

Bioindication par *Petunia hybrida* de la qualité de l'air autour de la zone industrielle de Fos-sur-Mer / Étang de Berre

— PÉTUNIAS —

2016

Charles-Enzo Dauphin
Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions
Centre de Vie La Fossette, RD 268
13270 Fos-sur-Mer
04 90 55 40 42
charles-enzo.dauphin@institut-ecocitoyen.fr

L'Institut Écocitoyen tient à remercier les volontaires du réseau VOCE, Mme. Lefèbvre, M. Mira, M. Theurkauff, Mme. Biet, M. Colombini, M. Deboom, Mme. Dolot, M. Dauphin, M. Breton et M. Jehl qui ont donné de leur temps pour mesurer le développement des plants et de leur espace en accueillant les stations de prélèvements durant toute la période d'étude.

Nous remercions également les jardins familiaux de la Plaine de Couvent ainsi que les jardins partagés du PotiRhône pour nous avoir mis à disposition leurs jardins pour la mise en place de nos stations d'étude.

L'Institut adresse également ses remerciements à la Société Nautique de Port-de-Bouc ainsi qu'au parc marin de la Côte Bleue pour leur participation et leur implication concernant cette étude de bioindication.

SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Présentation de l'étude

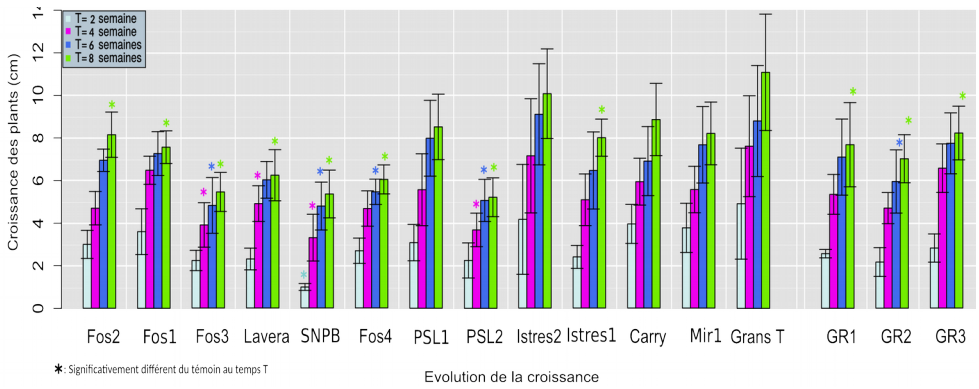
En 2015, l'Institut Écocitoyen pour la Connaissance des Pollutions (IECP) a mis en place une nouvelle campagne d'étude de la pollution de l'air en utilisant la bioindication par les pétunias (*Petunia hybrida*). Comme en 2014, elle a été réalisée avec le concours de plusieurs volontaires, regroupant plus de 16 stations d'étude reparties sur le territoire et composées chacune de six plants de *Petunia hybrida*. En 2014, l'Institut Ecocitoyen a utilisé *Petunia hybrida* pour évaluer l'exposition de plusieurs communes aux émissions atmosphériques polluantes d'origine industrielle, urbaine ou routière. Cette étude a permis de mettre en évidence un impact important sur le développement des pétunias positionnés au sein des communes proches d'un complexe industriel mais également d'une contamination urbaine et routière [IECP, 2014]. En plus de la mesure bimensuelle de sept paramètres morphologiques, ayant pour but de caractériser le développement morphologique des plants de chaque station d'étude, l'Institut Ecocitoyen a ajouté pour cette nouvelle étude une campagne de mesures atmosphériques passives en composés organiques volatils (COV) [IECP, 2016]. Les mesures avaient pour ambition de mettre en évidence l'impact potentiel des centres industriels locaux sur la nature et la quantité de ces COV dans l'air ambiant, mais également de vérifier une possible relation entre l'exposition en COV et le développement des plants de *Petunia hybrida*. La forte densité d'industries lourdes au sein du territoire entraîne un rejet atmosphérique de COV, avoisinant 4 000 tonnes déclarées en 2012. Ces installations industrielles étant au cœur du questionnement concernant l'exposition de la zone aux COV, ce sont six stations de pétunias et de prélèvement (quatre à Fos-sur-Mer, une à Port-de-Bouc, une à Lavéra) qui ont été positionnées au plus proche de la ZIP de Fos-sur-Mer pour essayer de mieux comprendre l'impact de la pollution atmosphérique sur le développement des pétunias. Ces stations sont accompagnées de cinq dispositifs de prélèvement (deux à Port-Saint-Louis-du-Rhône, deux à Istres et un à Carry-le-Rouet) dans un paysage à dominante urbaine se situant entre 10 km et 20 km de la ZIP et trois autres à une distance de plus de 20 km (deux à Miramas, en milieu urbain) incluant une zone totalement rurale (Grans). De plus, trois stations ont été choisies afin de caractériser une exposition routière et évaluer ainsi l'importance de la contribution du trafic routier aux teneurs en COV mesurées et d'observer leur impact sur le développement des pétunias. La campagne de mesure s'est déroulée durant deux mois, entre avril 2015 et juin 2015. Elle a été définie en fonction de la période de développement propice de *Petunia hybrida*. Chaque station d'étude était ainsi composée d'un double dispositif avec l'échantillonnage des COV associé à six plants de *Petunia hybrida* pour la bioindication de la pollution atmosphérique.

Résultats généraux

La première étape de cette étude de bioindication par *Petunia hybrida* de la pollution en COV autour de l'Étang de Berre a permis de caractériser les émissions industrielles de la ZIP de Fos-sur-Mer, notamment vis-à-vis de l'impact morphologique observé sur un ensemble de 16 stations d'étude de pétunia. Les résultats obtenus en observant le développement général de cette plante permettent de mettre en avant un impact sur les plants situés à proximité d'un complexe industriel en comparaison à des stations éloignées de toutes sources potentielles. À proximité des grandes zones industrielles, les pétunias étaient globalement de taille plus petite et portaient également des fleurs de plus petite taille.

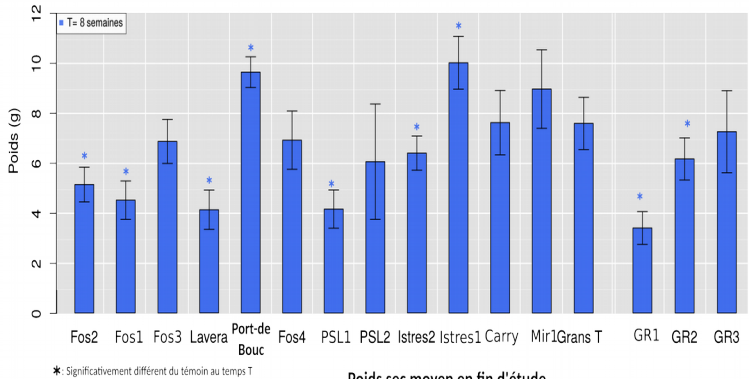
Impact de la pollution de l'air sur le développement des pétunias

Les résultats détaillés de la **croissance moyenne** de l'ensemble des stations d'étude laissent clairement apparaître un développement vertical des plants plus important au sein de la station témoin (Grans T). Tout au long de la période d'étude (2, 4, 6, 8 semaines), la station témoin affiche systématiquement la croissance moyenne la plus importante et atteint une croissance finale de 11 cm. Après huit semaines d'exposition, seules quatre stations ont une croissance comparable au témoin, à Port-Saint-Louis-du-Rhône, Carry, Istres et Miramas. L'ensemble des stations situées au sein d'un périmètre de 4 km autour d'une industrie affichent une croissance significativement plus faible que notre station témoin, de moins de 8 cm, voire moins de 6 cm pour certaines stations e Fos, Port-de-Bouc et Port-Saint-Louis-du-Rhône. Il est également visible que les trois stations localisées à proximité de l'autoroute A54 affichent une croissance moyenne significativement plus faible comparée à notre station témoin, inférieure à 8 cm pour les deux plus proches de l'autoroute.



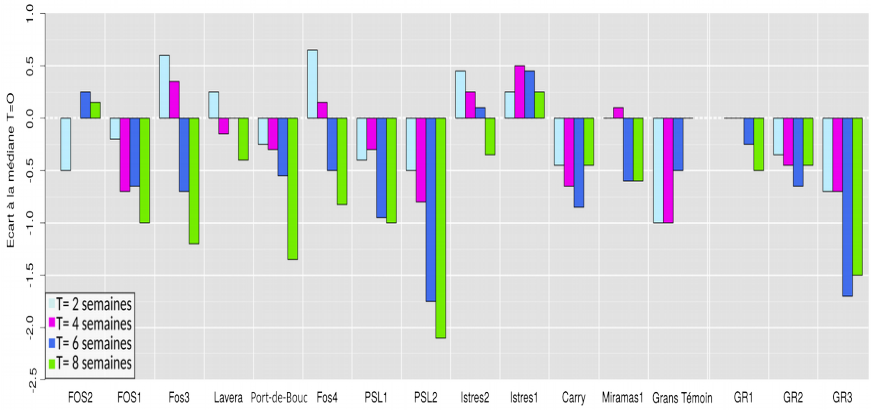
Comparaison des moyennes de croissance des plants de Pétunia (page 28)

Le poids sec de chaque plant est mesuré en fin d'étude, après 8 semaines d'exposition. Il a été mis en évidence un poids sec moyen significativement plus faible au sein des stations proches des industries (exception faite de Port-de-Bouc) et de l'autoroute A54. Parmi les quatre stations positionnées au plus proches d'installations industrielles, trois affichent un poids sec en fin d'étude 30 à 45 % plus faibles que notre témoin avec une valeur inférieure à 5 g par plant contre plus de 7 g en moyenne pour le témoin. Concernant les trois stations positionnées selon un gradient de distance par rapport à l'autoroute A54, les stations GR1 et GR2 témoignent d'un poids moyen significativement plus faible que notre témoin, affichant moins de 4 g par plant pour la station GR1 et environ 6 g pour GR2.



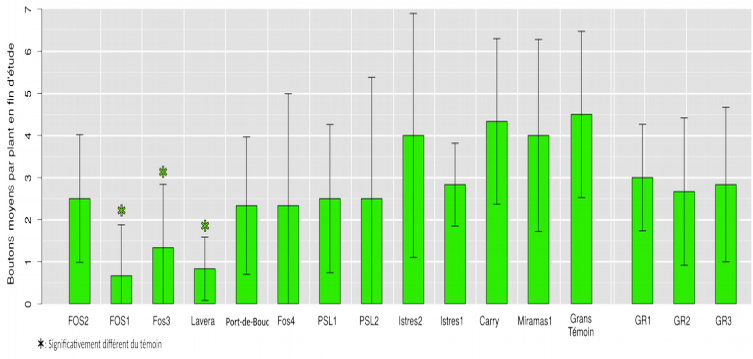
Poids sec moyen des différentes stations à T=8 semaines. (page 29)

La mesure du **diamètre de toutes les fleurs** a été effectuée par les volontaires au sein de chaque station, toutes les 2 semaines comme pour les autres paramètres. Les diamètres des fleurs après 2, 4, 6 et 8 semaines d'exposition sont comparés à leur diamètre initial (T=0). En fin d'étude, la station Grans témoin affiche un écart à la médiane nul avec un diamètre de 8cm, attestant ainsi d'un diamètre moyen des fleurs inchangé entre le début et la fin d'étude. Il est à noter que seules deux stations (Fos 2 et Istres 1) présentent un écart à la médiane positif en fin d'étude. Les plus importantes diminutions de la taille des fleurs observées en fin d'étude s'appliquent directement aux stations situées au plus proche d'une installation industrielle ou d'un axe routier important. Ainsi, les stations Fos 1, Fos 3, Port-de-Bouc, PSL 2 et GR3 témoignent d'un écart à la moyenne T=0 de plus de 1 cm en fin d'étude (avec un diamètre inférieur à 7 cm) témoignant ainsi d'une baisse importante de la taille des fleurs de pétunia en fonction de la proximité à une exposition industrielle ou routière.



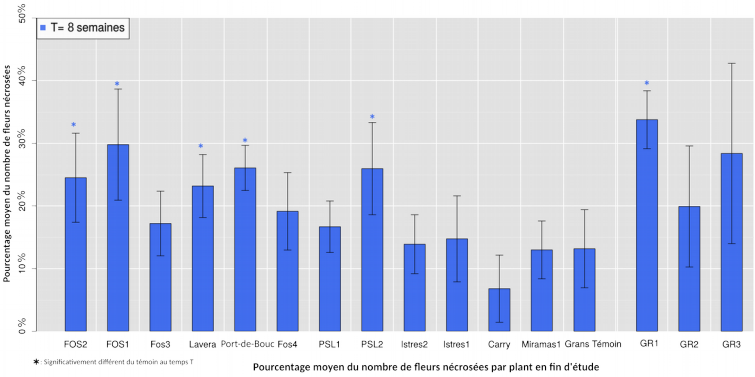
Evolution de l'écart à la médiane T=0 du diamètre des fleurs de l'ensemble des stations d'étude. Au dessus de 0, le diamètre des fleurs a augmenté, à l'inverse en dessous de 0, il a diminué (valeurs en mm, page 31)

Le nombre de bourgeons présents sur chaque plant en fin d'étude (T=8) augmente avec la distance par rapport à des installations industrielles. Les stations les plus éloignées des complexes industriels portent environ quatre bourgeons par plant en fin d'étude. À l'inverse, les stations localisées au plus proche des installations industrielles n'ont en moyenne qu'un bourgeon par plant environ. Cependant, de grandes différences apparaissent pour ces stations d'un plant à l'autre, certains n'ayant aucun bourgeon alors que d'autres peuvent avoir jusqu'à 5 bourgeons, suggérant que la réponse des pétunias à la pollution de l'air est très variable d'un plant à un autre.



Nombre moyen de bourgeons sur chaque plant en fin d'étude. (page 33

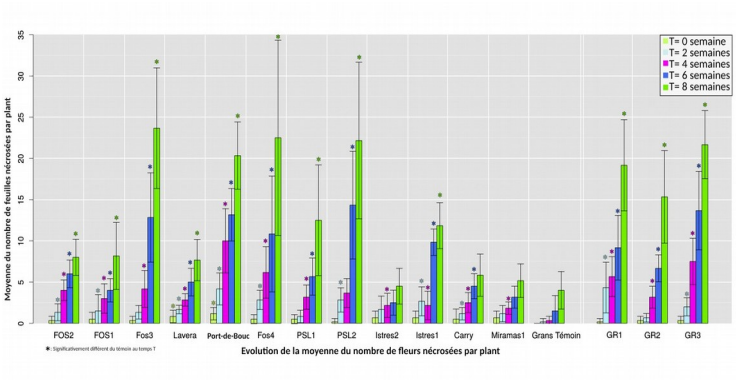
Le comptage du nombre de fleurs fraîches et du **nombre de fleurs nécrosées,** tout au long de la période d'étude, peut aussi être une indication de l'exposition à une pollution de l'air. La station de Carry-le-Rouet affiche le pourcentage de fleurs nécrosées moyen le plus bas de cette étude, à hauteur de 7 %. Notre témoin présente également une valeur particulièrement faible, affichant sur l'ensemble de l'étude seulement 13 % de nécrose de fleurs. Les stations localisées à proximité d'installations industrielles semblent présenter les pourcentages moyens en fleurs nécrosées les plus importants. En effet, l'ensemble des stations situées à moins de 4 km d'une industrie émettrice en COV témoignent de moyenne dépassant les 16 % de fleurs nécrosées. Quatre des cinq stations positionnées à moins de 2 km d'une industrie affichent des valeurs en fleurs nécrosées significativement plus importantes avec plus de 20 % de fleurs



Pourcentage de fleurs nécrosées des différentes stations après 8 semaines d'exposition. (page32)

nécrosées sur l'ensemble de la période d'échantillonnage, atteignant même 30 % pour la station Fos 1. L'étude des paramètres morphologiques précédents soutient le fait que les stations à caractère industriel ne sont pas les seules à présenter un développement morphologique perturbé. Encore ici, il est observé que les trois stations positionnées à proximité de l'autoroute A54 témoignent d'une nécrose moyenne de plus de 20 % de l'ensemble des fleurs comptabilisées sur les deux mois d'exposition.

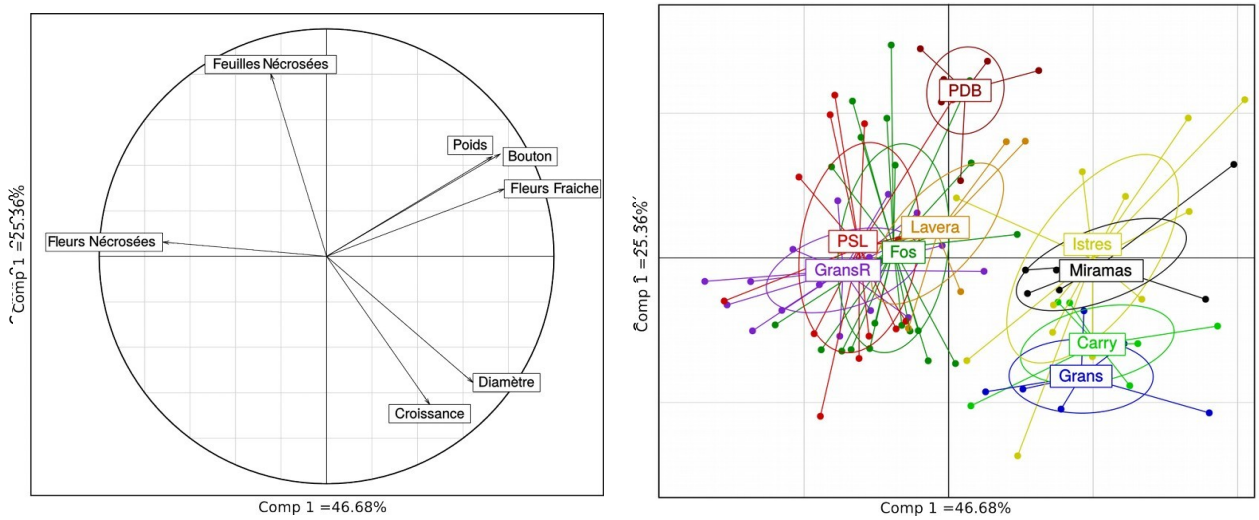
En observant l'évolution du **nombre de feuilles nécrosées** après huit semaines d'exposition, on peut noter une différence entre les stations en fonction de la présence de sources d'émissions à proximité. Seules les stations de Miramas 1, Carry, Istres 2 et Grans présentent un nombre limité de feuilles nécrosées (5 environ par plant après 8 semaines d'exposition), alors que l'ensemble des stations, situées dans un périmètre de 7 km autour d'installations industrielles ou proche d'un axe autoroutier, témoignent d'un nombre de feuilles nécrosées nettement plus important, pouvant dépasser 25. C'est notamment le cas des stations Fos 3, Fos 4, Port-de-Bouc, PSL 2, GR1 et GR3.



Evolution du nombre de feuilles nécrosées. (page 34)

Impacts morphologiques selon l'exposition

Pour mettre en évidence les relations existant entre les individus de chaque station et les variables étudiées, un traitement statistique employant la technique de l'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisé. Il permet de prendre en compte tous les paramètres et toutes les observations en une seule analyse complexe, qui vise à regrouper les observations en fonction des résultats des paramètres mesurés. Sept paramètres morphologiques ont été considérés ici (graphique de gauche) et la répartition des observations suivant leur degré d'association avec ces paramètres.



Cercle de corrélation et projection sur le plant factoriel des individus en intégrant leur localisation. N=96. (page 32)

Afin de mieux comprendre l'influence des paramètres en fonction du type d'exposition, les stations ont été regroupées par commune. L'analyse de ces résultats fait apparaître plusieurs groupes de stations d'étude. Les stations Carry, Grans témoin, Istres et Miramas semblent isolées des autres. En faisant la relation avec la répartition des paramètres, il apparaît ici que ces quatre villes sont corrélées avec des paramètres comme un nombre de bourgeons et de fleurs importants, ainsi qu'un diamètre de fleurs, une croissance et un poids sec élevés. Les plants de pétunias présents au sein de ces quatre villes affichent clairement un meilleur

développement morphologique par rapport aux autres villes à l'étude. Les plants présents à Grans et Carry-le-Rouet semblent se démarquer un peu plus que les plants localisés à Istres et Miramas, avec une croissance et un diamètre de fleurs encore plus importants. Il apparaît ainsi que les stations les plus éloignées des sources éventuelles de contamination atmosphérique témoignent d'un développement morphologique moins perturbé.
A l'inverse, les plants de Fos-sur-Mer, Lavéra, Port-saint-Louis-du-Rhône et Port-de-Bouc témoignent d'un développement altéré : un nombre de fleurs nécrosées particulièrement important, nettement moins de bourgeons et des fleurs plus petites ainsi qu'un poids moindre en fin d'étude. Cette analyse statistique indique que les plants situés au sein d'un environnement industriel présentent un développement morphologique perturbé. On note également que ces perturbations générales, associées à une exposition industrielle, sont comparables entre elles et que l'ensemble de ces plants de pétunias semblent avoir été impactés de façon relativement similaire à Fos, Lavéra, Port-de-Bouc ou encore Port-Saint-Louis-du-Rhône. Il est important de signaler ici que les 18 plants de *Petunia hybrida* situés à proximité de l'autoroute sont regroupés statistiquement avec les stations à caractère industriel, témoignant ainsi d'un impact morphologique comparable entre ces stations. Du point de vue du développement morphologique des pétunias, la proximité à l'autoroute semble avoir un impact semblable à une l'exposition industrielle sur le développement des pétunias.

Relation entre COV et développement de *Petunia hybrida*

La campagne de bioindication par *Petunia hybrida* de la pollution de l'air au pourtour de l'Étang de Berre a été complétée par des cartouches de prélèvement passif de COV atmosphériques. Un des objectifs était de mettre en évidence une éventuelle corrélation entre teneur de l'atmosphère en COV et développement des pétunias, mais aussi de démontrer un potentiel effet de la proximité d'un axe de circulation important sur le développement morphologique des pétunias. Cette étude fait apparaître que les stations les plus éloignées de la zone industrielle (Carry, Grans et Miramas) affichent les concentrations moyennes en COV les plus faibles observées durant l'étude, alors les stations expérimentales à caractère industriel (Fos-sur-Mer, Lavéra, Port-de-Bouc) témoignent de concentrations en COV relativement importantes. La mise en corrélation des paramètres morphologiques étudiés chez les pétunias et les concentrations atmosphériques en COV semblent indiquer un impact de l'augmentation des concentrations atmosphériques en COV sur le développement de la plante. Toutefois, ces centres industriels émettent de nombreux autres COV, des particules en grande quantité ainsi que des gaz. Un impact des installations industrielles semble indéniable. Il est cependant difficile d'identifier et d'isoler la ou les catégories de polluants incriminés .

Dioxyde de soufre et PM10

Corrélations entre les différents paramètres morphologiques et la concentration atmosphérique en SO_2 et PM10

	SO_2		PM10	
Paramètre morphologique	Corrélation R	P-value	Corrélation R	P-value
Croissance	— 0,41	0,001	0,32	0,04
Poids	— 0,32	0,017	0,23	0,17
Fleurs Fraîches	0,36	0,005	— 0,09	0,56
Fleurs Nécrosées	0,39	0,002	— 0,12	0,44
Feuilles Nécrosées	0,12	0,36	— 0,39	0,01
Diamètre des fleurs	— 0,31	0,017	0,4	0,0088
Bourgeons	0,13	0,34	— 0,17	0,29

Le calcul des corrélations entre les paramètres morphologiques observés chez *Petunia hybrida* et deux polluants atmosphériques mesurés pour le suivi de la qualité de l'air (PM10 et SO_2) fait apparaître une corrélation plus importante entre les teneurs en SO_2 et le développement général des pétunias par rapport aux PM10. Ces résultats indiquent un impact des rejets atmosphériques d'origine industrielle (dont le SO_2 est un traceur) sur la morphologie des pétunias. Les corrélations observées entre le SO_2 atmosphérique et le développement morphologique des pétunias sont largement comparables à celles observées en confrontant les COV atmosphériques et les paramètres morphologiques. Il en ressort que les COV et le SO_2 présentent des corrélations semblables et comparables (positives et négatives) avec chaque

paramètre morphologique chez les pétunias. Les concentrations atmosphériques en COV et SO_2 sont ainsi corrélées négativement avec la croissance moyenne des plants, le poids sec en fin d'étude et le diamètre moyen des fleurs alors qu'une corrélation positive relativement importante est observée pour le nombre de fleurs fraîches et nécrosées. En revanche, les PM10 présentent des corrélations qui semblent inversées par rapport à celles calculées pour le COV et le SO_2.

Ces résultats permettent, tout d'abord, de conforter l'hypothèse d'une influence importante de l'exposition industrielle sur le développement morphologique des pétunias. En effet, que ce soit du point de vue des concentrations atmosphériques en COV ou SO_2, il est observé une baisse du développement général répondant à l'augmentation de ces deux polluants atmosphériques. En revanche, les teneurs en PM10 ne semblent pas impacter le développement des pétunias, ce qui conforte l'hypothèse que la détermination de la masse des PM10 n'est pas un marqueur approprié pour estimer l'exposition aux rejets industriels.

SOMMAIRE

Synthèse Générale....5
Sommaire....11
Introduction....13
I – CONTEXTE GENERAL & CONDITIONS D'ETUDE....15
I.1. La biosurveillance....15
I.2. L'Observatoire Citoyen de l'Environnement....15
I.3. Sites de mesure....16
I.4. Moyens expérimentaux mobilisés....21
I.4.1. Utilisation de *Petunia hybrida* comme bioindicateur de la présence de COV....21
I.4.2. Stations d'étude et conditions de culture....23
I.4.3. Formation des volontaires....24
I.4.4. Traitement statistique....24
I.5. Conditions météorologiques....25
I.5.1. Température et pluviométrie....25
I.5.2. Conditions de vent....26
II-Résultats....28
II.1. Résultats morphologiques de *Petunia hybrida*....28
II.1.1. Croissance moyenne....28
II.1.2. Poids sec en fin d'étude....29
II.1.3. Taille des fleurs....31
II.1.4. Fleurs nécrosées....32
II.1.5. Nombre de bourgeons....33
II.1.6. Feuilles nécrosées....34
II.1.7. Une réponse physiologique différente en fonction de l'exposition....35
II.1.8. Analyse en Composantes Principales (ACP)....36
II.2. Exposition routière de *Petunia hybrida*....38
II.3. Exposition à des polluants atmosphériques de *Petunia hybrida*....40
II.3.1. Relation entre Composés Organiques Volatils et développement de *Petunia hybrida*...40
II.3.2. Dioxyde de soufre et PM10....43
Conclusion générale....45
BIBLIOGRAPHIE....46
Liste des figures....49
Annexes....50

INTRODUCTION

Le pourtour de l'Étang de Berre, situé à l'Ouest du département des Bouches du Rhône, est caractérisé par une très forte industrialisation qui regroupe quatre sites majeurs (Fos, Lavéra, La Mède et Berre), cohabitant avec des zones urbaines à forte densité de population. Ce territoire abrite la première zone industrialo-portuaire de France et d'Europe du sud avec les bassins ouest du Grand Port Maritime de Marseille (GPMM) implantés en 1970. Près de 10 000 ha de complexes industriels se partagent la zone (raffinerie, sidérurgie, chimie, incinérateurs d'ordures, cimenterie, centrales thermiques) avec des terminaux maritimes d'envergure internationale. Il comprend de nombreux sites industriels dont plus d'une dizaine présentant des risques d'accident majeur (explosion, émission de gaz toxiques, incendie, ...). L'ensemble de ces activités génère d'importantes émissions de gaz, de Composés Organiques Volatils (COV) et de particules dans l'atmosphère. Selon l'inventaire compilé lors de l'évaluation de risque sanitaire de la zone (ERS/Z) de Fos, les industries émettraient sur ce territoire une très large majorité des oxydes d'azote (NO_x : 10 700 t.an -1) et du dioxyde de soufre (SO_2 : 12 300 t.an -1), ainsi qu'une grande quantité de COV (3 000 t.an -1) [SPPPI, 2008].

Historiquement, le principal intérêt dans les effets des polluants atmosphériques sur la végétation a porté sur les gaz produits par la combustion des combustibles fossiles, le dioxyde de soufre, l'oxyde d'azote, et les acides qui en dérivent dans les « pluies acides » [Prihatin et al. 2015, Weijun et al. 2013]. Cependant, comme les émissions de polluants inorganiques « traditionnels » sont aujourd'hui plus réduites, le rôle relatif des COV comme des polluants primaires devient plus important. Le potentiel pour les COV d'avoir des effets directs sur les plantes à des concentrations ambiantes actuelles a été établi en grande partie sur la base des expositions à court terme de la végétation à des concentrations élevées.

Des recherches antérieures ont montré qu'à des concentrations élevées, la plupart des polluants présents dans les gaz d'échappement et dans les panaches industriels peuvent être nuisibles pour les plantes [Ackerly et Bazzaz, 1995 ; Grantz et al., 2003 ; Wellburn, 1990]. En 1983, Posthumus a été un des premiers chercheurs à suggérer l'utilisation du pétunia comme indicateur de la qualité de l'air, du fait de leur sensibilité aux COV. En effet, une pollution par ces derniers entraîne chez les pétunias une réduction du développement ainsi que l'apparition de modifications morphologiques visibles à l'œil nu. Parmi la grande classe des hydrocarbures volatils, les pétunias sont particulièrement sensibles à l'éthylène [Underwood et al, 2005], présent naturellement dans les plantes et émis en grande quantité par le trafic routier et l'industrie. Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer les niveaux phytotoxiques de l'éthylène sur le pétunia, tel que les émissions de polluants d'une autoroute rurale [Pleijel et al., 1994] ou autour des usines de fabrication de polyéthylène en caractérisant la floraison et la croissance des pétunias [Tonneijcka et al., 2003]. Il a ainsi été montré que l'éthylène, produit naturellement dans les plantes, est un régulateur de croissance, il favorise la synthèse de gibbérelline et peut induire la sénescence des plantes après la pollinisation [Yang et al., 2008]. C'est ce qui explique pourquoi, même à de très faibles concentrations, l'éthylène peut être préjudiciable pour les plantes. Ainsi, la réduction de la floraison et de la croissance dans les plants de pétunia est observable dès une exposition à 25 ppb d'éthylène [Abeles, 1973 ; Underwood et al, 2005 ; Singh et Tripathi, 2007]. En 1977, c'est Rudolph qui a été précurseur dans la biosurveillance environnementale à l'aide des pétunias. Il a étudié le modèle de floraison des pétunias afin de détecter les effets des polluants atmosphériques sur des plants à Munich. Il a établi une corrélation entre la diminution du nombre de nouvelles fleurs et le degré de pollution de l'air, et en a conclu que l'éthylène en est la cause première. Ces résultats sont appuyés par les conclusions obtenues par Plejel et son équipe en 1994.

En 2014, l'Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions a utilisé *Petunia hybrida* pour évaluer l'exposition de plusieurs communes aux émissions atmosphériques polluantes d'origine industrielle, urbaine ou routière. Cette étude a permis de mettre en évidence une réponse différente des pétunias en fonction des communes et surtout en fonction du niveau d'exposition aux polluants atmosphériques. De ce fait, les

modifications physiologiques les plus importantes observables chez *Petunia hybrida* sont directement reliées à la proximité des installations industrielles et des grands axes routiers. Les résultats obtenus en milieu rural, à plus d'une vingtaine de kilomètres de toute source d'émission industrielle, ont révélé un développement général plus important.

l'Institut Écocitoyen a décidé la mise en place d'une nouvelle campagne d'étude de deux mois entre avril 2015 et juin 2015 avec le concours de plusieurs volontaires, regroupant 16 stations d'étude réparties sur le territoire et composées chacune de six plants de *Petunia hybrida*. En plus d'un échantillonnage bimensuel de sept paramètres morphologiques ayant pour but de caractériser le développement morphologique des plants de chaque station d'étude, l'Institut Ecocitoyen a réalisé parallèlement une campagne de mesures des COV [Institut Ecocitoyen, 2016]. Effectués à l'aide de capteurs passifs, ces prélèvements avaient pour ambition de mettre en évidence l'impact potentiel des centres industriels locaux sur la nature et la quantité de ces COV dans l'air ambiant mais également de vérifier une possible relation entre l'exposition en COV et la croissance des plants de *Petunia hybrida*.

I – CONTEXTE GENERAL & CONDITIONS D'ETUDE

I.1. La biosurveillance

La biosurveillance concerne toute utilisation d'un organisme sensible à son milieu environnant pouvant faire état de ce dernier, soit par prélèvement direct depuis le milieu (bioindication passive), soit à travers la transplantation d'échantillon par bioindication active [Agnan, 2013]. Garrec et Van Haluwyn (2002) donnent un sens plus restrictif au terme de bioindicateur dans la mesure où ils le considèrent comme un simple relais ne faisant référence qu'à des effets observables au niveau de l'individu se traduisant par des altérations morphologiques, tissulaires ou physiologiques et caractérisant ainsi un potentiel impact sur un organisme vivant en fonction de l'exposition. La biosurveillance se décline en plusieurs outils de diagnostic environnemental bien distincts :

- Biointégration : observation de changements structurels au niveau population/communauté en réponse à un stress environnemental.

- Bioindication : observation des réponses biologiques (morphologiques, physiologiques, tissulaires…) d'un organisme vivant en réponse à un polluant.

- Biomarqueur : utilisation de marqueurs au niveau de la biologie structurelle ou fonctionnelle (enzyme, physiologie, protéine…) indiquant une influence du milieu environnant sur les fonctions biologiques.

- Bioaccumulation : détermination des teneurs en éléments chimiques bioaccumulés dans un organisme vivant en réponse à une exposition plus ou moins diffuse.

Le développement de techniques de biosurveillance est en plein essor, permettant à la fois de réduire considérablement les coûts d'une étude, mais aussi de palier au besoin d'utilisation d'appareils de mesures très perfectionnés. Également, l'observation de réponses biologiques sur un organisme vivant engendrées par une pollution peut indirectement indiquer un impact à un degré plus ou moins important sur l'homme. Depuis ses débuts en 1978 sur des études de la qualité de l'air [Swieboda et Kalemba, 1978], plusieurs végétaux sensibles ont été développés pour la surveillance de divers polluants atmosphériques. Il peut, par exemple, être cité l'évaluation de la qualité de l'air par les lichens [Gibson et al., 2013 ; Stephano, 2014, Dron et al., 2016], de l'impact de l'ozone par le tabac [Gombert et al, 2006] ou encore la teneur en mercure atmosphérique par les Ray Grass [De Temmerman et al, 2007].

I.2. L'Observatoire Citoyen de l'Environnement

Cette campagne de bioindication, qui a pour objectif de mettre en évidence la relation entre le développement de *Petunia hybrida* et la teneur atmosphérique en polluants, s'inscrit dans le cadre de l'Observatoire Citoyen de l'Environnement. A travers cet observatoire, l'Institut Ecocitoyen vise à répondre à une demande croissante sur les impacts écologiques et sanitaires des zones industrielles du Golfe de Fos et de l'Étang de Berre, en intégrant la population directement dans une réelle approche scientifique, permettant à la fois d'être une source informative mais également de fonder des échanges sur un socle de confiance entre science et information. Cet observatoire propose ainsi aux citoyens d'observer leur environnement, en participant directement à certaines études lancées par l'Institut Ecocitoyen ou même en proposant des suivis des milieux. Ces études, basées sur des protocoles scientifiques réalisés en étroite collaboration entre les chercheurs de l'Institut et les volontaires intègrent, au moins à une étape, l'action des citoyens dans l'acquisition de données. Les volontaires peuvent ainsi être amenés à intervenir lors des

phases préliminaires (reconnaissances de terrain, historiques d'usages, choix d'espèces…) et des phases opérationnelles (réalisations de prélèvements, suivis de paramètres,…). L'intérêt mutuel est ainsi de répondre à un questionnement précis à l'aide de nos connaissances scientifiques en façonnant des études scientifiques d'une ampleur multipliée par l'intervention des volontaires.

Ces travaux concernant l'étude des COV dans le compartiment atmosphérique intègrent une étude lancée par l'Institut en partenariat avec les volontaires, ayant pour but à la fois de caractériser la concentration de certains COV dans l'air [Institut Ecocitoyen, 2016] mais également de savoir si cette concentration est corrélée avec une perturbation du développement de *Petunia hybrida*. Une première étude ciblée sur le développement morphologique de cette plante en fonction de son exposition (industrielle, urbaine ou rurale) a montré une relation entre une baisse significative du développement de plusieurs paramètres (croissance, taille des fleurs, poids sec) et la proximité des centres industriels [IECP, 2014]. Toutefois, l'absence d'instrument de mesure n'a pas permis de quantifier cette exposition supposée, limitant la portée des conclusions du travail à un aspect qualitatif. De nombreux paramètres pouvaient aussi avoir une incidence potentiellement élevée sur le développement de la plante, tels que la proximité de la mer ou l'influence de la météo locale. C'est pourquoi, lors de cette nouvelle campagne de bioindication par *Petunia hybrida* de la pollution atmosphérique en 2015, un capteur a été introduit pour chaque station afin de mesurer simultanément la concentration atmosphérique de certains COV, principalement de type hydrocarbures. Cette étude scientifique a mobilisé 10 volontaires, 6 ayant déjà participé à la campagne pétunias 2014 [IECP, 2014], localisés autour des zones industrielles de Fos et Lavéra et jusqu'à Grans et Carry-le-Rouet pour une durée de 60 jours, afin d'accueillir les stations de bioindication par les pétunias et de prélèvement de COV.

I.3. Sites de mesure

La plupart des stations d'étude ont été installées autour de l'Étang de Berre, à l'Ouest des Bouches-du-Rhône. Au carrefour de la Mer Méditerranée, de la Camargue, de la plaine de Crau et de la vallée du Rhône, ce territoire est au cœur de nombreux enjeux environnementaux et sanitaires en confrontant un paysage industriel marqué face à une urbanisation importante et de nombreuses zones à fort intérêt écologique (Parc national de Camargue, réserve naturelle de la Crau, sept zones Natura2000, dont quatre d'intérêts communautaires et trois zones de protections spéciales). L'Étang de Berre a joué un rôle important dans l'industrialisation de ce territoire durant la première moitié du XXe siècle dans le but de créer un espace économique complémentaire à la cité phocéenne. Logiquement, la Zone Industrialo-Portuaire (ZIP) ensuite créée est progressivement devenue la première zone portuaire de France et d'Europe du Sud et l'un des plus importants sites industriels au niveau européen. Basée sur des atouts majeurs comme des plates-formes industrielles lourdes, un port en eau profonde et un réseau de communications maritimes, routières, ferroviaires, fluviales et aériennes de qualité, ce sont plus de 20 000 ha de grands groupes industriels de sidérurgie, pétrochimie, chimie ou encore d'énergie qui se partagent la zone. Des industriels comme Total et Esso (pétrochimie), ArcelorMittal et Ascométal (sidérurgie), Lyondell Basell, KemOne et Naphtachimie (chimie), ou Kerneos (fabrication de ciment), avoisinant deux incinérateurs de déchets, représentent un panel d'industries lourdes fortement émettrices de polluants atmosphériques dont les COV. Afin de mieux comprendre les relations entre pollutions atmosphériques et pétunias, nous avons travaillé sur des stations représentatives d'expositions variées pour tenter de définir au mieux l'influence industrielle, urbaine et routière. Ce sont au final, des volontaires répartis sur 8 communes représentant un total de 17 stations qui ont réalisé ce suivi, accompagnés par l'IECP (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des stations d'études.

Nom station	Distance industrie	Distance axe routier majeur	Commune
Grans Témoin	>15 km	2 km (N569)	Grans
Miramas 1	>15 km	2,8 km (N569)	Miramas
Miramas 2	>15 km	450 m (N569)	Miramas
Istres1	9 km (ESSO Raffinage)	850 m (N1569)	Istres
Istres 2	7 km (ESSO Raffinage)	1,7 km (N1569)	Istres
Fos 1	1 km (ESSO Raffinage)	40 m (N568)	Fos-sur-Mer
Fos 2	800 m (ESSO Raffinage)	200 m (N568)	Fos-sur-Mer
Fos 3	1,3 km (ESSO Raffinage)	700 m (N568)	Fos-sur-Mer
Fos 4	4,5 km (ArcellorMital)	300 m (N568)	Fos-sur-Mer
Lavéra	1,5 km (Ineos, KemOne Martigues)	2 km (N568)	Martigues
PSL 1	4,7 km (KemOne Fos, Lyondell)	2,6 km (D268)	Port-saint-Louis
PSL 2	5 km (KemOne Fos, Lyondell)	2,7 km ((D268)	Port-saint-Louis
SNPB	1,8 km (Ineos, KemOne Martigues)	1,9 km N568	Port-de-Bouc
Carry	10 km (Raffinerie La Mède)	5 km (A55)	Carry-le-Rouet
Autoroute	>15 km	40 m-170 m (A54)	Grans

- **Fos-sur-Mer**

Fos-sur-Mer est située aux abords de la ZIP de Fos. Quatre stations d'étude ont été installées sur cette commune de plus de 15 000 habitants (Figure 2), exposées à de multiples sources de pollution, notamment industrielle mais aussi potentiellement routière et urbaine. Les stations Fos 1 et Fos 2 étaient positionnées directement chez des volontaires participant à l'étude, la station Fos 3 au sein du groupe scolaire Gérachios et la station Fos 4 à l'Institut Ecocitoyen. Notons que la station d'étude Fos 3 était aussi l'objet de diverses autres études et mesures au cours de la même période (suivi du nombre de particules ultrafines, étude de transfert de polluants du sol et de l'atmosphère vers les plantes). Quatre stations d'étude sont localisées à moins de 1 km d'un axe routier important. Concernant la distance par rapport à une industrie lourde, les stations Fos 1, Fos 2 et Fos 3 se situent dans un périmètre compris entre 800 m et 1,4 km à distance de la raffinerie ESSO. La station Fos 4 est plus excentrée, hors de la ville et à 4,5 km du site sidérurgique d'ArcelorMittal.

- **Lavéra, Port-de-Bouc et Carry-le-Rouet**

Lavéra et Port-de-Bouc sont deux sites à forte prédominance industrielle. La station Lavéra, située chez un volontaire, est localisée à proximité du complexe pétrochimique composé de la plus importante raffinerie du sud-est de la France – d'une capacité annuelle de 10 millions de tonnes de pétrole (INEOS) – et d'un site chimique majeur fabriquant des monomères comme l'éthylène et le propylène et les transformant ensuite en plastique et intermédiaires chimiques. La station de Port-de-Bouc se trouvant sur le port de plaisance de la ville, devant les locaux de la Société Nautique (SNPB) et face au port pétrolier de Lavéra, est particulièrement exposée aux émissions des navires commerciaux, tout comme Lavéra.
La station de Carry-le-Rouet (Carry) est, quant à elle, plus éloignée des sources industrielles (située à plus de 5 km de la raffinerie de La Mède). Cette station constitue un point de référence, notamment vis-à-vis de l'influence de la mer et ses émissions dans l'atmosphère (particules marines, sels de chlore ou de brome…).

- **Port-Saint-Louis-du-Rhône**

Deux stations d'étude ont également été postées à Port-Saint-Louis-du-Rhône (Figure 2), une ville de plus de 8500 habitants, frontalière de la zone industrielle (moins de 10 km). Avec l'aide d'un volontaire, une station a été placée dans le centre urbain de la commune (PSL1) et une autre au jardin associatif « le Poti-Rhône » (PSL2). Les stations sont relativement éloignées des axes routiers importants, mais à environ 5 km d'une industrie lourde (Lyondell, KemOne).

- **Istres et Miramas**

Les stations suivantes s'éloignent de la proximité industrielle pour un paysage a priori plus urbain, voire rural pour certaines. Situées à moins de 10 km de la ZIP, deux stations sont localisées au sein de la ville d'Istres directement chez des volontaires (Figure 2). Pour une population totale de plus de 43 000 habitants, ces deux stations reflètent théoriquement une exposition plus urbaine et routière. Aussi, deux stations ont été positionnées dans la ville de Miramas (Figure 2). Elles sont situées en périphérie de cette ville de plus de 25 000 habitants, correspondant à une exposition intermédiaire entre urbaine et rurale, la première chez un volontaire (Miramas 1) et la deuxième au sein même du jardin associatif de la plaine de Couvent (Miramas 2).

- **Grans**

La station localisée sur la commune de Grans (Figure 2) est la plus éloignée de la ZIP de Fos (>20 km). Au sein d'un paysage à dominante rurale, la station Grans est la plus disatnte de toute forme d'exposition industrielle, routière ou urbaine. C'est pour son éloignement des sources de polluants atmosphériques que la station Grans sera utilisée comme station de référence, comme pour l'étude de bioindication par *Petunia hybrida* en 2014.

- **Grans Route**

Enfin, trois stations regroupées sous le nom de « Autoroute » ont été choisies afin de caractériser une exposition routière et évaluer ainsi son importance vis-à-vis du développement des pétunias. Situées au sein de la campagne gransoise, ces stations ont été placées suivant un gradient de distance par rapport à l'autoroute A54. Les stations dites « Autouroute » se trouvent respectivement à 40 m, 110 m et 170 m du centre de l'autoroute (Figure 1), dont la moyenne de circulation était de 31 752 véhicules par jour pendant l'étude [moyenne annualisée - Vinci, 2015]. Il faut toutefois signaler la présence d'une haie de cyprès positionnée entre l'autoroute A54 et les stations de pétunias, cette haie pouvant avoir une action de protection et éventuellement limiter l'exposition des plants.

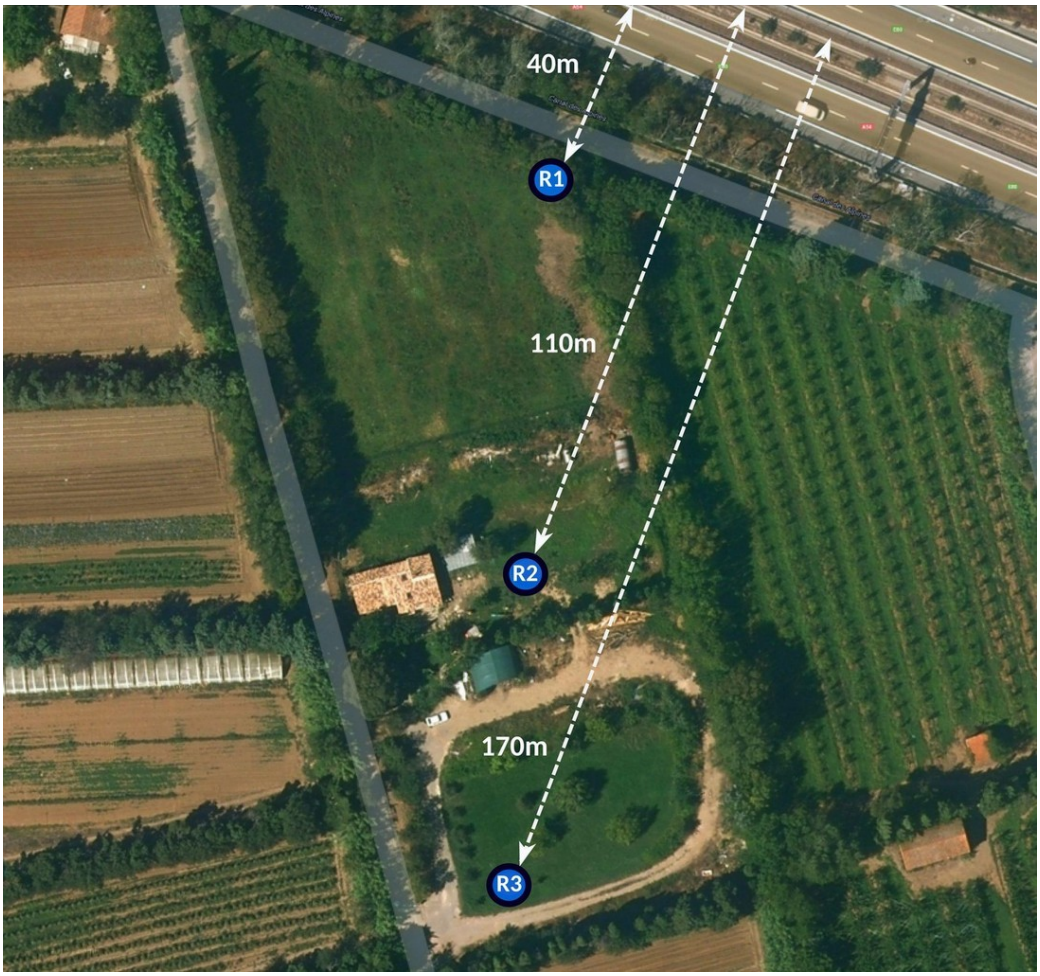


Figure 1 : Cartographie des stations Grans « Autoroute »

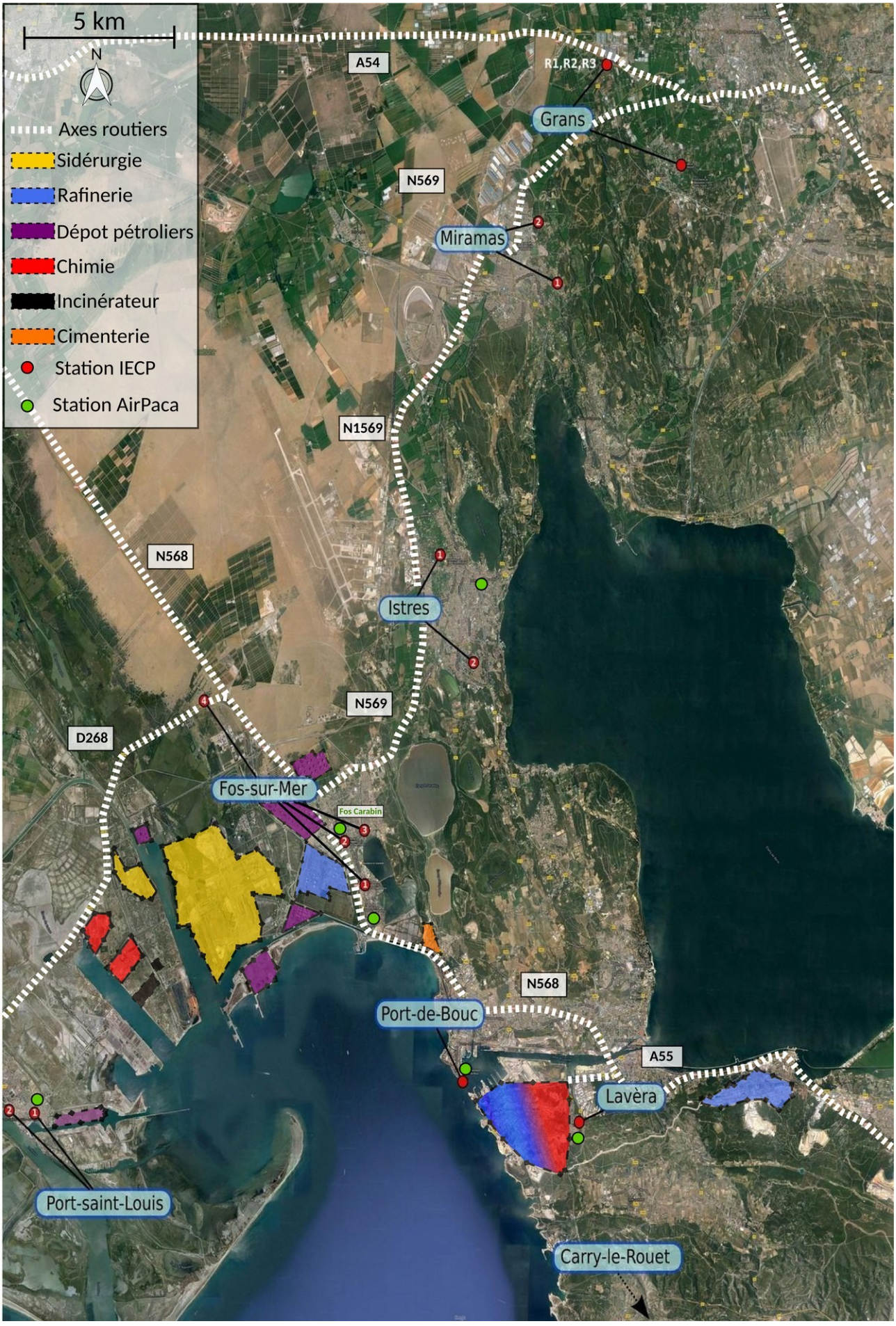


Figure 2 : Cartographie de l'ensemble de la zone d'étude.

I.4. Moyens expérimentaux mobilisés

I.4.1. Utilisation de *Petunia hybrida* comme bioindicateur de la présence de COV

Plusieurs études ont déjà pu mettre en évidence que l'excès en COV dans le compartiment atmosphérique peut être préjudiciable pour le développement des plantes [Ackerly et Bazzaz, 1995, Grantz et al., 2003]. En se basant sur des travaux de recherche mettant en évidence une probable sensibilité des pétunias exposés à une quantité importante en COV atmosphériques, l'Institut Écocitoyen a réalisé en 2014 sa propre étude sur la biosurveillance à l'aide des pétunias. Les conclusions tirées de cet exercice de 7 semaines permettent de révéler un impact plus important sur le développement des pétunias à l'approche de la zone industrielle, mais aussi de l'autoroute A54. Avec l'absence de dispositif de prélèvement de COV atmosphériques, cette première campagne nous a permis de confirmer certains résultats issus de la bibliographie scientifique existante, attestant d'un impact sur le développement morphologique des pétunias à l'approche d'une autoroute [Pleijel, 1994] ou d'un complexe industriel [Tonneijcka, 2003]. Au-delà de l'aspect bibliographique, le pétunia présente beaucoup de caractéristiques lui permettant d'être utilisé durant le temps imparti à cette étude (Tableau 2), telles qu'une croissance et une floraison rapide et importante, ainsi qu'une période de floraison correspondant à l'intervalle de temps de l'étude.

Tableau 2 : Fiche technique de Pétunia hybrida

Fiche technique Pétunia hybrida	
Nom vernaculaire	Pétunia hybride
Nom latin	*Pétunia hybrida*
Ordre	Solanales
Genre	Pétunia
Type de végétation	Vivace à fleurs, annuelle
Type de feuillage	Persistant
Croissance	Rapide et très florifère
Floraison	Importante. Printemps, été et automne.
Hauteur	30 à 50 cm

Cette première étude à également permis d'affiner et de compléter le nouveau protocole d'expérimentation en y ajoutant des cartouches de prélèvement passif de COV atmosphériques, mais aussi de sélectionner le nombre de paramètre à mesurer par les volontaires. Les cartouches de prélèvement passif reposent sur l'utilisation d'un charbon actif permettant de piéger certains polluants organiques atmosphériques par adsorption, suivant des cinétiques et des constantes d'équilibre bien connues dans les conditions d'utilisation, soit notamment pour une durée maximale d'environ 15 j d'exposition à l'air ambiant.
Une fois l'exposition terminée, les cartouches sont récupérées et envoyées au laboratoire départemental de la Drôme pour analyses [IECP, 2016].

Après analyse et interprétation des résultats de la campagne 2014, sept paramètres morphologiques ont été sélectionnés pour la campagne 2015 comme étant à la fois les plus représentatifs et caractéristiques d'une défaillance au niveau du développement des pétunias, mais également pour étudier tous les aspects morphologiques de la plante (feuille, fleur, bourgeon, croissance générale).

- **Taille des plants et poids sec en fin d'étude**

Tonneilck et son équipe (2003), lors de leurs travaux sur l'effet phytotoxique d'un complexe industriel producteur d'éthylène sur les pétunias, ont estimé la croissance de la végétation à l'aide d'un indice compris entre 1 (croissance légèrement réduite par rapport au témoin) et 3 (croissance extrêmement perturbée par rapport au témoin) mettant ainsi en évidence une croissance des plants inhibée à proximité de l'usine, paramètre validé lors de notre première étude. Lors de la campagne 2015, la croissance des plants a été mesurée par les volontaires, à l'aide d'une règle graduée, de façon bimensuelle sur l'ensemble de la période d'étude.

Le poids sec en fin d'étude est un paramètre morphologique important à intégrer dans le protocole d'échantillonnage. Contrairement à l'ensemble des facteurs morphologiques étudiés ici, le poids sec est le seul paramètre échantillonné uniquement par un chercheur de l'institut. Il est obtenu par lyophilisation (– 55 °C / 0,035 mbar, Christ-Alpha 1-4 LD) pendant 72 h. Ne concernant que l'appareil aérien, la mesure du poids sec en fin d'étude permet de mettre en évidence le développement foliaire des plants de Pétunia hybrida au cours des sept semaines d'exposition. Lors de la campagne 2014, l'étude de ce paramètre morphologique a été un bon témoin du développement général des plants. Couplé à l'étude de la croissance, le poids sec semble être un bon témoin pour déterminer l'évolution de la croissance générale des pétunias.

- **Diamètre des fleurs**

Pleijel et al. (1994) ont mis en évidence l'impact des COV sur les pétunias par une diminution du diamètre des fleurs en fonction de l'exposition atmosphérique en éthylène. La réponse de ce paramètre lors de la campagne 2014 a conforté la pertinence de conserver sa mesure en 2015. Les volontaires étaient ainsi chargés de mesurer l'ensemble des fleurs présentes sur chaque plant, à l'aide d'une règle graduée et d'une technique préalablement définie pour homogénéiser la prise de données entre l'ensemble des volontaires.

- **Nombre de feuilles nécrosées et de fleurs nécrosées**

Le nombre de feuilles et de fleurs nécrosées sont aussi des paramètres morphologiques qui ont été de nouveau intégrés dans le protocole de prise de données 2015. Ces deux paramètres n'avaient jamais été utilisés dans une étude de bioindication à l'aide de pétunias, mais sont fréquemment mesurés lors de campagnes de bioindication de la qualité de l'air sur des espèces végétales, comme l'ozone par le tabac ou le trèfle [Davranche et al., 2009 ; Manes et al., 2003]. La réponse de ce paramètre en 2014 a renforcé l'idée d'intégrer une nouvelle fois dans le protocole d'échantillonnage des volontaires de la campagne 2015 le comptage visuel de l'ensemble des feuilles et fleurs nécrosées.

- **Nombre de fleurs et de bourgeons**

Pleijel et son équipe (1994), ont dénombré lors de leur évaluation du niveau phytotoxique d'une autoroute à l'aide de pétunias, que le nombre de fleurs fraîches pouvait être corrélé avec la distance à une autoroute. Lors de ces travaux ils ont également utilisé le nombre de bourgeons floraux chez *Petunia hybrida* pour caractériser l'impact d'une autoroute rurale sur cette plante. Le nombre de bourgeons floraux augmentait alors significativement en s'approchant de l'autoroute (potentiellement dû à l'effet de maturation induit par l'éthylène). Lors de la campagne 2014, la tendance générale semble indiquer une augmentation du nombre de fleurs fraîches concernant les villes caractérisées par un environnement industriel. Concernant

l'échantillonnage des boutons floraux, trois des dix stations échantillonnées présentent en 2014 une moyenne significativement plus faible que la station témoin. La réponse de ces deux paramètres lors de la campagne pétunia 2014 conforte l'idée de conserver et de reconduire leur mesure par comptage visuel.

I.4.2. Stations d'étude et conditions de culture

Les plants de *Petunia hybrida* nécessaires à la mise en place de cette étude ont été acquis au sein d'un organisme spécialisé, la pépinière Super Plan située à Berre l'Étang. Les 102 plants de Pétunia ont connu les mêmes conditions de germination et de croissance jusqu'à leur acquisition : une date de semis et des conditions d'exposition et d'irrigation analogues. Les plants sont ainsi considérés comme identiques, et sont tous mis en culture dans des pots sphériques d'une contenance de 2L avec un terreau universel unique. Les plants sont ensuite répartis aléatoirement pour former un ensemble de six pots par stations, permettant un échantillonnage statistique suffisant.



Figure 3 : Exemple de station d'étude complète à Port-Saint-Louis-du-Rhône

L'objectif ici étant de mettre en évidence un potentiel impact de la pollution atmosphérique sur l'ensemble de nos stations d'étude, il est primordial de limiter les autres paramètres extérieurs pouvant induire et entraîner une incidence sur le développement des plantes. Pour cela, les conditions de culture ont été définies pour obtenir les conditions les plus analogues possibles entre les stations. Un même terreau de rempotage de type universel additionné à des billes d'argile (permettant un drainage simplifié des pots) ont été utilisés pour l'ensemble des pots, en l'absence totale d'intrants chimiques et naturels, homogénéisant ainsi le substrat sur l'ensemble de nos stations. Concernant l'exposition lumineuse des stations, ces dernières ont toutes été placées de façon à avoir un ensoleillement permanent tout au long de la journée. La fréquence d'irrigation a été définie à hauteur de 250 mL d'eau par pot tous les deux jours. Une eau identique (Cristalline©) est fournie à chaque volontaire, permettant ainsi d'homogénéiser les apports en eau de l'ensemble de nos 17 stations d'étude. À noter qu'un épisode pluvieux important durant la campagne s'est substitué à l'arrosage manuel des plants.

I.4.3. Formation des volontaires

La comparaison pertinente des données résultant de l'échantillonnage des différentes stations d'étude demande une solide rigueur dans la prise de données, ainsi qu'une homogénéité de cet échantillonnage au sein l'ensemble des stations. Ainsi, chaque volontaire se voit fournir deux fiches de relevés (Annexe 1) ainsi qu'un protocole permettant d'assurer des mesures similaires entre ces stations (Annexe 2). Outre le fait de détailler l'entretien demandé des stations (arrosage, interdiction d'intrant…), ce protocole définit les paramètres à suivre dans la prise de données, notamment pour évaluer parfaitement les paramètres morphologiques tels que les fleurs ou feuilles nécrosées. Une formation scientifique de l'ensemble des volontaires a été réalisée en amont afin, d'une part, de répondre à tout questionnement relatif au protocole et, d'autre part, de réaliser un premier relevé de tous les paramètres avec les volontaires possédant une station d'étude. Ce premier relevé a permis d'illustrer, mais également de vérifier la fiabilité des mesures réalisées par les volontaires. Après cette formation, l'ensemble des volontaires ont été chargés du comptage visuel de 4 paramètres (fleurs fraîches/nécrosées, bourgeons, feuilles nécrosées) et de la mesure de 2 paramètres (taille des plants et diamètre des fleurs), pour une fréquence d'échantillonnage bimensuelle. La campagne 2014 a également permis aux scientifiques de l'Institut d'effectuer plusieurs contrôles de station chez les volontaires, consistant en une comparaison entre la mesure effectuée par un scientifique de l'institut et celle réalisée par un volontaire sur une même station et à un temps donné. Le but était de déterminer le taux de différence entre les paramètres mesurés par les scientifiques et ceux mesurés par les volontaires. Il est ainsi apparu une différence de 1 % en moyenne sur les mesures (tailles des plants/diamètre fleurs) et 3,7 % en moyenne sur le comptage (fleurs/bourgeons/feuilles), attestant d'un échantillonnage scientifiquement rigoureux effectué par les volontaires. Ces taux de différences particulièrement faibles certifient d'une formation efficace des volontaires et d'une prise de données pertinentes et applicables à un traitement statistique.

I.4.4. Traitement statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant le logiciel statistique R, version 3.3 (R Core Team, 2016).

- **Test de comparaison de moyenne**

Pour vérifier statistiquement si deux échantillons peuvent raisonnablement être considérés comme à l'origine de la même distribution ou population (autrement dit, ne présentent pas de différence significative), différents tests statistiques peuvent être utilisés en fonction des caractéristiques du jeu de données. La taille de nos échantillons par station (N = 6) est trop faible pour considérer la possibilité d'une distribution normale, un test paramétrique n'est donc pas réalisable. Dans ce cas, un test non paramétrique de comparaison de moyennes entre deux échantillons deux à deux se montrera plus efficace et pertinent [Wijnand et Van de Velde, 2000]. Les données obtenues seront donc regroupées par station (N = 6 plants) pour ainsi caractériser individuellement chaque site d'étude et tester deux à deux chaque station d'étude et chaque paramètre à l'aide de tests non paramétriques de Mann Whitney à cinq temps différents :

T=0, représentant les données initiales en début d'étude.
T=2 semaines d'exposition.
T=4 semaines d'exposition, correspondant ici à la moitié de notre étude.
T=6 semaines d'exposition.
T=8 semaines d'exposition, en fin d'étude.

À noter que les tests de Mann Whitney pour le paramètre « croissance » n'ont pas été réalisés à T=0 mais à T=1 semaine d'exposition. En effet, la croissance végétale représentant la différence entre deux mesures de la taille de la plante, elle n'est calculable qu'à partir du deuxième relevé, après une semaine d'exposition.

- **Analyse en composantes principales (ACP)**

Une Analyse en Composante Principale (ACP) est une technique d'analyse statistique factorielle multivariée utilisée pour afficher des corrélations à partir de données provenant de multiples variables. Elle vise à afficher graphiquement les positions relatives des points de données en un nombre restreint de dimensions tout en conservant autant d'informations que possible et d'explorer les relations entre les variables de l'étude [Syms, 2008]. Les individus ou observations (en l'occurrence : les stations) vont être représentés sur les plans factoriels, en fonction de leur contribution aux facteurs ou variables (ici, cela signifie les paramètres mesurés sur les pétunias). Une variable qualitative supplémentaire, telle que la variable « Nom de Ville », peut être ajoutée afin de regrouper les résultats commune par commune. Cela permet, enfin, de mettre en évidence les différences éventuelles entre populations au sein de notre étude.

I.5. Conditions météorologiques

I.5.1. Température et pluviométrie

Les conditions générales de température et de pluviométrie de la zone d'étude sont présentées en Figure 5 pour 2014 et en Figure 4 pour la campagne 2015. Les données ont été obtenues à l'aide d'une sonde électronique RHT50 (Extech instruments) localisée à l'école primaire de Gérachios concernant la température en 2015 et par la station d'Istres de Météo-France concernant la pluviométrie (2014 et 2015) et la température (2014). Pour la période d'étude comprise entre le 9 avril 2015 et le 4 juin 2015, une température moyenne de 19,1 °C a été observée ainsi qu'une augmentation graduelle de cette température engendrée par le réchauffement saisonnier. Concernant la pluviométrie, la deuxième quinzaine du mois d'avril est marquée par plusieurs épisodes de précipitations (dont un assez fort avec 62,6 mm cumulés en deux jours), et qui concerne les deux premiers pas de temps.

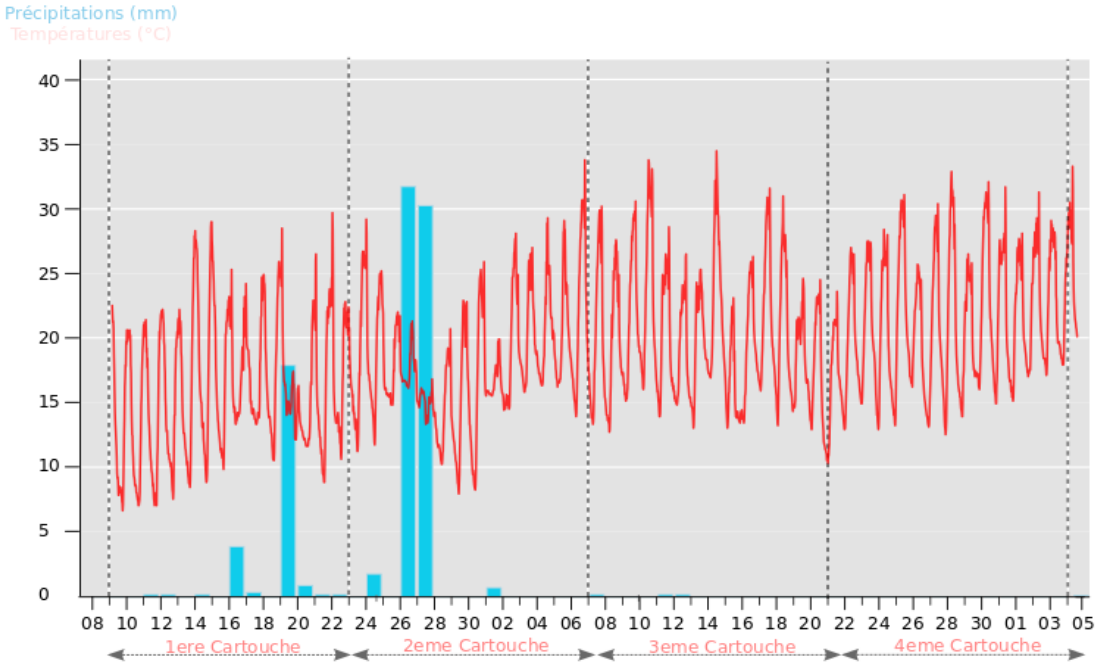


Figure 4 : Conditions météorologiques générales de température (Fos Gérachios) et de pluviométrie en 2015 (Données MétéoFrance Istres).

Au contraire, le mois de mai est resté très sec (1,2 mm cumulé sur le mois) et pratiquement aucune précipitation ne s'est produite. Trois autres sondes électroniques (Tomkey, InstanTrak Logger) ont été positionnées au sein des stations de Grans, Port-Saint-Louis-du-Rhône et Lavéra en vue d'obtenir un maillage plus fin des températures sur la zone d'étude. Les stations de Grans et de Port-saint-Louis-du-Rhône affichent des températures moyennes relativement analogues comparées à la station de Fos, étant respectivement de 17,9 °C et 18,1 °C. La station de Lavéra affiche les températures moyennes les plus faibles durant l'ensemble de la période d'échantillonnage, avec 15,3 °C.

La campagne 2014 se caractérise par une température moyenne de 16,9°C à Istres entre le 16 avril 2014 et le 4 juin 2014 (Figure 5). Plusieurs épisodes pluvieux relativement faibles sont apparus avec un maximum de 27,9mm de pluie sur 4 jours.

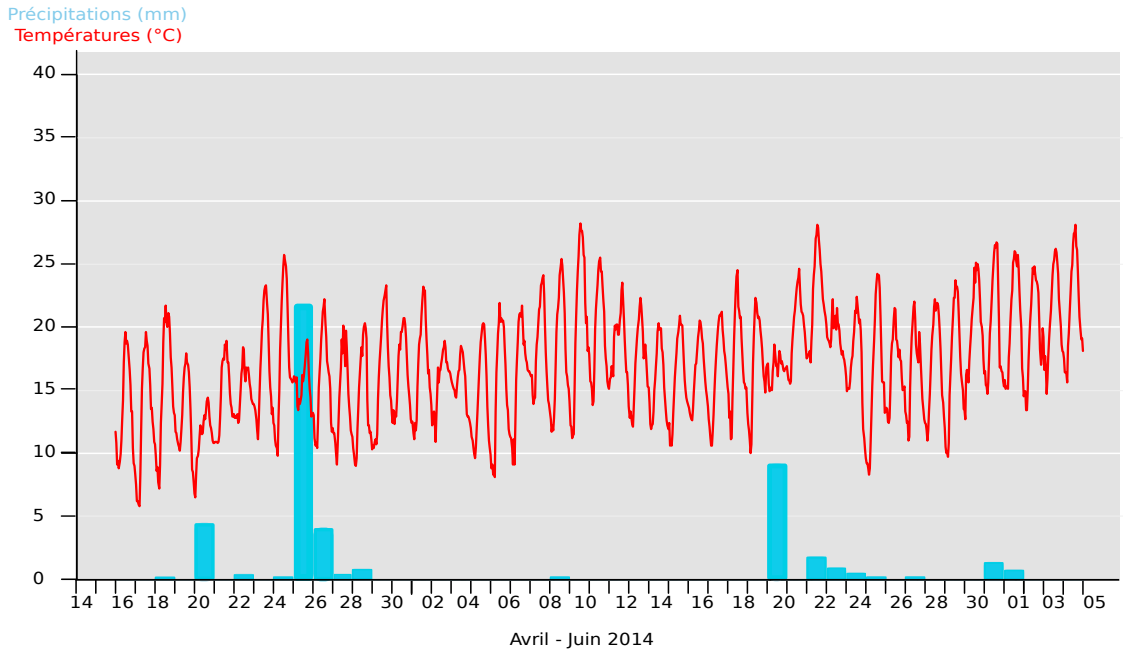


Figure 5 : Conditions météorologiques générales de température et de pluviométrie en 2014 (Données MétéoFrance Istres).

I.5.2. Conditions de vent

La direction et la force du vent ont une influence directe sur la dispersion et le transport des polluants atmosphériques, en particulier au sein de notre territoire d 'étude. De plus, la grande majorité des sources de polluants atmosphériques est ici industrielle, et donc fixe, et en partie canalisée (contrairement à la source routière). L'orientation du vent va donc jouer un rôle majeur dans la dispersion des polluants atmosphériques. Dans la région de Fos-Berre, c'est le mistral (vent de nord-ouest) qui prédomine et qui va diriger les polluants préférablement vers le sud ou le sud-est. Toutefois, il ne représente que 30 à 50 % des vents, selon la saison, et laisse donc place à diverses autres situations. La zone d'étude, étant à proximité de la Mer Méditerranée et de l'Étang de Berre, est en particulier soumise aux phénomènes de brise de terre et brise de mer [Boisot, 2012]. Enfin, l'orientation du vent au secteur sud-est est aussi une composante importante [Fontan, 2003]. Les données concernant la tendance générale du régime des vents durant les deux mois d'exposition en 2015 ont été collectées par la girouette-anémomètre à ultrasons (Vaisala WMT-52) qui équipe la station mobile de mesures atmosphériques (SMOCCA) de l'IECP, positionnée à Fos-sur-Mer au sein du groupe solaire Gérachios. Les données 2014 proviennent de la station de Météo-France à Istres. Les données ont ainsi été compilées sous forme de roses des vents couvrant la période d'étude dans son ensemble (Figure 6).

Le mistral et le vent d'ouest sont nettement dominants durant la période d'étude 2015, à hauteur de 40 % cumulés. Ce sont aussi les vents les plus forts, même si les vitesses enregistrées restent relativement limitées, la plupart du temps inférieures à 8 $m.s^{-1}$ (30 $km.h^{-1}$). Également, près de 20 % du vent durant cette période s'est avéré être d'origine sud-est, caractéristique d'un vent marin soufflant périodiquement sur cette zone. La campagne 2014 reflète la présence d'un mistral persistant durant les 7 semaines d'exposition des pétunias. En cumulé, les vents de direction nord et nord-ouest représentent plus de 50 % des différentes directions de vent enregistrées. La dominance de ce mistral est également caractérisée par sa force, franchissant de façon répétée les 30 $km.h^{-1}$. De même qu'en 2015, des vents sud sud-est ont été relevés indiquant l'influence du vent marin sur cette zone. Ce vent marin est ici caractérisé par une fréquence plus faible comparé à 2015 mais d'une force plus importante.

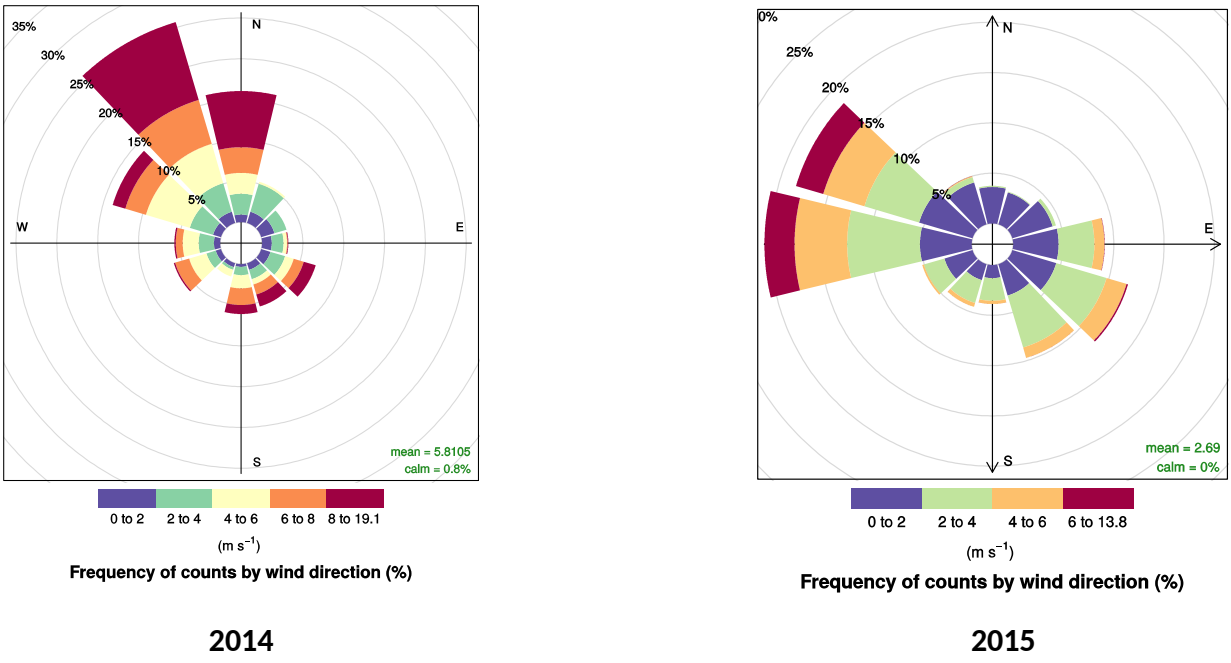


Figure 6 : Fréquence et vitesse des vents en fonction de la direction durant les périodes d'étude (%) 2014 et 2015.

Dans le cadre de cette étude, le vent ne va pas avoir pour seule conséquences de transporter les polluants, il va avoir un effet direct sur le développement des pétunias. Plusieurs études démontrent le fait que le vent peut engendrer des modifications morphologiques importantes chez une grande majorité de végétaux. Les vents fort récurrents (à partir de $8m.s^{-1}$) ont des incidences relativement importantes sur la forme et la taille des tiges, des ramifications secondaires, ou du système racinaire. Les plants exposés à des vents forts ont tendance à être plus petits et plus compacts avec une plus grande croissance radiale que les plants à l'abri [Mitchell, 1996 ; Telewski et al, 1995]. Des vents violents peuvent aussi engendrer un nombre réduit de feuilles ainsi que l'apparition de blessures sur les fleurs [Gardiner et al, 2016].

II-RÉSULTATS

Le suivi des sept paramètres morphologiques sélectionnés permet de caractériser le développement morphologique des différentes structures des plants de pétunias, avec la floraison (diamètre des fleurs, nombre de bourgeons, nombre de fleurs nécrosées), la croissance (croissance moyenne, poids sec en fin d'étude) et le développement foliaire (nombre de feuilles nécrosées). La périodicité de l'échantillonnage par quinzaine permet d'observer l'évolution générale de ces différents paramètres tout au long de la période d'étude.

II.1. Résultats morphologiques de *Petunia hybrida*

II.1.1. Croissance moyenne

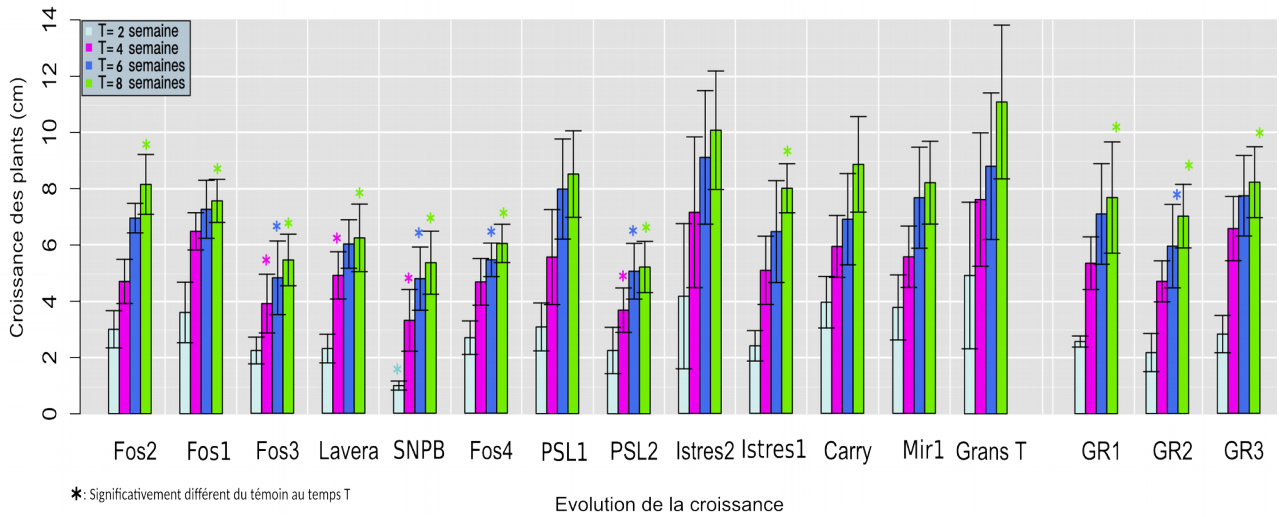


Figure 7 : Evolution de la croissance moyenne des différentes stations à T=0, T=2 semaines, T=4 semaines, T=6 semaines et T=8 semaines. (N=6 par station et par pas de temps, les étoiles marquent une différence significative avec le témoin Grans T ; p<0,05).

Les résultats détaillés de la croissance au cours de la période de l'ensemble des stations d'étude laissent clairement apparaître un développement vertical des plants plus important au sein de la station témoin (Grans T). Concernant les quatre temps pris en compte (T=2, T=4, T=6, T=8), la station témoin affiche même la croissance la plus importante à chaque temps avec une croissance finale supérieure à 11 cm (Figure 7). Lors des deux premières semaines d'étude, aucune station ne présente une croissance moyenne statistiquement différente de la station témoin, mis à part à Port-de-Bouc (SNPB). A l'inverse, après un mois d'exposition (T=4) les stations Fos3, Lavéra, Port-de-Bouc (SNPB) et PSL2 affichent déjà en moyenne une croissance significativement plus faible que notre témoin Grans T. Ces disparités s'accroissent au fil du temps. Il est visible, après huit semaines d'exposition, que seulement quatre stations ne présentent aucune différence significative avec notre témoin : les stations PSL1, Carry, Istres2 et Miramas1. L'ensemble des stations situées au sein d'un périmètre de 4 km autour d'une industrie affichent une croissance significativement plus faible que notre station témoin, inférieure à 8 cm et même inférieure à 6 cm pour les stations Fos3, Port-de-Bouc (SNPB) et PSL1. Il est également visible que les trois stations localisées à proximité de l'autoroute A54 (GR1, GR2 et GR3) affichent une croissance moyenne plus faible que la station témoin, entre 7 et 8 cm pour les deux stations les plus proches de l'autoroute.

La mesure de la croissance étant un paramètre morphologique déjà pris en compte lors de la première campagne 2014, la comparaison de ce paramètre des stations concernées lors des deux campagnes est visible sur la Figure 8.

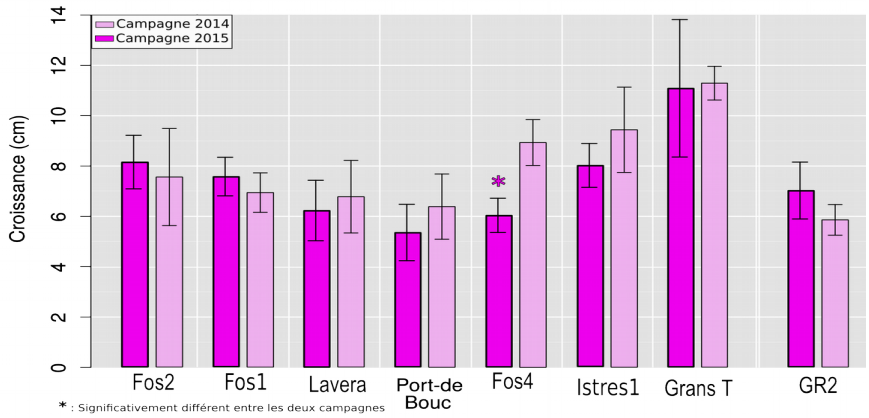


Figure 8 : Comparaison de la croissance moyenne en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015. (N=6 par station, les étoiles indiquent une différence significative entre les deux années sur une même station ; p<0,05).

Les deux campagnes d'échantillonnage effectuées à une année d'écart semblent refléter la même tendance générale du point de vue de la croissance moyenne selon les différentes stations prises en compte ici. Les croissances moyennes de chaque station sont comparables pour les deux années d'échantillonnage, à l'exception de la station FOS4 qui voit diminuer sa croissance moyenne de 2,5 cm par rapport à 2014 et 2015. D'autre part, lors de ces deux campagnes de prélèvement les stations situées à Fos-sur-Mer, Port-de-Bouc ou Lavéra (stations considérées ici comme les plus proches d'une installation industrielle) témoignent d'une croissance plus faible que les stations Istres et Grans Témoin, plus éloignées d'une source majeure en polluants atmosphériques. La station GR2 proche de l'autoroute A54, échantillonnée également lors des deux campagnes, affiche sur les deux années une croissance moyenne plus faible que le témoin et potentiellement comparable aux stations d'étude localisées à proximité d'un complexe industriel.

II.1.2. Poids sec en fin d'étude

Les résultats de mesures de poids sec, représentés sur la Figure 9, mettent clairement en évidence un poids sec moyen significativement plus faible dans la plupart des stations à caractère industriel ou routier Fos2, Fos1, Lavéra, PSL1, Istres 2, GR1 et GR2.

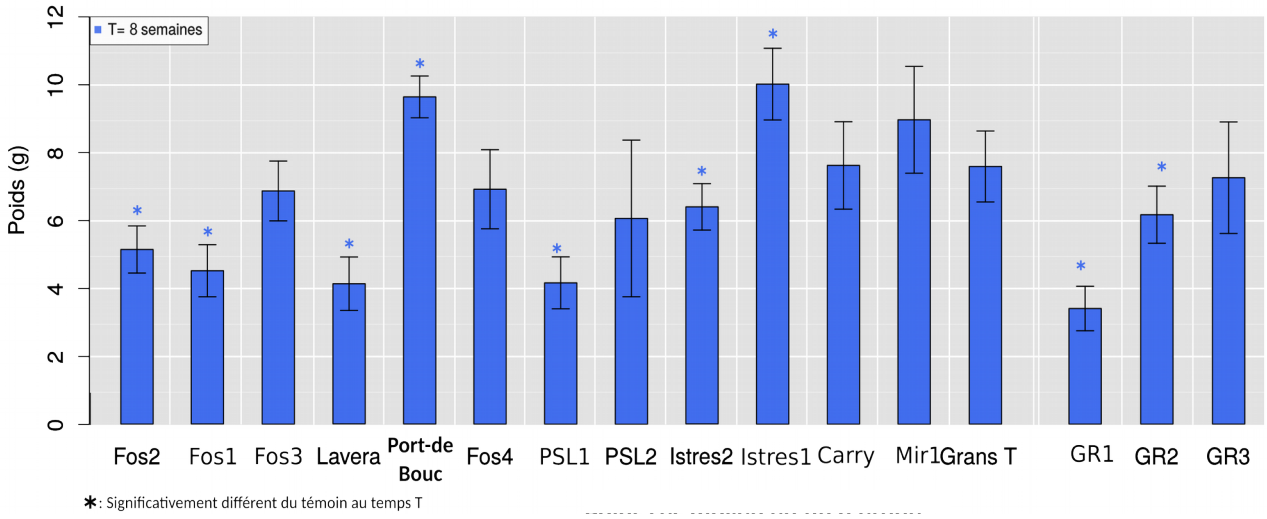


Figure 9 : Poids sec moyen des différentes stations à T=8 semaines. (N=6, les étoiles indiquent différences significative avec notre témoin Grans T ; p<0,05).

Parmi les quatre stations positionnées au plus proche d'installations industrielles, trois affichent un poids en fin d'étude significativement plus faible que notre témoin avec une valeur inférieure à 5 g par plant contre plus de 7 g en moyenne pour notre témoin. Concernant les trois stations positionnées selon un gradient de distance par rapport à l'autoroute A54, les stations GR1 et GR2 témoignent d'un poids moyen significativement plus faible que notre témoin, affichant moins de 4 g par plant pour la station GR1. Ces résultats nous montrent également que deux stations affichent un poids moyen significativement plus important que notre témoin, la station Istres 1 et Port-de-Bouc avec des poids moyens de 10 g environ par plant. Istres 1 est une station à la fois localisée à plus de 9 km d'une industrie et en périphérie de la ville Istres, définissant cette station comme a priori moins exposée aux polluants atmosphériques. Malgré une croissance légèrement plus faible que notre témoin, les stations d'Istres montraient déjà une croissance parmi les plus élevées de l'étude, ce qui reste cohérent avec le poids important relevé à Istres 1. Inversement, la station située à Port-de-Bouc a la particularité d'être postée à moins de 2 km du complexe industriel de Lavéra et d'afficher malgré tout un poids moyen en fin d'étude significativement plus important que notre témoin, alors que la croissance moyenne figurait parmi les plus faibles (Figure 8). Cette particularité s'explique par une croissance horizontale relativement importante.

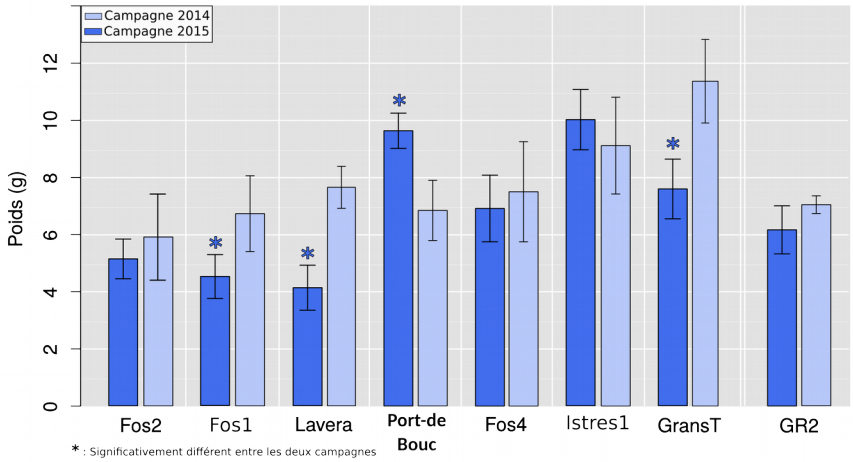


Figure 10 : Comparaison du poids sec moyen en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015. (N=6, les étoiles indiquent une différence significative entre les deux années sur une même station ; p<0,05).

La comparaison des résultats concernant le poids sec moyen entre les campagnes 2014 et 2015 (Figure 10) laisse clairement apparaître une baisse globale du poids sec en 2015. Seules les stations Port-de-Bouc et Istres 1, qui avaient la particularité de présenter un poids sec moyen significativement plus important que notre témoin en 2015 (pour des croissances moins élevées), affichent une augmentation du poids sec.
La première campagne 2014 témoignait clairement d'une baisse importante du poids sec moyen en fonction du rapprochement d'une installation industrielle. Malgré une baisse de plus de 3 g de poids sec de notre témoin en 2015, il est visible que les deux stations affichant le poids sec le plus bas en 2014 (Fos2 & Fos1) sont également celle présentant le poids sec moyen le plus faible lors de la campagne 2015.

II.1.3. Taille des fleurs

La mesure du diamètre de toutes les fleurs de chaque station est un paramètre permettant une évaluation globale du développement du système floral des pétunias. Les résultats ont été représentés sous forme d'écart à la médiane[1] dans chaque station et comparés aux médianes prises au temps initial T=0 (Figure 11). On visualise ainsi si les fleurs sont plus grandes qu'au départ (barres positives) ou au contraire plus petites (barres négatives) tout au long de la période d'étude. Une baisse du diamètre des fleurs est observée dès la première quinzaine d'exposition sur neuf des seize stations échantillonnées indépendamment de leur exposition, ce qui peut être expliqué par l'effet de perturbation dû au changement de substrat (rempotage) lors du début d'étude. Si cette tendance se poursuit après 4 semaines d'exposition, avec notamment des fleurs plus petites dans la station prise comme référence (Grans Témoin), elle s'inverse progressivement au cours des semaines qui suivent. En fin d'étude, la station Grans témoin affiche un écart à la médiane nul, attestant ainsi d'un diamètre moyen des fleurs inchangé entre le début et la fin d'étude. Il est également à noter que seulement deux stations présentent un écart à la médiane positif en fin d'étude, la station Fos2 et la station Istres1. Les autres stations d'étude témoignent d'une diminution du diamètre de leurs fleurs, mais les écarts à la médiane les plus importants en fin d'étude pointent directement les stations situées au plus proche d'une installation industrielle ou d'un axe routier important. Ainsi, les stations Fos1, Fos3, Port-de-Bouc, PSL2 et GR3 montrent des fleurs 1 cm plus petites qu'avant exposition.

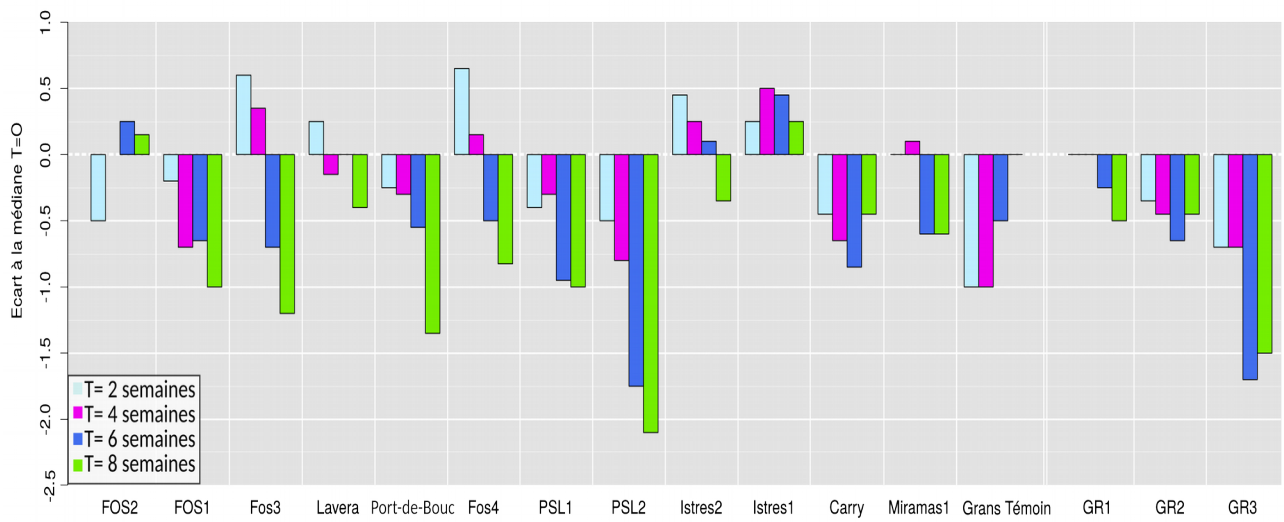


Figure 11 : Evolution du diamètre des fleurs de l'ensemble des stations d'étude (écarts par rapport à la médiane prise à T=0).

Les résultats sont très cohérents avec les mesures réalisées par les volontaires en 2014 (Figure 12), où les stations théoriquement parmi les moins exposées, Istres et Grans Témoin, affichent les diamètres moyens de fleurs les plus importants. Il est également à noter qu'aucune différence significative n'est observable entre les campagnes 2014 et 2015 pour chaque station individuelle (Figure 12), le diamètre de fleurs semblant être un paramètre stable et pertinent.

1 La médiane, qui est une valeur qui partage la liste des observations en deux sous-listes qui contiennent le même nombre d'observations, permet de s'affranchir de certaines observations extrêmes étant ainsi plus représentative pour le paramètre étudié ici.

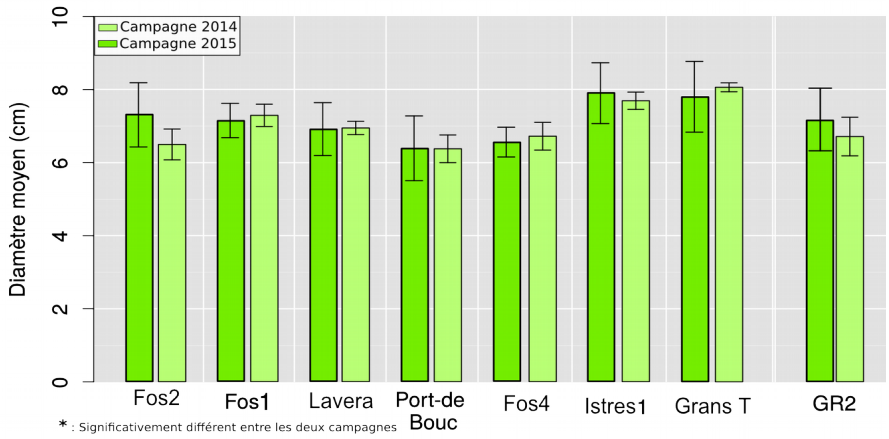


Figure 12 : Comparaison du diamètre moyen des fleurs en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015. (N=6, les étoiles indiquent une différence significative entre les deux années sur une même station ; p<0,05).

II.1.4. Fleurs nécrosées

Le comptage du nombre de fleurs fraîches et du nombre de fleurs nécrosées tout au long de la période d'étude nous permet de pondérer les résultats sous forme d'un pourcentage de fleurs nécrosées sur l'ensemble de la durée d'exposition (Figure 13). La station présente à Carry-le-Rouet (Carry) affiche le pourcentage de fleurs nécrosées moyen le plus bas de cette étude, à hauteur de 7 %. Notre témoin présente également une valeur particulièrement faible, affichant sur l'ensemble de l'étude seulement 13 % de nécrose des fleurs. Les stations localisées au plus proche d'installations industrielles semblent présenter les pourcentages moyens en fleurs nécrosées les plus importants. L'ensemble des stations postées à moins de 4 km d'une industrie émettrice en COV témoignent de moyennes supérieures à 20 % de fleurs nécrosées sur l'ensemble de la période d'échantillonnage, atteignant même 30 % pour la station Fos1. L'étude des paramètres morphologiques précédente montre que les stations à caractère industriel ne sont pas les seules à présenter un développement morphologique perturbé. Encore ici, il est observé que les trois stations positionnées à proximité de l'autoroute A54 témoignent d'une nécrose comparable (supérieure à 20 %) à celles des stations industrielles.

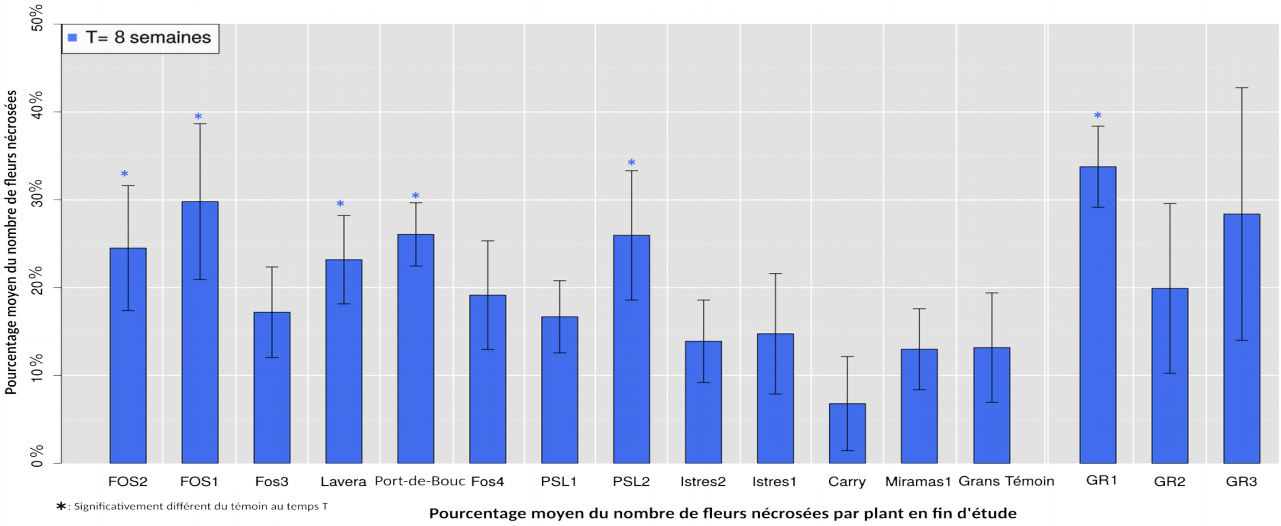


Figure 13 : Pourcentage de fleurs nécrosées des différentes stations à T=8 semaines. (N=6, les étoiles indiquent une différence significative avec notre témoin Grans Témoin ; p<0,05).

La plupart des stations communes entre les campagnes 2014 et 2015 présentent un pourcentage moyen de fleurs nécrosées en très nette augmentation en 2015 (Figure 14). Les stations Fos2, Fos1 et Lavéra voient leur pourcentage de fleurs nécrosées dépasser 20 % en 2015, jusqu'à 30 % pour la station Fos 1. Les stations Istres 1 et Grans témoin, plus éloignées d'éventuelles sources polluantes atmosphériques, affichaient un pourcentage moyen approchant 5 % en 2014 pour atteindre 10 à 15 % cette année. Malgré une augmentation du pourcentage de fleurs nécrosées au sein des stations les plus éloignées, elles restent nettement en dessous des stations industrielles et routières. Notons que seule la station routière (GR2) a vu son pourcentage de nécroses sur les fleurs rester constant. Cela rejoint les observations faites sur le poids sec et le nombre de bourgeons, et semble indiquer une exposition globalement différente en 2015.

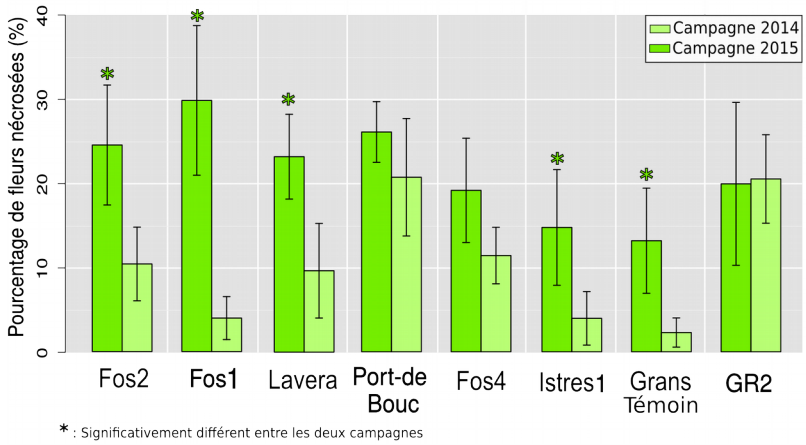


Figure 14 : Nombre moyen de fleurs nécrosées (en % de toutes les fleurs) durant les campagnes 2014 et 2015. (N=6, les étoiles indiquent une différence significative entre les deux années sur une même station ; p<0,05).

II.1.5. Nombre de bourgeons

L'étude du nombre total de bourgeons sur l'ensemble de la période d'étude ne montre pas de différences significatives au regard des tests statistiques réalisés sur ce paramètre. Cela est dû à un nombre de bourgeons mesurés qui est trop variable, tout en restant relativement faible comme le montre la Figure 15 qui représente le comptage en fin d'étude.

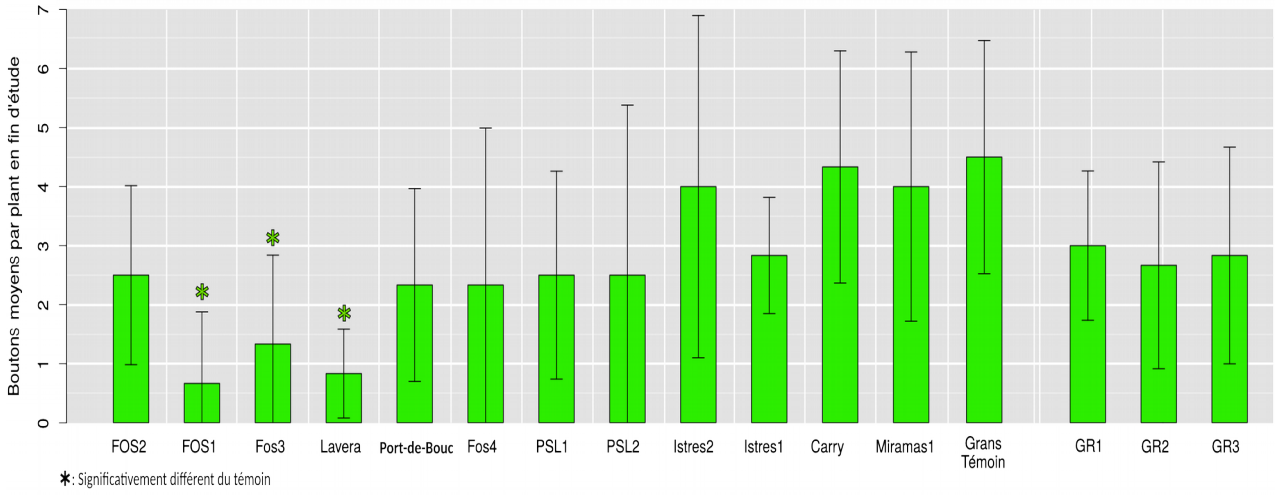


Figure 15 : Nombre moyen de bourgeons sur chaque plant en fin d'étude (N=6, les étoiles indiquent différences significative avec notre témoin Grans Témoin ; p<0,05).

Il est toutefois bien visible que le nombre de bourgeons en fin d'étude semble augmenter en fonction de la distance par rapport à des installations industrielles (Figure 15). En effet, les stations les plus éloignées de complexes industriels témoignent d'une moyenne proche de quatre bourgeons par plant en fin d'étude. À l'inverse, trois des quatre stations localisées à proximité des installations industrielles ne présentent qu'un bourgeon en moyenne, témoignant de plants affectés par leur exposition environnementale et dont le développement s'est affaibli.

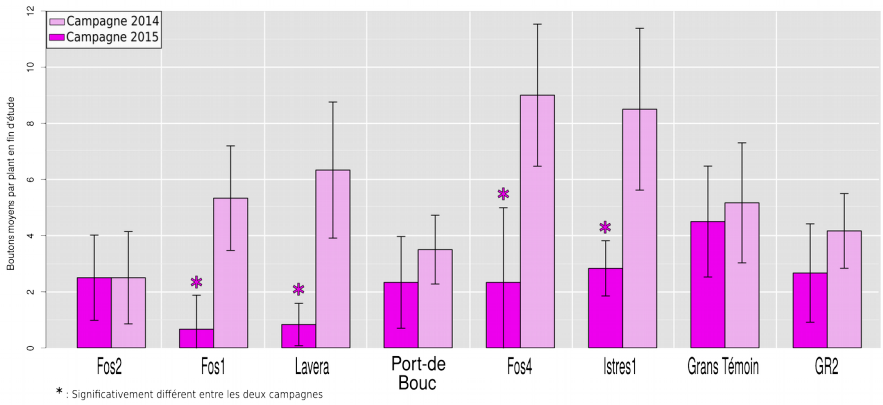


Figure 16 : Comparaison du nombre moyen de bourgeons sur chaque plant en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015. (N=6, les étoiles indiquent une différence significative entre les deux années sur une même station ; p<0,05).

La comparaison entre les campagnes 2014 et 2015 du nombre de bourgeons en fin d'étude (Figure 16) laisse entrevoir une baisse générale en 2015 de ce paramètre. Seules les stations Fos2, Grans Témoin et GR2 ne présentent pas de différences significatives entre les campagnes 2014 et 2015.

II.1.6. Feuilles nécrosées

La Figure 17 présente l'évolution du nombre de feuilles nécrosées durant toute la période d'étude avec en parallèle les tests de significativité par rapport au témoin à chaque temps.

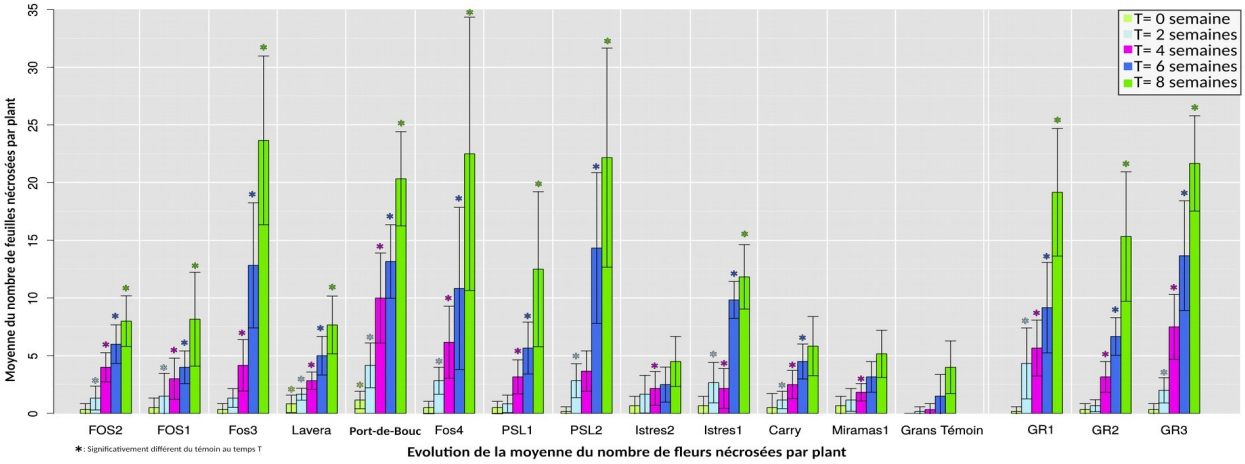


Figure 17 : Evolution du nombre de feuilles nécrosées des différentes stations à T=0 semaine, T=2 semaines, T=4 semaines, T=6 semaines et T=8 semaines (N=6, les étoiles indiquent des différences significatives avec la station Grans Témoin ; p<0,05)..

Dès le premier mois d'étude (T = 4 semaines), plusieurs stations affichent un nombre de feuilles nécrosées plus important comparé à l'ensemble des stations d'études. Ainsi, les stations Fos4, Port-de-Bouc, GR1 et GR3 voient déjà leurs moyennes dépasser les cinq feuilles nécrosées par plant. Après huit semaines d'exposition, seules les stations de Miramas 1, Carry et Istres 2 affichent un nombre de feuilles nécrosées

plus faible que la station témoin avec des valeurs moyennes oscillant autour de cinq feuilles nécrosées par plant. Ainsi, l'ensemble des stations situées dans un périmètre de 7 km autour d'une installation industrielle ou proche d'un axe autoroutier témoignent d'une moyenne en feuilles nécrosées significativement plus importante que notre station de référence. Cette différence est particulièrement plus marquée au sein des stations Fos3, Fos4, Port-de-Bouc, PSL2, GR1 et GR3 qui témoignent d'un nombre de feuilles nécrosées cinq fois plus conséquent que notre témoin.

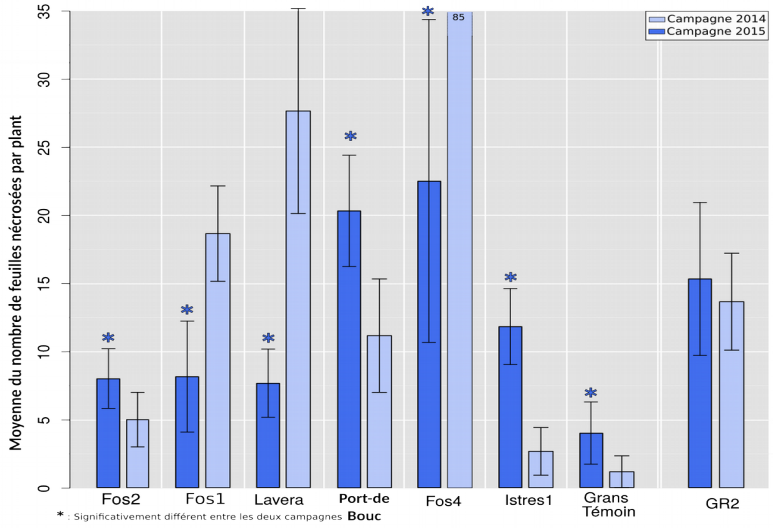


Figure 18 : Comparaison du nombre moyen de feuilles nécrosées en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015. (N=6, les étoiles indiquent une différence significative entre les deux années sur une même station ; p<0,05).

L'évolution du nombre de feuilles nécrosées entre les campagnes 2014 et 2015 (Figure 18) se révèle hétérogène. Seule la station proche de l'autoroute A54 présente un nombre de nécroses comparable les 2 années, comme pour l'ensemble des paramètres de développement des pétunias qui ont été mesurés. Cela montre qu'à trafic constant, l'impact reste similaire sur les pétunias. Par conséquent, au vu des données de trafic disponibles qui sont comparables entre les 2 années sur l'ensemble des grands axes (38178 véhicules/jour sur l'A54 en 2014 contre 39209 véhicules/jour en 2015 ; 26714 véhicules/jour en 2013 sur la N568 contre 27288 véhicules/jour en 2014. Chiffres : VINCI et DIR Méditeranée), les variations interannuelles observées ne peuvent s'expliquer par la seule exposition due au trafic routier, mais à d'autres sources d'émissions, notamment industrielles. Si cela se traduit de manière homogène pour certains paramètres (nombre de bourgeons, nécrose des fleurs et poids sec des plants), la complexité du lien entre exposition et développement conduit ici à une réponse hétérogène selon les stations, pointant la nécessité d'enrichir les connaissances à ce sujet afin d'interpréter plus précisément certains résultats.

II.1.7. Une réponse physiologique différente en fonction de l'exposition

Les résultats obtenus en étudiant plusieurs paramètres morphologiques détaillant le développement général de *Pétunia hybrida* permet de mettre en avant un impact sur le développement des plants situés à proximité des complexes industriels en comparaison des stations plus éloignées. Les plants situés dans un périmètre de 4 km autour d'une industrie émettrice en polluants (Fos-sur-Mer, Lavéra, Port-Saint-Louis-du-Rhône et Port-de-Bouc) témoignent ainsi d'un développement morphologique plus faible en comparaison avec les plants situés à plus de 15 km de ces mêmes industries (Miramas, Grans, Carry-le-Rouet). La campagne 2014 mise en œuvre par l'Institut Ecocitoyen avait déjà permis de révéler une croissance générale des pétunias nettement plus faible au sein de localités ayant une exposition industrielle. L'augmentation du nombre de stations en 2015 à permis de tirer des conclusions semblables, les stations à

dominante industrielle affichant le développement général le moins important. Un impact plus modéré est aussi observé au sein des stations Istres et Miramas, toujours plus faible que les stations industrielles mais plus important que les stations éloignées des principales sources de polluants atmosphériques.

II.1.8. Analyse en Composantes Principales (ACP)

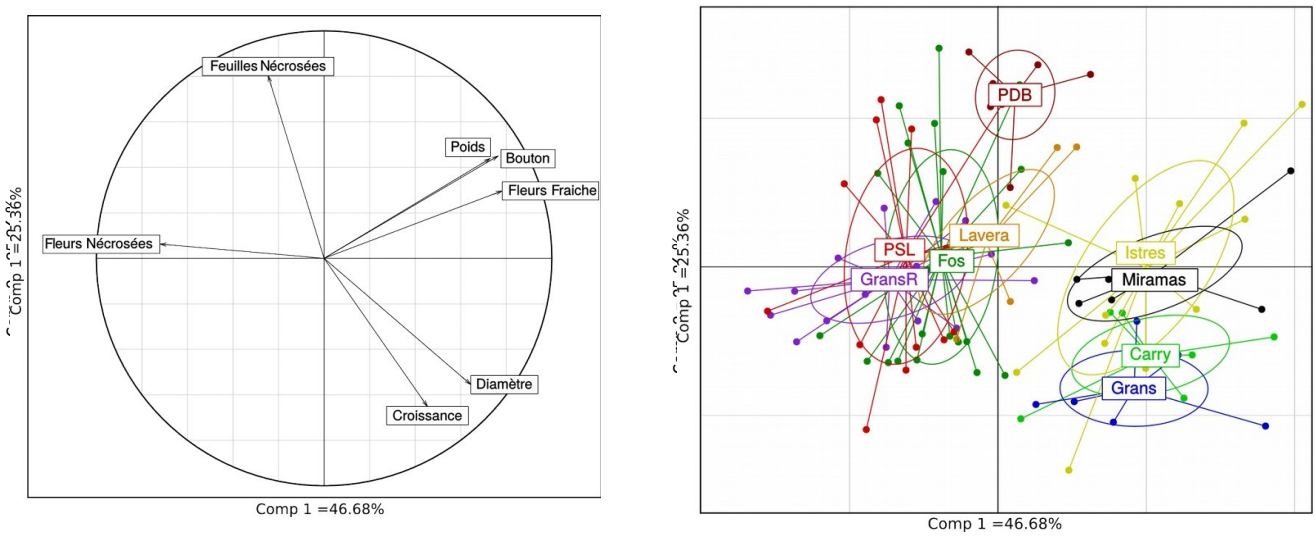


Figure 19 : Résultat de l'analyse en composantes principales (ACP), avec a) le cercle de corrélation des paramètres étudiés et b) la projection sur le plant factoriel des individus en intégrant leur localisation(n=96).

Une analyse statistique multifactorielle (analyse en composantes principales, ACP) a été effectuée sur l'ensemble des stations d'étude pour mettre en évidence les relations existantes entre les individus (plants de pétunias) de chaque station et les variables (paramètres de développement) étudiées à l'aide du cercle de corrélation et d'une projection de points sur le plan factoriel principal, celui dont les composantes ont le plus d'influence sur la variabilité.

Ces deux premiers axes permettent d'expliquer 72,04 % de la variance (axe 1 = 46,68 %, axe 2= 25,36 %). Ainsi, le cercle de corrélation met en évidence certaines relations entre plusieurs paramètres morphologiques. Le poids sec, le nombre de bourgeons et le nombre de fleurs fraîches semblent relativement corrélés entre eux. La croissance totale ainsi que le diamètre des fleurs évoluent également dans le même sens, ce sont des paramètres qui augmentent avec un meilleur développement des plants. Au contraire, le nombre de fleurs nécrosées ainsi que le nombre de feuilles nécrosées, qui représentent une atteinte physiologique quand leur nombre augmente, évoluent logiquement de façon opposée. Cela confirme bien la pertinence des paramètres étudiés qui illustrent la qualité du développement des plants : lorsque celui-ci est normal, le développement (bourgeons, fleurs, taille et poids de la plante) est bon et les nécroses sont plus rares. Lorsqu'on regarde le positionnement des stations par rapport à ces paramètres, on voit apparaître une disposition distincte des stations d'étude. Les stations Carry, Grans témoin, Istres et Miramas sont isolées des autres stations d'étude. En faisant la relation avec le cercle de corrélation, il apparaît que ces quatre villes sont corrélées avec les paramètres positifs de développement comme un nombre de bourgeons et de fleurs importants, ainsi qu'une taille de fleurs, une croissance et un poids sec relativement élevés. Les plants de pétunias présents au sein de ces quatre villes d'étude affichent clairement un bon développement morphologique par rapport aux autres villes à l'étude. Les plants présents à Grans et Carry-le-Rouet semblent se démarquer des plants localisés à Istres et Miramas, avec une croissance et un diamètre de fleur encore plus importants. Il apparaît ainsi que les stations éloignées de toutes sources éventuelles de contamination atmosphérique témoignent d'un développement morphologique peu perturbé.

Les plants de pétunias étudiés sur les communes à caractère industriel (Fos-sur-Mer, Lavéra et Port-Saint-Louis-du-Rhône) sont isolés au sein d'un groupement de stations bien distinct. La mise en parallèle avec le cercle de corrélations des paramètres étudiés (Figure 19) montre une altération des paramètres morphologiques. Ces plants de pétunias témoignent d'un nombre de fleurs nécrosées particulièrement important ainsi qu'une corrélation négative avec les paramètres de bon développement morphologique comme le nombre de bourgeons et de fleurs ainsi que le poids sec en fin d'étude. Il est ainsi confirmé par cette analyse statistique que les plants localisés au sein d'un environnement industriel présentent un développement morphologique général perturbé. Il est également visible que ces perturbations générales caractérisées par une exposition industrielle sont comparables entre elles du point de vue du développement des pétunias et que l'ensemble de ces plants témoignent de réactions ou de dommages morphologiques relativement similaires. Il est important de signaler que les 18 plants de Pe*tunias hybrida* situés à proximité de l'autoroute sont regroupés statistiquement avec les stations à caractère industriel, indiquant ainsi un impact morphologique comparable. Du point de vue du développement morphologique des pétunias, la proximité d'une autoroute semble avoir un impact semblable à une exposition industrielle.

La station située à Port-de-Bouc, à caractère explicitement industriel, a la particularité d'avoir été, lors de la campagne 2014, la station où les plants de pétunias ont présenté les perturbations morphologiques les plus considérables parmi l'ensemble des stations à l'étude. Lors de la campagne 2015, il est visible sur la Figure 19b que les plants situés à Port-de-Bouc se retrouvent encore isolés de l'ensemble des plants considérés dans cette étude, du fait d'une altération physiologique au niveau de leur développement général. Ces plants de pétunias affichent clairement la plus faible taille de fleurs et la croissance la moins importante. Lors de la campagne 2014, les modifications morphologiques observées sur les plants situés à Port-de-Bouc avaient soulevé un certain questionnement notamment sur une éventuelle influence induite par la proximité de la mer. En 2014, Villarino et son équipe [Villarino et al, 2014] ont pu mettre en évidence un stress génétique sur *Petunia hybrida* induit par une concentration élevée en sodium impactant le développement morphologique chez cette plante. Pour observer une potentielle perturbation due au sodium apporté par les embruns marins sur le développement des pétunias, la campagne 2015 a intégré une station située a Carry-le-Rouet à proximité immédiate de la mer (locaux du parc marin de la Côte Bleue). Les deux stations étant proches de la mer et ainsi exposées aux embruns marins se différencient essentiellement par leur environnement qui est directement relié à l'exposition à la pollution industrielle, théoriquement plus faible à Carry. Il s'avère ainsi que la station de Carry-le-Rouet affiche un développement morphologique des six plants de pétunia très peu perturbé par rapport à l'ensemble des stations à l'étude, au contraire de Port-de-Bouc. Ainsi, l'influence des embruns marins semble ici très limitée, voire inexistante. Au contraire, la proximité à un complexe industriel influe fortement sur le bon développement des plants de *Petunia hybrida*.

II.2. Exposition routière de *Petunia hybrida*

Le détail de l'ensemble des résultats concernant l'étude des paramètres morphologiques des pétunias en fonction des différentes stations d'étude indique un impact non négligeable sur les plants de pétunias situés à proximité de l'autoroute A54. Les différentes analyses statistiques révèlent un impact similaire sur le développement général des pétunias entre les stations situées à moins de 4 km d'une industrie lourde et les plants situés à proximité de l'autoroute (40 à 170 m).
La campagne 2015 s'est alors attachée à tenter de mieux comprendre l'influence du trafic routier sur le développement des pétunias. C'est pour cela qu'un ensemble de trois stations a été positionné selon un gradient de distance par rapport à l'autoroute (Figure 1). Ces stations étaient également accompagnées de cartouches de prélèvement de COV afin de mesurer le niveau d'exposition en COV atmosphériques selon le même gradient de distance. La Figure 20 décrit les résultats des mesures morphologiques réalisées sur les pétunias par rapport à la distance à l'autoroute A54.

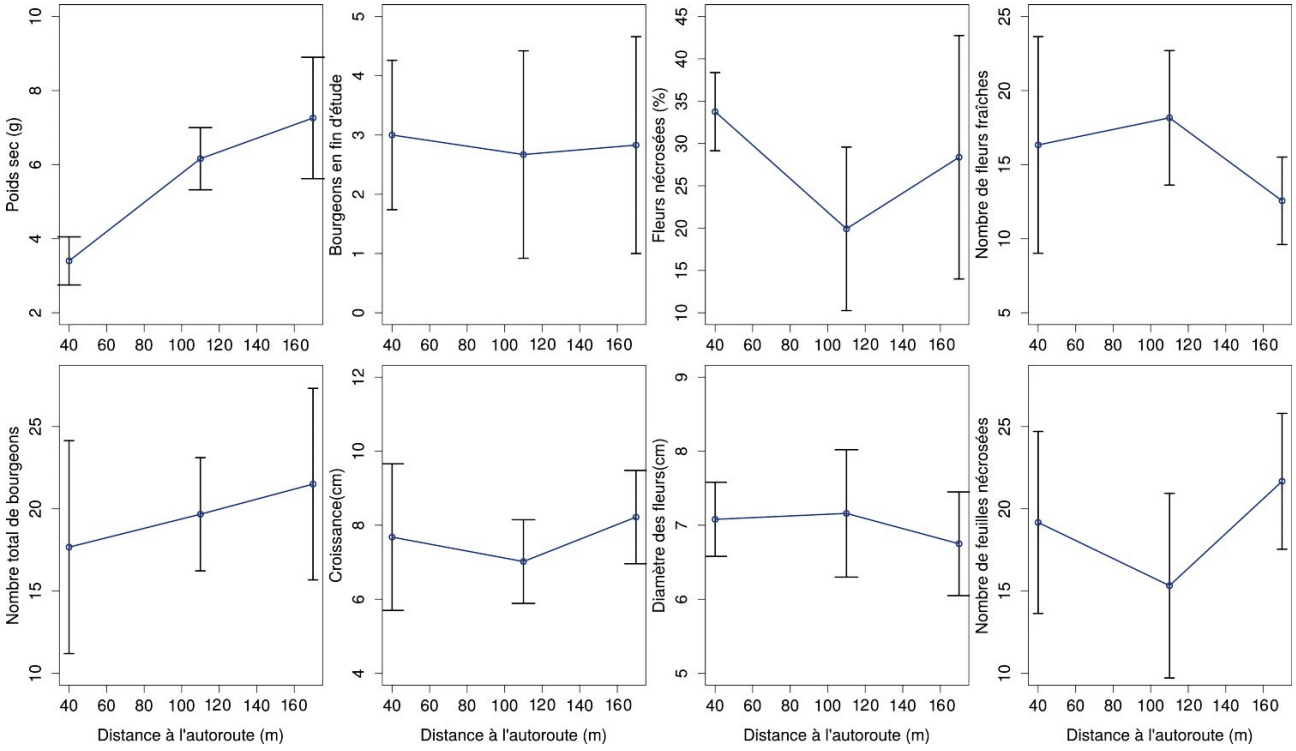


Figure 20 : Étude des différents paramètres morphologiques de petunia hybrida en fonction de la distance à l'autoroute A54.

Un impact certain est observé sur l'ensemble des trois stations à l'étude, mais l'hypothèse d'un impact progressif en fonction de la distance à l'autoroute A54 n'apparaît pas sur le gradient de distances étudiées (40 – 170 m). L'ensemble des paramètres morphologiques étudiés ici n'affichent pas de différence entre ces trois stations, à l'exception du poids sec en fin d'étude et du nombre total de bourgeons, qui semblent augmenter avec la distance par rapport à l'autoroute. Ces résultats ne permettent pas d'observer une influence de la distance par rapport à un axe routier important sur le développement morphologique des pétunias. L'analyse des concentrations atmosphériques de certains COV (notamment BTEX, alcanes) n'a pas permis de mettre en évidence une exposition particulière de ces trois stations d'étude (IECP, 2016). La présence de grands axes de circulation au sein de la zone d'étude nécessite de caractériser au mieux les émissions du trafic routier afin de pouvoir en estimer les contributions potentielles ainsi que l'impact sur *Petunia hybrida*.

Les concentrations en COV mesurées au sein des stations Grans-Route et Grans Témoin demeurent à des niveaux quasiment semblables (Figure 21). Il ressort que la concentration atmosphérique en BTEX est légèrement plus faible au niveau de Grans Témoin. Parmi les alcanes échantillonnés (décane, nonane, cyclohexane et hexane), on observe des concentrations sensiblement plus élevées au sein de la station Grans Témoin. La concentration atmosphérique de ces COV ne semble pas être influencée par la présence de l'autoroute. Ces niveaux d'exposition semblables se retrouvent également en comparant un dernier ensemble de COV regroupant le styrène, l'ETBE, le 124-tryméthylbenzène et le tétrachloroéthylène. Le niveau total de ces quatre COV se révèle, là encore, très largement comparable entre les stations Grans-Route et la station Témoin. L'ensemble des COV analysés ici ne semble pas être influencé par la présence d'un axe routier important sachant qu'aucune différence majeure n'est relevée.

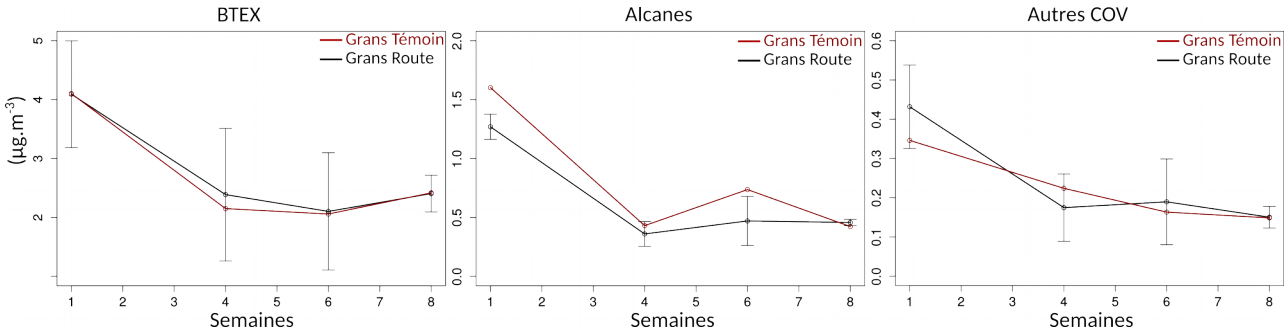


Figure 21 : Comparaison des concentrations en BTEX, Alcanes et autres COV au sein des stations Grans témoin et Grans route.

Malgré des concentrations atmosphériques en COV totaux équivalentes au niveau des stations Grans-Témoin et Grans-Route, on peut remarquer des différences significatives sur de nombreux paramètres définissant le développement morphologique chez les pétunias. Les plants de pétunias situés à proximité de l'autoroute A54 semblent relativement impactés en comparaison avec les plants situés au sein de la station Grans Témoin. Or, la distribution de l'ensemble de ces quatre stations s'est organisée autour d'une situation géographique similaire : un même village, une distance importante par rapport à une industrie et une exposition qualifiée de rurale. La proximité des stations Grans-Route vis-à-vis de l'autoroute A54 constitue la différence majeure par rapport à la station Grans-Témoin, nous permettant ainsi de caractériser l'effet routier sur le développement des pétunias et l'exposition en COV. Les COV analysés ici ne semble pas être des composés affectant réellement le développement des pétunias à proximité de l'autoroute. Or, à la vue du développement impacté des pétunias des stations Grans Route, l'hypothèse d'un autre facteur atmosphérique pouvant influencer le développement de *Petunia hybrida* n'est pas à écarter.

Le peu de littérature existante à ce sujet fait souvent référence à un effet probable de l'éthylène sur le développement des pétunias. Or, les profils d'émissions calculés par Latella et al. (2005) en fonction de deux catégories de véhicules diesel (avant 2000 et après 2000) présentent l'éthylène comme le COV le plus émis par les deux catégories (20,4 % pour les véhicules diesel avant 2000, 31,8 % pour les véhicules diesel après 2000). Le diesel étant incontestablement le carburant le plus utilisé sur les routes françaises, les différences de concentrations seraient potentiellement différentes entre Grans-Route et Grans témoin. L'hypothèse d'un impact de l'éthylène sur le développement des pétunias pourrait être une piste pertinente à approfondir. De plus, Bignal et al. (2008) ont pu observer les effets d'une autoroute sur le développement général de bryophytes. Il s'avère que plusieurs paramètres comme la croissance, la concentration en chlorophylle ou la concentration en azote se voient diminués notamment dans un périmètre de 100 m autour de l'autoroute. Ces résultats étaient compatibles avec le profil de pollution par le dioxyde d'azote, attestant encore une fois que les COV, ou plus précisément l'éthylène, ne sont potentiellement pas les seuls polluants atmosphériques à avoir une influence sur le développement de certains végétaux. L'impact d'une autoroute sur le développement foliaire de certaines espèces arbustives localisées dans un rayon de 100 m autour d'une autoroute a déjà été observé [Keeley and al., 2007], attestant d'une défoliation significative de ces arbres.

Les résultats enregistrés sur les trois stations Grans-Route, concernant les concentrations atmosphériques de ces COV, sont ainsi comparables à ceux enregistrés au sein de la station Grans Témoin, station qui ne présente aucune source de COV à proximité. Malgré cela, le développement morphologique global des pétunias de ces trois stations d'étude semble impacté en comparaison à l'ensemble des stations positionnées sur le territoire (Figure 19). L'influence routière sur le développement des pétunias ne peut donc être écartée.

II.3. Exposition à des polluants atmosphériques de *Petunia hybrida*

II.3.1. Relation entre Composés Organiques Volatils et développement de *Petunia hybrida*

L'étude des différents paramètres de développement chez *Petunia hybrida* a déjà permis de mettre en évidence un impact significatif sur le développement général des pétunias au sein des stations ayant une proximité relativement importante avec les industries. La Figure 22 présente l'évolution des différents paramètres morphologiques étudiés sur l'ensemble des plants de pétunias en fonction de la concentration totale en 15 COV différents (BTEX, alcanes notamment) prélevés par cartouches Radiello. La quantité de COV est ainsi présentée sous forme d'une somme des concentrations moyennes de l'ensemble des COV analysés ici, enregistrée sur l'ensemble de la durée d'étude au sein de chaque station d'étude (IECP, 2016) .
À l'exception du nombre de fleurs fraîches, on remarque que les paramètres morphologiques indiquant une bonne croissance diminuent lorsque la concentration en COV augmente. Inversement, les atteintes au développement des pétunias (nécroses, croissance plus faible) augmentent. Parmi eux, seule la croissance globale (taille des plants) montre une corrélation significative avec la teneur atmosphérique en COV ($R=-0,32$; $p=0,0027$) .

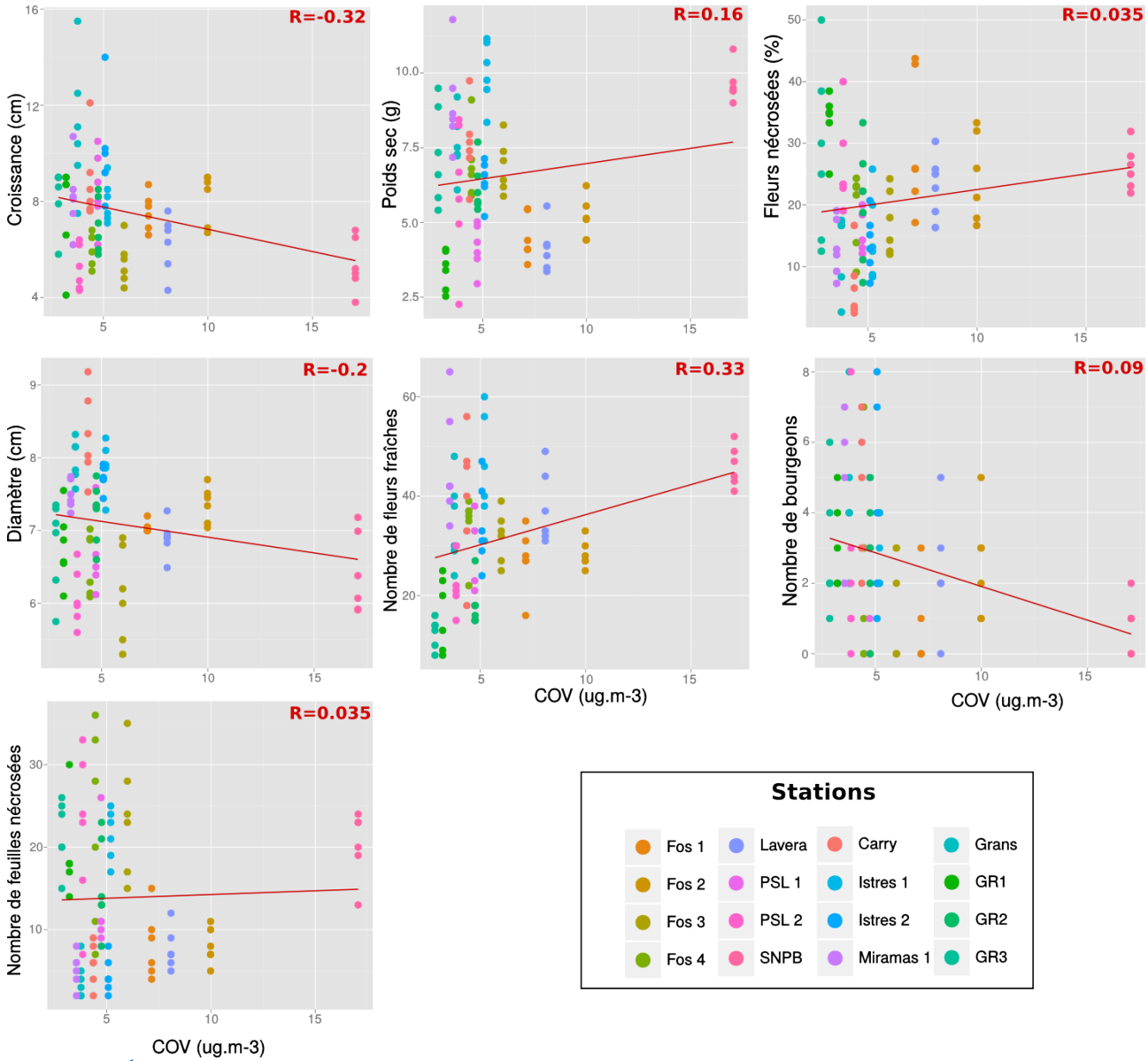


Figure 22 : Étude des différents paramètres morphologiques chez Petunia hybrida en fonction de la concentration atmosphérique en COV.

Si on exclut la station de Port-de-Bouc (SNPB), la mesure du poids sec en fin d'étude affiche (Figure 23) aussi une corrélation relativement importante avec la concentration atmosphérique en COV (R=-0,30 ; p=0,039), confirmant que la baisse globale de croissance chez les pétunias concorde ici avec des concentrations plus élevées en COV. Les plants situés à Port-de-Bouc semblent avoir réagi de manière très particulière par rapport à l'ensemble des plants à l'étude mais aussi en comparaison avec la campagne 2014, avec une hauteur faible mais un poids sec élevé comme discuté précédemment.

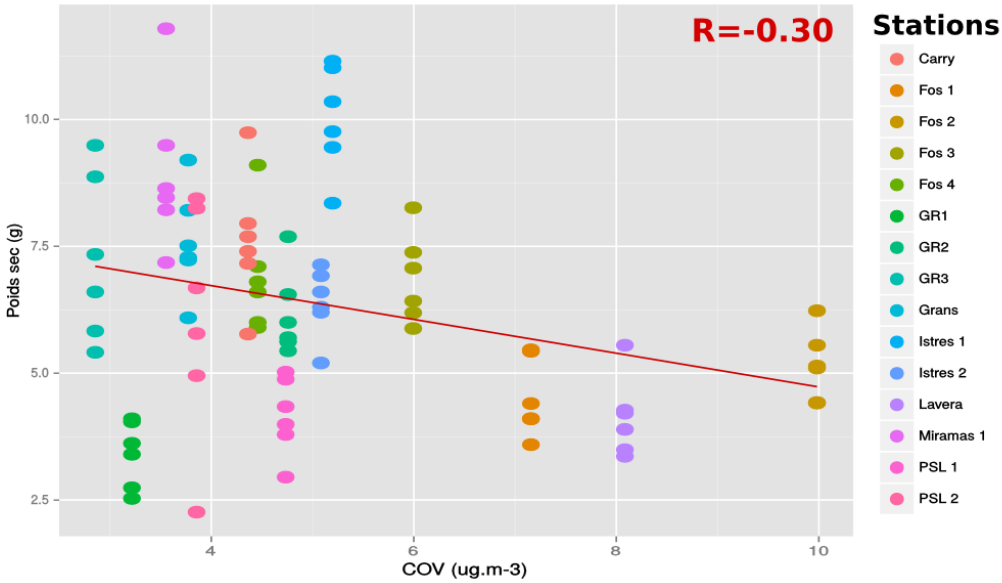


Figure 23 : Étude du poids chez Petunia hybrida en fonction de la concentration atmosphérique en COV en excluant les valeurs enregistrées à Port-de-Bouc.

L'analyse des résultats concernant les différents paramètres étudiés relatifs aux fleurs des pétunias ont déjà permis de constater que la situation géographique des plants par rapport aux grands centres industriels pouvait avoir une influence sur le diamètre des fleurs, le nombre de fleurs nécrosées, le nombre de fleurs fraîches ou encore le nombre de bourgeons (Figure 11,13,15,17). On peut notamment constater une corrélation positive pour le nombre de fleurs fraîches (R=0,33 ; p=0,00091) et négative pour le diamètre moyen des fleurs (R=-0,2 ; p=0,049) indiquant ainsi un nombre plus important de fleurs avec une taille significativement plus faible au sein des stations ayant une forte exposition en COV atmosphériques.

De même, le nombre de fleurs nécrosées semble influencé par les résultats observés au niveau du groupement de stations situé à proximité de l'autoroute A54, comme pour le poids sec à Port-de-Bouc. Ces trois stations (GR1, GR2, GR3) affichent ici un pourcentage de fleurs nécrosées relativement important alors que les niveaux de COV sont très limités. Si on exclut ces stations, le nombre de fleurs nécrosées témoigne d'une corrélation positive relativement forte (R=0,41, p=0,00017) entre les nécroses des fleurs et la concentration atmosphérique en COV. Cela indiquerait alors un lien entre l'augmentation des concentrations en COV et le nombre de nécroses sur les fleurs de pétunias, relié à la proximité des sites industriels.

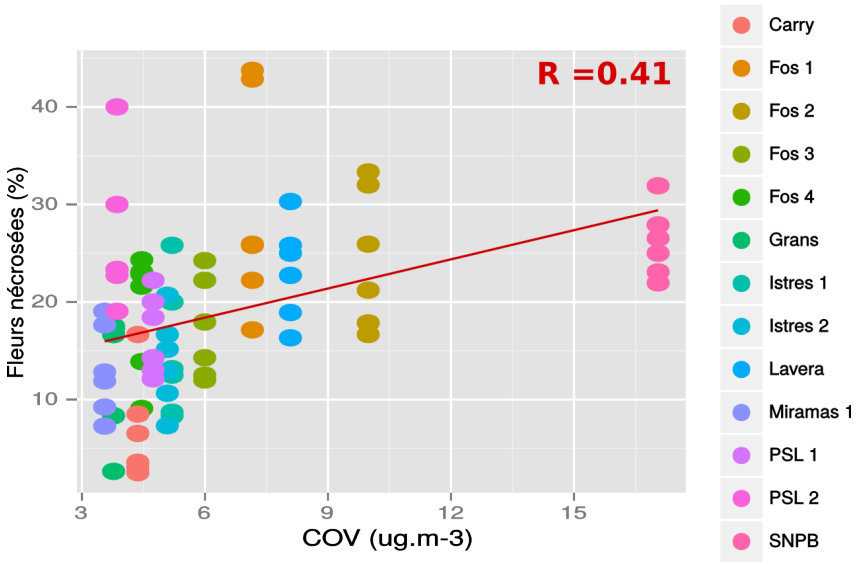


Figure 24 : Étude du nombre de fleurs nécrosées chez Petunia hybrida en fonction de la concentration atmosphérique en COV en excluant les valeurs enregistrées sur l'ensemble des stations Grans Route.

II.3.2. Dioxyde de soufre et PM10

L'étude de l'exposition en SO_2 et PM10 (données Airpaca) de certaines des stations à l'étude sur la même période a déjà été réalisée et détaillée (IECP, 2016). Il en ressort à la fois une concentration logiquement plus importante en SO_2 à proximité des installations industrielles de Fos-sur-Mer et Lavéra mais également une influence de ces complexes sur l'exposition en SO_2 dans les villes voisines comme Istres ou Carry-le-Rouet. D'autre part, la localisation géographique des industries a relativement moins d'influence sur l'exposition aux PM10. Les particules en suspension comme les PM10 ne sont pas seulement liées aux activités industrielles comme le dioxyde de soufre, leurs sources étant beaucoup plus nombreuses. Les corrélations entre les différents paramètres morphologiques et la concentration atmosphérique en SO_2 et PM10 sont indiquées dans le Tableau 3. Les données SO_2 concernent des mesures atmosphériques au sein des villes de Istres, Fos-sur-Mer, Port-Saint-Louis-du-Rhône, Port-de-Bouc, Lavéra ainsi que Carry-le Rouet. Les données relatives aux PM10 sont, quant à elles, disponibles sur un nombre plus faible de stations, Miramas, Fos-sur-Mer, Port-Saint-Louis-du-Rhône et Port-de-Bouc.

Le calcul de ces corrélations entre les paramètres morphologiques observés chez *Petunia hybrida* et deux autres polluants atmosphériques différents fait apparaître une corrélation plus importante entre la teneur atmosphérique en SO_2 et l'atteinte au développement général des pétunias par rapport aux PM10. Il s'avère ici que le seul nombre de feuilles nécrosées ne présentent pas de corrélation significative avec l'exposition en SO_2. Ainsi, la croissance moyenne, le poids sec en fin d'étude et le diamètre moyen sont corrélés significativement et négativement avec le SO_2, indiquant une influence potentielle de la quantité atmosphérique en SO_2 sur ces deux paramètres morphologiques. Cette influence se traduit ici par une baisse potentielle de la taille des fleurs et des plants ainsi que du poids en fonction des rejets atmosphériques d'origine industrielle. Le nombre de fleurs fraîches et de fleurs nécrosées sont ici corrélés positivement avec la quantité atmosphérique en SO_2, ce qui signifie que les nombres de fleurs et de fleurs nécrosées augmentent tous les deux avec la concentration en SO2.

Tableau 3 : Corrélations entre les différents paramètres morphologiques et la concentration atmosphérique en SO_2 et PM10

	SO_2 (N = 6)		PM10 (N = 4)	
Paramètre morphologique	Corrélation R	P-value	Corrélation R	P-value
Croissance	— 0,41	0,001	0,32	0,04
Poids	— 0,32	0,017	0,23	0,17
Fleurs Fraîches	0,36	0,005	— 0,09	0,56
Fleurs Nécrosées	0,39	0,002	— 0,12	0,44
Feuilles Nécrosées	0,12	0,36	— 0,39	0,01
Diamètre des fleurs	— 0,31	0,017	0,4	0,0088
Bourgeons	0,13	0,34	— 0,17	0,29

Il est intéressant de noter que les corrélations observées entre le SO_2 atmosphérique et le développement morphologique des pétunias sont largement comparables à celles observées en confrontant les COV atmosphériques et les paramètres morphologiques observés chez les pétunias. Il en ressort que les COV et le SO_2 présentent des corrélations semblables et comparables (positives et négatives) avec chaque paramètre morphologique chez les pétunias. Les concentrations atmosphériques en COV et SO_2 sont ainsi corrélées négativement avec la croissance moyenne des plants, le poids sec en fin d'étude et le diamètre moyen des fleurs, alors qu'une corrélation positive relativement importante est observée pour le nombre de fleurs fraîches et nécrosées.

Dans le cas des PM10 en revanche, peu de corrélations sont observées. De plus, la particularité des PM10 est qu'elles semblent varier inversement aux COV et au SO_2. La croissance des plants et le diamètre des fleurs témoignent d'une corrélation positive, respectivement de 0,32 (p=0,04) et 0,4 (p=0,009), soit une augmentation potentielle de ces deux paramètres morphologiques avec l'augmentation de la concentration atmosphérique en PM10. Toutefois les calculs effectués pour les PM10 concernent seulement 4 stations (contre 6 pour le SO2), ce qui peut conduire plus facilement à des résultats peu représentatifs comme c'est le cas ici.

Ces résultats confortent l'hypothèse d'une influence importante de l'exposition industrielle sur le développement morphologique des pétunias. Du point de vue des concentrations atmosphériques en COV ou SO_2, il est observé une baisse du développement général en fonction de l'augmentation de ces deux polluants atmosphériques qui semblent être relativement liés. En revanche, il semblerait que la concentration atmosphérique en PM10 ne soit pas un facteur majoritaire concernant l'impact de développement général observé chez les pétunias. D'autre part, l'absence de COV (et certainement de SO_2) au sein de la station Grans-Route, avec pourtant des pétunias relativement mal développés, met en évidence l'impact potentiel de probablement plusieurs autres facteurs atmosphériques pouvant perturber le développement des pétunias.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La bioindication par *Petunia hybrida* de la pollution de l'air sur le pourtour de l'Étang de Berre a permis de caractériser l'impact des émissions industrielles locales sur le développement morphologique d'un ensemble de 17 stations d'étude de *Petunia hybrida*. Les résultats obtenus en étudiant plusieurs paramètres morphologiques détaillant le développement général de cette plante révèlent un effet sur le développement des plants situés à proximité d'un complexe industriel en comparaison à des stations éloignées de toutes sources potentielles. Les plants situés dans un périmètre de 4 km autour d'un complexe industriel (Fos-sur-Mer, Lavéra, Port-Saint-Louis-du-Rhône et Port-de-Bouc) témoignent ainsi d'un développement morphologique significativement plus faible en comparaison des plants situés à plus de 15 km de ces mêmes industries (Miramas, Grans, Carry-le-Rouet). La campagne 2014 orchestrée par l'Institut Ecocitoyen avait déjà permis de révéler une croissance générale des pétunias plus faible lorsqu'ils étaient exposés à des émissions industrielles proches.

Cette campagne de bioindication de la pollution de l'air sur le pourtour de l'Étang de Berre a été précisée en y introduisant des cartouches de prélèvement passif de COV atmosphériques pour compléter les mesures de SO_2 et PM10. Les résultats indiquent que les stations les plus éloignées de la zone industrielle (Carry, Grans et Miramas) affichent les concentrations moyennes en COV comme en SO_2 les plus faibles observées durant l'étude. Les stations d'étude à caractère industriel (Fos-sur-Mer, Lavéra, Port-de-Bouc) témoignent de concentrations significativement plus importantes, concordant ainsi avec les observations relatives au développement de *Petunia hybrida* : les paramètres morphologiques étudiés chez les pétunias semblent être impactés par la faible proximité aux industries.

Cette étude de bioindication de la qualité de l'air par les pétunias s'est aussi attachée à caractériser l'effet routier sur la croissance des pétunias. Malgré des niveaux mesurés en COV relativement faibles, le développement morphologique global des pétunias localisés à proximité de l'autoroute A54 présente un impact important en comparaison à l'ensemble des stations positionnées sur le territoire et semble avoir un impact proche de celui d'une exposition industrielle.

L'étude de plusieurs polluants atmosphériques a permis de mettre en évidence une corrélation relativement importante entre le SO_2, les COV et un impact négatif sur les paramètres de développement étudiés chez *Petunia hybrida*. Ces résultats permettent, tout d'abord, de conforter l'hypothèse d'une influence des émissions industrielles sur le développement morphologique de cette plante. Du point de vue des concentrations atmosphériques en COV ou en SO_2, il est observé une baisse du développement général en fonction de l'augmentation de ces deux polluants atmosphériques dont les niveaux concordent sur le territoire. De plus, la concentration atmosphérique en PM10 ne semble pas impacter de façon négative le développement des pétunias.

Si l'ensemble de ces résultats indique un certain impact industriel sur la croissance des plants de pétunias, il reste difficile d'établir des liens directs entre un ou plusieurs polluants et les impacts morphologiques chez les pétunias. Les polluants atmosphériques étant particulièrement nombreux et de nature physico-chimique très différente, il est complexe d'établir des liens de causalité par des études environnementales seules. Pour répondre à ce type de question, des travaux en conditions contrôlées en laboratoire pourraient par exemple fournir une première réponse sur les polluants impliqués ou non dans l'atteinte au développement des pétunias. Quoi qu'il en soit, *Petunia hybrida* apparaît comme un bioindicateur pertinent de la pollution de l'air. Les résultats sont cohérents avec ceux de l'année précédente, mais montrent aussi des variations qui précisent la sensibilité de cet indicateur à la qualité de l'air. Enfin, l'implication des volontaires dans l'étude et la fiabilité des mesures qu'ils ont réalisées démontrent les capacités de ce type de dispositif, tant dans l'échange entre scientifiques et population locale, à produire des résultats scientifiques pertinents pour l'évaluation de la qualité de l'air.

BIBLIOGRAPHIE

Abeles F.B. Ethylene in plant biology. (**1973**) Academic Press.

Ackerly D.D., Bazzaz F.A. Plant-growth and reproduction along CO2 gradients nonlinear responses and implications for community change. Global change biology 1 (**1995**) 199-207.

Agnan Y., Séjakon-Delmas N., Probst A. Comparing early twentieth century and present-day atmospheric pollution in SW France : A story of lichens. Environmental Pollution 172 (**2013**) 139-148.

BASOL.. Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant à une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (www.basol.developpement – durable.gouv.fr). (**2014**).

Bignal K.L., Ashmore M.R., Headley A.D. Effects of air pollution from road transport on growth andphysiology of six transplanted bryophyte species. Environmental Pollution 156 (**2008**) 332 340.

Boisot O. Caractérisation du climat local sur le territoire du SAN Ouest-Provence et application aux études de la qualité de l'air. Rapport de stage Master 2, Université de Toulon – Institut Écocitoyen (**2012**) 84 p.

De Temmerman L., Claeys N., Roekens E., Guns M. Biomonitoring of airborne mercury with perennial ryegrass cultures. Environmental Pollution 146 (**2007**) 458-462

Dron J., Austruy A., Agnan Y., Ratier A., Chamaret P. 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. Pollution atmosphérique 228 (**2016**).

Davranche L., Desailly G, Conseil P., Cuny D. Structure et aspects pédagogiques d'un réseau régional de bioindication de l'ozone par le tabac en Nord-Pas de Calais. Air pur 77 (**2009**) 59-63.

Fontan J. Les pollutions de l'air les connaître pour les combattre. Vuibert. (**2003**).

Gardiner B., Berry P., Moulia B. Review : Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. Plant Science 245 (**2016**) 94–118.

Garrec J.P., Van Haluwyn C. Biosurveillance végétale de la qualité de l'air. Tec & Doc (2002) 117.

Gibson, Mark D. The spatial and seasonal variation of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in Cape Breton Highlands National Park, Canada, and the association with lichen abundance. Atmosphéric environment 64 (**2013**) 303-311.

Gombert S., Asta J., Seaward M.R.D. Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isère, southeast France). Ecological Indicators 6 (**2006**) 429-443

Grantz D.A, Garner J.H.B., Johnson D.W. Ecological effects of particulate matter. Environment International 29 (**2003**) 213-239.

Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, Dauphin C.E. Campagne de mesures atmosphériques des Composés Organiques Volatils par échantillonnage passif (**2016**).

Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions, Dauphin C.E. Bioindication par *Petunia Hybrida* de la pollution atmosphérique actuelle en Composés Organiques Volatils du territoire du Syndicat d'Agglomération Nouvelle Ouest Provence : Sources, degré d'influence et adaptabilité citoyenne. (**2014**).http://www.institut-ecocitoyen.fr/publication/petunia/AIR%20-%202014 %20-%20Dauphin %20-%20Rapp%20StageM2 %20[P%C3 %A9tunias].pdf.

Latella A., Stani G., Cobelli L., Duane M., Junninen H., Astorga C., Larsen B.R. Semicontinuous GC analysis and receptor modelling for source apportionment of ozone precursor hydrocarbons in Bresso, Milan 2003. Journal of Chromatography (**2005**) 1071.

Manes F., De Santis F., Giannini M.A., Vazzana C., Capogna F., Allegrini I. Integrated ambient ozone evaluation by passive samplers and clover biomonitoring mini-stations. Science of The Total Environment 308 (**2003**) 133-141.

Mitchell C.A. Recent advances in plant response to mechanical stress : theory and application, Hortscience 31 (**1996**) 31–35.

Pleijel, H., Ahlfors, A., Ska¨ rby, L., Pihl, G., Sellde´ n, G. Effects of air pollutant emissions from a rural motorway on Petunia and Trifolium. The Science of the Total Environment 146/ 147 (**1994**) 117–123.

Posthumus, A.C. Higher plants as indicators and accumulators of gaseous air pollution. Environmental Monitoring and Assessment 3 (**1983**) 263–272.

Prihatin J., Corebima A., Ariffin, Gofu A. The Effect of Exposure of Mulberry to Acid Rain on The Defects Cocoon of Bombyxmori L. Procedia Environmental Sciences 23 (**2015**) 186 – 191.

Rudolph E. Staub-Reinhaltung der Luft 37 (**1977**) 467-474.

Singh S.N., Tripathi R.D. Environment Bioremediation Technologies (Book).(**2007**)

SPPPI (Syndicat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles). Évaluation des risques sanitaires dans la Zone Industrielle de Fos-sur-Mer dans les Bouches-du-Rhône. Rapport Final SPPPI-Burgéap (**2008**) 152 p.

Stefano L. Lichens as sentinels for air pollution at remote alpine areas (Italy). Environmental science and pollution research 21 (**2014**) 2563 – 2571.

Swieboda M., Kalemba A. The lichens Parmelia physodes (L.) Ach. As indicator for determination of the degree of atmosphéric pollution in the area contaminated by fluorine and sulphur dioxine emision. Acta Societatis Botanicorum Poloniae 47 (**1978**) 25 – 40.

Syms C. Principal Components Analysis, In Encyclopedia of Ecology, edited by Sven Erik Jørgensen and Brian D. Fath. Academic Press (**2008**) 2940-2949.

Telewski F.W., Coutts M.P., Grace J. Wind-induced physiological and developmental responses in trees. Wind and Trees, Cambridge University Press (**1995**) 237–263.

Tonneijcka A.E.G, Bergeb W.F., Jansenc B.P. Monitoring the effects of atmospheric ethylene near polyethylene manufacturing plants with two sensitive plant species. Environmental Pollution 123 (**2003**) 275–279.

Underwood B.A., Tieman D.M., Shibuya K, Dexter R.J., Loucas H.M., Simkin A.J., Sims C.A., Schmelz E.A., Klee H.J., Clark D.G. Ethylene-regulated floral volatile synthesis in petunia corollas. Plant Physiology 138 (**2005**) 255-266.

Villarino G.H., Bombarely A., Giovannoni J.J., Scanlon M.J., Mattson N.S. Transcriptomic Analysis of in Response to Salt Stress Using High Throughput RNA Sequencing. Cornell Iniversity (**2014**).

Weijun S., Huili R., G. Darrel J., Dafeng H., Hai R. Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence, Atmospheric Environment 64 (**2013**) 242-250.

Wellburn A.R. Why are atmospheric oxides of nitrogen usually phytotoxic and not alternative fertilisers ?. New Phytologist 115 (**1990**) 395-429.

Wijnand H.P., van de Velde R. Mann–Whitney/Wilcoxon's nonparametric cumulative probability distribution. Computer Methods and Programs in Biomedicine 63 (**2000**) 21-28

Y**ang T.F., Gonzalez-Carranza Z.H., Maunders M.J., Roberts J.A.** Ethylene and the Regulation of Senescence Processes in Transgenic Nicotiana sylvestris Plants. Annals of botany 101 (**2007**) 301-310.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cartographie des stations Grans « Autoroute »....19
Figure 2 : Cartographie de l'ensemble de la zone d'étude....20
Figure 3 : Exemple de station d'étude complète à Port-Saint-Louis-du-Rhône....23
Figure 4 : Conditions météorologiques générales de température et de pluviométrie en 2015....25
Figure 5 : Conditions météorologiques générales de température et de pluviométrie en 2014....26
Figure 6 : Fréquence et vitesse des vents en fonction de la direction durant les périodes d'études (%) 2014 et 2015....27
Figure 7 : Evolution de la croissance moyenne des différentes stations à T=0, T=2 semaines, T=4 semaines, T=6 semaines et T=8 semaines. 28
Figure 8 : Comparaison de la croissance moyenne en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015. (N=6 par station, les étoiles indiquent une différence significative entre les deux années sur une même station ; p<0,05)....29
Figure 9 : Poids sec moyen des différentes stations à T=8 semaines. 29
Figure 10 : Comparaison du poids sec moyen en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015. 30
Figure 11 : Evolution du diamètre des fleurs de l'ensemble des stations d'étude (écarts par rapport à la médiane prise à T=0)....31
Figure 12 : Comparaison du diamètre moyen des fleurs en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015.. 32
Figure 13 : Pourcentage de fleurs nécrosées des différentes stations à T=8 semaines. 32
Figure 14 : Nombre moyen de fleurs nécrosées (en % de toutes les fleurs) durant les campagnes 2014 et 2015....33
Figure 15 : Nombre moyen de bourgeons sur chaque plant en fin d'étude....33
Figure 16 : Comparaison du nombre moyen de bourgeons sur chaque plant en fin d'étude entre les campagne 2014 et 2015....34
Figure 17 : Evolution du nombre de feuilles nécrosées des différentes stations à T=0 semaine, T=2 semaines, T=4 semaines, T=6 semaines et T=8 semaines....34
Figure 18 : Comparaison du nombre moyen de feuilles nécrosées en fin d'étude entre les campagnes 2014 et 2015....35
Figure 19 : Résultat de l'analyse en composantes principales (ACP)....36
Figure 20 : Étude des différents paramètres morphologiques de *Petunia hybrida* en fonction de la distance à l'autoroute A54....38
Figure 21 : Comparaison des concentrations en BTEX, Alcanes et autres COV au sein des stations Grans témoins et Grans route....39
Figure 22 : Étude des différents paramètres morphologiques chez *Petunia hybrida* en fonction de la concentration atmosphérique en COV....41
Figure 23 : Étude du poids chez *Petunia hybrida* en fonction de la concentration atmosphérique en COV en excluant les valeurs enregistrées à Port-de-Bouc....42
Figure 24 : Étude du nombre de fleurs nécrosées chez *Petunia hybrida* en fonction de la concentration atmosphérique en COV en excluant les valeurs enregistrées sur l'ensemble des stations Grans Route....43

ANNEXES

Annexe 1 : Fiches de prise de données volontaires

A. *Fiche de prise de données dédiée à l'ensemble des paramètres morphologiques étudiés excluant le diamètre des fleurs.*

Station
Date du relevé : … /... / 2015





06-28-40-09-79
04-90-55-49-94

	Plant 1	Plant 2	Plant 3	Plant 4	Plant 5	Plant 6
Nombre de feuilles nécrosées						
Nombre de boutons floraux vivants						
Nombre de fleurs fraîches						
Nombre de fleurs nécrosées						
Diamètre des fleurs (cm)	Utilisation de la fiche dédiée					
Longueur de la tige Principale (cm)						

B. *Fiche de prise de données dédiée au diamètre des fleurs.*

Station

Date du relevé : … /... / 2015

06-28-40-09-79
04-90-55-49-94

Diamètre des fleurs	Plant 1	Plant 2	Plant 3	Plant 4	Plant 5	Plant 6
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

Annexe 2 : Protocole de prise de données détaillant chaque paramètre, l'entretien des stations et les préconisations à respecter tout au long de l'étude

VOLONTAIRES POUR L'OBSERVATION CITOYENNE DE L'ENVIRONNEMENT 2015

Étude scientifique écocitoyenne de bioindication des Composés Organiques Volatils atmosphériques à l'aide de *Pétunia hybrida*

— Campagne 2015 -

Protocole d'échantillonnage

Tableau récapitulatif

Mesures	Fréquence	Action / Commentaire
Nombre de feuilles nécrosées	Une fois toutes les deux semaines	Dénombrer les feuilles nécrosées, puis les retirer **lorsqu' elles sont mortes** (les comptabiliser alors dans le nombre de feuilles mortes)
Nombre de boutons floraux vivants	Une fois toutes les deux semaines	Dénombrer le nombre de boutons floraux vivants (de l'apparition des pétales jusqu'à l'éclosion totale)
.		
Nombre de fleurs fraîches	Une fois toutes les deux semaines	Dénombrer le nombre de fleurs fraîches. Si une même fleur reste fraîche durant deux relevés consécutifs (1 semaine) elle sera de nouveau dénombrée.
Nombre de fleurs nécrosées	Une fois toutes les deux semaines	Dénombrer le nombre de fleurs nécrosées. Retirer les fleurs nécrosées **lorsqu'elles sont fanées** (les comptabiliser alors dans le nombre de fleurs fanées)
Diamètre des fleurs	Une fois toutes les deux semaines	Tendre légèrement la fleur lors de la mesure (20 fleurs max par plant)
Longueur de la tige principale	Une fois toutes les deux semaines	Tendre légèrement la tige. Arrêter la mesure avant la fleur.

Préconisations

- Il est essentiel de toujours **faire correspondre le numéro du pot** de pétunia au numéro présent sur la fiche de relevé.

- Il est important de toujours **noter la date** lors du relevé.

- Il est important de réaliser les mesures **selon le calendrier** (défini lors de la réunion).

- Il est important de réaliser les mesures **toujours de la même façon** et de **respecter les consignes** (tendre les feuilles ou la tige principale, retirer les fleurs fanées/ feuilles mortes/ bourgeons avortés…)

- Il est important de toujours arroser les plants de pétunia avec l'eau remise par nos soins. **Un jour sur deux avec une bouteille d'eau pour 6 plants** (équivalent à deux verres d'eau par plant, un jour sur deux).

- Ne surtout pas hésiter à nous contacter en cas de quelconques problèmes ou questions (difficulté pour la prise de mesure, indisponibilité pour une mesure ou un arrosage…), une solution sera rapidement trouvée.

I. Mise en place de la station d’étude

- **Exposition des plants**

Il est important d’exposer les plants de la station d’étude à un niveau d’ensoleillement similaire. C’est pour cela que les plants de pétunia seront disposés côte à côte (figure 1) avec préférentiellement un **niveau d’ensoleillement maximal**.

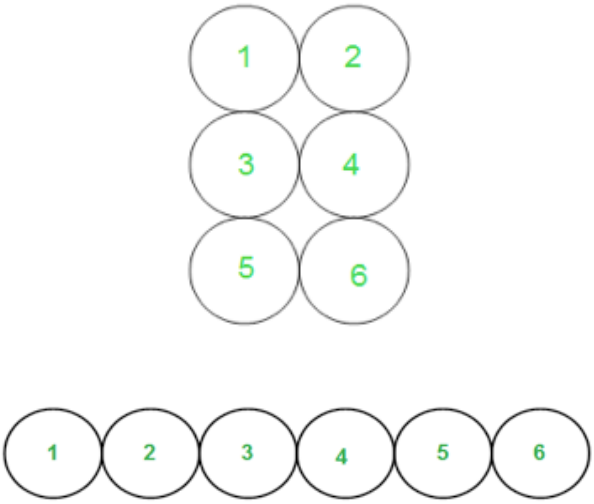


Figure1 : Positionnement des pots au sein de la station d’étude

Si le développement des plants devient trop important, il sera nécessaire d’espacer les pots d’une distance de 20 à 30 cm

- **Entretien**

Pour le bon fonctionnement de cette étude scientifique, il est très important d’arroser les pétunias de façon régulière et identique. Les plants seront arrosés **un jour sur deux** avec **une bouteille d’eau pour 6 plants, équivalent à deux verres d’eau par plant**.

Si une pluie survient le jour de l’arrosage il n’est pas nécessaire d’arroser les plants, évitant ainsi un excès d’eau fortement préjudiciable pour les pétunias.

- **Protection**

Si vous possédez des animaux de compagnie ou une autre source de dégradation potentielle, veuillez à surélever la stations d'étude pour éviter toute détérioration des plantes qui pourrait fausser les données ainsi obtenues.

II. Protocole d'échantillonnage

Pour étudier l'impact des Composés Organiques Volatils sur la croissance des pétunias, plusieurs mesures non destructives sont à réaliser sur la plante. Il est important de signaler que ces mesures doivent être réalisées **toujours de la même façon** et **toujours le même jour** à deux semaines d'intervalle.

Les plants en votre possession sont numérotés, veillez à faire concorder le numéro du pot et le numéro sur la fiche de relevé.

- **Nombre de feuilles nécrosées**

Les feuilles présentant des nécroses ou des décolorations sont à dénombrer toutes les deux semaines.

Si une feuille nécrosée déjà dénombrée est encore nécrosée la semaine suivante, il est nécessaire de la **dénombrer une nouvelle fois**.

La nécrose d'une feuille peut se présenter suivant plusieurs formes (figure 2) comme une décoloration totale ou partielle de la feuille, des tâches brunes ou blanches plus ou moins importantes.



Figure 2 : Différentes apparitions de nécroses foliaires

- **Nombre de boutons floraux vivants**

Le nombre de boutons floraux est à dénombrer toutes les deux semaines. Pour faciliter la prise de données, les boutons floraux sont comptabilisés selon **leurs différents stades** (figure 3) jusqu'à l'éclosion totale de la fleur (figure 4).

Pour des raisons de clarté, les boutons floraux seront dénombrés dès l'apparition des premières pétales (couleur blanchâtre sur le bouton) jusqu'à l'**éclosion totale de la fleur.**



Figure 3 : Bouton floral de pétunia



Figure 4 : Différence entre un bouton floral et une fleur totalement éclose

- **Nombre de fleurs fraîches**

Le nombre de fleurs fraîches (Figure 5) est à dénombrer toutes les deux semaines, ces fleurs seront comptabilisées jusqu'à leur fanage (elles seront alors comptabilisées dans les fleurs fanées).



Figure 5 : Fleur fraîche de pétunia

- **Nombre de fleurs fanées**

Le nombre de fleurs fanées (Figure 6) est à dénombrer toutes les deux semaines. Les fleurs fanées se repèrent facilement par un manque de vivacité, de maintien et un assèchement. Il est important de **retirer ces fleurs fanées** après qu'elles aient été dénombrées.



Figure 6 : Fleur fanée de pétunia

- **Nombre de fleurs nécrosées**

Le nombre de fleurs nécrosées (figure 7) devra être dénombré toutes les deux semaines. Toutes les fleurs étant blanches, les nécroses se repéreront facilement par l'**apparition de tâches brunes** sur les fleurs.



Figure 7 : Petite nécrose sur une fleur de pétunia

- **Diamètre des fleurs (cm)**

Le diamètre des fleurs est à échantillonner chaque semaine à l'aide de la règle graduée fournie. Chaque fleur ne devra être mesurée qu'une seule fois. C'est pour cela qu'il est important de marquer les fleurs, après la mesure, d'un signe bien visible à l'aide d'un marqueur noir dédié, pour ne pas mesurer la même fleur lors de l'échantillonnage.

Pour mesurer de façon simple et identique chaque fleur, le départ de la mesure se fera à l'**intersection de deux pétales jusqu'au bout du pétale opposé** (figure 8).
Il est important de **« tendre »** légèrement la fleur pour mesurer le diamètre correct, tout en faisant attention de ne pas abîmer ou déchirer la fleur.

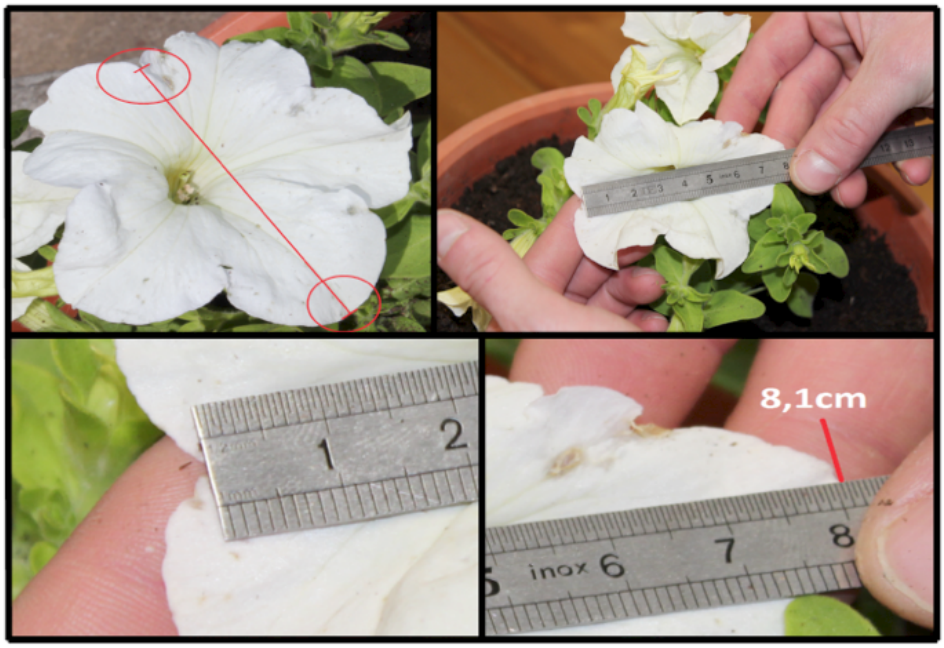


Figure 8 : Détail de la mesure de diamètre d'une fleur

- **Longueur de la tige principale (cm)**

La longueur de la tige principale est à échantillonner toutes les deux semaines. Évaluez la longueur totale de la plante en positionnant la règle graduée à la base du tronc jusqu'au **segment le plus haut du plant** de pétunia en prenant soin de tendre le plant avec délicatesse.
Attention, si une fleur est présente au sommet de la tige principale, il est important de ne pas prendre en compte la mesure de la fleur et d'arrêter la mesure au niveau du bouton floral (Figure 9)



Figure 9 : Mesure de la tige principale d'un pétunia

N'hésitez pas à nous contacter si vous rencontrez des difficultés, ou simplement pour nous poser vos questions.

Des visites de chaque station seront réalisées durant cette étude, permettant à la fois de surveiller votre station, de récupérer les fiches de relevés mais aussi pour recueillir vos impressions et retours d'expériences sur cette étude de la pollution de l'air à l'aide des pétunias.

Nous vous remercions de l'intérêt et de l'aide que vous portez à notre étude et à l'Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions.

Charles-Enzo Dauphin

04-90-55-49-94

07-63-01-82-92

charles-enzo.dauphin@institut-écocitoyen.fr

Annexe 2 : Données récoltées pour l'ensemble des paramètres morphologiques étudiés.

Données récoltées à T=0 semaine, T=2 semaines, T=6 semaines et T=7 semaines d'exposition. ***A.*** *Croissance.* ***B.*** *Poids sec (T=8 semaines).* ***C.*** *Diamètres des fleurs.* ***D.*** *Nombre de fleurs fraîches.* ***E.*** *Nombre de fleurs nécrosées.* F. *Nombre de bourgeons.* ***G.*** *Nombre de feuilles nécrosées.*

A. *Croissance de l'ensemble des plants de pétunia à T=2, T=4, T=6, T=8 (cm).*

Croissance (cm)	Grans Témoin	Miramas 1	Miramas 2	Istres 1	Istres 2	Fos 1	Fos 2	Fos 3	Fos 4	SNPB	Lavéra	PSL 1	PSL 2	Grans R1	Grans R2	Grans R3	Carry
27/04/15	5,1	3,1	— 0,9	3	9,3	5	2,5	2,4	3,8	0,9	1,9	3,5	1,8	2,5	2	3,5	4,1
27/04/15	7,5	3,6	2,6	2,6	3,2	4,7	2	2,7	2,6	0,7	2,3	1,4	3,3	2,6	2,6	2,1	4,1
27/04/15	2,2	4,4	2,5	2,5	2,7	2,9	3,2	1,9	2,2	1,1	3,2	3,3	3,3	2,7	3	2,6	2,8
27/04/15	8	5,1	2,1	2,6	2,3	2,4	3,8	2,8	2,8	1,1	2,1	3,2	1,9	2,7	2,6	2,8	3,9
27/04/15	5	4,5	2,7	1,4	3,8	2,8	3,5	1,6	2,5	1	2,5	3,3	1,7	2,7	1,3	2,2	3,3
27/04/15	1,7	1,9	6,4	2,3	3,7	3,8	3	2	2,2	1,1	1,8	3,8	1,5	2,2	1,5	3,7	5,5
11/05/15	8,6	5,1	1,9	5	12,5	7,4	4	2,4	5,2	2,9	4,9	4,2	3,8	5,5	4,2	7,2	6,5
11/05/15	9,5	5	4,1	4,1	6,2	7	4,2	4,4	5,3	2,3	3,6	6,8	4,5	3,8	5,1	6,3	5,6
11/05/15	4,2	6,3	3	4,9	7	5,5	5,6	4	4,9	3,5	5,5	6,3	4,5	5,5	5,5	5,3	4,9
11/05/15	9,8	7,3	4,6	6,9	5,3	6,5	3,8	5,1	3,1	2	5	3	3,5	6,2	5,1	5,2	5,3
11/05/15	8,5	5,5	4,5	6	5,8	6,3	5,3	2,9	4,4	4,6	4,4	5,6	3,4	4,8	3,5	7,7	5,4
11/05/15	5,1	4,2	3,9	3,6	6,1	6,2	5,3	4,6	5,1	4,5	6	7,5	2,4	6,3	4,8	7,7	7,9
25/05/15	9,1	7,9	4,6	3,05	13,7	8,7	7,5	2,9	6,1	3,9	4,9	7,3	4	6,5	4,5	8,7	6,7
25/05/15	12,5	7	4,6	7,6	7,6	7,8	7	5,2	5,2	3,7	6,7	9,1	6,1	4,1	8,4	6,4	7
25/05/15	5,2	8	3,2	6,5	9,5	6,4	6,2	4,2	5	6,5	6,4	8	6,4	6,5	6,2	5,6	5,1
25/05/15	10	10,7	4,9	8,2	7,5	8	7,5	6,9	4,9	4,2	5	5,2	4,5	8,2	6,3	8,9	6,7
25/05/15	9,5	7,2	6,2	7,1	8,5	6,3	6,5	4,9	5,2	5,8	6,2	7,8	5,1	9	4,3	9	6
25/05/15	6,5	5,2	4	6,3	7,8	6,4	7	4,8	6,3	4,6	6,9	10,5	4,3	8,3	6	7,8	9,9
08/06/15	9,5	8,1	5	7,1	14	8,7	8,5	4,8	6,5	5,2	4,3	8	4,3	6,6	6	9	7,7
08/06/15	15,5	7,5	5,9	8,2	9,2	7,8	8,8	5,6	6,8	3,8	7	8,8	6,2	4,1	8,5	8,6	8
08/06/15	10,4	8,2	5,8	7,3	10,2	6,9	6,9	4,4	5,4	6,5	6,8	9,8	6,4	8,7	8,2	5,8	7,6
08/06/15	11,1	10,7	6,8	9,4	7,8	8	9	7	5,1	4,8	5,4	6,2	4,7	8,7	7,1	9	8,5
08/06/15	12,5	8,5	7	8,5	10	6,6	6,7	5,1	5,9	6,8	6,3	7,8	5,3	9	5,8	9	9,2
08/06/15	7,5	6,2	4,9	7,5	9,2	7,4	9	5,8	6,5	5	7,6	10,5	4,4	9	6,5	7,9	12,1

B. *Poids sec de l'ensemble des plants de pétunia à T=8 (g).*

Poids sec (g)	Grans Témoin	Miramas 1	Miramas 2	Istres 1	Istres 2	Fos 1	Fos 2	Fos 3	Fos 4	SNPB	Lavéra	PSL 1	PSL 2	Grans R1	Grans R2	Grans R3	Carry
08/06/15	7,3	8,2	5,5	8,4	5,2	4,1	4,4	7,4	5,9	9,4	4,3	3,0	8,4	2,5	5,4	6,6	7,2
08/06/15	9,2	8,6	7,6	11,0	7,1	4,1	4,4	6,4	9,1	9,5	3,9	4,3	5,0	3,4	7,7	5,4	8,0
08/06/15	7,5	11,8	8,3	9,8	6,6	3,6	5,6	6,2	6,8	10,8	4,2	4,0	8,3	2,7	6,6	5,8	7,4
08/06/15	8,2	9,5	7,9	11,2	6,3	4,4	5,1	7,1	6,6	9,7	3,5	4,9	6,7	4,0	5,6	7,3	7,7
08/06/15	7,2	8,5	9,5	9,5	6,2	5,5	5,1	5,9	7,1	9	5,6	5,0	2,3	4,1	6	9,5	5,8
08/06/15	6,1	7,2	7,7	10,4	6,9	5,4	6,2	8,3	6	9,4	3,4	3,8	5,8	3,6	5,7	8,9	9,7

C. *Diamètre des fleurs des plants de pétunia à T=0, T=2, T=4, T=6, T=8 (cm).*

Diamètre fleurs (cm)	Grans Témoin	Miramas 1	Miramas 2	Istres 1	Istres 2	Fos 1	Fos 2	Fos 3	Fos 4	SNPB	Lavéra	PSL 1	PSL 2	Grans R1	Grans R2	Grans R3	Carry
13/04/15	9,0	7,8	7,4	7,2	7,1	8,5	7,7	7,2	7,9	7,1	7,9		7,7	8,3	9,3	8,2	7,7
13/04/15	7,9	9,0	7,6	8,2	7,9	7,1	6,1	7,7	7,0	7,9	6,9	7,8	7,1	8,7	7,2	8,4	10,0
13/04/15	8,1	9,1	7,8	8,4	7,8	9,8	6,5	6,6	8,0	7,8	7,4	7,6	8,5	8,6	7,7	8,0	9,0
13/04/15	7,6	8,7	7,0	8,0	8,8	6,9	7,2	8,0	7,5	8,8	7,8		7,2	7,8	7,5		9,5
13/04/15	8,5	6,5	7,1	8,3	7,4	7,9	8,2	7,2	7,1	7,4	7,0	9,1	8,2	6,6	8,5		8,5
13/04/15	8,1	7,2	7,3	8,4	7,7	7,8	7,3		7,4	7,7	7,0	7,8	8,6	8,4	7,6		7,9
27/04/15	8,0	8,1	7,6	8,5	8,3	8,5	7,8	7,5	7,9	7,7	7,0	7,1	7,8	9,5	7,9	8,7	8,2
27/04/15	6,8	8,5	8,4	8,6	7,4	8,0	6,8	7,5	7,5	7,2	7,0	6,5	7,2	9,0	8,0	7,4	8,3
27/04/15	8,3	8,2	7,4	9,3	8,0	7,9	7,0	7,8	7,7	7,4	7,3	6,4	7,7	7,8	5,8	7,5	8,5
27/04/15	8,3	8,2	7,7	8,7	7,8	7,9	5,6	7,9	7,8	8,2	7,8	7,9	6,4	7,2	7,0	8,0	9,4
27/04/15	7,3	7,9	7,2	8,3	6,7	8,3	7,2	7,4	7,8	8,1	7,5	7,9	8,1	6,9	6,4		7,9
27/04/15	6,3	7,6	7,5	8,5	7,8	9,6	6,9	7,4	7,8	7,5	8,5	8,3	7,9	7,0	6,6	6,9	7,6
11/05/15	6,8	8,0	7,5	7,9	7,8	7,3	7,8	7,2	7,0	6,8	7,1	7,2	7,1	7,4	7,6	7,8	7,9
11/05/15	7,0	8,0	7,9	8,7	7,7	7,6	7,2	7,7	7,4	7,4	7,2	7,3	6,7	7,5	6,9	7,6	8,2
11/05/15	7,4	8,2	7,0	8,2	8,0	7,4	7,4	7,7	7,5	7,4	7,1	7,1	7,6	7,8	6,4	6,8	7,8
11/05/15	7,3	8,3	6,8	8,6	8,4	7,1	8,3	7,5	7,6	8,0	6,5	7,9	6,4	7,7	7,0	6,8	8,1
11/05/15	7,3	8,3	6,5	8,4	7,5	7,6	7,9	7,6	7,7	7,4	7,0	8,4	7,2	6,8	7,0	7,9	7,7
11/05/15	6,8	7,7	6,9	8,2	7,6	7,5	7,1	7,3	7,5	7,8	7,7	8,0	7,4	7,4	6,6	7,1	8,3
25/05/15	7,2	7,4	6,0	7,9	7,5	7,8	7,4	6,9	6,5	6,4	7,0	6,0		7,9		6,5	7,8
25/05/15	7,6	7,6		8,5	7,8	7,2	7,0	6,5		7,3	7,2	6,8	5,6		7,0	7,5	7,8
25/05/15	7,7	7,5		8,0	7,5	7,4	6,7	6,0	6,6	7,2	7,8	6,1	6,7	6,7	6,9	7,1	7,8
25/05/15	6,8	7,3	6,7	8,8	8,3	8,3	6,9	6,2	6,8	7,8		7,4	5,6	7,0	7,6	6,8	8,7
25/05/15	7,6	7,7	7,0	8,7	7,2	7,9	7,4	7,0	7,2	7,1	7,3	7,7	7,1	6,6		5,9	8,0
25/05/15	7,6	7,2	6,8	8,0	7,8	7,1	7,5	6,0	7,0	7,8	6,6	7,1		7,1	6,8	5,9	7,9
08/06/15	7,8	7,4	6,4	7,3	7,7	7,0	7,0	5,5	6,1	5,9	6,8	6,1	5,8	6,1	7,5	5,8	8,0
08/06/15	8,2	7,7	6,5	8,1	7,4	7,2	7,1	6,0	6,9	5,9	6,9	6,5	5,6	7,1	7,8	7,1	7,5
08/06/15	7,8	7,4	6,8	7,9	7,7	7,1	7,5	5,3	6,3	6,1	7,3	6,4	6,7	6,9	7,4	7,0	8,8
08/06/15	8,3	7,7	6,6	8,3	7,9	7,0	7,5	6,2	6,1	6,4	6,5	7,6	6,0	7,6	6,9	7,4	9,2
08/06/15	7,6	7,2	6,5	7,9	7,7	7,0	7,3	6,9	6,9	7,2	6,9	7,3	6,4	6,6	7,3	7,3	8,3
08/06/15	8,2	7,5	6,9	7,9	7,9	7,0	7,7	6,8	7,0	7,0	7,0	6,7	6,0	6,6	6,6	6,3	7,9

D. *Nombre de fleurs fraîches des plants de pétunia à T=0, T=2, T=4, T=6, T=8 (cm).*

Nombre de fleurs	Grans Témoin	Miramas 1	Miramas 2	Istres 1	Istres 2	Fos 1	Fos 2	Fos 3	Fos 4	SNPB	Lavéra	PSL 1	PSL 2	Grans R1	Grans R2	Grans R3	Carry
13/04/15	1	2	1	1	1	12	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	1
13/04/15	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
13/04/15	1	1	2	1	1	2	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2
13/04/15	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	0	1	1	2	0	1
13/04/15	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	4	1	0	1
13/04/15	1	2	2	1	2	0	1	1	1	2	1	1	1	1	1	0	1
27/04/15	3	7	7	3	3	4	3	8	4	6	7	7	3	1	4	2	5
27/04/15	12	3	2	5	4	4	4	8	6	9	10	10	12	1	5	6	7
27/04/15	4	15	6	6	5	11	3	7	11	4	5	7	13	5	3	4	5
27/04/15	3	11	4	7	5	5	3	8	11	7	9	5	6	6	6	2	2
27/04/15	10	13	4	13	9	8	4	10	5	3	7	6	5	5	4	0	2
27/04/15	4	10	5	10	9	3	5	14	8	8	4	3	8	5	4	2	4
11/05/15	13	13	5	15	10	12	8	13	12	23	10	5	13	3	5	7	14
11/05/15	13	15	9	14	10	14	10	12	19	15	10	3	11	5	6	3	16
11/05/15	7	20	4	15	13	9	7	16	16	18	11	12	11	3	8	4	18
11/05/15	7	14	4	20	5	19	11	22	13	22	14	6	6	8	8	2	12
11/05/15	10	11	7	18	12	12	8	9	14	18	18	3	3	9	6	2	4
11/05/15	9	9	5	19	10	11	7	13	14	17	12	6	9	6	6	5	23
25/05/15	2	9	1	4	5	3	6	6	2	12	2	6	0	1	0	1	12
25/05/15	9	4	0	7	8	8	4	5	0	9	14	15	3	0	1	2	10
25/05/15	5	17	0	9	11	4	6	6	5	23	7	8	1	2	2	2	9
25/05/15	3	15	1	9	7	3	9	6	8	11	0	5	2	5	5	4	6
25/05/15	5	7	3	15	10	8	4	3	6	14	0	5	4	5	0	3	5
25/05/15	11	13	3	11	13	0	8	4	3	9	6	2	0	5	1	4	16
08/06/15	10	8	3	8	10	0	9	5	3	5	11	5	5	1	5	2	15
08/06/15	13	11	5	13	7	0	13	1	10	9	14	4	3	2	4	2	6
08/06/15	13	12	3	7	3	1	9	3	6	6	13	10	4	2	2	3	12
08/06/15	9	14	3	9	5	0	6	2	3	8	9	5	6	3	6	2	12
08/06/15	14	10	5	13	9	5	8	2	10	8	18	3	1	2	4	3	6
08/06/15	13	8	2	15	13	2	7	3	9	5	9	3	2	3	6	5	12

E. *Nombre de fleurs nécrosées des plants de pétunia à T=0, T=2, T=4, T=6, T=8 (cm).*

Nombre de fleurs nécrosées	Grans Témoin	Miramas 1	Miramas 2	Istres 1	Istres 2	Fos 1	Fos 2	Fos 3	Fos 4	SNPB	Lavéra	PSL 1	PSL 2	Grans R1	Grans R2	Grans R3	Carry
13/04/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/04/15	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/04/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/04/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/04/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/04/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/04/15	2	2	0	2	0	1	3	1	0	0	2	1	0	0	1	0	0
27/04/15	1	1	0	1	0	1	3	2	1	3	0	0	2	0	1	1	0
27/04/15	1	1	0	1	0	2	2	0	3	1	1	0	2	1	0	0	1
27/04/15	0	0	0	1	0	5	1	1	4	2	3	0	2	1	0	0	0
27/04/15	4	4	0	3	0	0	2	1	2	1	0	0	2	1	0	0	1
27/04/15	1	1	0	2	0	1	2	2	2	1	0	0	2	0	1	0	0
11/05/15	1	0	0	2	3	3		2	1	6	3	0	4	1	2	4	0
11/05/15	2	2	0	1	3	3		1	2	2	4	1	2	1	1	2	0
11/05/15	3	1	1	2	3	3		2	2	3	2	1	3	1	2	0	0
11/05/15	2	0	1	2	1	5		5	2	4	3	1	2	2	1	0	0
11/05/15	1	2	1	0	1	1		1	2	4	4	1	1	2	3	0	0
11/05/15	0	1	0	1	2	3		2	2	3	3	1	2	0	0	0	0
25/05/15	1	1	0	3	1	3	4	4	1	8	0	1		1	0	0	2
25/05/15	0	1	0	4	0	0	1	2		4	2	3	1	0	0	2	1
25/05/15	0	2	0	0	2	1	3	1	3	6	2	4	1	2	0	1	1
25/05/15	1	3	0	0	2	0	2	1	2	5		1	0	5	0	2	1
25/05/15	1	1	1	1	1	4	4	1	2	5		1	1	5	0	1	1
25/05/15	0	2	1	2	1	1	1	0	2	4	2	1	2	5	0	1	1
08/06/15	1	2	1	1	2	1	2	1	0	1	3	1	1	0	1	1	2
08/06/15	1	2	1	2	1	2	2	1	2	3	2	0	2	2	0	2	0
08/06/15	1	2	1	2	0	1	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
08/06/15	1	1	2	1	1	2	2	0	1	2	4	1	0	0	1	1	0
08/06/15	1	1	2	1	1	1	2	0	2	1	6	2	2	1	2	1	1
08/06/15	0	1	1	2	2	2	2	1	2	1	3	1		2	3	1	1

F. *Nombre de bourgeons des plants de pétunia à T=0, T=2, T=4, T=6, T=8 (cm).*

Nombre de bourgeons	Grans Témoin	Miramas 1	Miramas 2	Istres 1	Istres 2	Fos 1	Fos 2	Fos 3	Fos 4	SNPB	Lavéra	PSL 1	PSL 2	Grans R1	Grans R2	Grans R3	Carry
13/04/15	3	4	4	1	1	2	1	2	1	5	2	7	1	2	4	2	1
13/04/15	1	2	2	2	1	2	1	3	2	1	2	3	3	1	2	5	1
13/04/15	2	6	2	2	5	6	0	0	5	1	1	2	7	5	1	4	1
13/04/15	0	5	3	1	4	1	1	1	6	3	5	4	1	3	1	2	1
13/04/15	2	6	1	5	5	3	0	3	3	1	1	4	4	6	1	1	1
13/04/15	2	6	5	3	7	2	1	4	3	2	1	2	8	4	3	3	1
27/04/15	6	9	6	5	8	11	5	8	8	12	9	1	9	5	6	4	7
27/04/15	12	11	10	8	10	8	8	8	11	14	11	2	13	2	7	6	7
27/04/15	8	10	10	7	9	6	4	11	9	12	5	3	10	4	9	9	10
27/04/15	12	9	9	11	7	10	5	12	11	11	7	5	9	9	8	5	10
27/04/15	14	7	8	14	7	9	7	10	9	12	13	1	9	9	8	4	5
27/04/15	10	6	10	10	8	6	8	10	9	13	7	3	8	4	8	6	10
11/05/15	5	4	3	9	4	9	5	8	6	6	7	2	5	2	2	3	6
11/05/15	6	3	4	11	6	5	3	3	4	6	3	9	7	4	7	9	6
11/05/15	4	9	3	8	7	2	4	6	4	12	5	2	6	4	4	6	6
11/05/15	7	7	4	12	2	3	3	9	8	8	2	4	7	6	5	5	5
11/05/15	6	8	6	17	5	6	5	8	8	7	3	2	3	8	4	10	3
11/05/15	7	8	4	14	5	2	1	9	7	9	5	2	3	4	8	7	9
25/05/15	0	5	0	8	9	3	4	1	2	3	7	0	3	2	3	0	5
25/05/15	4	6	1	11	8	0	5	3	5	3	6	1	1	1	3	3	4
25/05/15	3	7	5	12	7	1	6	4	2	7	4	5	1	1	1	3	6
25/05/15	2	6	3	8	7	3	3	6	4	5	8	1	7	1	4	7	4
25/05/15	7	6	4	10	8	6	6	1	5	6	9	4	2	0	1	6	5
25/05/15	6	2	4	10	9	3	6	2	6	4	5	2	2	1	2	2	6
08/06/15	2	5	0	2	2	0	2	3	0	2	2	1	0	3	0	2	3
08/06/15	5	2	0	3	7	0	1	0	3	2	0	3	2	2	5	1	2
08/06/15	4	6	2	2	2	0	5	0	1	0	1	3	8	2	4	4	5
08/06/15	4	7	2	2	1	0	3	2	0	3	1	5	3	5	2	2	6
08/06/15	8	2	2	4	4	3	3	0	3	2	1	3	1	4	3	6	7
08/06/15	4	2	3	4	8	1	1	3	7	5	0	0	1	2	2	2	3

G. *Nombre de feuilles nécrosées des plants de pétunia à T=0, T=2, T=4, T=6, T=8 (cm).*

Nombre de feuilles nécrosées	Grans Témoin	Miramas 1	Miramas 2	Istres 1	Istres 2	Fos 1	Fos 2	Fos 3	Fos 4	SNPB	Lavéra	PSL 1	PSL 2	Grans R1	Grans R2	Grans R3	Carry
13/04/15		2	0	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
13/04/15		0	0	2	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	1	0
13/04/15		1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
13/04/15		1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	0	0	0	0
13/04/15		0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	3
13/04/15		0	1	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
27/04/15	0	2	0	0	1	5	1	0	4	7	2	1	2	1	1	2	0
27/04/15	0	2	0	2	4	2	2	1	4	2	2	1	3	5	1	0	1
27/04/15	1	2	0	5	3	2	1	2	1	3	2	2	4	3	0	3	1
27/04/15	0	1	0	4	0	0	3	1	3	4	1	0	1	4	1	2	1
27/04/15	0	0	1	2	0	0	1	2	2	6	2	0	2	10	0	3	2
27/04/15	0	0	1	3	2	0	0	2	3	3	1	1	5	3	1	2	2
11/05/15	1	2	1	0	1	6	3	5	4	15	3	1	5	5	2	2	1
11/05/15	0	3	1	2	4	4	6	4	4	11	3	4	5	6	4	9	4
11/05/15	1	2	1	5	3	2	4	2	10	6	2	4	4	3	5	8	2
11/05/15	0	1	1	2	0	3	5	4	6	13	3	5	1	6	4	8	2
11/05/15	0	2	1	3	2	1	3	8	10	10	4	3	2	10	2	10	2
11/05/15	0	1	1	1	3	2	3	2	3	5	2	2	5	4	2	8	4
25/05/15	5	3	3	8	3	6	5	8	5	12	3	6	17	7	5	4	6
25/05/15	1	5	4	11	1	4	8	9	4	17	5	10	20	11	6	16	4
25/05/15	0	3	6	12	5	3	6	9	14	12	5	4	19	5	5	15	2
25/05/15	0	1	5	8	1	5	8	13	11	15	5	5	14	9	9	16	4
25/05/15	1	3	8	10	2	4	4	16	23	15	8	5	2	16	7	15	5
25/05/15	2	4	10	10	3	2	5	22	8	8	4	4	14	7	8	16	6
08/06/15	3	4	18	21	3	6	7	15	11	19	5	11	24	14	8	15	9
08/06/15	5	6	8	17	6	9	11	23	7	23	6	26	33	18	21	24	8
08/06/15	2	8	17	24	8	5	7	24	28	20	7	11	30	18	13	25	2
08/06/15	2	2	12	19	4	4	10	17	36	23	9	10	23	17	23	26	4
08/06/15	4	5	13	25	2	15	5	28	33	24	12	9	7	30	13	20	6
08/06/15	8	6	10	23	4	10	8	35	20	13	7	8	16	18	14	20	6