

Année 2017

DEPOL'AIR

Mise au point de biofiltres végétalisés pour l'épuration de l'air

Arexhor Seine-Manche
22 rue de Normandie - 76640 Fauville-en-Caux
Tél. : 02 35 95 97 07 - Fax : 02 35 96 01 79
Courriel : arexhor.sm@astredhor.fr

L'application des méthodes, résultats et conclusions de cette expérimentation aux conditions de chaque exploitation horticole se fait sous l'entière responsabilité des entreprises.

FILIERE : Plantes en pot et à massif, Paysage

OBJECTIFS : Développer des solutions techniques, basées sur la biofiltration végétale, pour diminuer les concentrations en polluants atmosphériques (intérieurs et extérieurs).

INTERETS : Proposer des filtres végétalisés capables de dépolluer l'air d'un milieu donné

ACTION : Elargissement de gamme

MOTS CLE : Dépollution de l'air, biofiltres, plantes dépolluantes, Phyto-épuration

PARTENAIRES : Site expérimental : Serres expérimentales de Fauville en Caux (76)
Firmes : Premier Tech Falienor, Laboratoire : Université de Lille
Association : PlantAirPur, Commune : Fauville en Caux

REFERENT ESSAI : Marc-Antoine Cannesan

ANNEE : 2017

RESUME : Les deux systèmes végétalisés / biofiltres sont en place et fonctionnent correctement avec des plantes installées et adaptées à ces systèmes. Les phases d'analyses de dépollution ont débuté depuis l'été 2015 pour la tour « Air de Caux » de la station d'épuration de Fauville en Caux, et 6 séries ont été réalisées pour la partie « Air intérieur ». Les résultats encourageants ont été confirmés pour les polluants soufrés en conditions extérieures avec des rendements de dépollution compris entre 96 et 99%. Ces résultats sont significatifs sur toutes les saisons, permettant un abattement conséquent d'H₂S.

Cependant, en ce qui concerne le monoxyde de carbone pour la partie « Air intérieur », les résultats auront été fluctuants pendant les 6 séries, bien que les données obtenues sur la dernière série soient à nouveau encourageants. Les expériences réalisées semblent montrer que, associées à certains substrats, les murs végétaux peuvent avoir des propriétés d'épuration du CO dans l'air. Le facteur arrosage apparaît déterminant dans l'efficacité du système. Il n'a pas été possible de vérifier si cet effet existe pour d'autres polluants.

Bien que ce programme national soit arrivé à échéance, des perspectives d'intérêt sont en cours d'exploration, en fonction des opportunités rencontrées pendant ce programme. Nous envisagerions d'adapter nos biofiltres végétalisés dans des habitations urbaines ou même dans des bâtiments d'élevage afin de dépolluer ces différents sites. Et pour la tour épuratrice « Air de Caux », nous allons débuter un travail de compréhension des mécanismes de dépollution en marquant et en suivant ces composés soufrés dans le système.

1- INTRODUCTION

1.1 Objectifs et intérêts

L'objectif est de développer des solutions techniques, basées sur la biofiltration végétale, pour diminuer les concentrations en polluants atmosphériques en conditions intérieurs et extérieurs.

L'intérêt économique est de proposer des filtres végétalisés capables de dépolluer l'air d'un milieu donné et ainsi améliorer la qualité de l'air tout en élargissant la gamme pour la filière horticole.

1.2 Acquis et bibliographie

Nous passons près de 90 % de notre temps dans les espaces clos. Ces environnements comprennent de nombreuses sources de polluants atmosphériques (par exemple : les installations à combustion, les matériaux d'ameublement, de décoration, de construction) auxquelles s'ajoutent les activités humaines (tabagisme, utilisation et stockage des produits cosmétiques, d'entretien et de bricolage...). Pour diminuer les concentrations de ces polluants dont les effets sur la santé sont maintenant reconnus, il est nécessaire d'adopter plusieurs stratégies qui reposent (1) sur la limitation des sources (qui passe par exemple par l'entretien des appareils à combustion, l'utilisation rationnelle, raisonnée des produits chimiques) ; (2) sur la nécessité d'une bonne aération des locaux mais qui (3) peuvent faire également appel au traitement de l'air. Plusieurs dispositifs physico-chimiques de filtration et traitement sont dès à présents disponibles ou en développement (Blondeau et al., 2007). C'est parmi ceux-ci que l'utilisation des végétaux supérieurs (la phytoremédiation) a sa place. Ce procédé répond, de plus, à une demande sociale qui s'inscrit dans le retour à des aspirations, de la part du grand public, centrées sur le « naturel », le biologique, « l'éco - logis ».

L'efficacité de diverses espèces de plantes pour l'épuration passive de l'air à l'intérieur des locaux a été évaluée dans de nombreux travaux de la littérature. En France, ce thème était l'objet du programme PHYTAIR. Il ressort de ces recherches que les végétaux possèdent, grâce à leur appareil aérien, la capacité d'accumuler un certain nombre de polluants (ce sont majoritairement des polluants organiques qui ont été testés). Ces capacités dépendent à la fois du polluant et de l'espèce végétale étudiés. Néanmoins, le programme PHYTAIR soutenu par Plant'Airpur a permis de mettre en évidence, grâce à des travaux réalisés dans la maison expérimentale MARIA du CSTB, que ces capacités n'ont pas un rendement suffisant pour permettre une dépollution significative de l'air. Il en ressort donc que le mode passif ne suffit pas et qu'il est dès lors nécessaire de développer des techniques de biofiltration permettant d'augmenter l'efficacité. (Cuny et al, 2012).

Ces systèmes actifs ont eux aussi déjà fait l'objet d'un certain nombre de travaux. Historiquement, ce sont les agences spatiales américaines (principalement) et soviétiques qui, dans les années 80, ont donné une impulsion importante aux recherches sur l'utilisation des végétaux dans les environnements intérieurs. L'idée maîtresse de ces travaux était d'utiliser les végétaux pour l'épuration de l'air des véhicules spatiaux. Ces recherches n'ont pas débouché sur des applications concrètes dans le domaine spatial, mais ont été déclinées pour être appliqués à l'épuration de l'air à l'intérieur des locaux. Ceux-ci sont de taille et de forme très diverses, présentés et commercialisés pour l'épuration de l'atmosphère d'habitation comme de locaux publics (salles de spectacle, bureaux...). Quel que soit le modèle, le principe de fonctionnement est fréquemment identique faisant appel à un passage de l'air forcé (i.e. convection forcée) au travers du substrat des plantes (microorganismes, sol enrichi ou non en substances adsorbantes telles que du charbon actif). Ces systèmes peuvent entrer dans la catégorie des biofiltres même si leur définition est plus large. Ils font essentiellement appel à la fois à la fixation des polluants dans le substrat et à leur dégradation par les microorganismes ; le rôle des plantes peut apparaître ici assez secondaire même si en réalité il est fondamental car ce sont les plantes qui

entretiennent la faune et la flore du sol (Cuny, 2010). D'ailleurs, plusieurs auteurs ont montré que les résultats varient en fonction de l'espèce de plante choisie ainsi que de la présence de bactéries dans le sol (De Kempeneer et al., 2004, Cuny et al., 2012).

D'autres travaux mettent en avant la possibilité d'utiliser la biofiltration pour le traitement de l'air en extérieur, c'est notamment utilisé, entre autres, pour la désodorisation de stations d'épurations. Des projets sont menés actuellement à Honfleur et à Alençon par la société Phytorestore et un nouveau concept a été développé par la société DEGREMONT sur la nouvelle station d'épuration de Fauville en Caux. Dans tous les cas, l'air à traiter est forcé à travers le substrat et la rhizosphère. Le milieu riche en oxygène permet la dégradation des molécules grâce à l'action des micro-organismes fixés sur le substrat et les racines. Les paramètres de suivi de désodorisation sont : NH₃, composés soufrés (H₂S, SO₂). D'autres ouvrages tels que des murs végétalisés proposés par la société Canevaflor dans des aires de parking combinent un système de ventilation et un mur végétal ; cette technologie dynamique permet d'extraire l'air pollué du parking et de le pulser à travers ce filtre naturel. (Lien Horticole, N°791, mars 2012)

Plusieurs travaux ont démontré qu'il existe de nombreux gaz polluants (benzène, toluène, styrène, cétone, formaldéhyde...) qui peuvent être dégradés ou piégés avec succès par des biofiltres (*Prado et al., 2004 ; Chan and Peng, 2008 ; Lee et al., 2009 ; Rene et al., 2010*).

Il a notamment été indiqué dans ces travaux que plusieurs plantes sont capables d'assainir des lieux chargés en gaz polluants tels que le formaldéhyde, le benzène, le toluène et du trichloroéthylène (Wolverton and Wolverton, 1993 ; Liu et al., 2007; Yang et al., 2009). Il est démontré que le formaldéhyde, par exemple, peut être efficacement détoxifié notamment par oxydation (Giese et al., 1994, Xu et al., 2010). De plus, le formaldéhyde exogène absorbé par la plante peut être métabolisé dans les tissus de la plante. D'ailleurs, les racines des plantes et le sol sont capables d'agir sur ces polluants de l'air ou de l'eau (Glick et al., 2003). Des travaux réalisés dans des chambres expérimentales enrichies en différents gaz polluants ont démontré que des plantes en pot permettent une absorption par la plante et une dégradation par les microorganismes présents dans ce sol (Godish and Guindon, 1989; Oyabu et al., 2003). Une étude similaire réalisée en 2009 par Yang et al., démontre l'effet stimulateur de *Chlorophytum comosum L.* et *Glycine max L.* sur la biofiltration du formaldéhyde par l'assimilation au niveau racinaire et par la dégradation microbienne dans le sol augmentée par les exsudats racinaires. Il avait été préalablement validé que *Chlorophytum comosum L.* avait une capacité assainissante (Wolverton et al., 1984 ; Godish and Guindon, 1989; Giese et al., 1994).

D'autres plantes ont également montré des capacités intéressantes vis-à-vis de ces polluants. Notons les espèces *Hemigraphis alternata*, *Hedera helix*, *Hoya carnosa*, et *Asparagus densiflorus* qui se sont montrées efficaces sur de très nombreux types de gaz polluants, *Tradescantia pallida* efficace sur 4 composés organiques volatiles (COV) : Benzène, Toluène, Trichloroethylene et l' α -Pinene, *Fittonia argyroneura* efficace sur l'octane et l' α -pinene, et *Polyscias fruticosa* efficace sur l'octane (Yang et al., 2009). Cette étude met en avant que pour augmenter la qualité de l'air en intérieur par les plantes, il faut multiplier le nombre d'espèces végétales positionnées dans l'entourage pollué (Yang et al., 2009). Comme précisé précédemment, la microflore du sol permet aussi, par dégradation des polluants, d'assainir l'environnement. De nombreuses études ont validé le fait que plusieurs microorganismes ont cette capacité de dégradation, citons en exemple les espèces du genre *Exophiala*, ou d'autres champignons : *Scedosporium*, *Paecilomyces*, *Cladosporium*, *Cladophialophora* (Keenes et al., 2004).

Ainsi, si nous disposons actuellement de références bibliographiques qui montrent que des capacités d'épuration basées sur la biofiltration végétale utilisant le complexe plantes, substrat et microorganismes associés sont possibles, il reste que peu de systèmes sont actuellement disponibles et que leurs performances n'ont pas fait l'objet d'évaluations précises. Notre projet a donc pour but de combler ce déficit en proposant la mise au point et l'évaluation de systèmes de biofiltration végétale pour l'intérieur des locaux mais aussi pour des projets en extérieur tels qu'au sein d'une station

d'épuration. A noter que l'association Plant'Airpur a été partenaire des projets PHYTAIR (Cuny et al., 2010/2012), HORVAL (Gouron et al, 2010/2011).

2- MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel végétal

Pour l'essai en intérieur, après une première sélection de plantes en 2014 et 2015, les séries de 2016 ont été réalisées avec exclusivement du *Chlorophytum comosum* (figure ci-dessous), afin de simplifier les paramètres et de mieux comprendre les résultats souvent assez complexes à interpréter. Ces travaux ont été repris en 2017, tout en revalidant le protocole de passage dans l'enceinte et d'entretien des modules (arrosage notamment) afin de limiter la variabilité observée précédemment.



Pour le suivi de l'essai extérieur sur la station d'épuration de Fauville-en-Caux les plantes implantées à l'origine (2012) ont été les suivantes :

- Il y a 1629 plants en vertical et 4 m² à couvrir sur le dessus de l'ouvrage (70 plants/m² pour densité idem à vertical).
- Total 1909 plants, + marge plantation 10% = 2100 plants
- On segmente le périmètre en 2 zones : 2/3 ouest-sud-est, 1/3 nord

Genre	Espèce	Expositions	Producteur identifié	Indice taux de plantation	Face nord		Face ouest-sud-est	
					%	Plants	%	Plants
					100%	600	100%	1500
Plantes à fleurs, y compris graminées				voir aussi Lumen et Plantagenet				
Dianthus	superbus	Soleil	Lepage	1 à 5% max	100%	600	100%	1500
Erica	tetralix	Soleil	Lepage	10-15%			5%	75
Iris	pseudacorus	Soleil	Lepage	5%	5%	30	5%	75
Juncus	effusus 'Spiralis'	Soleil	Lepage	1 à 3%			3%	45
Mentha	aquatica	Soleil	Lepage	1 à 3%			3%	45
Caltha	palustris	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%			2%	30
Carex	riparia	Mi-expo à soleil	Lepage	minimum 60% genre Carex si on trouve espèces botaniques	2%	12	10%	150
Carex	acutiformis	Mi-expo à soleil	Lepage		2%	12	10%	150
Epilobium	hirsutum	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3% max	1%	6	1%	15
Eupatorium	rugosum	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%	1%	6	1%	15
Filipendula	vulgaris	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%	2%	12	2%	30
Geum	rivale	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%	1%	6	1%	15
Lysimachia	nummularia	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%	1%	6	2%	30
Lythrum	salicaria	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%	1%	6	1%	15
Myosotis	palustris	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%	1%	6	3%	45
Rumex	montanum	Mi-expo à soleil	Lepage	5%	5%	30	5%	75
Rumex	arifolius	Mi-expo à soleil	Lepage		5%	30	4%	60
Symphytum	officinale	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%			2%	30
Luzula	sylvatica	Mi-ombre	Lepage	10-20%	20%	120	10%	150
Galium	odoratum	Ombre	Lepage	1 à 3% max	3%	18		
Fougères				20-25% max l'ensemble				
Blechnum	spicant	Ombre	Lepage; Yves Dupont		15%	90		
Osmunda	regalis	Ombre	Yves Dupont		5%	30		
Polystichum	setiferum	Ombre	Yves Dupont		5%	30		
Thelypteris	palustris	Ombre	Lumen		15%	90		
Dryopteris	carthusiana	Semi exposition	Lumen; Yves Dupont		5%	30	5%	75
Dryopteris	dilatata	Semi exposition	Yves Dupont		5%	30	5%	75
Athyrium	filix-femina	Soleil	Lepage; Yves Dupont				10%	150

2.2. Matériel technique

- Programme Air Intérieur :

Les dispositifs d'air intérieur étudiés sont constitués de modules (murs) végétalisés proposés par un partenaire privé et soutenu par l'association Plant'Airpur

Le module testé mis au point par la société C-GREEN, est un module de dimension 1003x1035mm garni de 48 plantes en façade. Il est ventilé méthode douce dans le substrat à l'aide d'un tube microperforé et d'une pompe bas débit (2m³/Heure) pour préserver l'humidité du substrat et protéger les micro-organismes et les racines.

L'arrosage se fait manuellement par le dessus, directement dans les sacs, en plastique qui contiennent le substrat enrichi ou non en microorganisme.

Plusieurs modules correspondant à différentes combinaisons substrat/micro-organismes/plantes sont testés.

Le Substrat de chez Falienor Premier Tech est composé de tourbe blonde irlandaise F1, de fibre de coco medium, de perlite moyenne, de fibre de bois WoodTech et contenant de la chaux et 1.2 kg/m³ Topsubtra 12-12-17.

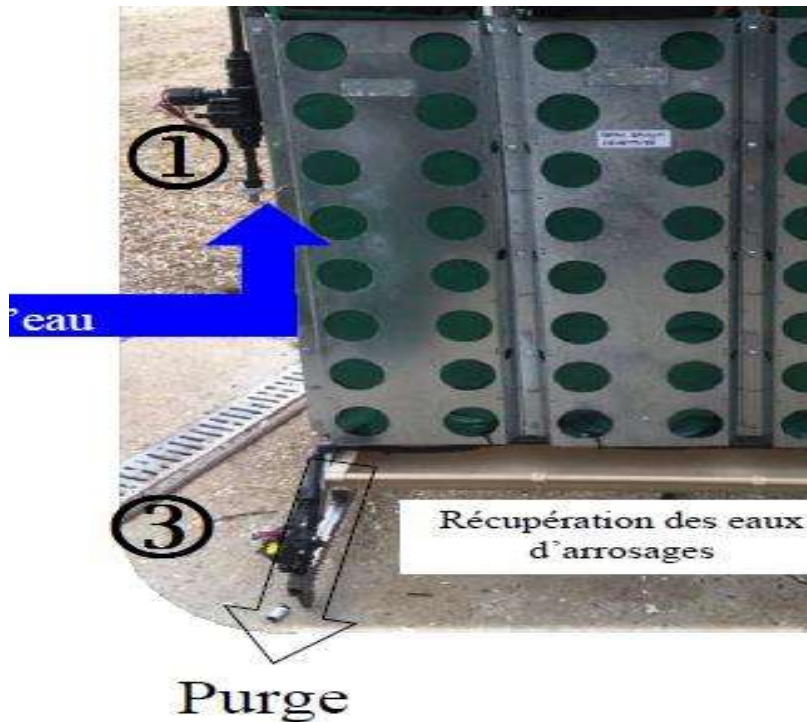
Trois conditions de biotisation sont testées :

- **Mix 1** : Mycorhize Myke Pro 500 : Dose x1+ Bactérie GHA 180 (*Bacillus Pumilus*) Dose x1
- **Mix 2** : Mycorhize Myke Pro 500 : Dose x2 + Bactérie GHA 180 (*Bacillus pumilus*) Dose x2
- **Mix 3** : Mycorhize Myke Pro 500 : dose x1+ *Bacillus pumilus*, *Bacillus subtilis* et *Pseudomonas fluorescens* Dose x1

Photographie représentant les caractéristiques du module en 2014 et 2015 :



Suite aux résultats fluctuants et à l'incidence qui semble être apportée par le facteur humidité du sol, des ajustements de ce module ont été apportés à partir de 2016 avec notamment l'ajout d'électrovannes :



Les apports et purges d'eau et d'air, sont automatisés par le biais d'électrovanne ainsi que d'un programmeur (6). L'arrivée d'eau se fait par le branchement à l'électrovanne (1) en passant par un régulateur de pression. L'arrivée d'air est faite via l'électrovanne (2). La purge d'air quant à elle passe par l'électrovanne (3). De plus un robinet (4) est ajouté ainsi qu'une gouttière de récupération des eau d'arrosage, afin de pouvoir la vider facilement. L'embout de connexion des modules entre eux est fermé à l'aide d'un bouchon (5) fixé sur le support.



Photographie représentant un module après 2 mois de végétalisation dans les serres de Fauville en Caux, (avant le transport au laboratoire de Lille pour les tests de dépollution) :

- Programme Air extérieur :

(Cf. extrait du cahier des charges établi par la sté DFA : Degrémont France Assainissement)

*Tour cylindrique végétalisée (3m de haut)

*Ventilateur

*Tuyau d'alimentation

*Sol mixte :

-squelette minéral : pouzzolane 15-20

-Terre : terre sablo limoneuse (<2mm avec du très fin, sans être de l'argile) 0.5 volume + matière organique

-Mise en oeuvre : préparation au sol, produits secs, mélange 3 fois à la pelle dépose dans l'ouvrage par couches de 25-30 cm, toujours sec compactage

* Végétaux

-pH acide (au départ, mais celui-ci est devenu dans le temps de plus en plus basique)

-classiquement utilisés en murs végétalisés (voir sélection précédente)

-variés pour limiter le risque d'échec

* Arrosage des plantes par l'eau sortant de la station

* Laisser un temps d'enracinement avant exploitation

Caractéristique de la tour

Diamètre trous	mm	50
Entre-axe trous	mm	80
Nombre total de trous (et de plants)		1629

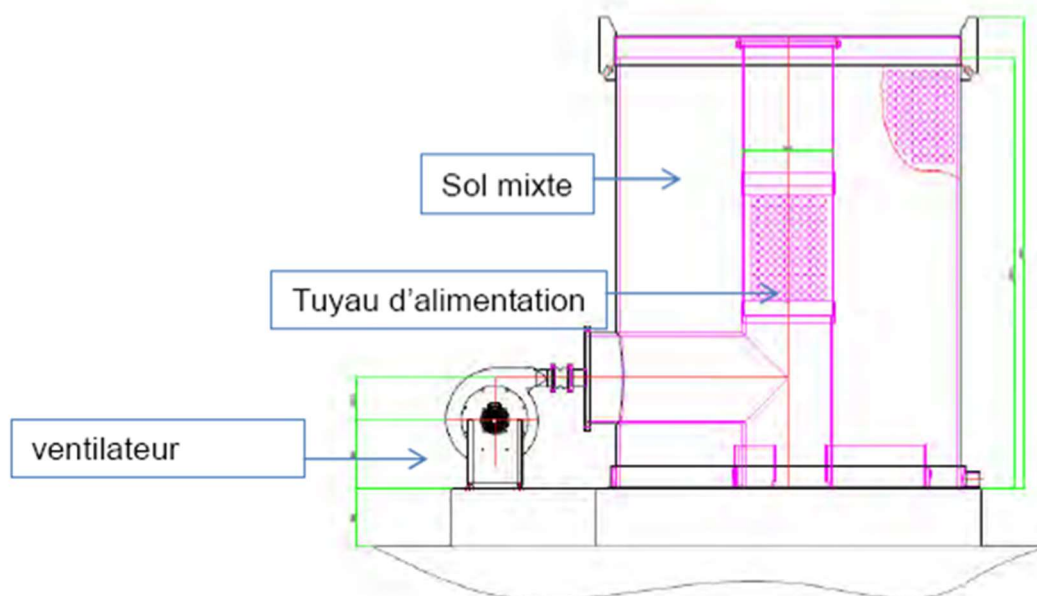


Schéma de la tour végétalisée :



Photographie de la tour (Juin 2015)

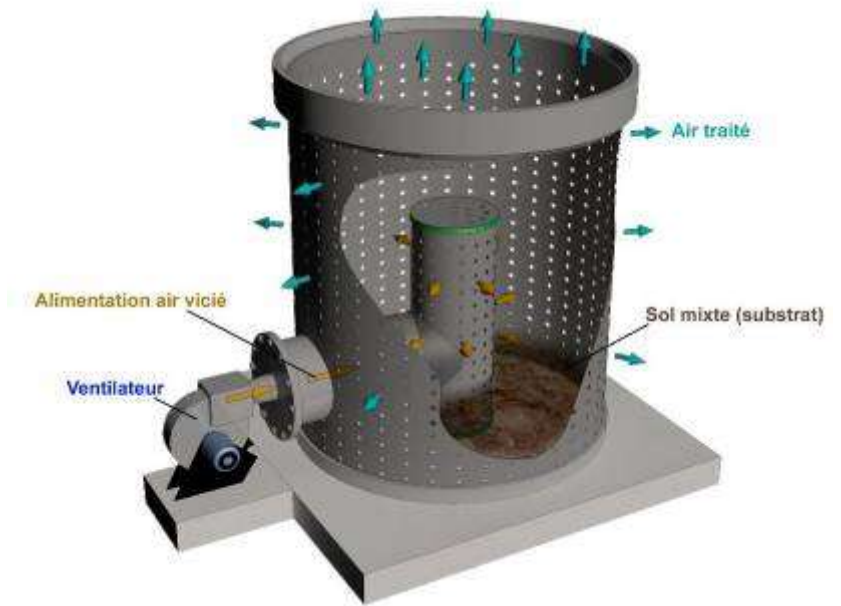


Schéma du dispositif (source : DFA)

3- ORGANISATION DE L'ESSAI

3.1 Implantation de l'essai

Une sixième série a été réalisée en 2017 pour la partie « Air intérieur », après celles réalisées en 2015 et 2016. Cette série est passée pendant l'été 2017. Les modules ont été végétalisés pendant deux mois (mi-mars à mi-mai 2017) dans les serres de Fauville en Caux (76), puis ces derniers ont été livrés mi-mai à l'Université de Lille (59) pour les tests de dépollution (courant juin).

Concernant l'essai « Air extérieur », un suivi des plantes a été réalisé, des analyses sur plantes, eau, substrat, et sur la dépollution ont été réalisés sur la tour Air de Caux à la station d'épuration de Fauville en Caux (76) courant toute l'année 2017.

3.2. Dispositif expérimental

Cette sixième série « Air intérieur » a été réalisée avec 5 modalités (modules) testées :

- Module sur support avec substrat témoin sans plantes
- Module sur support avec substrat témoin et plantes
- Module sur support avec substratensemencé (mix1) avec plantes
- Module sur support avec substratensemencé (mix2) avec plantes
- Module sur support avec substratensemencé (mix3) avec plantes

4- MESURES ET NOTATIONS

4.1 Variables mesurées et planning de notation

Air Intérieur :

- Développement des végétaux par rapport au système
- Impact des polluants sur végétaux (formation de nécroses foliaires ; l'atteinte de la photosynthèse : mesure de la fluorescence de la chlorophylle grâce à un fluorimètre portatif, Suivi des atteintes à l'ADN grâce au test des comètes)
- Suivi des concentrations de polluants (CO, SO₂).

Air Extérieur :

- Analyse de l'eau d'arrosage et analyse de sol (et microorganismes = biomasse microbienne)
- Analyse chimique des végétaux
- Evaluation des capacités épuratrices du système

5- RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Résultats du programme « Air Intérieur » :

- Développement des végétaux par rapport au système :

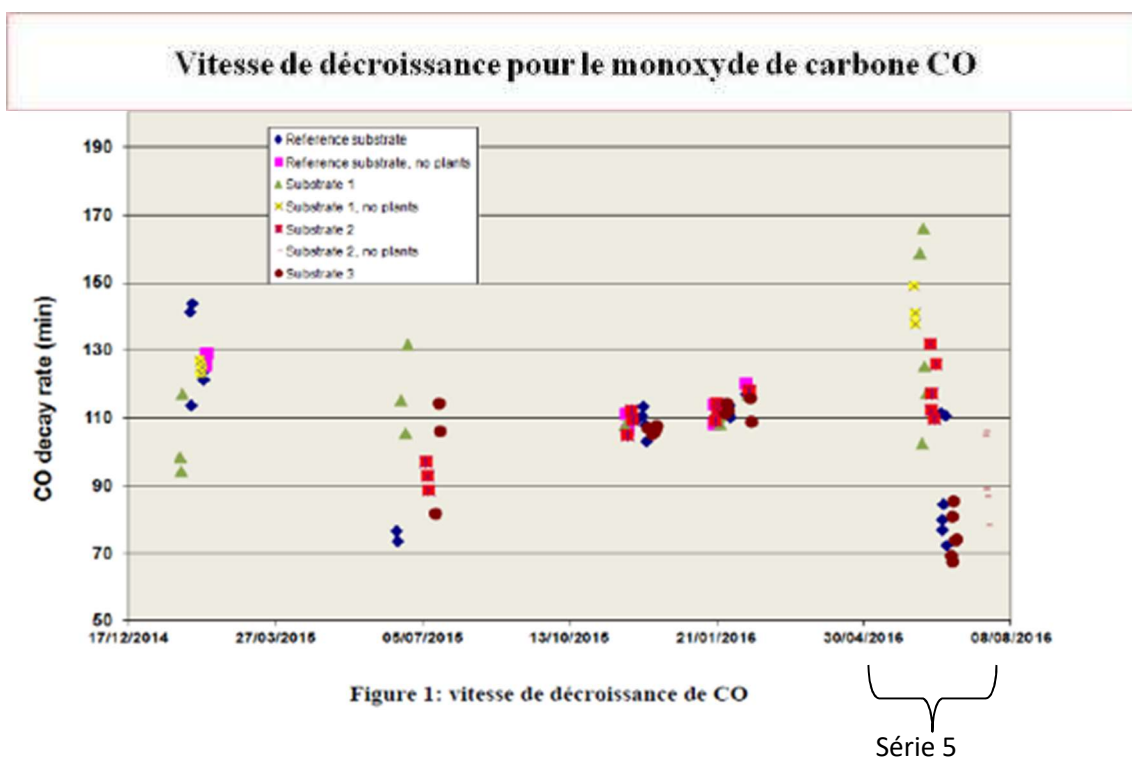
Globalement, le *Chlorophytum comosum* s'adapte très bien au système, et ne semble pas souffrir des contraintes de l'installation.

Cependant, il faut noter, que cette année, et pour la première fois, après les tests de dépollution, des plantes ont commencé à montrer courant juillet des symptômes de pourriture, certainement causés par un agent de type Pythiacée (figure ci-dessous). En effet, les modules, bien arrosés, et conservés sur Lille pendant la phase estivale, en laboratoire ont fini par dépérir.



- Suivi des concentrations de polluants (CO, SO₂) :

Rappel des 5 premières séries : Tous les résultats concernant la dépollution ont été comparés pour l'ensemble des séries, pour les polluants CO et SO₂ qui sont au final les deux seuls polluants exploitables, vu qu'ils suivent une courbe de décroissance (en concentration du polluant) linéaire. Il a été difficile d'exploiter ces résultats tant les variations entre les séries sont importantes, et ce malgré des résultats intéressants concernant la 1^{ère} et la 2^{de} série (bien que pour la seconde les témoins empêchaient de conclure), vis-à-vis du CO. La troisième série n'a pas induit de différence significative entre les modalités. Cette 3^{ème} série a été déshydratée puis ré-humectée et repassée dans le cube pour à chaque fois être repassée dans le cube mais aucune différence n'est apparue (séries 3 bis). Une des hypothèses était que ces grandes variations pouvaient venir de l'arrosage (cité précédemment) et donc de l'humidité du substrat au moment du passage dans le cube. C'est pour cela que les séries de 2016 ont été réalisées avec les améliorations du module :



Les résultats de cette 5^{ème} série présentait à nouveau une importante variabilité, sans pouvoir clairement conclure sur l'effet potentiel du paramètre végétalisé ou biotisé dans le cas de la dépollution de l'air de l'enceinte. Il était impossible d'en tirer des conclusions claires, nettes et définitives. Une des hypothèses était que ces grandes variations pouvaient venir de l'arrosage et donc de l'humidité du substrat au moment du passage dans le cube, ainsi une série suivante réalisée (5^{ème} bis) avait eu comme objectif de reprendre les modules végétalisés et d'amorcer des successions d'arrosage puis de ressuage avec un passage dans le cube à chaque étape pour mieux comprendre le paramètre humidité du substrat. Le calendrier des dates de réceptions de chaque module, des interventions (arrosage/quantité), et des dates de passage dans le cube ainsi que le résultat associé avaient été longuement analysés et débattus pendant le COPIL. Un autre élément limitant pour comprendre ces mécanismes était le fait que les valeurs à vide (vitesse de dépollution de l'enceinte vide = valeur témoin) étaient, elles-mêmes fluctuantes. En 2016, on avait considéré que la moyenne de dépollution pour l'enceinte à vide était de 220/230 mn, et que si l'on ôtait certaines valeurs suspectes des séries témoin et Detox 1, on obtenait des abattements de 10 à 30% en monoxyde de

carbone. Reste que ces valeurs n'apparaissent ni robustes ni certaines aussi elles nous ont poussé à continuer l'investigation dans ce sens.

C'est ainsi qu'une série supplémentaire a été réfléchiée et réalisée en 2017. Cette dernière avait comme objectif de pouvoir enfin conclure sur cette variabilité en redéfinissant le passage des modules et des répétitions dans l'enceinte. Initialement, pour une modalité, entre 3 et 5 répétitions étaient réalisées. Pour chaque répétition, une journée à demi-journée minimum était nécessaire pour obtenir les résultats. Ainsi, entre la première répétition de la première modalité et la dernière répétition de la dernière modalité, il pouvait y avoir 5 semaines de délais. Cette longue période peut donc être source de variabilité avec des modules qui ne passent pas dans un état physiologique similaire. Afin de limiter cette problématique, un protocole de passage a été intégralement repensé et validé par le comité de pilotage. En effet, une alternance entre les modules était compliqué d'un point de vu logistique, alors ce sont les modules végétalisés qui sont passés les premiers, puis les non végétalisés puis les témoins. De plus, une exposition « à vide » a été réalisée entre chaque répétition : (Cf. tableau 1 ci-dessous).

Module	Date	Décroissance CO (min)
VIDE	20/04/2017 18:28:16	313.88
DETOX 2 VGT	21/04/2017 11:01:16	315.07
VIDE	21/04/2017 17:08:16	255.70
DETOX 2 VGT	24/04/2017 14:58:16	236.82
VIDE	25/04/2017 08:59:16	227.03
DETOX 2 VGT	25/04/2017 17:49:16	238.92
VIDE	26/04/2017 09:22:16	234.04
DETOX 2 VGT	27/04/2017 12:44:16	212.73
VIDE	28/04/2017 12:28:16	171.52
DETOX 1 VGT	02/05/2017 10:27:16	195.48
VIDE	02/05/2017 16:55:16	246.87
DETOX 1 VGT	03/05/2017 09:06:16	210.57
VIDE	03/05/2017 16:52:16	239.38
DETOX 1 VGT	04/05/2017 09:35:16	204.75
VIDE	04/05/2017 16:58:16	299.20
DETOX 1 VGT	05/05/2017 09:06:16	182.55
DETOX BACILLUS VGT	11/05/2017 10:05:17	165.29
VIDE	11/05/2017 16:56:17	223.76
DETOX BACILLUS VGT	12/05/2017 07:45:17	171.59
VIDE	12/05/2017 16:45:17	331.59
DETOX BACILLUS VGT	15/05/2017 09:18:17	170.91
VIDE	15/05/2017 16:40:17	309.77
DETOX BACILLUS VGT	16/05/2017 08:20:17	238.81
VIDE	16/05/2017 16:46:17	288.93
DETOX BACILLUS NVGT	06/06/2017 09:25:17	131.26
DETOX BACILLUS NVGT	07/06/2017 09:00:17	157.85
VIDE	07/06/2017 16:45:17	172.70
DETOX BACILLUS NVGT	08/06/2017 08:15:17	183.11
VIDE	08/06/2017 16:45:17	297.81
DETOX BACILLUS NVGT	09/06/2017 10:04:17	144.95
VIDE	09/06/2017 17:33:17	170.14
DETOX 1 NVGT	20/06/2017 09:08:17	180.07
VIDE	20/06/2017 16:14:17	193.78
DETOX 1 NVGT	21/06/2017 09:03:17	128.79
VIDE	21/06/2017 16:42:17	220.42
DETOX 1 NVGT	22/06/2017 09:12:17	172.20
VIDE	22/06/2017 16:29:17	139.96
DETOX 1 NVGT	23/06/2017 09:45:17	127.34
VIDE	23/06/2017 17:04:17	151.42

Tableau 1 : Calendrier des expériences et temps de décroissance CO

Les résultats de dépollution obtenus sont présentés dans le tableau 2 ci-dessous :

Id	Modalité	Moyenne (minutes)	% d'abattement	Groupes homogènes	
2	Detox 2	251,441	- 7,297	A	
6	enceinte vide	233,093	x	A	
1	Detox 1	198,338	17,523	A	B
3	Detox bacillus	186,640	24,889		B C
5	Detox bacillus NV	154,293	51,072		C
4	Detox 1 NV	147,100	58,459		C

Tableau 2 : Temps de décroissance en minutes, par type de module

On constate ainsi que seule la modalité 2 (végétalisée et substrat biotisé) présente une moyenne supérieure à l'enceinte vide. Pour toutes les autres modalités, on observe une décroissance plus rapide, qui est significative pour les 2 modalités non végétalisées et pour la modalité « Detox bacillus ». Comme la variabilité (écart type) pour l'enceinte vide est importante, cette observation a été complétée avec la comparaison entre le taux de décroissance mesuré lors de l'exposition du module et celui mesuré dans l'enceinte vide juste après ou avant. Dans ce cas, on observe que pour la modalité Detox 2 il n'y a toujours pas de différence significative entre les temps de décroissance. Pour les modalités Detox 1 et Detox Bacillus, la décroissance de CO est systématiquement plus rapide que dans l'enceinte vide, avec une différence d'environ 60 min et 100 min respectivement. Pour les modules non végétalisés, la vitesse de décroissance de CO est environ 20 min plus rapide en présence du module par rapport à l'enceinte vide. Cette seconde observation plaide en faveur de l'intérêt du végétal dans ce biofiltre. Résultat qui n'était pas visible dans l'observation globale du tableau 2.

On notera que des symptômes caractéristiques d'une pourriture racinaire sont apparus sur les chlorophytum des modalités Detox 2 et 1 au moment de leurs passages dans l'enceinte. Detox 2, le plus atteint a également été le seul à ne pas montrer d'efficacité. On peut donc émettre l'hypothèse qu'un végétal / biofiltre en bonne santé est nécessaire pour obtenir de bons rendements épuratoires. Il semble donc que :

- Detox 2 n'ait pas d'action significative pour l'épuration du CO de l'air
- Detox 1 et encore plus Détox Bacillus contribuent efficacement à l'épuration du CO de l'air, même si on ne peut rejeter l'hypothèse que l'agent pathogène ayant affecté les plants puisse jouer un rôle sur les performances du système.

5.2. Résultats du programme « Air extérieur » :

- Analyse de l'eau d'arrosage et analyse de sol et microorganismes

L'analyse d'eau indique les mêmes propriétés que les analyses précédentes à savoir un pH plutôt basique (en moyenne à 7,75), légèrement supérieur à celui enregistré en 2016 (7,55), et une conductivité moyenne élevée (1,3) sensiblement au-dessus de celle de 2016 (1,15). Notons que comme pour les analyses faites en 2016, les moyennes des taux d'azote nitrique et ammoniacal, de phosphate, de sulfates, de bicarbonates, de chlorures, de manganèse, de fer et de sodium sont plutôt également élevées en sortie du biofiltre, par rapport à l'eau du clarificateur.

Comme pour 2016, les analyses d'eau faites en 2017 ont été réalisées de manière différentielle, c'est à dire entre l'eau du clarificateur qui sert à arroser, et l'eau ayant traversé la tour (eau rejetée dans le bas de la tour). Cette analyse permet d'observer les variations d'éléments et si une partie des éléments soufrés solubles dans l'eau est bien retrouvée dans cette eau rejetée.

		avr-17		oct-17	
		Eau clarificateur	Eau sortie biofiltre	Eau clarificateur	Eau sortie biofiltre
	pH eau	7,31	7,66	7,29	7,84
	EC	1,15	1,28	1,13	1,33
Anions	Azote nitrique	0	4,94	0	6,24
	Phosphate	28,36	35,25	25,38	33,89
	Sulfates	56,44	64,87	41,48	60,14
	Chlorures	294,6	310,7	210,6	293,4
	Carbonates	0	0	0	0
	bicarbonates	312,8	416,7	325,5	397,7
Cations	azote ammoniacal	0,23	1,95	0,41	2,45
	potassium	31,86	32,46	29,77	30,66
	magnésium	7,87	7,48	6,16	6,18
	calcium	93,36	95,04	83,91	92,04
	sodium	216,3	237,83	199,7	206,71
Oligoéléments	cuiivre	0,01	0,02	0,01	0,02
	zinc	0,07	0,24	0,08	0,28
	manganèse	0,05	3,36	0,05	4,07
	bore	0,09	0,09	0,09	0,09
	fer	0,06	3,54	0,07	3,38

Tableau récapitulatif des analyses d'eau de la tour Air de Caux

Ces analyses permettent notamment d'observer des différences importantes sur différents éléments dont l'azote et les sulfates qui sont bien retrouvés dans cette eau rejetée, et ainsi orientent le fait qu'une partie de la dépollution peut être imputée à l'eau d'arrosage.

Analyse support de culture			
	2013	2017	2018
pH eau	7,1	8,3	8,4

Les analyses de sol montrent que le pH est de plus en plus basique (~ 8,4 : légèrement plus basique que 2016, mais aussi que le taux de matière organique est plutôt constant ces dernières années et très élevé (~6,6%).

En ce qui concerne le taux de biomasse microbienne, il se situe en général et selon les profondeurs et saisons entre 0.4% et 2% du carbone organique total, comme pour 2016. Ce taux paraît faible, mais ce cadre est défini pour un sol agricole classique. Il n'y a pas de changement important par rapport aux analyses de 2015.

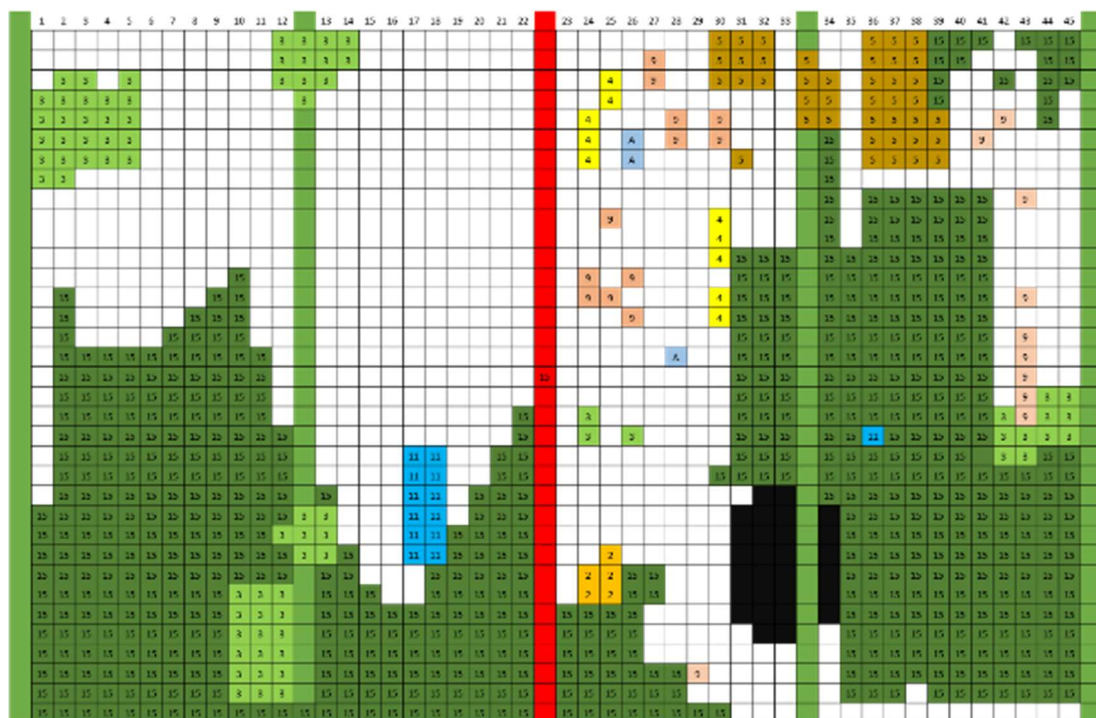
A mi-hauteur de la tour et dans les premiers horizons, ce taux ne varie pas entre l'été et l'hiver et reste aux alentours de ~2%. Dans le bas de la tour, ce taux est faible (~ 0,3-0,4%). Ce faible taux est certainement lié à un problème d'hydromorphie du sol lié à un arrosage trop important, des pluies

hivernales fréquentes et à une absence d'assimilation par les racines pendant cette phase hivernale. Un carottage par le dessus de la tour permet de vérifier ce taux dans les différentes strates de la tour à [~0-25cm], [~25-50cm], [~50-75cm] et [~75-100cm]. Les résultats indiquent que le pH est stable entre les différentes strates. Le taux de matière organique est très élevé dans les 3 premières phases, cependant dans la dernière strate [~75-100cm], ce taux est plus faible. On note le même phénomène pour la biomasse microbienne qui se maintient autour d'1,2% en surface, jusqu'à une profondeur de 75 cm et chute à ~ 0,65% du carbone organique pour la strate la plus profonde. Ce résultat est certainement lié au fait que plus on prélève en profondeur moins de racines sont présentes (et donc moins de microorganismes) et ainsi des taux en biomasse microbienne plus bas.

- Inventaire et cartographie des végétaux présents sur la tour

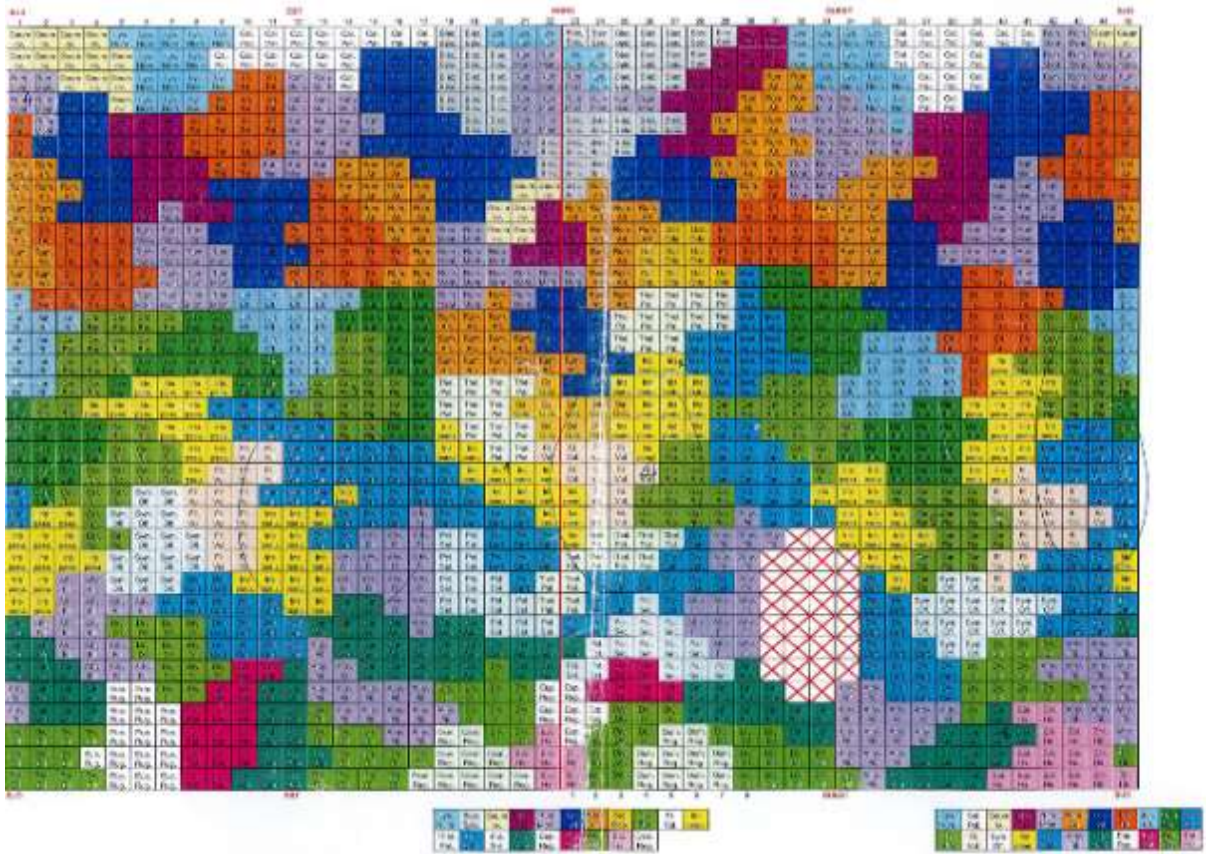
Au moment de la mise en route de la tour en 2012, une quarantaine d'espèces ont été ainsi plantées sur ce biofiltre. 6 années plus tard, une homogénéisation des espèces s'est faite avec près de 75% des espèces ayant disparu, et une propagation des 25% restantes sur l'ensemble de la tour.

Une dizaine d'espèces végétales ont ainsi prospéré, il s'agit de : *Geum rivale*, *Luzula sylvatica*, *Iris pseudacorus*, *Carex riparia*, *Carex acutiformis*, *Rumex montanum*, *Rumex arifolius*, *Epilobium hirsutum*, *Eupatorium rugosum*, *Filipendula vulgaris*, *Geranium sp.* et *Thelypteris palustris*.



Cartographie de début avril 2017(reprise de végétation), représentant la présence /colonisation des espèces identifiées ci-dessus.

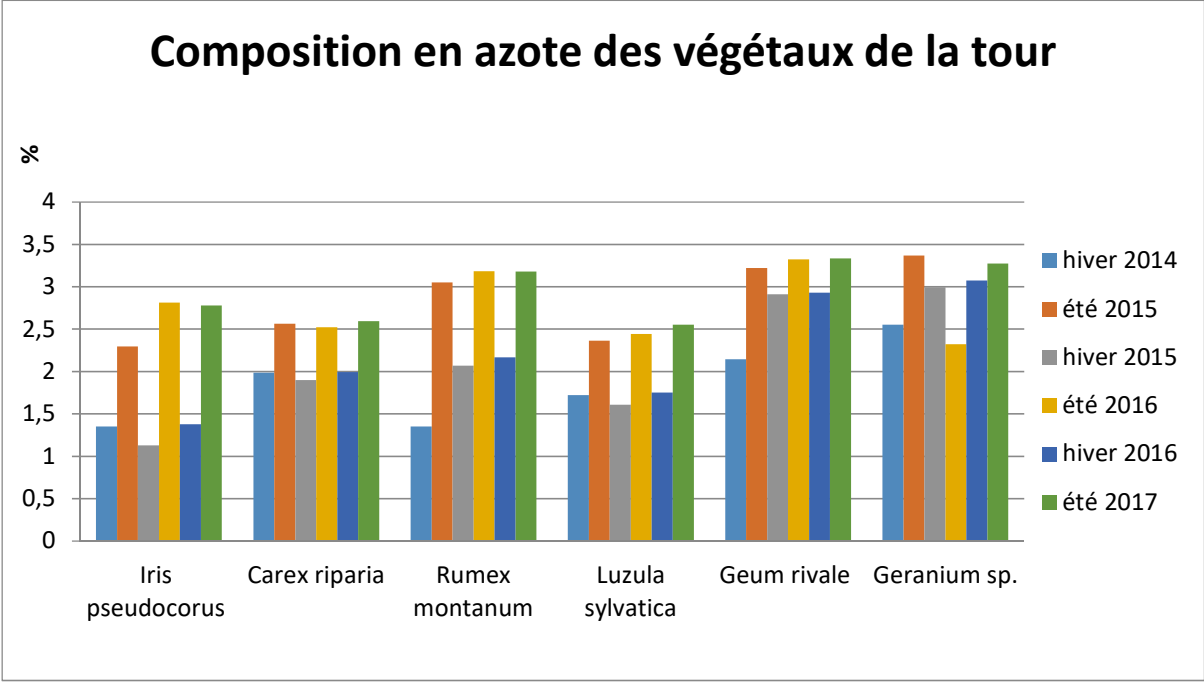
Si l'on compare ce document à celui représentant l'implantation des végétaux sur la tour en 2012 (document ci-dessous), on peut observer visuellement cette homogénéisation végétale.



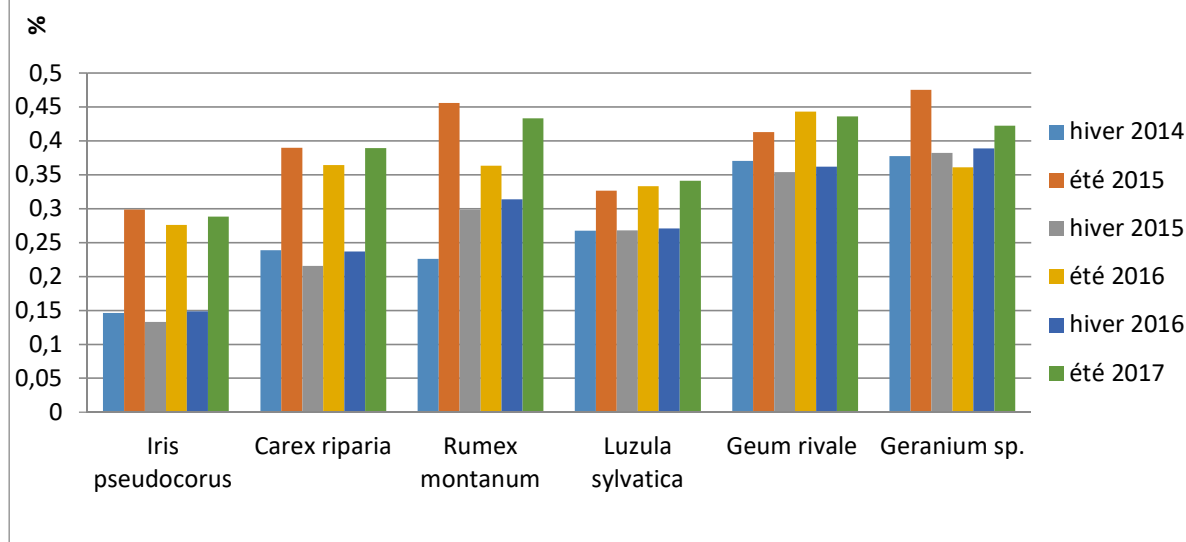
Cartographie des espèces végétales plantées sur la tour au moment de l'installation en 2012.

- Analyse chimique des végétaux

Les analyses sur végétaux se sont focalisées sur l'évolution de la composition en azote et en soufre des végétaux.



Composition en soufre des végétaux de la tour



6 espèces (Iris, Carex, Rumex, Luzule, Geum, Geranium) ont été suivies sur les analyses d'été et d'hiver depuis l'hiver 2014. 6 autres espèces l'ont été exclusivement sur les analyses d'été (2015/2016): Myosotis, Filipendula, Epilobe, Menthe, Polystichum, Lythrum, mais ces analyses ont été stoppées car ces plantes ont disparu. D'autres espèces ayant disparu, plus tôt dans le programme, les analyses du % d'azote et de soufre n'ont pu être poursuivies (cas par ex. de la menthe aquatique, du myosotis ou du *Lythrum salicaria*).

Ces analyses montrent l'évolution de la composition en N et S dans les tissus végétaux. On observe que concernant l'azote, il est plus présent dans les plantes en été, et que pour 3 espèces (Rumex, Geum et Geranium), ce taux a augmenté dans les tissus entre l'hiver 2014 et l'hiver 2016.

Concernant le soufre, on observe que la plupart des espèces sont capables d'en accumuler de plus grandes quantités par rapport à l'hiver. Il s'agit des espèces Iris, Carex, Rumex, Luzule et Geum, (plus difficile à conclure pour le Geranium).

- Mesures de dépollution :

Des mesures en temps réel ont été réalisées pendant un an et sur toutes les faces de la tour et à différentes hauteurs, par deux capteurs autonomes pour composés soufrés :

- ▶ 1 capteur de sensibilité 0-20 ppm
- ▶ 1 capteur de sensibilité 0-2 pmm

Ces capteurs ont été installés sur la tour, en entrée et en sortie. Le capteur en sortie a été changé de place tous les 15 jours (différentes orientations et différentes hauteurs, de la position 1 à 12) :

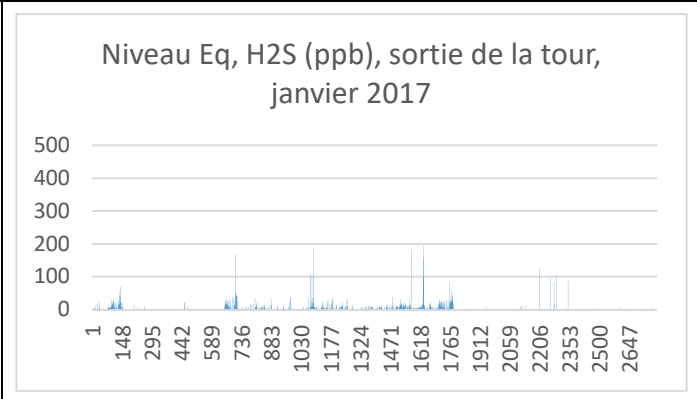
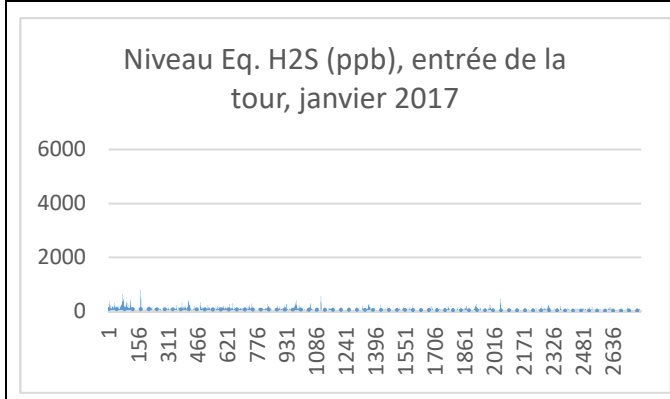
1	Haut Nord	5	Milieu Nord	9	Bas Nord
2	Haut Sud	6	Milieu Sud	10	Bas Sud
3	Haut Ouest	7	Milieu Ouest	11	Bas Ouest
4	Haut Est	8	Milieu Est	12	Bas Est

Graphiques par mois, mettant en comparaison les concentrations de polluants en amont et en aval du biofiltre, obtenues en 2017:

- JANVIER :

Haut Nord

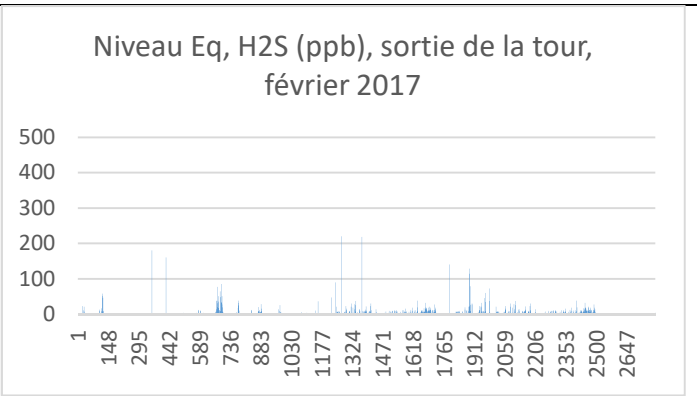
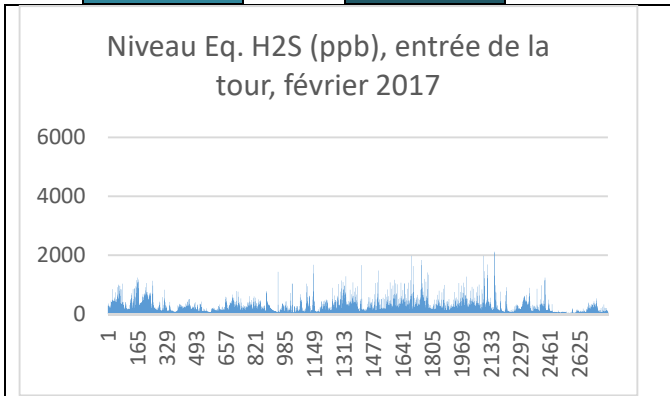
Haut Sud



- FEVRIER :

Haut Ouest

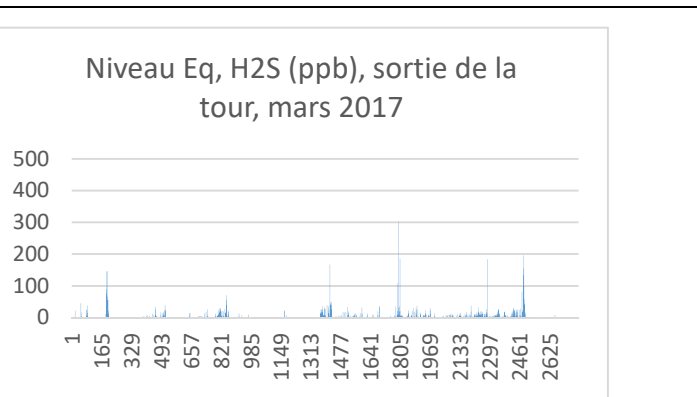
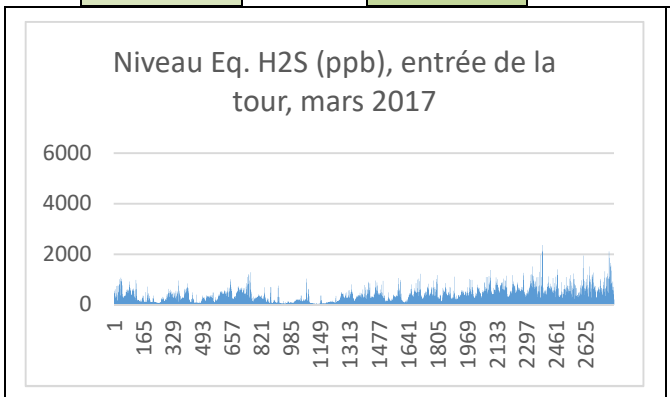
Haut Est



- MARS :

Milieu Nord

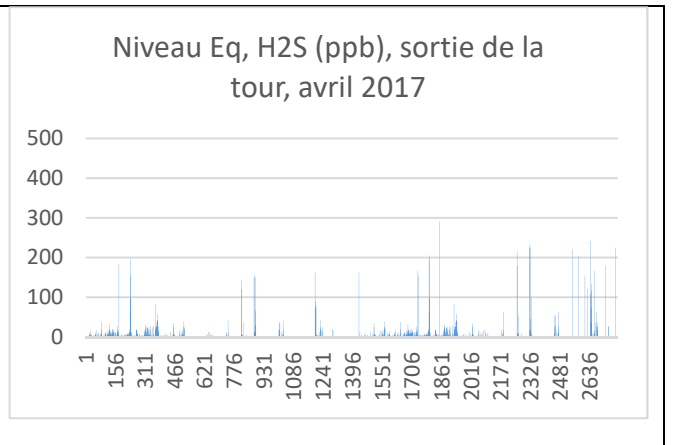
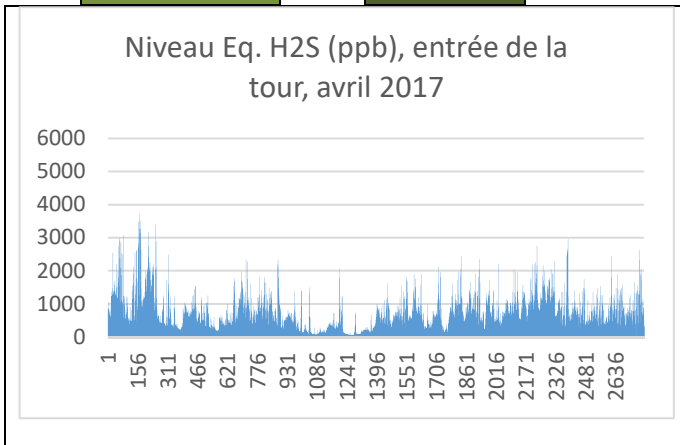
Milieu Sud



- AVRIL :

Milieu Ouest

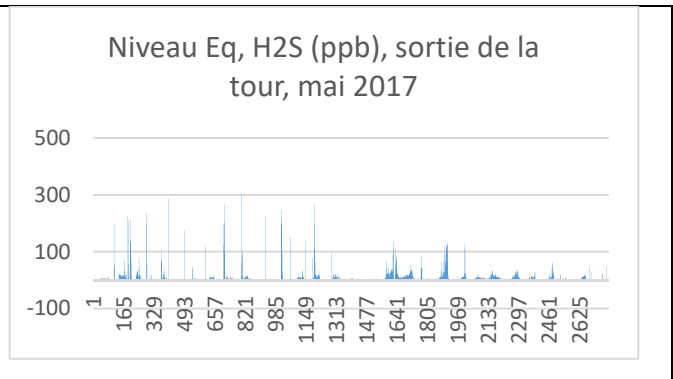
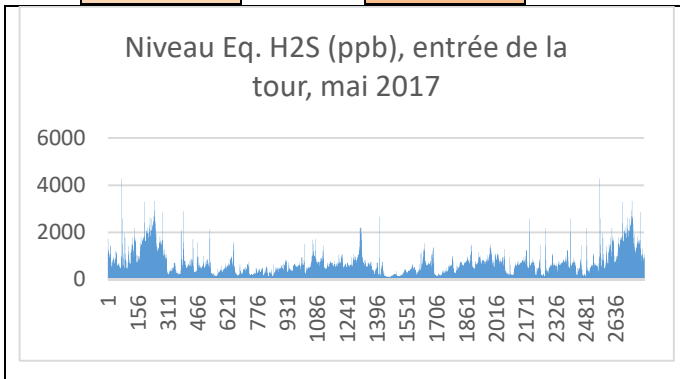
Milieu Est



- MAI :

Bas Nord

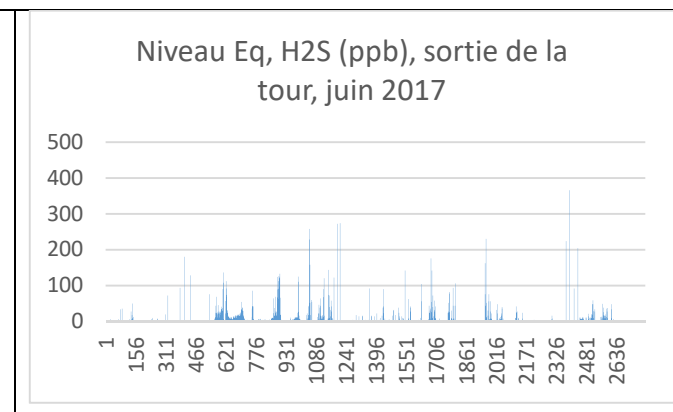
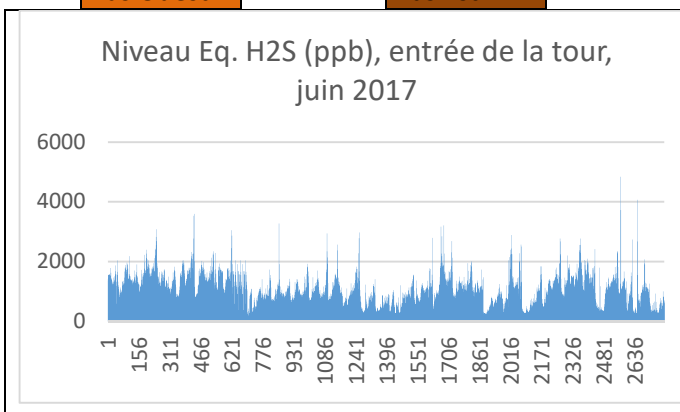
Bas Sud



- JUIN :

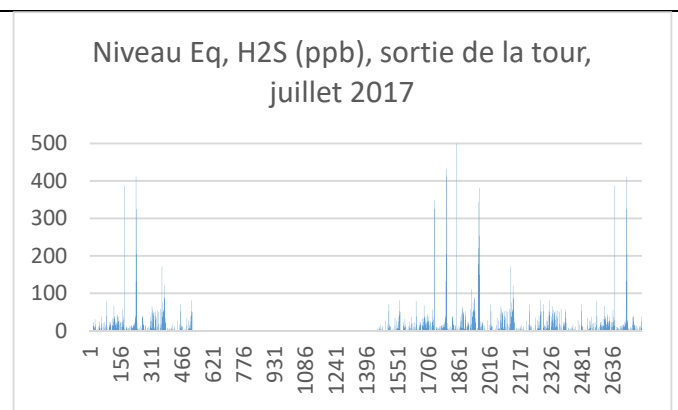
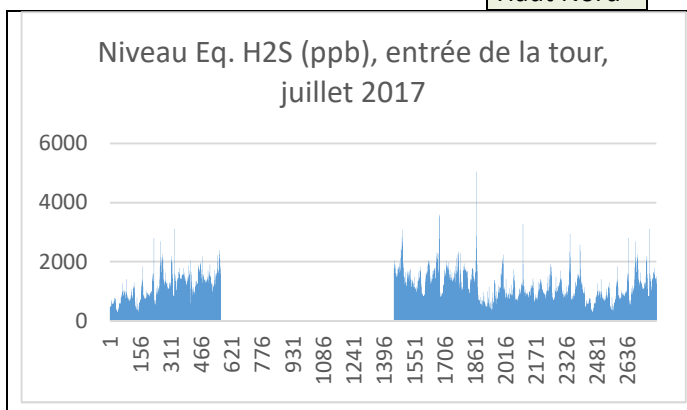
Bas Ouest

Bas Est



- JUILLET :

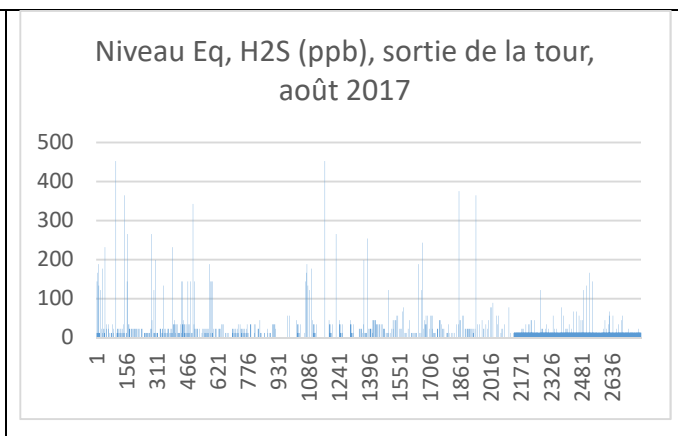
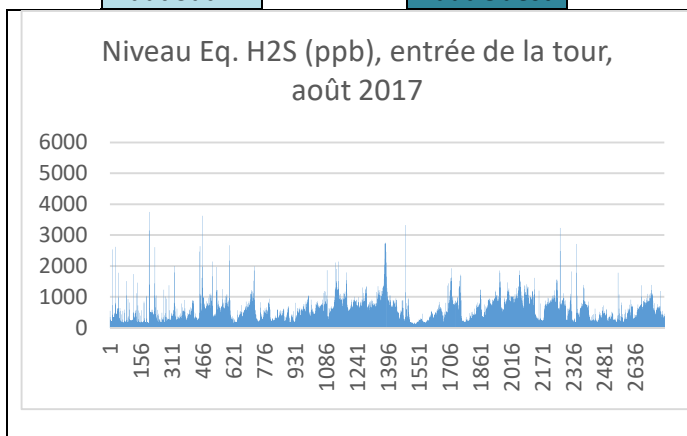
Haut Nord



- AOÛT :

Haut Sud

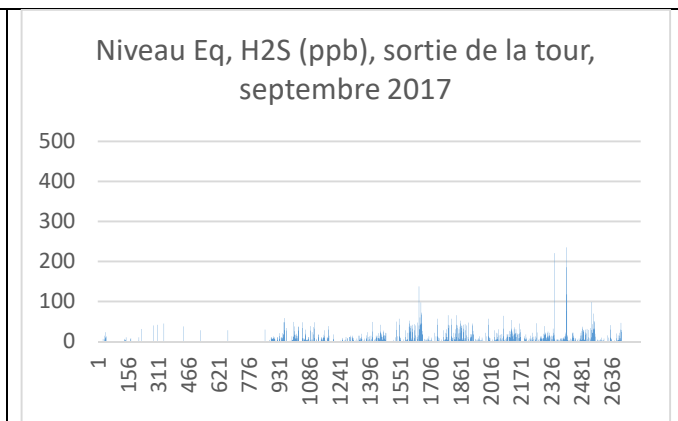
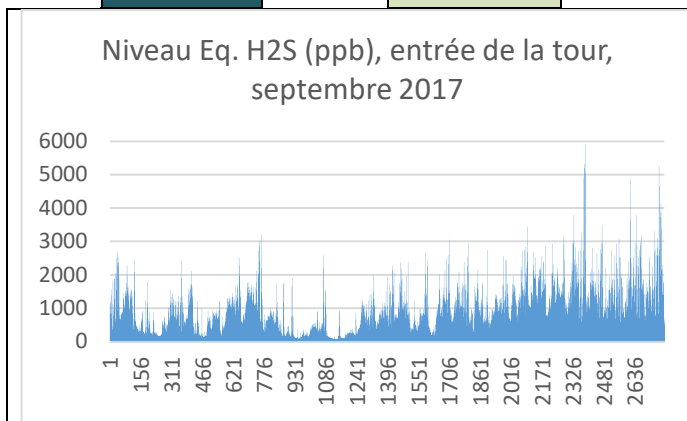
Haut Ouest



- SEPTEMBRE :

Haut Est

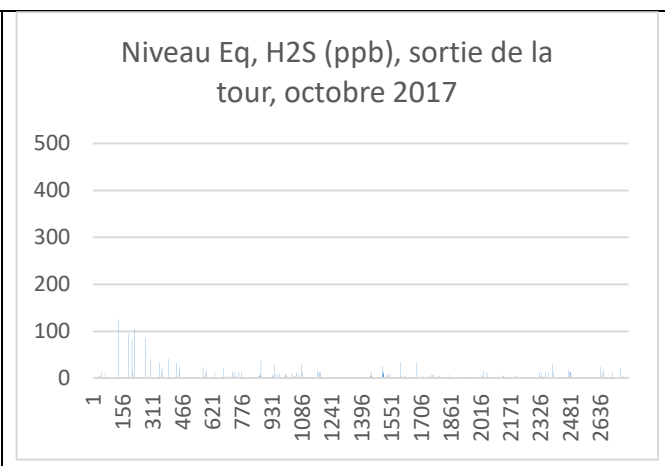
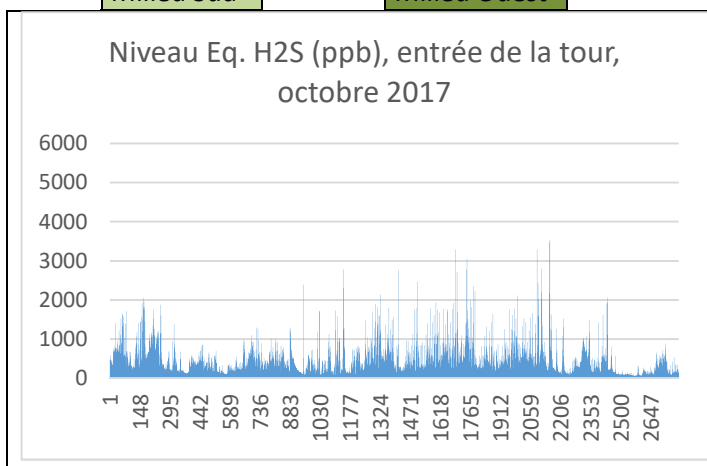
Milieu Nord



- OCTOBRE :

Milieu Sud

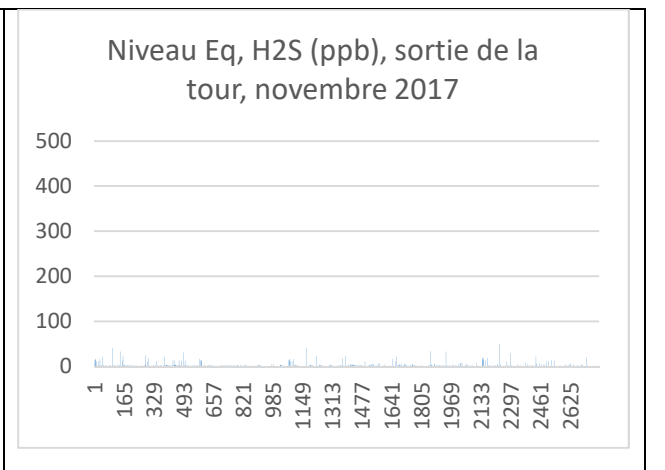
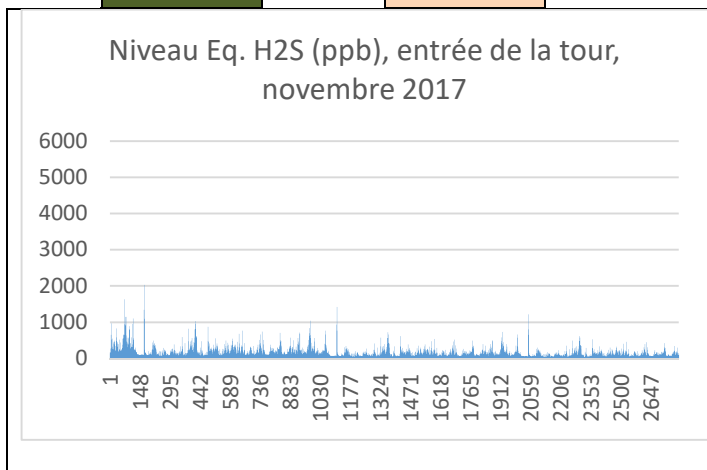
Milieu Ouest



- NOVEMBRE :

Milieu Est

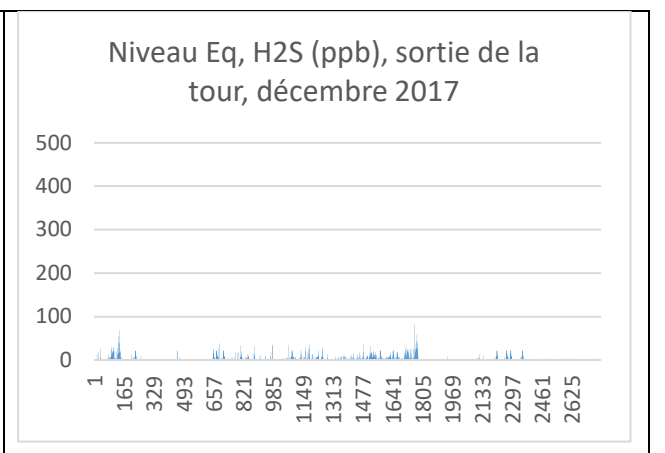
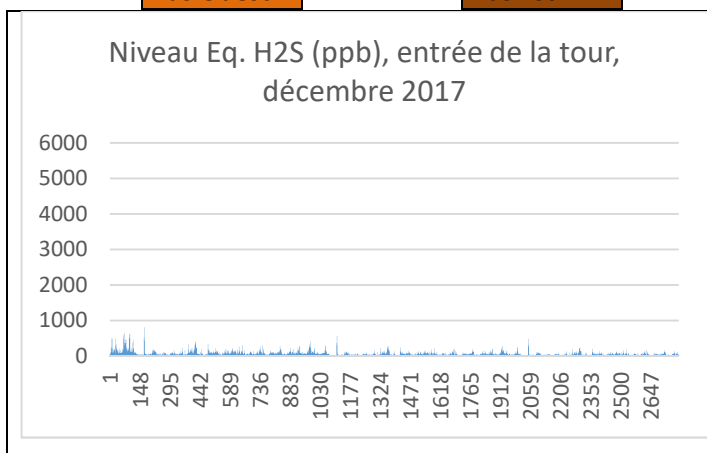
Bas Nord



- DECEMBRE :

Bas Ouest

Bas Est

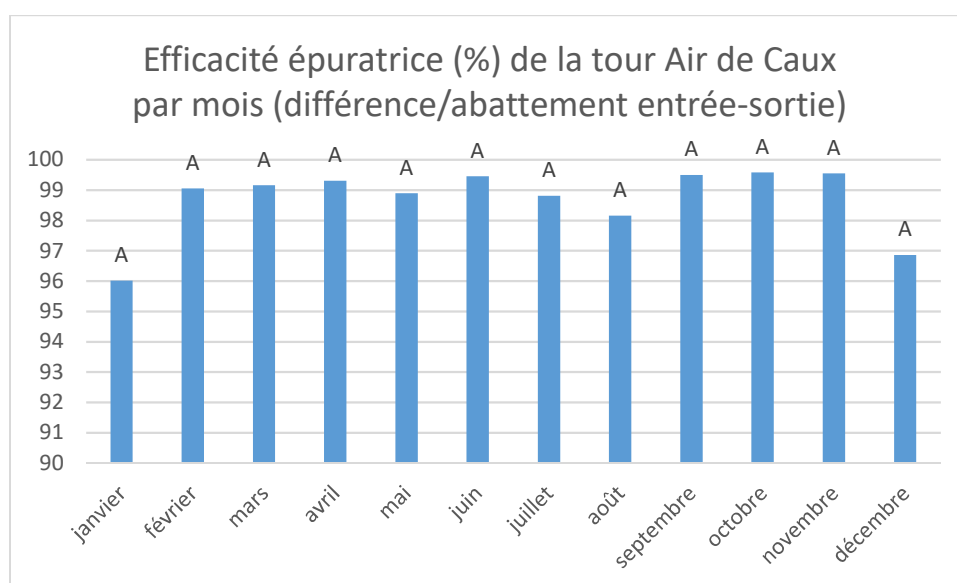


- Interprétation des résultats de dépollution présentés ci-dessus :

Un récapitulatif des données présentées dans les graphiques précédents est synthétisé dans le tableau ci-dessous, et met en avant la moyenne d'H2S (ppb), en entrée et en sortie du biofiltre par mois :

mois	moyennes H2S (ppb)	
	entrée	sortie
janvier	66,8616181	2,66343391
février	272,772004	2,58010057
mars	364,106207	3,07255747
avril	698,492421	4,83153736
mai	680,03908	7,54525862
juin	1078,43355	5,89771193
juillet	1129,37316	13,4876446
août	599,452945	11,0707256
septembre	910,265517	4,64530532
octobre	454,620007	1,89399928
novembre	167,154045	0,75854885
décembre	67,9177417	2,13397989

Ce tableau nous permet de calculer l'efficacité épuratrice de la tour Air de Caux par mois, en % d'abattement des composés soufrés (Cf. graphique ci-dessous) :



L'efficacité de la tour épuratrice est excellente car le % épuratoire obtenu sur l'année est compris entre 96 et plus de 99%.

Nous n'observons pas de différences significatives sur la fonction épuratrice par rapport à la saison. On notera néanmoins que les mois d'hiver (décembre et janvier) sont les périodes où la différence en composés soufrés entre l'entrée et la sortie est la moins bonne. Cela pourrait s'expliquer par un système plante/microorganisme en état de dormance sur ces mois. Les périodes de printemps et surtout d'automne sont en revanche les plus performantes (avril, septembre, octobre et novembre). La période estivale, affiche également d'excellents résultats.



Capteur en sortie



Capteur en entrée



Juin 2016



octobre 2016



Janvier 2017



septembre 2017

Photographies de la Tour Air de Caux[®], (crédit photos : Arexhor Seine-Manche)

6- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- Conclusions :

Les deux systèmes végétalisés / biofiltres sont en place et fonctionnent correctement avec des plantes installées et adaptées à ces systèmes.

Les phases d'analyses de dépollution ont débuté depuis l'été 2015 pour la tour « Air de Caux » de la station d'épuration de Fauville en Caux, et 6 séries ont été réalisées pour la partie « Air intérieur ».

Les résultats encourageants ont été confirmés et validés pour une dépollution des polluants soufrés en condition extérieure pour la tour « Air de Caux » de la station d'épuration de Fauville en Caux avec des rendements très bons (au-dessus de 96% d'abattement).

Cependant, en ce qui concerne les tests à l'Université de Lille focalisés sur le monoxyde de carbone pour la partie « Air intérieur », les résultats auront été fluctuants pendant les 6 séries, même si les données obtenues sur la dernière série étaient à nouveau encourageantes. Les expériences de janvier 2015 à février 2016 ont mis en évidence que les conditions d'arrosage (fréquence, quantité d'eau) étaient un paramètre critique pour l'étude des performances épuratoires des modules vis-à-vis des polluants générés par la combustion de l'encens, ainsi que les conditions environnementales (notamment la température dans le local de stockage des modules entre les expériences). Ceci apparaît notamment lors de la comparaison des temps de décroissance de CO lors de ces expériences, avec une forte dispersion des mesures lors des séries de janvier-février 2015 et juin-juillet 2015, donnant des résultats incohérents. De plus, les expériences de novembre 2015 à février 2016 ont conduit aux mêmes temps de décroissance, quel que soit le substrat, sans dispersion des résultats. Les concentrations des autres polluants (autres que CO) n'ont pas pu être exploitables, car les oxydes d'azote sont fortement influencés par les concentrations extérieures, SO₂ est resté en faible concentration, et les particules (souvent en quantités trop importantes) ne présentaient pas de décroissance exponentielle. A partir de juin 2016, les modules ont été livrés assemblés par blocs de trois, munis d'un système d'arrosage intégré. Dans un premier temps, la conservation des modules entre les expériences a été confiée à une entreprise extérieure mais les résultats obtenus lors de cette série n'ont pas été exploitables à nouveau à cause d'un problème d'homogénéité d'humidité du substrat au moment du passage dans l'enceinte. A partir de septembre 2016, le protocole opératoire a été modifié, avec une plus forte étanchéité de l'enceinte, pour minimiser la part du taux d'échange d'air de l'enceinte et ainsi mieux observer les différences éventuelles entre les temps de déclin de CO pouvant être attribués à l'effet du mur végétal. Les résultats issus de toutes les expériences suivantes ne pourront donc pas être comparés aux expériences avant cette date.

Les expériences de septembre et octobre 2016 ont montré que les temps de décroissance de CO suite à l'exposition aux fumées d'encens sont plus longs pour un substrat trempé que pour un substrat sec, avec un effet de l'arrosage qui s'observe avec un retard d'environ une journée. Nous en concluons que l'historique de l'arrosage est également un paramètre important, et non pas uniquement l'hygrométrie du substrat. Dans ces conditions, le substrat témoin semble plus efficace pour l'élimination de CO, puis Détox 1, puis Détox 2. Ceci est confirmé par la dernière série d'expériences d'avril à juin 2017, où l'on observe que Détox 2 n'a pas d'action significative sur la vitesse de décroissance de CO, qui est la même que la vitesse observée dans l'enceinte vide, alors que Détox 1 et Détox Bacillus induisent une décroissance plus rapide.

En conclusion, les expériences réalisées semblent montrer que, associées à certains substrats, les murs végétaux peuvent avoir des propriétés d'épuration du CO dans l'air. Il n'a pas été possible de vérifier si cet effet existe pour d'autres polluants. De plus, les expériences successives ont mis en évidence un certain nombre de paramètres influents, rarement voire jamais pris en compte dans les études antérieures sur la dépollution de l'air par les plantes, notamment l'hygrométrie et l'historique d'arrosage, auxquels on peut également ajouter la composition du substrat, sa densité ou sa quantité, ainsi que la présence possible d'agents pathogènes. Dans ces conditions, même si nos expériences en conditions relativement contrôlées, dans un volume de 8 m³, montrent un effet du mur végétal, il n'est pas possible de s'assurer qu'une fois installés dans un environnement réel, les murs végétaux auront réellement un effet.

- Perspectives :

Bien que ce programme national soit arrivé à échéance, des perspectives d'intérêt nous sont apparues évidentes, c'est pour cela que des opportunités de poursuites de ces recherches sont en ce moment explorées :

- 1 : Pour la partie « air intérieur », nous envisagerions d'adapter nos modules dans des habitations urbaines ou même dans des bâtiments d'élevage afin de dépolluer ces différents sites.

Concernant, la dépollution des bâtiments d'élevage par exemple, les solutions proposées pour limiter ces polluants ne concernent que l'extérieur des bâtiments, leur système de ventilation ou la propreté de ses allées. Il n'y a pas encore de solutions pour traiter l'air des bâtiments d'élevage, directement à l'intérieur. Il a par exemple été récemment démontré, l'intérêt des additifs ajoutés dans la litière. Par exemple, sur des élevages fortement émetteurs (35 g NH₃/animal), des complexes de microorganismes ont réduit les émissions de 27 % (Bargain, 2013). Les chercheurs pistent les gaz émis dans les poulaillers. (Réussir aviculture).

- 2 : Et pour la tour épuratrice « Air de Caux », nous allons débiter un travail en collaboration avec l'Université de Caen, afin de comprendre les mécanismes de dépollution en marquant et en suivant ces composés soufrés dans le système.

Une étude, extrêmement intéressante, et pouvant servir de modèle, réalisée en 2007/2008 à Chicago a montré que l'installation de 300 toits verts sur une surface totale de 27,87 ha en juin 2007 a permis d'éliminer de la pollution de l'air. Le résultat a montré qu'un total de 1675 kg de polluants atmosphériques ont été éliminés par 19,8 ha de toits verts en une année, l'O₃ représentant 52 % du total, le NO₂ (27 %), les PM₁₀ (14%) et le SO₂ (7 %) ; (Article 2008 : Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago).

Présentations des travaux de recherche et publications :

- Présentation du programme au Workshop international « biosurveillance végétale et fongique de la qualité de l'air » 13-14 octobre 2014, Nouveau Siècle, Lille.
- Présentation d'un PPT sur le programme au salon du végétal le 18 février 2015 à Angers, et le 21 juin 2017 à Nantes.
- Présentation d'un PPT sur le programme aux journées "Horticultures de demain: Produire autrement, Vendre autrement" le 3 mars 2015 à Romans, au 8^{ème} Club U2B le 3 juin 2015 à Paris, au colloque Florysage le 10 novembre 2015 à Caen et au salon Paysalia le 5 décembre 2017 à Lyon.
- Communication au Indoor Air, Laboratory tests of the indoor air filtration efficiency of green walls, 3-7 Juillet 2016 à Gand.
- Une publication technique est actuellement en cours d'écriture.