GUIDE POUR LA CRÉATION D'UNE PÉPINIÈRE D'HERBIERS MARINS À MAURICE

Rui Santos | 2026



BlueZ C Institute
Odysseo AQUARIUM · MAURITIUS
Odysseo FOUNDATION
eclosia Solidarité
VARUNA
AFD
EXPERTISE FRANCE GROUPE AFD
eclosia
attitude FOUNDATION
Association pour le Développement Durable

Index

Index **2**

1. Introduction 4
   - 1.1 Objectif et champ d'application du manuel 4
   - 1.2 Justification des pépinières d'herbiers marins 4
   - 1.3 Principes directeurs du manuel 5

2. Contexte écologique et de restauration à Maurice **6**
   - 2.2 Espèces cibles pour la pépinière 7
   - 2.3 Principaux pressions et implications pour la restauration 8

3. Objectifs et critères de réussite de la pépinière **10**

4. Sélection et suivi des prairies donneuses **11**
   - 4.1 Identification des sites donneurs potentiels 11
   - 4.2 Caractérisation environnementale des sites donneurs 13
   - 4.3 Suivi de l'état saisonnier des plantes 13
   - 4.4 Suivi de la phénologie reproductive 15

5. Sélection des sites d'installation de la pépinière **18**
   - 5.1 Exigences générales du site 18
   - 5.2 Odysseo Oceanarium 19
   - 5.3 Four Seasons Resort barachois 20

6. Conception et infrastructures de la pépinière **21**
   - 6.1 Configuration générale de la pépinière 21
   - 6.2 Approvisionnement et circulation de l'eau 21
   - 6.3 Sédiments et substrat de plantation 22
   - 6.4 Contrôle de la lumière et de la température 23

7. Collecte de transplantations adultes et mise en place de la pépinière **23**
   - 7.1 Justification du transplant d'individus adultes 23
   - 7.2 Méthode de collecte sur le terrain 25
   - 7.3 Installation dans les bassins de la pépinière 26

8. Collecte et traitement des graines **27**
   - 8.1 Importance de la restauration basée sur les graines 27
   - 8.2 Collecte à partir de pousses reproductrices 27
   - 8.3 Collecte à partir des banques de graines sédimentaires 28
   - 8.4 Collecte à partir des fruits 28

9. Stockage des graines, germination et culture des plantules **29**
   - 9.1 Principes généraux de stockage des graines 29
   - 9.2 Mise en place du laboratoire de germination 29
   - 9.5 Protocol pour les espèces alternatives 31
   - 9.6 Croissance des plantules 31

10. Culture en bassins extérieurs **32**
10.1 Transfert du laboratoire vers les bassins extérieurs 32
10.2 Culture des plantes adultes en bassins 33
10.3 Routines d'entretien 33

11. Suivi des conditions environnementales de la pépinière **34**
11.1 Paramètres de qualité de l'eau 34
11.2 Suivi des paramètres lumineuses 35
11.3 Suivi des sédiments 35

12. Suivi de la santé et de la croissance des herbiers marins **36**
12.1 Évaluation visuelle de l'état des plantes 36
12.2 Suivi de la couverture et de l'expansion 36
12.3 Mesures des feuilles et des pousses 37
12.4 Suivi de la reproduction dans les bassins de la pépinière 37

13. Suivi de la récupération des sites donneurs **38**
13.1 Objectif du suivi de la récupération des sites donneurs 38
13.2 Méthode de suivi 39
13.3 Règles décisionnelles pour les futures récoltes 39

14. Évaluation de la séquestration du carbone et des nutriments **40**
14.1 Justification 40
14.2 Bilan carbone de la pépinière 40
14.3 Bilan nutritif de la pépinière 41

15. Feuille de route pour la mise en œuvre **43**
15.1 Phase 1 : Préparation and évaluation de référence 43
15.2 Phase 2: Installation pilote de la pépinière 44
15.3 Phase 3: Optimisation et production 44
15.4 Phase 4: Essais de restauration et mise à l'échelle à long terme 45

16. Références documentaires **46**

17. Déclaration finale **47**

1. Introduction

1.1 Objectif et champ d'application du manuel

Ce manuel fournit un cadre pratique et technique pour l'établissement d'une pépinière d'herbiers marins à Maurice. Il est destiné aux praticiens de la restauration écologique, aux gestionnaires du milieu marin, aux chercheurs, aux exploitants d'aquariums et de pépinières, aux équipes environnementales des complexes hôteliers, ainsi qu'aux partenaires gouvernementaux et non gouvernementaux impliqués dans la conservation des herbiers marins.

Le manuel couvre l'ensemble du processus de mise en place d'une pépinière : sélection des sites donneurs et des sites d'installation, collecte de plantes adultes et de graines, germination des graines en laboratoire, croissance des plantules, transfert des plantules et/ou des transplantations prélevées sur le terrain vers des bassins de culture ou des réservoirs semi-naturels, entretien de la pépinière, suivi de l'état et de la croissance des plantes, ainsi qu'évaluation à long terme. Il comprend également des procédures de suivi des sites donneurs afin de documenter la phénologie des espèces cibles d'herbiers marins, ainsi que les impacts et la récupération des sites après les prélèvements de transplantations. L'objectif est de garantir que les activités de restauration n'exercent pas de pression supplémentaire sur les prairies donneuses. Le but n'est pas uniquement d'établir une pépinière pilote, mais également de développer un système reproductible pouvant être étendu afin de soutenir les efforts de restauration et de recherche à plus grande échelle à Maurice.

L'approche décrite dans ce manuel accorde une priorité aux espèces cibles mauriciennes *Syringodium isoetifolium* et *Halodule uninervis*. Ces espèces sont particulièrement adaptées au développement en pépinière car elles sont communes à Maurice, présentent une croissance rapide et sont considérées comme des espèces pionnières capables de coloniser des substrats perturbés. Toutefois, le manuel reconnaît également que les comportements reproducteurs peuvent être variables. Ainsi, des espèces alternatives telles que *Ruppia spp.* et *Halophila spp.* pourront être utilisées si les suivis de terrain indiquent que les espèces cibles principales ne produisent pas suffisamment de graines pour permettre l'établissement de la pépinière, ou si d'autres contraintes imprévues apparaissent au cours du projet.

1.2 Justification des pépinières d'herbiers marins

Les pépinières d'herbiers marins constituent un outil de restauration conçu pour produire du matériel végétal sain dans des conditions contrôlées ou semi-contrôlées, à partir de graines ou de transplantations prélevées sur le terrain. Dans les approches conventionnelles de restauration, les plantes adultes sont souvent prélevées dans des sites donneurs puis transplantées directement vers

les sites à restaurer. Bien que cette méthode puisse être efficace, elle peut également endommager les sites donneurs lorsqu'elle est mal gérée, en particulier lorsque de grandes quantités de plantes sont nécessaires. Une pépinière permet de réduire ce risque en offrant la possibilité de multiplier ou de maintenir une quantité relativement faible de matériel végétal prélevé sur les sites donneurs avant son utilisation dans les opérations de restauration. En outre, les pépinières permettent de produire du matériel végétal présentant une plus grande diversité génétique, notamment lorsque la propagation par graines est utilisée. Cette approche contraste avec les méthodes traditionnelles de transplantation, qui reposent souvent sur un nombre limité de génotypes donneurs et peuvent entraîner une réduction de la variabilité génétique au sein des populations restaurées.

La culture en pépinière améliore également la capacité à tester et à optimiser la germination des graines, la croissance des plantules et les conditions de culture des plantes. La température, la salinité, le flux d'eau, la disponibilité des nutriments, la charge en épiphytes, le type de sédiment et la disponibilité de la lumière peuvent être surveillés et ajustés plus facilement dans des bassins ou des réservoirs semi-naturels qu'en milieu naturel. La pépinière constitue ainsi à la fois une plateforme expérimentale et une unité de production. Elle peut être utilisée pour comparer la croissance des transplantations d'adultes et des plantules, évaluer les besoins spécifiques des différentes espèces en matière de lumière et de salinité, et affiner les techniques de transplantation avant la mise en œuvre d'actions de restauration à plus grande échelle.

À Maurice, une pépinière présente également une valeur stratégique, car la restauration des herbiers marins en est encore à un stade précoce par rapport à d'autres habitats côtiers. Une pépinière pilote peut contribuer au développement de capacités techniques locales, générer des données sur la saison de reproduction et les taux de croissance, et démontrer aux parties prenantes la faisabilité des actions de restauration des herbiers marins. Cet aspect est particulièrement important dans les systèmes lagunaires arrière-récifs ainsi que dans les zones côtières dépendantes du tourisme, où la conservation des herbiers marins doit être intégrée à une vision plus large pour la santé des écosystèmes, de la productivité halieutique, de la protection côtière et de l'atténuation du changement climatique.

1.3 Principes directeurs du manuel

Le **premier principe** de ce manuel est que les actions de restauration ne doivent pas être entreprises tant que les causes du déclin des herbiers marins n'ont pas été identifiées et, dans la mesure du possible, atténuées. Les pépinières peuvent produire du matériel végétal destiné à la restauration, mais elles ne peuvent pas compenser des conditions environnementales inadéquates sur les sites de restauration, telles qu'une turbidité chronique, un enrichissement excessif en nutriments, l'instabilité

des sédiments, des perturbations physiques répétées ou un renouvellement insuffisant de l'eau. Par conséquent, le développement d'une pépinière doit être intégré à l'évaluation des sites et à la gestion environnementale.

Le **deuxième principe** est la protection des sites donneurs. Les prélèvements doivent être réalisés de manière prudente, répartis spatialement et faire l'objet d'un suivi rigoureux. Lorsque l'objectif est de conserver des unités plante-rhizosphère intactes, les plantes doivent être prélevées avec leur sédiment. De même, la collecte des graines doit être planifiée en fonction de la période de reproduction et réalisée de manière à éviter un prélèvement excessif du matériel reproducteur. Le suivi de la récupération des sites donneurs constitue une composante obligatoire d'un programme de restauration et ne doit en aucun cas être considéré comme une activité facultative.

Le **troisième principe** repose sur la gestion adaptative. Étant donné que les connaissances locales concernant la reproduction, la germination des graines et la croissance des plantules des herbiers marins mauriciens demeurent limitées, les procédures décrites dans ce manuel doivent être considérées comme des protocoles évolutifs susceptibles d'être améliorés au fil du temps. Les données de suivi doivent être examinées régulièrement et les décisions de gestion soigneusement documentées. À mesure que le projet progresse, la pépinière devrait gagner en efficacité grâce à l'identification des périodes les plus favorables, les espèces le mieux adaptées, les conditions sédimentaires optimales et l'éventail de la qualité d'eau la plus propice à la production de matériel végétal.

2. Contexte écologique et de restauration à Maurice

2.1 Importance des écosystèmes d'herbiers marins

Les herbiers marins sont des écosystèmes de plantes à fleurs marines qui forment des prairies sous-marines dans les eaux côtières peu profondes. Contrairement aux macroalgues, ils possèdent des racines, des rhizomes, des feuilles, des fleurs et des graines, et se développent en étant ancrés dans les sédiments (Fig. 1).



Figure 1 Morphologie d'un herbier marin : feuilles, rhizome horizontale et racines.



Figure 2 Les herbiers marins retiennent les sédiments.

Leurs structures souterraines stabilisent les sédiments, tandis que leurs feuilles ralentissent les mouvements de l'eau et piègent les particules en suspension (Fig. 2). Ces fonctions font des herbiers marins d'importants ingénieurs de l'écosystème dans les lagons tropicaux. À Maurice, les herbiers marins contribuent à la stabilité des lagons et à la productivité biologique. Ils fournissent un habitat pour les poissons juvéniles, les invertébrés et les communautés épiphytes. Ils améliorent également la qualité de l'eau en piégeant les particules et en absorbant les nutriments dissous. Leurs sédiments peuvent accumuler du carbone organique, ce qui les intègre aux ressources de « carbone bleu » de l'île.

Bien que les récifs coralliens et les mangroves bénéficient souvent d'une plus grande attention du public, les herbiers marins constituent fréquemment un habitat de connexion entre ces deux écosystèmes, soutenant ainsi l'ensemble du paysage côtier. Un programme de pépinière doit donc être considéré comme allant bien au-delà de la simple culture de plantes. Il s'inscrit dans un effort plus large visant à maintenir la résilience côtière, les habitats de nurserie pour les ressources halieutiques, la clarté de l'eau, la stabilité des sédiments et la biodiversité.

La communication de ce rôle élargi est essentielle pour obtenir l'adhésion des parties prenantes, en particulier dans les contextes où les herbiers marins sont parfois perçus à tort comme une végétation gênante dans les lagons à vocation touristique.

2.2 Espèces cibles pour la pépinière

Les principales espèces cibles de la pépinière mauricienne sont *Syringodium isoetifolium* et *Halodule uninervis*. Ces deux espèces présentent une croissance rapide dans les eaux côtières mauriciennes et sont particulièrement adaptées aux essais de restauration en raison de leur capacité à coloniser des substrats ouverts. *Syringodium isoetifolium*, souvent appelée « herbe spaghetti » (*noodle grass*), possède des feuilles cylindriques fines et lisses, dépourvues de nervures visibles. Les extrémités des feuilles sont généralement arrondies ou légèrement effilées. Cette espèce forme habituellement des herbiers plus lâches et moins denses que ceux d'autres espèces d'herbiers marins (Fig. 3).



Figure 3 Prairie de *Syringodium isoetifolium*

Halodule uninervis possède des feuilles étroites, plates et rubanées, présentant des nervures parallèles visibles. L'extrémité de la feuille est caractéristique, avec deux à trois petites dents distinctes (voir l'extrémité foliaire à la Fig. 8). Cette espèce peut former des herbiers denses lorsque les conditions environnementales sont favorables (Fig. 4). Ces espèces sont considérées comme des espèces pionnières, car elles sont capables de s'établir dans des zones perturbées ou sur des substrats nus et de créer des conditions favorables à une succession écologique ultérieure. Leurs racines et leurs rhizomes contribuent à stabiliser les sédiments, tandis que leurs feuilles réduisent les mouvements de l'eau à proximité du fond, favorisant le piégeage et la sédimentation des particules fines et de la matière organique présentes dans la colonne d'eau. Une fois établies, elles peuvent faciliter le recrutement ou le maintien d'autres espèces d'herbiers marins nécessitant des conditions sédimentaires plus stables.

Comme la phénologie reproductive de ces espèces n'a pas encore été caractérisée à Maurice, un suivi de la floraison, de la fructification et de la production de graines est nécessaire avant la mise en œuvre de programmes de restauration à grande échelle fondés sur l'utilisation de graines. La transplantation de plantes adultes avec leur sédiment est donc intégrée comme stratégie parallèle pour l'établissement de la pépinière, tandis que les méthodes de restauration basées sur les graines sont développées et évaluées.



Figure 4 Prairie *Halodule uninervis*

2.3 Principales pressions et implications pour la restauration

Les herbiers marins sont sensibles aux variations de la disponibilité lumineuse. Une augmentation de la turbidité causée par le ruissellement des sédiments, les opérations

de dragage, les aménagements côtiers ou la remise en suspension des sédiments peut réduire la photosynthèse et limiter leur croissance. L'enrichissement en nutriments peut favoriser le développement d'algues épiphytes sur les feuilles, ce qui réduit davantage la lumière disponible et perturbe les échanges gazeux. Les perturbations mécaniques liées au mouillage des embarcations, aux hélices de bateaux, au piétinement ou aux travaux côtiers peuvent fragmenter les herbiers et exposer leurs rhizomes.

Ces pressions influencent la planification de la pépinière de deux manières. Premièrement, les herbiers donneurs doivent être sélectionnés dans des zones en bon état écologique, caractérisées par une forte densité de plantes, une bonne qualité de l'eau et peu de signes visibles de stress. Deuxièmement, les sites de restauration destinés à recevoir ultérieurement le matériel végétal produit en pépinière doivent être évalués selon les mêmes critères. Une pépinière peut améliorer la qualité et la disponibilité des transplantations, mais elle ne peut garantir leur survie sur un site de restauration où les facteurs ayant causé la dégradation initiale demeurent actifs.

Le présent manuel recommande donc que le développement de la pépinière soit intégré à une stratégie de restauration plus large. Cette stratégie devrait inclure une cartographie de référence des habitats, l'identification des facteurs de pression, l'implication des parties prenantes, l'obtention précoce et coordonnée des autorisations nécessaires, ainsi qu'un suivi régulier des zones donneuses et des sites de restauration. Dans le contexte mauricien, l'obtention des autorisations peut être longue et administrativement complexe, impliquant souvent des périodes d'examen prolongées. Par conséquent, les délais liés aux procédures d'autorisation peuvent affecter le calendrier du projet et compromettre l'alignement des activités de pépinière avec les périodes saisonnières favorables à la reproduction et à la transplantation des herbiers marins. Il est donc essentiel d'obtenir les autorisations bien en amont afin de garantir que les activités de pépinière et les opérations de terrain puissent être mises en œuvre sans interruption.

L'augmentation de la production en pépinière ne devrait être envisagée qu'après que des essais pilotes aient démontré la capacité des plantes à survivre dans les conditions environnementales prévues sur les sites de restauration.

3. Objectifs et critères de réussite de la pépinière

Une pépinière pilote d'herbiers marins à Maurice a pour objectif d'optimiser la germination des graines selon les exigences propres à chaque espèce, de permettre la production de plantules à partir de graines, d'améliorer les méthodes de culture des plantules et des plantes adultes, et de fournir du matériel végétal destiné à la restauration des herbiers marins côtiers au sein du système lagunaire arrière-récifal.

Les critères de réussite doivent être définis selon quatre niveaux complémentaires.

Au **niveau opérationnel**, la réussite repose sur la conception, l'installation et la gestion adéquates de la pépinière afin qu'elle fonctionne de manière fiable dans les conditions locales. Cela implique la mise à disposition d'un nombre suffisant de bassins ou d'enceintes de culture permettant de produire des quantités écologiquement pertinentes de matériel végétal, le maintien de conditions appropriées de qualité de l'eau, de température et de régime hydrodynamique, la limitation du développement excessif d'épiphytes, ainsi que la mise en œuvre de procédures régulières d'entretien et de suivi. La réussite opérationnelle dépend également de la disponibilité des infrastructures nécessaires, de l'accès à l'eau de mer et de l'obtention des autorisations requises dans des délais compatibles avec le calendrier du projet afin d'éviter tout retard dans l'établissement et le fonctionnement de la pépinière.

Au **niveau biologique**, la réussite se mesure à la performance des plantes cultivées. Cela comprend le maintien de taux élevés de survie et de croissance des transplantations, le succès de la germination des graines, une forte survie des plantules attestée par la production de nouvelles feuilles, pousses et racines, ainsi que, lorsque cela est possible, la réussite de la reproduction sexuée des plantes au sein des bassins de culture.

Au **niveau de la restauration**, la réussite signifie que le matériel produit en pépinière peut être transplanté efficacement dans les environnements lagunaires, en particulier dans les systèmes lagonaires arrière-récifaux, avec des taux satisfaisants de survie, d'établissement et de croissance continue dans les conditions naturelles. Les essais pilotes de transplantation doivent démontrer que les plantes produites en pépinière sont capables de résister aux contraintes locales, notamment les variations de température, la dynamique sédimentaire et les pressions d'origine anthropique, avant toute augmentation de l'échelle des opérations de restauration.

Au **niveau de la sensibilisation du public**, la réussite implique que la pépinière serve également de plateforme d'information et de sensibilisation. Lorsqu'elles sont installées dans des complexes hôteliers, des parcs marins ou des aquariums, les pépinières peuvent contribuer à l'éducation

environnementale en mettant en valeur l'importance écologique des herbiers marins pour la productivité halieutique, la biodiversité, la protection côtière et l'atténuation du changement climatique. Les supports pédagogiques et les messages de sensibilisation doivent être scientifiquement rigoureux, adaptés au contexte local et accessibles à un large éventail de publics, notamment les touristes et les communautés locales.

4. Sélection et suivi des prairies donneuses

4.1 Identification des sites donneurs potentiels

Les travaux préliminaires réalisés à Maurice ont permis d'identifier plusieurs zones présentant des populations saines de *Syringodium isoetifolium* et de *Halodule uninervis*, notamment à Le Morne, Coteau Raffin, Case Noyale (Fig. 5) ainsi qu'à proximité du Four Seasons (Fig. 6), comme sites potentiels de prospection. Ces zones peuvent être utilisées pour la collecte initiale de transplantations destinées à l'établissement de la pépinière, mais elles ne doivent pas être considérées comme des sites donneurs permanents tant qu'un suivi saisonnier n'aura pas confirmé leur adéquation à cet usage.

Un herbier donneur de qualité doit présenter une forte couverture végétale, une coloration foliaire saine, une faible charge en épiphytes, des sédiments stables et peu de signes de perturbations physiques. Il doit également être facilement accessible pour permettre des opérations répétées de suivi et de collecte, sans pour autant être soumis à une fréquentation excessive susceptible de créer des conflits avec les autres usagers du site.

Les herbiers monospécifiques ou fortement dominés par une seule espèce sont particulièrement utiles lorsque des collectes de graines spécifiques à une espèce sont nécessaires, car les herbiers mixtes peuvent compliquer l'identification des structures reproductrices ainsi que celle des plantules.

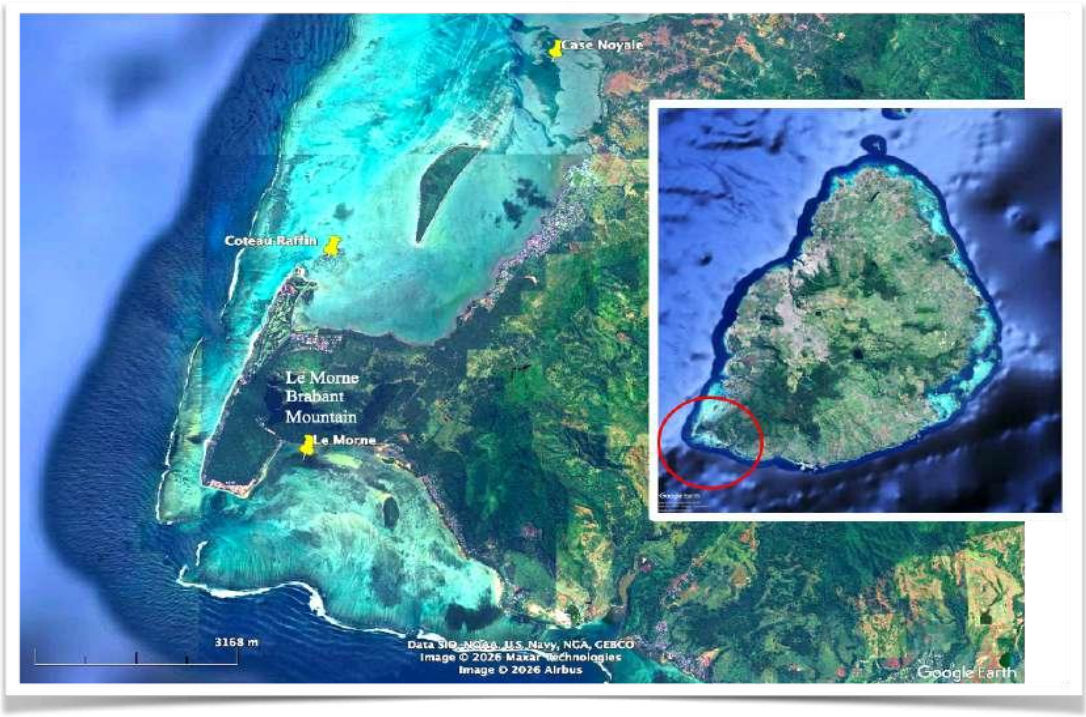


Figure 5 Localisation de la zone d'étude des herbiers marins dans le sud -ouest de l'île Maurice (cercle rouge)

La réplication spatiale est un élément important du programme de collecte. Le recours à un seul herbier donneur augmente les risques si ce site est affecté par des perturbations, des maladies, une faible activité reproductive ou une faible viabilité des graines. Dans la mesure du possible, au moins trois zones donneuses devraient faire l'objet d'un suivi régulier, et la pépinière devrait conserver des registres détaillés sur l'origine de l'ensemble des plantes et des graines collectées.

Cette approche permet de comparer ultérieurement les performances des différentes populations donneuses et contribue au maintien d'une diversité génétique élevée au sein du matériel utilisé pour la restauration.



Figure 6 Localisation du Four Seasons Resort. Le cercle rouge indique le barachois de l'hôtel qui pourrait être utilisé pour l'implantation de la pépinière d'herbiers marin

4.2 Caractérisation environnementale des sites donneurs

Le suivi environnemental des sites donneurs devrait inclure des mesures de la colonne d'eau et des sédiments. La température de l'eau, la salinité, l'oxygène dissous, le pH et l'irradiance devraient idéalement être mesurés en continu pendant des périodes sélectionnées au cours de chaque saison. Lorsque des capteurs permettant un suivi continu ne sont pas disponibles, des mesures ponctuelles devraient être réalisées lors de chaque mission de terrain, tout en reconnaissant que ces valeurs peuvent ne pas refléter la variabilité journalière ou hebdomadaire. Des échantillons d'eau peuvent également être prélevés pour l'analyse des nutriments, notamment l'ammonium, les nitrates et les phosphates.

La caractérisation des sédiments devrait inclure l'analyse de la granulométrie, ainsi que la détermination de la teneur en matière organique et en carbone organique. La comparaison entre les sédiments végétalisés et les sédiments non végétalisés situés à proximité permet d'évaluer la contribution des herbiers marins au **stockage du carbone bleu**. Les sédiments pauvres en matière organique sont généralement préférés dans les bassins de pépinière afin de réduire les risques d'anoxie. Toutefois, le sédiment naturel provenant des sites donneurs demeure important autour des racines et des rhizomes transplantés, car il abrite le microbiome associé à ces structures.

Les équipes de terrain devraient consigner la date, l'heure, l'état de la marée, les conditions météorologiques, les coordonnées GPS, le type d'herbier, la composition spécifique ainsi que tout facteur de stress visible. Des mesures répétées au fil des saisons sont essentielles, car les lagons récifaux tropicaux peuvent présenter d'importantes variations liées aux précipitations, à la température, au régime hydrodynamique et aux activités humaines. Les données environnementales devraient ensuite être analysées conjointement avec les données relatives à la croissance et à la reproduction des plantes afin d'identifier les périodes et les sites les plus favorables à la collecte du matériel végétal.

4.3 Suivi de l'état saisonnier des plantes

Le suivi saisonnier doit être réalisé quatre fois par an, à intervalles approximatifs de trois mois, afin de caractériser les variations de la biomasse, de la densité, de la morphologie des plantes et de leur état nutritionnel. Chaque site suivi doit comporter des échantillons répliqués afin de permettre des comparaisons statistiques entre les saisons et les différents sites. Ces relevés fournissent des informations de référence essentielles sur l'état de santé des herbiers donneurs et doivent être interprétés conjointement avec le suivi de la phénologie reproductive décrit à la section 4.4.

L'échantillonnage de la biomasse et de la densité peut être réalisé à l'aide d'un carottier

d'environ 20 cm de diamètre, placé de manière aléatoire dans des zones présentant une couverture complète en herbiers marins. Le carottier doit être enfoncé ou creusé suffisamment profondément pour inclure les pousses, les rhizomes et les racines (Fig. 7).



Figure 7 Prélèvement d'un échantillon par carottage dans un herbier de *Halodule uninervis*.

L'échantillon doit ensuite être placé dans un sac en filet (Fig. 8) puis délicatement rincé afin d'éliminer les sédiments sans endommager les plantes. Au laboratoire, les pousses, les rhizomes, les racines et les débris associés sont séparés, comptés et séchés jusqu'à obtention d'une masse constante afin d'estimer la biomasse. Lorsque cela est possible, des sous-échantillons de matériel végétal devraient être analysés afin de déterminer leur teneur en carbone (C) et en azote (N).



Figure 8 Placement de l'échantillon dans un sac en plastique.

Les caractéristiques morphologiques et nutritionnelles des plantes fournissent des indicateurs complémentaires de leur état physiologique et de leur adaptation à l'environnement local. Pour chaque échantillon, des pousses intactes doivent être sélectionnées afin de mesurer la longueur des pousses, le nombre de feuilles par pousse, la largeur des feuilles ainsi que leur intégrité (feuilles intactes ou endommagées). Le diamètre des rhizomes peut également être mesuré comme indicateur de la taille et de la vigueur des plantes. Ces données morphologiques permettent de comparer les formes de croissance entre les sites et les saisons, ainsi que de détecter d'éventuelles réponses au stress, telles qu'une réduction de la longueur des feuilles, une diminution de la densité des pousses ou des modifications de la répartition de la biomasse entre les parties aériennes et souterraines.

L'état nutritionnel des herbiers marins, exprimé par le rapport carbone/azote (C/N), fournit des informations complémentaires sur

les conditions environnementales et les performances des plantes. Des rapports C élevés indiquent généralement une faible disponibilité en azote et une possible limitation nutritive susceptible de restreindre la croissance. À l'inverse, des rapports C/N faibles traduisent une disponibilité relativement élevée en azote et peuvent refléter un enrichissement en nutriments, susceptible d'accroître la prolifération des épiphytes et les phénomènes de limitation par la lumière. Des valeurs intermédiaires du rapport C/N sont généralement associées à des conditions nutritives équilibrées et à une croissance saine des plantes. L'interprétation du rapport C/N doit toutefois toujours être associée aux observations morphologiques, aux mesures de croissance et aux données environnementales, car des valeurs similaires peuvent refléter des conditions écologiques différentes selon le contexte.

4.4 Suivi de la phénologie reproductive

Le suivi de la phénologie reproductive constitue une composante essentielle du développement d'une pépinière, car il permet de déterminer quand et où des graines viables peuvent être collectées pour la propagation par semences (voir section 8). À Maurice, la période de reproduction des espèces cibles *Syringodium isoetifolium* et *Halodule uninervis* est encore mal documentée. Des observations locales préliminaires indiquent que la fertilité pourrait s'étendre d'octobre à mars, mais un suivi systématique est nécessaire afin de documenter la phénologie reproductive et son intensité. Un programme de suivi structuré durant cette période est donc requis avant toute mise en œuvre de collectes de graines à grande échelle.

Le suivi sur le terrain devrait être réalisé **au moins deux fois par mois** pendant la saison de reproduction. Comme les fleurs de *S. isoetifolium* et *H. uninervis* sont difficiles à observer *in situ*, lors de chaque visite, des échantillons répliqués de toutes les pousses présentes dans de petites placettes (par exemple 20 × 20 cm) doivent être prélevés afin d'analyser en détail la phénologie reproductive et l'effort reproducteur en laboratoire. Au laboratoire, les échantillons collectés dans le cadre du suivi reproductif doivent être examinés afin de quantifier les stades reproductifs.

Pour chaque échantillon, le nombre total de pousses, le nombre de pousses végétatives, le nombre de pousses reproductrices ainsi que le stade reproductif (par exemple : 1- fleurs ou inflorescences immatures, 2- fleurs mâles/femelles, 3- fruits immatures, 4- fruits/graines matures) doivent être enregistrés. L'effort reproducteur peut être exprimé comme le pourcentage de pousses reproductrices par rapport au nombre total de pousses, ainsi que par le nombre de fleurs/fruits/graines par pousse.

Cette classification permet une comparaison cohérente entre sites et facilite l'identification des périodes optimales pour la collecte de graines. *S. isoetifolium* et *H. uninervis* sont des espèces dioïques, et les pousses reproductrices portent donc uniquement des fleurs mâles ou femelles. Alors que *S. isoetifolium* présente des inflorescences terminales en cymes mâles et femelles (Fig. 9), les pousses reproductrices de *H. uninervis* présentent de petites fleurs mâles et femelles isolées (Figs. 10 et 11). Étant donné que les événements reproductifs peuvent être sporadiques, des observations répétées sont essentielles.



Figure 9 Inflorescence femelle (cymes) de *Syringodium isoetifolium*. L'encadré montre un détail de la fleur femelle.



Figure 10 Fleur mâle de *Halodule uninervis*.

En plus de l'observation directe des pousses reproductrices, un échantillonnage des sédiments devrait être inclus dans le programme de suivi afin d'évaluer la présence de banques de graines. De nombreuses espèces d'herbiers marins produisent des graines pouvant rester viables dans les sédiments. L'échantillonnage des 5 à 10 premiers centimètres de sédiment peut permettre d'identifier la présence de graines viables issues de saisons de reproduction précédentes. Lorsque des banques de graines sont confirmées, leur collecte doit suivre le protocole d'échantillonnage des sédiments décrit à la section 8.3.

Les résultats du suivi reproductif doivent être utilisés pour :

- Identifier les périodes de pic pour la collecte de graines (section 8)
- Déterminer les sites donneurs les plus productifs
- Évaluer la variabilité temporelle de la reproduction
- Planifier le calendrier de la pépinière, y compris la collecte, le stockage et la germination des graines (sections 8 et 9)

Étant donné que la disponibilité des graines constitue un facteur limitant majeur pour la restauration basée sur les semences, le suivi de la phénologie reproductive doit être

considéré comme une activité prioritaire durant les premières phases du

développement de la pépinière. Ce programme devrait être poursuivi sur plusieurs années lorsque cela est possible, car la variabilité interannuelle peut être importante dans les systèmes lagunaires tropicaux.



Figure 11 Fleurs femelles de Halodule uninervis.

5. Sélection des sites d'installation de la pépinière

5.1 Exigences générales du site

L'établissement d'une pépinière d'herbiers marins nécessite un site où l'approvisionnement en eau de mer, la qualité de l'eau, le régime hydrodynamique et l'accessibilité peuvent être contrôlés et gérés de manière adéquate. Le site idéal doit disposer d'une eau de mer propre, d'une salinité stable, de variations modérées de température, d'une protection contre les fortes houles ainsi que d'un espace suffisant pour l'installation de bassins ou de zones de culture semi-naturelles. Il doit également permettre un accès fréquent pour les activités de suivi, d'entretien, de nettoyage, d'échantillonnage et d'intervention en cas d'urgence.

Les systèmes extérieurs doivent bénéficier d'un éclairage naturel suffisant sans être exposés à un échauffement excessif. Dans les environnements tropicaux, une irradiance et des températures excessives peuvent être observées dans les bassins peu profonds, en particulier lorsque le renouvellement de l'eau est insuffisant. L'installation de filets d'ombrage peut être nécessaire durant les périodes de forte irradiance ou de stress thermique. À l'inverse, les systèmes de laboratoire utilisés pour la germination doivent permettre un contrôle précis de la photopériode et de la température, conformément aux exigences spécifiques des espèces concernées.

Le site de la pépinière doit également garantir des conditions d'exploitation sûres et fiables. Cela comprend l'accès à l'électricité pour alimenter les pompes, les systèmes d'aération, les capteurs et l'éclairage, la

disponibilité d'espaces sécurisés pour le stockage du matériel, un accès sécurisé pour le personnel, ainsi que la mise en place de procédures adaptées pour la manipulation de l'eau de mer, des sédiments et du matériel biologique. Lorsque la pépinière est installée dans un site accueillant du public, l'accès des visiteurs doit être contrôlé afin d'éviter toute contamination ou tout dommage accidentel aux installations.

5.2 Odysseo Oceanarium

L'Odysseo Oceanarium constitue le principal site retenu pour l'implantation de la pépinière, en combinant des composantes de laboratoire et de culture en bassins extérieurs. L'établissement dispose d'infrastructures existantes pour l'approvisionnement en eau de mer, de capacités de traitement de l'eau, d'un personnel technique qualifié ainsi que de locaux de laboratoire où la germination des graines et la croissance des plantules peuvent être réalisées dans des conditions contrôlées de lumière, de température et de salinité. Ces caractéristiques en font un site particulièrement adapté à la conduite d'essais expérimentaux durant la phase pilote.

Le système extérieur d'Odysseo comprend des bassins en fibre de verre d'une capacité d'environ 1 800 litres. Ces bassins sont exposés à la lumière naturelle du soleil et alimentés par un flux continu d'eau provenant de bassins adjacents contenant des poissons (Fig. 12). La qualité de l'eau y est surveillée afin de maintenir des paramètres physico-chimiques adaptés aux besoins des organismes hébergés, notamment une température comprise entre 24 et 26 °C, un pH de 7,9 à 8,3, une salinité de 29 à 33 PSU et de faibles concentrations en nutriments. Les plantes adultes prélevées avec leur sédiment ainsi que les plantules produites en laboratoire peuvent être installées dans ces bassins afin de comparer leurs performances dans des conditions extérieures semi-contrôlées.



Figure 12 Bassins extérieurs d'herbiers marins à l'Odysseo Oceanarium.

L'un des principaux avantages d'un environnement de type océanarium est que la qualité de l'eau y fait déjà l'objet d'un suivi régulier dans le cadre des opérations courantes de l'établissement. Les mesures de température, de salinité, de pH, d'oxygène dissous et de concentration en nutriments peuvent ainsi être intégrées au programme de suivi et à la base de données de la pépinière.

Le site présente également un fort potentiel pédagogique, car il permet aux visiteurs de découvrir l'importance écologique des herbiers marins ainsi que le rôle des pépinières de restauration dans le renforcement de la résilience des écosystèmes côtiers.

5.3 Four Seasons Resort barachois

Le site du Four Seasons Resort offre un environnement de barachois semi-naturel où une pépinière d'herbiers marins et une zone de démonstration de culture sont en cours d'installation. Ces bassins artificiels à circulation continue d'eau (Figs. 13 et 14) présentent des conditions plus proches de celles du système récif-lagon qu'un bassin entièrement artificiel, notamment grâce à un éclairage naturel, un renouvellement contrôlé de l'eau et une connectivité biologique avec le lagon.

Ces caractéristiques sont particulièrement avantageuses pour l'acclimatation des transplantations ainsi que pour les activités de sensibilisation et d'engagement du public.



Figure 13 Bassins de barachois du Four Seasons Resort.

L'utilisation de ce barachois artificiel, ainsi que la prise en considération éventuelle de barachois mauriciens traditionnels, nécessite une évaluation rigoureuse. La profondeur de l'eau, les régimes de circulation, la nature des sédiments, la turbidité, la pression d'herbivorie ainsi que le développement des épiphytes doivent être évalués avant toute plantation. Le système doit permettre le contrôle ou, à défaut, le suivi du renouvellement de l'eau et de sa qualité. Si les conditions présentent une trop forte variabilité ou si la profondeur de l'eau rend les opérations d'entretien et de suivi difficiles, le site pourrait être plus approprié pour l'acclimatation des plantes à un stade avancé que pour la production

initiale en pépinière.

L'implication d'un complexe hôtelier peut apporter une valeur ajoutée en établissant un lien entre les activités de restauration et la sensibilisation à l'environnement. Toutefois, la gestion de la pépinière doit rester fondée sur des principes scientifiques. Les activités d'interprétation et de sensibilisation destinées aux visiteurs ne doivent pas interférer avec les opérations de suivi, et toute utilisation des plantes produites en pépinière pour des actions de restauration dans les zones du complexe hôtelier doit respecter les mêmes exigences en matière d'autorisations, de diversité génétique et de biosécurité que les autres projets de restauration.

6. Conception et infrastructures de la pépinière

6.1 Configuration générale de la pépinière

La pépinière devrait être conçue comme un système modulaire pouvant fonctionner à l'échelle pilote tout en permettant une extension ultérieure. Une configuration de base comprend les modules suivants : une zone de laboratoire dédiée à la germination, un espace intérieur ou abrité destiné à la croissance des plantules, une zone de bassins extérieurs pour les transplantations de plantes adultes et les jeunes plants, un espace de stockage et de préparation du matériel, ainsi qu'un poste de gestion des données.

La modularité est importante car les différents stades du cycle de vie nécessitent des conditions spécifiques. Les graines peuvent nécessiter des traitements de salinité et de température contrôlés dans de petits récipients. Les jeunes plantules peuvent nécessiter des pots contenant du sédiment placé dans des aquariums munis d'une légère aération. Les transplantations de plantes adultes nécessitent quant à elles des bassins extérieurs de plus grande taille offrant une profondeur de sédiment suffisante, un régime hydrodynamique adapté et un espace permettant l'expansion des rhizomes.

Il est recommandé de prévoir plusieurs bassins extérieurs plutôt qu'un seul grand bassin. Le maintien de bassins distincts réduit les risques et permet qu'un échec expérimental dans un bassin n'affecte pas l'ensemble de la pépinière. Chaque bassin ou réservoir doit être identifié par un code unique. Les registres doivent inclure les dimensions du bassin, la source d'approvisionnement en eau, le débit, le type de sédiment, la date de plantation, l'espèce cultivée, le site donneur, le nombre de transplantations ou de plantules, ainsi que les éventuels traitements appliqués. Ce niveau de traçabilité est essentiel pour interpréter les résultats de croissance et planifier les futures opérations de restauration.

6.2 Approvisionnement et circulation de l’eau

La circulation de l'eau constitue l'un des éléments les plus importants de la conception de la pépinière. Les herbiers marins ont besoin d'un mouvement de l'eau pour assurer les échanges gazeux, le renouvellement des nutriments et l'élimination des déchets métaboliques. Toutefois, un débit excessif peut déraciner les plantules ou provoquer l'érosion des sédiments. Le régime recommandé est un écoulement doux et continu traversant la canopée des herbiers sans générer de turbulences importantes. Les entrées et sorties d'eau doivent être disposées de manière à éviter la formation de zones stagnantes où l'eau pourrait s'accumuler sans circulation.

Pour les bassins extérieurs, un approvisionnement continu en eau de mer renouvelée est à privilégier lorsque cela est possible, comme c'est le cas dans les barachois du Four Seasons. Les systèmes à circulation continue limitent les variations de température, d'oxygène dissous et de concentration en nutriments, tout en réduisant l'accumulation de déchets métaboliques. Lorsque des systèmes en recirculation sont utilisés, ils nécessitent une filtration, des renouvellements réguliers de l'eau et un suivi rigoureux. Les systèmes à eau statique ne devraient être utilisés que pour le maintien temporaire des plantes ou pour des expériences contrôlées de courte durée, car la qualité de l'eau peut s'y dégrader rapidement.

Une inspection hebdomadaire des entrées et sorties d'eau est nécessaire. Les grilles, conduites et systèmes d'évacuation peuvent être obstrués par des débris, des organismes d'encrassement biologique (biofouling) ou des sédiments. Une circulation irrégulière de l'eau peut entraîner une hypoxie localisée, une érosion des sédiments ou une accumulation d'épiphytes. Toutes les opérations de maintenance doivent être consignées dans le registre de la pépinière afin que les changements observés dans l'état des plantes puissent être interprétés en tenant compte des événements opérationnels survenus.

6.3 Sédiments et substrat de plantation

Le substrat de la pépinière doit favoriser le développement des racines et des rhizomes tout en limitant les risques de conditions anoxiques. Un sédiment à faible teneur en matière organique est recommandé comme couche de base dans les bassins de culture. Une quantité excessive de matière organique peut accroître la respiration microbienne, réduire la disponibilité de l’oxygène dans le sédiment et entraîner la production de sulfures ou d’autres composés susceptibles de provoquer un stress au niveau des racines des herbiers marins. Les sédiments sableux fins sont généralement adaptés, mais des essais préalables dans les conditions locales sont recommandés.

Dans la mesure du possible, les transplantations de plantes adultes doivent être déplacées avec leur sédiment d’origine. La plante, le sédiment, les racines, les rhizomes et le microbiome de la rhizosphère constituent une unité écologique intégrée. Le maintien de cette unité intacte permet de réduire le

choc de transplantation et de préserver les associations microbiennes bénéfiques.

Les plantules produites en laboratoire peuvent être transférées dans des bassins extérieurs contenant un substrat préparé ou un sédiment prélevé dans des herbiers naturels de la même espèce. L'utilisation de sédiments provenant d'herbiers naturels peut favoriser l'établissement de microorganismes bénéfiques, mais elle comporte également des risques de biosécurité liés à l'introduction potentielle de ravageurs, de pathogènes ou d'algues indésirables. Les sédiments doivent donc être collectés dans des zones donneuses en bon état écologique et faire l'objet d'une inspection préalable avant leur utilisation.

6.4 Contrôle de la lumière et de la température

La lumière est essentielle à la photosynthèse des herbiers marins et constitue souvent un facteur limitant dans les milieux naturels. Les bassins extérieurs à Maurice bénéficieront d'un fort ensoleillement naturel, mais les bassins peu profonds peuvent également être exposés à une irradiance excessive et à un échauffement important. Des filets d'ombrage devraient être disponibles et utilisés lorsque les plantes présentent des signes de stress, tels qu'un jaunissement ou un blanchissement des feuilles, ou encore une prolifération rapide des épiphytes associée à une forte disponibilité lumineuse et nutritive.

Les systèmes de germination et de croissance des plantules en laboratoire nécessitent un éclairage artificiel ou un éclairage naturel contrôlé. Une photopériode de 12 heures de lumière et 12 heures d'obscurité (12 h : 12 h) est recommandée pour de nombreux protocoles de germination et de croissance des plantules, sauf si des essais spécifiques à l'espèce indiquent d'autres exigences. L'intensité lumineuse (densité de flux de photons photosynthétiquement actifs, PPFD) devrait pouvoir être ajustée dans une plage comprise approximativement entre 0 et 500 µmol quanta m^{-2} s^{-1}.

La température doit pouvoir être contrôlée et faire l'objet d'un suivi quotidien ou continu. Les protocoles de germination en laboratoire appliqués aux espèces cibles et aux espèces apparentées utilisent généralement des températures comprises entre 22 et 28 °C environ, bien que certaines espèces alternatives nécessitent des traitements de stratification. Les bassins extérieurs doivent être conçus de manière à limiter les risques de surchauffe grâce à un renouvellement adéquat de l'eau, une profondeur suffisante, l'utilisation éventuelle de filets d'ombrage ou, si nécessaire, de systèmes de refroidissement (« chillers »).

7. Collecte de transplantations adultes et mise en place de la pépinière

7.1 Justification du transplant d'individus adultes

La transplantation de plantes adultes fournit une source immédiate de matériel végétal établi pour

initier la pépinière et permet d'ajuster les conditions environnementales afin d'optimiser la croissance des herbiers marins. Étant donné que la disponibilité des graines et les exigences de germination de *Syringodium isoetifolium* et *Halodule uninervis* à Maurice sont encore mal connues, l'utilisation de plantes adultes constitue une approche pratique pour démarrer les activités de la pépinière pendant que les méthodes de propagation par graines sont développées. Les plantes adultes contribuent également à la stabilisation des sédiments et au maintien de communautés microbiennes bénéfiques dans les bassins, améliorant ainsi la survie des plantules après leur transfert en conditions extérieures.

L'objectif n'est pas de prélever de grandes quantités d'herbiers marins dans les sites donneurs, mais plutôt de collecter de petites unités intactes capables de survivre, de se développer et, à terme, de fournir du matériel végétal produit en pépinière. Les transplantations doivent donc être réalisées de manière prudente et faire l'objet d'un suivi rigoureux. Les prélèvements effectués dans chaque herbier donneur doivent rester limités et être répartis spatialement afin d'éviter la création de vastes zones dénudées.

La transplantation de plantes adultes est particulièrement adaptée lorsque les herbiers donneurs sont denses, en bon état écologique et que les prélèvements peuvent être réalisés sans provoquer de dommages durables. Lorsque les sites donneurs sont peu denses, soumis à des facteurs de stress ou présentent une croissance lente, la collecte de graines ou l'identification de sites donneurs alternatifs devrait être privilégiée.



Figure 14 Transplantation d'herbiers marins à l'aide d'un plateau biodégradable.

7.2 Méthode de collecte sur le terrain

Sur chaque site donneur, les zones où les plantes ont été prélevées doivent être localisées afin de permettre le suivi de leur récupération. Une méthode consiste à matérialiser de façon permanente les extrémités des transects, lorsque cela est autorisé et sans danger. À chaque visite du site, un ruban de transect préalablement marqué à intervalles d'un mètre est déployé entre ces points de référence. Cette approche fournit un cadre structuré pour localiser les zones de prélèvement et assurer le suivi de leur régénération.

En eau peu profonde, les plantes peuvent être prélevées à l'aide d'une pelle ou d'un outil similaire suffisamment large pour extraire un bloc cohérent d'herbier et de sédiment d'environ 40 × 40 cm (plaque de gazon ou *sod*). Ce bloc doit être soulevé avec précaution afin de préserver l'intégrité des rhizomes et d'éviter d'écraser les feuilles. Dans les zones plus profondes, un carottage cylindrique comprenant les plantes et le sédiment (carotte), d'un diamètre d'environ 25 à 30 cm, est généralement plus facile à prélever et à remonter en surface. L'objectif est de collecter simultanément les pousses, les rhizomes, les racines et le sédiment environnant.

Chaque unité prélevée doit être délicatement placée dans un bac rigide en plastique, en conservant autant que possible l'organisation naturelle des plantes et du sédiment. Des plateaux biodégradables peuvent être utilisés afin de maintenir la structure des plaques de gazon ou des carottes de sédiment (Fig. 15). Les plateaux doivent être conservés à l'ombre et humidifiés avec de l'eau de mer du site. L'exposition directe au soleil ainsi que les délais prolongés de transport doivent être évités, car la chaleur et la dessiccation peuvent rapidement provoquer un stress des tissus végétaux.

7.3 Installation dans les bassins de la pépinière

À la pépinière, les plaques de gazon, les carottes ou les plateaux biodégradables doivent être enfouis dans le sédiment préparé des bassins extérieurs de manière que la surface du sédiment transplanté soit au même niveau que le substrat environnant. L'avantage des plateaux biodégradables est qu'ils permettent de maintenir plus longtemps l'organisation naturelle de l'herbier et du sédiment pendant l'acclimatation aux nouvelles conditions environnementales. Leur dégradation progressive permettra ensuite aux rhizomes horizontaux des herbiers marins de s'étendre latéralement.

Une disposition en damier est recommandée pour l'installation des plaques de gazon, des carottes ou des plateaux biodégradables, car elle laisse des zones de sédiment nu entre les unités plantées, favorisant l'expansion des rhizomes et facilitant les mesures de croissance. La densité de plantation doit être enregistrée.

Après l'installation, la circulation de l'eau doit être douce durant les premiers jours afin d'éviter la remise en suspension des sédiments. Les plantes doivent être inspectées quotidiennement pendant la phase initiale d'acclimatation. Les signes de stress liés à la transplantation comprennent le flétrissement des feuilles, leur jaunissement, la nécrose, une perte excessive de feuilles ou encore des conditions d'anoxie dans le sédiment. En cas d'observation de ces signes, les feuilles mortes doivent être retirées et les conditions de circulation de l'eau, de température et de lumière doivent être ajustées.

Le premier mois suivant la transplantation est une période critique. Les actions de maintenance doivent se concentrer sur la stabilité de la qualité de l'eau, la prévention de la surchauffe et le contrôle des épiphytes sans endommager les feuilles. L'état des plantes doit être documenté à l'aide de photographies standardisées et d'observations écrites. La date de transplantation doit servir de référence pour tous les calculs de croissance et de survie.



8. Collecte et traitement des graines

8.1 Importance de la restauration basée sur les graines

La restauration basée sur les semences est importante car elle permet de réduire la pression exercée sur les herbiers donneurs et d'augmenter la diversité génétique des populations restaurées. La transplantation de plantes adultes transfère principalement des clones existants ou des fragments de plantes, tandis que les approches basées sur les graines permettent d'introduire de nouvelles combinaisons génétiques issues de la reproduction sexuée. Cette diversité peut améliorer la résilience face aux changements environnementaux, aux maladies et aux pressions locales.

Cependant, la restauration par semis présente également des défis. Chez de nombreuses espèces d'herbiers marins, le semis direct en milieu naturel entraîne de faibles taux d'établissement, car les graines peuvent être consommées, enfouies trop profondément, dispersées par les courants ou perturbées par la bioturbation. La germination *ex situ* et la production de plantules en pépinière permettent d'améliorer la survie initiale en donnant aux plantules le temps de développer racines et pousses avant leur exposition aux contraintes du milieu naturel. La pépinière joue ainsi un rôle d'interface entre la collecte des graines et leur utilisation pour la restauration.

8.2 Collecte à partir de pousses reproductrices

La collecte des graines doit être réalisée vers la fin de la saison de reproduction, lorsque les fruits et les graines sont plus susceptibles d'être matures et viables. La collecte directe sur les pousses reproductrices est appropriée lorsque des fleurs, fruits ou structures porteuses de graines peuvent être identifiés sur le terrain. Les équipes de terrain doivent soit prélever délicatement à la main les pousses porteuses de graines, soit agiter prudemment les pousses reproductrices afin de libérer les fruits ou graines matures. Une proportion limitée du matériel reproducteur doit être prélevée dans chaque herbier afin de préserver la régénération naturelle.

Les pousses et graines collectées doivent être transportées dans une glacière contenant de l'eau de mer du site de collecte. Le matériel doit rester immergé et à l'abri de la lumière durant le transport. À l'arrivée au laboratoire, le matériel reproducteur peut être transféré dans de grands récipients ou aquariums contenant de l'eau de mer aérée. Certains protocoles utilisent de l'eau de mer diluée à environ 12 PSU afin de favoriser la libération des graines, mais des essais locaux doivent déterminer les conditions optimales pour les populations mauriciennes.

Les récipients doivent être contrôlés quotidiennement. Les graines qui se déposent au fond doivent être récupérées délicatement à l'aide d'une pipette, d'un tamis ou d'un petit filet. La libération des graines peut s'étendre sur plusieurs semaines, mais le calendrier précis doit être enregistré pour

chaque espèce et chaque site donneur. Les graines doivent ensuite être nettoyées des débris et transférées vers des conditions de stockage ou des essais de germination.

8.3 Collecte à partir des banques de graines sédimentaires

De nombreuses espèces d'herbiers marins produisent des graines capables de rester dormantes dans les sédiments. L'échantillonnage des banques de graines est utile lorsque les pousses reproductrices sont difficiles à observer ou lorsque les graines ont déjà été libérées. La majorité des graines viables se trouve généralement dans les 5 à 10 premiers centimètres de sédiment. Comme la distribution des graines est hétérogène, il est préférable de prélever de nombreux petits échantillons plutôt que quelques grands.

Sur chaque site de collecte, plusieurs petits carottages de sédiment sont réalisés à l'aide d'une seringue plastique coupée ou d'un carottier similaire, généralement de 5 cm de diamètre et de 5 à 10 cm de profondeur. Le piston peut être utilisé comme bouchon pour faciliter l'extraction de la carotte de sédiment. L'échantillonnage doit être répété afin d'obtenir un matériel représentatif.

Dans la mesure du possible, le sédiment doit être tamisé sur le terrain afin de réduire les volumes transportés au laboratoire. Une maille d'environ 0,5 mm permet de retenir une grande partie des graines d'herbiers marins tout en laissant passer les particules fines, mais la taille des mailles doit être adaptée à celle des graines des espèces ciblées. Un tamis supplémentaire à maille plus large peut être utilisé pour retenir les sédiments grossiers. Le matériel retenu doit être conservé dans de l'eau de mer à température ambiante et examiné au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'une loupe manuelle.

8.4 Collecte à partir des fruits

Lorsque des fruits intacts sont collectés, les graines peuvent être libérées naturellement dans des conditions de laboratoire contrôlées. Les fruits doivent être placés dans des béchers ou des récipients remplis d'eau de mer provenant du site de collecte. Un dispositif d'extraction simple peut inclure un tamis grossier permettant de retenir les gros débris et un tamis fin permettant de capturer les graines libérées. Une aération douce à l'aide d'une pierre poreuse assure l'oxygénation et la circulation de l'eau.

Les récipients doivent être maintenus sous une photopériode et une irradiance similaire aux conditions naturelles, sauf si des traitements expérimentaux sont testés. Les graines retenues dans le tamis fin doivent être collectées tous les deux à trois jours. Cette approche réduit la manipulation manuelle et peut mieux préserver la viabilité des graines qu'une extraction forcée.

Toutes les graines collectées doivent être étiquetées selon l'espèce, le site donneur, la date, la méthode de collecte et, lorsque cela est connu, le stade de maturité. Les lots de graines ne doivent pas être mélangés, sauf si l'objectif est spécifiquement de constituer un lot de restauration mixte.

Le maintien de lots séparés permet de comparer les taux de germination et d'identifier les sites donneurs les plus performants.

9. Stockage des graines, germination et culture des plantules

9.1 Principes généraux de stockage des graines

Le stockage des graines vise à préserver leur viabilité jusqu'à leur mise en germination. Les conditions de stockage doivent empêcher une germination prématurée, limiter la croissance microbienne et maintenir l'état physiologique des graines. Chez de nombreuses espèces d'herbiers marins, une faible température et l'obscurité contribuent à maintenir la quiescence. Toutefois, un stockage prolongé peut réduire la viabilité, et sa durée doit donc être minimisée sauf dans le cadre d'études spécifiques.

Un protocole initial recommandé consiste à stocker les graines à environ 4 °C, dans l'obscurité et dans de l'eau de mer. Une légère circulation de l'eau peut réduire la stagnation, et un renouvellement hebdomadaire de l'eau de mer permet de limiter le développement de moisissures et de micro-organismes. L'aération n'est pas toujours nécessaire pendant le stockage, mais les conditions en oxygène doivent être vérifiées si des signes de dégradation apparaissent.

Les expériences de stockage doivent être soigneusement documentées. Pour chaque lot, la pépinière doit enregistrer la température de stockage, la salinité, les conditions de lumière, la fréquence de renouvellement de l'eau, la date de début et de fin, le nombre de graines stockées, le nombre de graines ayant germé pendant le stockage et le nombre de graines encore viables après stockage. Ces données seront essentielles pour améliorer les protocoles futurs de manipulation des graines à Maurice.

9.2 Mise en place du laboratoire de germination

La germination en laboratoire doit commencer par des essais pilotes de petite taille et des réplicats, plutôt que par de grands lots uniques. Les graines peuvent être placées dans des tubes d'essai en verre, des boîtes de Petri ou de petits récipients remplis d'eau de mer artificielle ou naturelle. Les contenants doivent être étiquetés avec l'espèce, le site donneur, la date, les traitements de salinité et de température ainsi que le numéro de réplica. Le suivi de la germination doit être effectué au moins deux fois par semaine.

L'eau de mer artificielle peut être préparée à partir de sels dissous dans de l'eau distillée et ajustée à un pH d'environ 8,2 lorsque nécessaire. L'eau de mer naturelle du site de collecte peut également être utilisée, notamment lorsque l'objectif est de reproduire les conditions de terrain. Le choix doit être cohérent au sein d'un même essai. Les récipients doivent être maintenus propres et l'eau doit

être renouvelée en cas de contamination ou de diminution de l'oxygène dissous. L'intensité lumineuse doit être faible à modérée (20–80 µmol photons m^{-2} s^{-1}) et une photopériode de 12 heures de lumière et 12 heures d'obscurité doit être maintenue pendant la germination.

La germination doit être définie de manière cohérente. Une graine est considérée comme germée lorsque l'enveloppe se rompt et que le cotylédon ou la première structure de plantule émerge. Le développement ultérieur, incluant la formation des feuilles, des racines et l'initiation du rhizome, doit être enregistré séparément. Cette distinction est importante car la germination ne conduit pas toujours à l'établissement réussi de la plantule.

9.3 Germination de *Syringodium isoetifolium*

Les informations spécifiques sur la germination de *Syringodium isoetifolium* sont limitées, de sorte que les protocoles initiaux s'appuient sur des espèces apparentées du genre *Syringodium*. Les graines peuvent être placées dans de l'eau de mer artificielle avec une gamme de salinité comprise approximativement entre 20 et 35 PSU, et maintenues à des températures d'environ 24 à 26 °C. Étant donné que les effets de la salinité peuvent être limités chez certaines espèces de *Syringodium*, les essais doivent couvrir une gamme reflétant les conditions des lagons mauriciens.

Le premier signe visible de germination peut être l'ouverture du tégument du fruit et l'émergence du cotylédon. Le cotylédon peut devenir vert puis se détacher au moment du développement des vraies feuilles. La formation de racines adventives et de rhizomes doit être enregistrée comme indicateur de transition réussie de la plantule. Les graines germées doivent être transférées dans un sédiment sableux fin ou un substrat préparé, en les enfouissant à une profondeur inférieure à 5 cm.

9.4 Germination d'Halodule *uninervis*

Les protocoles spécifiques pour *Halodule uninervis* peuvent être inspirés des études réalisées sur des espèces apparentées du genre *Halodule*. Une approche initiale consiste à placer les graines dans de l'eau de mer artificielle à une salinité de 10 à 20 PSU et à les maintenir à 22 à 24 °C pendant deux semaines, suivies d'un transfert vers une salinité plus faible d'environ 5 PSU pendant une période pouvant aller jusqu'à 3 mois. Des essais locaux sont nécessaires, car les populations tropicales peuvent présenter des réponses différentes en matière de dormance et de sensibilité à la salinité.

La germination peut commencer par la rupture du tégument et l'émergence du cotylédon. Les feuilles peuvent se développer à partir de la gaine cotylédonaire, et des racines adventives doivent apparaître à la base. Les plantules peuvent développer deux feuilles en quelques semaines dans des conditions favorables. La formation de rhizomes ramifiés constitue une étape clé, car elle indique un potentiel d'expansion clonale après transplantation.

9.5 Protocole pour les espèces alternatives

Si les espèces cibles principales ne produisent pas suffisamment de graines, des espèces alternatives telles que *Ruppia* spp. et *Halophila* spp. peuvent être envisagées comme espèces complémentaires ou de substitution. Les espèces de *Ruppia* réagissent souvent fortement aux variations de salinité. Un protocole de germination peut exposer les graines à des conditions hypersalines, puis réduire progressivement la salinité jusqu'à des niveaux très faibles, simulant les changements osmotiques susceptibles de déclencher la rupture du tégument. Toutefois, les protocoles doivent être adaptés aux populations locales et aux objectifs écologiques.

Les graines de *Halophila* peuvent nécessiter une stratification thermique, avec une exposition à des températures plus fraîches suivie d'un réchauffement progressif. Étant donné les conditions tropicales de Maurice, le comportement des graines peut différer des protocoles établis en zones tempérées. Les essais doivent utiliser des traitements thermiques reflétant la variabilité saisonnière observée sur les sites de collecte. Une fois germées, les plantules doivent être cultivées jusqu'au stade d'au moins une feuille, et de préférence jusqu'à la formation d'un rhizome, avant leur transfert.

Les espèces alternatives ne doivent pas être utilisées simplement parce qu'elles sont plus faciles à faire germer. Le choix des espèces doit être aligné avec les objectifs de restauration, la distribution historique, les conditions d'habitat et la compatibilité écologique. La pépinière peut tester plusieurs espèces, mais les décisions de transplantation doivent rester prudentes et fondées sur la pertinence écologique.

9.6 Croissance des plantules

Après la germination, les plantules doivent être transplantées dans un sédiment sableux fin ou un sédiment d'herbier naturel et maintenues dans de l'eau de mer naturelle à environ 24 à 26 °C sous une photopériode de 12 heures de lumière et 12 heures d'obscurité. La gamme recommandée d'intensité lumineuse pour la croissance des plantules est de 100 à 300 µmol photons m^{-2} s^{-1}. Une irradiance plus élevée (>400–500 µmol m^{-2} s^{-1}) peut provoquer une photo-inhibition. Durant cette période, la lumière, la salinité, la température et la qualité de l'eau doivent rester stables. La mortalité des plantules doit être enregistrée avec, lorsque cela est possible, les causes probables telles que la croissance fongique, l'absence d'enracinement, l'enfouissement, la flottabilité, le broutage ou la prolifération d'algues.

Les plantules doivent être suivies pendant au moins deux mois avant leur transfert vers les bassins extérieurs. Tous les écarts par rapport au protocole doivent être documentés afin de constituer une base de connaissances locale.

10. Culture en bassins extérieurs

10.1 Transfert du laboratoire vers les bassins extérieurs



Le transfert des contenants de laboratoire vers les bassins extérieurs constitue une phase sensible. Les plantules cultivées dans des conditions intérieures stables peuvent subir un stress lorsqu'elles sont exposées à la lumière naturelle, aux variations de température et à un mouvement de l'eau plus important. Une période d'acclimatation doit donc être mise en place. Durant cette phase, les plantules sont progressivement exposées aux conditions extérieures, soit en les transférant dans des bassins extérieurs ombragés, soit en augmentant progressivement l'intensité lumineuse et le mouvement de l'eau en laboratoire.

Les plantules ne doivent être transférées que lorsqu'elles présentent des feuilles et des racines visibles, et de préférence un début de formation de rhizome. Les très jeunes plantules sans ancrage sont facilement déplacées. La profondeur de plantation doit être suffisamment faible pour permettre l'émergence des feuilles, mais suffisamment importante pour maintenir la plantule en place. Un sédiment fin doit être délicatement tassé autour des racines sans recouvrir les feuilles.

Les données de transfert doivent inclure l'âge des plantules, le nombre planté, la profondeur de plantation, le type de sédiment, le code du bassin et les conditions environnementales au moment de la plantation. La survie doit être vérifiée fréquemment au cours des deux premières semaines. En cas de mortalité élevée, les plantules restantes doivent être stabilisées, l'ombrage ou le débit ajustés, et

la cause du problème identifiée avant toute nouvelle tentative de transfert.

10.2 Culture des plantes adultes en bassins

Les transplantations adultes en bassins extérieurs doivent être considérées comme des patchs vivants capables de s'étendre par croissance végétative. Les principaux indicateurs de réussite de l'établissement sont la survie des pousses initiales, la production de nouvelles pousses, l'extension horizontale des rhizomes, le développement des racines dans le substrat du bassin et l'augmentation de la couverture au fond. Durant la phase initiale, une certaine perte de feuilles peut être observée, mais une nécrose persistante ou un déclin des pousses indique un stress.

La conception de plantation en bassin doit laisser suffisamment d'espace pour l'expansion. Une disposition en damier permet aux unités plantées de s'étendre vers les zones libres et facilite le suivi visuel. Les espaces ouverts permettent également de déterminer si l'expansion résulte de la croissance des rhizomes ou de la germination de plantules. Une densité trop élevée peut rendre difficile la quantification de la croissance et limiter la circulation de l'eau.

Le contrôle des épiphytes est essentiel dans les bassins extérieurs. Les feuilles doivent être inspectées chaque semaine et nettoyées délicatement à l'aide d'une brosse souple lorsque la couverture épiphytique devient excessive. Le nettoyage doit être réalisé avec précaution, car des feuilles endommagées peuvent devenir des points d'entrée pour des infections ou la décomposition. Les niveaux de nutriments doivent être vérifiés en cas de prolifération d'épiphytes, car des problèmes persistants indiquent souvent un excès de nutriments, une faible pression de broutage, un débit insuffisant ou une forte irradiance. De petits organismes brouteurs peuvent être introduits dans les bassins afin de réduire la charge épiphytique.

10.3 Routines d'entretien

La maintenance de routine doit inclure l'inspection des pompes, conduites, entrées et sorties d'eau, filtres et parois des bassins. Les débris doivent être retirés, mais les perturbations du sédiment et des racines doivent être minimisées. Le niveau d'eau doit être vérifié quotidiennement dans les systèmes où l'évaporation peut augmenter la salinité. Toute correction de salinité doit être progressive afin d'éviter un stress osmotique.

L'état de surface du sédiment doit être observé. Un sédiment noirci, une odeur de sulfure, la présence de bulles de gaz ou la dégradation des racines peuvent indiquer des conditions anoxiques. En cas d'anoxie, il peut être nécessaire d'ajuster le débit, de retirer du sédiment riche en matière organique ou de réduire la densité de plantation. La pépinière doit éviter les perturbations majeures du sédiment sauf en cas de nécessité, car la remise en suspension peut endommager les feuilles et réduire la clarté de l'eau.

Toutes les actions de maintenance doivent être consignées dans un registre. Cela inclut le nettoyage, les changements d'eau, les pannes de pompes, les ajustements d'ombrage, les ajouts d'engrais, les ajouts de sédiment, l'élimination des organismes indésirables, l'ajout ou le retrait d'organismes brouteurs et tout événement inhabituel. Sans registre de maintenance, il devient difficile d'interpréter les variations de performance des plantes.



11. Suivi des conditions environnementales de la pépinière

11.1 Paramètres de qualité de l'eau

Le programme de suivi de la pépinière doit mesurer la température, la salinité, le pH, l'oxygène dissous et les nutriments comme paramètres essentiels de la qualité de l'eau. Lorsque cela est possible, ces paramètres doivent être enregistrés en continu à l'aide de capteurs et d'enregistreurs de données. L'oxygène dissous et le pH doivent être mesurés en continu pendant la phase pilote, car ils peuvent fortement varier entre le jour et la nuit dans les systèmes de culture de plantes.

Les nutriments, notamment les nitrates, l'ammonium et les phosphates, doivent être analysés au moins deux fois par mois. Les échantillons doivent être prélevés à la fois à l'entrée et à la sortie du système. La comparaison entre le flux entrant et le flux sortant permet d'évaluer si le système d'herbier marin consomme les nutriments ou s'il en relâche dans certaines conditions. L'échantillonnage doit être effectué à la même heure de la journée afin de limiter les variations diurnes.

La mesure de l'alcalinité est recommandée deux fois par mois, en particulier si des bilans de carbone doivent être calculés. Associée au pH, l'alcalinité permet d'estimer le carbone inorganique dissous. Cela est utile pour comprendre les dynamiques du carbone dans la pépinière, mais nécessite des

méthodes cohérentes et une interprétation rigoureuse des données.

11.2 Suivi des paramètres photiques

La disponibilité de la lumière doit être suivie car elle influence directement la photosynthèse et la croissance. Dans les bassins extérieurs, la lumière doit être mesurée au niveau de la canopée plutôt qu'à la surface de l'eau, car la turbidité et la profondeur peuvent réduire la lumière atteignant les feuilles. Dans les systèmes de laboratoire, l'intensité lumineuse et la photopériode doivent être mesurées et enregistrées pour chaque essai de germination et de croissance.

L'ombrage doit être considéré comme un traitement expérimental et non comme un ajustement informel. Si des filets d'ombrage sont installés, la date, le niveau d'ombrage et la raison doivent être documentés. Les réponses des plantes doivent ensuite être évaluées. L'ombrage peut réduire le stress thermique et la photo-inhibition, mais il peut aussi limiter la croissance s'il est excessif. L'équilibre optimal peut différer entre jeunes plantules et transplantations adultes.

Les observations au niveau des feuilles peuvent aider à interpréter les conditions lumineuses. Des feuilles longues et pâles peuvent indiquer une faible lumière, tandis que des extrémités blanchies ou nécrosées peuvent indiquer une lumière excessive ou un stress thermique. Une forte couverture d'épiphytes peut imiter un stress de faible luminosité même lorsque la lumière externe est élevée, car les épiphytes réduisent la lumière atteignant la surface foliaire.

11.3 Suivi des sédiments

Le sédiment n'est pas seulement un support physique ; il constitue une partie intégrante de l'habitat des herbiers marins et influence l'équilibre en oxygène des racines, la disponibilité des nutriments et les interactions microbiennes. Les conditions du sédiment doivent donc être suivies en parallèle de la qualité de l'eau. Le potentiel redox du sédiment peut être utilisé comme indicateur de la disponibilité en oxygène et des conditions réductrices autour des racines et rhizomes.

Les mesures doivent être réalisées à l'aide d'une électrode redox en platine reliée à un millivoltmètre, avec des relevés effectués à des profondeurs standard dans la zone racinaire, par exemple à 1, 3, 5 et 10 cm sous la surface du sédiment. Des mesures répétées doivent être effectuées dans chaque herbier donneur ou bassin de la pépinière et enregistrées avec les observations de l'aspect du sédiment, les odeurs, la température de l'eau, la salinité et l'état des plantes. Des valeurs faibles (0 à −100 mV) ou fortement négatives (< −200 mV) indiquent des conditions réduites ou anoxiques et peuvent signaler un risque d'accumulation de sulfures, de stress racinaire et de dégradation des rhizomes.

Les données redox doivent toujours être interprétées conjointement avec les observations visuelles du sédiment, la croissance des plantes, l'état des racines et les paramètres de qualité de l'eau, et non utilisées comme indicateur isolé.

Le suivi du sédiment doit être interprété avec prudence dans les petits bassins, car il s'agit de systèmes artificiels où les effets de bord sont importants. Néanmoins, les tendances observées peuvent guider les décisions de gestion, telles que la réduction des apports organiques, l'augmentation du débit d'eau, l'ajustement de la densité de plantation ou le remplacement du sédiment dans les zones problématiques.

12. Suivi de la santé et de la croissance des herbiers marins

12.1 Évaluation visuelle de l'état des plantes

L'inspection visuelle constitue la méthode la plus simple et la plus fréquente pour évaluer l'état des plantes. Le personnel doit inspecter les feuilles, les pousses, la surface du sédiment et la clarté de l'eau au moins deux fois par semaine. Des plantes en bonne santé présentent des feuilles vertes, des pousses fermes, des rhizomes intacts et des signes de nouvelle croissance. Les symptômes de stress incluent le jaunissement, le brunissement, la nécrose, la perte de feuilles, une couverture épiphytique excessive, le noircissement du sédiment ou la présence de pousses flottantes.

Les inspections doivent être standardisées. Les observateurs doivent enregistrer systématiquement les mêmes catégories à chaque passage, notamment la couleur des feuilles, le niveau d'épiphytes, la présence de brouteurs ou de parasites, l'état du sédiment, la clarté de l'eau et toute odeur ou mousse inhabituelle. Des photographies doivent être prises depuis des positions fixes afin de constituer un enregistrement visuel. Les observations subjectives deviennent plus utiles lorsqu'elles sont répétées de manière cohérente.

Si des signes de stress sont observés, la réponse doit être proportionnée et documentée. Les actions immédiates peuvent inclure la vérification du débit d'eau, la mesure de la température et de l'oxygène dissous, la mesure du potentiel redox du sédiment, la réduction de la lumière par ombrage, le nettoyage des épiphytes, l'élimination du matériel en décomposition ou l'ajustement de la salinité. La cause du stress doit être identifiée avant d'apporter des modifications majeures.

12.2 Suivi de la couverture et de l'expansion

La couverture benthique est l'un des indicateurs les plus importants de la performance de la pépinière. Dans les bassins, des photographies verticales doivent être prises à intervalles réguliers en conservant la même hauteur de caméra, le même angle et les mêmes conditions d'éclairage. Une échelle de référence ou un cadre fixe doit être inclus. Les images peuvent être analysées à l'aide de logiciels tels que ImageJ (https://imagej.net/ij/download.html) afin d'estimer le pourcentage de couverture des herbiers.

Le suivi de la couverture doit être réalisé au moins une fois par mois, et plus fréquemment durant les

deux premiers mois suivant la transplantation. L'analyse doit distinguer la zone plantée de la colonisation nouvelle lorsque cela est possible. Dans un dispositif en damier, l'expansion dans les zones initialement libres constitue un indicateur fort de la réussite de la croissance végétative.

Les données de couverture doivent être représentées dans le temps pour chaque bassin et chaque espèce. Les courbes de croissance peuvent révéler des phases de latence, des périodes d'expansion rapide, des ralentissements saisonniers ou des déclins. Ces tendances doivent être comparées aux données environnementales afin d'identifier les facteurs influençant la performance des plantes.

12.3 Mesures des feuilles et des pousses

La mesure de la longueur des feuilles constitue un indicateur quantitatif simple de la croissance des plantes. Toutes les deux semaines, 30 feuilles réparties dans l'ensemble du bassin doivent être sélectionnées de manière aléatoire et mesurées pour leur longueur maximale. Les feuilles ne doivent pas être choisies uniquement dans les zones les plus saines, afin d'éviter un biais des résultats. Toute trace de broutage, de rupture ou de nécrose doit être notée.

La densité des pousses peut être mesurée à l'aide de quadrats de petite taille lorsque la couverture végétale est suffisante. Pour les mesures destructives de biomasse, les perturbations doivent être minimisées durant la phase pilote. De petits quadrats, par exemple de 10 × 10 cm, peuvent être récoltés trimestriellement uniquement lorsque la surface plantée est suffisamment grande pour supporter un prélèvement. Les échantillons doivent être séparés en composantes aériennes et souterraines, puis séchés et pesés.

La pépinière doit privilégier le suivi non destructif durant la phase d'établissement. Les prélèvements destructifs de biomasse fournissent des données importantes, mais peuvent compromettre la production s'ils sont réalisés trop tôt ou trop fréquemment. Lorsque la biomasse est échantillonnée, l'emplacement doit être enregistré et la zone laissée en récupération.

12.4 Suivi de la reproduction dans les bassins de la pépinière

Les plantes adultes cultivées en pépinière doivent être surveillées pour la présence de structures reproductrices. La floraison ou la fructification en bassin fournirait des informations précieuses sur les déclencheurs de reproduction et pourrait permettre la création d'une source locale de graines sans recourir à de nouvelles collectes sur les sites donneurs. Les inspections doivent rechercher des pousses fertiles, des fleurs mâles et femelles, des fruits et des graines, à l'aide de loupes binoculaires ou de microscopes stéréoscopiques lorsque nécessaire.

Si des structures reproductrices sont observées, elles doivent être photographiées, comptées et associées aux conditions du bassin. La pépinière doit enregistrer l'espèce, la date, la température de

l'eau, la salinité, le régime lumineux et l'état des plantes. La reproduction en bassins de pépinière ne doit pas être considérée comme systématique chaque année. Elle peut dépendre de la maturité des plantes, des signaux saisonniers, des variations de température, de salinité, de lumière et de nutriments. Un suivi continu est donc nécessaire afin de détecter les événements reproductifs et de les exploiter efficacement.

13. Suivi de la récupération des sites donneurs

13.1 Objectif du suivi de la récupération des sites donneurs

Le suivi de la récupération des sites donneurs garantit que l'établissement de la pépinière ne provoque pas de dommages inacceptables aux herbiers naturels. Tout prélèvement de plantes adultes crée une zone dénudée ou perturbée (Fig. 16), et la vitesse de récupération dépend de la croissance des espèces, de la saison, de la stabilité du sédiment et des pressions locales. Le suivi fournit des preuves que les méthodes de collecte sont durables ou indique quand la récolte doit être réduite ou interrompue.

Le suivi de la récupération améliore également la compréhension de la dynamique naturelle des herbiers. La vitesse à laquelle les herbiers adjacents recolonisent les zones dénudées peut informer la planification de la restauration. Une récupération rapide suggère une forte résilience locale, tandis qu'une récupération lente peut indiquer un stress environnemental ou une capacité limitée d'expansion des rhizomes. Ces données aident à identifier de meilleurs sites donneurs et de meilleures périodes de collecte.

Le suivi des sites donneurs doit être intégré au budget et au calendrier du projet. Il nécessite des visites de terrain, de la photographie, des comptages de pousses et une analyse des données. Sans ce volet, le programme risque de transférer la dégradation des sites de restauration vers les sites donneur.



Figure 15 Zone dénudée créée à la suite du prélèvement d'herbier marin pour la collecte de transplantations.

13.2 Méthode de suivi

Les zones dénudées créées lors de la collecte de transplantations doivent être localisées à l'aide de transects permanents et de positions enregistrées. Lors de chaque visite de suivi, un quadrat métallique de surface connue doit être placé sur chaque zone dénudée afin de fournir une échelle. Une photographie verticale doit être prise dans des conditions standardisées. Les images peuvent ensuite être analysées pour mesurer la surface encore dénudée et la recolonisation.

Des visites mensuelles sont recommandées pendant la première phase de récupération. Les observateurs doivent enregistrer la nouvelle croissance des rhizomes aux bords des patchs, l'apparition de nouvelles pousses dans la zone dénudée, l'identité des espèces, la stabilité du sédiment et les signes d'érosion ou d'enfouissement. Le nombre de pousses se développant à l'intérieur de chaque zone dénudée doit être comptabilisé. Si d'autres espèces colonisent la zone, cela doit également être noté.

La récupération peut être exprimée par la réduction de la surface dénudée au cours du temps, l'augmentation de la densité de pousses dans la zone, ou le pourcentage de couverture par rapport à l'herbier adjacent. Le suivi doit se poursuivre jusqu'à ce que la zone soit largement recolonisée ou qu'il devienne évident que la récupération est lente et nécessite des mesures supplémentaires.

13.3 Règles décisionnelles pour les futures récoltes

Les prélèvements doivent être ajustés en fonction de la récupération des sites donneurs. Si les zones dénudées se rétablissent rapidement et que l'herbier adjacent reste en bonne santé, une collecte limitée peut être poursuivie selon une approche conservatrice. Si la récupération est lente, l'intensité des prélèvements doit être réduite, la collecte doit être transférée vers d'autres sites, ou les méthodes basées sur les semences doivent être privilégiées.

Si le suivi révèle de l'érosion, une expansion des zones dénudées, une instabilité persistante du sédiment ou un déclin de l'herbier environnant, la collecte sur ce site donneur doit être interrompue. Le site peut nécessiter une protection contre d'autres pressions avant de pouvoir être réutilisé. Les sites donneurs ne doivent jamais être considérés comme des sources de matériel renouvelables sans limite.

Les règles de décision doivent être documentées dans le plan de gestion du projet. Par exemple, le programme peut définir qu'aucune nouvelle transplantation adulte ne sera prélevée sur un transect tant qu'un pourcentage minimal de la zone prélevée n'a pas été recolonisé. De tels seuils rendent les décisions de collecte transparentes et défendables.

14. Évaluation de la séquestration du carbone et des nutriments

14.1 Justification

Les écosystèmes d'herbiers marins sont reconnus pour leur capacité à séquestrer le carbone et les nutriments, contribuant ainsi à la régulation du climat, à l'amélioration de la qualité de l'eau et au bon fonctionnement des écosystèmes. Dans le contexte d'une pépinière, l'évaluation des dynamiques du carbone et des nutriments est essentielle afin de déterminer si le système fonctionne comme une unité écologique productive et équilibrée ou s'il est affecté par un excès de matière organique, un enrichissement en nutriments ou des conditions environnementales sous-optimales. Les bassins de pépinière étant des environnements contrôlés, des facteurs tels que le renouvellement de l'eau, la composition du sédiment et la densité des plantes peuvent fortement influencer les cycles du carbone et des nutriments, souvent plus rapidement que dans les systèmes naturels.

L'évaluation du carbone et des nutriments fournit une mesure intégrée du fonctionnement de l'écosystème en tenant compte de l'équilibre entre production, respiration, stockage et exportation. Ces évaluations permettent également de détecter précocement des déséquilibres tels qu'une accumulation de matière organique, une anoxie du sédiment ou une disponibilité excessive en nutriments, susceptibles d'affecter la santé des plantes et les performances de la pépinière.

14.2 Bilan carbone de la pépinière

Le bilan carbone d'un bassin de pépinière reflète l'équilibre entre les apports de carbone, les transformations internes, le stockage et les pertes du système. Le carbone entre dans le système sous forme de carbone inorganique dissous provenant de l'atmosphère et de l'eau de mer entrante, ainsi que sous forme de matière organique particulaire et dissoute. Au sein de la pépinière, le carbone est fixé par les herbiers marins grâce à la photosynthèse, incorporé dans la biomasse végétale, transféré vers les sédiments, restitué à la colonne d'eau par la respiration et exporté vers l'atmosphère ou par l'eau sortante.

Les échanges de CO_2 à l'interface air-eau fournissent une mesure directe du métabolisme net de l'écosystème et devraient être quantifiés à l'aide d'une méthode de chambre flottante. Une chambre de volume et de surface connus est placée à la surface de l'eau et reliée à un analyseur de CO_2 en circuit fermé. La concentration en CO_2 à l'intérieur de la chambre est enregistrée en continu pendant environ 20 à 30 minutes, en veillant à obtenir une variation linéaire de la concentration. Les mesures doivent être répétées plusieurs fois par bassin et à différents moments de la journée afin de prendre en compte la variabilité nycthémérale. Le taux de variation de la concentration en CO_2 est ensuite utilisé pour calculer les flux. Des flux négatifs indiquent une absorption nette de CO_2 par le système, tandis que des flux positifs indiquent une émission nette. Les flux doivent être intégrés dans le temps

afin d'obtenir des estimations journalières des échanges nets de carbone.

Les apports et les exportations de carbone associés au renouvellement de l'eau doivent être évalués par la mesure du carbone inorganique dissous, à partir de mesures combinées du pH et de l'alcalinité aux points d'entrée et de sortie de l'eau. Les différences de concentration entre l'eau entrante et sortante, multipliées par le débit de renouvellement, permettent d'estimer les importations ou exportations de carbone. Lorsque cela est possible, les concentrations en carbone organique dissous et en carbone organique particulaire peuvent également être mesurées afin de quantifier d'autres voies de transfert du carbone.

Au sein de la pépinière, le stockage du carbone dans la biomasse doit être estimé à partir d'échantillonnages saisonniers des pousses, rhizomes et racines des herbiers marins selon les méthodes décrites à la section 4.3. Les échantillons doivent être séchés jusqu'à masse constante puis analysés pour leur teneur en carbone à l'aide d'une analyse élémentaire. Les variations du stock de carbone dans la biomasse au cours du temps fournissent une estimation de l'accumulation de carbone liée à la croissance des plantes.

Le stockage du carbone dans les sédiments peut être évalué à partir de carottes de volume connu, séchées puis analysées pour leur teneur en carbone organique et leur densité apparente. Ces mesures permettent de calculer les stocks de carbone par unité de surface et leur évolution au cours du temps. L'échantillonnage doit être réalisé périodiquement, par exemple sur une base trimestrielle, afin de détecter les tendances d'accumulation ou de perte de carbone.

Le bilan carbone global de la pépinière peut ainsi être déterminé en combinant les mesures des échanges de CO_2 air-eau, du transport de carbone par les eaux entrantes et sortantes, ainsi que des variations des stocks de carbone dans la biomasse et les sédiments (Fig. 17). Un système dans lequel la fixation et le stockage du carbone dépassent la respiration et les exportations fonctionnera comme un puits net de carbone, tandis qu'un système dominé par la respiration et les exportations agira comme une source de carbone. L'interprétation des résultats doit tenir compte de la variabilité nycthémérale, des taux de renouvellement de l'eau et des conditions sédimentaires afin de garantir une évaluation robuste.

14.3 Bilan nutritif de la pépinière

Le bilan des nutriments de la pépinière reflète l'équilibre entre les apports, les cycles internes, le stockage et les exportations de nutriments, l'azote et le phosphore étant les principaux éléments d'intérêt. Les nutriments entrent dans le système principalement par l'eau de mer entrante, sont assimilés par les herbiers marins et les micro-organismes, stockés dans la biomasse et les sédiments, régénérés lors des processus de décomposition, puis exportés par les eaux sortantes (Fig. 17).

Les concentrations en nutriments dans la colonne d'eau doivent être mesurées aux points d'entrée et de sortie afin de quantifier les apports et les exportations. Les échantillons doivent être prélevés régulièrement, par exemple une fois par mois, puis analysés pour l'ammonium, les nitrates et les phosphates à l'aide de méthodes colorimétriques ou d'analyses de laboratoire standardisées. La différence entre les concentrations mesurées à l'entrée et à la sortie, combinée aux débits de renouvellement de l'eau, permet d'estimer l'absorption nette ou la libération nette de nutriments par le système.

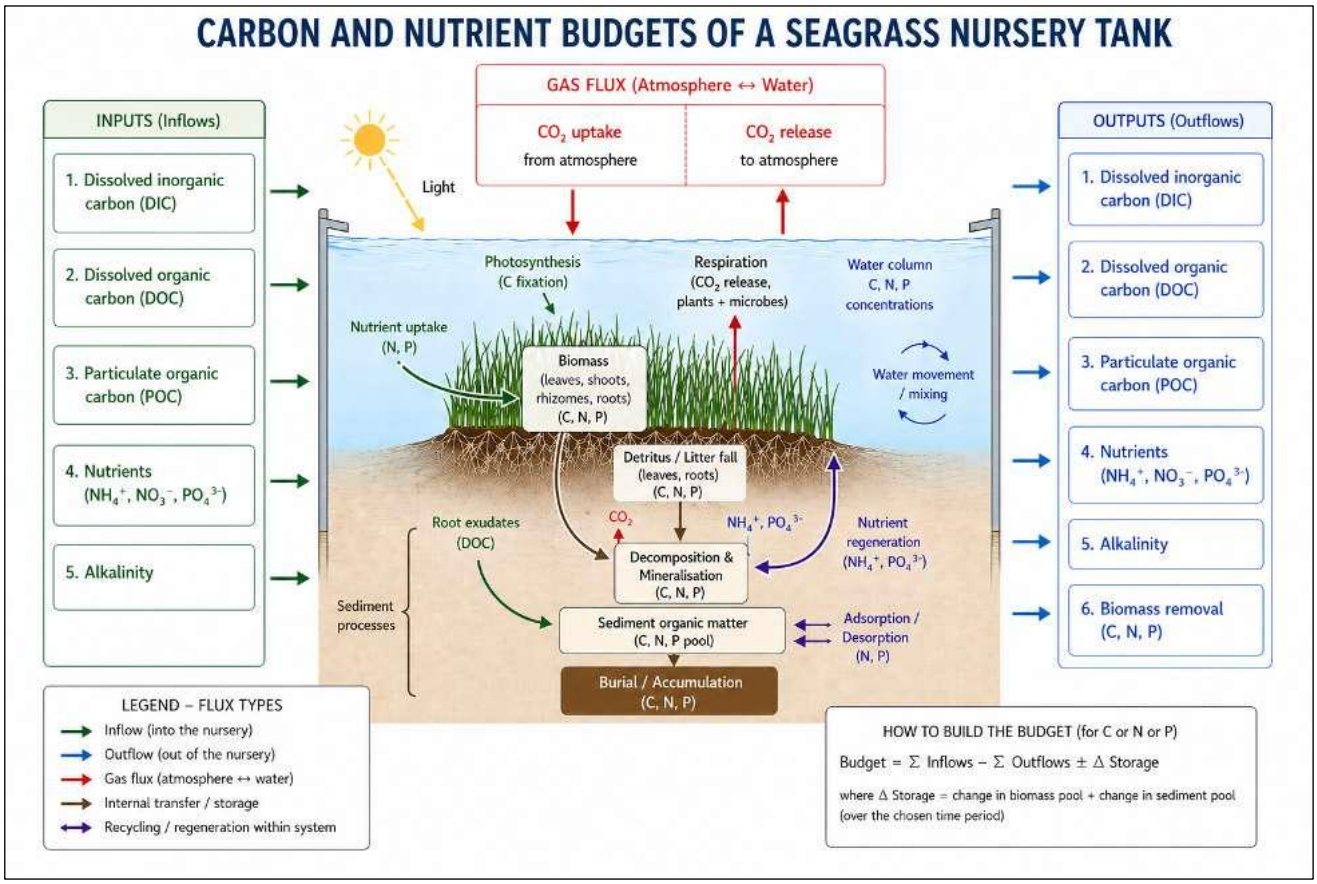


Figure 16 Flux et stocks de carbone et de nutriments dans une pépinière d'herbiers marins

L'absorption des nutriments par les herbiers marins doit être évaluée à partir d'analyses de tissus végétaux collectés lors du suivi saisonnier (section 4.3). Les échantillons de feuilles séchées doivent être analysés pour leur teneur en carbone et en azote et, lorsque cela est possible, en phosphore. Le rapport carbone/azote (C) constitue un indicateur utile de l'état nutritionnel des plantes : des valeurs élevées suggèrent une limitation en azote, tandis que des valeurs faibles indiquent un enrichissement en nutriments. Les variations de la teneur en nutriments des tissus au cours du temps reflètent les changements de disponibilité des nutriments et leur assimilation par les plantes.

Le stockage des nutriments dans les sédiments doit être évalué à partir de l'analyse des carottes prélevées dans les bassins de la pépinière. Les échantillons doivent être analysés pour leur teneur en azote total, phosphore total et matière organique. En complément, des échantillons d'eau

interstitielle peuvent être prélevés et analysés pour l'ammonium et le phosphate dissous afin d'évaluer la disponibilité des nutriments et leur potentiel de relargage par les sédiments. Des concentrations élevées de nutriments dans l'eau interstitielle, en particulier sous des conditions de faible potentiel redox, peuvent indiquer une charge interne en nutriments et un risque accru d'eutrophisation.

Les transformations des nutriments au sein du système sont principalement contrôlées par les processus microbiens, notamment la minéralisation de la matière organique et la régénération des nutriments. Ces processus peuvent accroître la disponibilité des nutriments, mais peuvent également entraîner leur accumulation lorsqu'ils ne sont pas compensés par l'absorption végétale ou l'exportation hors du système. Des indicateurs visuels tels qu'une augmentation de la couverture épiphytique, le développement d'algues ou des modifications de la clarté de l'eau doivent être enregistrés parallèlement aux mesures chimiques afin de faciliter l'interprétation des résultats.

Le bilan global des nutriments est déterminé par les relations entre les apports via l'eau entrante, l'absorption par les herbiers marins, le stockage dans la biomasse et les sédiments, le recyclage interne et les exportations par l'eau sortante. Une pépinière équilibrée maintien des concentrations en nutriments suffisantes pour soutenir la croissance des plantes sans favoriser un développement excessif des algues ou des épiphytes.

15. Feuille de route pour la mise en œuvre

15.1 Phase 1 : Préparation et évaluation de référence

La première phase vise à mettre en place la gouvernance du projet, à obtenir les autorisations nécessaires, à établir les partenariats et à acquérir les données de référence. Les sites potentiels de prélèvement (sites donneurs) et les sites envisagés pour l'installation de la pépinière doivent être visités et évalués. Les accords avec les structures d'accueil, telles qu'Odysseo ou les partenaires hôteliers, doivent être finalisés. Les équipes de terrain doivent également commencer le suivi saisonnier des herbiers donneurs ainsi que les suivis mensuels de la reproduction des espèces cibles.

Au cours de cette phase, le projet doit également acquérir ou préparer le matériel nécessaire, élaborer les fiches de collecte de données, mettre en place la base de données et former le personnel. Les procédures opérationnelles normalisées (SOP) doivent être examinées et validées avant le début des opérations de terrain. Les espaces de laboratoire destinés au traitement des graines et aux essais de germination doivent être préparés, notamment en mettant en place les protocoles de nettoyage et les systèmes d'étiquetage.

Un rapport de référence doit être produit afin de synthétiser l'état des sites donneurs, les paramètres

environnementaux, l'aptitude des sites candidats pour la pépinière, l'état d'avancement des autorisations administratives ainsi que la conception proposée pour la phase pilote. Ce rapport constituera le document de référence pour les évaluations futures du projet.

15.2 Phase 2 : Installation pilote de la pépinière

La deuxième phase concerne la construction ou la préparation des bassins de pépinière et des installations de laboratoire. Les bassins doivent être installés, nettoyés, remplis d'un substrat sédimentaire approprié, raccordés à l'alimentation en eau de mer et testés avant l'introduction des plantes. Les débits d'eau, la température, la salinité, le pH et l'oxygène dissous doivent être suivis durant une période de mise en service afin de vérifier la stabilité du système.

Les premières transplantations de plantes adultes doivent être réalisées de manière conservatrice à partir des sites donneurs sélectionnés puis installées dans les bassins. Parallèlement, le suivi de la reproduction et la collecte des graines doivent se poursuivre. Les essais de germination en laboratoire doivent débuter avec de petits lots de graines et plusieurs traitements expérimentaux.

Les trois premiers mois de fonctionnement pilote doivent être consacrés à l'évaluation de la survie des plantes et de la stabilité du système. Des contrôles quotidiens ou très fréquents sont nécessaires. Tout problème technique, tel qu'une panne de pompe, une surchauffe, une remise en suspension des sédiments ou une prolifération excessive d'épiphytes, doit être résolu avant toute phase d'extension de la pépinière.

15.3 Phase 3 : Optimisation et production

Une fois le système pilote stabilisé, la pépinière peut entrer dans une phase d'optimisation. Différents types de sédiments, niveaux d'éclairement, régimes hydrodynamiques, introductions d'espèces brouteuses, densités de plantation et âges de transfert des plantules peuvent être testés. L'objectif est d'identifier les conditions qui maximisent la survie, la croissance et l'expansion de chacune des espèces cibles.

La production doit rester étroitement liée au suivi scientifique. Si la couverture des herbiers augmente et que de nouvelles pousses sont produites, une partie du matériel cultivé en pépinière pourra éventuellement être divisée afin d'alimenter des bassins supplémentaires ou de petits essais de restauration. Toutefois, les prélèvements réalisés dans la pépinière ne doivent pas compromettre le stock de départ. Un calendrier de production doit définir précisément à quel moment et selon quelles modalités les plantes peuvent être prélevées pour des initiatives de restauration.

La production à partir de graines ne doit être développée à plus grande échelle qu'après avoir obtenu des taux satisfaisants de germination et de survie des plantules, et une fois la pépinière d'adultes

pleinement fonctionnelle. La pépinière doit conserver des registres détaillés des pourcentages de germination, de la mortalité des plantules, du temps nécessaire au développement des racines et des performances après transfert vers les bassins extérieurs. Ces données permettront de déterminer si la restauration fondée sur les graines est suffisamment maîtrisée pour être testée dans des conditions de terrain.

15.4 Phase 4 : Essais de restauration et mise à l'échelle à long terme

La phase finale consiste à utiliser le matériel végétal produit en pépinière dans le cadre d'essais de restauration écologique. Les opérations de transplantation en milieu naturel doivent débuter à petite échelle sur des sites soigneusement sélectionnés, où les facteurs de pression ont été évalués et où les conditions environnementales sont jugées favorables. Les transplants ou plantules issus de la pépinière doivent être implantés selon des méthodes adaptées à l'espèce concernée, au type de sédiment et au régime hydrodynamique du site.

Lorsque cela est possible, les essais de restauration doivent suivre un protocole expérimental de type « avant-après-contrôle-impact » (BACI, *Before-After-Control-Impact*). Des données de référence doivent être collectées avant la transplantation, et des zones témoins ou de référence doivent être suivies parallèlement aux zones restaurées. Le succès de la restauration doit être évalué à partir de critères tels que la survie des plants, la densité de pousses, l'expansion de la couverture végétale, la stabilité des sédiments ainsi que des indicateurs écologiques complémentaires, notamment la biodiversité associée.

L'extension à long terme du programme doit reposer sur les résultats obtenus à la fois en pépinière et sur les sites expérimentaux de restauration. Si les taux de survie en milieu naturel demeurent faibles, le problème peut être lié à l'aptitude du site de restauration plutôt qu'à la qualité de la production en pépinière. La feuille de route doit donc rester flexible et s'appuyer sur les résultats obtenus pour améliorer en continu la sélection des sites, les méthodes de culture en pépinière et les techniques de transplantation.

L'augmentation de l'échelle du projet doit être progressive. Une pépinière pilote doit d'abord démontrer que les plantes peuvent survivre et croître dans les bassins de culture et que les systèmes de suivi fonctionnent de manière fiable. Ce n'est qu'après cette validation que la superficie des bassins ou la capacité de production pourra être augmentée. Une expansion prématurée risque d'amplifier les problèmes techniques et d'accroître les risques écologiques.

L'extension du programme nécessite également des ressources humaines et financières adaptées. Un plus grand nombre de bassins implique davantage de suivi, de nettoyage, de gestion des données et de maintenance. Tout projet d'agrandissement doit donc s'accompagner d'un plan opérationnel

réaliste intégrant non seulement les coûts d'infrastructure, mais aussi les besoins à long terme en personnel et en fonctionnement. Une pépinière est un système vivant qui requiert une attention et un entretien continus.

16. Références documentaires

Ce manuel a été élaboré à partir des livrables du projet "Mise en place d'une pépinière d'herbiers marins à Maurice" , qui peuvent être consultés pour des informations complémentaires : le Livrable 1 "Protocoles de suivi et de transplantation" , le Livrable 2 "Collecte et transplantation des grains", le Livrable 3 "Identification de sites potentiels pour l'installation de la pépinière", le Livrable 4 "Feuille de route pour la conception de la pépinière pilote" et le Livrable 5 "Programme de suivi de la pépinière d'herbiers marins".

Le manuel s'appuie également sur le rapport du Cawthron Institute intitulé *"A Blueprint for Seed-Based Seagrass Restoration in Aotearoa New Zealand" (« Cadre de référence pour la restauration des herbiers marins à partir de graines en Aotearoa Nouvelle-Zélande »)*, qui fournit des orientations détaillées sur la planification de la restauration fondée sur les graines, la collecte des fleurs et des graines, le stockage des graines, la germination, la croissance des plantules, la transplantation en milieu naturel et le suivi des opérations de restauration.

Le contexte régional et les principes de restauration ont été étayés par le document *"Guidelines for Seagrass Ecosystem Restoration in the Western Indian Ocean Region"* (« Lignes directrices pour la restauration des écosystèmes d'herbiers marins dans la région de l'océan Indien occidental »), élaboré conjointement par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP) dans le cadre de la Convention de Nairobi et la Western Indian Ocean Marine Science Association (WIOMSA). Ce document est particulièrement pertinent, car Maurice fait partie de la région de l'océan Indien occidental et partage de nombreux défis de restauration des écosystèmes côtiers tropicaux avec les autres pays de cette région.

Les aspects généraux relatifs à la planification des projets de restauration, aux autorisations administratives, au suivi écologique et à la communication avec les parties prenantes ont été appuyés par le *"Seagrass Restoration Handbook UK and Ireland »* (« Manuel de restauration des herbiers marins du Royaume-Uni et d'Irlande*")*. Bien que les espèces et les conditions climatiques diffèrent de celles de Maurice, cet ouvrage fournit des principes utiles en matière de conception de projets, de gestion adaptative, de suivi écologique et de sensibilisation du public.

17. Déclaration finale

L'établissement d'une pépinière d'herbiers marins à Maurice doit être considéré comme un programme technique et écologique à long terme, plutôt que comme un simple projet d'infrastructure. La pépinière ne produira pas uniquement des plants et des plantules, mais également des connaissances : sur les saisons de reproduction, la viabilité des graines, les exigences locales de germination, les performances des transplantations, les techniques de culture des herbiers marins, la régénération des sites donneurs et les conditions environnementales favorisant une croissance saine des herbiers. Ces connaissances sont essentielles pour permettre une mise à l'échelle responsable de la restauration des herbiers marins.

Ce manuel constitue un guide opérationnel évolutif pour la mise en place de pépinières d'herbiers marins, avec un focus sur le contexte mauricien. Il doit être mis à jour au fur et à mesure de l'accumulation des données de terrain et des résultats obtenus en pépinière.

MANUEL POUR L'ÉTABLISSEMENT D'UNE PÉPINIÈRE D'HERBIERS MARINS À MAURICE

Ce projet est soutenu par le Fonds Business Biodiversité Océan Indien (FBBOI), administré par Expertise France dans le cadre du programme Varuna – Air for Biodiversity in the Indian Ocean, et financé par l'Agence Française de Développement (AFD).

Il s'agit également d'une initiative menée par Odysseo (Oceanarium (Mauritius) Ltd), en partenariat avec :
Association pour le Développement Durable (ADD)
Attitude Foundation
Eclosia Solidarité

AUTEUR
Rui Santos

PHOTOGRAPHIE
Photos de Rui Santos
Photo nº 4 de Shane Sunassee
Photo nº 9 de Homesha Bhurosah

CONCEPTION GRAPHIQUE
Maria João Neves

REMERCIEMENTS
Odysseo Oceanarium
Bernardo Nascimento
Shane Sunassee

BLUEZ C INSTITUTE
Mai 2026

