pb/kg sont sorbés pour l'helixine.

Pour 608g : $(0.3 \times 608) / 1000 = 0.18\text{g Pb sorbés}$

Pourcentage de sorption par rapport à l'ensemble du plomb en suspension :

$$(0.18 \times 100) / 9.1 = \sim 2\%$$

Pour atteindre 5% de sorption :

$$(5 \times 9.1) / 100 = \sim 0.5\text{g Pb}$$

$$(0.5 \times 1000) / 0.3 = 1517\text{g de masse sèche}$$

$$1517 / 9.5 = 160 \text{ plantes nécessaires}$$