

2013 -2015 – Domaine Eau et Aménagements urbains - Action 54 « Systèmes d'épuration dans les DOMCOM »

Quelles plantes pour les filtres plantés de végétaux dans les DOM ?

Rapport final



Test Batch, SEV Mayotte, octobre 2014

Rémi Lombard Latune (Irstea)
Pascal Molle (Irstea)

Décembre 2015

En partenariat avec :



- **AUTEURS**

Rémi LOMBARD LATUNE, Ingénieur d'études (Irstea), remi.lombard-latune@irstea.fr

Pascal MOLLE, Directeur de recherche (Irstea), pascal.molle@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

Onema : Lauriane Vasseur, Chargée de mission sur l'eau et les aménagements urbains, lauriane.vasseur@onema.fr

Irstea : Pascal MOLLE, Directeur de recherche (Irstea), pascal.molle@irstea.fr

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

César DELNATTE, Botaniste (DEAL MARTINIQUE), cesar.delnatte@developpment-durable.gouv.fr

Nicolas FINA, Ingénieur chargé de missions R&D (Cotram), nicolas.fina@caiali.fr

Sophie GONZALEZ, Conservatrice de l'Herbier de Guyane (IRD), sophie.gonzalez@ird.fr

Valérie GUIOT, Chargée de mission (CBNM), vguiot@cbnm.org

Gerald LACOMBE, Ingénieur Assainissement (Etiage Guyane), g.lacombe@etiageguyane.fr

Olivier LAPORTE-DAUBE, Ingénieur assainissement (Etiage Guyane), o.laporte@etiageguyane.fr

Samuel PEYRAT, Conducteur de travaux et responsable de la pépinière, sevmayotte@live.fr

Jean-Jacques REYMOND, Directeur (Oasure), direction@oasure.fr

Droits d'usage : accès public
Niveau géographique : national
Couverture géographique : DOM
Niveau de lecture : Expert

- **RESUME**

Les plantes sont indispensables au fonctionnement des filtres plantés de végétaux (FPV). *Phragmites australis* classiquement utilisé en métropole est considéré comme invasif dans les DOM.

Une liste de végétaux potentiellement intéressants pour la filière a été produite à partir d'une étude bibliographique et de discussions avec un réseau d'experts.

Avant d'être évalués sur des stations en taille réelle, les végétaux sont soumis à des tests-batch qui ont pour but d'évaluer leur sensibilité aux principaux stress induits par les filtres plantés à écoulement vertical (FPVv) : les stress hydrique et anoxique. Le suivi des végétaux repose sur un protocole d'observations visuelles.

Une première campagne de test-batch a été menée au siège de l'entreprise Oasure à Saint-Just Saint-Rambert (Loire). Ce test, mené sur des plants de *Phragmites australis* de 3, 6, 12 et 24 mois, avait pour but d'étudier l'impact de l'âge des végétaux sur leur sensibilité aux stress. Les plants de 24 mois, et dans une moindre mesure ceux de 3 mois semblent plus résistants au stress anoxique que ceux de 6 et 12 mois. Cela pourrait s'expliquer pour les plants de 24 mois par une plus grande maturité, et pour ceux de 3 mois par une plus grande proportion de tissus embryonnaire. Il ne semble pas y avoir de tendance pour le stress hydrique.

Deux campagnes de tests batch se sont déroulées à Mayotte et en Martinique. Vingt plantes tropicales ont été testées. Quatre se sont bien adaptées aux stress et sont prometteuses : *Clynogyne commorensis*, *Canna indica*, *Costus spiralis* et *Heliconia psittacorum*. Les cypéracées (*Cyperus alopecuroides*, *Cyperus alternifolius*, *Cyperus involucreatus* et *Cyperus papyrus*) bien qu'ayant plus souffert lors des tests pourraient également être une piste intéressante.

Par la suite, le comportement de cinq végétaux parmi les plus prometteurs a été suivi en taille réelle, en Guyane. Outre des enseignements sur les plantes étudiées, l'étude a permis de définir un protocole de suivi simplifié, exportable dans les autres DOM. *Heliconia psittacorum* et *Canna indica* ont confirmés leur statut de plante de substitution à *Phragmites australis*. Les résultats d'un suivi plus léger à Mayotte montrent que *Clynogyne commorensis* est la plante endémique qui se prête le mieux à l'utilisation sur les filtres.

Les trois plantes retenues à l'issue de cette étude font partie de l'ordre des Zingibérales. Elles sont généralement utilisées comme plantes ornementales et se développent assez lentement. Au démarrage de la station, elles peuvent nécessiter un accompagnement pour prendre le dessus sur les mauvaises herbes, surtout en cas de très forte charge (réhabilitation). En contrepartie la fréquence de faucardage sera faible (supérieure à un an). Il pourrait être intéressant d'avoir des plantes avec des caractéristiques différentes (densité, vitesse de développement) à proposer comme alternative. Des suivis sont mis en place sur des filtres plantés de cypéracées et en fonction des retours d'expériences, certaines espèces pourraient être ajoutées aux plantes retenues.

- **MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)**

Assainissement, Petites et moyennes collectivités, Traitement des eaux usées domestiques, Filtre Planté de Végétaux (FPV), Eaux usées brutes, DOM, Tropiques, plantes.

- **ABSTRACT**

Plants are essential in constructed wetland (CW). Due to its invasive behavior, *Phragmites australis*, which is traditionally used, cannot be involved in French Overseas Territories (FOT).

A list of potentially interesting plants has been produced from literature review and discussions with a network of experts in tropical botany. Based on this list, 21 plants were selected for laboratory and full scales experiments.

In the first place, before full scale experiments, plants were submit to batch tests in order to evaluate their tolerance to water and anoxic stress. Batch test protocol is based on a complementary approach comprising visuals observations.

A first experiment was conducted at Oasure headquarters in Saint-Just Saint-Rambert (Loire). For this test 3, 6, 12 and 24 months *Phragmites australis* were studied. The objective was evaluating the age impact on their sensitivity to water and anoxic stress. 24 and 3 months plants appeared to be more tolerant to anoxic stress than the others. For 24 months plants it could be explained by their maturity and for 3 months plants by bigger proportion of young tissues. There was no clear trend for water stress.

Two set of experiments took place in Mayotte and Martinique. Amongst the 20 plants studied, 4 are well adapted and promising : *Clynogyne commorensis*, *Canna indica*, *Heliconia psittacorum* and *Costus spiralis*. The Cyperus family (*Cyperus alopecuroides*, *Cyperus alternifolius*, *Cyperus involucratus* and *Cyperus papyrus*) even if they suffer during the test are also interesting.

Then, a full scale study with 5 plants amongst the most promising was implmented in French Guyana. It brings information on plants ability to grow in such conditions as well as determine a simplified evaluation method which can be exported in the other FOT. *Heliconia psittacorum* and *Cana indica* has confirmed their status of good substitution plants. Results from Mayotte showed that *Clynogyne commorensis* is a suitable plant for the system.

In conclusion, informations on plants are synthesized in an "herbier". It would be improved with results coming from on-site observations of the different FOT.

- **KEY WORDS**

Sanitation, Municipal Wastewater Treatment, Constructed wetland, Vertical flow, Small communities, French Overseas Department, Tropical, plants.

- **SYNTHÈSE POUR L'ACTION OPÉRATIONNELLE**

Les macrophytes, par leur action mécanique, sont indispensables au fonctionnement des filtres plantés de végétaux (FPV). *Phragmites australis* est utilisé en France métropolitaine comme à l'étranger. Cependant, cette espèce n'est pas présente naturellement dans la zone tropicale. En raison d'un risque invasif marqué, le choix a été fait de chercher des plantes endémiques tropicales en vue de sa substitution dans l'adaptation de la filière des FPV au contexte tropical (Action DOM ONEMA/IRSTEA).

Une étude spécifique a été mise en place, impliquant des acteurs des différents DOM: Oasure et SEV (pépiniéristes spécialisés dans les végétaux à destination des FPV), Cotram Assainissement (Constructeur), Etiage Guyane (Bureau d'Etude), des conservatoires nationaux botaniques (de Mascarin antenne de Mayotte, et de Martinique), agents botanistes de la DEAL...

L'étude « quelles plantes pour les FPV dans la zone tropicale ? » est composée de trois phases :

- Etude bibliographique

Une première étape bibliographique a permis de recenser dans la littérature, les végétaux utilisés en zone tropicale sur les FPV. Le système français de filtre à écoulement vertical, sans prétraitement, est peu répandu hors du territoire national, c'est pourquoi peu de références utilisables ont été trouvées, la grande majorité étant des plantes aquatiques peu adaptées aux filtres verticaux alimentés en eaux usées brutes.

Le choix d'élargir les recherches sur la base de critères bien définis, par des échanges avec des spécialistes des plantes tropicales (Conservatoires Botaniques, botanistes locaux), a permis d'étoffer la liste des végétaux :

- *Phragmites mauritanus*
- *Canna indica*
- *Heliconia Caribea*
- *Heliconia psitacorum*
- *Heliconia rostrata*
- *Alipinia purpurata*
- *Cyperus papyrus L.*
- *Cyperus alopecuroides*
- *Cyperus alternifolius*
- *Schoenoplectus littoralis*
- *Echinochloa polystachia*
- *Echinochloa guadaloupensis*
- *Brachiaria brizantha*
- *Brachiaria decumbens*
- *Eleocharis interstincta*
- *Costus speciosus*
- *Cladium jamaicense*
- *Fuirena umbellata*
- *Clinogyne comorensis*
- *Curculigo angustifolia*

- Les tests batch

La seconde étape de l'étude a consisté en la mise en place de « test batch » afin de tester à petite échelle la sensibilité des plantes retenues aux conditions des filtres plantés, afin de ne garder que les plus intéressantes pour les tests en taille réelle.

Les plantes ont été divisées en quatre lots : témoins, stress anoxique, stress hydrique périodique et stress hydrique permanent. L'évolution de plusieurs critères physiologiques (chlorose, flétrissement, floraison, rejets) a été régulièrement observée, permettant d'étudier la sensibilité des végétaux aux différents stress et de les comparer.

- Les tests en taille réelle

Un premier test en taille réelle a été mis en place en Guyane. Le protocole avait un double objectif :

- valider de manière définitive l'utilisation de cinq plantes quant à leur développement dans les conditions réelles de la filière, ainsi que du point de vue de la compétition avec les adventices.
- définir un protocole simplifié qui pourra par la suite être mis en place dans l'ensemble des DOM pour le suivi des végétaux.

Principaux résultats :

- Impact de l'âge des plantes sur la résistance aux stress

Une première campagne de test-batch a été menée en septembre-octobre 2014 au siège de l'entreprise Oasure à Saint-Just Saint-Rambert (Loire). Menée sur des plants de *Phragmites australis* de 3, 6, 12 et 24 mois, elle avait pour but d'étudier l'impact de l'âge des végétaux sur leur sensibilité aux stress. Les plants de 24 mois et dans une moindre mesure, ceux de 3 mois, semblent plus résistants au stress anoxique que ceux de 6 et 12 mois. Cela peut s'expliquer pour les premiers par une plus grande maturité des parties racinaires responsables de l'émission des rejets. Pour les plants de 3 mois, une hypothèse serait la plus grande proportion de tissus embryonnaires.

Il ne semble pas y avoir de tendance pour le stress hydrique.

La généralisation de ces résultats à d'autres espèces et sous des climats différents reste à étudier.

- Tests batch sur les plantes tropicales

Deux campagnes de tests batch se sont déroulées à Mayotte et en Martinique. Vingt plantes ont été étudiées. Une partie des plantes identifiée lors de l'étude bibliographique n'a pas pu être trouvée : ni dans le commerce, ni dans le milieu naturel malgré l'appui des conservatoires botaniques locaux. Les performances des plantes sont évaluées par la dégradation des critères physiologiques observés.

Neuf plantes sont écartées à la suite des tests. *Curculingo angustifolia* et *Alpinia purpurata* n'étaient pas adaptées aux conditions des filtres (même les plantes des lots témoins sont mortes). *Eleocharis interstincta*, *Cyperus sp.* et *Schoenoplectus littoralis* sont des plantes tiges : frêles et sans feuilles leur action mécanique est trop limitée. *Costus speciosus* a présenté des performances très intéressantes lors des tests mais forme du bois très rapidement ce qui complique l'exploitation. *Hyptis capitata* a souffert tout au long des tests et est écartée. *Fuirena umbellata* est une plante aquatique dont les faibles performances lors du stress hydrique ont été rédhibitoires. *Brachiaria decumbens* a montré des performances moyennes face aux 2 stress.

Les cypéracées (*Cyperus alopecuroides*, *Cyperus alternifolius*, *Cyperus involucratus* et *Cyperus papyrus*) se sont généralement comportées au moins aussi bien que *Thysanolaena maxima* utilisée

dans les DOM jusqu'à présent. Cette dernière se développe bien sur les filtres, mais c'est son port en touffe qui laisse des portions de filtres à nue limitant le potentiel épuratoire du système. Les cypéracées sont une piste de substitution intéressante. Leurs développements en conditions réelles permettront de faire un choix entre elles.

Heliconia psittacorum, *Canna indica*, *Clinogyne commorensis* et *Costus spiralis* se sont remarquablement bien adaptées aux filtres et aux différentes conditions proposées. Toutes font parties de l'ordre des Zingibérales et sont des plantes ornementales. *Clinogyne commorensis* est endémique de Mayotte, et ne pourra pas être utilisée en dehors de l'océan indien. Les autres sont très communes dans la zone tropicale.

Ce sont les plantes à tester en priorité lors de la prochaine phase de l'étude : le suivi in situ des végétaux sur des stations en conditions réelles.

- Suivis *in situ*

L'étude mise en place en Guyane a permis d'évaluer cinq plantes en conditions réelles. *Phragmites australis* a été étudié au titre de référence. Le travail réalisé sur son cycle végétatif a permis de définir une base pour les discussions à venir concernant les fréquences de faucardage. *Echinochloa polystachia* s'est développé très facilement sur les filtres mais son mode de multiplication par marcottage entraîne la formation d'un tapis très dense. Enfin, sa propension à sortir des filtres l'a définitivement écartée de la sélection. *Costus spiralis* n'a pas réussi à se développer sur les filtres face à la concurrence des adventices, et a donc été écartée précocement. *Cana glauca* l'a remplacé et a donné satisfaction, tout comme *Heliconia psittacorum* qui est désormais incontournable.

Le protocole de suivi simplifié retenu se base sur la mise en place de quadras, à l'intérieur desquels la hauteur et la densité des végétaux sont relevés. L'observation régulière du stade de développement des végétaux permet, en la couplant avec les données des quadras, de définir le cycle végétatif de la plante sur lequel il faudra s'appuyer pour déterminer une fréquence de faucardage. Les aspects de concurrences sont abordés via l'apparition et la proportion d'occupation du filtre par les adventices. Enfin l'examen des parties racinaires de plants adultes ainsi que la disposition des rejets permet de prévoir si la plante aura un développement homogène ou en touffe.

En parallèle, un petit suivi in situ a été mis en place à Mayotte. L'absence d'entretien de la station par l'exploitant ne permettait pas de récupérer des données susceptibles d'être utilisées comme références. Cette étude a tout de même montrée que *Clinogyne comorensis* mérite d'être retenue dans la sélection finale.

Conclusion

Trois plantes de l'ordre des Zingibérales sont retenues. Elles se caractérisent par un développement assez lent qui laisse entrevoir qu'un travail d'accompagnement sera nécessaire lors de la phase de démarrage des filtres. Par la suite, l'entretien devrait être plus limité et se cantonner au faucardage dont la fréquence sera supérieure à un an.

Les Cypéracées sont une piste de substitution intéressante quand il n'est pas possible d'utiliser de Zingibérales. Leur développement est plus rapide, et leur densité est plus importante. Elles pourraient être particulièrement adaptées aux lits de séchage plantés.

- **SOMMAIRE**

Introduction	10
1. Etude bibliographique : rôle des végétaux et pistes de substitution	12
1.1. Les propriétés attendues des plantes	12
1.2. Les végétaux potentiellement intéressants	13
2. Les tests batch	15
2.1. Matériel et méthodes	15
2.1.1. Protocole	15
2.1.1.1. Obtention des végétaux.....	15
2.1.1.2. Croissance.....	15
2.1.1.3. Période d'adaptation.....	15
2.1.1.4. Mise en place des tests	16
2.1.2. Suivi	16
2.1.2.1. Observations.....	16
2.1.2.2. Résultats.....	18
2.2. Contrôle de l'effet de l'âge des végétaux sur la réponse au stress.....	19
2.2.1. Les plantes.....	19
2.2.2. Résultats	19
2.2.3. Conclusions	22
2.3. Test batch en milieu tropical.....	23
2.3.1. Mayotte	23
2.3.1.1. Les plantes	23
2.3.1.2. Résultats.....	25
2.3.1.3. Conclusions	27
2.3.2. Martinique	29
2.3.2.1. Les plantes	29
2.3.2.2. Résultats.....	30
2.3.2.3. Conclusions	35
2.4. Conclusion générale sur les tests batch.....	35
3. Les essais en taille réelle	37
3.1. Suivi in situ en Guyane.....	37
3.1.1. Organisation de l'expérimentation sur bois d'Opale 2 :	38
3.1.1.1. Caractéristiques de la station et aménagements pour les suivis :	38
3.1.1.2. Les plantes testées :	40
3.1.2. Protocole de suivi	41
3.1.2.1. Suivi du développement des végétaux :	42
3.1.2.2. Compétition sur les filtres.....	42
3.1.2.3. Adaptation d'une partie du suivi	43
3.1.3. Résultats	43
3.1.3.1. Suivi du développement des végétaux	43
3.1.3.2. Cycles végétatifs et faucardage.....	48
3.1.3.3. Parties racinaires et développement horizontal	50
3.1.3.4. Compétition interspécifique pour l'occupation des filtres	53
3.1.3.5. Conclusion	54
3.1.4. Protocole transférable	55
3.2. Suivi <i>in situ</i> à Mayotte	56

4. Conclusion de l'étude sur les plantes	59
5. Glossaire	62
6. Sigles & Abréviations	63
7. Bibliographie	64
8. Table des illustrations	66
9. Table des Tableaux	67
10. Annexes :	68
Annexe 1 : Principes de la fluorescence chlorophyllienne.....	68
• La photosynthèse.....	68
• JIP-test.....	69
Annexe 2 : protocole et fiche de suivi taille réelle simplifié	72
11. Remerciements	75

- **QUELLES PLANTES POUR LES FILTRES PLANTES DE VEGETAUX DANS LES DOM ?**

Introduction

Les plantes jouent un rôle fondamental dans les filtres plantés de macrophytes (Brix, 1997). Dans un filtre à écoulement vertical comme le système français, c'est principalement leur action mécanique qui favorise l'infiltration de l'eau et l'aération du massif filtrant qui est recherchée. Elles jouent également un rôle dans la diversité et la densité de la flore bactérienne du filtre (exsudats racinaire, oxygène), mais ces aspects-là ne sont pas étudiés dans le présent rapport.

Phragmites australis est la plante classiquement utilisée en France métropolitaine et plus généralement dans toute la zone tempérée. Considérant son potentiel invasif en climat tropical, il a été décidé de ne pas introduire *Phragmites australis* dans les régions où elle n'est pas indigène.

Son statut dans les Départements d'Outre-Mer (DOM) est synthétisé dans le tableau suivant :

	<i>Phragmites australis</i>
Guyane	Autochtone (S.Gonzalez ¹). Présent sur les stations de Bois d'Opale. Pas souhaitée à l'intérieur du Parc Naturel de Guyane.
Martinique	Rare, écartée car considérée comme invasive.
Guadeloupe	Présente, écartée car considérée comme invasive
La Réunion	Absente
Mayotte	Absente

Tableau 1: statut de *Phragmites australis* dans les DOM

Trouver une plante de substitution à *Phragmites australis*, adaptée au contexte tropical, est une problématique transversale à l'ensemble des DOM.

La démarche adoptée dans cette étude est composée de trois étapes successives, présentées dans la Figure 1.

- étude bibliographique : une recherche dans la littérature associée à des échanges avec des organismes ressources locaux a permis de recenser les plantes potentiellement adaptées à la filière. En parallèle une liste de critères auxquels les végétaux doivent répondre a été dressée. Ceci a conduit à un tri dans les différentes propositions. Une première liste d'une vingtaine de végétaux présentant un intérêt pour la filière a été dressée.
- tests batch : l'ampleur de la liste de végétaux retenus a entraîné la mise en place de pré-tests pour éliminer les plantes les moins adaptées, avant de mettre en place les végétaux restants sur des stations en taille réelle. L'idée est d'évaluer la capacité de chacune des plantes à s'adapter aux conditions spécifiques des filtres pour ne retenir que les plus prometteuses.
- tests in situ : les végétaux les plus intéressants seront testés en conditions réelles sur des filtres en fonctionnement. Leur développement sera suivi à travers plusieurs paramètres : croissance, développement homogène, densité, agressivité...

¹ Sophie Gonzalez est la Conservatrice de l'Herbier de Guyane. Elle a confirmé par échange de mail le 5 Avril 2012 le statut autochtone de *Phragmites australis* en Guyane.

Quelles plantes pour les FPR dans les DOM ?

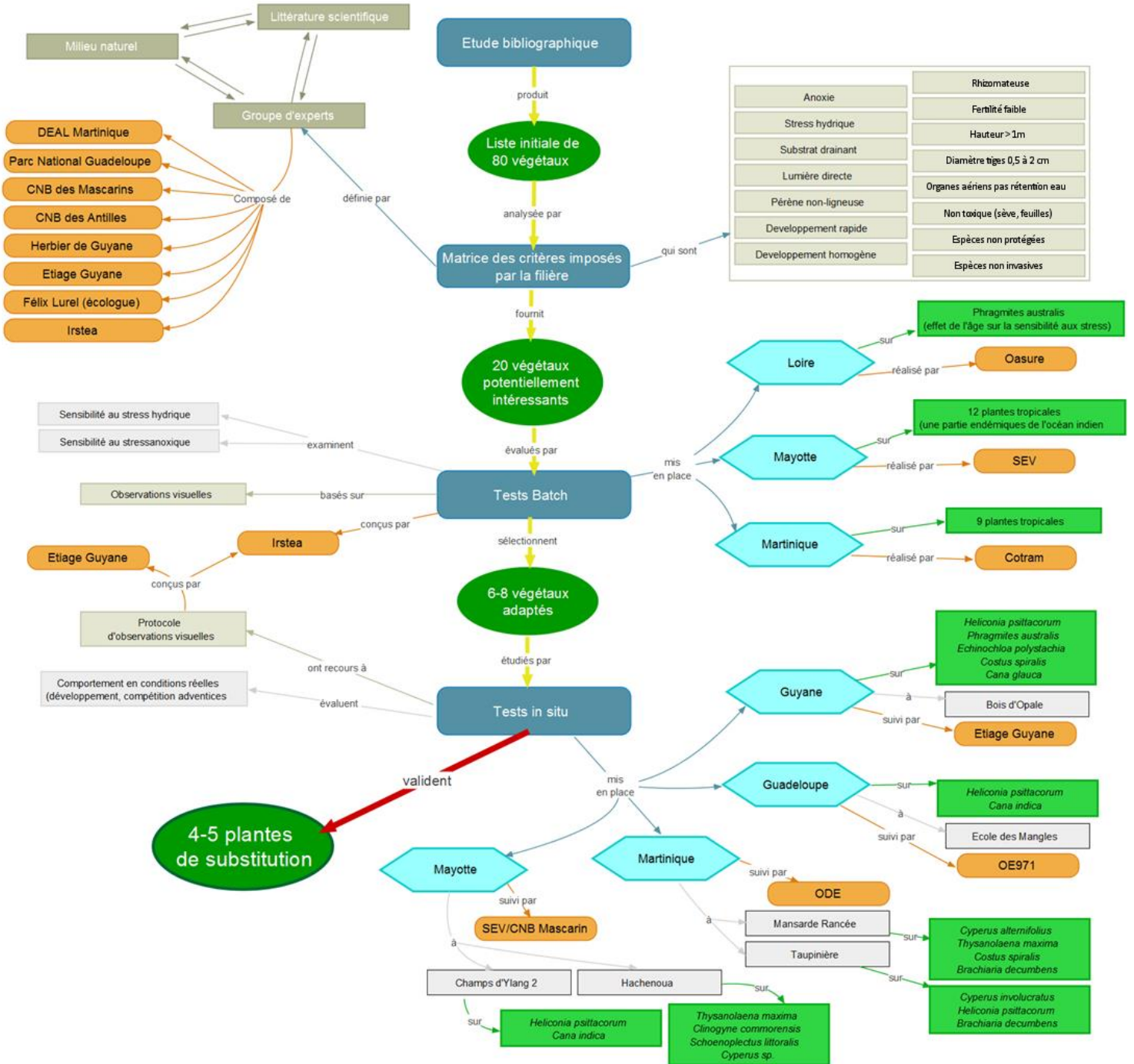


Figure 1 : Carte conceptuelle de la démarche mise en place pour trouver des végétaux de substitution à *Phragmites australis*. En raison de retard sur le terrain, les tests in situ ont démarrés avec beaucoup de retard et tous les résultats prévus ne pourront pas être présentés.

L'objectif final de l'étude est d'obtenir une liste de végétaux endémiques de la zone tropicale, aptes à être utilisés dans des filtres plantés.

1. Etude bibliographique : rôle des végétaux et pistes de substitution

Pour trouver une plante de substitution à *Phragmites australis*, nous avons dans un premier temps cherché dans la littérature les végétaux utilisés ailleurs dans le monde (Eme, 2012).

Au niveau international, les filtres horizontaux sont les plus répandus. La filière n'est pas contraignante du point de vue de la disponibilité en eau pour les plantes et de nombreux végétaux aquatiques sont utilisés et adaptables.

Le système français à écoulement vertical est encore peu répandu. Il se caractérise par l'alimentation en eaux usées brutes des filtres, engendrant la formation d'une couche de boues colmatante en surface. Par ailleurs, en milieu tropical, le système comporte deux lits alimentés en alternance de manière à maintenir une période de repos nécessaire à l'activité bactérienne dans le massif. Ces caractéristiques engendrent des contraintes supplémentaires pour le choix des végétaux : une action mécanique indispensable pour maintenir une continuité hydraulique dans le système, ainsi que la capacité à se développer en absence d'eau 3,5 jours par semaine. *Phragmites australis* donnant entièrement satisfaction et étant très répandu dans le monde, très peu d'autres espèces végétales ont été utilisées.



Figure 2 : Illustration du rôle mécanique des plantes. Photo Hans Brix.

Au cours des différentes missions dans les DOM, des contacts ont été noués avec des organismes ressources sur place (Conservatoires Botaniques Nationaux, Botanistes...). Ce réseau d'expert a contribué à proposer des espèces locales susceptibles de répondre aux besoins de la filière.

Le nombre de végétaux recensés lors de cette première phase (une centaine), a nécessité de décrire précisément les différentes propriétés recherchées de manière à faire un premier tri dans les propositions.

1.1. Les propriétés attendues des plantes

Les plantes doivent s'adapter à des contraintes induites par le milieu et avoir des caractéristiques morphologiques garantissant l'action mécanique recherchée. Enfin des critères réglementaires peuvent empêcher l'utilisation des végétaux localement.

Le milieu des filtres plantés à écoulement vertical impose :

- Le développement dans un substrat sablo-graveleux non saturé et bien drainant.

- La résistance à des apports conséquents de matières organiques peu évoluées, avec possible installation transitoire d'un milieu anoxique.
- La résistance au stress hydrique : alternance marquée des phases d'alimentations (> 400 mm/j pendant 3,5 jours), et de repos (3,5 jours sans apports en climat tropical).
- La faculté à pousser en plein soleil (absence d'ombre).

Par ailleurs, les végétaux doivent impérativement présenter les caractéristiques intrinsèques suivantes :

- Plantes pérennes non ligneuses.
- Développement rapide et homogène pour coloniser rapidement la surface du filtre et éviter un développement « en touffes » qui limiterait la surface du filtre réellement active.
- Rhizomateux, avec idéalement d'importants rhizomes dans les 50 premiers cm du filtre.
- Ne pas être considérés comme invasifs, avec une faible production de graines (pour limiter la dissémination).
- Hauteur supérieure à 60 cm et diamètre des tiges compris entre 0,5 et 2 cm de manière à garantir à la fois un effet mécanique important et un faucardage manuel aisé.
- Les feuilles, bractées ou autres organes aériens ne doivent pas retenir l'eau de pluie, afin d'éviter tout risque sanitaire lié aux moustiques notamment.
- La plante ne doit pas présenter de risque d'irritation, ou intoxication lors du faucardage.

Les discussions avec les représentants de la DEAL de Martinique ont permis de faire ressortir des contraintes supplémentaires liées au statut des végétaux et aux risques qu'ils peuvent présenter. Ces risques sont modulés par le contexte écologique de la zone (plantes cousines endémiques, cultures) et doivent faire l'objet d'une évaluation locale systématique.

- Les plantes ne doivent pas présenter de risques invasifs.
- Les plantes ne doivent pas être des espèces protégées.

1.2. Les végétaux potentiellement intéressants

Les végétaux identifiés comme potentiellement intéressants ont été confrontés aux critères de sélection mentionnés dans le tableau 2 et validés ou non, pour chacun de ces critères. Lorsqu'il n'a pas été possible de trouver l'information, un point d'interrogation est figuré.

Deux profils de végétaux sont obtenus :

- En rouge, les plantes qui ne satisfont pas à tous les critères et sont donc rejetées. Il n'y a pas eu de priorisation des critères. Il est possible si au final aucune plante ne donnait satisfaction, d'élargir en pondérant les critères de manière à faire ressortir d'autres végétaux.
- En bleu, vingt et une plantes potentiellement intéressantes, pour lesquelles tous les critères ne sont pas renseignés et qui ne présentent pas à notre connaissance de contre-indication.

Des études complémentaires sont donc nécessaires pour déterminer, pour chacun de ces végétaux potentiellement intéressants, leur capacité à s'adapter aux contraintes liées au milieu des filtres. Initialement il était prévu de tester *in situ* les plantes les plus intéressantes. L'étude bibliographique a fait ressortir une liste de candidats plus importante qu'attendue. Il n'était alors pas possible de tester en taille réelle, en zone tropicale, les 21 végétaux. Des pré-tests (test batch) ont donc été mis en place, de manière à évaluer l'adaptation des plantes aux deux principales sources de stress induits par la filière : le stress hydrique et le stress anoxique.

	Anoxie (MO peu évoluée, en quantité importante)	Stress hydrique (alternance phases alimentation / repos)	Substrat sablo-graveleux non saturé drainant	Lumière directe	pérenne non ligneuse	Développement rapide	Développement homogène	Rhizomateuse	Fertilité faible (production de graines et dispersion)	Hauteur > 1m, diam. tiges 0,5 à 2 cm	Pas de rétention d'eau par parties aériennes	Toxicité (sève, feuilles...)	Espèce non protégée	Espèce non invasive
<i>Phragmites australis</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
<i>Phragmites mauritanus</i>	?	?	?	?	✓	?	✓	✓	?	?	✓	✓	✓	✓
<i>Canna indica</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Heliconia Caribea</i>	?	?	?	?	✓	?	?	✓	✓	✓	?	✓	✓	✓
<i>Heliconia psitacorum</i>	✓	✓	✓	✓	✓	?	?	✓	✓	✓	?	✓	✓	✓
<i>Heliconia rostrata</i>	?	?	?	?	✓	?	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Alipinia purpurata</i>	?	?	?	?	✓	?	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Cyperus papyrus L.</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Cyperus alopecuroides</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	?	✓	✓	✓	✓
<i>Cyperus alternifolius</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	?	✓	✓	✓	✓
<i>Cyperus luzulae</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	X	✓	✓	✓	✓
<i>Schoenoplectus littoralis</i>	✓	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Thysanolea maxima</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Tripsacum laxum</i>	?	?	✓	✓	✓	?	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Pennisetum purpureum</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	X	✓	✓	✓	✓	X
<i>Arundo donax</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
<i>Echinochloa polystachia</i>	?	?	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Echinochloa guadaloupensis</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	?	✓	✓	✓	✓
<i>Panicum maximum</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	X	?	✓	✓	✓	X
<i>Brachiaria brizantha</i>	?	?	?	✓	✓	✓	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Brachiaria mutica</i>	?	?	?	✓	✓	✓	?	✓	X	✓	✓	✓	✓	X
<i>Brachiaria decumbens</i>	?	?	?	✓	✓	✓	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Typha augustifolia</i>	?	X	X	✓	✓	✓	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Diffenbachia seguine</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	?	✓	✓	X	✓	✓
<i>Saccharum sp.</i>	?	✓	?	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
<i>Eleocharis mutata</i>	?	?	?	✓	✓	?	X	✓	?	X	✓	✓	✓	✓
<i>Eleocharis interstincta</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Costus speciosus</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	?	?	✓	✓	?	✓	✓
<i>Cladium jamaicense</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	?	?	?	?	?	✓	✓
<i>Fuirena umbellata</i>	?	?	?	?	✓	?	?	?	?	?	?	?	✓	✓
<i>Maranta Humilis Aubl</i>	?	?	?	✓	✓	?	X	?	?	X	?	?	✓	✓
<i>Ludwigia octovalvis</i>	?	?	?	✓	X	✓	?	✓	X	✓	✓	✓	✓	X
<i>Polygonum punctatum</i>	?	?	?	?	✓	?	?	✓	?	X	✓	✓	✓	X
<i>Polygonum densiflorum</i>	?	?	?	?	✓	?	?	✓	?	X	✓	✓	✓	X
<i>Clinogyne comorensis</i>	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	?	?	✓	✓	✓	✓
<i>Curculigo angustifolia</i>	?	?	?	?	✓	?	?	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 2 : Synthèse des propositions de plantes de substitution et passage au crible des propriétés attendues.

2. Les tests batch

Le but de ces tests était de comparer rapidement, à petite échelle, l'adaptation des végétaux aux différentes conditions environnementales rencontrées dans les filtres.

Le stress hydrique entre deux phases d'alimentation ainsi que le stress anoxique, qui peut résulter transitoirement d'une surcharge organique et/ou hydraulique pendant les phases d'alimentation, sont les principaux stress induits par le procédé.

De manière indirecte, le stress induit par le substrat des filtres (pauvre et très drainant) est également évalué.

2.1. Matériel et méthodes

La difficulté rencontrée lors de la mise en place du protocole des tests était d'obtenir des données quantitatives qui permettent, plus simplement que des données qualitatives, de suivre l'évolution des plantes et de comparer les variétés entre elles.

C'est une approche complémentaire entre des observations visuelles (données qualitatives) et le suivi de la fluorescence chlorophyllienne (donnée quantitative), qui a été retenu (voir Annexe 1). Malheureusement, malgré plusieurs adaptations dans le protocole, les données de fluorescence semblent être trop dépendantes de conditions extérieures à l'expérimentation (hétérogénéité des plants au départ, variabilité importante entre les lots, à l'intérieur des lots, voire même entre les feuilles d'un même plant) et ne sont pas exploitables.

Le travail sur la fluorescence ne sera donc pas exposé. Seul le suivi des observations visuelles sera présenté et exploité.

Trois campagnes ont été réalisées : la première en métropole dans la Loire pour caler le protocole et étudier l'impact de l'âge sur la sensibilité au stress, et les deux suivantes à Mayotte et en Martinique.

2.1.1. Protocole

2.1.1.1. Obtention des végétaux

Selon les cas, les végétaux qui avaient été identifiés lors de la première phase de l'étude ont pu être achetés en pépinière ou glanés dans le milieu naturel avec l'aide d'un botaniste (Conservatoire Botanique National locaux, ou expert DEAL) puis multipliés en pépinière.

2.1.1.2. Croissance

Lors de la mise en service d'un FPV, les végétaux sont âgés de trois mois minimum. Le même âge a été retenu pour les tests.

2.1.1.3. Période d'adaptation

L'objectif étant de tester l'adaptation au milieu des filtres, le substrat des tests est donc le même que celui utilisé dans les massifs filtrants, à savoir du gravier de granulométrie 2/4 à 2/6mm. Une phase d'adaptation au substrat est fondamentale avant de démarrer les tests à proprement parler et éviter que les perturbations liées au changement de milieu soient imputées au stress étudié. Pour chaque variété, chacune des plantes est placée avec sa motte dans un seau standard de 15L environ, circulaire de 30 cm de diamètre, percé dans sa partie inférieure et rempli de graviers 2/4 à 2/6. A la surface du gravier est placé un peu de compost, qui mimera dans une certaine mesure la couche de dépôt organique à la surface des filtres. Durant un mois, les plantes sont arrosées en fonction de leur besoin, avec un engrais de croissance, de préférence le même que celui utilisé en pépinière.

2.1.1.4. Mise en place des tests

Après un mois d'adaptation, pour chacune des vingt espèces, les plantes sont séparées en quatre lots de cinq plants.

Le premier lot est soumis à un stress anoxique : le trou dans la partie inférieure du seau est bouché et il est rempli jusqu'à 3 cm au-dessus du compost par des eaux usées brutes. En l'absence d'oxygène un milieu anoxique se développe. Il est contrôlé lors des tests par le suivi du potentiel redox dans les seaux.

Le second lot subit un stress hydrique permanent : les plantes ne sont plus arrosées et sont placées à l'abri de la pluie.

Les plants du troisième lot sont soumis à un stress hydrique périodique : durant une semaine les plants subiront un stress hydrique, avant d'être de nouveau arrosé pendant une semaine. Les périodes de stress et de repos sont alternées jusqu'à la fin des tests. L'idée du stress hydrique périodique est d'étudier à la fois la capacité de résilience des végétaux après l'arrêt du stress et de voir si une adaptation à moyen terme se produit, conférant une plus grande résistance.

Le dernier lot est le témoin. Les conditions de culture sont identiques à la phase d'adaptation.

2.1.2. Suivi

Les tests ont été conduits jusqu'à la mort des plants, généralement au bout de 2 mois. Les plantes souffrent en condition de stress. Certaines meurent au bout de quelques jours pour les plus sensibles au stress hydrique alors que d'autres survivent plusieurs semaines en condition de stress anoxique.

2.1.2.1. Observations

Les observations ont été effectuées régulièrement à raison de deux à trois fois par semaine. En parallèle, des photos des végétaux ont été prises de manière hebdomadaire.

Pour les observations différents symptômes sont attendus sur les différents organes de la plante.

- Plante dans son ensemble
 - Verse

La verse est consécutive à un déséquilibre dans les transferts hydriques de la plante. Les tissus se ramollissent et la plante n'arrive plus à maintenir son port habituel. C'est un symptôme intéressant à suivre puisque la plante ne pourra pas assurer dans cet état-là d'action mécanique.

- Chlorose

La chlorose est une décoloration de la plante qui devient vert clair du fait d'une baisse de concentration en chlorophylle. En plein champ, elle peut être due à des carences en nutriments ou comme dans notre cas, à un manque ou à un excès d'eau. C'est une des voies d'adaptation des végétaux au stress hydrique.

- Mort

On considère qu'une plante est morte lorsque l'ensemble de ses parties aériennes sont sèches (tiges y compris). Bien souvent, les parties souterraines sont encore vivantes et peuvent repartir (rejets) si les conditions s'améliorent.

- Vigueur

Une plante est considérée comme vigoureuse lorsque ses tissus sont d'un vert soutenu, qu'elle ne présente pas de flétrissement, verse ou tout autre symptôme de souffrance et que de nouvelles feuilles ou pousses apparaissent.



Figure 3 : Verse des lots en stress anoxique 3^{ème} jour. En haut les lots témoin, en bas les lots en stress anoxique. Les lots sont placés par âge de gauche à droite : 24, 12, 6 et 3 mois.

- Feuilles
 - Flétrissement

Comme pour la verse, le flétrissement des feuilles est dû à une perte de turgescence des cellules végétales. Les tissus se ramollissent, se déforment, voire deviennent cassants quand le flétrissement est poussé. Les tissus vasculaires peuvent être impactés différemment des tissus photosynthétiques : la plante peut ne pas verser et avoir des feuilles flétries ou verser avec des feuilles légèrement flétries.

- Marbrures / chlorose

Les marbrures (voir Figure 4) correspondent à la chlorose au niveau des feuilles chez certains végétaux. Le limbe se décolore alors que les nervures principales gardent leur couleur. Elles apparaissent d'abord sur les jeunes feuilles. Là encore il est intéressant de distinguer le symptôme à l'échelle des feuilles et de la plante.

- Nécrose/mort

Des taches de nécroses, voire une nécrose complète de la feuille, peuvent apparaître en réaction au stress. C'est l'abscission une forme d'adaptation au stress à travers la réduction de la surface foliaire pour limiter les pertes par évapotranspiration. Des taches de nécrose peuvent également apparaître sous l'action de ravageurs auxquels la plante est plus sensible du fait de sa faiblesse générale.



Figure 4 : Marbrures et flétrissements

- Fleurs

La floraison et la production de rejet (multiplication végétative) sont les moyens pour les plantes de se reproduire. Lorsque la floraison se fait en dehors de la période habituelle, c'est signe que la plante a reçu un stress sérieux : elle cherche à se reproduire avant de disparaître. C'est aussi signe qu'elle a encore les ressources pour le faire.

- Rejets

Les rejets sont émis par les rhizomes et la partie souterraine de la plante et produisent un nouvel individu clone de la plante mère. A l'intérieur des tissus embryonnaires le matériel génétique est remis à zéro. Cela peut permettre des modifications dans l'expression des gènes de la plante et ainsi lui conférer une plus grande adaptation à son nouvel environnement. C'est à la fois l'apparition et la croissance des jeunes pousses qui sont surveillé.

2.1.2.2. Résultats

Les observations réalisées sont synthétisées dans des tableaux de données brutes. A partir de ces tableaux, les différents symptômes observés ont été agrégés en cinq indicateurs de la santé des plantes.

Le potentiel osmotique regroupe l'ensemble des données sur le flétrissement des feuilles, le port de la plante et ses différents degrés de vigueur. Il représente la capacité de la plante à ajuster son potentiel osmotique aux variations du milieu (stress hydrique, stress anoxique) de manière à maintenir la turgescence nécessaire à la croissance cellulaire et éviter la plasmolyse.

Le potentiel photosynthétique rassemble les observations portant essentiellement sur la couleur des feuilles (chlorose, marbrures, nécrose, abscission) et reflétant, à travers la quantité de pigments photosynthétiques présents (les chlorophylles), l'activité photosynthétique de la plante.

La multiplication végétative correspond aux observations faites sur les rejets : apparition, croissance... Cet indicateur renseigne l'état des parties racinaires des végétaux qui peuvent émettre de nouvelles tiges, alors même que la tige mère est en souffrance, voire morte. Les cellules embryonnaires des nouvelles tiges leur permettent généralement de mieux s'adapter aux changements de conditions.

La multiplication sexuée rassemble les observations en lien avec la floraison. Chaque espèce a sa propre stratégie de multiplication (végétative ou sexuée), il est donc délicat de conclure sur la sensibilité d'une espèce à des conditions données à partir des seules observations sur les rejets ou la floraison.

L'indicateur ravageur correspond à la présence de nombreux ravageurs sur les végétaux. Cela n'a été observé que pour les lots en stress anoxique à Oasure.

2.2. Contrôle de l'effet de l'âge des végétaux sur la réponse au stress

Une première campagne de test-batch a été menée sur le site d'Oasure de fin août à mi-octobre 2014. Cette entreprise d'insertion implantée dans la Loire est spécialisée dans la production de plants de *Phragmites australis*, à destination des FPR.

2.2.1. Les plantes

L'objectif de ces premiers tests était d'étudier si l'âge des végétaux pouvait jouer un rôle dans l'adaptation au milieu des filtres ou conférer une plus grande résistance au stress. Des plantes (*Phragmites australis*) de 3, 6, 12 et 24 mois ont été étudiées. Après avoir passé la phase d'adaptation d'un mois, les plants ont été répartis dans une serre (voir figure 5) en quatre lots : témoins, stress anoxique, stress hydrique continu et stress hydrique périodique.

La serre est équipée d'un arrosage automatique qui a été coupé sur la moitié de la surface (à droite photo 5). C'est dans cette moitié là qu'ont été placés les lots soumis aux stress hydrique et anoxique.



Figure 5 : Serre à Oasure. Au fond à gauche les plants témoins. A droite dans les seaux blancs, les lots stress anoxique et au premier plan à droite les plants en stress hydrique continu et périodique.

2.2.2. Résultats

Les observations se sont étalées sur 45 jours du 26 août au 9 octobre 2014.

- Stress anoxique

Le suivi du potentiel redox montre que les plantes étaient soumises à une forte anoxie (moyenne 53 mV, minimum -60m V et maximum 151 mV).

Pour l'ensemble des lots en stress anoxique, les plantes peinent à maintenir le potentiel osmotique dans les cellules des tissus vasculaires, la verse des plantes est immédiate et semble définitive.

Au niveau des feuilles, on constate des différences entre les lots : les plants de 3 et 24 mois semblent mieux résister au stress que ceux de 6 et 12 mois. Pour ces derniers, les feuilles flétrissent une dizaine de jours avant celles des plants de 3 et 24 mois. Les premières feuilles meurent après 14 jours de stress dans le lot de 12 mois, 3 semaines dans celui de 6 mois. Il n'y a pas en revanche de mortalité des feuilles dans le lot de plants de 24 mois.

La dépigmentation des tissus (chlorose) est plus progressive. Dans un premier temps, la teinte des feuilles s'éclaircit, puis des marbrures traduisant une atteinte du potentiel photosynthétique se manifestent au moment où les feuilles commencent à flétrir, d'abord dans les lots de 6 et 12 mois, puis dans celui de 3 mois. Les plants de 24 mois sont plus épargnés, leurs marbrures sont moins marquées.

A partir de la troisième semaine, des parasites apparaissent sur les végétaux de 6 et 12 mois et ne se propagent aux autres lots que dans les semaines qui suivent, quand eux aussi s'affaiblissent (marbrures, morts des premiers plants).

L'apparition et la croissance des rejets suivent la logique inverse soulignant la même tendance : d'abord dans les lots de 3 et 24 mois, puis plus tardivement dans les autres lots.

Les plantes des quatre lots ont terminé les tests « en vie », bien que les plants de 3 à 12 mois soient dans un état critique. Les tiges mères sont généralement mortes et les plantes doivent leur survie à leurs rejets.

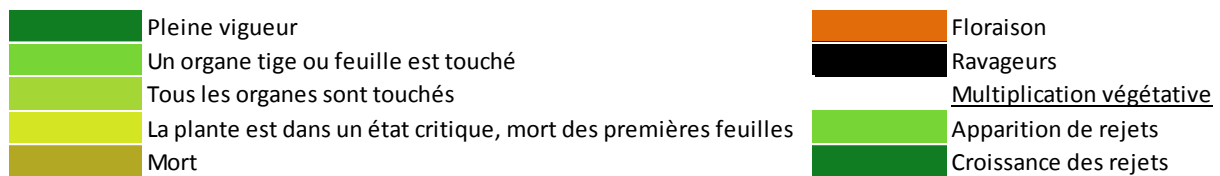


Tableau 3 : Code couleur utilisé dans les tableaux de synthèse des observations réalisés lors des tests batch. La « mort » correspond aux tissus aériens, la survie des parties racinaires n'est pas vérifiée.

Temps d'exposition au stress (j)		3	5	8	14	16	20	23	27	36	38	43	45
3 mois	Pot. osmotique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Pot. photosynthétique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Mult. végétative	[Color gradient: dark green to light green]											
	Ravageurs	[Color gradient: black to dark green]											
6 mois	Pot. osmotique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Pot. photosynthétique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Mult. végétative	[Color gradient: dark green to light green]											
	Ravageurs	[Color gradient: black to dark green]											
12 mois	Pot. osmotique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Pot. photosynthétique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Mult. végétative	[Color gradient: dark green to light green]											
	Ravageurs	[Color gradient: black to dark green]											
24 mois	Pot. osmotique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Pot. photosynthétique	[Color gradient: dark green to yellow]											
	Mult. végétative	[Color gradient: dark green to light green]											
	Ravageurs	[Color gradient: black to dark green]											

Tableau 4 : Synthèses des observations réalisées sur les lots soumis au stress anoxique.

- Stress hydrique

Paradoxalement, les plantes soumises au stress hydrique se portent très bien pendant les premiers jours, à tel point qu'elles semblent dans un meilleur état que les témoins. Ce constat a entraîné des modifications dans le programme d'arrosage des témoins.

Temps d'exposition au stress (j)		3	5	8	14	16	20	23	27	36	38	43	45
3 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											
6 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											
12 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											
24 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											

Tableau 5 : Synthèse des observations faites sur les lots soumis au stress hydrique permanent.

Il faut attendre la troisième semaine pour constater que les plantes ont du mal à maintenir le potentiel osmotique dans leurs cellules. Les feuilles flétrissent puis les plants s'affaissent de manière de plus en plus marquée entre la 4^{ème} et la 6^{ème} semaine. Les feuilles sont alors sèches et cassantes. Ensuite les premières meurent, d'abord dans les lots de 6 et 12 mois, puis dans ceux de 3 et 24 mois. Au cours des 2 dernières semaines, les plantes meurent petit à petit. Seules quelques plantes de 24 mois semblent encore en vie à la fin des tests.

Une dizaine de jours après le début des tests, les premiers symptômes d'atteinte de l'appareil photosynthétique apparaissent : des marbrures sur les feuilles, dans un premier temps peu marquées, puis qui s'intensifient au cours de la 3^{ème} semaine. Après un mois sans arrosage, les plantes sont dans un état critique : les tissus sont jaunes, le potentiel photosynthétique des plantes semble être au plus bas. Il n'y a pas de différence nette entre les lots pour cet indicateur.

Sans surprise, les plantes soumises au stress hydrique n'ont pas émis de rejets.

Temps d'exposition au stress (j)		3	5	8	14	16	20	23	27	36	38	43	45
3 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											
6 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											
12 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											
24 mois	Pot. osmotique	[Color scale from green to yellow]											
	Pot. Photosynthétique	[Color scale from green to yellow]											
	Mult. Végétative	[Color scale from green to yellow]											

Tableau 6 : Synthèse des observations faites sur les lots soumis au stress hydrique périodique. En bleu est représentée la période d'arrosage.

Les lots en stress hydrique périodique ont connu après 15 jours sans eau, une semaine d'arrosage. Le tableau 6 comme la figure 6, montrent que la période de réhydratation a eu des conséquences immédiate et très négatives à court terme sur les plantes, tant au niveau du potentiel osmotique que de l'appareil photosynthétique. Il faut attendre une bonne quinzaine de jours pour que la tendance s'inverse et que les effets bénéfiques de l'arrosage se manifestent. Au cours de la 5^{ème} semaine le flétrissement s'estompe, les tissus reprennent des couleurs et de nombreux rejets apparaissent. Ils n'auront pas l'opportunité de pousser réellement. À la fin des tests, à la 7^{ème} semaine, les plants ne sont pas morts mais sont dans un mauvais état : chlorose généralisée et flétrissement des feuilles. Il n'y a sur ces conditions-là, aucune différence notable entre les lots.



Figure 6 : Stress hydrique permanent (G) et périodique (D) à J+20.

2.2.3. Conclusion

Ces premiers tests avaient pour objectif de voir si l'âge des plantes pouvait jouer un rôle dans leur adaptation aux deux principaux stress auxquels sont soumises les plantes sur les filtres : les stress hydrique et anoxique.

Les plants de 24 mois ont terminé l'ensemble des tests en vie, et se sont plutôt bien adaptés au stress anoxique puisqu'ils ont commencé à émettre des rejets une quinzaine de jours après le début de l'expérimentation. Ce constat n'est pas surprenant. Chez des plantes de cet âge-là, les différents organes sont en place et bien développés, en particulier les rhizomes qui ont un rôle de stockage permettant aux plantes d'atténuer les coups durs mais sont aussi les organes d'où repartent les rejets.

Les plants plus jeunes ont plus souffert : ceux des lots en stress hydrique sont morts avant la fin des tests. Il est surprenant en revanche de constater que les plants de 3 mois ont plutôt mieux supporté les tests que ceux de 6 et 12 mois. La dégradation plus lente des potentiels osmotiques et photosynthétiques, ainsi que l'émission de rejets plus précoces le montrent. Cela pourrait s'expliquer par une plus grande quantité de tissus embryonnaire plus prompts à s'adapter au milieu, ainsi que par une évapotranspiration moindre (la pompe du système vasculaire des végétaux) du fait de leur feuillage moins développé.

Ces résultats sont à relativiser au regard du mode de production des plants avant utilisation dans les tests batch. Dans la pépinière, les jeunes plantules sont placées en godets et leurs parties aériennes sont « tondues » chaque semaine. Dans un premier temps, le but est de stimuler la croissance racinaire. Après quelques semaines l'intérêt est de limiter leur emprise au sol. Les plants de 6, 12 et

24 mois sont donc très peu développés et ne sont pas représentatifs des végétaux poussant dans le milieu naturel ou sur les filtres.

Par ailleurs ces résultats obtenus sur *Phragmites australis* en climat tempéré ne sont peut-être pas généralisables à d'autres espèces ou à d'autres climats. Cette question mériterait une étude complémentaire.

Cette première campagne a apporté son lot d'enseignements. Le stress anoxique s'est avéré au départ le plus violent pour *phragmites australis*. Les plantes sont d'abord touchées dans les mécanismes qui leur permettent de réguler leur pression osmotique et ainsi de contrôler leur croissance. Les feuilles se flétrissent mais ne sont pas cassantes comme pour le stress hydrique. L'appareil photosynthétique est touché dans un second temps. Les conditions anoxiques affaiblissent les plantes comme le montre le développement des ravageurs mais ne semble pas en mesure d'entraîner la mort de la partie aérienne. Les plantes semblent mettre en œuvre des mécanismes d'adaptation aux conditions anoxiques. La multiplication végétative pourrait en être une pour *Phragmites australis*. L'explication serait alors la même que pour les plants de 3 mois : mobiliser des tissus embryonnaires pour produire des rejets et réduire les besoins en eau et l'évapotranspiration en réduisant la partie aérienne. Les organes souterrains sont en tout cas bien en vie.

Les effets du stress hydrique permanent se manifestent beaucoup plus lentement mais ne laissent en revanche aucune chance aux végétaux. C'est l'appareil photosynthétique qui semble être touché en premier. Les mécanismes sont mieux connus que pour le stress anoxique. Lors de la phase photochimique de la photosynthèse, l'énergie solaire est transformée en énergie chimique (ATP), l'accepteur final de la chaîne d'électrons est l'eau. En l'absence d'eau, il y a création de radicaux libres, espèces chimiques extrêmement oxydantes qui peuvent endommager sérieusement le matériel cellulaire. Une stratégie de protection des végétaux face au stress hydrique est de limiter la photosynthèse, en stoppant la production de pigments chlorophylliens qui initient la photosynthèse en captant les photons. Dans le cas du stress hydrique, la chlorose ne serait pas due au stress en lui-même mais serait un mécanisme de défense de la plante, ce qui expliquerait qu'elle intervienne avant la perte de contrôle de l'osmolarité.

Les essais de réhydratation d'un lot de plants en stress hydrique, pour voir à la fois la résilience des végétaux et une adaptation progressive au stress, sont un échec. L'arrosage quinze jours après le début des tests est arrivé manifestement trop tard : les plantes étaient proches du point de flétrissement permanent. Les changements répétés de conditions ont amplifié le stress comme le montre la dégradation de l'état général des plantes ; l'arrosage a été long à produire un effet. Le protocole a par la suite été modifié, en augmentant l'alternance et réduisant la période de stress.

2.3. Test batch en milieu tropical

2.3.1. Mayotte

Les tests batch à Mayotte se sont déroulés dans la pépinière de l'entreprise SEV à Combani. SEV est la pépinière spécialisée en fourniture de végétaux pour les filtres plantés à Mayotte.

2.3.1.1. Les plantes

Les douze espèces qui ont été testées sont issues de la liste présentée en 1.2. Une partie est produite habituellement par la pépinière, le reste a été glané dans le milieu naturel par le personnel de SEV avec l'aide des agents de l'antenne de Mayotte du Conservatoire Botanique National des Mascarin (CBNM).



Figure 7 : Lot témoin des tests batch, avec 11 des 12 espèces étudiées.

La photo (figure 7) présente les différents végétaux testés à Mayotte. Avec de gauche à droite :

- *Canna indica* : présente dans toute la zone tropicale, c'est une plante ornementale très répandue.
- *Costus speciosus* : également une plante ornementale, la variété testée ici a les feuilles marbrée et semble lignifier précocement.
- *Cyperus papyrus* : le vrai papyrus, plante aquatique originaire du delta du Nil. Elle pourrait être intéressante si elle n'est pas strictement aquatique.
- *Cyperus alternifolius* : le faux papyrus, utilisé en plante ornementale, préférée à *Cyperus papyrus* car elle s'adapte à des conditions plus variées. Elle n'est pas présente sur la photo. Le nombre de sujets disponibles pour le test était limité, et nous avons préféré privilégier les lots stressés plutôt que le témoin.
- *Curculigo angustifolia*, est une plante de la famille du gingembre. Elle a de très grandes feuilles (plus d'un mètre) repliées en accordéon et présente la particularité de fleurir au sol au niveau de sa tige.
- *Thysanolena maxima*, est plantée sur la station d'Hachenoua. Elle pousse en touffe mais s'est très bien adaptée aux conditions du filtre. Elle est là pour servir de référence : les plantes qui ont des performances équivalentes ou supérieures ne poseront a priori pas de problème en taille réelle.
- *Clynogyne commorensis* : plante endémique des Comores.
- *Alpinia purpurata*, est une plante ornementale très répandue en zone tropicale.
- *Heliconia psitacorum*, c'est également une plante ornementale répandue dans les tropiques.
- *Cyperus sp.*, en cours d'identification par le CBNM, est une plante endémique de la région. Elle se développe sous forme de grandes tiges creuses dépourvues de feuilles.
- Une autre variété de *Thysanolena*.
- *Schoenoplectus littoralis*, endémique de la région, se développe également sous forme de grandes tiges creuses.



Figure 8 : Installations expérimentales à la pépinière de SEV. A gauche les lots en stress hydrique sont protégés des précipitations par une bâche. Au centre les lots en stress anoxique et à droite les lots témoins.

Les tests se sont déroulés entre octobre et novembre 2014. La durée des tests a été écourtée par l'arrivée d'une saison des pluies précoce et intense. Le personnel de SEV a également eu du mal à suivre le protocole pour le lot en stress hydrique périodique. De ce fait ces résultats ne sont pas présentés.

2.3.1.2. Résultats

Les résultats sont présentés comme précédemment, sous forme de tableaux chronologiques. Pour la construction des tableaux, se reporter aux explications lors de la présentation du protocole (§2.1.2.2).

- Stress anoxique :

Comme vu lors des tests réalisés à Oasure, le stress anoxique impacte très rapidement et de manière forte la régulation de la pression osmotique dans les cellules végétales. L'ensemble des végétaux présente, dès les premières observations, une verse ainsi qu'un flétrissement des feuilles plus ou moins marqués (voir tableau 8). La verse s'atténue généralement rapidement après quelques jours, ce qui peut être lié aux problèmes d'approvisionnements en eaux usées brutes, ce qui conjugué avec la forte évapotranspiration n'a pas permis de maintenir une forte anoxie en permanence (moyenne 148 mV, minimum -19 mV et maximum 218 mV).

On observe également au début des tests une chlorose commune à l'ensemble des espèces, ce qui n'avait pas été observé de manière aussi flagrante lors des tests sur *Phragmites australis*. Elle s'atténue par la suite pour la plupart des végétaux.











	Pleine vigueur		Floraison
	Un organe tige ou feuille est touché		Ravageurs
	Tous les organes sont touchés		<u>Multiplication végétative</u>
	La plante est dans un état critique, mort des premières feuilles		Apparition de rejets
	Mort		Croissance des rejets

Tableau 7 : Code couleur utilisé dans les tableaux de synthèse des observations réalisés lors des tests batch.

Temps d'exposition au stress (j)		3	5	10	13	21	25	31	41	
<i>Thysanolaena maxima</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Clinogyne comarensis</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Curculigo angustifolia</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Cyperus papyrus</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Cyperus alternifolius</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Thysanolaena sp.</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Heliconia psittacorum</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[Orange]								
<i>Alpinia purpurata</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Costus speciosus</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Cana indica</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Schoenoplectus littoralis</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[Orange]								
<i>Cyperus sp.</i>	Pot. osmotique	[Green]								
	Pot. Photosynthétique	[Green]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[Orange]								

Tableau 8 : Synthèse des observations réalisées sur les lots soumis au stress anoxique.

Les réponses des différentes espèces au stress sont très variées et permettent de les classer en deux groupes.

Des plantes ne s'adaptent pas du tout au stress et meurent au bout de quelques jours. Il s'agit des *Thysanolaena*, de *Curculigo angustifolia* et d'*Alpinia purpurata*.

Les autres espèces s'adaptent plutôt bien aux conditions, les fonctions photosynthétiques ne sont à priori pas perturbées, alors que le constat est plus contrasté au niveau de l'osmolarité.

Canna indica est la première à retrouver une pleine vigueur, et ce en moins de 2 semaines. Elle émet des rejets qui poussent rapidement et ne semble pas perturbée par les conditions.

Il faut quatre semaines environ à *Clinogyne comorensis*, *Heliconia psittacorum* et aux cypéracées pour être dans un état comparable aux témoins.

Enfin *Schoenoplectus littoralis* et *Costus speciosus* s'adaptent mais peinent à retrouver leur vigueur. Cette dernière en particulier semble juste en mesure d'assurer ses fonctions vitales.

- Stress hydrique :

Les effets du stress hydrique sont plus rapides à se manifester sur les espèces testées en milieu tropical que lors des tests menés à Oasure (voir tableau 9). Plus qu'une propriété de *Phragmites australis*, on peut y voir un effet du climat et le fait que les végétaux soient à l'air libre, le vent étant un facteur favorisant l'évapotranspiration.

Dans un premier temps les végétaux n'arrivent pas à maintenir le potentiel osmotique de leurs cellules. Les feuilles flétrissent, les plus sensibles versent. Après cinq jours, la plupart des plantes réussissent à stabiliser leur état et une partie retrouve de la vigueur, signe d'une bonne adaptation au stress. Par la suite leur état se dégrade lentement jusqu'à la mort de ¼ des espèces.

Contrairement à ce qui a été vu dans en métropole, l'activité photosynthétique semble peu impactée par le stress hydrique, à l'exception de quelques espèces plus sensibles. La chlorose ne se manifeste sur les feuilles que quand la plante présente des signes de flétrissement. Il semblerait donc que les plantes tropicales aient des mécanismes d'adaptation au stress hydrique différents de *Phragmites australis* ou qu'elles soient beaucoup plus résistantes au stress.

Le stress hydrique est plus discriminant que le stress anoxique, ce qui nous amène à distinguer trois groupes de plantes en fonction de leurs comportements face au stress.

Curculigo angustifolia est la plante la moins résistante et meurt après deux semaines. *Alpinia purpurata* souffre également beaucoup même si elle survit un peu plus longtemps.

Les *Thysanolaena* et les Cypéracées sont plus résistantes. Elles s'affaiblissent lentement, d'abord par flétrissement et chlorose, puis les premières feuilles meurent avant que les plantes ne sèchent à leur tour à la fin de la 4^{ème} semaine.

Quatre espèces étaient encore vivantes après quarante et un jours sans eau. C'est le cas de *Clinogyne comorensis*, même si ses feuilles étaient flétries et chlorosées. *Canna indica*, *Costus speciosus* et *Heliconia psittacorum* ont terminé les tests avec quelques flétrissements mais sans chlorose apparente. Autour de la 3^{ème} semaine de tests ces trois dernières espèces ont même retrouvées une vigueur comparable aux plants témoins.

2.3.1.3. Conclusions

Ces premiers tests batch sur des plantes tropicales apportent de nombreux enseignements. En plus des retours sur la capacité des différents végétaux à s'adapter aux stress, ces tests ont été l'occasion d'étudier leur morphologie et d'écartier ceux qui ne répondent pas aux critères définis dans le § 1.1 (taille, diamètre de la tige, bois ...) qui permettent de garantir un rôle mécanique.

Temps d'exposition au stress (j)		3	5	10	13	21	25	31	41	
<i>Thysanolaena maxima</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Clinogyne comorensis</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Curculigo angustifolia</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[Orange to Yellow gradient]								
<i>Cyperus papyrus</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Cyperus alternifolius</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Thysanolaena sp.</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Heliconia psittacorum</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. sexuée	[Orange to Yellow gradient]								
<i>Alpinia purpurata</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Costus speciosus</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Cana indica</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[White]								
	Mult. sexuée	[White]								
<i>Schoenoplectus littoralis</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. sexuée	[Orange to Yellow gradient]								
<i>Cyperus sp.</i>	Pot. osmotique	[Green to Yellow gradient]								
	Pot. Photosynthétique	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. Végétative	[Green to Yellow gradient]								
	Mult. sexuée	[White]								

Tableau 9 : Synthèse des observations réalisées sur les lots en stress hydrique.

Curculingo angustifolia et *Alpinia purpurata* ont mal supporté les tests quels que soient les lots, y compris les témoins. Elles ne sont donc pas adaptées à une utilisation sur les filtres, pour des raisons de substrat ou d'exposition à une lumière directe.

Schoenoplectus littoralis et *Cyperus sp.* ne semblent pas adaptées non plus, en raison de leur morphologie de plantes tiges. Elles n'ont pas de feuilles, leur prise au vent est donc limitée. Leur tige est creuse et assez fragile. Elles ne pourront pas assurer le rôle mécanique recherché.

Costus speciosus forme très rapidement du bois et sa tige fait de 2 à 5 centimètres de diamètre. Lors de l'entretien des filtres elle sera trop difficilement faucardable.

Ces plantes sont à proscrire et sont éliminées de la liste.

Cyperus papyrus et *Cyperus alternifolius* ont un comportement comparable à celui des *Thysanolaena* en contexte de stress hydrique mais résistent mieux au stress anoxique. Comme ce n'est pas le comportement des *Thysanolaena* qui pose problème sur les filtres mais son développement en touffe, ces cyperacées sont une piste de substitution intéressante à *Phragmites australis* dans les DOM.

Enfin, trois plantes sortent du lot quelles que soient les conditions de stress. Elles ont terminées l'ensemble des tests en vie et paraissent très intéressantes à tester en taille réelle. Il s'agit de *Clinogyne comorensis*, *Heliconia psitacorum*, et *Canna indica*.

Costus speciosus, par ses performances, est à rapprocher de ce dernier groupe. Pour les tests suivant en Martinique, nous avons cherché une cousine proche avec une tige moins ligneuse qui serait plus facile à faucarder.

2.3.2. Martinique

Les tests batch en Martinique se sont déroulés sur deux mois de Mars à Mai 2015, sur la station de Taupinière. Le suivi a été réalisé par Cotram Assainissement, qui est l'exploitant de la station et partenaire du projet Attentive (constructeur).

2.3.2.1. Les plantes

Ces tests ont été l'occasion d'évaluer neuf plantes. On retrouve parmi elles *Thysanolaena maxima*, qui sert à la fois de référence par rapport à l'existant puisque c'est généralement elle qui est utilisée jusqu'à présent dans les DOM et aussi de point de comparaison avec les tests fait à Mayotte.

- *Costus spiralis* est une variété de costus moins ligneuse que *Costus speciosus* qui avait donné de bons résultats à Mayotte mais qui par sa constitution (tige épaisse qui lignifie rapidement) paraissait peu adaptée.
- *Hyptis capitata* est une petite plante originaire d'Amérique du sud présente également dans toute la Caraïbe.
- *Cyperus alternifolius* est utilisé sur les filtres de la station de Mansarde Rancée. C'est le faux papyrus, très répandu, largement utilisé en plante ornementale à travers le monde. Il était déjà testé à Mayotte.
- *Cyperus alopecuroides* est plus grande et a un développement plus lent que ses cousines.
- *Cyperus involucratus* est un cultivar très proche de *C. alternifolius* mais présenterait moins de risque invasif que sa cousine. Elle a la préférence de la DEAL Martinique dans la famille des Cyperacées.
- *Fuirena umbellata* est une plante aquatique très répandue dans la zone tropicale et fréquemment considérée comme une mauvaise herbe dans les rizières.
- *Eleocharis interstincta* se développe à l'état naturel dans les milieux aquatiques. Elle est de type plante-tige.

- *Brachiaria decumbens* est une plante fourragère répandue en zone tropicale. Elle est présente sur les step de Mansarde Rancée et Taupinière.



Figure 9 : Dispositif expérimental sur la station de Taupinière. A gauche les lots en stress anoxique. Au centre sous la serre les lots en stress hydrique permanent et périodique. Au fond les lots témoins.

2.3.2.2. Résultats

Les plantes ont été réparties en lots pour chacune des conditions de cultures différentes : stress anoxique, stress hydrique permanent, stress hydrique périodique et témoins.

Les observations se sont étalées sur 54 jours et sont synthétisées dans les tableaux chronologiques suivants. Pour la construction des tableaux, se reporter aux explications du paragraphe 2.2.2

- Stress anoxique

Malgré les efforts de Cotram, l'anoxie n'a pas été maintenue en permanence. Lors des mesures, les valeurs étaient très basses témoignant d'un milieu très réducteur (moyenne -97 mV, minimum -174 mV et maximum 6m V). En revanche, il y avait des fuites dans le système et lors des visites le milieu n'était plus saturé en eau. Cela s'est traduit par un impact moins fort du stress sur les plants. Au démarrage des tests, les plants semblent souffrir moins que lors des autres campagnes (Tableau 11). La comparaison des comportements de *Thysanolaena maxima* et *Cyperus alternifolius* avec ce qui avait été observé à Mayotte est très claire : les *Thysanolaena* étaient mortes en quinze jours lors des tests à Mayotte.











	Pleine vigueur		Floraison
	Un organe tige ou feuille est touché		Ravageurs
	Tous les organes sont touchés		<u>Multiplication végétative</u>
	La plante est dans un état critique, mort des premières feuilles		Apparition de rejets
	Mort		Croissance des rejets

Tableau 10 : Code couleur utilisé dans les tableaux de synthèse des observations réalisés lors des tests batch.

Temps d'exposition aux stress (j)		5	8	13	16	20	23	28	30	33	35	40	42	47	49	54	
<i>Hyptis capitata</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Cyperus alternifolius</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Thysanolaena maxima</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Fuirena umbellata</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Cyperus alopecuroides</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Eleocharis interstincta</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Cyperus involucratus</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Brachiaria decumbens</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															
<i>Costus spiralis</i>	Pot. osmotique	[Green]															
	Pot. Photosynthétique	[Green]															
	Mult. Végétative	[Green]															
	Mult. sexuée	[Orange]															

Tableau 11 : Synthèse des observations réalisées sur les lots soumis au stress anoxique.

Hyptis capitata et *Eleocharis interstincta* supportent assez mal le changement de conditions et le stress associé : verse, chlorose et mort des premières feuilles dès la première semaine. Toute les deux fleurissent, des rejets apparaissent et poussent. Par la suite *Eleocharis* s'adapte remarquablement bien. Elle est la seule plante à terminer le test dans un état comparable aux témoins.

Hyptis capitata dépérit lentement, tout comme *Brachiaria decumbens* et *Thysanolaena maxima*. Ces plantes se retrouvent dans un très mauvais état général à la fin des tests : vigueur faible, 80% des plants sont morts.

Les autres plantes ont un comportement relativement stable au cours des tests. A partir de la 6^{ème} semaine, leur état se dégrade tout de même. Elles présentent généralement un flétrissement et une chlorose d'intensité moyenne à la fin des tests.

Au vu des conditions d'expérimentation il n'est pas possible d'aller beaucoup plus loin dans l'analyse. Il avait déjà été constaté que le stress anoxique n'est pas le plus discriminant pour le choix des plantes.

- Stress hydrique :

Le suivi des tests a été suffisamment long et poussé pour que l'on voit toutes les plantes mourir. La comparaison du comportement de *Thysanolaena maxima* et de *Cyperus alternifolius* avec les observations faites à Mayotte dans des conditions identiques montrent que le stress hydrique a été plus poussé lors des tests batchs en Martinique. Les *Thysanolaena* meurent après trois semaines en Martinique contre quatre à Mayotte. L'écart est moins important pour *Cyperus alternifolius*. A Mayotte les tests batch se sont déroulés lors de la saison des pluies : l'humidité ambiante plus importante et les températures plus faibles expliquent cette différence.

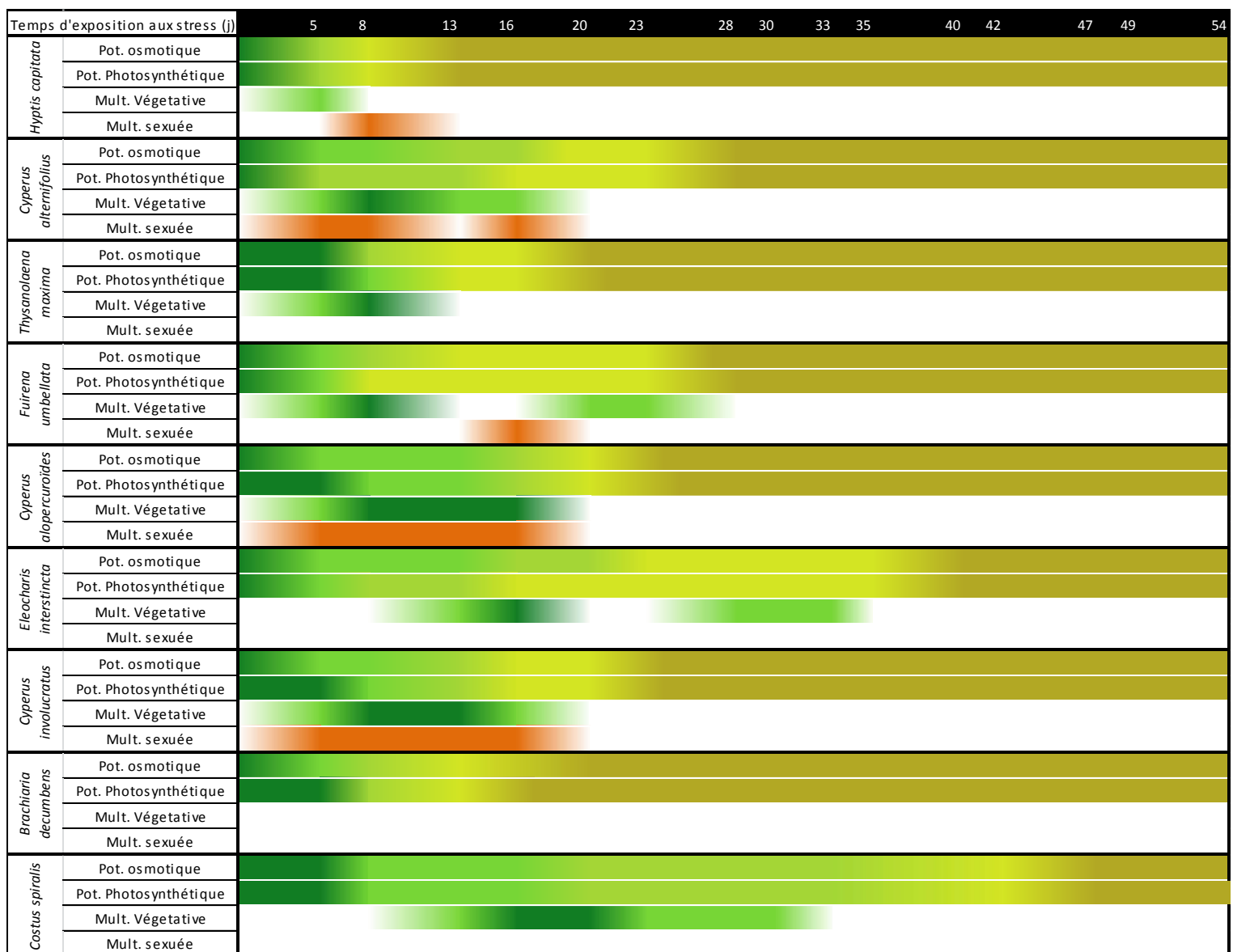


Tableau 12 : Synthèse des observations réalisées sur les lots en stress hydrique permanent.

Costus spiralis est restée en vie jusqu'à la 7^{ème} semaine. Elle a dépéri lentement tout au long du suivi et a même émis quelques rejets au cours des 3^{èmes} et 4^{èmes} semaines des tests.

Eleocharis interstincta a survécu six semaines sans arrosage. Son comportement est plus stable que lors du stress anoxique, avec un long déclin.

Les cypéracées (*Cyperus alternifolius*, *Cyperus alopercuroïdes*, *Cyperus involucratus*) et *Fuirena umbellata* meurent au cours de la 4^{ème} semaine. Toutes ont émis des rejets et ont fleuries au cours des trois premières semaines.

Thysanolaena maxima et *Brachiaria decumbens* ont souffert du stress rapidement et sont mortes au cours de la 3^{ème} semaine.

Hyptis capitata n'a pas du tout supporté le stress et est morte en une dizaine de jours. Elle a tout de même essayée de se multiplier en émettant des rejets et fleurissant.

Le protocole du stress hydrique périodique a été modifié. Les lots alternent entre une semaine de stress hydrique et une semaine d'arrosage classique avec les témoins.

Le changement de condition d'arrosage plus fréquent impacte moins les végétaux que lors des tests à Oasure, où l'arrosage après 15 jours sans eau avait dans un premier temps fortement affaibli les plantes.

Dans ces conditions, il n'a pas été possible de mettre en évidence de manière claire la résilience de chaque espèce au stress hydrique. Par ailleurs, les tests étaient sans doute trop courts pour observer une accoutumance des plantes au stress : les plantes ne récupèrent pas plus rapidement de la quatrième semaine sans arrosage que de la première.

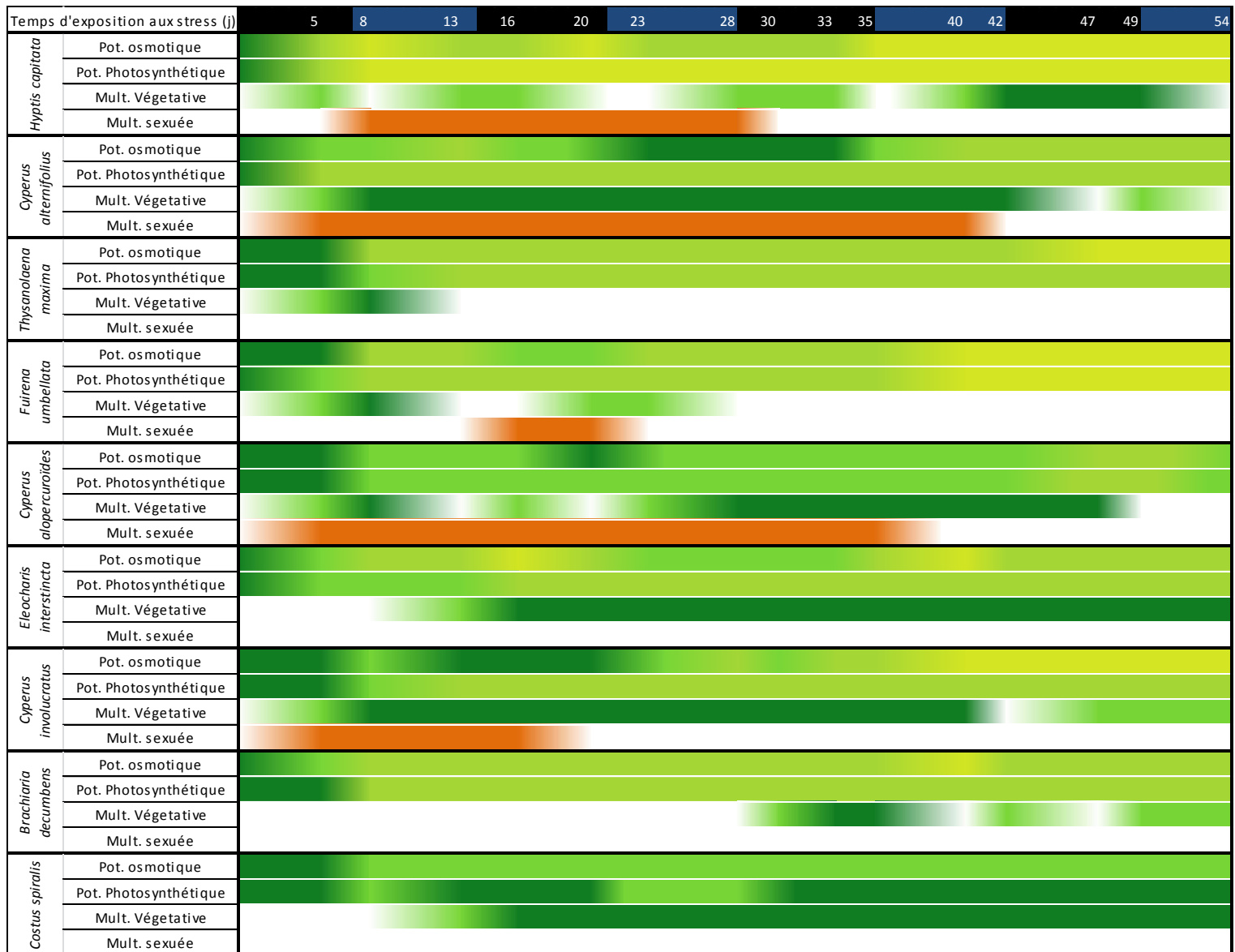


Tableau 13 : Synthèse des observations faites sur les lots soumis au stress hydrique périodique.
 En bleu sont représentées les périodes d'arrosage.

Ceci dit, ces conditions étaient tout de même intéressantes à suivre puisqu'elles se rapprochent du fonctionnement des filtres (alternances). Ces observations permettent de préciser et de nuancer les constats dressés suite au stress hydrique continu.

Hyptis capitata, *Fuirena umbellata*, *Thysanolaena maxima* et *Cyperus involucratus* ont terminés les tests dans un état critique. Les phases de réhydratation leur ont permis de survivre mais dans un très mauvais état général.

Brachiaria decumbens s'en sort nettement mieux. L'alternance lui est bénéfique, son état a été stable pendant la majorité du test.

Les autres cypéracées se sont mieux adaptées que dans les conditions de stress strict et présentent des atteintes légères. *Costus spiralis* n'a apparemment pas souffert des tests.

2.3.2.3. Conclusion

Hyptis capitata n'est pas adaptée à l'utilisation sur les filtres. Elle ne s'est pas adaptée aux stress quelles que soient les conditions.

Fuirena umbellata est une plante aquatique. Elle s'est donc plutôt bien adaptée au stress anoxique mais nettement moins au stress hydrique, continu comme périodique. De plus, ses tiges sont fines et elles ne semblent pas dépasser 50 cm de haut. Son action mécanique serait trop limitée pour être efficace.

Eleocharis interstinca est une plante tige à rapprocher de *Schoenoplectus littoralis* étudiée à Mayotte. Pour les mêmes raisons que cette dernière, elle est écartée.

L'utilisation de ces végétaux est à proscrire. Ils ne sont donc pas retenus pour la suite des tests.

Bracharia decumbens s'est assez mal adaptée aux stress anoxique et au stress hydrique continu. En revanche, elle s'est bien comportée lors du stress hydrique périodique. C'est une des rares plantes fourragère qui ait été testé. C'est principalement à ce titre qu'il peut être intéressant de continuer à l'étudier, bien que sa physionomie de grande herbe ne plaide pas non plus en sa faveur.

Comme vu lors des tests à Mayotte, les cypéracées dans leur ensemble ont des comportements assez proches et font généralement au moins aussi bien que *Thysanolaena maxima*. Elles constituent une piste de substitution intéressante.

Enfin *Costus spiralis* a montré des performances au moins aussi intéressantes que *Costus speciosus*, avec des traits plus conformes à ce qui est attendu sur les filtres. Elle sera particulièrement intéressante à tester en taille réelle.

2.4. Conclusion générale sur les tests batch

Lors de ces tests batch, le comportement de vingt végétaux soumis au stress anoxique et au stress hydrique a été observé. *Echinochloa polystachia* et *Cladium Jamaicanse* faisaient partie de la liste initiale de végétaux à tester. Elles n'ont pas pu être trouvées lors des phases de glanage des végétaux dans le milieu naturel préalable au démarrage des tests.

Huit plantes sont écartées de la suite des tests pour des raisons d'inadaptation aux stress ou de morphologie qui ne correspondaient pas aux critères présentés dans le §1.2.

Bracharia decumbens ne semble pas disposer de mécanismes performants d'adaptation aux stress étudiés. De plus cette grande herbe ne garantit pas non plus un rôle mécanique important. C'est la seule plante fourragère qui a pu être testée. Le développement très rapide de ces végétaux peut être un atout dans certaines conditions. Par ailleurs il pourrait être possible de l'utiliser en association durant la phase de démarrage des stations, en attendant que les végétaux plus intéressants mais au développement plus long ne s'installent.

Quatre cypéracées différentes ont été étudiées. Elles ont des comportements assez proches et un taux de survie comparable à *Thysanolaena maxima*. Comme ce n'est pas le comportement des *Thysanolaena* qui pose problème sur les filtres mais son développement en touffe. Ces cypéracées sont une piste de substitution intéressante.

Parmi ces quatre espèces, *Cyperus alopercuroïdes* est plus massive et semble se développer moins vite que les autres.

Cyperus alternifolius a été testée à Mayotte et en Martinique. La DEAL de la Martinique ne souhaite pas qu'elle soit utilisée sur son territoire, car même si elle n'est pas considérée comme invasive, elle a une forte tendance à coloniser tous les milieux qui lui sont favorables.

Cyperus involucratus est de la famille des cypéracées celle qui a la préférence de la DEAL Martinique. Par contre, ses performances en conditions de stress hydrique périodique en Martinique sont en deçà de ses cousines. Elle est par ailleurs assez rare et fréquemment confondue avec *C.alternifolius*.

Cyperus papyrus est peut-être la plus intéressante du lot. Même si elle est réputée être aquatique, elle s'est bien adaptée au stress hydrique.

Heliconia psittacorum, *Canna indica*, *Clinogyne commorensis* et *Costus spiralis* se sont remarquablement bien adaptées aux filtres et aux différentes conditions proposées. Toutes font parties de l'ordre des Zingibérales et sont des plantes ornementales. *Clinogyne commorensis* est endémique de Mayotte et ne pourra pas être utilisées en dehors de l'océan indien. Les autres sont très communes dans la zone tropicale.

Ce sont les plantes à tester en priorité lors de la prochaine phase de l'étude, le suivi in situ des végétaux sur des stations en conditions réelles.

3. Les essais en taille réelle

Les tests batch ont permis de comparer entre eux une présélection de végétaux obtenue d'après leur adéquation à un « cahier des charges », sur la base de leur adaptation à des conditions de stress. Ces tests ont été réalisés à l'échelle pilote où les conditions de culture étaient contrôlées. Les sources de stress ont été limitées à celles dont on voulait étudier l'impact.

Les plantes les plus intéressantes à l'issue des tests batch (tableau 14) ont été évaluées dans le contexte réel de la filière, pour ne retenir que les plus adaptées. Le changement d'échelle de la phase pilote à la phase d'étude in situ impose une approche différente du suivi qui ne sera pas basée sur les conséquences d'un stress et une comparaison à une référence (témoins). Les végétaux sont passés d'un milieu contrôlé aux conditions réelles des filtres (alternance de l'alimentation, boues organiques riches en microorganismes, compétition avec des adventices, aléas climatiques...). Le changement d'échelle est également temporel, puisque les tests batch se sont déroulés sur quelques semaines et que le suivi in situ a été réalisé sur une année. Enfin, les observations focalisées lors de l'étape précédente sur l'individu se sont attachées lors des essais en taille réelle à décrire le développement de la population de chaque espèce.

Espèce	Famille, genre
<i>Heliconia psittacorum</i>	Heliconiacées, Zingibérales
<i>Cana Indica</i>	Cannacées, Zingibérales
<i>Clinogyne commorensis</i>	Maranthacées, Zingibérales
<i>Costus spiralis</i>	Costacées, Zingibérales
<i>Cyperus alternifolius</i>	Cypéracées, Poacées
<i>Cyperus involucratus</i>	Cypéracées, Poacées
<i>Cyperus alopercuroïdes</i>	Cypéracées, Poacées
<i>Cyperus papyrus</i>	Cypéracées, Poacées

Tableau 14 : Plantes retenues à l'issue des test-batch

3.1. Suivi *in situ* en Guyane

Les premiers suivis *in situ* se sont déroulés en Guyane. Le bureau d'étude ETIAGE Guyane participe depuis plusieurs années au développement des FPV en Guyane. La difficulté d'entretenir les filtres, due au manque de compétitivité de *Phragmites australis* face aux adventices locales, a amené Etiage à rechercher des plantes plus adaptées à ces milieux complexes parmi l'importante flore amazonienne. Les collaborateurs d'Etiage disposent de connaissances uniques sur la filière, en botanique et physiologie végétale dans le réseau des FPV à l'outre-mer.

Ces suivis *in situ* avaient deux objectifs. D'une part observer le développement des végétaux les plus prometteurs sur un filtre en conditions réelles. D'autre part travailler sur la méthodologie du suivi en taille réelle, de manière à définir un protocole simple et généralisable par la suite à l'ensemble des DOM.

3.1.1. Organisation de l'expérimentation sur Bois d'Opale 2 :

3.1.1.1. Caractéristiques de la station et aménagements pour les suivis :

Les suivis ont été menés sur la station de Bois d'Opale 2 (commune de Macouria). C'est une station de 480 EH dimensionnée à 0,8 m²/EH, avec un étage unique de deux filtres en alternance. La couche filtrante est composée de 30 cm de graviers 3/6 mm.

Les données météorologiques relevées sur le site sont présentées dans le Klimadiagramm suivant (figure 10). La pluviométrie est de 2815 mm sur l'année 2015. La moyenne des températures est de 27,2°C sur l'année, les températures ayant oscillées entre 24,2° c et 29,7°C. Le climat est de type équatorial, marqué par une saison des pluies qui s'est étalée de février à juin, avec un pic de précipitations de 600 mm en mai.

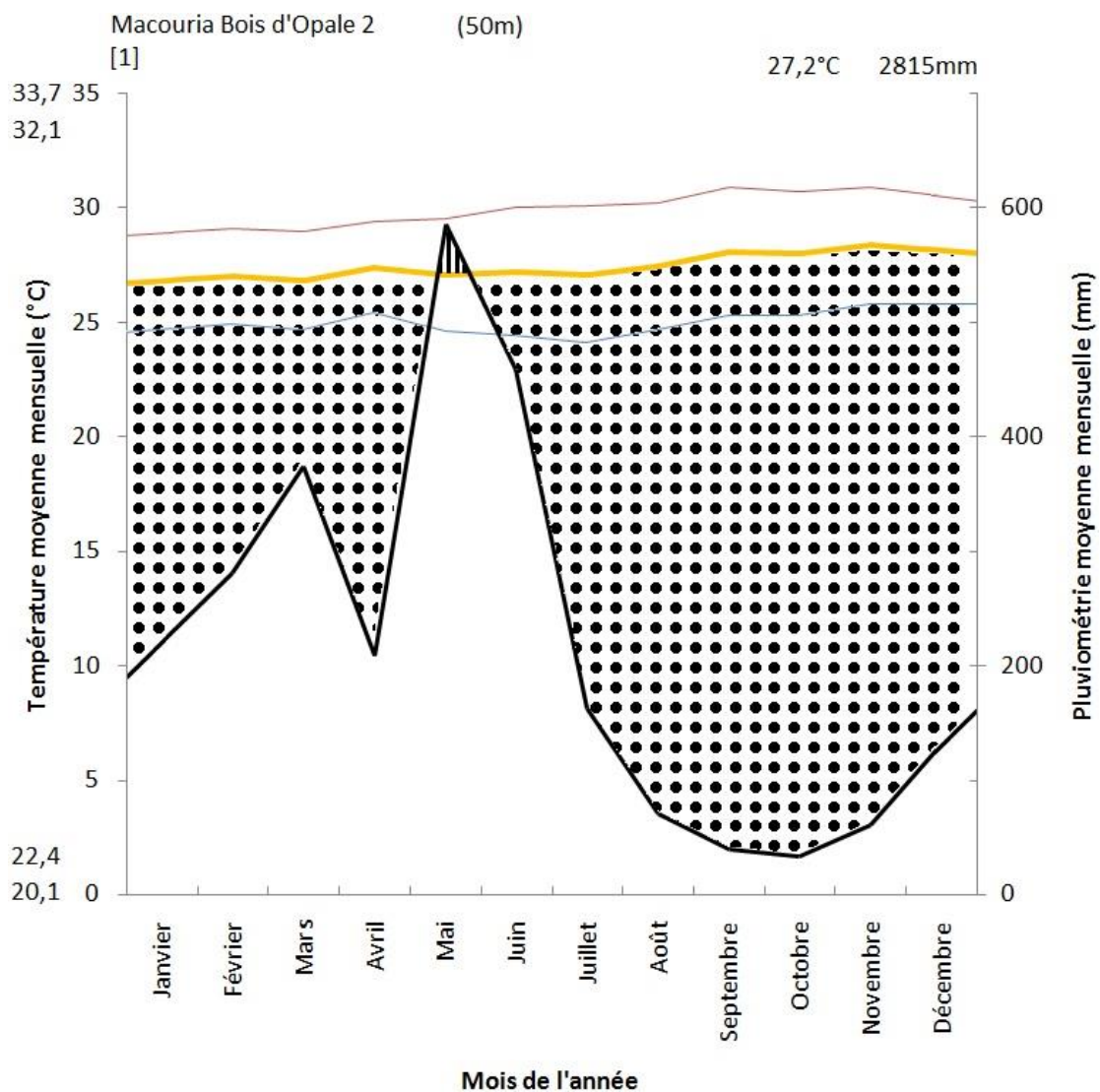


Figure 10 : Klimadiagramm d'après Walter (1973) de la station de Bois d'Opale 2 à Macouria en 2015 (Guyane). La courbe jaune représente la température moyenne, en bleu les minimums et en rouge les maximums. La courbe noire présente l'évolution des précipitations mensuelles. La zone hachurée correspond à une période d'inondation, et les zones à pois à des période de sécheresse. Source : Etiage.

Une description détaillée de la station et de ses performances peut être trouvée dans le rapport final sur les suivis menés en Guyane dans le cadre de nos projets avec l'Onema (Lombard-Latune et al., 2014).

	Taux de charge temps sec (%)	Taux de charge temps pluie (%)
Hydraulique (m/j)	88,8%	219,7%
DBO5 (g/m ² /j)	24,6%	31,1%
MES (g/m ² /j)	13,4%	19,7%
DCO (g/m ² /j)	29,8%	43,3%
NTK (g/m ² /j)	29,6%	37,4%

Tableau 15 : Taux de charge de la station de bois d'Opale 2. (Lombard-Latune et al., 2014)

En service depuis Mars 2012, une couche de boue bien minéralisée s'est développée à la surface des filtres formant un terreau favorable au développement de plantes adventices (voir figure 11). Les phénomènes de compétition sont importants sur cette station, ce qui en fait un site idéal pour tester les plantes sélectionnées, face aux adventices locales. Les études menées sur les autres sites permettront de voir les aspects compétition dans des conditions différentes.



Figure 11 : Exemple de colonisation d'un filtre de bois d'Opale par *Cucurbita maxima* (Giromon).
 Photo Etiage.

Entre 2013 et 2014, les charges organiques traitées par la station sont de l'ordre de 30% de la charge nominale (voir Tableau 15). En conséquence de quoi, un des filtres a été compartimenté à l'aide de bandes en plexiglas de manière à diminuer artificiellement la surface de filtre mise en service et multiplier par 3 la charge appliquée (voir figure 12). La charge organique ainsi appliquée était plus proche de la charge nominale. La charge hydraulique qui était déjà forte en saison des pluies et de nappe haute pourrait en revanche poser des problèmes de surcharge (flaquages importants). Les deux filtres permettent ainsi de tester deux configurations différentes du point de vue de la charge organique : charge nominale (CN) et faible charge (FC).



Figure 12 : Réduction de la surface en service autour de chacun des points d'alimentation de bois d'Opale 2. Photo Etiage.

3.1.1.2. Les plantes testées :

Cinq plantes ont été retenues pour cette expérimentation (4+1) :

- *Phragmites australis* : la Guyane est le seul DOM où il est possible d'étudier dans la zone tropicale. Il est important de voir comment cette plante de référence se comporte au cours des tests. Elle servira d'étalon pour juger du comportement des autres végétaux.
- *Echinochloa polystachia* : elle avait été identifiée très tôt comme étant une plante de substitution sérieuse. Elle n'a pas pu être trouvée en Martinique ou à Mayotte pour subir les tests batch, malgré tout il est intéressant de l'évaluer dans le cadre d'un suivi in situ.
- *Heliconia psittacorum* : elle est plantée sur les filtres de Bois d'Opale 1 et donne entière satisfaction à l'exploitant. Elle a montré de très bonnes performances lors des tests batch et était une des priorités pour le suivi in situ.
- *Costus spiralis* : les costacées ont donné de bons résultats lors des tests batch. *Costus spiralis* est présente sur Mansarde Rancée (Martinique). Malheureusement, elle a très mal supporté la compétition avec les adventices : après 3 mois de tests elle a quasiment complètement disparu des filtres. Elle a été remplacée à mi-parcours du suivi (Juin 2015) par :
- *Canna glauca* : une espèce proche de *Canna indica* qui a elle aussi montré une adaptation intéressante aux stress lors des tests batch.

Costus spiralis, *Heliconia psittacorum* et *Canna glauca* sont des plantes qui font partie de l'ordre des Zingibérales, qui se caractérisent par un cycle végétatif long. *Echinochloa polystachia* et *Phragmites australis* sont des Poacées ou Graminées. Les plantes de cette famille ont un cycle végétatif court.

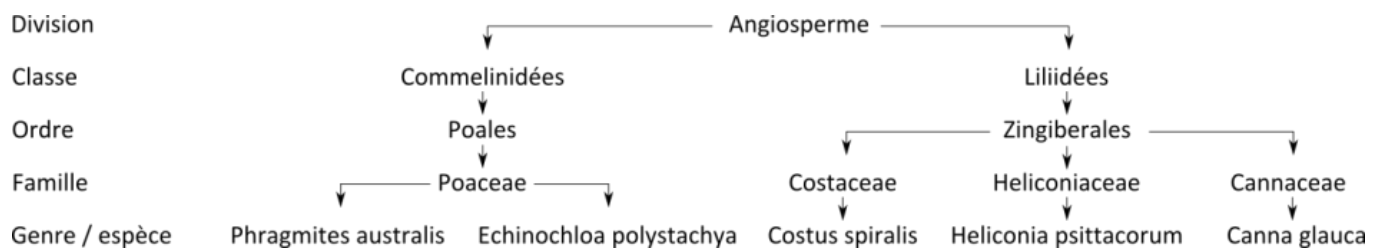


Figure 13 : Classification botanique des plantes sélectionnées pour le suivi en taille réelle sur Bois d'Opale 2.
 Source : Etiage.

Une des questions soulevée par les retours d'expérience dans les DOM est de savoir à quelle densité planter les végétaux. En métropole *Phragmites australis* est mis en place à raison de quatre plants par mètre carré de filtre. La capacité à remporter la compétition avec les adventices est déterminante, au moins durant la phase de démarrage des filtres. En raison de la lenteur de développement des Zingibérales, il a été choisi de diviser chaque zone de filtre en deux et d'augmenter les densités : six et douze 12 plants au m².

Pour chacune des quatre espèces étudiées sur Bois d'Opale, il y avait donc quatre configurations : six et douze plants au m² à charge nominale, ainsi que six et douze plants au m² en faible charge. Soit au total seize zones différentes à suivre (voir figure 14).

Cana glauca est venue remplacée *Costus spiralis* après quelques mois, suite à la disparition de cette dernière d'une partie des filtres (voir 3.1.3.1).

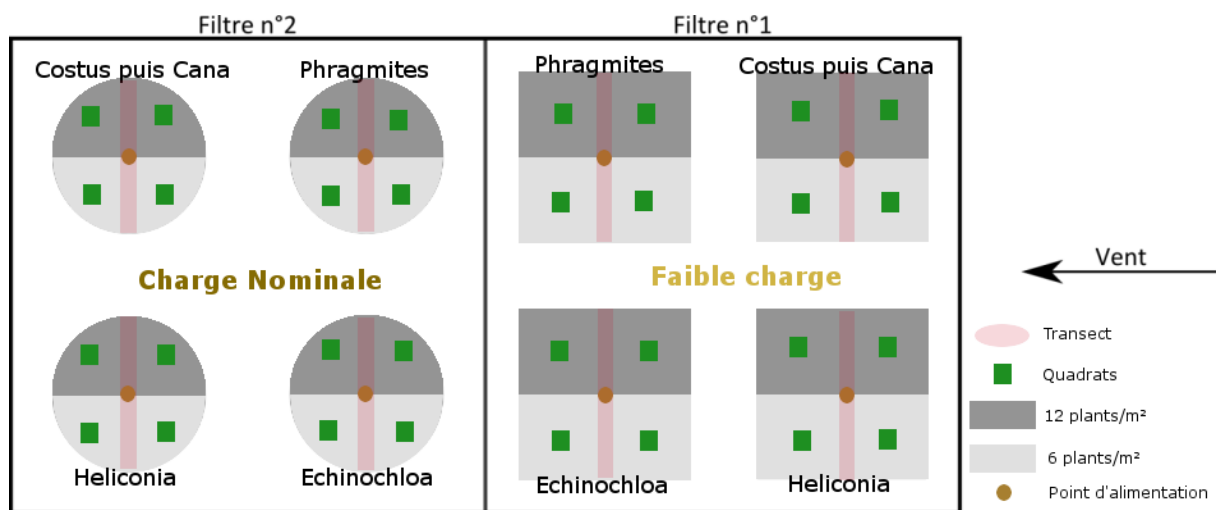


Figure 14 : Configuration des filtres de bois d'Opale pour les tests.

3.1.2. Protocole de suivi

Le suivi s'est focalisé sur deux problématiques : l'adéquation des végétaux aux critères requis par la filière (voir 1.1) par une observation de leur développement, ainsi que l'aspect phytosociologique à travers l'étude des relations des communautés végétales entre elles et donc la compétition interspécifique pour l'occupation des filtres.

Pour chacun des aspects le suivi produit des données chiffrées (quantitatives) et des observations qualitatives.

Les campagnes de mesures sont organisées mensuellement entre Février et Décembre 2015. A cette occasion des photos sont prises (figure 15). Elles permettent à posteriori de valider les tendances générales observées par le suivi, en particulier sur le cycle végétatif des végétaux.

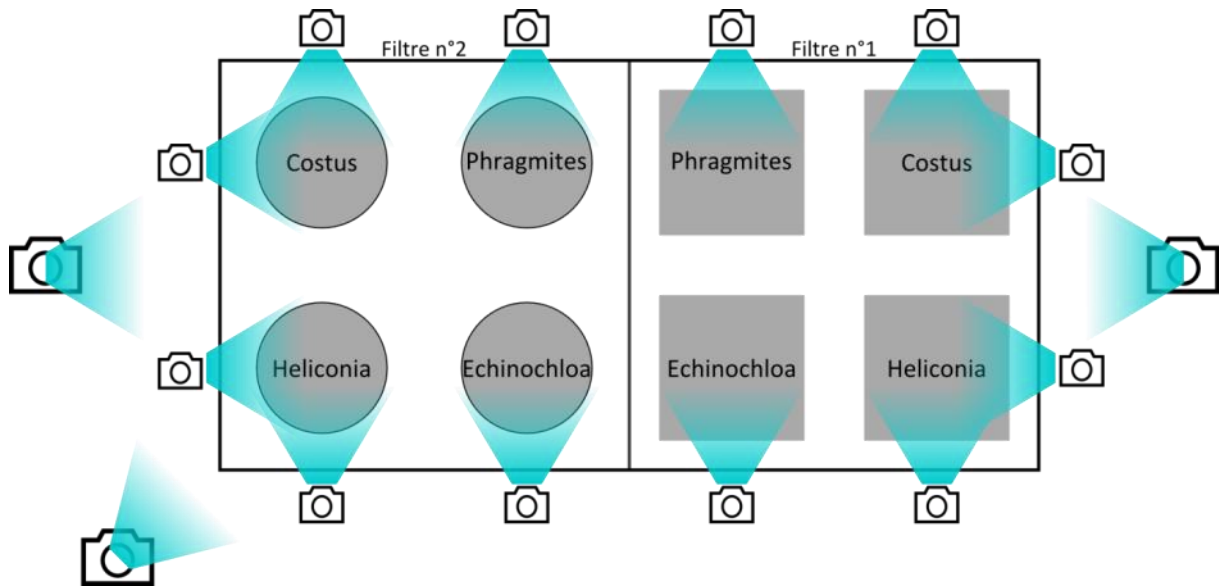


Figure 15 : Plan général des prises de vues dans le cadre du suivi photographique des tests. Au cours des tests *Costus* a été remplacé par *Canna glauca*. Source : Etiage.

3.1.2.1. Suivi du développement des végétaux :

Les indicateurs quantitatifs utilisés pour le suivi du développement des végétaux reposent sur la méthode des quadrats. Des zones de 50 x 50 cm sont délimitées lors de la mise en place de l'expérimentation (voir figure 14). Deux quadrats sont mis en place pour chacune des configurations (quatre plantes, deux charges par plantes, deux densités par charge), soit au total trente-deux quadrats à suivre. Ils ont été positionnés à équidistance du point d'alimentation : il y a ainsi deux répétitions pour chaque configuration. A charge nominale, la distance au point d'alimentation ne devrait pas être un paramètre de variation important.

Par la suite les relevés suivants sont effectués lors de chaque campagne :

- Nombre de tiges,
- Hauteur maximale des végétaux, mesurée du sol à l'apex de la plante la plus grande.
- Diamètre des tiges,
- Nombre de feuilles,
- Dimensions des feuilles les plus développées. Cet indicateur aurait pu être utilisé par la suite pour calculer l'indice foliaire. Une variation de l'indice foliaire par rapport à des valeurs de références est l'indicateur d'un état de stress.

En complément, des données qualitatives sont relevées lors de chaque passage. Elles concernent :

- La floraison,
- L'apparition et la croissance des rejets. A partir du moment où les rejets atteignent la taille des plants lors de la plantation, ils sont considérés comme de nouvelles tiges.
- L'état général des végétaux.

Ces données qualitatives ont été utilisées pour définir le cycle végétatif de chaque espèce. C'est en fonction de ce dernier que des préconisations sur le faucardage ont été faites.

3.1.2.2. Compétition sur les filtres

Deux dispositifs sont mis en place pour évaluer de manière quantitative la compétition entre les végétaux plantés et les plantes adventices sur les filtres.

Le premier est la réalisation de transects (voir figure 14). Le principe est de relever le long d'un axe traversant les zones, la présence des plantes testées ou d'adventices, en essayant de relever, ou à défaut d'estimer la densité des végétaux. En comparant les transects réalisés à différentes dates, une dynamique peut-être mise en évidence.

Ces transects sont couplés à l'étude des photographies prises tout au long des suivis pour obtenir des ratios d'occupation des filtres.

La compétition est également évaluée de manière indirecte par un relevé des temps passés par les exploitants au sarclage des adventices sur les filtres.

Des données qualitatives sont relevées au cours des campagnes de suivis :

- Recensement des espèces adventices,
- Un suivi des attaques de ravageurs,
- Une analyse globale des phénomènes de successions végétales sur les filtres.

3.1.2.3. Adaptation d'une partie du suivi

Le protocole a été modifié après les premières campagnes de suivi. Le constat suivant a été dressé :

- Il n'a pas été possible de trouver dans la littérature de données fiables sur l'indice foliaire des plantes utilisées. Des mesures sur des plantes témoins auraient été trop complexes à mettre en place : il a été décidé d'abandonner ces mesures, les phénomènes de stress ayant été étudiés lors des tests batch.
- Les mesures de certains indicateurs impactent de manière indirecte le développement normal des végétaux sur les filtres et donc les résultats du suivi suivant. Ils nuisent à la représentativité de l'ensemble du suivi. C'est le cas par exemple des transects : lors des relevés, le filtre est piétiné autour de l'axe du transect. D'un suivi à l'autre les traces sont toujours visibles et favorisent certaines adventices. C'est le cas, dans une moindre mesure, pour les quadras. Un compromis a été trouvé. Seuls les quadras ont été maintenus compte tenu de la faible valeur ajoutée des mesures sur les transects.

3.1.3. Résultats

3.1.3.1. Suivi du développement des végétaux

Pour chacun des huit quadras suivis par plante, des moyennes des mesures des différents individus composants le quadra ont été faites. Les quadras sont très homogènes. Les différences entre les plants sont très faibles et sont matérialisés par les écarts-types sur les figures. Ces moyennes ont été par la suite agrégées de différentes manières. Dans un premier temps en deux groupes : charge nominale (CN) et faible charge (FC), ce qui amène à voir l'impact de la charge (hydraulique forte et très forte et organique faible et forte) sur les paramètres mesurés.

Nombre de tiges par mètre carré

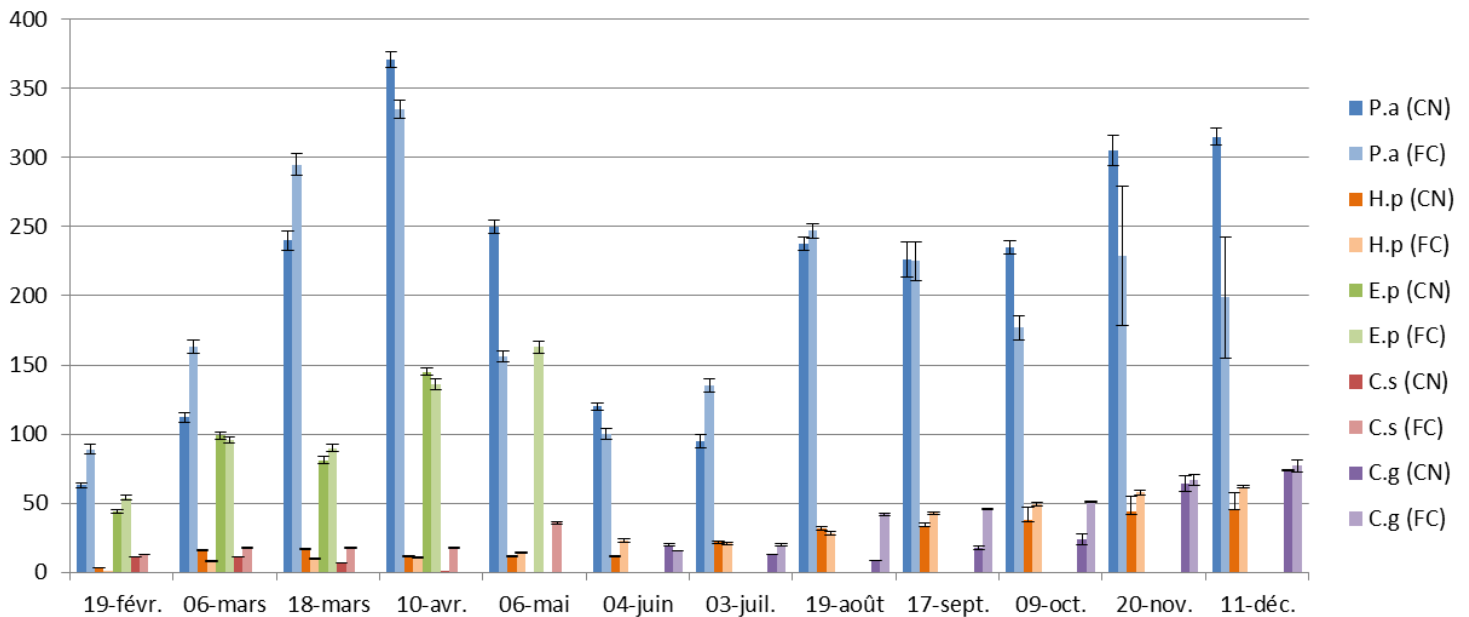


Figure 16 : Densités des végétaux en nombre de tiges par mètres carrés pour chacun des taux de charge (charge nominale CN et faible charge FC). P.a : *Phragmites australis*, H.p : *Heliconia psittacorum*, E.p : *Echinochloa polystachia*, C.s : *Costus spiralis*, C.g : *Cana glauca*.

Phragmites australis est la plante avec la densité de tiges la plus importante sur les filtres. Elle n'a aucun mal à s'installer sur les filtres et il ne semble pas y avoir de différence significative entre les différents taux de charges. Trois mois après la mise en place de l'expérimentation, un maximum de 350 tiges par m² a été relevé, ce qui correspond à la densité en métropole. Après ce pic, la densité diminue pour être minimale au mois de Juin. Un faucardage a été réalisé en juillet, suite auquel la densité recommence à augmenter mais à un rythme plus lent.

En novembre et décembre les lots à « faible charge » présentent des variations plus importantes à la moyenne, ainsi qu'un écart qui se creuse avec les lots à « charge nominale ». L'entrée d'adventices dans les quadras est la principale explication.

La densité des plants d'*Heliconia psittacorum* augmente très lentement. Après huit mois de suivi, on compte une cinquantaine de tiges au m². Les conditions de charge nominale impactent le développement de la plante : deux des quatre quadras en forte charge voient leurs plantes disparaître, le premier en mai (six plants/m²) et le second en juin (douze plants/m²). En revanche l'impact sur la taille des plantes n'est pas réellement significatif comme le montre les écarts types.

Dès le 2^{ème} mois *Echinochloa polystachia* a une densité de l'ordre de 100 tiges/m². A partir de mai, les tiges étaient tellement grandes et enchevêtrées qu'il n'était plus possible de les compter. La valeur de 150 tiges/m² est retenue. Il n'y a pas de différence liée au taux de charge. Un faucardage a été réalisé au mois d'août. L'entrelacs des tiges est tel qu'il forme un tapis au sol.

Costus spiralis n'a pas réussi à se développer dans les quadras en charge nominale. Très rapidement la densité diminue et au 3^{ème} mois il ne reste plus qu'une plante sur les 4 quadras recevant une charge nominale. Même si les conditions sur Bois d'Opale 2 sont particulièrement extrêmes, ce constat est rédhibitoire et les costus sont arrachés et remplacés par *Cana glauca*.

Cana glauca se développe mieux que les autres zingibérales. La densité s'établit autour de 75 plants/m² après six mois sur les filtres. Elle semble par contre perturbée elle aussi par les charges appliquées les plus fortes. Comme pour *Héliconia*, deux quadras à charge nominale voient leur plantes disparaître après deux mois. Par ailleurs, les plants des autres lots à forte charge ont un retard de croissance important durant les premiers mois. Leur densité est deux fois moindre que pour les quadras à faible charge. Cet écart disparaît aux 5èmes et 6èmes mois.

Hauteur moyenne (cm)

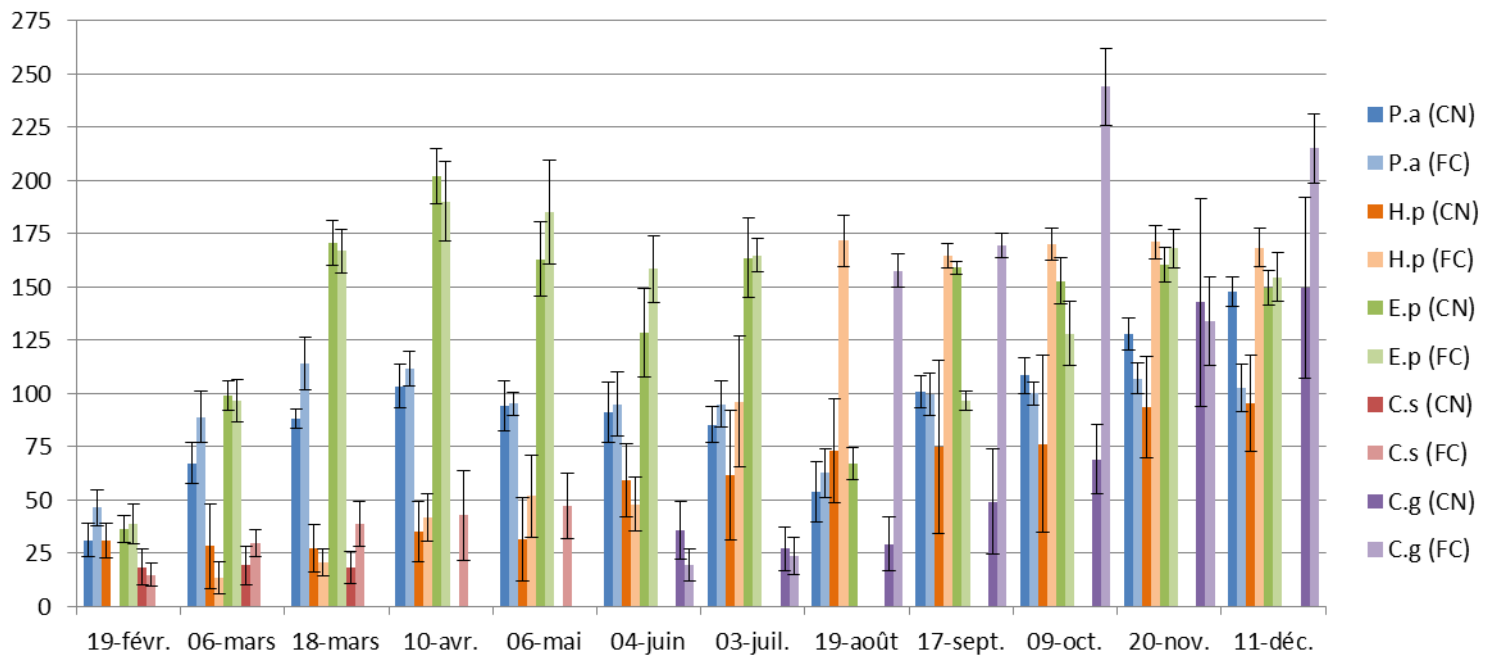


Figure 17 : Hauteur moyenne des végétaux en centimètre pour chacun des taux de charge (charge nominale CN et faible charge FC). P.a : *Phragmites australis*, H.p : *Heliconia psittacorum*, E.p : *Echinochloa polystachia*, C.s : *Costus spiralis*, C.g : *Cana glauca*.

Malgré leur bon développement au démarrage, les *Phragmites australis* restent petits, autour d'un mètre. En métropole il mesurent au moins le double. Il est possible que cette différence vienne de particularités de la sous-espèce locale. En revanche les rejets qui se développent suite au faucardage de juillet sont significativement plus grands et atteignent 1,5 mètre.

Les *Heliconia* poussent lentement. Après 5 mois, la croissance s'accélère pour les plants à faible charge, passant de moins de 50 cm début juin à plus d'1,5m en août. Certains individus font plus de 2m. A charge nominale la croissance des plantes est inhibée : à 6 mois elles sont deux fois plus petites que celles recevant de faibles charges. L'écart semble tout de même s'atténuer par la suite. Les variations de taille au sein de la population sont bien plus importantes à charge nominale (écarts-types), ce qui montre que certaines plantes ont une croissance inhibées par rapport à leurs voisins.

Les *Echinochloa* atteignent 2 m en 3 mois. Un faucardage a été réalisé au mois d'août et explique la chute constatée à ce moment là. Les plantes se développent très facilement et ont retrouvé leur taille adulte un mois plus tard.

Les *Cana* se développent très rapidement pour les plants en faible charge : 1,5 m au 3^{ème} mois, près de 2,5 au 5^{ème}. La brusque chute de taille observée en novembre est due à un faucardage qui a été

nécessaire dans certaines parties du filtre pour supprimer des nids de rongeurs (figure 18). En quelques semaines les plantes dépassent à nouveau les 2 mètres.

L'influence de la charge sur leur croissance est comparable à ce qui a été observé pour *Heliconia* : à charge nominale, la croissance est fortement impactée (un tiers de la taille des plants à faibles charges au 5^{ème} mois). Les variations autour de la moyenne sont également bien plus importantes. L'écart se résorbe tout de même rapidement puisque au 7^{ème} mois les plants à charge nominale font les 2/3 de la hauteur des plants à faible charge.



Figure 18 : Nid de rongeurs dans les quadras de *Cana glauca*. Photo Etiage.

Le diamètre des tiges (figure 19) des Poacées est stable dans le temps, à l'inverse de celui des zingibérales. Le diamètre des *Heliconia* passe ainsi de 1cm au mois de Mai à 3 cm en Juillet après que la croissance se soit accélérée. Cela s'explique par le mode de croissance des Zingibérales et la structure de leur tiges. Celles-ci sont composées d'un enroulement des pétioles des feuilles. Chaque nouvelle feuille part de la partie racinaire de la plante et vient donc élargir la tige.

Un des critères de sélection initial était justement le diamètre de la tige. La limite avait été fixée à 2 cm pour garantir un faucardage aisé, mais peut être amenée à évoluer dans une certaine mesure. Si le diamètre devient réellement gros le rôle mécanique s'en trouvera limité, en plus des difficultés de faucardage. Il semble se stabiliser autour de 3 cm (figure 19) ce qui reste acceptable. Après la fin du suivi, l'évolution du diamètre des tiges sera un paramètre à surveiller.

Les graphiques précédents montrent que les charges les plus élevées inhibent le développement des zingibérales, mais pas celui des poacées.

Par leur action mécanique les plantes favorisent les écoulements en limitant le colmatage de surface. Une densité de plantation initiale plus importante pourrait réduire l'impact des fortes charges, et ainsi améliorer le développement des végétaux sensibles aux fortes charges. Un ratio est calculé (12 plants m⁻² / 6 plants m⁻²) pour chaque taux de charge et chaque critère de développement (Figure 17).

A faible charge, il n'y a pas d'impact de la densité de plantation sur le développement des plantes. Le constat est le même à charge nominale pour les poacées ainsi que pour *Costus spiralis* et *Cana galuca*. En revanche pour *Heliconia psittacorum*, une densité de plantation plus importante favorise son développement à charge nominale. Les tiges sont 8 fois plus nombreuses, 3,5 fois plus hautes et 2 fois plus épaisses dans la partie plantée à 12 plants par mètres carré que dans celle plantée à 6.

Diamètre des tiges (cm)

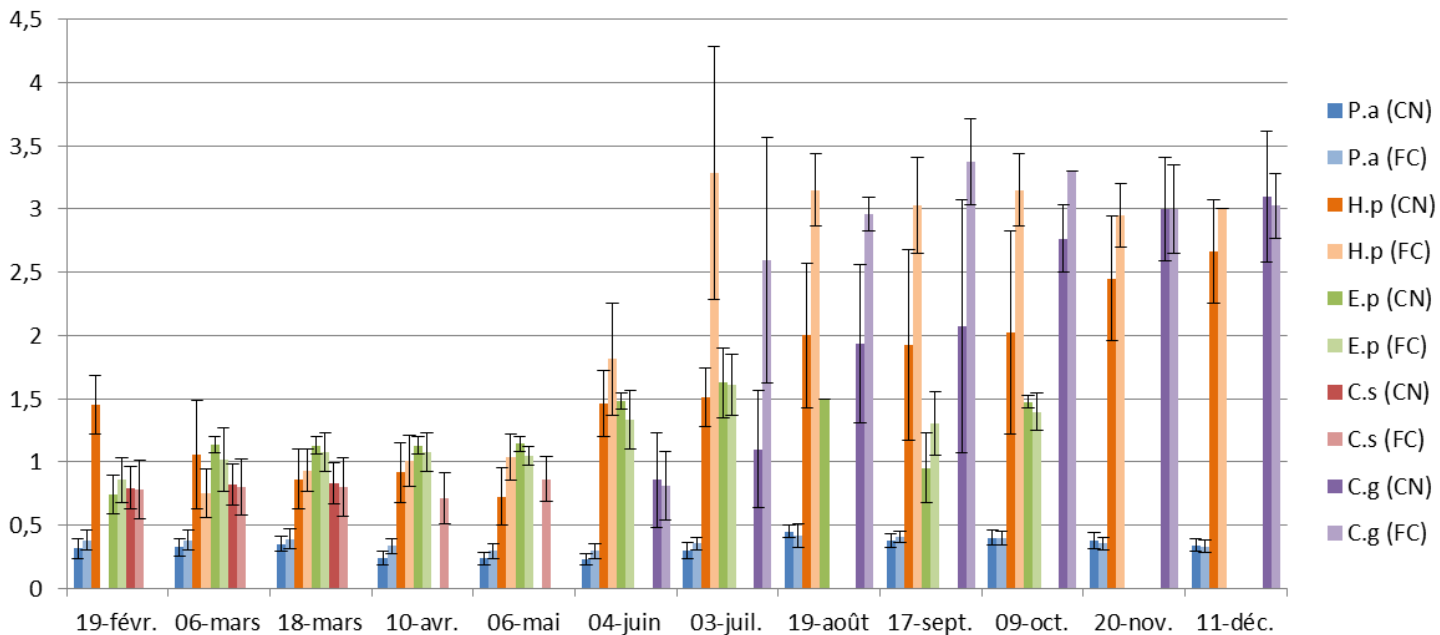


Figure 19 : Diamètre des tiges des végétaux en centimètre pour chacun des taux de charge (charge nominale CN et faible charge FC). P.a : *Phragmites australis*, H.p : *Heliconia psittacorum*, E.p : *Echinochloa polystachia*, C.s : *Costus spiralis*, C.g : *Cana glauca*.

En conclusion, le suivi du développement des végétaux en conditions réelles montre qu'il y a de fortes différences entre les plantes en fonction de leur famille botanique. Les Poacées ont un développement rapide tant en densité qu'en hauteur. Elles atteignent leur maturité après quelques mois. Elles ne sont pas impactées par les charges les plus élevées.

Les Zingibérales se développent plus lentement. Après un an de suivi elles ne semblent pas avoir fini leur croissance. Elles sont sensibles aux fortes charges, mais une densité de plantation plus importante pourrait améliorer leur développement (pour *Heliconia* en tout cas).

Les unes comme les autres ont atteint les valeurs minimales requises par la filière.

Ces données sont complétées par des relevés sur l'apparition des différents stades végétatifs pour définir le cycle végétatif de chaque espèce.

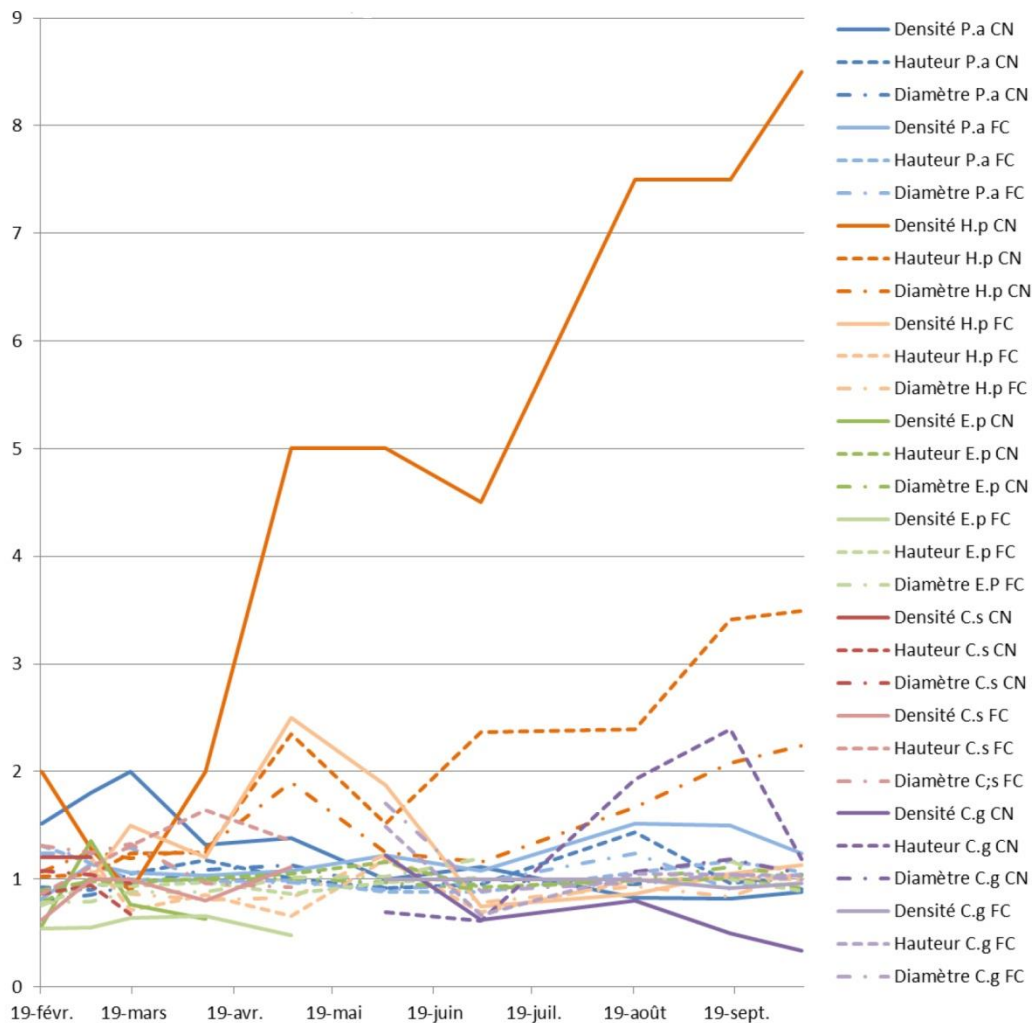


Figure 20 : Ratios 12 plants m² / 6 plants m² calculé pour chacun des critères des développements, a faible charge (FC) et charge nominale (CN). P.a : *Phragmites australis*, H.p : *Heliconia psittacorum*, E.p : *Echinochloa polystachia*, C.s : *Costus spiralis*, C.g : *Cana glauca*.

3.1.3.2. Cycles végétatifs et faucardage

Le cycle végétatif se définit comme la succession d'étapes dans le développement des plantes. On distingue schématiquement 4 phases :

- la croissance végétative, depuis la germination d'une graine ou depuis l'appartion d'un rejet dans le cas d'une multiplication végétative. Elle dure jusqu'à ce que la plante ait atteint un niveau de développement qui lui permette de produire suffisamment d'énergie pour se reproduire.
- La floraison, qui correspond à la phase de multiplication sexuée de la plante.
- La nouaison ou fructification, conduit à la production d'un œuf (graine).
- La sénescence, la plante ayant rempli sa fonction reproductrice meurt petit à petit.

Ces différentes phases ont une durée variable d'une plante à l'autre et varient aussi en fonction du type de climat.

Le climat étant relativement stable toute l'année dans la zone tropicale, les plantes ont des cycles végétatifs très différents de ceux de la métropole, marqués par la mort de tous les végétaux en hiver.

L'étude des cycles végétatifs des plantes est utilisée comme base pour les discussions sur les fréquences de faucardage des végétaux retenus afin de minimiser les charges d'entretien des filtres. Le tableau suivant présente pour chaque plante la date d'apparition des différentes phases du cycle végétatif. Il est à mettre en relation avec les figures 16, 17 et 19 présentant l'évolution des critères morphologiques des végétaux.

	Février		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre	
	1->15	16->28	1->15	16->31	1->12	13->30	1->17	18->31	1->14	15->30	1->12	13->31	1->16	17->31	1->13	14->30	1->18	19->31	1->15	16->30	1->13	14->31
<i>Phragmites australis</i>												F										
<i>Heliconia psittacorum</i>																						
<i>Echinochloa polystachia</i>														F								
<i>Costus spiralis</i>																						
<i>Cana glauca</i>																						

Tableau 16 : Date d'apparition des différents stades végétatifs. En orange est représentée la floraison, en beige la sénescence. « F » correspond au faucardage.

La phase de croissance de *Phragmites australis* dure deux mois. Au 3^{ème} mois, la plante entre en floraison, ce qui correspond à la période où les plantes sont les plus denses sur les filtres (350 tiges/m²). La floraison dure quelques semaines avant que la plante n'entre en sénescence. On voit bien la densité des tiges diminuer à partir du mois de mai pour finir à une centaine de tiges par mètre carré en juin. Le cycle végétatif de *Phragmites australis* est très court en milieu tropical, il dure 3,5 mois. Le faucardage réalisé au début du mois de juillet pour relancer le développement de la plante : la densité augmente à nouveau et la plante repart pour un nouveau cycle.

Il est exceptionnel de pouvoir observer la floraison de *Phragmites australis* en Guyane d'après le bureau d'étude Etiage qui l'observait pour la première fois. En toute logique, elle aurait dû être observée à nouveau en août-septembre mais ça n'a pas été le cas. Le second cycle est donc bloqué, comme le montre l'évolution des données morphologiques : taille et densité continue à croître, comme observé lors du cycle précédent. Un facteur exogène peut jouer un rôle important dans la floraison : la pluviométrie, très forte en avril-mai (jusqu'à 600 mm/mois) puis beaucoup plus faible en août-septembre (80 mm/mois), comme le montre le Klimadiagramm figure 10.

Echinochloa polystachia rentre encore plus rapidement en floraison, après 1,5 mois de croissance seulement. La floraison est également très courte mais il n'a pas été constaté de sénescence. A cause de la formation d'un tapis très dense à la surface du lit, le suivi de la densité a été compliqué et a finalement été arrêté avant que l'on puisse constater une baisse de la densité sur le filtre. Un faucardage a été réalisé au début du mois d'août pour contenir la plante dans les filtres. 1,5 mois plus tard, les végétaux fleurissaient à nouveau, le cycle s'est donc bien répété.

Les zingibérales entrent en floraison au cours du 3^{ème} mois. Leur floraison est très longue, supérieure à neuf mois. De ce fait, la durée de leur cycle végétatif n'a pas pu être déterminé, mais il s'étale sur une période supérieure à la durée de l'étude. Il sera nécessaire de continuer à suivre ces plantes pour le déterminer précisément.

L'étude du cycle végétatif des plantes tropicales montre que la sénescence correspond à une diminution de la densité de plantes sur les filtres. Un faucardage à la fin d'un cycle permet de relancer une période de croissance et ainsi de maintenir une bonne densité.

Les poacés ont un cycle végétatif très court qui induit une fréquence de faucardage très élevée : deux à trois passages dans l'année.

A l'inverse, les zingibérales ont un cycle beaucoup plus long. Il n'a pas pu être déterminé mais la fréquence de faucardage à prévoir est supérieure à une année.

3.1.3.3. Parties racinaires et développement horizontal

Le développement des plantes à la surface des filtres doit être le plus homogène possible pour que l'infiltration des eaux usées mobilise la plus grande surface de filtre. Les potentialités du système sont ainsi optimisées. Dans le cas d'un développement en touffe, la surface d'infiltration est limitée à la surface des touffes. Entre ces dernières, la couche de dépôt empêche l'infiltration.

Pour appréhender la manière dont les plantes vont coloniser la surface des filtres, l'étude des parties racinaires des végétaux a été couplée aux observations faites sur les filtres.



Figure 21 : Rhizome de *Phragmites australis*. Photo Etiage

Le système racinaire de *Phragmites australis* présente des rhizomes étendus comme le montre la figure 21. Ce qui lui permet d'éviter un développement en touffe. Sa multiplication végétative se fait par émission de rejets depuis les rhizomes ainsi que par des stolons (grandes tiges rampantes) lui permettant de coloniser rapidement de grands espaces.



Figure 22 : Parties racinaires d'*Echinochloa polystachia*. Photo Etiage.

Le système racinaire d'*Echinochloa polystachia* est de type fasciculé, correspondant à un important réseau de racines avec des rhizomes très peu développés. Sa multiplication végétative se fait essentiellement par marcottage. Le marcottage est une propriété des tiges de certaines plantes dont les cellules épidermiques ont la capacité à se différencier en tissus racinaire au contact du sol. Assez

rapidement, la plante crée un entrelac de tiges et de racines très dense qui forme comme un tapis au sol (voir figure 22). De ce fait, les *Echinochloa* sont des plantes colonisatrices par excellence, qui se développent très rapidement, peuvent coloniser de grands espaces et étouffent les plantes avec lesquelles elles sont en compétition. En revanche, leur rôle mécanique sera limité car situé en surface du sol.



Figure 23 : Exemple de « tapis » formé par *Echinochloa polystachia*. Photo Etiage.

Heliconia psittacorum possède un système racinaire rhizomateux plongeant, mesurant entre 10 et 20 cm de profondeur. Des racines partent du rhizome horizontalement. Communément, un plant produit plusieurs rhizomes qui partent dans des directions différentes. Les rejets poussent généralement loin de la tige mère, ce qui garantit un développement homogène. La multiplication végétative se fait uniquement à partir des rhizomes. La colonisation d'une grande surface se fait donc très lentement.



Figure 24 : Rhizomes et rejets d'*Heliconia psittacorum*. Photos Etiage.

Costus spiralis présente un système racinaire rhizomateux bulbeux. Les bulbes supportent mal la submersion et finissent par pourrir s'ils restent sous l'eau trop longtemps. La multiplication végétative se fait essentiellement par les bulbes et les rejets sont donc très proches de la tige mère, donnant un développement en touffe. Une fois le massif bien installé, des racines traçantes peuvent émettre des rejets à plus d'un mètre.



Figure 25 : Bulbe rhizomateux de *Costus spiralis*. Photo Etiage.

Canna glauca possède un système racinaire mixte : il produit des rhizomes courts et chaque nouveau pied possède des racines fasciculées d'où partent des radicelles. La multiplication végétative se fait par les rhizomes. Son développement est localement très dense et s'étale très lentement sans pour autant faire de touffe.



Figure 26 : Système racinaire de *Cana glauca*. Photo Etiage.

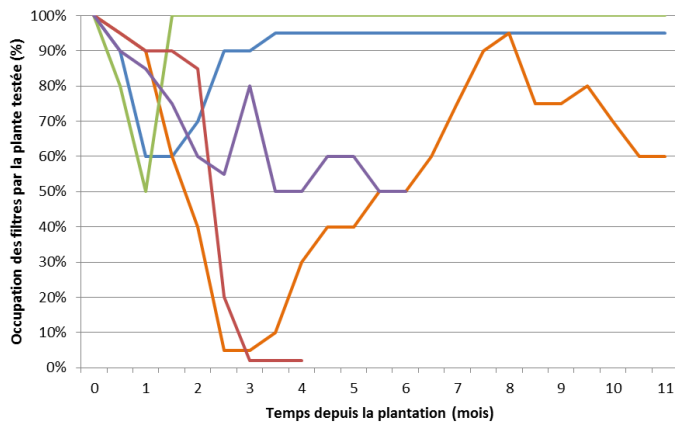
En conclusion l'étude des parties racinaires des végétaux permet de comprendre le type de système racinaire associé à la stratégie de colonisation de chaque espèce. Il faudra privilégier les plantes avec des rhizomes longs favorisant ainsi un développement homogène.

En revanche, les plantes se développant essentiellement par marcottage sont à proscrire : la formation de tapis comme celui que présente les *Echinochloa* ne permettra pas d'avoir d'action mécanique des tiges.

3.1.3.4. Compétition interspécifique pour l'occupation des filtres

La compétition entre les plantes sélectionnées et les adventices sur les filtres a été suivie directement par une estimation des ratios d'occupation des filtres (surface du filtre occupé par la plante testée, en pourcentage, voir figure 27) et de manière indirecte par un relevé des temps passés sur chaque espèce lors des tâches d'exploitation (tableaux 16).

Ratios d'occupation des filtres à charge nominale



Ratios d'occupation des filtres à faible charge

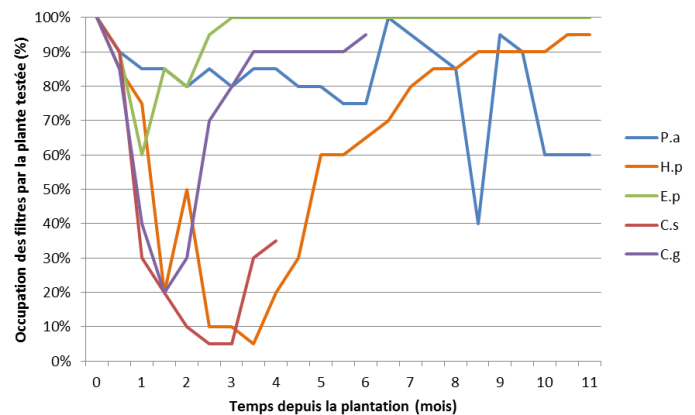


Figure 27 : ratios d'occupation des filtres pour chaque espèce, à charge nominale (CN) et faible charge (FC).
 P.a : *Phragmites australis*, H.p : *Heliconia psittacorum*, E.p : *Echinochloa polystachia*, C.s : *Costus spiralis*, C.g : *Cana glauca*.

Il faut noter que les travaux d'arrachage des adventices (sarclage) n'ont pas été homogènes. L'objectif était de permettre aux végétaux de se développer, les besoins des plantes n'étant pas les mêmes. L'aspect visuel n'entrait pas en compte.

Globalement les besoins en entretien étaient beaucoup plus faibles à charge nominale : d'une part du fait de la présence d'une lame d'eau importante lors des phases d'alimentation, d'autre part en raison des plaques de plexiglas qui constituaient une barrière physique à l'entrée des adventices dans les parties exploitées du filtre.

Un autre constat général est que le faucardage est une tâche chronophage amenée à se répéter, alors que le sarclage n'intervient que lors du démarrage de la station. De ce point de vue les Zingibérales présentent un avantage indéniable.

FC	1 ^{er} mois	2 ^{ème} mois	3 ^{ème} mois	4 ^{ème} mois	5 ^{ème} mois	6 ^{ème} mois	7 ^{ème} mois	8 ^{ème} mois	9 ^{ème} mois	10 ^{ème} mois	11 ^{ème} mois	Total
<i>Echinochloa polystachia</i>				00:15		06:30						06:45
<i>Phragmites australis</i>	00:35	01:25	00:20	00:15	02:15		00:20	01:15				06:25
<i>Heliconia psittacorum</i>	01:25	02:00	00:25	00:45								04:25
<i>Costus spiralis</i>	00:20	05:00	01:30	02:15								09:05
<i>Cana glauca</i>				02:30		00:20						02:50

CN	1 ^{er} mois	2 ^{ème} mois	3 ^{ème} mois	4 ^{ème} mois	5 ^{ème} mois	6 ^{ème} mois	7 ^{ème} mois	8 ^{ème} mois	9 ^{ème} mois	10 ^{ème} mois	11 ^{ème} mois	Total
<i>Echinochloa polystachia</i>						04:15						04:15
<i>Phragmites australis</i>		00:35	00:20	00:10	02:15							03:20
<i>Heliconia psittacorum</i>			00:20									00:20
<i>Costus spiralis</i>	00:40		00:35	02:15								03:30
<i>Cana glauca</i>												00:00

Tableau 17 : Temps passés à l'entretien des filtres à charge nominale (CN) et faible charge (FC). En noir le sarclage des adventices, et en rouge les tâches de faucardage.

Phragmites australis peine à se maintenir sur le filtre. Elle y parvient au prix d'une exploitation laborieuse : sarclage et faucardage représentent plus de 10 heures d'entretien (CN+FC). Même lorsqu'elle semble bien installée, les adventices arrivent à revenir s'installer.

Echinochloa polystachia, en revanche, s'impose sans aucun problème et n'est jamais inquiétée. Par contre, elle est très pénible à faucher. L'exploitant reconnaît qu'il n'était pas « armé » pour cette tâche. Il est possible, en trouvant les outils adéquats, de réduire cette durée.

Comme vu précédemment, il faut s'attendre à devoir la faucher plusieurs fois par an, ce qui entraînera des coûts d'exploitation importants.

Heliconia psittacorum a nécessité plus de 4h30 d'entretien lors de la phase de démarrage. L'évolution du ratio d'occupation des filtres amène d'ailleurs à s'interroger sur la nécessité de cet entretien lors des premiers mois. On constate en effet qu'une quinzaine de jours après chaque entretien, les adventices reprennent le dessus, alors que finalement, une fois installée, *Heliconia psittacorum* s'impose petit à petit. A charge nominale toutefois elle semble perdre du terrain au cours des dernières semaines.

Costus spiralis est la plante qui a reçu le plus d'entretien (plus de 12 heures), ce qui n'a pas empêché qu'elle se fasse complètement dominer par les adventices. Non compétitive, elle est donc écartée.

Cana glauca n'a bénéficié d'aucun entretien à charge nominale et s'impose d'elle-même. L'installation de nids de rongeur dans ses racines lui pose problème, tout comme le fauchage qui s'en suit, comme le montre les variations plus importantes lors des 2 derniers mois.

3.1.3.5. Conclusion

Cette étude sur les compétitions interspécifiques montre que les espèces à développement lent nécessitent généralement un accompagnement lors de la phase de démarrage. Après quelques mois, une fois installées, certaines espèces s'imposent et sont retenues (*Heliconia psittacorum* et *Cana glauca*) alors que d'autres n'y parviennent pas et sont écartées (*Costus spiralis*).

Le fauchage représente une charge d'exploitation qui n'est pas négligeable. Les plantes à cycles végétatifs longs présentent donc des avantages indéniables en termes de simplicité d'exploitation et sont donc préférées aux plantes à cycles courts.

Une solution pour limiter l'entretien lors des phases de démarrage pourrait être une association entre *Phragmites australis*, à développement rapide mais qui n'arrive jamais à occuper pleinement le filtre, avec les *Heliconia* ou *Cana* au développement plus lent au démarrage. Ces dernières, une fois installées, prendraient le dessus sur les phragmites qui seraient amenées à disparaître.

Ces résultats, en particulier sur la compétition avec les adventices et l'ampleur des travaux de sarclages sont à modérer. Les conditions en Guyane ne sont pas généralisables à l'ensemble des DOM. L'âge de la station (trois ans) et la proximité avec la forêt amazonienne favorise l'émergence de plantes adventices. Le climat est équatorial et non tropical.

	<i>Phragmites australis</i>	<i>Echinochloa polystachia</i>	<i>Costus spiralis</i>	<i>Heliconia psittacorum</i>	<i>Canna glauca</i>
Densité	Forte	Forte	?	Moyenne à faible (à terme ?)	Moyenne (à terme ?)
Taille	Petite (1m)	Bonne (1,8m)	?	Bonne (1,8m)	Grande (> 2m)
Diamètre tiges	Petit (0,4 cm)	Bon (1cm)	Bon (0,8 cm) à terme ?	Gros (3cm)	Gros (3cm)
Développement rapide	Très rapide	Très rapide	Très lent	Lent	Moyen à lent
Développement homogène	Homogène	Homogène	Touffe	Homogène	Homogène mais localement dense
Fréquence de faucardage (cycle végétatif)	3-4 mois	3-4 mois	?	? > 1an	? > 1an
Compétitivité vis-à-vis des adventices	Ne s'installe jamais complètement	Ultra compétitive	Pas compétitive	Indépendante peu compétitive	Compétitive
Marcottage	Non	Très fréquent	Non	Non	Non

Tableau 18 : Récapitulatif des observations des différentes caractéristiques étudiées lors du suivi *in situ*.

3.1.4. Protocole transférable

L'étude réalisée avec Etiage était ambitieuse. Une quantité importante de données a été collectée, et toutes n'ont pas été valorisées. Il est intéressant de proposer un protocole simplifié de suivi des végétaux, qui permette à des personnes n'ayant pas l'habitude de travailler avec les plantes de fournir un retour d'expériences sur les végétaux utilisés sur leur système.

La méthode des quadrats est simple et indispensable. En s'en tenant à deux quadrats de 50x50, représentatifs de l'état moyen du filtre, dans lesquels le nombre de tiges par mètre carré et la hauteur moyenne des plantes est relevé, le travail peut être fait en 30 minutes. La proportion d'adventices présentes dans le quadrat est intéressante à suivre. La fréquence idéale est de faire un suivi par mois. Dans le cas de plantes à développement lent, tous les 2-3 mois peut être suffisant.

Il est intéressant également de noter les dates d'apparition des principales phases du cycle végétatif : floraison et sénescence afin de pouvoir adapter la fréquence de faucardage. Cela peut se faire machinalement lors des tâches d'exploitation.

Enfin, une fois les plantes bien installées, les observations des parties racinaires sont riches d'enseignement, bien que demandant plus de connaissances pour être exploitées. Il est nécessaire d'utiliser un outil (type pelle ou pioche) pour sortir les organes souterrains sans les arracher.

Multiplier les prises de vues sur site est toujours intéressant à posteriori pour valider des impressions et des tendances.

Des exemples de protocoles et de fiche de suivis sont disponibles dans l'annexe 2.

3.2. Suivi *in situ* à Mayotte

La station de Hachenoua est la plus ancienne station de filtres plantés dans les DOM (2006). En parallèle de l'organisation des tests batch réalisés en novembre 2014, le Syndicat Intercommunal des Eaux et de l'Assainissement de Mayotte (SIEAM) a proposé que soit testé à Hachenoua en taille réelle les plantes endémiques de Mayotte sélectionnées pour les tests batch.

Les filtres ont été plantés avec *Clinogyne commorensis*, *Schoenoplectus littoralis*, *Cyperus sp.* et *Thysanolaena maxima*. Le suivi a été réalisé par le CNBM conjointement avec la pépinière SEV. En raison du faible entretien des filtres, la fréquence des suivis a été fixée à trois mois. Pour la même raison, les données chiffrées obtenues ne reflètent pas une situation d'exploitation normale et ne sont pas présentées.



Figure 28 : Evolution visuelle du filtre planté avec *Clinogyne commorensis* à Hachenoua. A gauche Juin 2015, au centre septembre et à droite décembre 2015. Photos : CNBM

Ce suivi aura tout de même permis de valider l'utilisation de *Cinogyne commorensis* sur les filtres dans l'océan indien. Les plantes se sont bien développées atteignant 1,4 m après trois mois. Suite à l'absence d'exploitation les adventices ont pris le dessus (photo du milieu figure 28). Un passage a tout de même été fait, qui a permis de retrouver un bon développement des végétaux.



Figure 29 : *Schoenoplectus littoralis* (G) et *Cyperus sp.* (D) en décembre à Hachenoua.

Schoenoplectus littoralis et *Cyperus sp.* n'ont pas eu un développement satisfaisant sur le filtre. Leur physionomie de plantes-tiges ne leur permet pas d'être compétitives face aux adventices sur les filtres. En l'absence de feuilles, trop de lumière atteint le sol.



Figure 30 : Parties racinaires de *Clinogyne comorensis*. Photos CNBM.

Clinogyne comorensis présente un système racinaire rhizomateux de type sympodial, organisé autour de rhizomes peu développés, qui croissent par développement des bourgeons latéraux d'où partent une succession de tiges unies entre elles.

Les racines sont fibreuses, certaines d'entre elles sont tubérisées (photo de droite) et développent un organe de réserve pour s'adapter aux changements de conditions, en l'occurrence à la saison sèche de Mayotte où la plante disparaît dans le milieu naturel. L'apport régulier d'eau sur le filtre leur a permis de passer la saison sèche sans encombre.



Figure 31 : Marcottage sur les tiges de *Clinogyne comorensis*.

Certaines tiges de *Clinogyne comorensis* (fréquemment celles portant les organes floraux) ont tendance à marcotter quand elles entrent en contact avec le sol.

La description des parties racinaires laisse à penser que le développement ne sera pas très homogène à la surface du filtre. La capacité à marcotter présente également le risque de créer un entrelacs qui limitera l'action mécanique de la plante.

Clinogyne comorensis reste tout de même une plante de substitution intéressante, même si elle apporte moins de garantie que *Heliconia psittacorum*.

4. Conclusion de l'étude sur les plantes

Cette étude a été l'occasion de décrire une quinzaine de caractéristiques que doivent présenter les plantes de manière à assurer une action mécanique sur la couche de boue qui s'accumule sur le système limitant ainsi le colmatage du système.

Des végétaux de 3 groupes différents ont été étudiés.

- Famille des Poacées (ou graminées, ordre des Poales)

Phragmites australis ainsi que *Thysanolaena maxima*, *Echinochloa polystachia*, *Brachiaria decumbens* sont des Poacées. Elles paraissent intéressantes pour leur densité de tiges et leur développement rapide. Leur étude a montré qu'en raison de cycles végétatifs très courts en milieu tropical, la fréquence de faucardage devait être augmentée pour maintenir une densité importante, ce qui entraîne un surcoût important. Leur mode de développement n'a pas donné satisfaction non plus : certaines variétés présentent un développement hétérogène (effet touffe), d'autres s'étalent par marcottage ce qui annule leur rôle mécanique (effet tapis). Pour finir, leur développement est tel qu'en l'absence d'entretien elles présentent potentiellement un risque invasif.

Aucune n'a finalement été retenue. L'ordre des Poacées est très large et des espèces auxquelles nous n'avons pas pensées sont certainement intéressantes. En particulier si on imagine des systèmes avec une valorisation agricole (plantes fourragères).

- Des végétaux de la famille des Cypéracées (ordre des Poales également).

Il n'a pas été possible d'étudier de cypéracées lors du suivi in situ mais des retours de suivi simplifié comme proposé dans la partie 3.1.4 sont attendus en 2016. Des quatre espèces étudiées lors des tests batch *Cyperus alternifolius* est la seule à être écartée formellement puisqu'elle présente un risque invasif selon la DEAL de la Martinique. *Cyperus alopercuroides* et *Cyperus papyrus* pourraient convenir. Plus sensibles aux stress générés par la filière que les Zingibérales, elles se comportent cependant mieux que les Poacées qui ont été testées. Leur densité à maturité est intermédiaire entre celle des Poacées et des Zingibérales, elles sont donc une piste intéressante pour les lits de séchages plantés qui seront installés prochainement dans les DOM.

- Ordre des Zingibérales (voir figure 32)

L'ordre des Zingibérales compte huit familles. Trois d'entre elles n'ont pas été étudiées pour différentes raisons : risque phytosanitaire (Musacées : les bananiers), taille (Stelitziacées : l'arbre du voyageur) ou contraintes géographiques (Lowiacées : présentes en Asie essentiellement).

Des représentants des cinq familles restantes ont été étudiées, deux ont été écartées :

- les Costacées (*Costus spiralis* et *Costus speciosus*) en raison d'une trop faible compétitivité sur les filtres et d'une sensibilité des rhizomes aux eaux stagnantes,
- les Zingibéracées (*Alpinia purpurata*) qui n'ont pas supporté les conditions des filtres.

Les représentantes des trois dernières familles se sont avérées les plus intéressantes à l'issue de cette étude. Il s'agit de :

- *Heliconia psittacorum*, de la famille des Heliconiacées. Son développement est peut-être le plus lent des trois mais est compensé par une meilleure répartition à la surface des filtres.
- *Canna indica* et *Canna glauca*, de la famille des Cannacées. Leur développement est très dense, s'approchant plus d'un développement en touffe que les autres.
- *Clinogyne comorensis* de la famille des Marantacées. Elle se développe assez rapidement, mais la tige qui porte les fleurs a une tendance à marcotter qui pourrait présenter un risque de formation d'un « tapis » au sol.

Ces plantes apportent un surplus de robustesse au système car elles peuvent s'adapter à un large spectre de conditions (résistance au stress hydrique, au stress anoxique) et sont peu gourmandes en

entretien (fréquence de faucardage faible au-delà de 12 mois). En revanche, elles demanderont un accompagnement lors de la phase de démarrage pour limiter la compétition avec les adventices.

Heliconiacées et Cannacées sont très utilisées comme plantes ornementales. Chacune présente de multiples cultivars (*Heliconia psittacorum* en compterait plus d'un millier selon Fournet, 2002). La même espèce présente donc des nuances d'un DOM à l'autre (couleur mais aussi taille parfois). Il est impossible de ne retenir que deux ou trois espèces qui présenteraient strictement les mêmes traits à travers toute la zone tropicale.

Par ailleurs, même si ce sont des plantes ornementales qui ont donc une valeur commerciale, toutes les espèces ne sont pas présentes dans l'ensemble des DOM. Il est important de pouvoir proposer des solutions locales présentes dans chacun des territoires de manière à éviter d'avoir recours à une espèce exotiques du point de vue du DOM considéré.

Les familles des Heliconiacées et des Cannacées sont très homogènes, comme on a pu le voir en remplaçant *Canna indica* par *Canna glauca* en Guyane. La liste des plantes de substitution a été élargie aux autres espèces des familles des Heliconiacées et Cannacées sur la seule base de leurs critères morphologiques (taille, rétention d'eau par les parties aériennes ...) en présumant des autres critères en vertu des performances de leur cousines.

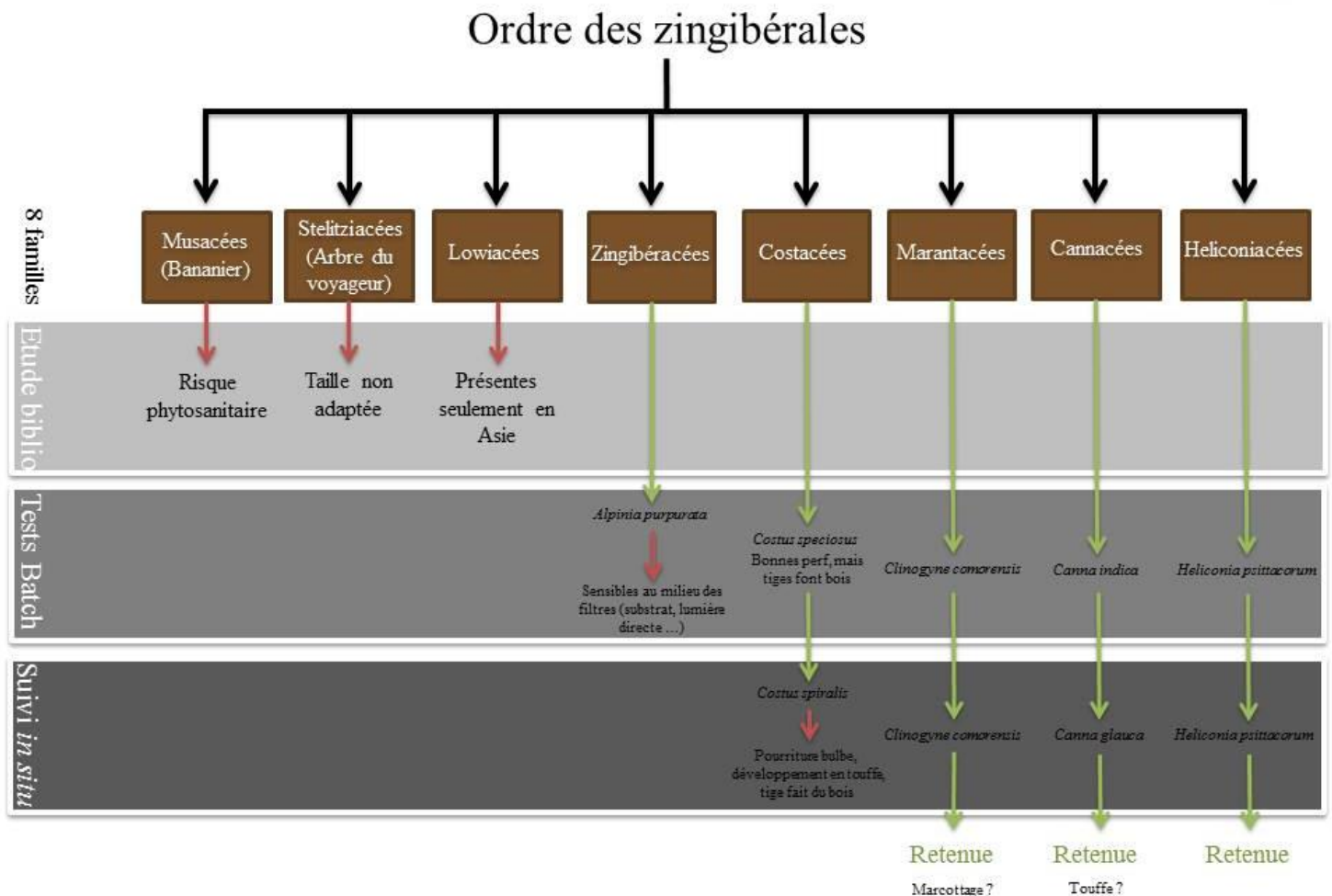


Figure 32 : Conclusions de l'étude sur l'ordre des Zingibérales.

Le tableau suivant synthétise pour chacun des DOM les plantes de substitution proposées. Dans le choix des végétaux à retenir pour une station, l'aspect phytosanitaire doit être pris en compte. En effet la famille des musacées (banancier) fait partie de l'ordre des zingibérales. Une autre zingibérale

utilisée sur des filtres à proximité d'une bananeraie, peut se transformer en réservoir pour pathogènes ou ravageurs et ainsi entraîner un risque phytosanitaire important pour l'exploitation. D'après la FRODON de la Martinique, parmi les différentes plantes retenues, les Heliconiacées pourraient présenter un risque et ne devraient pas être mise en place à moins d'un kilomètre d'une plantation. A l'inverse les Cannacées présentent peu de risques et doivent être privilégiées dans ces cas-là.

Espèces	Martinique	Guadeloupe	Mayotte	La Réunion	Guyane
<i>Clinogyne comorensis</i>	X	X	CBNM (2011)	X	X
<i>Canna indica</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	CBNM (2011)	CBNM (2012)	Funk & al.(2007)
<i>Canna glauca</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	CBNM (2011)	CBNM (2012)	Funk & al.(2007)
<i>Canna x generalis L.H. Bailey</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	CBNM (2011)	CBNM (2012)	X
<i>Heliconia psittacorum</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	CBNM (2011)	X	Funk & al.(2007)
<i>Heliconia rostrata</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	CBNM (2011)	CBNM (2012)	X
<i>Heliconia wagneriana</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	Cultivé	X	X
<i>Heliconia acuminata</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	X	X	Funk & al.(2007)
<i>Heliconia bihai</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	X	CBNM (2012)	Funk & al.(2007)
<i>Heliconia stricta huber</i>	X	X	X	CBNM (2012)	X
<i>Cyperus papyrus</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	Cultivé	X CBNM	Cultivé
<i>Cyperus dives delile/alopercurioides</i>	Fournet (2002)	Fournet (2002)	X	CBNM (2012)	X
<i>Cyperus alternifolius</i>	X DEAL	X DEAL	X	CBNM (2012)	X
<i>Phragmites mauritianus</i>	X	X	X	CBNM (2012)	X

Tableau 19 : Végétaux de substitution à *Phragmites australis* dans la zone tropicale.

Pour chacun des DOM est précisée la flore de référence où la plante est mentionnée. Les croix rouges correspondent à une absence de la plante ou à une réticence des services de l'état quant à son utilisation.

5. Glossaire

Anoxie : un milieu anoxique est dépourvu d'oxygène dissous. Il reste de l'oxygène lié à des molécules (comme à l'azote dans le cas des nitrates), et qui disponible uniquement pour certaines bactéries qui ont la capacité à utiliser l'oxygène fixé pour leur respiration.

Edaphique : relatif à la nature du sol

Fluorescence : émission lumineuse provoquée par l'excitation d'une molécule, généralement par absorption d'un photon, immédiatement suivie d'une émission spontanée d'un second photon de longueur d'onde différente du premier.

Macrophytes: ensemble des plantes aquatiques visibles à l'œil nu.

Marcottage : méthode de multiplication végétative basée sur la rhizogenèse sur les parties aérienne de la plante mère.

Plantes non ligneuses : plantes qui ne produisent pas ou peu de lignines, macromolécules responsable de la rigidité des végétaux et entrant dans la composition du bois. Par extension on entend par plantes non ligneuses, les plantes qui ne produisent pas de bois.

Plasmolyse : état cellulaire résultant d'une perte d'eau provoquée par les phénomènes d'osmose.

Rhizome : tige souterraine qui sert à la fois d'organe de stockage et de reproduction par voie végétative.

6. Sigles & Abréviations

ATP	Adenosine Tri-Phosphate : molécule présente dans tous les organismes vivants connus, et qui fournit par hydrolyse l'énergie nécessaire aux réactions chimiques métaboliques.
Chl a	Chlorophylle a : pigment photosynthétique qui capte les photons
CNBM	Conservatoire National Botanique des Mascarin (Réunion)
CR	Centre Réactionnel : partie du photosystème II qui fait le lien entre l'antenne qui capte les photos et un accepteur d'électrons qui lui est associé, la Quinone A.
DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DOM	Département d'Outre-Mer
EHN	Electrode à Hydrogène Normalisée
FPR, FPV	Filtre Plantés de Roseaux, de Végétaux
FPVv	Filtre Plantés de Végétaux à écoulement vertical
Fv/Fm	Fluorescence Variable sur Fluorescence Maximale, correspond au rendement maximal de la photochimie primaire (jP0)
Irstea	Institut national de recherche en science et technique pour l'environnement et l'agriculture
JIP-test	Acronyme désignant l'analyse des courbes de transition de la fluorescence
MO	Matières Organiques
NADP, NADPH	Nicotinamide Adénosine Di nucléotide Phosphate
ODE,OE	Office De l'Eau
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
PEA	Plant Efficiency Analyzer
Pi, Pi_{ABS}	Indice de Performance
PSI, PSII	Photosystème 1 et 2
QA	Quinone A (voir CR)
SEV	Société espace vert Mayotte
sp.	<i>Species</i> (latin), s'utilise quand l'espèce n'a pas été identifiée
T0, t0	temps 0, initial

7. Bibliographie

Appenroth, K. -J, J Stöckel, A Srivastava, et R. J Strasser, 2001 : Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrhiza* as probed by OJIP chlorophyll a fluorescence measurements. *Environmental Pollution* 115, n° 1 (novembre 2001): 49-64.

Brix, H., 1997 : Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands ? *Wat.Sci. Tech.* 35, 11-17.

Chaves, M.M., J.S. Pereira, J. Maroco, M.L. Rodrigues, C.P.P. Ricardo, M.L. Osório, I. Carvalho, T. Faria, et C. Pinheiro, 2002 : How Plants Cope with Water Stress in the Field. *Photosynthesis and Growth. Annals of Botany* 89, n° SPEC. ISS. (2002): 907-16.

Conservatoire Botanique National de Mascarin (Boulet V. coord.) 2011. – *Index de la flore vasculaire de Mayotte (Trachéophytes) : statuts, menaces et protections.* - Version 2011.1 (mise à jour du 01 août 2011). Conservatoire Botanique National de Mascarin, Antenne de Mayotte - Coconi - Disponible à « <http://floremaore.cbnm.org> ».

Conservatoire Botanique National de Mascarin (Boulet V. coord. et auteur principal) version 2012 - Index de la flore vasculaire de la Réunion (Trachéophytes) : statuts, menaces et protections. - . Disponible à "<http://flore.cbnm.org>".

Cornelissen, J.H.C., S.Lavorel, E.Garnier, S.Diaz, N.Buchmann, D.E Gurvich, P.B.Reich, H. ter Steege, H.D. Morgan, M.G.A. van der Heijden, J.G. Pausas and H.Poorter, 2003 : A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwilde. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51, 335 – 380.

Cornic, Gabriel, 2014 : L'émission de fluorescence chlorophyllienne. Régulation de l'activité du PSII et estimation du flux d'électrons dans les thylakoïdes sur des feuilles intactes. *Laboratoire Ecologie Systematique et Evolution, Université Paris Sud.* 13p.

Darwish, Majd, Félicie Lopez-Lauri, Mohamed El Maataoui, Laurent Urban, et Huguette Sallanon, 2014 Pretreatment with alternation of light/dark periods improves the tolerance of tobacco (*Nicotiana tabacum*) to clomazone herbicide. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 134 (5 mai 2014): 49-56.

ETIAGE Guyane, Laporte-Daube Olivier, 2015 : Quelles plantes pour les filtres plantés de végétaux dans les DOM ? Test in situ en Guyane : rapport global de l'étude. *ETIAGE Guyane.* 53p.

Eme, Claire, 2012 : Traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés de macrophytes. Adaptation de la filière au contexte tropical : état de l'art. *Rapport final. IRSTEA Lyon-Villeurbanne (Mai 2012). Rapport ONEMA.* 76p.

Fournet, J. (2002) : *Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique : Clefs générales "Cycadaceae-Avicenniaceae"*. FRA : CIRAD; Gondwana Editions;, vol. 1;1324 p.

Fournet, J. (2002) : *Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique : Lamiacea-Orchidaceae.* FRA : CIRAD; Gondwana Editions;, vol. 2;1213 p.

Funk, V., T. Hollowell, P. Berry, C. Kelloff, and S. N. Alexander, 2007 : Checklist of the Plants of the Guiana Shield (Venezuela : Amazonas, Bolivar, Delta Amacuro; Guyana, Surinam, French Guiana). *Contributions from the United States National Herbarium*, volume 55, 584 pages.

Heers, Martin, 2006 : Constructed wetlands under different geographic conditions : Evaluation of the suitability and criteria for the choice of plants including productive species. Master Thesis, Hamburg University of Applied Sciences, Germany. 166p.

Juneau, Philippe, Hisashi Sumitomo, Saburo Matsui, Sadahiko Itoh, Sang-Gil Kim, et Radovan Popovic, 2003 : Use of chlorophyll fluorescence of *Closterium ehrenbergii* and *Lemna gibba* for toxic effect evaluation of sewage treatment plant effluent and its hydrophobic components. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 55, n° 1 (mai 2003): 1-8.

Kalaji, Hazem M., Robert Carpentier, Suleyman I. Allakhverdiev, et Karolina Bosa, 2012 : Fluorescence parameters as early indicators of light stress in barley. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 112 (2 juillet 2012): 1-6.

Mateus, Dina M. R., Mafalda M. N. Vaz, Isabel Capela, et Henrique J. O. Pinho, 2014 : Sugarcane as constructed wetland vegetation: Preliminary studies. *Ecological Engineering* 62 (janvier 2014): 175-78.

Oukarroum, Abdallah, 2007 : Vitalité des plantes d'orge (*Hordeum vulgare L.*) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Thèse de doctorat n°3878. Faculté des sciences de l'université de Genève. 183p.

Perez-Harguindeguy, N., S.Diaz, E.Garnier, S.Lavorel, H.Poorter, P.Jaureguiberry, M.S.Bret-Harte, W.K.Cornwell, J.M.Craine, D.E.Gurvich, C.Urcelay, E.J.Veneklaas, P.B.Reich, L.Poorter, I.J.Wright, P.Ray, L.Enrico, J.G.Pausas, A.C.de Vos, N.Buchmann, G.Funes, F.Quetier, J.G.Hodgson, K.Thomson, H.D.Morgan, H.ter de Steeges, M.G.A. van der Heijden, L.Sack, B.Blonder, P.Porschlod, M.V.Vaieretti, G.Conti, A.C.Staver, S.Aquino and J.H.C Cornelissen, 2013 : New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian journal of Botany*. 42 p.

Pagter, Majken, Claudia Bragato, et Hans Brix, 2005 : Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquatic Botany* 81, n° 4 (avril 2005): 285-99.

Srivastava, A., R. J. Strasser, et Govindjee, 2004 : Greening of Peas: Parallel Measurements of 77 K Emission Spectra, OJIP Chlorophyll a Fluorescence Transient, Period Four Oscillation of the Initial Fluorescence Level, Delayed Light Emission, and P700. *Photosynthetica* 37, n° 3 (28 octobre 2004): 365-92.

Stirbet, Alexandrina, et Govindjee, 2010 : On the Relation between the Kautsky Effect (chlorophyll a Fluorescence Induction) and Photosystem II: Basics and Applications of the OJIP Fluorescence Transient. *Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology* 104, n° 1-2 (août 2011): 236-57.

Strasser, Reto J., Merope Tsimilli-Michael, et Alaka Srivastava, 2004 : Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. In *Chlorophyll a Fluorescence*, édité par George Christos Papageorgiou et Govindjee, 321-62. *Advances in Photosynthesis and Respiration* 19. Springer Netherlands, 2004.

Taiz, Lincoln, Zeiger, Edouardo, 2006: *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc.; 4th edition (June 1, 2006). 0878938567 - 700p.

Tanner, Chris C, 1996 : Plants for constructed wetland treatment systems — A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering* 7, n° 1 (septembre 1996): 59-83.

Živčák, M., M. Brestič, K. Olšovská, et P. Slámka, 2008 : Performance Index as a Sensitive Indicator of Water Stress in *Triticum Aestivum L.* *Plant, Soil and Environment* 54, n° 4 (2008): 133-39.

8. Table des illustrations

Table des figures

Figure 1 : Carte conceptuelle de la démarche mise en place pour trouver des végétaux de substitution à <i>Phragmites australis</i>	11
Figure 2 : Illustration du rôle mécanique des plantes.....	12
Figure 3 : Verse des lots en stress anoxique 3 ^{ème} jour.	17
Figure 4 : Marbrures et flétrissements.....	18
Figure 5 : Serre à Oasure.....	19
Figure 6 : Stress hydrique permanent (G) et périodique (D) à J+20.	22
Figure 7 : Lot témoin des tests batch, avec 11 des 12 espèces étudiées.	24
Figure 8 : Installations expérimentales à la pépinière de SEV.....	25
Figure 9 : Dispositif expérimental sur la station de Taupinière.	30
Figure 10 : Klimadiagramm d'après Walter (1973) de la station de Bois d'Opale 2 à Macouria en 2015 (Guyane).....	38
Figure 11 : Exemple de colonisation d'un filtre de bois d'Opale par <i>Cucurbita maxima</i> (Giromon).....	39
Figure 12 : Réduction de la surface en service autour de chacun des points d'alimentation de bois d'Opale 2.....	40
Figure 13 : Classification botanique des plantes sélectionnées pour le suivi en taille réelle sur Bois d'Opale 2.	40
Figure 14 : Configuration des filtres de bois d'Opale pour les tests.....	41
Figure 15 : Plan général des prises de vues dans le cadre du suivi photographique des tests.	42
Figure 16 : Densités des végétaux en nombre de tiges par mètres carrés pour chacun des taux de charge.....	44
Figure 17 : Hauteur moyenne des végétaux en centimètre pour chacun des taux de charge.....	45
Figure 18 : Nid de rongeurs dans les quadras de <i>Cana glauca</i>	46
Figure 19 : Diamètre des tiges des végétaux en centimètre pour chacun des taux de charge.....	47
Figure 20 : Ratios 12 plants m ² / 6 plants m ² calculé pour chacun des critères des développements, a faible charge (FC) et charge nominale (CN).....	48
Figure 21 : Rhizome de <i>Phragmites australis</i>	50
Figure 22 : Parties racinaires d' <i>Echinochloa polystachia</i>	50
Figure 23 : Exemple de « tapis » formé par <i>Echinochloa polystachia</i>	51
Figure 24 : Rhizomes et rejets d' <i>Heliconia psittacorum</i>	51
Figure 25 : Bulbe rhizomateux de <i>Costus spiralis</i>	52
Figure 26 : Système racinaire de <i>Cana glauca</i>	52
Figure 27 : ratios d'occupation des filtres pour chaque espèce.....	53
Figure 28 : Evolution visuelle du filtre planté avec <i>Clinogyne comorensis</i> à Hachenoua.....	56
Figure 29 : <i>Schoenoplectus littoralis</i> (G) et <i>Cyperus sp.</i> (D) en décembre à Hachenoua.	56
Figure 30 : Parties racinaires de <i>Clinogyne comorensis</i>	57
Figure 31 : Marcottage sur les tiges de <i>Clinogyne comorensis</i>	57
Figure 32 : Conclusions de l'étude sur l'ordre des Zingibérales.	60
Figure 33 : Complexes protéiques impliqués et réactions lors de la phase lumineuse de la photosynthèse.....	68
Figure 34 : Une courbe typique de l'effet Kautsky ou fluorescence transitoire.....	70

9. Table des Tableaux

Tableau 1: statut de <i>Phragmites australis</i> dans les DOM	10
Tableau 2 : Synthèse des propositions de plantes de substitution et passage au crible des propriétés attendues.....	14
Tableau 3 : Code couleur utilisé dans les tableaux de synthèse des observations réalisés lors des tests batch	20
Tableau 4 : Synthèses des observations réalisées sur les lots soumis au stress anoxique.....	20
Tableau 5 : Synthèse des observations faites sur les lots soumis au stress hydrique permanent.....	21
Tableau 6 : Synthèse des observations faites sur les lots soumis au stress hydrique périodique.	21
Tableau 7 : Code couleur utilisé dans les tableaux de synthèse des observations réalisés lors des tests batch.....	25
Tableau 8 : Synthèse des observations réalisées sur les lots soumis au stress anoxique.	26
Tableau 9 : Synthèse des observations réalisées sur les lots en stress hydrique.....	28
Tableau 10 : Code couleur utilisé dans les tableaux de synthèse des observations réalisés lors des tests batch.....	30
Tableau 11 : Synthèse des observations réalisées sur les lots soumis au stress anoxique.	31
Tableau 12 : Synthèse des observations réalisées sur les lots en stress hydrique permanent.	32
Tableau 13 : Synthèse des observations faites sur les lots soumis au stress hydrique périodique.	34
Tableau 14 : Plantes retenues à l'issue des test-batch.....	37
Tableau 15 : Taux de charge de la station de bois d'Opale 2.....	39
Tableau 16 : Date d'apparition des différents stades végétatifs.	49
Tableau 17 : Temps passés à l'entretien des filtres à charge nominale (CN) et faible charge (FC)	53
Tableau 18 : Récapitulatif des observations des différentes caractéristiques étudiées lors du suivi <i>in situ</i>	55
Tableau 19 : Végétaux de substitution à <i>Phragmites australis</i> dans la zone tropicale.....	61
Tableau 20 : Principaux paramètres des JIP-tests et leurs formules.....	71

10. Annexes :

Annexe 1 : Principes de la fluorescence chlorophyllienne

- La photosynthèse

La photosynthèse est la production de matière organique à partir de CO_2 et d' H_2O sous l'action d'énergie lumineuse. Les photons sont captés par les pigments chlorophylliens (a et b), et sont utilisés selon 3 voies en concurrence : (1) la photosynthèse majoritairement, l'énergie excessive peut être (2) dissipée sous forme de chaleur ou (3) réémise par fluorescence. En mesurant la fluorescence des chlorophylles, on obtient donc des informations sur les changements de l'efficacité photochimique et la dissipation thermique.

Chez les plantes, la photosynthèse a lieu dans les chloroplastes, des organites spécialisés présents à l'intérieur des cellules végétales. Les chloroplastes sont composés d'une double membrane séparant le stroma du milieu intra cellulaire. Le stroma contient les thylakoïdes dont les membranes sont le siège de la phase lumineuse de la photosynthèse et dont l'intérieur est appelé le lumen.

La photosynthèse peut être décomposée en 2 étapes. La phase photochimique ou lumineuse, qui se déroule dans les membranes thylakoïdiennes et transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique (synthèse d'ATP et réduction du NADP^+ en NADPH). La phase sombre, se déroule dans le stroma où, au cours du cycle de Calvin-Benson, le CO_2 est fixé par l'oxydation du NADPH et la déphosphorylation de l'ATP.

Lors de la phase lumineuse, les réactions d'oxydo-réduction sont réalisées par 3 complexes protéiques (voir figure 33) : le photosystème II (PSII), le cytochrome b_6f , le photosystème I (PSI) composent ce qui est appelé la chaîne de transfert des électrons.

En situation normale, en fonction de l'état physiologique de la plante, une infime partie (entre 2 et 10%) de la lumière absorbée par les tissus photosynthétiques est réémise sous forme de fluorescence par la *chlorophylle a* (pigment photosynthétique contenu dans le PSII).

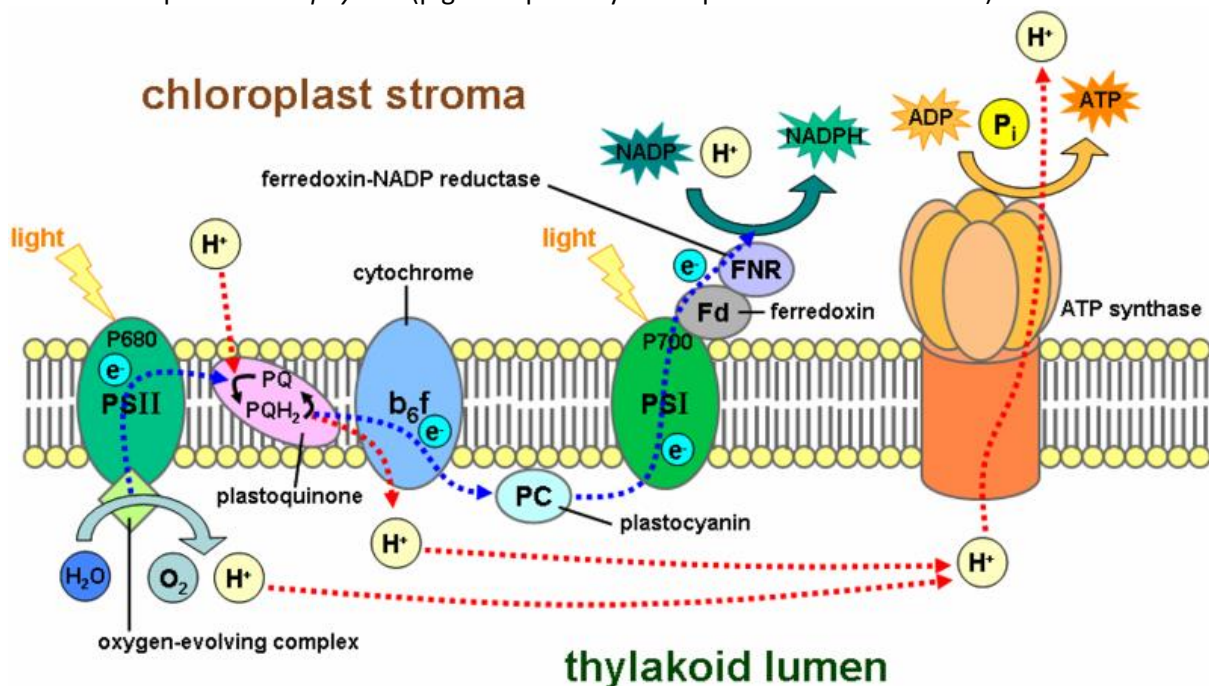


Figure 33 : Complexes protéiques impliqués et réactions lors de la phase lumineuse de la photosynthèse, (Taiz and Zeiger, Plant Physiology, 4th edition)

- JIP-test

Quand un échantillon gardé à l'abri de la lumière durant 30 minutes est éclairé à nouveau, le rendement de la fluorescence de la *Chl a* montre des changements caractéristiques appelés fluorescence transitoire ou effet Kautsky (du nom de Hans Kautsky qui a décrit le phénomène avec Hirsh en 1931). Le rendement de la fluorescence mesuré montre une augmentation très rapide (autour de 0,2s) depuis son origine O, ou F_0 , ou il est minimal, jusqu'à un pic P qui dépend de l'intensité d'illumination et qui est maximal en condition de saturation ($600 \text{ Wm}^{-2} = 100\%$ de lumière). Dans ce cas-là $F_p = F_M$ la fluorescence maximum. Après une seconde environ, la fluorescence diminue lentement pour finalement s'établir à un niveau stable F_S . L'ensemble du processus dure quelques minutes (voir figure 34 (a)).

Entre les 2 extrêmes F_0 et F_p , la courbe présente différentes inflexions intermédiaires caractéristiques que l'on appelle J et I, à 2 et 30 ms (Stirbet et al. 2011). En représentant l'évolution de la fluorescence sur une échelle de temps logarithmique (figure 34) on obtient les courbes OJIP. Dans certains cas de stress, d'autres épaulements peuvent apparaître.

Les changements dans la phase croissante de la courbe peuvent être corrélés avec des événements au début de la chaîne des transporteurs d'électrons (PSII jusqu'au cytochrome b_6/f). En revanche, l'interprétation de la phase lente et descendante est beaucoup plus complexe étant donnée l'augmentation du nombre de processus en jeu.

La compréhension du phénomène de fluorescence transitoire est basée sur la théorie de Duysens and Sweers de 1963, selon laquelle le PSII est responsable de la variation de la fluorescence de la *chl a*. La conversion photochimique serait limitée par un accepteur d'électron associé (la quinone Q_A), qui une fois réduite serait dépendante du reste de la chaîne de transporteurs d'électrons et d'enzymes pour retrouver son état oxydé et pouvoir accepter un autre électron. Lorsque Q_A est réduite, le centre réactionnel CR (P680) du PSII est dit fermé et les photons captés par les chlorophylles sont réémis par fluorescence. Lorsque les plantes sont adaptées à l'obscurité (phase O) leur CR sont ouverts et les Q_A oxydées. Au fur et à mesure que les électrons arrivent les Q_A sont réduites (Q_A^-), les CR se ferment et la production de fluorescence augmente jusqu'à son maximum (phase P) où toutes les Q_A sont réduites et les centres réactionnels sont fermés.

De très nombreux paramètres peuvent être déduits des JIP-tests (voir ci-dessous). Le paramètre classique de la fluorescence est le rendement quantique maximal de la photochimie primaire (ϕP_0) qui correspond à la probabilité pour qu'une excitation induite par un photon se désactive via la photochimie (Cornic, 2014) :

$$\phi P_0 = TR_0 / ABS = 1 - (F_0 / F_M) = F_V / F_M$$

avec ABS : l'énergie absorbée par l'échantillon

TR_0 : l'énergie capturée (trapped) par le système pour réduire Q_A en Q_A^-

F_V : fluorescence variable $F_V = F_M - F_0$

Les expériences basées sur la fluorescence chlorophylliennes ont montré que F_V / F_M était un paramètre très peu sensible au stress hydrique (1998 ; Oukkaroum, 2007). Pour une plante en bonne santé sa valeur varie entre 0,8 et 0,84. Les premiers symptômes d'atteinte physiologique (jaunissement et chlorose) sont généralement visibles quand la valeur descend en dessous de 0,8. L'intérêt de suivre ce paramètre dans notre cas est limité. Il a plutôt été utilisé comme manière de valider la qualité de la mesure.

Strasser et al. (2004) ont démontré l'avantage de multiplier les paramètres dérivés de la fluorescence chlorophyllienne plutôt que d'employer un paramètre simple comme F_v/F_m . C'est dans ce but que l'indice de performance Pi_{ABS} (Performance index) a été développé par Srivastava et al. (1999). Ce paramètre intégratif combine 3 paramètres indépendants : (1) la densité de centre réactionnel disponible, (2) l'efficacité de la chaîne des transporteurs d'électrons au-delà de Q_A , et (3) la probabilité pour qu'une excitation induite par un photon se désactive via la photochimie (F_v/F_m).

$$Pi_{ABS} = [\underset{(1)}{\gamma_0 / (1-\gamma_0)}] \cdot [\underset{(2)}{Y_0 / (1-Y_0)}] \cdot [\underset{(3)}{\phi P_0 / (1-\phi P_0)}]$$

L'équation de Pi_{ABS} est dérivée par analogie de l'équation de Nernst, qui est utilisée pour déterminer le potentiel rédox d'un système (en s'appuyant sur la présence des 2 formes du couple redox) : ainsi par exemple $1-\phi P_0$ correspond à l'inverse de ϕP_0 , soit la probabilité que l'excitation induite par un photon se dissipe par fluorescence ou par voie thermique. Pi_{ABS} reflète l'état de fonctionnement des 2 photosystèmes I et II et donne de nombreuses informations sur l'état physiologique de la plante en condition de stress (Strasser et al. 2004, Stirbet 2011). C'est cette valeur qui sera recherchée dans notre cas pour quantifier l'effet du stress.

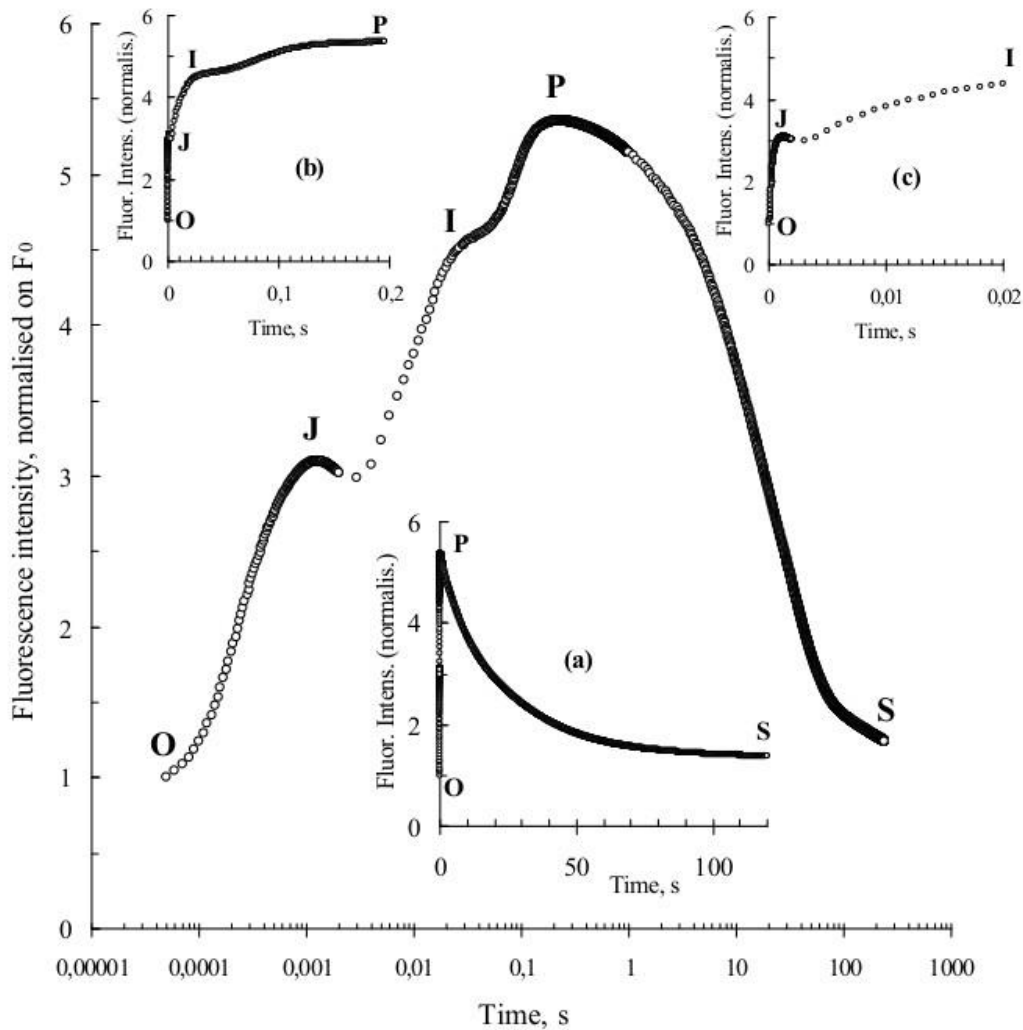


Figure 34 : Une courbe typique de l'effet Kautsky ou fluorescence transitoire, obtenue après exposition d'un échantillon adapté à l'obscurité par une lumière saturante (600 Wm^{-2}), tracé à une échelle de temps logarithmique. Les insertions montrent la même courbe à des échelles de temps linéaire différentes : (a) jusqu'à 120s, (b) jusqu'à 200 ms et (c) jusqu'à 20 ms. (Strasser et al. 2004)

Principaux paramètres des JIP-tests et leurs formules

Parameters	O-J-I-P test formulae	Definitions
<i>Extracted fluorescence parameters</i>		
F_o		Initial fluorescence
$O (F_{50\mu s})$		Fluorescence intensity at 50 μs
$J (F_{2ms})$		Fluorescence intensity at 2 ms
$I (F_{30ms})$		Fluorescence intensity at 30 ms
P or F_m		Maximum fluorescence
$F_{100\mu s}$		Fluorescence intensity at 100 μs
$F_{300\mu s}$		Fluorescence intensity at 300 μs
t_{F_m}		Time to reach F_m (ms)
<i>Calculated parameters</i>		
F_v	$= (F_m - F_o)$	Variable fluorescence
V_j	$= [(F_{2ms} - F_o) / (F_m - F_o)]$	Relative variable fluorescence at J-step
M_o	$= [4 \cdot (F_{300\mu s} - F_{50\mu s}) / (F_m - F_{50\mu s})]$	Net rate of PSII closure
Area		Area between the fluorescence curve and F_m
S_M	$= (area / F_o)$	Normalised area
<i>Specific fluxes (RC)</i>		
ABS/RC	$= [(TR_o / RC) / (TR_o / ABS)]$	Effective antenna size of an active RC
TR_o / RC	$= (M_o / V_j)$	Maximal trapping rate per RC
DI_o / RC	$= [(ABS / RC) - (TR_o / RC)]$	Dissipation of an active RC
ET_o / RC	$= [(TR_o / RC) (ET_o / TR_o)]$	Electron transport of an active RC
<i>Phenomenological fluxes (CS)</i>		
ABS/CS	Approximately proportional to F_o	Number of photons absorbed per CS
TR_o / CS	$= (ABS / CS) (TR_o / ABS)$	Energy flux for trapping per CS
DI_o / CS	$= (ABS / CS) - (TR_o / CS)$	Energy dissipation per CS
ET_o / CS	$= (ET_o / RC) (RC / CS)$	Electron transport per CS
RC/CS	$= (ABS / CS) (RC / ABS)$	Density of reaction centres per CS
<i>Yields (or flux ratios)</i>		
$\phi_{Po} = (TR_o / ABS)$	$= F_v / F_m = 1 - (F_o / F_m)$	Maximum quantum yield of primary photochemistry
$\phi_{Do} = (DI_o / ABS)$	$= DI_o / ABS = 1 - \phi_{Po} = (F_o / F_m)$	Maximum quantum yield of non-photochemical de-excitation
$\psi_o = (ET_o / TR_o)$	$= 1 - V_j$	Probability that a trapped exciton moves an electron further than Q_A^-
$\phi_{Eo} = (ET_o / ABS)$	$= (1 - F_o / F_m) (1 - V_j)$	Probability that an absorbed photon moves an electron further than Q_A^-
<i>Performance index</i>		
PI_{ABS}	$= (RC / CS) [\phi_{Po} / (1 - \phi_{Po})] [\psi_o / (1 - \psi_o)]$	Performance index

Tableau 20 : Principaux paramètres des JIP-tests et leurs formules (Strasser et al., 2004).

Annexe 2 : protocole et fiche de suivi taille réelle simplifié

Projet ATTENTIVE

Protocole de suivi des végétaux *in situ*

1. Objectif :

Etude du développement des végétaux dans le contexte réel de la filière.

- ➔ Valider définitivement l'utilisation des espèces pour les FPV en zone tropicale
- ➔ Déterminer pour chaque espèce les bonnes pratiques (fréquence de faucardage, besoin d'entretien au démarrage ...)

2. Protocole :

Le suivi se fait à 2 échelles différentes :

- **Une fois par mois** au niveau des quadras. A la plantation 2 quadras de 50 x 50 cm sont matérialisés sur chaque lits (ou zone de plantation d'une espèce : demi-lits, quart de lits ...). Estimation : 30 minutes par espèces.
- **A chaque passage** sur la station au niveau de la population de chaque espèce dans son ensemble. Plusieurs indicateurs doivent être relevés. Estimation : 5 minutes par espèces

2.1. Suivi des quadras

A la plantation 2 quadras de 50 x 50 cm sont définis pour chaque espèce et chaque lit. Ils doivent être placés à la même distance du point d'alimentation (doublons), entre 1 et 3 m.

S'il y a peu d'espèces présentes sur la station, que les lits sont grands, ou que les végétaux ont été plantés à différentes densités, il est intéressant de faire plus de quadras : 2 à 1m du point d'alim et 2 à 4m par exemple.

Les quadras doivent être matérialisés à l'aide de piquets et de rubalise (ou autre). Ces zones seront étudiées en détail pendant toute la durée du suivi, et il est important de revenir toujours au même endroit.

1 fois par mois les mesures suivantes sont réalisées sur les plantes à l'intérieur de chaque quadra :

- Mesure de la densité : nombre de tiges présentes dans le quadra. La distinction entre rejet et tige est la suivante : un rejet est considéré comme une tige lorsqu'il a atteint la taille des plants lors de la plantation (généralement 25 cm).
- Hauteur maximale : la hauteur des 5 tiges les plus hautes du quadra est relevée.
- Diamètre des tiges : le diamètre de ces 5 tiges est relevé. La mesure du diamètre se fait toujours à la même hauteur à 20 cm du sol. 2 méthodes sont envisageables : à l'aide d'un mètre ruban puis en appliquant la formule du périmètre ($P=2\pi R$ soit $D=P/\pi$), ou d'un pied à coulisse.

- Occupation du quadra : estimer la surface du quadra qui est occupé par la plante étudiée (en %), par rapport aux adventices. La surface nue n'est pas prise en compte.

Remarque : il faut essayer autant que possible de limiter les déplacements à la surface des filtres et autour des quadras de manière à ce que le filtre reste représentatif d'un filtre en fonctionnement dans un contexte normal.

Un fichier Excel est proposé pour la réalisation du suivi.

2.2. Suivi de la population dans son ensemble

Il s'agit d'observations qui sont faites au niveau de la population de chaque espèce dans son ensemble (2lits, 1 lit, ½ lit...). Elles se font à chaque passage sur la station et sont très rapides :

- Occupation des filtres : estimer la surface occupée par la plante étudiée en % de la surface des filtres. La surface nue n'est pas prise en compte.
- Le temps de travail nécessaire à l'exploitation : chaque fois qu'une tâche (arrachage des mauvaises herbes, taille – maintien dans le filtre, faucardage...) est réalisée sur l'une des espèces, noter une description de la tâche et le temps qu'elle a nécessité.
- Description des phases du cycle végétatif : Le cycle végétatif se définit comme la succession d'étapes dans le développement des plantes. On distingue schématiquement 4 phases :
 - o la croissance végétative : depuis la germination si la plante part d'une graine ou depuis l'apparition d'un rejet dans le cas d'une multiplication végétative. Elle dure jusqu'à ce que la plante ait atteint un niveau de développement qui lui permette de produire suffisamment d'énergie pour se reproduire.
 - o la floraison, qui correspond à la phase de multiplication sexuée de la plante.
 - o la nouaison ou fructification, conduit à la production d'un œuf (graine).
 - o la sénescence, ou mort programmée : la plante ayant rempli sa fonction reproductrice meurt petit à petit.

A chaque passage sur la station il est demandé d'identifier à quelle étape du cycle végétatif se trouve la population.

- Toute autre observation anormale est intéressante à noter (apparition de ravageurs, chlorose...).

Un fichier Excel est proposé pour la réalisation du suivi.

Projet ATTENTIVE
Suivi du développement des végétaux in situ

Suivi des quadras

Espèce :		Date du suivi :				
Quadras 1	Nombre de tige		Surface occupée (%)			
	1	2	3	4	5	
Hauteur						
Diamètre tige						
Quadras 2	Nombre de tige		Surface occupée (%)			
	1	2	3	4	5	
Hauteur						
Diamètre tige						

Espèce :		Date du suivi :				
Quadras 1	Nombre de tige		Surface occupée (%)			
	1	2	3	4	5	
Hauteur						
Diamètre tige						
Quadras 2	Nombre de tige		Surface occupée (%)			
	1	2	3	4	5	
Hauteur						
Diamètre tige						

11. Remerciements

L'ensemble des rédacteurs remercie l'ONEMA pour son financement, ainsi que les équipes d'Oasure, Cotram assainissement, SEV Mayotte et Etiage Guyane pour leur participation à cette étude.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les experts qui ont accepté de donner de leur temps pour échanger avec nous sur l'épineuse question des plantes dans les FPV et en particulier César Delnatte de la DEAL Martinique, Sophie Gonzales de l'herbier de Guyane et Valérie Guiot du CNBM antenne de Mayotte.

Onema
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea
Parc de Tourvoie,
BP 44
92163 Antony Cedex
01 40 96 61 21
www.irstea.fr