

# Plantes épuratrices de l'air

**Réalisé 2014**

## **Description de l'action**

### **A – Les finalités de l'action**

La planète comptera 9 milliard d'habitants en 2050, dont les 2/3 seront des urbains. La densification des villes conduit à intensifier les problèmes sanitaires et à concentrer les pollutions.

Parmi les solutions de maîtrise des pollutions, soutenues par plusieurs grands programmes de recherche à travers le monde depuis les années 90, la phytorestoration (ou phytoremédiation) est l'ensemble des technologies qui utilisent les plantes comme principal agent de traitement des pollutions et vise à restaurer les ressources essentielles que sont l'eau, les sols et l'air mais aussi la valeur sociale, économique, écologique et paysagère des sites traités.

Utiliser les végétaux pour améliorer la qualité de l'air au sein des villes mais aussi à l'intérieur des habitats offre donc de larges perspectives pour la filière. La mise à disposition de tels végétaux nécessite que soient étudiées leurs capacités d'épuration pour permettre aux professionnels de la production comme du commerce, de constituer des gammes végétales répondant aux besoins.

Différentes solutions ont été étudiées, selon deux approches, l'épuration passive par l'utilisation de l'appareil aérien (capture des polluants par la feuille essentiellement) et l'épuration active, appelée aussi biofiltration. Néanmoins, leur réelle efficacité n'a que rarement été évaluée et nécessite encore une approche systématique.

**Le présent projet a pour objectif de développer des solutions techniques, basées sur la biofiltration végétale, pour diminuer les concentrations en polluants atmosphériques (intérieurs et extérieurs).**

Elles font appel à des modules végétalisés, ensemencés en micro-organismes et ventilés, mais aussi sur des ouvrages existants (par exemple, un dispositif installé au sein d'une station d'épuration). Ce développement intègre le choix des végétaux les plus adaptés aux contraintes des installations ainsi que la caractérisation des performances épuratrices.

Pour 2014, les objectifs à atteindre étaient pour le premier axe l'agencement de modules plantés et "biotisés" et l'optimisation de leur croissance et du développement des micro-organismes. Des tests de dépollution de l'air intérieur par ces modules devaient être également engagés en collaboration avec l'Université de Lille pour évaluer l'intérêt d'une ventilation forcée dans le substrat et les associations plantes-microorganismes.

Pour le deuxième axe, le premier objectif pour 2014 était d'améliorer les plantations en éliminant les espèces mal adaptées et en les remplaçant par d'autres plus rustiques pour ces conditions particulières. Le second objectif était de mettre en place un dispositif de mesure des polluants et de commencer à les évaluer pour connaître la capacité dépolluante de ce système.

### **B – Rappel des travaux prévus, des résultats espérés et des partenariats planifiés**

RESPONSABLE(S) DE L'ACTION :

Agnès LANGLOIS  
AREXHOR IDF-HN  
22 rue de Normandie,  
76 640 Fauville en Caux,  
Tél : 02.35.95.07.07  
Fax : 02.35.96.01.79

LES PARTENAIRES :

**Astredhor**  
Fabien ROBERT  
44 rue d'Alésia  
75682 PARIS Cedex 14

Tél. : 01 53 91 45 00  
N° Siret : 414 912 725 00010

## LES AUTRES ASSOCIES A L'ACTION :

Université Lille 1,  
UMR 8522,  
59650 Villeneuve d'Ascq

E.A. 4483,  
Laboratoire des Sciences Végétales et Fongiques,  
3 rue du Professeur Laguesse,  
59006 Lille Cedex, France.

Plante & Cité  
3 rue Fleming  
49066 Angers Cedex 1

Les approches techniques testées consistent à la mise au point de dispositifs de biofiltration de l'air à travers un substrat servant de support pour le développement de végétaux et d'évaluer leur capacité phytoépurratrice.

Les études portent sur :

- le développement et l'amélioration de procédés de biofiltration mis au point en collaboration avec des partenaires privés : choix des plantes, recherche de micro-organismes adaptés
- l'étude d'impacts des systèmes étudiés en laboratoire et en conditions réelles : analyses des variations des concentrations de polluants en amont et aval des systèmes
- Type de polluants et facteurs étudiés : Température, Humidité; CO<sub>2</sub>, CO, COV (benzène, toluène, formaldéhyde), NO<sub>x</sub>, particules fines pour les projets intérieurs et composés soufrés (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>), NH<sub>3</sub> dans le cadre du projet de la station d'épuration.

Les dispositifs étudiés sont dans deux conditions distinctes : traitement de l'air intérieur par des modules végétalisés et de l'air extérieur sur le site d'une station d'épuration. Ces deux scénarii se déroulent donc dans des conditions réalistes.

### **Axe 1 : Les dispositifs de traitement de l'air intérieur :**

Les dispositifs d'air intérieur étudiés sont constitués de modules (murs) végétalisés proposés par des partenaires privés et soutenus par l'association Plant'Airpur.



## Exemple de module

Cet axe se décompose en 3 Tâches

Tâche A : Elaboration et optimisation de dispositifs de modules plantés et ensemencés en micro-organismes en collaboration avec les partenaires privés. Le laboratoire des Sciences Végétales et Fongiques, apportera à son niveau son expertise dans ce domaine.

Le choix des espèces a été effectué à partir de plantes fréquemment rencontrées dans la littérature et pour lesquelles les capacités d'épuration ont déjà fait l'objet de travaux, choix de celles qui s'adaptent (ou qui supportent le mieux) les contraintes du dispositif.

Les espèces suivies sont utilisées dans un dispositif de mur végétal filtrant dont certains paramètres nécessiteront d'être optimisés :

- taux de ventilation dans le substrat : celui-ci doit être optimisé afin de permettre de traiter un volume d'air intéressant sans pour autant dessécher le substrat ;
- volume des apports hydriques : ils doivent permettre d'avoir un substrat suffisamment humide pour garantir l'intégrité de la microflore ainsi que les apports nécessaires au développement des végétaux ;
- type d'ensemencement du substrat à l'aide de micro-organismes adaptés.

Les essais sont menés au sein de la station Arexhor Seine Manche.

➤ Phase production sous serre (Fauville en Caux) :

La première phase de l'essai « Air intérieur » a débuté avec les 5 modalités ci-dessous testées :

- Module sur support sans substrat sans plantes : M0
- Module sur support avec substrat non ensemencé avec plantes : M1, et M5
- Module sur support avec substrat non ensemencé sans plantes : M4
- Module sur support avec substrat ensemencé avec plantes : M3
- Module sur support avec substrat ensemencé sans plantes : M2

Une modalité représente 3 modules.

CONSTRUCTION MODULE	Semaine 36
RECEPTION ET PLANTATION	Semaine 42
LIVRAISON	Semaine 49
CULTURE	Sous serre sur tablette à plat le temps de l'enracinement.
SUBSTRAT	Premier tech Falienor
IRRIGATION	Aspersion 1 fois semaine en pot et après plantation, puis 1 fois par mois après livraison sur Lille.
PROTECTION PHYTOSANITAIRE	Aucune



Le but de cette phase est de tester les apports optimum, en suivant l'état sanitaire des végétaux afin d'obtenir des dispositifs opérationnels pouvant être testés lors de la phase 2 en présence de polluants.

Un suivi de paramètres physiologiques est réalisé afin de suivre l'état sanitaire des végétaux :

- La croissance, le développement,
- La qualité des plantes
- L'apparition de nécroses foliaires
- Le taux d'hygrométrie du substrat
- La quantification de la présence des micro-organismes

Tâche B : A partir de dispositifs optimisés (en nombre réduits) vis-à-vis du développement des végétaux, tests des capacités épuratrices en enceinte confinée.



Le dispositif est une chambre d'exposition de 8m<sup>3</sup> appelée le CUBE (cf. photo ci-dessus).

Ces tests réalisés à l'Université de Lille (UMR 8522), visent à évaluer les capacités des systèmes à diminuer les concentrations d'une gamme de polluants atmosphériques dans des conditions proches de celles des habitations :

- enceinte ventilée,
- éclairage naturel,
- sources de polluants réalistes : chauffage au pétrole, bâton d'encens, parquet en bois brut...

Le CUBE permet de nous rapprocher plus des conditions qui sont présentes dans un logement que les enceintes expérimentales habituellement utilisées dans ce type d'expériences.

- Les conditions expérimentales sont : 21°C±2°C, H : 60% env.
- Les polluants étudiés sont : CO, COV (benzène, toluène, formaldéhyde), NOx, particules fines pour les projets intérieurs

- En parallèle, les paramètres de confort, tels que : les concentrations en CO<sub>2</sub>, la température, l'humidité relative seront également suivis.

Le CUBE est équipé d'un ensemble analytique, qui permet de mesurer en continu les paramètres environnementaux (T, RH, CO<sub>2</sub>) et les concentrations de certains polluants (CO, SO<sub>2</sub>, NOx, COV). Les caractéristiques de ces instruments sont données ci-dessous.

La première phase de l'essai « Air intérieur » a débuté avec 5 modalités :

- Module sur support sans substrat sans plantes : M0
- Module sur support avec substrat non ensemencé avec plantes : M1, et M5
- Module sur support avec substrat non ensemencé sans plantes : M4
- Module sur support avec substrat ensemencé avec plantes : M3
- Module sur support avec substrat ensemencé sans plantes : M2

- Les variables physiologiques mesurées :

Afin d'apprécier les impacts des polluants sur les végétaux, plusieurs variables qui caractérisent différents niveaux d'organisation biologique sont suivis:

- Formation de nécroses foliaires ;
- Atteinte de la photosynthèse : mesure de la fluorescence de la chlorophylle grâce à un fluorimètre portatif (PAM WALZ) ;
- Suivi des atteintes à l'ADN grâce au test des comètes présenté ci-dessous.

A partir de dispositifs optimisés (en nombre réduits) vis à vis du développement des végétaux, sont réalisés à l'université de Lille des tests des capacités épuratrices en enceinte confinée.

Pour ne pas influencer les analyses, les modules ont été codés et livrés en décembre à l'université de Lille. Deux séries de mesures ont été préalablement réalisées par D. Cuny (Univ. Lille 2), pour être livrées ensuite fin décembre et mi-janvier à B. Hanoune (Univ Lille 1). Ont été suivis pour cette première période allant de décembre 2014 à février 2015 :

- ✓ Un jeu de module témoin sans plantes ni substrat
- ✓ Deux jeux de modules avec substrat seulement
- ✓ Trois jeux de modules avec substrat et plantes.
- ✓ Des mesures de nombres de particules sont effectuées à l'aide de deux instruments :
- ✓ Lighthouse HH3016IAQ, compteur optique de particules 6 canaux, mesurant les particules de diamètre compris entre 0.3 et 10  $\mu\text{m}$ . Ce compteur est installé à l'intérieur du CUBE.
- ✓ TSI P-Trak, compteur optique mesurant les particules de diamètre 0.02 – 1  $\mu\text{m}$ . La sonde de prélèvement de ce compteur est située dans le CUBE, mais l'appareil est situé à l'extérieur.
- ✓ Dylos, compteur optique de particules 2 canaux, situés dans le CUBE. Les mesures de ce compteur ne sont pas encore validées.

Des capteurs miniatures de polluants ont également été installés dans l'enceinte. Ce sont ou bien des capteurs non sélectifs, de type oxydes métalliques (Libelium), ou bien des capteurs plus sélectifs (Alphasense), de type infrarouge non dispersif ( $\text{CO}_2$ ), électrochimique ( $\text{NO}_2$ ), ou PID (COV). La réponse de ces capteurs n'est pas encore validée. Un capteur complémentaire pour CO (Easylog) est également installé dans l'enceinte d'exposition.

La température et l'humidité dans le CUBE sont mesurées par le compteur Lighthouse HH3016IAQ, ainsi qu'avec un capteur Easylog.

Les sources de pollution utilisées et choisies pour se rapprocher de conditions réelles sont des bâtons d'encens. (cf. photo ci-dessous)



### Protocole opératoire appliqué :

- Tous les instruments de mesure fonctionnent en continu, indépendamment de la présence

des modules dans l'enceinte. Seul le compteur de particules TSI P-Trak n'est mis en route

qu'avant les expositions des modules, du fait de son autonomie limitée à 8 heures de fonctionnement.

- La ventilation de l'enceinte est coupée, pour assurer un taux de ventilation minimal, et une accumulation maximale des polluants dans l'enceinte, de manière à mieux mettre en évidence les effets de la présence des modules.

- Un jeu de module est installé dans l'enceinte, et soumis plusieurs fois aux polluants émis par un bâton d'encens. Dans la mesure du possible, on attend que les niveaux de polluants mesurés reviennent aux valeurs avant allumage du bâton d'encens avant de procéder à l'exposition suivante. Chaque bâton d'encens brûle pendant

environ ½ heure. Chaque jeu de module est exposé au minimum trois fois à un bâton d'encens



- Le test des comètes (protocole adapté de Gichner *et al.*, 2001) est une technique utilisant comme biomarqueur la fragmentation de l'ADN. Il s'agit d'un test qui permet de mettre en évidence d'une manière précoce la survenue de dégâts au niveau de l'ADN. Il s'agit là d'un biomarqueur d'effet.

Le test des comètes mesure le niveau de fragmentation de l'ADN de cellules individualisées. Il se base sur la migration différentielle des fragments d'ADN en fonction de leur taille sous l'effet d'un champ électrophorétique. C'est ainsi que l'on observe *in fine* des figures en forme de comètes, dont la queue est constituée d'une traînée de fragments d'ADN cassé, plus courts, qui ont migré le plus loin, et la tête par les fragments d'ADN les plus intacts (c'est le reste du noyau), qui migrent peu.

Le déroulement de l'ADN qui précède l'électrophorèse se fait en conditions alcalines (pH 13), ce qui permet de détecter les cassures simples et double brins et les sites alcali-labiles.

Les différentes étapes du protocole sont détaillées dans la figure ci-après.(cf. figure).

Un dispositif relie le microscope à l'ordinateur, et permet de voir sur l'écran la zone observée. Le logiciel Comet Assay IV (Perspective Instrument Ltd) calcule la valeur de l'Olive Tail Moment (O.T.M.) de chaque noyau observé.

Plus l'O.T.M. est élevé, plus l'ADN est endommagé. 30 noyaux sont observés sur chaque lame.

Les expositions prévues seront d'une semaine par dispositif étudié.

Ce test a été développé dans les méthodes de biosurveillance de la qualité de l'air à l'intérieur des locaux et a déjà été appliqué dans des écoles, des bureaux administratifs et des exploitations agricoles.

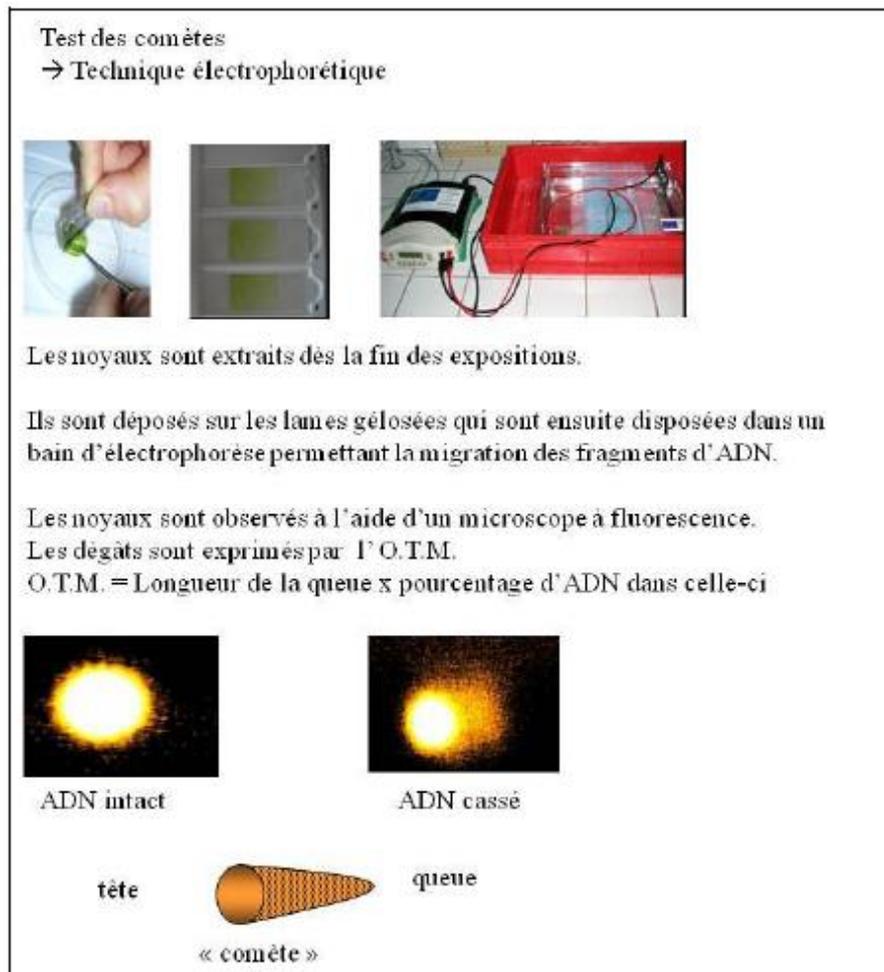


Figure : protocole général du test des comètes.

### Tâche C : Feedback et dimensionnement :

Durant l'exposition des végétaux, un suivi des paramètres physiologiques est réalisé afin de savoir si ceux-ci supportent ces nouvelles contraintes. Selon les résultats, des modifications seront apportées au dispositif initial (ensemencement du substrat, espèces différentes...). *In-fine*, le dispositif sera dimensionné en fonction de ces résultats dans une perspective d'utilisation dans des espaces plus importants. Des essais « grandeur nature » dans des conditions réelles d'utilisation pourront être envisagés.

### **Axe 2 : Les dispositifs de traitement de l'air extérieur**

Un dispositif étant d'ores et déjà existant, le phasage pour cette partie du projet est différent.

### Tâche D : Matériel technique /dispositif expérimental

Ce travail ayant été réalisé, il n'apparaît pas dans le diagramme de Gantt.

L'essai mis en place par Arexhor Seine Manche depuis 2012 sur la commune de Fauville en Caux au niveau de la station d'épuration utilise un support innovant de par le support vertical choisi pour la phytorestauration. Ce dernier, développé par la société SOGETI, en lien avec la société DFA (Degrémont France Assainissement), est composé de trous d'un diamètre de 30 à 40mm dans lesquels les taxons sont plantés.

Ce dispositif pourrait intéresser d'autres collectivités mais il est nécessaire pour cela d'avoir des données plus précises.

Caractéristique de la tour étudiée :

\*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 œuvre : 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 : Objectifs recherchés selon DFA :

-Végétaux intégrés (racines) dans le média filtrant

-Eviter le tassement

-Favoriser le passage d'air

-Rétention/drainage de l'eau

-Laisser un temps d'enracinement avant exploitation

-Nombre de plants/maillage des perforations :

Caractéristique de la tour

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

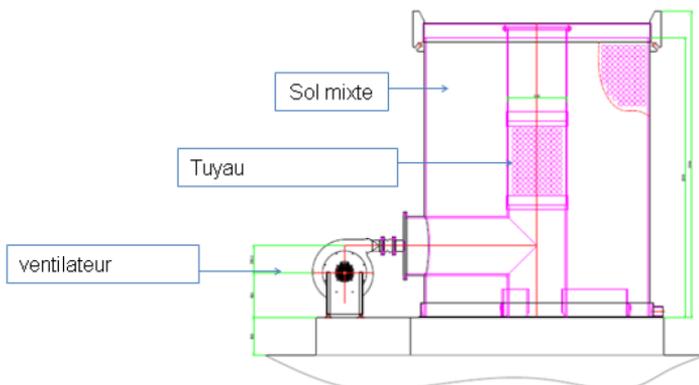


Schéma du dispositif

Tâche E : Choix des taxons

La gamme de végétaux sélectionnée pour répondre au cahier des charges a été choisie en collaboration avec Plante & Cité. Cet essai doit permettre de sélectionner les végétaux qui s'adaptent le mieux à la phytorestauration et aux parois verticales.

Ce travail ayant été réalisé, il n'apparaît pas dans le diagramme de Gantt.

- Il y a 1629 plants en vertical et 4 m<sup>2</sup> à couvrir sur le dessus de l'ouvrage (70 plants/m<sup>2</sup> 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
<b>Plantes à fleurs, y compris graminées</b>			voir aussi Lumen et Plantagenet					
Dianthus	superbus	Soleil	Lepage	1 à 5% max				
Erica	tetralix	Soleil	Lepage	10-15%				
Iris	pseudacorus	Soleil	Lepage	5%	5%	30	5%	75
Juncus	effusus 'Spiralis'	Soleil	Lepage	1 à 3%				
Mentha	aquatica	Soleil	Lepage	1 à 3%				
Caltha	palustris	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%				
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%	5%	30	4%	60
Symphytum	officinale	Mi-expo à soleil	Lepage	1 à 3%				
Luzula	sylvatica	Mi-ombre	Lepage	10-20%	20%	120	10%	150
Galium	odoratum	Ombre	Lepage	1 à 3% max	3%	18		
<b>Fougères</b>				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	dilata	Semi exposition	Yves Dupont		5%	30	5%	75
Athyrium	filix-femina	Soleil	Lepage; Yves Dupont				10%	150

## Tâche F : Suivi du développement des plantes

Essai de réimplantation sur les parties du dispositif où les plants ont le plus souffert des contraintes. Choix des espèces en partenariat avec Plante & Cité :

Paramètres étudiés :

- Croissance et développement des plantes ; concurrence visuelle
- Sensibilité aux conditions de développement racinaires particulières
- Résistance aux contraintes de l'installation
- Mesure de l'évolution pH, analyses d'eau et de substrat



Photo de la tour à vocation phytoépuration de la station d'épuration de Fauville-en-Caux

Tâche F : Evaluation des capacités épuratrices du système :

Cette phase consiste, en amont et en aval du dispositif, à réaliser des mesures des concentrations en polluants. Une attention particulière sera portée sur les composés soufrés car ils sont à l'origine des odeurs, nuisance particulièrement présente au niveau des stations d'épuration.

Les composés soufrés seront: H<sub>2</sub>S et SO<sub>2</sub>. Un suivi des concentrations en NH<sub>3</sub> sera également réalisé. Les mesures seront réalisées grâce à des tubes passifs, les expositions seront d'une semaine, réalisées en été et hiver.

## C – travaux réalisés, résultats obtenus et partenariats effectifs

### Implantation des essais

La première phase de l'essai « Air intérieur » a débuté en juin-juillet 2014 (Construction des modules puis livraison par Plant'Airpur en septembre dans les serres de Fauville en Caux). Mise en production et végétalisation ensuite pendant 2 mois dans les serres de Fauville puis ces derniers ont été livrés à l'Université de Lille (59) pour les tests de dépollution mi-décembre.

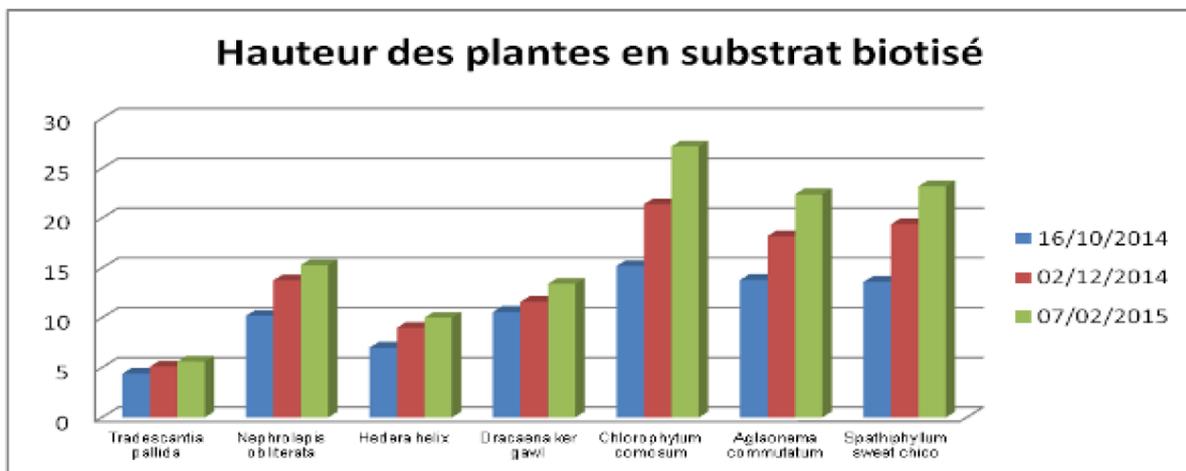
Concernant l'essai « Air extérieur », un suivi des plantes a été réalisé, et des premières analyses de terre et sur la station d'épuration de Fauville en Caux (76) ont débuté fin d'année 2014. Il était initialement prévu de mettre des capteurs pour composés soufrés : H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>. et NH<sub>3</sub> en amont et aval du système d'aération de la station afin de mesurer la capacité épuratrice du système. Cependant l'air de la station est fortement pulsé dans un système de canalisation pour arriver à la tour (débit de 100m<sup>3</sup>/h). C'est à cet endroit que les premières sondes doivent être accrochées afin de relever les concentrations en polluants. Un système d'accroche indéfectible doit être imaginé pour ne pas que les capteurs soient aspirés vers le ventilateur, ce qui l'endommagerait.

### Dispositif « air intérieur » : résultats

#### I.1. Développement des végétaux par rapport au système

Globalement, toutes les espèces (*Tradescantia pallida*, *Nephrolepis obliterata*, *Hedera helix*, *Dracaena ker gawl*, *Chlorophytum comosum*, *Aglaonema commutatum*, *Spathiphyllum sweet chico* et *Crassula portulacea*) se sont bien comportées et aucune n'a semblé souffrir des contraintes de l'installation :

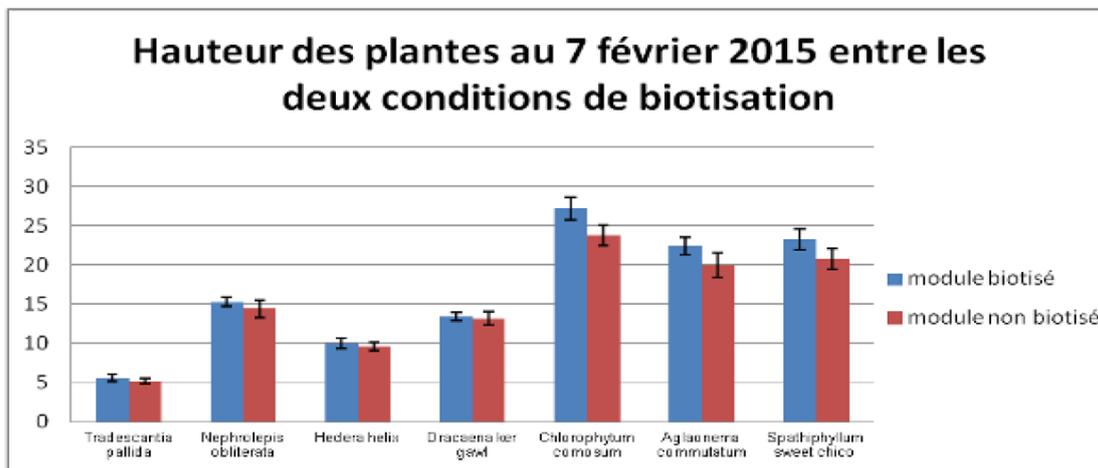
Néanmoins *Chlorophytum comosum*, *Aglaonema commutatum*, et *Spathiphyllum sweet chico* se sont montrées très poussantes comme le montre le graphique ci-dessous, et le positionnement de ces espèces, pour la deuxième série de tests fait courant 2015 a été revu afin d'éviter qu'elles concurrencent le développement des autres plantes voisines.



La biotisation semble n'avoir eu d'effet que sur le développement des 3 espèces les plus poussantes soit *Chlorophytum comosum*, *Aglaonema commutatum*, *Spathiphyllum sweet chico* comme le montre ce graphique ci-dessous sur la hauteur des plantes.

Les notations de développement n'ont pas été faites sur les *Crassula* car nous avons un mix de différentes espèces et pas seulement des *Crassula portulacea*.

Esthétiquement, toutes les espèces ont été jugées satisfaisantes et se sont bien adaptées au système. Pour la seconde série, seul le *Chlorophytum* sera changé par un autre *Chlorophytum* plus compact.



**I.2. 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)

Il a été noté quelques nécroses foliaires sur *Aglaonema commutatum*, mais celles-ci ne semblent pas liées aux polluants.

Les mesures de la fluorescence sont en cours de traitements, néanmoins les premières estimations ne semblent pas indiquer de variation importante de la fluorescence de la chlorophylle. Les résultats définitifs ainsi que ceux concernant l'intégrité de l'ADN seront disponibles prochainement afin de répondre à cette question.

### I.3 Suivi des concentrations de polluants (CO, O3, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, COV dont BTEX, particules)

Les mesures ayant commencé tardivement, toutes les mesures de suivi des concentrations de polluants n'ont pas fini d'être analysées. Cependant, des premières tendances semblent confirmer que pour le monoxyde de Carbone, c'est bien avec le module enrichi en microorganismes et végétalisé que le taux de CO diminue le plus rapidement dans le temps.

Pour l'instant, seuls les résultats obtenus avec l'analyseur online de CO ont été analysés et sont présentés ici. La Figure 1 présente une courbe typique de l'évolution de CO pendant l'exposition.

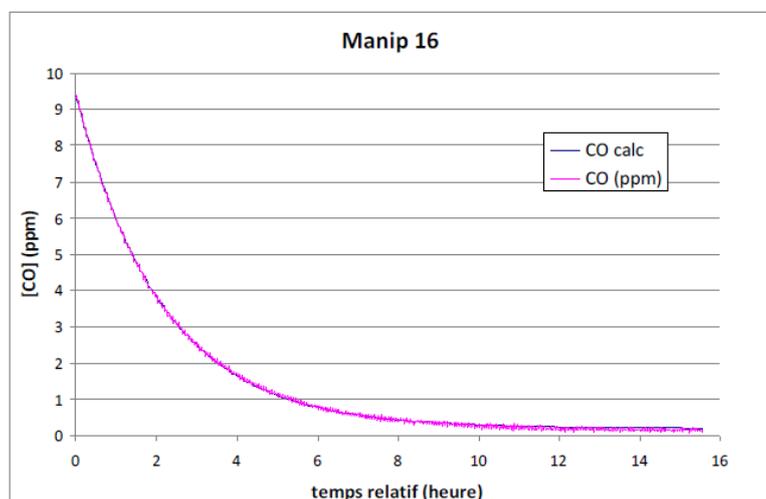


Figure 1: décroissance de CO lors de l'expérience n° 16 (module 4 - substrat seul)

Quand l'encens s'est complètement consumé, CO décroît de manière exponentielle. L'évolution de la concentration a été analysée par régression linéaire selon la formule :

$CO(t) = A \exp(-t/X)+B$ , avec A un facteur préexponentiel qui correspond à la concentration maximale de CO, X le temps caractéristique de la décroissance, et B la concentration mesurée finale, qui n'a pas été fixée à 0 du fait d'une dérive (déjà observée auparavant) du 0 de l'analyseur.

Les temps de décroissance sont montrés sur la Figure 2. L'incertitude affichée est l'écart-type des résultats individuels de chaque exposition.

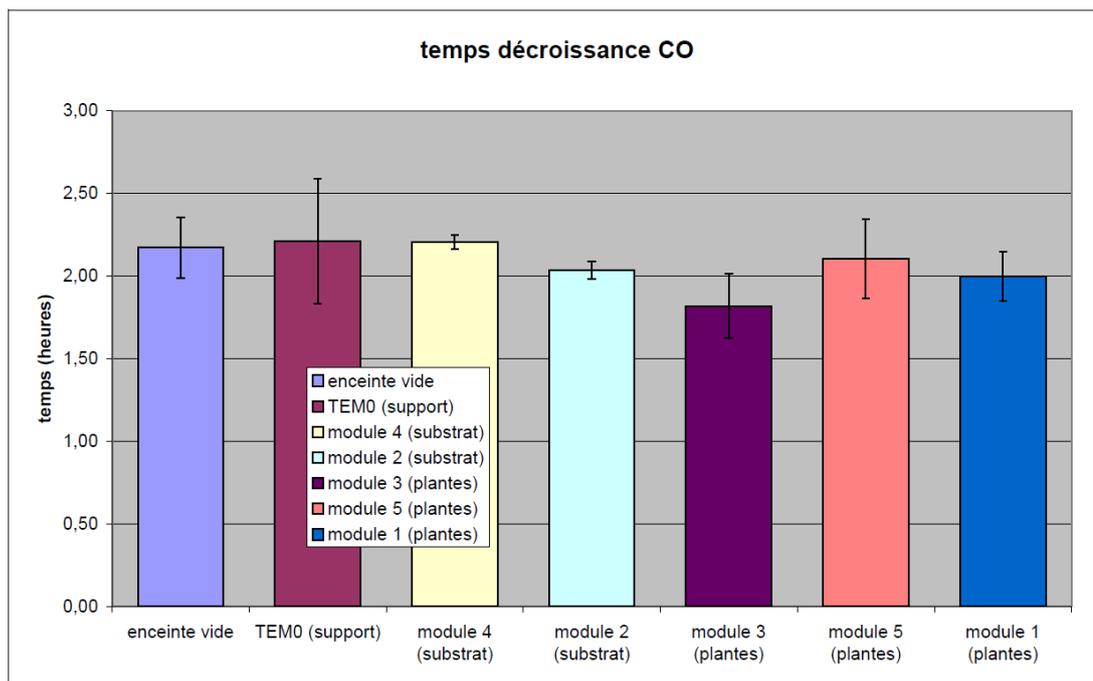


Figure 2: temps de décroissance de CO

Ce temps caractéristique de décroissance représente en même temps les échanges d'air entre l'intérieur du CUBE et le laboratoire, les pertes par prélèvements pour les analyseurs, la réactivité (supposée nulle) de CO vis-à-vis des parois et des autres espèces présentes dans l'air, et les performances épuratoires du système étudié. Comme les trois premiers paramètres peuvent être raisonnablement considérés comme des constantes, toute différence observée dans le temps de décroissance traduit l'effet du système exposé. Il semble donc, sous réserve d'une analyse statistique à venir, que les modules 2 (substrat seul) et 3 (avec plantes) aient un effet positif de dépollution de l'air.

#### I.4. Suivi des microorganismes

Les racines de toutes les espèces de plantes ont été, via le fournisseur de terreau, PremierTech Falienor, envoyées pour analyse afin de connaître l'évolution des 2 agents de biotisation incorporés dans le substrat avant l'exposition aux polluants. Les résultats sont en cours.

### Dispositif « air extérieur » : résultats

#### II.1. Analyse de l'eau d'arrosage et analyse de sol et microorganismes

L'analyse d'eau indique un pH plutôt basique (7,2) une conductivité élevée, et un taux de bicarbonates de chlorure, d'azote ammoniacal et de sodium plutôt élevé également.

L'analyse de sol montre que le pH est basique, mais aussi que le taux de matière organique est plutôt très élevé ainsi que le % en carbone, cependant le taux de biomasse microbienne est faible. Il est de 1,4% du carbone organique sachant que la norme se situe entre 2 et 4%.

Un carottage par le dessus de la tour a été réalisé afin de savoir si ce taux est différent plus au centre de la tour. 4 échantillons ont été prélevés à [~0-25cm], [~25-50cm], [~50-75cm] et [~75-100cm]. Les résultats indiquent que le pH est stable entre les différentes strates (variation de 8,2 à 7,6). Le taux de matière organique est très élevé dans les 3 premières phases (de 7,6% jusqu'à 10,3% !), cependant dans la dernière strate [~75-100cm], ce taux chute à 6,2 ce qui est un taux correct mais bien moins important qu'en surface. On note le même phénomène pour la biomasse microbienne qui se maintient autour d'1% jusqu'à une profondeur de 75 cm et chute à 0,5% du carbone organique pour la strate la plus profonde. Ce taux faible 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. D'autres carottages seront effectués en fin de printemps 2015 quand la végétalisation aura repris, ainsi qu'un carottage dans la partie basse de la tour.

Une analyse microbiologique est prévue au printemps 2015 afin de connaître les espèces de champignons, et bactéries présentes qui se sont donc adaptées notamment à la fréquence des polluants soufrés.

## II.2 Analyse chimique des végétaux

Une première série d'analyse chimique sur végétaux a été réalisée sur 6 végétaux (2 Iris, Géranium, Geum, Luzule et graminée) dont un (Geum) a été prélevé à deux endroits sur la tour (haut de la tour et bas de la tour). Seuls les plants assez développés en début d'hiver ont été sélectionnés.

Ces résultats de 6 éléments majeurs (Fig 1 ci-dessous), 3 oligoéléments (Fig 2 ci-dessous) nous donnent une première base de composition de ces plantes après 3 années d'exposition aux polluants soufrés notamment.

Ces résultats seront comparés en 2015, avec d'autres prélèvements en cours de saison afin de voir si des variations notamment sur le soufre et l'azote sont observés. D'autres espèces seront également ajoutées pour analyses. De plus des analyses sur plants non exposés seront réalisées afin de connaître si des variations de compositions chimiques existent.

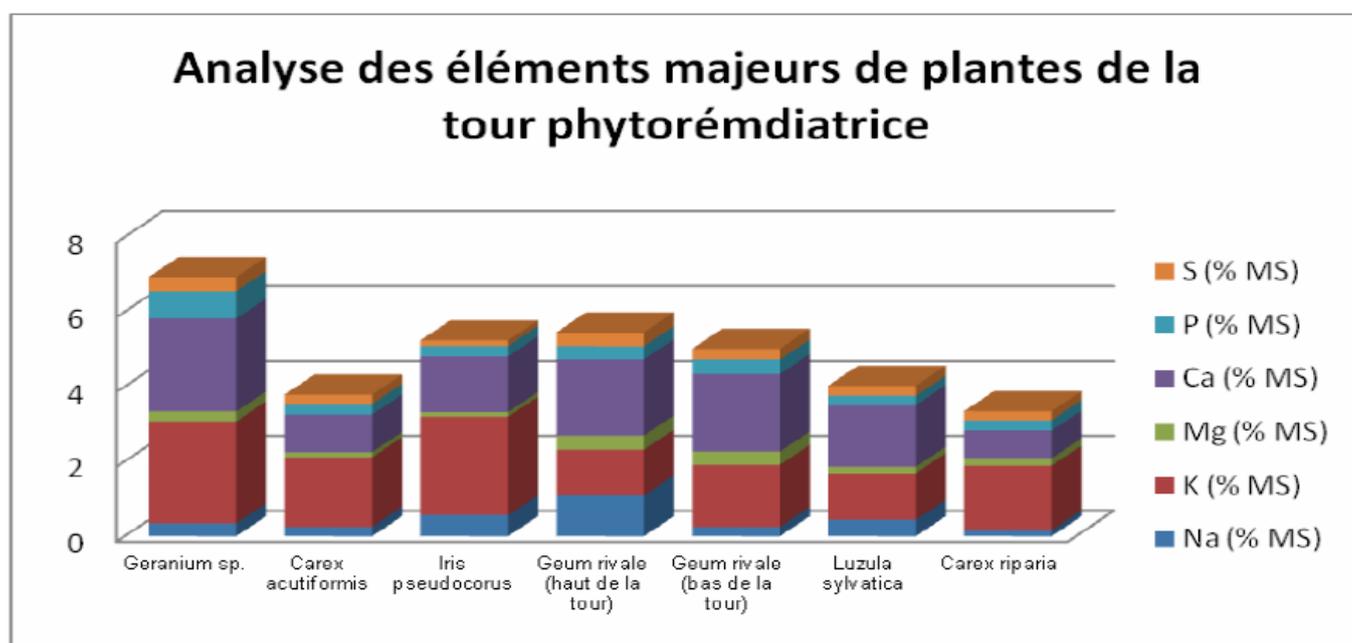


Figure 1 : Eléments majeurs en % de MS des plantes prélevées en décembre 2014 sur la tour phytoremediatrice

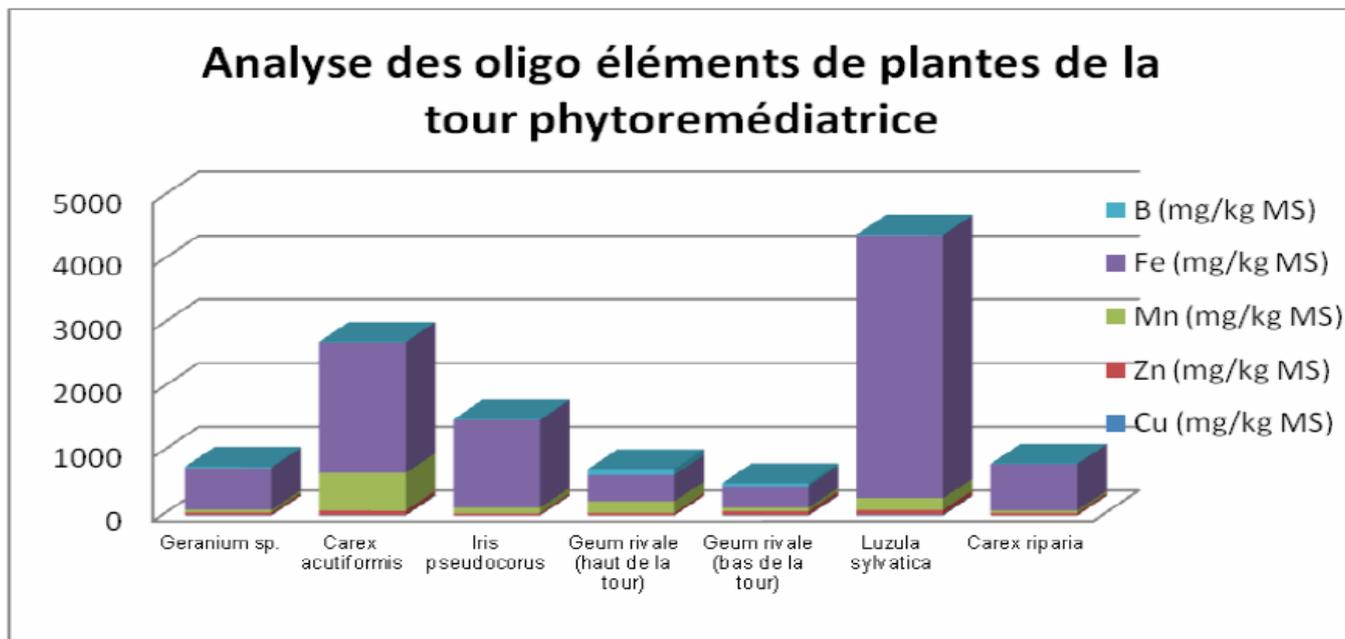


Figure 2 : Oligo éléments en mg/Kg de MS des plantes prélevées en décembre 2014 sur la tour phytoremediatrice

### II.3. Evaluation des capacités épuratrices du système

En ce qui concerne l'analyse des capacités épuratrices du système, une rencontre avec l'équipe NOSE de Suez Environnement, spécialisée dans la problématique odeur, a eu lieu le 17 décembre 2014. De nouvelles mesures ont été étudiées :

- Mesures « Point zéro » : Les mesures « point zéro » permettent de faire un état des lieux à un instant donné. Ces mesures recouvrent généralement l'ensemble des polluants qui peuvent générer des odeurs au regard d'une activité donnée, en entrée et en sortie du système de traitement, afin d'en mesurer les performances. S'y ajoutent des relevés de paramètres de fonctionnement du système. Cette approche est particulièrement pertinente dans le cadre de modifications futures de conditions de fonctionnement entièrement maîtrisables. Dans le cadre des analyses de la tour Air de Caux, dont le cycle biologique varie au fil des saisons et des conditions climatiques, une mesure de « point zéro » n'est pas apparue la plus pertinente.

- Mesures olfactométriques : les mesures olfactométriques sont les seules mesures mettant en œuvre le nez humain dans la caractérisation d'une odeur. Quel que soit le composé odorant, le nez humain reste à ce jour le plus sensible des détecteurs et son utilisation pour la mesure de la concentration d'odeur est encadrée par la norme européenne EN13725.

Cette approche humaine est apparue indispensable en complément de mesures par capteurs électrochimiques. Pour la mettre en œuvre de manière satisfaisante, un technicien du CIRSEE se rendra sur la station de Fauville en Caux pour effectuer les prélèvements dans le cadre précis de la norme européenne. Il disposera d'un équipement spécifique qui permet d'extraire un échantillon en le préservant de toute contamination odorante extérieure. L'utilisation de cet équipement en présence d'un opérateur pourra servir de formation pour un prêt ultérieur. L'air sera prélevé dans des sacs TEDLAR ou équivalent, envoyés directement sur site par le laboratoire d'analyse. Ce laboratoire de Suez Environnement convoquera un jury de nez dans les 30 heures maximum après prélèvement pour réaliser la mesure olfactométrique selon la norme EN13725.



## - Mesures en temps réel

Les mesures porteront sur les composés qui sont le plus émis par le prétraitement des stations et qui participent le plus au ressenti olfactif de la station, à savoir les composés soufrés. L'équipe NOSE a sélectionné des micro-capteurs particulièrement bien adaptés à la mesure de très faibles concentrations de polluant dans l'ambiance. Déjà installés sur les stations de Cannes Aquaviva, Ciudad Juarez au Mexique, Louis Fargue à Bordeaux, et sur trois stations proches de New York, ils assurent une mesure en continu des émissions en composés soufrés diffuses, génératrices de nuisances olfactives.

Ont été sélectionnés des micro-capteurs pour H<sub>2</sub>S/composés soufrés mesurant des concentrations sur la plage suivante :

- de 30 ppb à 20 ppm pour une mesure en amont de la tour,
- de 10 ppb à 2 ppm pour mesure en sortie.

Ces micro-capteurs sont intégrés dans un boîtier de protection qui est équipé d'une batterie leur permettant une autonomie d'environ 3 semaines.

Nous avons choisi un boîtier de grande taille qui peut accueillir jusqu'à 3 capteurs si des mesures complémentaires d'autres polluants sont décidées dans le futur.



Micro-captureur autonome pour la mesure des composés soufrés et azotés

Ces analyses vont débuter en avril 2015 et permettront de conclure sur les capacités épuratrices du système.

## **D – Les livrables et diffusions**

Plusieurs valorisations ont été réalisées au-delà des présentations faites lors des journées portes ouvertes de la station Arexhor Seine Manche et du compte rendu disponible sur la base "Expérimentation" de l'Institut :

- 1) Un poster a été formulé pour réaliser différentes présentations à différentes occasions.
- 2) Présentation à la manifestation "Génie Végétale, Génie écologique" organisée par Val'hor le 13 décembre à l'Espace Pierre Cardin à Paris : réalisation d'une fiche de présentation (Annexe 1). Cette manifestation vise à mettre en valeur les savoir-faire d'excellence et l'expertise de la filière paysage et susciter le dialogue entre donneurs d'ordre, prescripteurs et professionnels.
- 3) Une présentation a été réalisée à la manifestation "Les Respirations" du 26 novembre 2014, et a permis au Syndicat d'eau potable et d'assainissement de Fauville-Ouest en cœur de Caux, gestionnaire de la tour végétale, de recevoir un prix, un Oxygen Award (Annexe 2).

Au niveau de la station, les travaux ont été mis en valeur dans la publication Horti Bil.

## **E – Evaluation et suivi de l'action élémentaire**

### **L'action a été développée conformément aux objectifs fixés.**

Les travaux ont permis d'avoir des premiers résultats encourageants quant aux techniques qui seront à développer pour les professionnels. Toutefois, un transfert n'est pas encore possible tant que le projet pluriannuel n'est pas terminé.

Tableau de bord des indicateurs de résultats :

Type d'indicateur	Stade	Indicateurs produits	Période de mise en œuvre
Indicateurs de définition des besoins	Prévisionnel	<b>Compte rendu de Commission technique</b>	11 juillet et 2 octobre 2013
Indicateurs d'élaboration	Prévisionnel	<b>Compte rendu de présentation au Conseil stratégique de l'innovation</b>	6 novembre 2013
Indicateurs d'évaluation des programmes	Prévisionnel	<b>Compte-rendu du Cost national</b>	4 décembre 2013
Indicateurs de suivi en développement	Réalisation	<b>Conventions avec les partenaires</b>	11 juillet 2014
Indicateurs d'efficacité globale du dispositif	Post réalisation	<b>Comptes rendus du Comité de suivi</b>	2 unités de bassin tous les ans. Unité nationale 1 fois tous les 3 ans

## **F – Commentaires sur le projet**

Suites à donner et perspectives

Le projet étant sur 3 ans de développement, les travaux seront de fait poursuivis pour atteindre pleinement les résultats escomptés.

Autres, notamment des explications :

Si évolution des objectifs

Si différentiel entre résultats espérés et obtenus

Si évolution des modalités de pilotage, des partenaires, du calendrier, etc...

Pas de différentiel, les travaux ont été finalisés dans les objectifs qui avaient été définis.

Pour le volet "air intérieur", l'ensemble des travaux prévus ont été réalisés sans problème technique et ont permis des résultats pleinement exploitables. Reste à exploiter les résultats de dépollution qui ont été fournis tardivement par le partenaire recherche.

Pour le volet "air extérieur" les analyses de gaz n'ont pas pu être réalisées du fait que les capteurs n'ont pas pu être installés. En effet, les conditions physiques pour accueillir les sondes sont très contraignantes et nécessite des dispositifs particuliers qui n'avaient pas été imaginés au moment du montage du projet en 2013 et qui n'ont été identifiées que lors du développement du projet. En conséquence, les investissements des sondes ont été reportés à 2015, et a engendré une moindre réalisation pour 2014.



## Epuration des airs viciés par les plantes

La phytorestauration (ou phytoremédiation) est l'ensemble des technologies qui utilisent les plantes comme principal agent de traitement des pollutions et vise à restaurer les ressources essentielles que sont l'eau, les sols et l'air mais aussi la valeur sociale, économique, écologique et paysagère des sites traités.

Un partenariat entre Astredhor Seine-Manche, Plante et Cité et Degrémont France Assainissement a permis de créer un prototype de traitement de l'air vicié pour la nouvelle station d'épuration de Fauville Ouest en Cœur de Caux. La tour « Air de Caux » est un biofiltre végétal qui permet d'aboutir à une véritable désodorisation dite « verticale ».

Depuis leur apparition sur la planète, les plantes ont contribué à faire de la Terre une planète vivable pour les animaux, dépendants de l'oxygène pour leur survie.

Moins connue et moins étudiée, est la capacité des plantes à agir sur leur environnement autrement que par la captation de gaz carbonique et le relargage d'oxygène dans l'atmosphère. En effet, depuis quelques décennies, les plantes sont étudiées et commencent à être utilisées pour leur capacité à capter des polluants dans leur environnement soit directement soit du fait de leur association avec des micro-organismes. Des applications pour filtrer des eaux usées (lagunage, piscine naturelles, etc.) ou dépolluer les sols (de sites industriels contaminés) sont par exemple aujourd'hui mises en œuvre. L'utilisation des plantes à des fins de dépollution de l'air est pour sa part plus récente. Il est ainsi nécessaire que des travaux soient menés pour définir les réelles possibilités des plantes vis-à-vis des nombreux polluants atmosphériques. En effet, si différents ouvrages ont été réalisés en vue de limiter l'exposition des personnes à ces polluants sur différents sites (stations d'épuration, parkings, gares, etc.), rares ont été les réelles évaluations de leur efficacité.

Astredhor Seine-Manche a engagé depuis 3 ans des travaux pour étudier la possibilité d'épurer avec des plantes l'air vicié issu de stations d'épuration des effluents de villes. Un partenariat entre le syndicat d'eau potable et d'assainissement de Fauville Ouest en Cœur de Caux, Astredhor Seine-Manche, Plante & Cité et Degrémont France Assainissement (DFA) a ainsi été constitué pour créer un prototype de biofiltre vertical, végétalisé, de traitement de l'air vicié pour la nouvelle station d'épuration de Fauville Ouest en Cœur de Caux. Conçu par DFA et Plante & Cité, ce prototype est composé de trous d'un diamètre de 30 à 40 mm dans lesquels les plantes sont installées (Photo 1).



Photo 1 : La tour « Air de Caux » • Source : Astredhor Seine-Manche

Ainsi, le passage de l'air vicié se fait par convection forcée à travers la tour qui contient le terreau dans lequel sont plantés les végétaux. Les racines des plantes permettent le développement de micro-organismes dans le substrat en leur fournissant des éléments carbonés (sucres essentiellement) indispensables à leur survie. Le dispositif constitue véritablement un « biofiltre », le substrat ayant un rôle fixateur des polluants et les micro-organismes qui entourent les racines, un rôle de dégradation de ces polluants. Le rôle des plantes peut apparaître ici assez secondaire

# Une station qui purifie l'eau... et l'air !

Pour lutter contre les nuisances olfactives, la nouvelle station d'épuration de Fauville-en-Caux, en Seine-Maritime, s'est équipée d'un prototype de filtration innovant : une tour désodorisante qui collecte l'air vicié pour le traiter dans un filtre biologique végétalisé. Un procédé simple, esthétique et fonctionnel.

**D**epuis fin 2012, la commune de Fauville-en-Caux, près du Havre, a ouvert les vannes d'une station d'épuration pour le moins atypique. Entièrement reconstruite pour être mise en conformité avec la Directive Européenne sur les Eaux Résiduaires Urbaines et augmenter sa capacité à 5 900 équivalents habitants, cet ouvrage a été doté d'un procédé qui génère le moins de nuisances olfactives possibles. "Pour éliminer les odeurs en sortie de station, les unités de désodorisation conventionnelles sont généralement équipées de systèmes de filtration à charbon actif, mais nous avons voulu intégrer un procédé biologique de filtration verticale, autrement dit une tour biofiltrante, afin d'être remarqué et de sensibiliser les administrés et les professionnels de l'intérêt d'un tel outil de traitement" indique Jean-Marc Vasse, maire de Fauville-en-Caux, Président du Syndicat d'eau Fauville Ouest en Cœur de Caux, et par ailleurs Délégué général de Val'Hor. Développée pour la première fois en France, cette technologie démontre, outre la phytoépuration traditionnelle dite à boues actives, que les services épuratoires rendus par les végétaux méritent encore d'être exploités.



La Tour Air de Caux™ a été récompensée d'un Oxygen Award, décerné aux institutions qui ont œuvré de manière concrète à améliorer la qualité de l'air.

## Un process innovant

Après une série de traitements classiques des eaux usées, le process, conçu par Degrémont France Assainissement et Plante&Cité, consiste à collecter l'air vicié en sortie de station, réputé pour contenir des composants soufrés hautement odorants, pour le traiter sur un filtre biologique végétalisé. Concrètement, à l'aide d'un système de ventilation, l'air vicié issu de la fermentation anaérobie des résidus organiques, normalement traité par du charbon actif, em-

prunte un réseau de canalisation souterrain avant d'aboutir à la base et au centre d'une tour cylindrique remplie d'un mélange organo-minéral, dont la hauteur avoisine les 3,5 m pour une circonférence moyenne de 1,8 m. L'air à traiter traverse d'abord un substrat composé à quantités égales d'un squelette minéral de pouzzolane, d'un mélange de terre limono-sableuse et de matières organiques. Cette combinaison organo-minérale assure un premier abattement des émanations soufrées et azotées (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, autres résidus mercaptans...). Grâce à la ventilation et à la porosité du mélange, l'air traverse ensuite tout le substrat, jusqu'à atteindre les bords du cylindre, là où se concentre la rhizosphère composée d'une sélection de 1 909 plantes, essentiellement vivaces. Ces dernières sont directement intégrées dans la paroi métallique de la tour, dont les orifices circulaires et réguliers de 30 à 40 mm de diamètre, au contact direct

du substrat, permettent la mise en terre de mottes et de micro-mottes. Les parties rhizomiques sont donc incluses à l'intérieur de la tour, assurant ainsi une séquestration complémentaire des gaz, tandis que les parties aériennes habillent la colonne d'un épais manteau vert. A ce jour, près de la moitié des plantes a disparu pour des raisons de pH incompatibles et de concurrences interspécifiques. Et au vu du développement important de certaines plantes, il a été jugé inutile de replanter chaque orifice. Un système d'arrosage goutte-à-goutte a été déposé au sommet et au milieu de la colonne de substrat.

## Une station verte

Malgré l'absence de données scientifiques dans la mise en œuvre d'un tel projet, la sélection végétale a été soigneusement étudiée. Pour Agnès Langlois, directrice administrative, scientifique et technique

## Fiche technique

- **Maitre d'ouvrage** : Ville de Fauville-en-Caux, Syndicat d'eau et d'assainissement de Fauville Ouest en Cœur de Caux
- **Maitres d'œuvre** : Degrémont France Assainissement, Plante&Cité, Cabinet Folius (paysagiste)
- **Coût total Pôle Eau** (unité de potabilisation, station d'épuration et interconnexion avec les réservoirs d'eau) : 10 M€ TTC (Tour Air de Caux™ : 15 000 €)