



La Convention de Nairobi, à travers le projet financé par le GEF Mise en œuvre du programme d'action stratégique pour la protection de l'océan Indien occidental contre les sources et activités terrestres (WIOSAP), en collaboration avec WIOMSA, facilite la production d'une série de lignes directrices régionales. Les trois premiers volumes portent sur la restauration des écosystèmes d'herbiers marins, la restauration des écosystèmes de mangrove et l'évaluation des flux environnementaux dans la région de l'OIO.

Les pays participant au WIOSAP sont les Comores, Madagascar, Maurice, les Seychelles, le Mozambique, le Kenya, la Tanzanie, la France (qui ne bénéficie pas des fonds du GEF), la Somalie et l'Afrique du Sud. Le but du WIOSA est « d'améliorer et maintenir la santé environnementale des écosystèmes côtiers et marins de la région par une meilleure gestion du stress d'origine terrestre ». L'objectif spécifique du WIOSAP est de « réduire les impacts des sources et activités terrestres et de gérer durablement les écosystèmes côtiers et marins critiques par la mise en œuvre des priorités du WIOSAP avec le soutien de partenariats aux niveaux national et régional ».

La Commission de l'océan Indien (COI) est une organisation régionale intergouvernementale qui regroupe cinq États membres : l'Union des Comores, la France au titre de la Réunion, Madagascar, Maurice et Seychelles. Elle donne corps à la solidarité régionale à travers des projets de coopération couvrant un large éventail de secteurs dont la préservation des écosystèmes et la gestion durable des ressources naturelles. Le projet RECOS, mis en œuvre par la COI et cofinancé par l'AFD et le FFEM, a pour objectif de renforcer la résilience des populations littorales face aux effets du changement climatique en restaurant les services rendus par les écosystèmes côtiers. RECOS contribue, entre autres, au renforcement de la coopération scientifique régionale sur la restauration des écosystèmes côtiers.

Guide de restauration des écosystèmes d'herbiers marins dans la région de l'OIO

Directives et boîtes à outils pour écosystèmes de l'OIO

Guide de restauration des écosystèmes d'herbiers marins dans la région de l'OIO

Directives et boîtes à outils pour écosystèmes de l'OIO

Guide de restauration des écosystèmes d'herbiers marins dans la région de l'OIO



**Publié par le Programme des Nations unies pour
l'environnement/Secrétariat de la Convention de Nairobi.**

Copyright © Nairobi Convention 2020. Tous droits réservés.

Cette publication peut être reproduite en tout ou en partie et sous quelque forme que ce soit à des fins éducatives ou non lucratives sans autorisation spéciale du détenteur des droits d'auteur, à condition que la source soit mentionnée. Cependant, la Convention de Nairobi encourage la dissémination et l'utilisation du matériel de ce rapport. La Convention de Nairobi apprécierait de recevoir un exemplaire de toute publication qui utilise cette publication comme source. Cette publication ne peut être ni revendue ni utilisée à quelque fin commerciale que ce soit sans l'autorisation écrite préalable du Programme des Nations unies pour l'environnement-Convention de Nairobi..

Clause de non-responsabilité :

Les observations, interprétations et conclusions exprimées ici sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues des parties contractantes de la Convention de Nairobi, le PNUE et la WIOMSA. Cette publication a été produite par le Programme des Nations Unies pour l'environnement/Secrétariat de la Convention de Nairobi à travers le projet WIOSAP/PASOIO financé par le Fonds pour l'environnement mondial (GEF) et le projet de partenariat ASDI, WIOMSA à travers le programme MASMA, en collaboration avec divers gouvernements, des organisations de la société civile et d'autres partenaires dans la région.

La traduction française de ce document a été réalisée par Gilbert Ahnee et fait l'objet d'une édition scientifique par Jérôme Harlay, dans le cadre du projet « Résilience des écosystèmes et des populations côtiers du Sud-Ouest de l'océan Indien » (RECOS) de la Commission de l'océan Indien (COI), avec le soutien financier de l'Agence française de développement (AFD) et du Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM).

Compilé et préparé par :

Paul L.A. Erfteemeijer

Rédacteur en chef de la série :

Matthew D. Richmond

Conçue par :

Marco Nunes Correia

Coordonnée par :

Jared Bosire, Julius Francis et Timothy Andrew

Illustrations :

Illustration 1 : avec l'aimable autorisation de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), dessinée par Natalie Cosentino-Manning et Milena Viljoen

Citation:

PNUE/Convention de Nairobi/WIOMSA (2020). *Guide de restauration des écosystèmes d'herbiers marins dans la région de l'OIO* PNUE, Nairobi, 63 pp. Une version numérique de ce rapport est accessible à : www.nairobiconvention.org/; www.wiomsa.org ; www.commissionoceanindien.org

Directives et boîtes à outils pour écosystèmes de l'OIO

ISSN : 2714-1942

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs du guide	1
1.3 Destinataires cibles	1
1.4 Processus suivi pour l'élaboration du guide	1
2. ÉCOSYSTÈMES D'HERBIERS MARINS DANS LA RÉGION DE L'OIO	5
2.1 Espèces d'herbiers marins	5
2.2 Fonctions et valeurs de l'écosystème	6
2.3 Facteurs de déclin	7
2.4 Arguments pour la restauration des herbiers	9
2.5 Intégrer la restauration des herbiers aux cadres	9
3. RESTAURATION DES HERBIERS – CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES	13
3.1 Termes et définitions	13
3.2 Considérations de bon sens	15
3.3 Hiérarchie des approches de restauration et gestion d'herbiers	16
4. MÉTHODES DE RESTAURATION	19
4.1 Transplantation	19
4.1.1 Méthodes sans sédiments	20
4.1.2 Méthodes herbier et sédiments	23
4.1.3 Méthodes basées sur les semences	24
4.2 Transplantation mécanique	28
5. IDENTIFICATION DU SITE DE RESTAURATION	31
5.1 Check-list des critères de choix de site	33
6. PRINCIPES DE BONNE PRATIQUE – UN PROTOCOLE DE RESTAURATION	35
6.1 Principes directeurs de planification de restauration	35
6.2 Autres considérations pratiques	39
7. SUIVI DE RESTAURATION	45
7.1 Introduction	45
7.2 Indicateurs de suivi	45
7.3 Signalement de suivi	46
8. PLAN DE GESTION DE RESTAURATION D'HERBIER	47
8.1 Phase de planification de projet	47
8.2 Phase de mise en œuvre du projet	49
8.3 Phase de suivi et d'évaluation du projet	49
8.4 Recommandations pour la recherche	49
9. RÉFÉRENCES	50

Études de cas

EC 1.	Expérience de restauration de l'herbier <i>Zostera capensis</i> au moyen de la méthode des « bouchons », dans la zone intertidale de la baie de Maputo (Mozambique). _____	3
EC 2.	Susceptibilité et nettoyage des herbiers marins touchés par les marées noires par Matthew D. Richmond. _____	10
EC 3.	Restauration passive des herbiers marins à Port Manatee, Floride (USA). _____	14
EC 4.	Transfert d'une banque de graines de <i>Ruppia tuberosa</i> dans le Coorong. _____	17
EC 5.	Restauration de zostères dans la baie de Chesapeake, au moyen de plantes adultes et de graines. _____	25
EC 6.	Déplacement de grandes mottes de zostères intertidales <i>Zostera noltii</i> à l'aide d'une excavatrice modifiée aux Pays-Bas _____	27
EC 7.	Essai communautaire de restauration d'herbiers marins à Beravy, Toliara (Madagascar). _____	32
EC 8.	Facilitation du recrutement de semis d' <i>Amphibolis</i> avec des substrats artificiels. _____	37
EC 9.	« Des graines pour les vivaneaux » : collecte, traitement et diffusion de graines de <i>Posidonia australis</i> . _____	38
EC 10.	Essais communautaires de restauration d'herbiers marins à Diani et à l'île Wasini, au Kenya. _____	51

Liste de cadres

- Cadre 1.** Impression photographique du projet en cours de restauration des herbiers dans la baie de Maputo (Mozambique), utilisant des carottes d'herbes marines pour la transplantation de *Zostera capensis* sur des plaines intertidales affectées par le creusement de palourdes. _____ 3
- Cadre 2.** Espèces d'herbes marines de la région de l'OIO (vues de spécimens séchés ; noter les parties en floraison des spécimens de *Ruppia maritima*, *Enhalus acoroides* et *Syringodium isoetifolium*). _____ 5
- Cadre 3.** Impressions d'herbiers typiques de l'océan Indien occidental, montrant un peuplement mixte de *Thalassodendron ciliatum* et *Enhalus acoroides* (à gauche), et un gros plan de *Thalassodendron ciliatum* (à droite). _____ 6
- Cadre 4.** Les prairies sous-marines de la région de l'OIO rendent toute une série de services écosystémiques importants, notamment en tant que zones de nutrition pour des espèces menacées telles que les tortues vertes (à gauche) et le maintien des pêcheries locales (à droite). _____ 7
- Cadre 5.** Impact de l'industrie du tourisme sur les herbiers marins. La couverture des herbiers marins a diminué devant un hôtel de plage de la côte nord de Mombasa. _____ 8
- Cadre 6.** Travaux de sauvetage et de restauration des herbiers dans la baie de Tampa (Floride) : en haut, giga-dispositif de transplantation de gazon. En bas (à gauche) : zone intertidale où des mottes d'algues de 1x1 m ont été retirées avec la machine ci-dessus (voir cadran pour référence d'échelle). En bas (à droite) : bouées de démarcation utilisées pour prévenir toute entrée, transit, ancrage ou dérive dans les zones restreintes, pour permettre aux herbiers de se remettre des dégâts causés par les bateaux. _____ 14
- Cadre 7.** Étapes du programme 2014/2015 de transfert de *R. tuberosa* : a) récolte des graines dans les sédiments du lac Cantara ; b) stockage des sédiments contenant les graines ; c) mise en place des sédiments stockés et d) actions d'épandage. _____ 17
- Cadre 8.** Représentation de la morphologie générale d'une herbe marine. _____ 20
- Cadre 9.** Démonstration de la méthode de l'agrafe, montrant l'attache d'une pousse d'herbe marine à l'agrafe (à gauche) et l'insertion de l'agrafe dans le sédiment pendant la plantation. _____ 21
- Cadre 10.** Démonstration de tissage de pousses d'algues dans un matériau biodégradable en toile de jute. _____ 22
- Cadre 11.** Démonstration d'une version adaptée de la méthode du cadre (testée avec succès au Kenya) pour laquelle les plants d'herbe marine sont fixés à un cadre métallique placé et retenu sur le fond marin pour restaurer les zones endommagées. _____ 23
- Cadre 12.** Démonstration de la méthode « herbiers avec sédiments », montrant du gazon avec une pelle (à gauche) et deux tailles de bouchons avec des carottiers. _____ 24

Cadre 13.	Démonstration de la méthode des sacs de semences déployés par bouée (BuDs), montrant des unités individuelles de sacs avec bouée, remplis de pousses en fleurs et de spathes contenant des semences (à gauche) ainsi que leur déploiement sur un plateau intertidal (à droite).	24
Cadre 14.	Méthode du sac de graines déployé par une bouée (y compris l'assemblage et le déploiement), l'une des méthodes utilisées pour restaurer les zostères dans la baie de Chesapeake (États-Unis).	25
Cadre 15.	Récolte mécanique du stock de graines dans les zones donneuses, traitement des graines dans des cuves au laboratoire et manipulation des graines prêtes à être lancées, généralement à partir d'un petit bateau.	26
Cadre 16.	Photographie de la méthode de relocalisation du gazon sur les sites intertidaux de l'Escaut oriental, montrant la technique modifiée de raclage à la pelle mécanique et le déplacement du transplant.	27
Cadre 17.	Photographie du projet de restauration d'herbiers en cours à Beravy, Toliara (Madagascar), utilisant des bêches pour l'excavation de mottes d'herbes marines pour la transplantation dans les zones dégradées.	32
Cadre 18.	Approche de facilitation du recrutement d' <i>Amphibolis antarctica</i> montrant : a) une plantule d' <i>Amphibolis</i> avec gros plan du grappin (voir flèche) pour faciliter l'ancrage ; b) des sacs de sable récemment déployés et disposés pour le suivi ; c) un déploiement vieux de six mois, couvert de semis d' <i>Amphibolis</i> ; d) une parcelle restaurée d' <i>Amphibolis</i> montrant la coalescence de ~40 sacs.	37
Cadre 19.	a) Fruits mûrs de <i>Posidonia australis</i> avant la collecte ; b) fruits récoltés dans une glacière de 100 litres pour le transport au laboratoire ; c) traitement de fruits après la collecte ; d) après traitement, les graines sont propres et prêtes à être livrées aux sites de terrain ; e) graines dispersées à la surface des sédiments (200 graines m ⁻²) ; f) gros plan de graines stabilisées sur le fond marin ; g) plantules établies d'un an ; h) plantules établies en haute densité ; i) plantule de deux ans avec des pousses multiples.	36
Cadre 20.	Projet communautaire de restauration des herbiers marins sur l'île Wasini, impliquant la plantation de semis d'herbiers marins en utilisant des sacs de toile de jute pour l'ancrage et la stabilisation des sédiments (à droite), après consultation et planification préalables auprès de la communauté locale (à gauche).	51

Tableau

Tableau 1. Adéquation selon les espèces des différentes méthodes de restauration des herbiers marins. ____ 30

Encadré

Encadré 1. Raisons courantes de l'échec des essais de restauration d'herbiers marins _____ 15

Illustrations

Illustration 1. Impacts potentiels des déversements d'hydrocarbures sur les herbiers marins et les organismes associés. _____ 10

Illustration 2. Étapes et considérations de base d'un plan de gestion de restauration d'herbiers marins. ____47

Préface

Dans la région de l’océan Indien occidental (OIO), les herbiers marins ou prairies sous-marines de phanérogames couvrent de vastes zones de fonds meubles littoraux le long d’environ 12 000 km de côtes, de la zone intertidale jusqu’à des profondeurs de plus de 30 m (Gullström et al., 2002 ; Ochieng et Erfteimeijer, 2003 ; Bandeira et Gell, 2003). Les herbiers de la région se trouvent souvent en continuité géographique avec les récifs coralliens et les mangroves. Les herbiers mixtes sont courants (surtout au Kenya, au Mozambique et en Tanzanie), mais on trouve aussi des herbiers monospécifiques.

Les herbiers de la région de l’OIO abritent un éventail très diversifié de biodiversité végétale et animale. En raison de leur production primaire élevée et de la structure complexe de leur habitat, les herbiers abritent une variété d’organismes benthiques, démersaux et pélagiques. De nombreuses espèces de poissons et de mollusques, y compris celles qui présentent un intérêt commercial, sont attirées par les habitats qu’offrent les herbiers pour se nourrir et s’abriter, en particulier pendant les phases juvéniles de leur vie. Les herbiers de la région de l’OIO abritent également des populations importantes de deux espèces menacées qui se nourrissent dans les prairies marines, en l’occurrence la tortue verte, *Chelonia mydas*, et le dugong, *Dugong dugon*. Ces prairies marines soutiennent également les pêcheries en tant que zones de nurserie, de reproduction et d’alimentation.

En raison de l’architecture complexe de la canopée de feuilles en combinaison avec le réseau dense de racines et de rhizomes, les herbiers marins stabilisent les sédiments et servent de barrières hydrodynamiques efficaces abaissant l’énergie des vagues et la vitesse des courants, réduisant ainsi la turbidité et l’érosion côtière (Donatelli et al., 2019). De plus, les herbiers marins piègent de grandes quantités de

nutriments et de matières organiques dans les sédiments. Grâce à la décomposition microbienne, la biomasse des herbiers entre dans le réseau alimentaire marin en tant que détritiques et soutient ainsi la productivité par le recyclage des nutriments et du carbone. Plus récemment, les prairies sous-marines ont été reconnues pour leur potentiel considérable de stockage de carbone, et il a été estimé qu’au niveau mondial, jusqu’à 19,9 Pg¹ de carbone organique sont ainsi stockés par les prairies sous-marines.

Les herbiers de la région de l’OIO sont soumis à une série de menaces, allant de la sédimentation due à la déforestation terrestre et à l’érosion dans les bassins versants, au piétinement et à la forte concentration d’activités de pêche et de tourisme, à l’eutrophisation et aux dommages physiques causés par les ancrages, les dégâts d’hélice et les échouages de bateaux, au surpâturage par les oursins. Les facteurs sous-jacents à certaines de ces menaces sont la croissance démographique rapide, la pauvreté, le manque d’éducation environnementale et de sensibilisation à l’environnement, l’application inadéquate des lois et le changement climatique. La dégradation continue des herbiers marins dans la région justifie les efforts de restauration pour garantir que ces écosystèmes essentiels continuent à fournir les biens et services qui leur sont propres.

Pour faciliter le renforcement des capacités et la promotion de la restauration des herbiers marins dans la région de l’océan Indien occidental (OIO), la Convention de Nairobi, en collaboration avec l’Association des sciences marines de l’océan Indien occidental (WIOMSA), a soutenu l’élaboration de ce Guide de restauration des écosystèmes d’herbiers marins dans la région de l’OIO. Les recommandations sont pratiques et concises et sont conçues pour être adoptées et appliquées directement par les acteurs de la restauration des herbiers marins et les autres parties prenantes intéressées dans la région.

¹ Pg = petagram; un Pg = 1015 grammes = un milliard de tonnes métriques

L'inclusion de descriptions complètes des écosystèmes d'herbiers marins, l'identification des sites de restauration, les méthodes pratiques qui peuvent être utilisées pour la protection et la restauration de ces sites ; la façon de développer un plan de gestion de restauration d'herbiers marins incluant un cadre de surveillance fait de cette ressource un ajout essentiel aux outils disponibles pour répondre aux besoins environnementaux urgents dans l'OIO.

L'élaboration de ces recommandations a suivi un processus qui a abouti à leur adoption par les pays de l'OIO, un aspect important si l'on veut qu'elles soient activement utilisées dans la région. Cet ouvrage fournit une ressource pratique qui permettra aux acteurs locaux de s'enrichir d'expériences régionales et internationales, et d'améliorer la qualité et le niveau de l'évaluation et de la surveillance des écosystèmes dans l'OIO.

J'encourage les acteurs de l'OIO à faire usage de cet ouvrage et à contribuer activement à l'amélioration et à la mise à jour de ces recommandations sur la base des expériences acquises dans le cadre des projets pilotes du WIOSAP. Je voudrais féliciter tous ceux qui ont été impliqués dans leur développement coopératif et il ne fait aucun doute que ces directives seront d'une grande utilité dans le futur.



Kerstin Stendahl

Chef de service
Service de l'intégration des écosystèmes
Divisions des Écosystèmes
Programme des Nations unies pour
l'Environnement

Acronymes et abréviations

EIE	Evaluation d'impact environnemental
GPS	Système de positionnement global
OIO	Océan Indien occidental
OC	Organisation communautaire
ONG	Organisation non gouvernementale
Pg	Petagramme ; un Pg = 1015 grammes
PVC	Chlorure de polyvinyle (plastique)
REHM	Restauration d'écosystèmes d'herbiers marins
SCUBA	Appareil respiratoire sous-marin autonome / Self-Contained Underwater Breathing Apparatus
SEBD	Système d'ensemencement par bouées déployées
TERF	Transplantation à distance de zostères marines à l'aide de cadres / Transplanting Eelgrass Remotely with Frames
Tg	Teragramme ; un Tg = 1012 grammes
WIOMSA	Association des sciences marines de l'océan Indien occidental / Western Indian Ocean Marine Science Association
WIOSAP	Protocole relatif à la protection du milieu marin et côtier de la région de l'océan Indien occidental contre la pollution due aux sources et activités terrestres / Western Indian Ocean Strategic Action Programme of the Nairobi Convention

Remerciements

Les personnes suivantes sont aimablement remerciées pour leur contribution à la préparation et à la révision de cet ouvrage : Salomão Bandeira, Jacqueline Uku, Lilian Daudi, Charles Muthama, Emma Gibbons, Leah Pettitt, Marieke van Katwijk, John Statton, Gary Kendrick, Marion Cambridge, Jason Tanner, Andrew Irving, Bob Orth, Michelle Waycott, Korjent van Dijk, Gildas Todinanahary, James Kairo, Blandina Lugendo, Marcos Pereira, Agnes Muthumbi et C.N. Paupiah. Le financement reçu du Fonds pour l'Environnement Mondial (GEF) - à travers la WIOMSA et les projets de partenariat de l'Agence Suédoise pour le Développement International (ASDI) - est reconnu avec gratitude, comme le

sont les experts qui ont donné de leur temps pour s'assurer qu'un produit complet et acceptable résulte de ce travail. Enfin, la WIOMSA, à travers le programme MASMA, est remerciée pour sa contribution inestimable à la gestion du développement du projet de guide et à la préparation finale du manuscrit pour publication.

Enfin, nous tenons à remercier le projet RECOS mis en œuvre par la Commission de l'océan Indien (COI) et cofinancé par l'Agence française de développement (AFD) et le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM), pour la version française du guide.

Crédits photos : Bob Orth (cadres 14 and 15), Jacqueline Uku, Lilian Daudi et Charles Muthama, KMFRI (visuel 20), Jason Tanner et Andrew Irving (cadre 18), John Statton (cadre 19), Kat Ryan, Department for Environment and Water (cadre 7), Leah Pettitt et Emma Gibbons, Reef Doctor (cadre 17), Luca van Duren (cadre 13), Marjolijn Christianen (cadre 4 - gauche), Paul Erfteimeijer (cadres 2, 3, 4 - droit, 5, 6 - haut et bas, gauche, 8, 9, 10, 11, 12 et photo de couverture), Salomão Bandeira (cadre 1), Savanna Barry, Université de Floride (cadre 6 - bas droit) et Wim Giesen (cadre 16).

Glossaire

Apical : provenant de l'extrémité supérieure, distale ou extrême (pointe).

Atténuation la restauration, la création ou l'amélioration d'une zone d'herbiers marins pour compenser la perte autorisée de prairie sous-marine.

Atténuation compensatoire : création ou restauration d'une zone humide ou d'une zone d'herbiers marins afin de compenser la perte autorisée d'une zone humide ou d'une zone d'herbiers marins similaire.

Banque de graines : accumulation de graines dormantes dans les sédiments, susceptibles de germer ultérieurement.

Bénéfices écosystémiques : services offerts à la société humaine par ces écosystèmes. Ils sont classés en quatre catégories : support (cycle des nutriments, de l'eau et du carbone, photosynthèse), régulation (qualité de l'eau, stabilisation du substrat, atténuation des effets des catastrophes naturelles), approvisionnement (en ressources naturelles primaires, eau douce, protéines de la biomasse, fibres, matériaux de construction, combustible, molécules pharmaceutiques), et socio-culturel (récréation, écotourisme, valeurs communautaires, patrimoine culturel).

Benthique : qui vit dans ou sur les fonds marins (sédiments).

Bioturbation : perturbation physique des fonds marins par l'activité animale.

Brin(s) : fragment(s) (ou tige(s)) d'herbier portant des feuilles, un rhizome et des racines, prélevés dans un herbier en vue de sa restauration.

Carbone bleu : carbone capturé par les océans et les écosystèmes côtiers de la planète (stocké dans la biomasse et les sédiments).

Croissance horizontale : la croissance horizontale du rhizome s'oppose à la croissance verticale de la plantule, elle représente une forme végétative de la croissance de la matre.

Démersal : vivant près ou sur le fond marin.

Densité de pousses : nombre de pousses de feuilles par unité de surface (généralement 1m²).

Élévation de la marée : élévation relative ou position bathymétrique où se trouvent les plantes par rapport aux fluctuations du niveau de l'eau causées par la marée, généralement par rapport à un point de référence convenu comme le zéro des cartes (ou zéro hydrographique) qui est habituellement le niveau de la marée astronomique la plus basse.

Eutrophisation : pollution de certains écosystèmes aquatiques qui se produit lorsque le milieu reçoit trop de matières nutritives assimilables, ce qui entraîne une prolifération de certaines espèces au détriment de l'équilibre de l'écosystème.

Herbivorie : consommation/pâturage de tissus végétaux vivants par les animaux.

Histoires de vie (stratégies) : aspects caractéristiques du développement et du comportement reproductif d'un organisme, ainsi que ses caractéristiques démographiques telles que le temps de génération et la durée de vie, la densité de population et la dynamique de population.

Monospécifique : composé d'une seule espèce.

Motte(s) : section(s) de sédiment recouverte(s) d'herbes marines maintenues par leurs racines et rhizomes (aussi appelée(s) TERF - acronyme anglais - ou bouchons, excavée en vue d'une transplantation).

Opportuniste : une espèce capable de coloniser, de se reproduire et d'acquérir une biomasse importante et persistante lorsque les conditions sont bonnes mais qui a également la capacité de se reconstituer rapidement à partir de semences lorsque cela est nécessaire.

Pélagique : vivant dans la colonne d'eau de la haute mer.

Phanérogame(s) marine(s) : plantes aquatiques semblables aux plantes terrestres qui produisent des racines et peuvent produire des fleurs. Elles se regroupent en quatre familles suivantes : Zosteraceae, Posidoniaceae, Cymodoceaceae et Hydrocharitaceae.

Pionnier (-ère) (espèce) : espèce d'herbier ayant une stratégie de croissance qui lui permet de coloniser rapidement un plancher océanique dépourvu de végétation, généralement avec un investissement élevé dans la reproduction sexuelle, une faible résistance aux perturbations mais capable de se rétablir rapidement à partir d'une banque de graines.

Plantation corrective : action corrective consistant à planter de nouvelles unités d'herbiers au cours d'un programme de restauration pour remplacer les unités précédemment plantées qui sont mortes.

Pot de tourbe : technique consistant à prélever de petites mottes (bouchons) d'herbes marines et à les placer dans des coupelles ou des petits pots commercialement viables (constitués de tourbe comprimée) pour faciliter l'empilage, la manipulation, le transport et la transplantation.

Pousse : unité végétale unique qui naît du rhizome.

Projet pilote : projet environnemental à faible empreinte géographique visant à vérifier un concept de faisabilité dans un but éducatif ou de recherche expérimentale.

Région biogéographique : zone de répartition des animaux et des plantes présentant des caractéristiques similaires ou communes (distincte d'autres régions de ce type).

Réhabilitation : efforts visant à améliorer les conditions mais pas nécessairement à restituer des herbiers de la même espèce, de la même abondance ou d'une fonction écosystémique équivalente.

Relocalisation : opérations de sauvetage de parcelles d'herbiers marins - qui seraient autrement perdues, sous l'empreinte des développements planifiés - en les déplaçant vers d'autres zones.

Remédiation : action de remédier à quelque chose, en particulier d'inverser ou d'arrêter les dommages environnementaux ou tout autre changement non désiré.

Résilience : capacité d'un écosystème à répondre à une perturbation ou à un dérangement en résistant aux dommages et en se rétablissant rapidement.

Restauration : tout processus visant à ramener un système d'herbiers à un état préexistant (vierge ou non).

Rhizome : tige souterraine, poussant généralement à l'horizontal.

Sauvetage : sauvetage de l'herbier dans une zone où sont prévues des activités qui le détruiront.

Secchi (disque) : disque circulaire, blanc et noir ou uniformément blanc, descendu dans une masse d'eau pour estimer la clarté de l'eau en mesurant la profondeur à laquelle il disparaît.

Sédiment cohésif : sédiment contenant une proportion importante de fines particules d'argile, ce qui permet aux sédiments de se lier entre eux.

Semis : jeune plante qui a germé à partir d'une graine.

Spathes : bractées à la base de la fleur de l'herbier qui contiendra les graines mûrissantes après fécondation (peuvent se détacher et flotter pour faciliter la dispersion des graines).

Succession secondaire : communauté végétale qui se développe sur des sites d'où une communauté précédente a été retirée.

Transplantation : plantation de pousses ou de mottes d'herbiers provenant d'une autre zone d'herbiers dans un site de restauration.

1. Introduction

1.1 Contexte

Ce guide de restauration des écosystèmes d'herbiers marins (REHM) est destiné à servir d'outil pour accompagner les opportunités de restauration des herbiers marins dans la région de l'océan Indien occidental (OIO). Il a été développé en réponse à la dégradation croissante des herbiers de la région, soit par pression anthropogénique directe, soit à la suite d'impacts liés au changement climatique, ou encore les deux à la fois. L'initiative fait partie d'un programme plus large, financé par le GEF, qui s'intitule « Mise en œuvre du programme d'action stratégique pour la protection de l'océan Indien occidental contre les sources et activités terrestres » (WIOSAP), par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (Convention de Nairobi). Ce guide prodigue des conseils techniques nécessaires à la restauration des herbiers marins pour la mise en œuvre de projets de démonstration dans toute la région, dans le cadre de l'objectif plus large d'une réduction des pressions exercées sur ces écosystèmes d'herbiers marins par des sources et activités terrestres.

Le guide présente les meilleures approches et méthodologies pour la restauration des herbiers marins et est basé sur un examen minutieux de publications scientifiques et grises portant sur les méthodes de restauration des herbiers marins, et s'enrichit des retours d'expérience de projets expérimentaux, de projets pilotes à petite échelle et des programmes de restauration à grande échelle dans le monde entier.

Ce guide a été adapté pour une application pratique dans la région de l'OIO, en prenant en compte les facteurs locaux de déclin des herbiers, les espèces dominantes d'herbes marines, le contexte environnemental et de gestion, les contraintes logistiques et économiques. Il présente entre autre trois études de cas de la région (voir étude de cas 1).

1.2 Objectifs du guide

L'objectif de la préparation de ce guide spécifique à l'OIO est d'aider les acteurs régionaux à optimiser leurs ressources sur ce qui est le plus susceptible de fonctionner pour eux lors de la planification d'un projet de restauration des herbiers marins et de les aider à adapter la vaste gamme de méthodes et d'approches de restauration aux spécificités de leur site. Cela leur permettra d'éviter de répliquer des approches infructueuses et de mener des activités de restauration d'herbiers au hasard, sans considération sérieuse des leçons tirées des méthodes testées ailleurs et de leur applicabilité dans la région.

1.3 Destinataires cibles

Le guide est destiné aux parties prenantes de la restauration des herbiers dans la région de l'OIO, y compris les gestionnaires de ressources, les praticiens de la restauration, les scientifiques, les étudiants, les organisations non gouvernementales (ONG) et les communautés locales. Il est écrit dans un style facilement compréhensible et transmissible. Il s'appuie sur la littérature existante et les guides/protocoles/manuels de restauration des herbiers, complétés par l'expérience pratique des projets de recherche et de restauration des herbiers dans la région de l'OIO.

1.4 Processus suivi pour l'élaboration des guide

Le processus suivi pour l'élaboration de ce guide a été rigoureux. Il fut initié en avril 2018, lors d'une réunion des points focaux de la Convention de Nairobi à Madagascar. Le besoin de guides divers et le processus à suivre pour leur élaboration y furent discutés. Dans un premier temps, il a été demandé au Secrétariat de préparer les termes de référence d'un consultant chargé d'élaborer un projet de guide. Ces termes de référence ont été approuvés par le comité de

pilotage du projet (CPP) lors d'une réunion qui s'est tenue au Kenya en août 2018 ; un consultant a été recruté au 3^e trimestre 2018. L'avancement du processus a été suivi lors d'une réunion des points focaux et des experts régionaux en décembre 2018, au Mozambique ; s'en est suivi à partir de janvier 2019 de la phase active du développement de ce guide qui comprenait la consultation d'experts régionaux et l'examen du projet par le Secrétariat et les parties contractantes.

Le guide a été validé en mai 2019 lors de la réunion *Science to Policy* à laquelle ont participé les points focaux, les experts et les partenaires, au cours de laquelle d'autres contributions

techniques et politiques ont été apportées. Le guide mis à jour a été présenté lors de la réunion du CPP qui s'est tenue en juin 2019 et qui a approuvé : i) son adoption pour une application régionale plus large ; ii) une phase de test ; iii) la révision si nécessaire après cette phase, en fonction des réactions des différents usagers ; et, iv) sa mise en pratique pour le renforcement des capacités en matière de restauration des herbiers marins. Une dernière approbation du CPP a permis le lancement de l'édition professionnelle, de la mise en page/conception, et enfin de la publication et la diffusion.

EC 1.

Expérience de restauration de l'herbier *Zostera capensis* au moyen de la méthode des « bouchons », dans la zone intertidale de la baie de Maputo (Mozambique).

L'objectif de cette étude de restauration de l'herbier marin était d'évaluer les effets de la pêche à la palourde et du creusement des sédiments sur le rétablissement de *Zostera capensis*, et de comparer la survie des transplants d'herbier marin introduits expérimentalement à l'aide de tubes en PVC pour restaurer les zones impactées. L'étude a été menée sur les estrans de la baie de Maputo, au Mozambique (planche 1). L'efficacité de la replantation de *Z. capensis* a été testée à l'aide de tubes en PVC de deux diamètres (7,5 cm et 4,5 cm). La structure de la communauté des herbiers, la densité des pousses, l'abondance de la faune, les épiphytes et la granulométrie du sédiment ont été étudiés au début (avant la restauration) et 14, 45, 75 et 175 jours après la restauration. Au total, 160 transplants ont été plantés dans huit parcelles (80 avec un tube de 4,5 cm et 80 autres avec un tube de 7,5 cm) et leur survie, la densité des pousses et l'abondance des épiphytes ont été contrôlées.

L'herbier marin des sites donneurs s'est rapidement rétabli (% de couverture rétabli en deux semaines environ et autres attributs écologiques les semaines suivantes). Après trois mois, la survie de l'herbier planté sur les sites de restauration différait significativement selon la méthode des bouchons, étant élevée pour les tubes en PVC de 7,5 cm de diamètre (60 %) et faible (<10 %) pour les tubes de 4,5 cm. Alors que *Z. capensis* s'est rapidement remis de la perturbation causée par la récolte des palourdes, cette espèce est affectée par une série d'autres pressions dans la baie de Maputo. Les premiers résultats de l'expérience sont prometteurs et indiquent que l'utilisation de carottiers en PVC (7,5 cm au lieu de 4,5 cm) pour déplacer les transplants d'herbes marines peut s'avérer appropriée pour la restauration (à petite échelle) de *Z. capensis* dans la baie de Maputo (Mabuto et al. 2008).



Cadre 1. Impression photographique du projet en cours de restauration des herbiers dans la baie de Maputo (Mozambique), utilisant des carottes d'herbes marines pour la transplantation de *Zostera capensis* sur des plaines intertidales affectées par le creusement de palourdes.

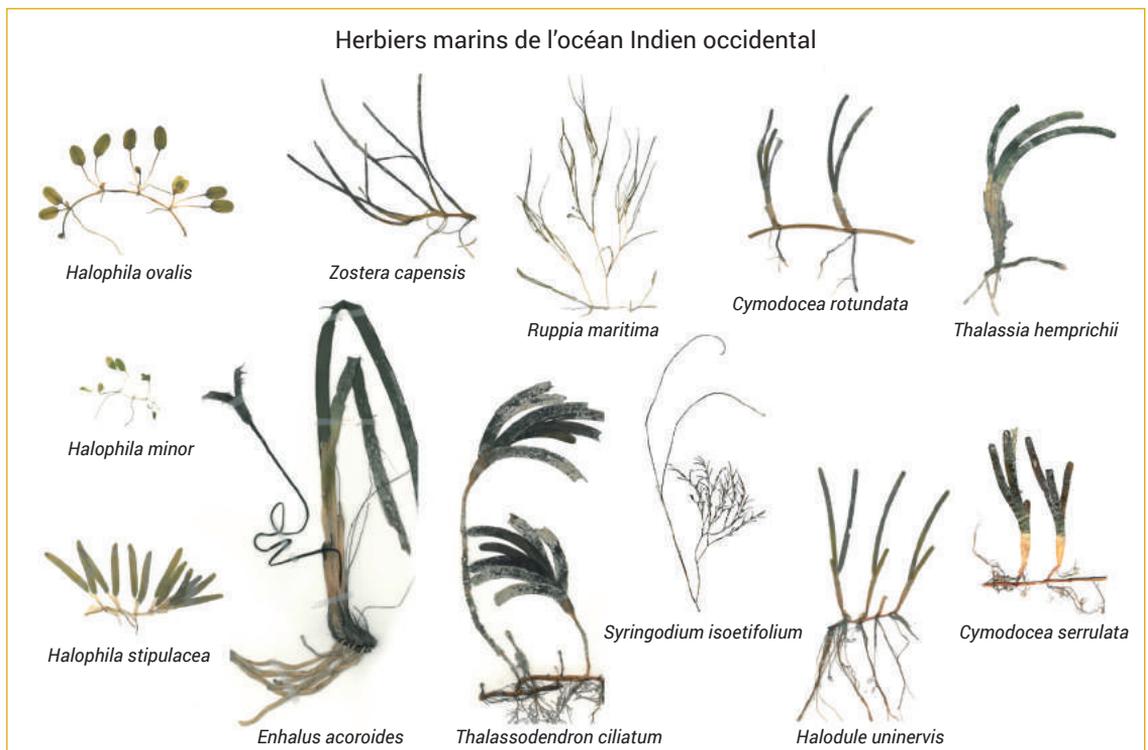
2. Écosystèmes d'herbiers marins dans la région de l'OIO

La région de l'océan Indien occidental (OIO) englobe l'Afrique du Sud, les Comores, la France (Réunion), le Kenya, Madagascar, Maurice, le Mozambique, les Seychelles, la Somalie, et la Tanzanie. Les herbes marines de la région de l'OIO couvrent de vastes zones de fonds littoraux mous, le long d'environ 12 000 km de côtes, de la zone intertidale à des profondeurs de plus de 30 m (Gullström et al., 2002 ; Ochieng et Erftemeijer, 2003 ; Bandeira et Gell, 2003). Les herbiers de la région se trouvent souvent en étroite relation avec les récifs coralliens et les

mangroves. Les herbiers mixtes sont courants (surtout au Kenya, au Mozambique et en Tanzanie) mais on trouve aussi des herbiers monospécifiques.

2.1 Espèces d'herbes marines

Un total de 12 espèces d'herbes ou phanérogames marines² a été documenté dans la région de l'OIO (Cadre 2). Deux des espèces les plus communes sont *Thalassia hemprichii* et *Thalassodendron ciliatum*³, formant toutes deux



Cadre 2. Espèces d'herbes marines de la région de l'OIO (vues de spécimens séchés ; noter les parties en floraison des spécimens de *Ruppia maritima*, *Enhalus acoroides* et *Syringodium isoetifolium*).

² Plusieurs autres herbes marines (*Halodule pinifolia*, *Halodule wrightii*, *Halophila ovata*, *Halophila decipiens* et *Halophila beccarii*) ont été signalées dans la région, mais il peut s'agir d'erreurs d'identification ou d'une confirmation supplémentaire. La taxonomie suit ici Waycott et al. (2004).

³ Une nouvelle espèce de *Thalassodendron* (*T. leptocaula*) a été récemment décrite dans des habitats rocheux du sud-est de l'Afrique mais la distribution de cette nouvelle espèce dans la région de l'OIO n'est pas encore bien comprise.

de vastes prairies ou herbiers dans la région. *Thalassia hemprichii* se trouve généralement dans des habitats plus protégés ou sur des plaines intertidales, tandis que *Thalassodendron ciliatum* occupe normalement des habitats sableux subtidaux exposés ou semi-exposés (tels que les lagons récifaux le long de certaines parties de la côte kenyane, Cadre 3). *Halophila ovalis*, *Cymodocea rotundata*, *Cymodocea serrulata*, *Syringodium isoetifolium* et *Halodule uninervis* sont également communes dans la majeure partie de la région. *Enhalus acoroides*, *Halophila stipulacea* et *Halophila minor* (un membre du complexe *Halophila ovalis*) semblent être limités au nord du Mozambique et de la Tanzanie et à certains endroits du Kenya. *Zostera capensis* (qui figure - en danger - sur la liste rouge de l'UICN) n'est commune que dans le sud du Mozambique et en Afrique du Sud, où de grands peuplements monospécifiques peuvent être présents ; l'espèce a également été enregistrée au Kenya. *Ruppia maritima*⁴ est commune dans les estuaires d'Afrique du Sud, mais elle est également présente dans les lacs côtiers du sud du Mozambique et de Madagascar.

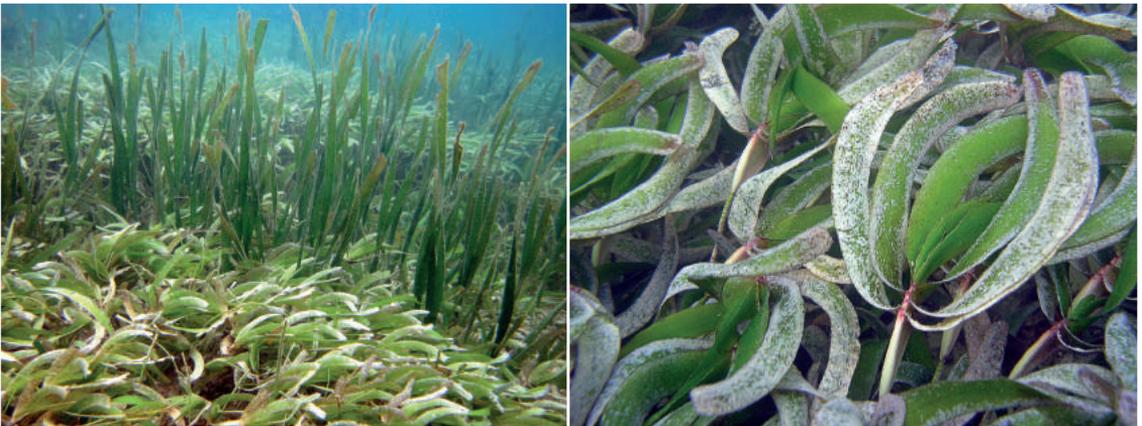
On remarque dans de nombreuses zones intertidales et subtidales que les herbiers sont constitués d'un assemblage de pousses de densités différentes. À certains endroits, il peut y avoir des étendues continues denses s'étendant

sur des centaines de mètres, mais aux abords des lagons, des zones intertidales inférieure et supérieure et d'autres zones, on peut également voir un mélange de plaques denses, de zones complètement nues et d'autres en croissance récente. Un tel gradient de zones de sable nu à de fortes densités est généralement lié à la façon dont le système racinaire des herbiers s'adapte aux vagues, à la dessiccation et aux autres contraintes physiques du milieu.

2.2 Fonctions et valeurs de l'écosystème

Les herbiers marins de la région de l'OIO abritent une biodiversité végétale et animale très étendue. En raison de leur production primaire élevée et de la structure complexe de leur habitat, les herbiers abritent une variété d'organismes benthiques, démersaux et pélagiques. De nombreuses espèces de poissons et de mollusques, y compris celles qui présentent un intérêt commercial, sont attirées par ces habitats d'herbiers pour s'alimenter et s'abriter, en particulier au cours des phases juvéniles de leur cycle de vie. Les herbiers de la région de l'OIO abritent également des populations importantes de deux espèces menacées qui se nourrissent d'herbes marines, à savoir la tortue verte *Chelonia mydas* (Cadre 4) et le dugong *Dugong dugon*.

L'importance des écosystèmes d'herbiers marins



Cadre 3. Impressions d'herbiers typiques de l'océan Indien occidental, montrant un peuplement mixte de *Thalassodendron ciliatum* et *Enhalus acoroides* (à gauche), et un gros plan de *Thalassodendron ciliatum* (à droite).

⁴ *Ruppia maritima* a souvent été décrite comme une plante d'eau douce avec une tolérance prononcée à la salinité. Elle est introduite ici en tant que réelle espèce d'herbe marine, conformément aux récents guides d'herbiers marins et la littérature clé.



Cadre 4. Les prairies sous-marines de la région de l'OIO rendent toute une série de services écosystémiques importants, notamment en tant que zones de nutrition pour des espèces menacées telles que les tortues vertes (à gauche) et le maintien des pêcheries locales (à droite).

d'Afrique de l'Est pour les pêcheries se révèle progressivement, grâce à un effort de recherche croissant sur le rôle des herbiers de cette région en tant que zones de nurserie, de reproduction et d'alimentation pour les espèces de poissons et de crustacés marins à forte valeur économique comme les crevettes (*Penaeus*) et la langouste (*Panulirus*). La récolte des bivalves et d'autres invertébrés dans les zones intertidales d'herbes marines pour la consommation humaine est une activité économique importante au niveau local (par exemple en Tanzanie et au Mozambique).

En raison de l'architecture complexe de la canopée en combinaison avec un réseau dense de racines et de rhizomes, les herbiers marins stabilisent les sédiments du littoral et servent de barrière hydrodynamique efficace, abaissant l'énergie des vagues et la vitesse du courant, atténuant ainsi l'érosion côtière. En outre, les herbiers retiennent de grandes quantités de nutriments et de matière organique dans leurs sédiments. Grâce à la décomposition microbienne, la biomasse des herbiers entre dans le réseau alimentaire marin en tant que détritiques et supporte ainsi la productivité par le recyclage des nutriments et du carbone.

Plus récemment, les prairies sous-marines ont été reconnues pour leur potentiel considérable de stockage de carbone organique. On estime qu'à l'échelle mondiale, 19,9 Pg de carbone organique sont stockés dans les prairies sous-

marines. Le carbone organique des sédiments des herbiers s'accumule à la fois par la production in situ et par la sédimentation du carbone particulaire piégé dans la colonne d'eau. L'accumulation de carbone dans les sédiments marins permet le stockage à long terme du carbone organique et a été appelée « carbone bleu » pour le distinguer du carbone vert des puits terrestres. Les prairies sous-marines ne couvrent que 0,1 % de la surface du plancher océanique mondial, mais représentent 10 à 18 % de la séquestration totale du carbone océanique, s'accumulant à des taux de 48 à 112 Tg C an⁻¹.

Les bénéfices écosystémiques considérables que les herbiers procurent à l'économie régionale de l'OIO grâce à ces diverses fonctions ont une valeur économique totale estimée à quelques 20,8 milliards USD (Obura et al., 2017).

2.3 Facteurs de déclin

Les herbiers de la région de l'OIO sont soumis à une série de menaces (Eklöf, 2008 ; UNEP, 2009 ; Nordlund, 2012 ; Lugendo, 2015). La sédimentation due à la déforestation des hautes terres et l'érosion dans les bassins versants affectent les zones d'herbiers marins aux Comores et dans le nord du Kenya. Le piétinement et la forte concentration des activités de pêche et de tourisme sont un problème le long de certaines parties des côtes du Mozambique, de l'île Maurice et du Kenya



Cadre 5. Impact de l'industrie du tourisme sur les herbiers marins. La couverture des herbiers marins a diminué devant un hôtel de plage de la côte nord de Mombasa.

(Bandeira et Gell, 2003 ; Daby, 2003 ; Ochieng et Erfteemeijer, 2003 ; Cadre 5). L'eutrophisation et les dommages physiques causés par les ancres, les cicatrices d'hélice et les échouages de bateaux ont affecté les herbiers près de centres urbains tels que Dar es Salaam (Tanzanie), Mombasa (Kenya) et Maputo (Mozambique). Les effets destructeurs de certains types d'engins de pêche sur les herbiers, comme la senne de plage, sont couramment rapportés en Tanzanie, au Mozambique et dans le sud de Madagascar (Gullström et al., 2002). Le creusement pour collecter des bivalves intertidaux est courant dans les herbiers marins intertidaux de Maputo (Mozambique), où il a affecté les prairies marines et la biodiversité associée (Bandeira et Gell, 2003). L'élevage d'algues à Zanzibar (Tanzanie) a des effets à court et à long termes sur la croissance et l'abondance des herbiers (par l'ombrage, l'enlèvement, le piétinement et l'amarrage des bateaux), ce qui affecte les prises de poissons locales (Eklöf et al., 2006). Les impacts sur les herbiers dus aux fuites d'herbicides et aux écoulements de l'industrie sucrière ont été

documentés à l'île Maurice. Le surpâturage par l'oursin à épines blanches *Tripneustes gratilla*, suite à la surpêche de ses prédateurs, a été pointé comme une cause potentielle du déclin des herbiers marins le long de certaines parties de la côte kenyane (Alcoverro & Mariani, 2002).

Les facteurs sous-jacents à certaines de ces menaces comprennent la croissance démographique rapide, la pauvreté, le manque d'éducation et de sensibilisation environnementales, l'application inadéquate des lois et le changement climatique (Anemone-Mabuto et al., 2017). Le développement rapide des côtes (impliquant le dragage, le défrichage et la pollution) et la pollution pétrolière (y compris le risque de marées noires) n'ont pas encore, à ce jour, causé d'impacts dramatiques sur les herbiers dans la région de l'OIO (voir l'étude de cas 2). Cependant, la croissance économique émergente et la démographie sont susceptibles d'exercer une pression croissante sur l'environnement côtier et littoral de la région dans les années à venir. Par exemple, les plans récents de

développement de grands ports au Kenya et en Tanzanie, qui impliqueront des activités de dragage considérables, de même que l'installation prévue de gazoducs dans le nord du Mozambique suite à la découverte récente de gisements de gaz naturel, sont susceptibles de poser de nouveaux risques sur les herbiers marins et les moyens de subsistance qui y sont associés dans la région de l'OIO (Erftemeijer et Lewis, 2006).

2.4 Arguments pour la restauration des herbiers

La justification de la restauration des herbiers est de compenser les dommages ou réhabiliter un écosystème d'herbier marin qui ne peut plus suffisamment s'autocorriger ou s'autoréparer. Cela est généralement en réponse à l'observation d'une dégradation significative ou d'une perte de surface des herbiers dans certaines zones - par télédétection, cartographie et/ou enquête de terrain. Alors que la plus haute priorité devrait toujours être accordée à éviter de telles dégradations et pertes, cela n'est pas toujours possible en pratique (par ex. quand la cause de la perte des herbiers échappe au contrôle de la gestion) ; une intervention active pour la restauration des herbiers peut alors s'avérer nécessaire.

L'objectif ultime de la restauration de l'herbier est non seulement de revégétaliser les zones endommagées ou dégradées mais aussi de restaurer les services écosystémiques perdus que ces zones fournissaient. Dans certains cas, la restauration des herbiers peut être envisagée pour réintroduire une espèce de phanérogame marine qui a complètement disparu d'une zone.

2.5 Intégrer la restauration des herbiers aux cadres stratégiques

Il y a des avantages à considérer l'incorporation de la restauration des herbiers comme outil de gestion dans les cadres politiques et les contextes décisionnels régionaux et nationaux. Certains pays de la région de l'OIO l'ont déjà fait de manière assez spécifique. La stratégie nationale et le plan d'action de la diversité biologique du Mozambique, par exemple, mentionnent spécifiquement l'importance des herbiers marins et accorde toute l'attention nécessaire à la restauration des écosystèmes dégradés (MITADER, 2015). Au Kenya, la restauration de l'environnement est ancrée dans la loi de 1999 sur la gestion et la coordination de l'environnement (National Council for Law, 2018) et une « stratégie de conservation des écosystèmes des récifs coralliens et des herbiers marins 2014-2018 » a été élaborée ; elle encourage spécifiquement le développement et la mise en œuvre de protocoles et d'activités de restauration des herbiers marins, ainsi que des programmes de suivi et d'évaluation dédiés (Kenya Wildlife Service, 2013). Ces instruments politiques sont également d'une importance stratégique lors des évaluations d'impact environnemental, lors de la fixation des compensations pour les dommages environnementaux ou lors de la négociation des compensations de carbone bleu. La restauration des herbiers ne se suffit pas à elle-même, elle fait partie d'un ensemble d'options et d'outils de gestion pour la conservation, la protection, la gestion et la réhabilitation de l'environnement. Cela est important, surtout si l'on considère le contexte plus large de la nécessité de s'attaquer aux causes sous-jacentes du déclin des herbiers et de protéger les herbiers contre les sources de perturbations et les activités terrestres (GESAMP, 2001).

EC 2.

Susceptibilité et nettoyage des herbiers marins touchés par les marées noires

par Matthew D. Richmond

Dans l'océan Indien occidental, les herbiers marins sont principalement situés sur le littoral moyen ou inférieur des bras de mer et des baies, des lagons subtidaux et des zones peu profondes, abritées et à faible énergie, protégées par des récifs ou des barrières côtières. Leur emplacement les rend vulnérables aux déversements d'hydrocarbures, car c'est dans ces zones que le pétrole déversé a tendance à s'accumuler. L'écosystème des herbiers marins est sensible aux hydrocarbures, notamment en raison de la faune associée qui habite les sédiments, la canopée et la surface des feuilles ou qui utilise les herbiers comme zones de reproduction ou d'alimentation. Les déversements qui atteignent le rivage à marée basse sont plus susceptibles d'avoir un impact sur les herbiers intertidaux, mais une fois que la marée est haute, les hydrocarbures flottent généralement et sont transportés plus loin

sur le rivage. Les systèmes d'herbiers marins situés à des profondeurs plus importantes sont moins susceptibles d'être affectés par une exposition à long terme aux hydrocarbures déversés. Les effets des produits pétroliers sur les écosystèmes d'herbiers marins (figure 1) peuvent être les suivants :

- Mortalité directe des organismes par étouffement, contamination, asphyxie ou empoisonnement,
- Mortalité indirecte due à la disparition des sources de nourriture ou à la destruction ou à l'élimination de l'habitat,
- Mortalité des poissons et des invertébrés juvéniles qui utilisent les herbiers marins comme zones de reproduction,
- Incorporation de quantités sublétales de fractions des hydrocarbures dans les tissus corporels du biote.

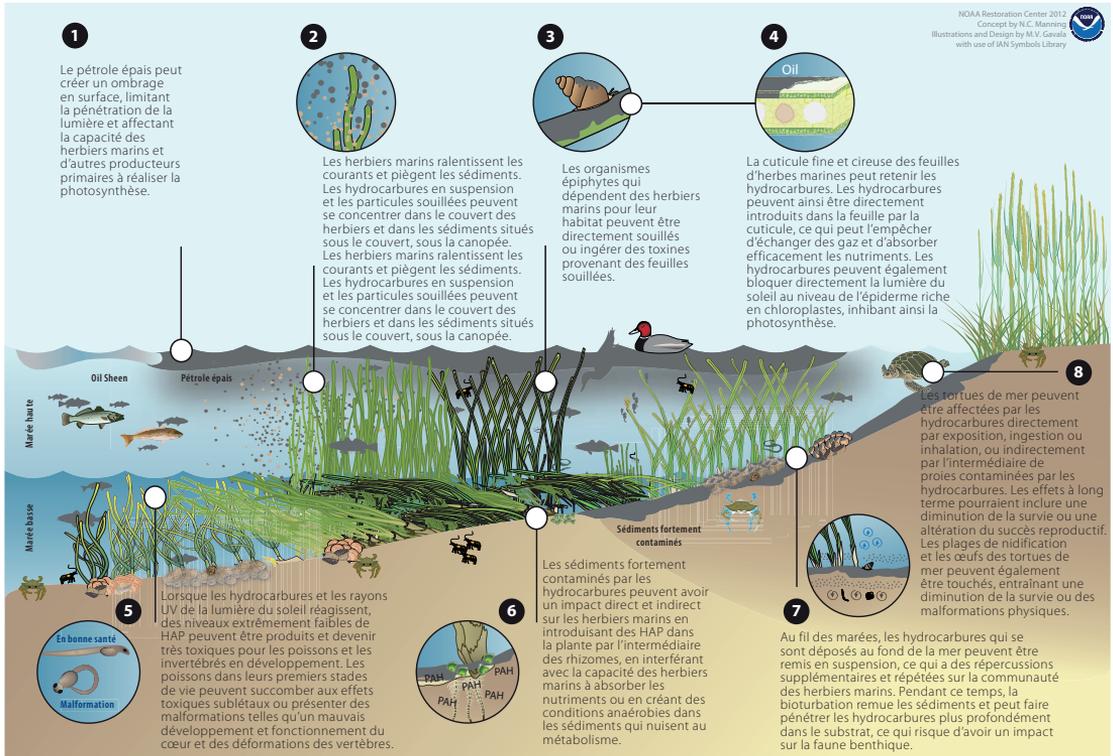


Illustration 1. Impacts potentiels des déversements d'hydrocarbures sur les herbiers marins et les organismes associés.

(Source: NOAA Restoration Centre 2012, cited in Kenworthy *et al.*, 2017).

- Réduction de la valeur marchande des coquillages récoltés en raison de la contamination par les hydrocarbures,
- Incorporation de substances potentiellement cancérigènes dans la chaîne alimentaire.

Selon le degré du mazoutage, on peut s'attendre à des effets à court terme sur les herbiers marins lorsque les parties aériennes de la plante (feuilles et gaines foliaires) sont en contact direct avec les hydrocarbures flottants. Un examen récent des études de cas disponibles a révélé que les effets des déversements d'hydrocarbures sur les herbiers marins n'étaient pas uniformes. Sur de nombreux sites, il n'y avait que peu ou pas de preuves d'effets significatifs à long terme ou persistants, à moins que les herbiers n'aient été complètement recouverts d'hydrocarbures ou que les parties souterraines des plantes n'aient été affectées par la pénétration d'hydrocarbures dans les sédiments. Tant que l'herbier marin et son système racinaire ne sont pas gravement touchés, les herbiers se rétablissent généralement assez rapidement.

Lorsqu'un déversement d'hydrocarbures est susceptible d'atteindre et d'affecter les herbiers marins, il est important que les intervenants sur le littoral choisissent soigneusement des méthodes de lutte contre le déversement visant à empêcher efficacement les hydrocarbures d'atteindre les herbiers marins. Si un déversement évolue au point de nécessiter un nettoyage, l'objectif doit être de contenir les hydrocarbures afin qu'ils puissent être rapidement collectés et retirés du système. Les intervenants doivent délimiter des zones interdites aux équipes de nettoyage, là où les herbiers sont adjacents à d'autres habitats marins et côtiers en cours de nettoyage. Quelles que soient les méthodes de nettoyage - chimiques, mécaniques ou manuelles

utilisées, les opérations doivent être bien supervisées et documentées.

Dans les environnements tropicaux, où les taux d'évaporation sont très élevés, le nettoyage naturel et le rinçage à basse pression sont les méthodes de nettoyage préférées pour les hydrocarbures échoués dans les herbiers. L'enlèvement des sédiments, l'enfouissement, la coupe et le brûlage inconsidérés de la végétation mazoutée, l'utilisation d'agents dispersants, le nettoyage à la vapeur ou le rinçage à haute pression sont autant d'opérations à éviter. Seule l'élimination de la majeure partie des hydrocarbures en phase libre doit être tentée, en laissant les hydrocarbures restants s'altérer naturellement afin de minimiser les dommages physiques causés à la structure de l'herbier. Aucun cas documenté n'indique la nécessité d'une restauration active (plantation) des herbiers marins à la suite d'un déversement d'hydrocarbures.

L'utilisation de dispersants peut accroître le stress des herbiers et causer des dommages supplémentaires au système d'herbiers, bien que la toxicité des dispersants et des hydrocarbures dispersés qui en résultent dépende de l'espèce exposée. Les mesures préparatoires aux déversements accidentels d'hydrocarbures comprennent un plan d'urgence complet en cas de déversement d'hydrocarbures et l'établissement de la ligne de base avant impact des zones vulnérables d'herbiers marins situées à proximité des raffineries de pétrole, des grands ports ou des terminaux pétroliers.

Quelques lectures complémentaires : Fonseca et al. (2017) ; Kenworthy et al. (2017).

3. Restauration des herbiers marins – considérations générales

La disparition étendue des prairies sous-marines de par le monde, qui coïncide avec une connaissance et une prise de conscience croissantes de la valeur des ressources de ces systèmes, a suscité une attention accrue pour la restauration des prairies marines. Une série de méthodologies a été développée et testée dans divers environnements, avec des degrés de réussite variables et de nombreuses leçons à tirer.

La restauration ou la réhabilitation de l'herbier peut être recommandée lorsque l'écosystème de l'herbier a été altéré à un point tel qu'il ne peut plus suffisamment s'autocorriger ou s'autorenouveler. Dans de telles conditions, les processus normaux de succession secondaire ou de récupération naturelle des dommages sont inhibés d'une manière ou d'une autre. Malheureusement, pendant longtemps, la pratique de la restauration des herbiers a mis l'accent sur la plantation d'herbiers comme principal outil de restauration, au lieu d'évaluer d'abord les raisons de la perte d'herbiers dans une zone et de travailler sur les processus de régénération naturelle que connaissent tous les écosystèmes (voir étude de cas 3). La restauration des herbiers peut également être envisagée lorsqu'il est nécessaire de réintroduire une espèce d'herbier qui a disparu d'une zone.

Dans d'autres cas, la restauration de l'herbier est parfois menée comme une forme d'atténuation compensatoire, en créant des prairies d'herbiers dans des zones qui semblent propices à la croissance, dans une tentative de substituer (communément appelée « compensation ») la perte inévitable d'herbiers sains ailleurs, en raison de « l'empreinte » d'un certain développement (par exemple, l'expansion d'un port ou la réclamation de terres dans l'espace côtier). Il peut s'agir d'une exigence obligatoire dans le cadre de l'approbation des permis environnementaux,

selon le principe de la « perte nette nulle ». Ces mesures d'atténuation peuvent inclure le déplacement des herbiers ou des opérations de sauvetage (voir ci-dessous). Cependant, il faut souligner ici que la restauration des herbiers ne doit jamais être considérée comme la première alternative lors de la planification de l'atténuation des projets de développement côtier ou pour justifier l'atténuation comme mesure de compensation pour les activités économiques.

Un autre objectif de la restauration des herbiers, suggéré plus récemment en réponse aux préoccupations liées au changement climatique, pourrait être de planter des herbiers pour la « séquestration de carbone bleu » ou pour réduire l'acidification des océans mais cela, n'a nulle part encore été mis en œuvre.

3.1 Termes et définitions

Dans le contexte de ce manuel, le terme « restauration d'herbiers » a été adopté pour désigner tout processus visant à ramener un système d'herbiers, autant que possible, à un état préexistant (qu'il soit vierge ou non), en tenant compte des processus de récupération naturelle. Cette définition plus large inclut les efforts de réhabilitation qui visent à améliorer les conditions mais pas nécessairement à ramener des herbiers de la même espèce, de la même abondance ou d'une fonction écosystémique équivalente. Le terme « transplantation d'herbiers » est utilisé pour décrire la plantation de pousses ou de mottes d'herbiers provenant d'une autre zone d'herbiers dans un site de restauration, tandis que le terme « relogement d'herbiers » est utilisé pour décrire les opérations de sauvetage de parcelles d'herbiers qui seraient autrement perdues sous l'empreinte de développements planifiés, ces parcelles déplacées vers d'autres zones.

EC 3.

Restauration passive des herbiers marins à Port Manatee, Floride (USA).

La restriction de l'accès des bateaux à certaines zones (endommagées par des hélices) dans la baie de Tampa, en Floride, par des mesures réglementaires et l'installation de bouées de démarcation (interdisant toute entrée, transit, ancrage ou dérive dans les zones restreintes) a permis une reconstitution importante (4,5 ha) et réussie des herbiers marins (par une restauration "passive") à des coûts relativement faibles (300 000 dollars pour les bouées et trois ans de patrouilles et d'entretien) (Swingle, 2003).

Cette approche passive a de loin dépassé les résultats décevants (survie très faible ou nulle) d'une approche simultanée (5 millions de dollars de relocalisation mécanique de l'herbier qui avait utilisé une machine de transplantation

de "giga-dispositif de transplantation de rhizome" (Planche 6) pour récupérer et relocaliser ~11 000 mottes de rhizomes d'une zone d'expansion portuaire dans un site de relocalisation voisin de ~4 ha (Cuba, 2003). Bien que capable de déplacer du matériel végétal viable avec ses sédiments propres, l'état du matériel donneur et la faible adéquation de l'habitat receveur (marginal) ont contribué à la faible réussite globale de cette approche mécanique. Ce cas démontre que - lorsque cela est possible - l'inversion de la dégradation des herbiers marins en s'attaquant à la (aux) cause(s) profonde(s) afin de faciliter le rétablissement naturel peut être l'une des approches les plus rentables pour la restauration des herbiers marins à grande échelle.



Cadre 6. Travaux de sauvetage et de restauration des herbiers dans la baie de Tampa (Floride) : en haut, giga-dispositif de transplantation de racines. En bas (à gauche) : zone intertidale où des mottes d'algues de 1x1 m ont été retirées avec la machine ci-dessus (voir cadran pour référence d'échelle). En bas (à droite) : bouées de démarcation utilisées pour prévenir toute entrée, transit, ancrage ou dérive dans les zones restreintes, pour permettre aux herbiers de se remettre des dégâts causés par les bateaux.

3.2 Considérations de bon sens

Si l'herbe marine ne pousse pas à un endroit, il y a deux possibilités : 1) elle n'a jamais poussé à cet endroit parce que les conditions qui y prévalent ne sont pas adaptées ou 2) elle y a poussé dans le passé mais a disparu en raison d'un impact négatif (humain ou naturel). Dans les deux cas, les conditions environnementales ne sont apparemment pas adaptées aux herbes marines à l'heure actuelle. Il ne serait donc pas logique de planter des herbiers sur ces sites et de s'attendre à ce que ces greffes survivent. Il faut plutôt s'attaquer d'abord à la/aux causes sous-jacentes de la disparition des herbiers, en améliorant les conditions environnementales.

Dès que les conditions s'améliorent significativement, ou reviennent à ce qu'elles étaient avant la perturbation, les herbiers reviennent généralement d'eux-mêmes, retrouvant progressivement, avec le temps, leur couverture et leur fonctionnement écologique antérieurs (Vaudrey et al., 2010). Le seul obstacle potentiel à ce rétablissement naturel pourrait être la limitation du recrutement

(un manque d'approvisionnement en graines ou en fragments), soit en raison d'obstacles à la connectivité avec les prairies adjacentes (non affectées), soit en raison de l'absence de toute population significative restant à proximité et à partir de laquelle le site pourrait être repeuplé. Dans de tels cas, il serait logique d'apporter des graines d'herbiers ou du matériel végétal d'ailleurs pour restaurer une certaine couverture végétale (voir étude de cas 4). Lorsque ces parcelles revégétalisées seront suffisamment grandes, elles seront capables de se maintenir d'elles-mêmes, de s'étendre et de recoloniser progressivement le site.

Une sélection inappropriée du site et un manque de planification (avec peu ou pas de considération pour la raison pour laquelle l'herbier a disparu en premier lieu) sont parmi les raisons les plus fréquemment citées pour l'échec des tentatives de restauration de l'herbier (Encadré 1). Le chapitre 8 présente des suggestions sur la manière d'élaborer un plan de gestion de la restauration des herbiers marins.

Encadré 1. Raisons courantes de l'échec des essais de restauration d'herbiers marins

- Choix de site inapproprié.
- Déracinement des transplants en raison de forts débits, de l'énergie élevée des vagues ou de la houle.
- Instabilité des sédiments provoquant l'érosion ou l'étouffement et l'enfouissement des plantules.
- Mauvaise qualité de l'eau (turbidité, eutrophisation, faible luminosité).
- Prolifération d'algues et/ou croissance excessive d'épiphytes.
- Ancrage inadéquat des transplants (emportés par les marées).
- Mauvaise planification (pas d'inversion des menaces, manque de considération pour le choix du site).
- Trop peu profond (dessiccation) ou trop profond (lumière insuffisante).
- Bioturbation excessive (par exemple, par des polychètes ou des raies) déracinant les transplants.
- (Sur)brouillage des transplants (par exemple par des oursins ou des amphipodes).
- Maladie (par exemple, attaque fongique sur les graines ou les plantules).
- Trop petite échelle (faible résilience, auto-facilitation insuffisante).
- Manque de matériel donneur ou de stock de graines (par exemple, pas de floraison).
- Dommages causés par les activités humaines, tempêtes, inondations ou déversements.
- Application à grande échelle d'une technologie non éprouvée (essais insuffisants).
- Attentes irréalistes (concernant les coûts, l'échelle, la durée, les chances de réussite).

3.3 Hiérarchie des approches de restauration et gestion d'herbiers

Pour l'approche la moins coûteuse et la plus pertinente de la restauration des herbiers marins, la hiérarchie d'interventions suivante est recommandée, soit en quatre étapes et par ordre de priorité :

ÉTAPE 1 : SOUSTRAIRE LES CAUSES DE DÉCLIN

L'objectif est de prévenir la perte continue et d'inverser la dégradation des herbiers marins en s'attaquant aux facteurs de déclin. Il peut s'agir de diverses approches, telles que : la création de « aires marines protégées » (AMP) ; l'imposition de restrictions d'accès aux bateaux ; l'interdiction de l'utilisation du chalutage, du senneur de plage et d'autres engins de pêche destructeurs dans les zones d'herbiers ; l'installation de dispositifs anti-chalutage ; l'amélioration des pratiques de gestion des bassins versants et des captages ; l'investissement dans des systèmes de traitement des eaux usées pour réduire l'eutrophisation (par exemple, Greening et Janicki, 2006 ; Vaudrey et al, 2010) ; l'adoption d'un processus d'étude d'impact environnemental (EIE) approfondi et l'évitement des zones d'herbiers marins dans la sélection des sites pour les ports, la reclassification, l'industrie, l'aquaculture, les pipelines et autres infrastructures.

ÉTAPE 2 : AIDER LE RÉTABLISSEMENT NATUREL

Cela implique des approches actives pour créer/ rétablir des conditions propices pour faciliter et soutenir ou accélérer le rétablissement naturel de la végétation d'herbiers marins et des fonctions écosystémiques - comme de la biodiversité - qui lui sont associées. Cela peut comprendre des sacs de toile de jute ou une application de géotextiles (pour stabiliser le substrat, piéger les recrues et faciliter la réussite de l'établissement), la restauration de l'échange de marée (lorsqu'il est limité ou bloqué), la gestion de l'apport d'eau douce (par exemple dans les estuaires hypersalins), des mesures d'ingénierie hybrides telles que des murets, des barres de sable, des crêtes de moules ou des récifs d'huîtres (pour créer des conditions plus calmes) ou le remplissage de blessures excavées plus grandes et plus profondes dues à l'échouement d'un bateau ou à des cicatrices d'hélice, le rétablissement au moyen de tubes géotextiles biodégradables remplis de sédiments.

EC 4.

Transfert d'une banque de graines de *Ruppia tuberosa* dans le Coorong.

La santé écologique du Coorong, un système lagunaire côtier d'Australie-Méridionale, a été dévastée par une sécheresse de longue durée de 2006 à 2010 et par un prélèvement excessif d'eau en amont dans la rivière Murray. La baisse des niveaux d'eau et les salinités extrêmes ont entraîné un déclin rapide de *Ruppia tuberosa*. Malgré l'amélioration récente des conditions environnementales dans le Coorong, les populations de *R. tuberosa* dans les deux principaux lagons du Coorong ne sont pas naturellement revenues à leur état initial, en raison de l'épuisement de la banque de semences. Le lac Cantara, un petit lac salé situé à proximité dans le parc national du Coorong, possède une population établie et saine de *R. tuberosa* qui a largement survécu à la sécheresse et a servi de site donneur pour ce projet de translocation de la banque de semences.

Les graines de *Ruppia tuberosa* ont une taille d'environ 1 mm, sont noires et en forme de goutte, et peuvent être trouvées en grandes densités dans la couche supérieure des sédiments du lit du lac. Les graines ont été collectées à la fin de l'été et au début de l'automne, lorsque le lac Cantara était sec (planche 7). Un petit excavateur a été utilisé pour gratter les 15 mm supérieurs de sédiments nus contenant les graines. Des tapis roulants ont été utilisés pour réduire l'impact de l'excavatrice. Les semences ont été collectées en bandes, avec des intervalles de largeur égale pour favoriser une récupération plus rapide du stock de semences de *R. tuberosa* dans le lac Cantara.

Les sédiments ont été transportés dans des sacs vers des sites de translocation dans le Coorong. La plantation a été effectuée pendant l'exposition des vasières le long du lagon de Coorong (sud) lorsque les niveaux d'eau étaient bas. Les sites de plantation ont été choisis en fonction des prévisions de niveau d'eau, car on sait que *R. tuberosa* pousse mieux dans le Coorong à des profondeurs d'eau comprises entre 30 et 100 cm. La plantation a consisté à agiter légèrement la surface de la vasière, à disperser le sédiment de la graine, puis à le presser dans le sol. Les sections plus profondes des vasières présentaient une faible couverture d'eau même au moment de la plantation, de sorte que les sédiments de semences ont été dispersés directement dans l'eau et que l'action locale des vagues les a maintenus en place. Au total, 280 tonnes (14 080 sacs) et 450 tonnes (30 100 sacs) de sédiments ont été transférées en 2013 et 2014, respectivement. Une superficie estimée à ~20 ha et ~41 ha a été restaurée au cours de ces deux années. Les efforts de restauration ont été couronnés de succès dans la mesure où *R. tuberosa* a recolonisé les zones transplantées. Bien que la restauration ait contribué au rétablissement de *R. tuberosa* dans le Coorong, les niveaux d'eau ne sont pas montés suffisamment haut pour permettre l'achèvement du cycle de reproduction sur les sites revégétalisés et les densités de graines et de turions (bourgeons hivernaux qui restent dormants au bord du lac) sont restées faibles par rapport aux valeurs historiques (Collier et al., 2016).



Cadre 7. Étapes du programme 2014/2015 de transfert de *R. tuberosa* : a) récolte des graines dans les sédiments du lac Cantara ; b) stockage des sédiments contenant les graines ; c) mise en place des sédiments stockés et d) actions d'épandage.

4. Méthodes de restauration

Les méthodes de restauration d'herbiers marins développées et testées au cours des dernières décennies sont innombrables. La restauration de l'herbier est une discipline relativement jeune, avec de nouvelles méthodes, des idées et des approches innovantes développées en permanence. Il existe plusieurs excellents manuels, guides et revues qui décrivent et examinent en détail un large éventail de méthodes de restauration des herbiers marins. Les travaux de Mark Fonseca (Fonseca, 1994 ; Fonseca et al., 1998 ; Fonseca et al., 2002) méritent une attention particulière, ainsi que ceux de Bob Orth (Orth et Marion, 2007 ; Orth et al., 2007), et du regretté Robin R. R. Lewis III (Lewis, 1987 ; Treat et Lewis, 2006). Des revues récentes incluent : Calumpong et Fonseca (2001) et Van Katwijk et al. (2016).

Le développement et la mise en œuvre de méthodes appropriées nécessitent de l'expérience et une bonne connaissance des formes de croissance et de l'histoire de vie des espèces. Il a été démontré que de nombreuses méthodes permettent de restaurer des herbiers marins avec succès cependant, il est essentiel de connaître les méthodes de manipulation et de plantation et d'avoir la capacité de travailler dans l'eau ou sous l'eau. La plupart des expériences avec ces méthodes ont été acquises sur des espèces d'herbiers tempérés, notamment aux États-Unis (Fonseca et al., 1998) et en Australie (Statton et al., 2018). En comparaison, la restauration d'herbier dans les régions tropicales n'en est qu'à ses débuts (hormis quelques grands travaux en Floride et des projets pilotes antérieurs dans les Caraïbes) et n'a certainement pas encore été réalisée avec succès à grande échelle. La restauration des herbiers dans la région de l'OIO ne fait que commencer, mais quelques premiers essais à petite échelle ont été lancés récemment au Kenya, à Madagascar et au Mozambique.

4.1 Transplantation manuelle

Les méthodes de plantation en eaux plus profondes nécessiteront l'utilisation d'équipements de plongée, de conducteurs de bateaux expérimentés et de plongeurs formés. Les eaux peu profondes peuvent permettre de réaliser les travaux de restauration en apnée, à condition que la profondeur de l'eau soit suffisamment faible pour permettre à une personne pratiquant la plongée libre d'atteindre le fond en retenant sa respiration. Les zones intertidales sont souvent facilement accessibles à pied à marée basse (à condition qu'elles ne soient pas extrêmement boueuses) et peuvent donc être les zones présentant le moins de difficultés logistiques pour les activités de plantation. Dans tous les cas, il est important de marquer clairement les zones de plantation, afin que leurs limites soient bien visibles (par exemple, avec des poteaux ou des bouées).

Toutes les méthodes de plantation nécessitent la présence de « stocks sauvages » et exigent une main-d'œuvre importante. Alors que cela peut facilement se traduire par des coûts élevés (par surface) - en particulier dans les économies occidentales, où les coûts de main-d'œuvre sont typiquement élevés - ce n'est pas nécessairement le cas dans la majeure partie de la région de l'OIO ou pour les programmes de restauration qui impliquent des communautés locales et/ou des bénévoles.

Les projets de plantation impliquent typiquement soit des unités d'herbes marines sans sédiments, des mottes d'herbes marines avec des sédiments et des systèmes de rhizomes/racines intacts ou des graines/fruits.

4.1.1 Méthodes sans sédiments

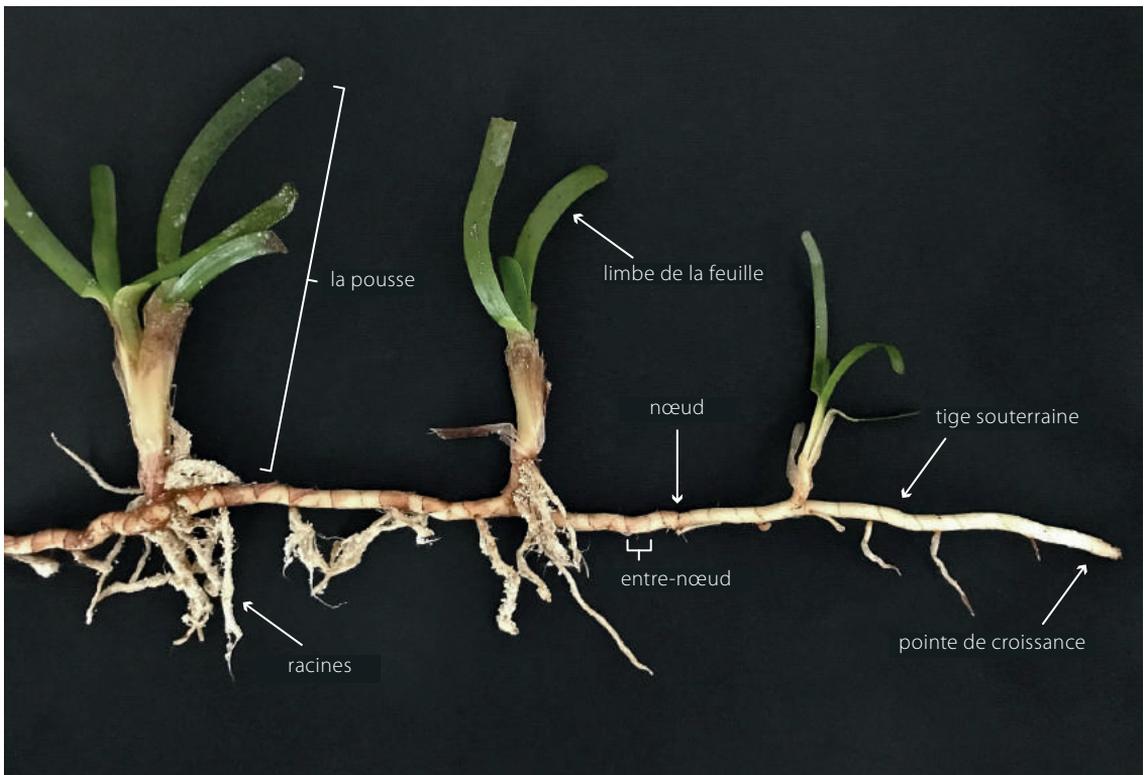
Méthodes sans sédiments

Avantages : Les méthodes sans sédiments ont l'avantage de réduire le fardeau du transport de lourds sédiments.

Inconvénients : le principal inconvénient de cette approche est son intensité de main-d'œuvre (ce qui limite l'échelle spatiale de la restauration) et l'utilisation d'agrafes métalliques, parfois critiquée mais pouvant être retirées ultérieurement (et réutilisées) ou remplacées par une alternative biodégradable (par exemple, des brochettes en bambou).

Pour la plupart des méthodes sans sédiments, les plants sont déterrés à l'aide d'une pelle (ou d'un autre outil), les sédiments sont secoués pour débarrasser les racines et les rhizomes du sédiment cohésif, les plants placés dans des réservoirs d'eau de mer courante, sur des jetées flottantes ou dispositifs similaires, pour conservation jusqu'à ce qu'ils soient transformés en « unités de plantation » (voir Cadre 8 pour la

morphologie générale). Il est important de s'assurer de la présence de fragments de rhizomes en croissance dans les unités de plantation individuelles car ils constituent une source de nouvelles pousses et de croissance horizontale, un moyen de coloniser de nouvelles zones. Pour le matériel végétatif, il est recommandé d'avoir au moins une pousse (avec un bout en croissance) par unité de plantation. Cependant, des avantages peuvent être tirés de la nature clonale de la plante si un plus grand nombre de pousses courtes par longueur de rhizome est préservé (par exemple, de préférence trois pousses par fragment de rhizome pour *Thalassia*). Les plants doivent être collectés et plantés le même jour, conservés dans une eau ayant la même température ambiante et la même salinité, maintenus aussi humides que possible lorsqu'ils sont hors de l'eau. Dans quelques cas, des herbes marines factices ont été implantées pour créer artificiellement des conditions temporairement plus stables, pour faciliter l'établissement et le rétablissement des greffons entre ces imitations.



Cadre 8. Représentation de la morphologie générale d'une herbe marine.



Cadre 9. Démonstration de la méthode de l'agrafe, montrant l'attache d'une pousse d'herbe marine à l'agrafe (à gauche) et l'insertion de l'agrafe dans le sédiment pendant la plantation.

Les herbiers doivent soit être plantés directement dans le sédiment (sous forme de brins), soit ancrés à l'aide d'une variété d'objets tels que tiges, chevilles, anneaux, clous, pierres, coquillages, barres d'armature, brochettes ou agrafes. Les agrafes métalliques en forme de U ou les crochets en fil métallique robuste (par exemple, le fil de clôture) sont les dispositifs d'ancrage les plus courants à ce jour, utilisés avec succès dans les programmes de plantation sans sédiments d'herbiers (Cadre 9). Les plants sont retenus par les agrafes, la partie du rhizome et des racines des fragments de plantes étant insérée sous le « pont » de l'agrafe, les plants fixés par un trombone métallique torsadé, recouvert de papier (pas de plastique). L'attache torsadée est fixée autour des plants, à la base, de sorte que les feuilles s'étendent sous l'agrafe jusqu'à la colonne d'eau lorsqu'ils sont plantés. Une petite bande de papier biodégradable est utilisée pour protéger les rhizomes du lien torsadé en enveloppant le groupe de plants avec le papier, puis en l'insérant dans le sédiment de façon à ce que les racines et les rhizomes soient enfouis. L'ameublissement du sédiment à l'aide d'un ustensile tel qu'un couteau de plongée facilite la mise en place des racines dans le sédiment. Il peut être important de tenir compte de l'orientation des plants et de l'angle des agrafes ou des crochets en fil de fer dans les environnements à haute énergie, afin que les plants ne soient pas déplacés par le courant dominant.

Une personne peut à l'avance disposer les unités de plantation à l'espacement souhaité, tandis qu'une deuxième personne la suit et les installe. L'étape consistant à attacher les plants aux agrafes peut être préparée à l'avance mais prend du temps. Dans les zones où l'énergie des vagues et la vitesse du courant sont faibles, des groupes de plants peuvent être agrafés au fond sans les attacher aux agrafes au préalable. Lorsque la flottabilité négative n'est pas nécessaire, les agrafes métalliques peuvent être remplacées par des brochettes de bambou (pliées en "V"). Les agrafes ou les crochets métalliques peuvent être récupérés une fois que les plantes se sont établies avec succès, puis réutilisés pour d'autres plantations (par exemple l'année suivante).

Les plants peuvent également être insérés dans un tissu ou natte à mailles biodégradable (par exemple, des sacs de toile de jute) qui est fixé à la surface du sédiment comme unité de plantation (Wear et al., 2010 ; Cadre 10). Cette méthode a été appliquée avec succès pour restaurer des herbiers marins dans des cicatrices d'amarrage en Australie occidentale et des prairies dégradées au Kenya (voir l'étude de cas 10).

Dans une technique récente, plus innovante, mise au point aux États-Unis, les plants ont été attachés (feuilles vers le haut, racines vers le bas), avec des ficelles de papier, au fond de systèmes déployés sur cadre (unités TERF : Transplanting Eelgrass Remotely with Frames System) qui



Cadre 10. Démonstration de tissage de pousses d'algues dans un matériau biodégradable en toile de jute.

peuvent être déployés à partir de petits bateaux dans des eaux plus profondes sans l'aide de plongeurs. Les cadres aident à protéger les plantations contre les perturbations biologiques et physiques et sont maintenus au fond par des briques ou des broches métalliques et marqués à la surface par des bouées (Cadre 11). Plus tard, les systèmes peuvent être retirés lorsque les plantes ont réussi à s'enraciner et que leurs liens en papier se sont décomposés.

On peut aussi placer des sacs en toile de jute remplis de sédiments en guise de "matelas" le long de la bordure des systèmes de prairie marine sains et laisser les prairies marines environnantes les coloniser naturellement. Une fois que les matelas ont une couverture uniforme et dense d'herbiers, ils peuvent être transférés sur un site de restauration. Des essais de cette méthode - bien qu'elle ne soit pas « sans sédiments » - pour déplacer *Halophila ovalis* et *Halodule uninervis* à Dubaï et à Abu Dhabi ont montré son potentiel.



Cadre 11. Démonstration d'une version adaptée de la méthode du cadre (testée avec succès au Kenya) pour laquelle les plants d'herbe marine sont fixés à un cadre métallique placé et retenu sur le fond marin pour restaurer les zones endommagées.

4.1.2 Méthodes herbier-et-sédiments

Méthodes herbier-et-sédiments

Avantages : d'application relativement facile, généralement moins coûteuse en main-d'œuvre (par unité de superficie) et résultant en un taux de survie plus élevé que celui des méthodes sans sédiments.

Inconvénients : le principal inconvénient de ces méthodes provient du défi logistique posé par le poids des mottes/bouchons. Ils peuvent être assez lourds à transporter (selon leur taille) sur de longues distances, en particulier avec des espèces à racines profondes ou lorsque le lit du donneur est éloigné du site de plantation.

Au sein de cette méthode, il existe différents extrêmes, en fonction du volume d'herbes marines à planter (Cadre 12). La technique de la motte ou du gazon représente la plantation des plus grands volumes, consistant à planter une pelletée d'herbes marines avec leur sédiment (y compris la faune benthique), rhizomes/racines

intacts. Les seuls équipements nécessaires sont des pelles et des (grands) bassins pour contenir les mottes. Cependant, si le site donneur est éloigné, le transport des mottes peut poser un problème logistique, car le poids du matériel peut constituer une charge physique. Les espèces à racines profondes, telles que *Enhalus acoroides* et *Thalassia hemprichii*, peuvent nécessiter l'enlèvement d'une énorme quantité de sédiments pour récolter les structures végétales souterraines intactes. En outre, la récolte d'un herbier entier peut constituer une perturbation importante dans le site donneur, ce qui peut empêcher son rétablissement.

La méthode du bouchon utilise des tubes comme dispositifs de carottage pour extraire les plantes avec les sédiments et les rhizomes intacts. Les tubes de carottage peuvent être faits d'un tuyau en plastique PVC de n'importe quel diamètre, avec des bouchons aux deux extrémités pour créer initialement un vide et empêcher les sédiments de s'écouler par le fond. Le tube est inséré dans le sédiment, bouché (ce qui crée un vide),



Cadre 12. Démonstration de la méthode « herbiers avec sédiments », montrant du gazon avec une pelle (à gauche) et deux tailles de bouchons avec des carottiers.



Cadre 13. Démonstration de la méthode des sacs de semences déployés par bouée (BuDs), montrant des unités individuelles de sacs avec bouée, remplis de pousses en fleurs et de spathe contenant des semences (à gauche) ainsi que leur déploiement sur un plateau intertidal (à droite).

retiré du sédiment et bouché à l'autre extrémité pour éviter de perdre le bouchon. Cette opération est relativement facile dans les sédiments mous mais cohésifs avec des espèces d'herbiers plus petites et à feuilles fines ; il devient plus difficile dans les substrats plus grossiers, avec des herbiers plus résistants (par exemple *Thalassodendron*), avec des systèmes de racines denses et des feuilles plus hautes et plus résistantes, où il faut prendre soin d'éviter un cisaillement excessif des feuilles. Lorsque le site donneur est éloigné du site de plantation, de nombreux tubes sont nécessaires, ce qui augmente le coût et la charge logistique (en raison du poids combiné).

Diverses modifications de ces méthodes ont été apportées par différents programmes de restauration, pour s'adapter aux conditions, échelles et objectifs spécifiques du site et du projet. On a essayé d'extruder des bouchons d'herbes marines de 10 x 10 cm (3 x 3 pouces) dans des pots de tourbe (transportés sur des plateaux flottants) pour faciliter leur transplantation, une méthode qui a montré un certain potentiel pour les espèces à feuilles courtes (en haute densité) telles qu'*Halodule*, *Halophila* et peut-être *Ruppia*, bien qu'il puisse y avoir quelques difficultés à faire sortir l'air emprisonné dans les pots de tourbe sous les bouchons et à déchirer les côtés des pots de tourbe une fois au fond (pour permettre la propagation des rhizomes). Au Qatar, dans le cadre d'un vaste programme de relocalisation d'herbiers près d'un grand port, des plateaux métalliques ont été utilisés pour récupérer des

mottes de 50 x 50 cm d'*Halodule uninervis* (récoltées par des plongeurs en apnée dans des herbiers sur des sédiments boueux fins) qui ont été transportées sur des barges flottantes bricolées (construites à partir de palettes et de vieux pneus de voiture) et tractées par un petit bateau entre le site donneur et le site de relocalisation, où ils étaient placés dans des dépressions de taille similaire dans le sédiment (faites avec les mêmes plateaux métalliques), un programme qui a connu un certain succès (bien que limité) (Whitehead, 2015).

4.1.3 Méthodes basées sur les semences

Méthodes basées sur les semences

Avantages : relativement facile, convient à des applications à grande échelle.

Inconvénients : dépendance de la disponibilité des graines (et du moment où elles le sont) ; pourcentage de survie généralement faible. Ce dernier point peut toutefois être facilement compensé par la distribution d'un (très) grand nombre de graines (selon la disponibilité).

Les techniques de restauration basées sur les semences sont très prometteuses pour la restauration à grande échelle de certaines espèces d'herbiers marins, en particulier dans les zones à faible énergie où les semences peuvent s'installer et germer et où les semis s'établissent avec succès sans être emportés par les eaux. La restauration à base de graines a été particulièrement

EC 5

Restauration de zostères dans la baie de Chesapeake, au moyen de plantes adultes et de graines.

Au cours des quatre dernières décennies, un programme de restauration à grande échelle de la zostère marine (*Zostera marina*) a été mis en œuvre dans la baie de Chesapeake et les baies côtières adjacentes de la péninsule de Delmarva (États-Unis) (Marion & Orth, 2010 ; Orth et al., 2010 ; Orth et al., 2012). La restauration a été lancée pour la première fois en 1978 à la suite de la disparition et de la dégradation généralisées des zostères dans la baie en raison de la détérioration de la qualité de l'eau. Des efforts importants ont été déployés pour améliorer la qualité de l'eau grâce à l'installation d'usines de traitement des eaux usées et à une meilleure gestion des bassins versants. Si les zostères se sont bien rétablies dans la baie de Chesapeake elle-même, il n'y a pas eu de rétablissement dans les baies côtières adjacentes.

Des techniques manuelles et mécanisées ont été utilisées pour restaurer les zostères dans un certain nombre d'endroits différents, en utilisant

soit des plantes adultes, soit des semences, soulignant l'importance du moment de la transplantation, des besoins en main-d'œuvre et du succès initial. La plupart des premiers travaux de transplantation ont été menés dans une variété d'endroits présentant des historiques de végétation et des caractéristiques de qualité de l'eau différents, ce qui a permis d'examiner les questions liées aux exigences en matière d'habitat.

La plantation de zostères en automne plutôt qu'au printemps s'est avérée optimale, offrant aux plantes une période de croissance initiale plus longue pour s'établir. Les techniques utilisant des plantes adultes (par exemple, des tapis de mailles avec des pousses à racines nues, des mottes et des carottes de zostères et de sédiments, des faisceaux de pousses à racines nues avec des ancrs, et des pousses à racines uniques sans ancrs) ont généralement été couronnées de succès, la méthode de plantation manuelle de pousses uniques étant à la fois couronnée de



Cadre 14. Méthode du sac de graines déployé par une bouée (y compris l'assemblage et le déploiement), l'une des méthodes utilisées pour restaurer les zostères dans la baie de Chesapeake (États-Unis).

succès et nécessitant le moins de temps. La plantation mécanisée à l'aide d'un bateau de plantation a eu un taux de survie initial des plantes plus faible, sans gain de temps significatif.

Les techniques utilisant des semences, telles que l'ensemencement manuel à partir d'un petit bateau, l'utilisation de sacs en toile de jute pour protéger les semences, et les sacs de semences déployés sur des bouées (planche 14) ont eu des degrés de réussite variables. Les semis les mieux établis ont été observés lorsque les semences étaient protégées par des sacs en toile de jute. Les principaux défis posés par les ensemencements sont principalement liés au faible taux de survie (généralement entre 5 et 10 % des graines)

et aux conditions de traitement et de stockage des semences qui affectent leur viabilité.

En dépit de certaines difficultés, la distribution de semences est l'une des techniques les moins exigeantes en main-d'œuvre utilisées à ce jour dans le cadre du programme et s'avère actuellement très efficace pour restaurer les zostères dans les baies côtières de Virginie (Planche 15). Au cours des 20 dernières années, plus de 72 millions de graines ont été disséminées sur 215 ha de baies côtières. Cette amélioration naturelle de ces milieux est simple, rapide et efficace. Les 215 ha de parcelles ensemencées se sont depuis étendus naturellement pour former ~3 640 ha de zostères dans l'ensemble des baies du bord de mer



Cadre 15. Récolte mécanique du stock de graines dans les zones donneuses, traitement des graines dans des cuves au laboratoire et manipulation des graines prêtes à être lancées, généralement à partir d'un petit bateau.

réussie avec la zostère (*Zostera marina*) dans la baie de Chesapeake (États-Unis) où environ 215 ha ont été restaurés avec des graines en utilisant une variété de techniques (Orth et al., 2012) (voir étude de cas 5). Les techniques basées sur l'ensemencement ont également été testées avec succès pour certaines autres espèces d'herbiers,

notamment *Posidonia* spp. en Méditerranée et en Australie (voir l'étude de cas 9) et *Ruppia* spp. aux États-Unis et en Australie du Sud (voir l'étude de cas 4).

La méthode de collecte et d'ensemencement manuels des graines d'herbiers semble être la

plus facile et la moins coûteuse. Le coût principal de cette méthode réside dans l'obtention et le stockage des graines. L'obtention des graines se fait par la collecte de pousses fertiles (contenant des graines) ou de fruits matures peu de temps avant qu'ils ne soient disponibles. Les pousses collectées sont ensuite maintenues en vie dans de grands réservoirs d'eau de mer pendant plusieurs semaines jusqu'à ce que la plupart des

graines aient été libérées (voir l'étude de cas 5). Les graines sont séparées des autres débris organiques par vannage et tamisage et stockées jusqu'à ce qu'elles soient requises pour un projet de restauration.

Une autre approche pour les espèces qui produisent des graines contenues dans les spathes des pousses en fleur (par exemple, *Zostera* spp.)

EC 6.

Déplacement de grandes mottes de zostères intertidales *Zostera noltii* à l'aide d'une excavatrice modifiée aux Pays-Bas.

La relocalisation de la zostère dans l'Escaut oriental, aux Pays-Bas, a impliqué l'utilisation d'une excavatrice modifiée sur les vasières intertidales le long des digues, pour racler de grandes mottes (~2 m²) de zostère naine (*Zostera noltii*) avec des sédiments vaseux (couche supérieure). Les mottes ont été stockées, transportées puis réinstallées dans des habitats comparables plus éloignés. La raison pour laquelle la végétation de zostères a été récoltée le long des digues était pour faire place à d'importantes rénovations des digues le long d'une partie particulièrement vulnérable de la côte, afin de faire face à l'élévation du niveau de la mer. Les mottes de zostères récoltées ont été déplacées vers huit sites bénéficiaires situés plus loin des digues (Planche 16). Au total, 2 600 m² de mottes de zostères ont été transplantés mécaniquement sur six plaines intertidales sur une période de cinq ans (2007-12).

Ce projet a eu des résultats prometteurs, avec des succès variant en fonction de l'emplacement, et un taux de survie global de 43 % des mottes transplantées après cinq ans, pour un coût total (y compris le suivi) d'environ 8,6 millions de dollars/ha (Suykerbuyk et al., 2016). Dans quatre des six zones intertidales, les plaques de zostères transplantées ont montré une faible survie et ont progressivement diminué en taille au fil du temps. Le faible succès sur ces sites peut être partiellement attribué aux conditions du site de l'habitat récepteur, notamment les schémas de dessiccation locaux, mais peut aussi être partiellement dû à une variabilité naturelle imprévisible, comme l'ont montré les chercheurs. Les deux autres sites ont présenté une colonisation extensive de la zostère autour des zones de transplantation (certaines années), qui survivent toujours et sont en bonne santé jusqu'à aujourd'hui (Suykerbuyk et al., 2016)



Cadre 16. Photographie de la méthode de relocalisation du gazon sur les sites intertidaux de l'Escaut oriental, montrant la technique modifiée de raclage à la pelle mécanique et le déplacement du transplant.

consiste à récolter de grandes quantités de pousses fertiles avant la libération des graines, ces dernières placées alors dans des filets à mailles (suspendus à des bouées) - également appelés sacs de semences déployés par des bouées (BuDs) - ancrés sur le site de restauration (Cadre 13). En permettant la libération naturelle des graines avec le temps, les graines mûrissent et tombent des filets sur le fond de la mer où elles germent. Bien que cette méthode puisse convenir aux projets de restauration communautaires dans les régions qui n'ont pas accès aux installations nécessaires pour séparer les graines des autres matières végétales, elle est plus coûteuse et plus longue en raison du grand nombre de bouées, de filets, de dispositifs d'ancrage et de bateaux nécessaires.

Quelle que soit la méthode utilisée pour la collecte et la diffusion des graines, le pourcentage de graines diffusées qui survivent et s'établissent en tant que plantules est généralement faible (<10 %) et parfois très faible (1-2 %). Cependant, dans les zones où la collecte des graines pendant la saison de reproduction demande peu d'efforts (pour les espèces d'herbes qui fleurissent et fructifient en masse, comme *Zostera spp.*), il est assez facile de diffuser un très grand nombre de graines pour compenser ce faible taux de survie. Pour les espèces de zostères plus petites, pour obtenir quelques centaines de plantules par m², il faut généralement répandre plusieurs milliers de graines par m². Il a rarement été démontré que l'impact de la récolte de telles quantités de graines sur les herbiers donneurs était significatif. Pour améliorer le succès de la germination des graines et de l'établissement des plantules sur les plaines intertidales dynamiques, des dispositifs innovants d'injection de graines ont été développés pour être utilisés dans un programme de restauration de la zostère en Hollande, dans la mer de Wadden (Van der Eijk, 2017).

Un inconvénient des approches basées sur les graines est leur dépendance de la disponibilité des graines qui peut être faible ou mal connue. C'est potentiellement un problème dans certaines parties de la région de l'OIO où le moment,

l'intensité et la fréquence de la floraison et de la production de graines pour la plupart des espèces d'herbiers sont encore largement inconnus.

4.2 Transplantation mécanique

Méthodes mécaniques

Avantages : potentiellement adaptées à une application à grande échelle.

Inconvénients : coûts d'investissement initiaux élevés, exigences en matière de fonctionnement et de maintenance (haute technologie), pas toujours rentables.

Dans le but d'intensifier les efforts de restauration et de réduire les coûts à l'hectare, un certain nombre de méthodes mécaniques ont été développées, faisant appel à des équipements lourds ou à des machines pour la collecte de matériel végétal et de graines ou pour l'élimination des déchets. Les techniques utilisant des graines, telles que l'épandage manuel à partir d'un petit bateau, l'utilisation de sacs de toile de jute pour protéger les graines ainsi que les sacs de graines déployés par une bouée ou BuDs (Cadre 14) ont eu des degrés de réussite variables. Le taux d'établissement des semis le plus élevé a été observé lorsque les semences étaient protégées par des sacs de toile de jute. Les principaux défis liés aux semences concernent principalement leur faible taux de survie (généralement entre 5 et 10 %) et les conditions de traitement et de stockage des semences qui affectent leur viabilité.

En dépit de ses propres difficultés, la dissémination des graines est, en main-d'œuvre utilisée à ce jour dans le cadre du programme, une des techniques les moins coûteuses, se révélant actuellement très efficace pour restaurer les zostères dans les baies côtières de Virginie (Cadre 15). Au cours des 20 dernières années, plus de 72 millions de graines ont été répandues dans 215 ha de baies côtières. Cette valorisation naturelle de ces milieux est simple, rapide et efficace. Les 215 ha de parcellesensemencées se sont depuis étendus naturellement à ~3 640 ha de zostères dans l'ensemble des baies du bord de mer.

Parmi ces exemples, on peut citer une moissonneuse mécanique modifiée, fonctionnant derrière un bateau et utilisée pour récolter des pousses de zostères reproductrices pour la collecte de semences dans la baie de Chesapeake, aux États-Unis (Marion et Orth, 2010), un dispositif de houe arrière modifiée, pour récupérer et déplacer des mottes de *Zostera noltii* intertidales dans l'Escaut Occidental néerlandais (Suykerbuyk et al, 2016) (voir l'étude de cas 6) ainsi qu'un dispositif mécanique sous-marin, (« Ecosub »), utilisé pour couper et planter des mottes de *Posidonia spp.* et d'*Amphibolis spp.*, sur des sites profonds de la côte, à forte énergie de vagues, près de Cockburn Sound, en Australie occidentale (Paling et al., 2001).

Deux autres exemples : l'utilisation d'un « Giga extracteur de mottes, utilisé pour sauver et relocaliser des mottes d'herbes marines tropicales de la baie de Tampa en Floride, aux États-Unis (Swingle, 2003 ; voir l'étude de cas 3) et la méthode « Pli-sûr » avec une machine à transplanter (modèle Optimal 880) modifiée pour être utilisée en mer et équipée d'une excavatrice à très long bras actionnée à partir d'une barge qui a été utilisée pour la relocalisation mécanique de mottes de *Posidonia oceanica* à Monaco (Descamp et al., 2017). En raison des coûts d'investissement

élevés et de certains défis opérationnels du projet, la pertinence de ces méthodes de restauration mécanique des herbiers pour une application dans la région de l'OIO est discutable.

Différentes méthodes de restauration peuvent être plus ou moins adaptées à différentes espèces d'herbiers, en fonction de leur morphologie et de leur stratégie d'histoire de vie (Tableau 1), bien que l'adéquation et l'efficacité de la plupart de ces méthodes de restauration aient été démontrée, elles n'ont pas encore été testées pour la plupart des espèces dans la région de l'OIO à ce jour.

Comme on peut le voir au tableau 1, pour plusieurs espèces de l'OIO, il n'y a pas beaucoup de connaissances sur leur réponse aux différentes techniques de restauration, et celles-ci représentent des domaines de recherche appropriés pour l'avenir. Cependant, on peut voir que la restauration de l'espèce intertidale commune *Thalassia* s'est avérée prometteuse en utilisant la technique passive (comme pour plusieurs autres espèces), avec l'utilisation de brindilles et de semis. Les techniques basées sur les semences ont bien fonctionné et ont montré des résultats prometteurs pour *Ruppia* et *Zostera*.

Tableau 1. Adéquation des différentes méthodes de restauration des herbiers marins par espèce. [Légende : les coches (✓) indiquent qu'une méthode a été testée sur une espèce (ou son espèce sœur) ; les points d'interrogation (?) indiquent qu'une méthode n'a pas encore été testée mais qu'elle est potentiellement adaptée à cette espèce. Les ombres indiquent qu'une méthode s'est révélée particulièrement adaptée (vert) ou inadaptée (rouge) lorsqu'elle a été testée pour une espèce].

	<i>Thalassia hemprichii</i>	<i>Thalassodendron ciliatum</i>	<i>Enhalus acoroides</i>	<i>Cymodocea rotundata</i>	<i>Cymodocea serrulata</i>	<i>Syringodium isoetifolium</i>	<i>Halodule uninervis</i>	<i>Halophila ovalis</i>	<i>Halophila minor</i>	<i>Halophila stipulacea</i>	<i>Zostera capensis</i>	<i>Ruppia maritima</i>
	T.h.	T.c.	E.a.	C.r.	C.s.	S.i.	H.u.	H.o.	H.m.	H.s.	Z.c.	R.m.
Restauration passive :												
Suppression des menaces (ancres, pêche, etc.)	✓	?	?	?	?	?	✓	✓	?	?	✓	✓
Méthodes sans sédiments (4.1.1)												
Brins plantés (méthode des brins fonctionnels)	?		✓	?	?	✓	✓	✓		?	✓	?
Brins ancrés (méthode des agrafes)	✓		✓	?	✓	?	✓	?		?	✓	?
Brins sur nattes ou cadres (TERFs)	✓			?	?	?	?	✓		?	✓	?
Méthodes avec sédiments (4.1.2)												
Motte ou gazon (par carottage)	?	?		?	?	✓	✓	✓	?	?	✓	✓
Carottage à la pelle	✓	?		?	?	✓	✓	?	?	?	?	?
Carottage par plateaux							✓	?	?	?	?	?
Bouchons en pots de tourbe							✓	✓	?	?	✓	?
Méthodes basées sur les semences (4.1.3)												
Collecte et d'ensemencement manuels	?		?					?			✓	?
Pousses fertiles en sacs (méthode BUDs)						?	?				✓	?
Semences en sacs avec sédiment								?	?	?		✓
Semis :												
Recueillis sur le fucus de la plage ou élevés en laboratoire.	✓	?	✓	✓	✓	?	?	✓		?	?	?
Méthodes mécaniques (4.2)												
Récolte mécanique de grains ou des mottes											✓	
Restauration passive :												
Suppression des menaces (ancres, pêche, etc.)	✓	?	?	?	?	?	✓	✓	?	?		
Méthodes sans sédiments :												
Brins plantés (méthode des pousses)	?		✓	?	?	✓	✓	✓		?		
Brins ancrés (méthode des agrafes)	✓		✓	?	✓	?	✓	?		?		

* essayé sur *Posidonia coriacea* et *Amphibolis* spp. en Australie sans résultats concluants

5. Identification du site de restauration

Le choix inapproprié d'un site est de loin la principale cause d'échec des projets de restauration des herbiers marins dans le monde. S'il n'y a pas d'herbiers (ou seulement des herbiers clairsemés) sur un site de restauration proposé, il est légitime de se demander : pourquoi ? Le simple fait de transplanter des herbiers sur de tels sites (quelle que soit la méthode utilisée) ou même d'essayer d'utiliser des graines ne suffira pas, en soi, à garantir la réussite de l'établissement d'un nouvel herbier tant que les facteurs de stress initiaux subsisteront. Comme nous l'avons souligné plus haut, il peut s'agir de la mauvaise qualité de l'eau, d'une bioturbation excessive, du broutage intensif des oursins, de la pêche à la senne de plage, de la circulation des bateaux, des vagues ou des courants forts. Les facteurs de stress doivent être clairement identifiés et éliminés ou du moins réduits (étude de cas 7), ce qui peut être coûteux. Cependant, si l'on ne s'attaque pas aux facteurs de stress, la restauration des herbiers a peu de chances de produire des résultats significatifs sur ces sites.

Les aspects importants à prendre en compte lors de la sélection de sites appropriés pour la restauration des herbiers comprennent :

- l'adéquation de l'habitat (conditions environnementales propices à la croissance de l'herbier) ;
- le niveau de perturbation (humaine) (provenant d'activités et/ou de développements qui peuvent affecter la santé et la survie des herbiers) ;
- l'expérience antérieure (succès sur des sites similaires) ;
- les conseils de spécialistes de la région (personnes connaissant bien la région) ;
- les considérations pratiques (par exemple, l'accès, la perturbation, ainsi que les considérations logistiques, institutionnelles et juridiques) ;
- la proximité de prairies sous-marines existantes ;
- les preuves de la présence historique d'herbiers sur le site, observations récentes

de colonisation d'herbiers dans ou à proximité de la zone ;

- la présence d'autres habitats à proximité, connus pour la stabilité et faciliter la croissance (par exemple, récifs, mangroves, bancs d'huîtres) et qui contribueraient à la réussite de la restauration des herbiers à long terme.

L'adéquation de l'habitat pour les herbiers marins est largement déterminée par les limites de tolérance de chaque espèce de phanérogames marines aux variations environnementales, telles que :

- la température de l'eau ;
- la salinité ;
- la disponibilité de la lumière (fonction de la profondeur de l'eau et de la turbidité) ;
- la vitesse d'écoulement ;
- l'exposition aux vagues ;
- l'exposition à marée basse (dessiccation) ;
- les conditions du substrat (composition et stabilité).

Cela peut nécessiter l'avis d'un spécialiste sur la base d'un examen de la littérature spécifique et d'une évaluation in situ et/ou d'une modélisation des conditions environnementales. Cependant, la plupart des espèces de phanérogames marines se développeront probablement bien dans des eaux subtidales relativement peu profondes de salinité « normale » (~30-35 ppt), de faible turbidité, de lumière adéquate (~15-20 % de l'irradiance de surface), de sédiments stables, ou dans des zones non polluées, à l'abri d'une énergie excessive des vagues ou de conditions d'écoulement extrêmes.

Il est déconseillé de planter des herbiers dans des zones où il n'y a pas d'historique de croissance d'herbiers ou dans des zones où les causes sous-jacentes de la dégradation et de la disparition des herbiers n'ont pas été clarifiées. De même, la probabilité de réussite sera faible dans les zones où la disparition des herbiers a provoqué une rétroaction négative « irréversible », aboutissant à un autre état stable (Suykerbuyk et al., 2016). Les sites de restauration des herbiers doivent

EC 7.

Essai communautaire de restauration d'herbiers marins à Beravy, Toliara (Madagascar).

Cette restauration des herbiers marins a été initiée en février 2019 par Reef Doctor, une ONG basée à Ifaty, au sud-ouest de Madagascar. Elle s'inscrit dans le cadre d'un projet de la communauté locale de Beravy en partenariat avec Vezo Miaro (association de jeunes pêcheurs). Les herbiers marins de Beravy sont en déclin, principalement en raison du ruissellement des sédiments provenant de la terre, qui a étouffé les herbiers. Le transport des sédiments de la terre vers la côte a été causé par la déforestation des mangroves voisines et les activités agricoles sur les terres adjacentes, des utilisations qui sont également abordées dans le cadre du projet. L'objectif final est de restaurer les zones d'herbes marines dégradées par la sédimentation afin de contribuer à la durabilité à long terme des écosystèmes côtiers et de soutenir le développement communautaire dans la baie de Ranobe.

Chaque mois, 1 200 mottes (30 x 30 cm) d'herbes marines sont transplantées dans des zones en-

dommagées et dégradées de la zone de marée de la baie (Planche 17), excavées à la bêche à partir d'une zone d'herbier sain de *Cymodocea serrulata*, *Cymodocea rotundata* et *Halodule uninervis* située à proximité. Au 31 mai 2019, des herbiers ont été transplantés sur deux sites d'une superficie totale combinée de 0,2 ha. L'objectif final est la transplantation de 36 000 mottes d'herbes marines (Reef Doctor, 2019).

La survie des parcelles d'herbes marines transplantées est surveillée afin d'évaluer le succès de la méthodologie. Le pourcentage de couverture des parcelles sélectionnées est mesuré tous les trois mois, ainsi que le taux de survie global de tous les transplants. Les premiers résultats sont encourageants (Reef Doctor, 2019). L'évaluation de ces résultats de suivi régulier permet d'adapter l'approche et la méthodologie de restauration en continu et d'établir une méthode de transplantation optimale.



Cadre 17. Photographie du projet de restauration d'herbiers en cours à Beravy, Toliara (Madagascar), utilisant des bêches pour l'excavation de mottes d'herbes marines pour la transplantation dans les zones dégradées.

avoir des profondeurs similaires à celles des prairies saines voisines et ne pas être soumis à des dommages chroniques dus aux tempêtes. Les sites qui subissent une recolonisation naturelle rapide et étendue par les herbiers ne doivent pas être sélectionnés pour la restauration.

La restauration des herbiers est parfois exigée à titre de compensation pour les dommages causés, par exemple par le creusement de tranchées pour les oléoducs ou l'expansion des ports. D'autres sites sont parfois envisagés pour la restauration, notamment les dommages causés aux herbiers par les activités nautiques, liées aux hélices, à l'ancrage et l'échouement des bateaux.

Les zones de plantation pour l'atténuation compensatoire peuvent être classées comme étant sur site ou hors site. Les plantations sur site sont effectuées dans la zone de perturbation des sites touchés, tandis que les plantations hors site sont effectuées à une certaine distance des sites touchés. Il y a généralement peu (voire pas...) d'emplacements hors site disponibles (à moins qu'ils ne soient nouvellement conçus dans le cadre d'une conception intégrée pour un développement) pouvant soutenir la croissance des herbiers ou impliquer une substitution d'habitat, c'est-à-dire le remplacement d'un type d'habitat (existant) par un autre (c'est-à-dire des herbiers).

5.1 Check-list de critères de choix de site

Voici une liste des paramètres minimaux à prendre en compte pour vérifier qu'un site potentiel est un candidat à la restauration et qu'un site donneur est un site approprié sur lequel on peut prélever du matériel (plantes avec racines et/ou graines).

Sites de restauration :

- Distribution historique des herbiers (photographies aériennes, cartes, ensembles de données, littérature).
- Distribution actuelle des herbiers (cartographie, travail sur le terrain, preuves de perte/déclin/cicatrices/dommages).
- Proximité des herbiers naturels (sites donneurs ou source de recrutement naturel).

- La cause du déclin des herbiers a-t-elle été inversée ?
- La restauration d'herbier a-t-elle déjà été couronnée de succès sur des sites similaires (pilotes) ?
- Composition/épaisseur du substrat/sédiment (adaptée aux herbiers ?)
- Instabilité des sédiments (érosion ou enfouissement importants qui pourraient entraver la restauration)
- Bioturbation (des niveaux élevés de bioturbation pourraient entraver le succès de la restauration)
- Profondeur de l'eau et caractéristiques des marées (similaires aux herbiers naturels voisins)
- Disponibilité de la lumière (répondant aux exigences minimales en matière de lumière)
- Qualité de l'eau (turbidité, nutriments, matière organique, polluants, charges de phytoplancton et d'épiphytes)
- Salinité et température (dans les limites de tolérance des espèces cibles)
- Exposition aux vagues/tempêtes (ne dépassant pas les limites de tolérance des herbiers)
- élévation de la marée (risque de dessiccation pendant l'exposition à marée basse)
- Questions juridiques (autorisations)
- Contraintes imposées par des structures, des canaux creusés ou des activités humaines
- Il faut éviter de restaurer des sites où la probabilité d'un rétablissement naturel est élevée (par exemple, présence d'une banque de semences viable, nombre élevé de semis, expansion importante des rhizomes à partir de zones d'herbiers adjacentes).

Sites donneurs :

- Assez étendus (pour une récolte suffisante de matériel végétal ou de graines)
- En bon état de santé (pour offrir du matériel de haute qualité/des graines viables)
- Situés dans la même zone biogéographique
- proches (pour minimiser les coûts de transport et les contraintes logistiques).

Des programmes de système d'information géographique (SIG) relativement simples peuvent faciliter le choix du site en fournissant une vue générale de la zone considérée, sur laquelle de nombreux ensembles de données et autres informations peuvent être présentés. Les cartes qui en résultent peuvent également être utilisées pour des présentations aux communautés et aux parties prenantes, pour informer sur le processus, la façon et les raisons pour lesquelles les sites ont été sélectionnés ou non. Trois catégories de cartographie souvent développées grâce au SIG sont les suivantes :

- **Cartographie d'exclusion** : cartographie des zones qui ne sont pas appropriées, inaccessibles, où le développement est compromis, présentant des conflits d'utilisation potentiels ou actuellement déjà couvertes par des prairies sous-marines ou d'autres écosystèmes précieux ;
- **Cartographie d'adéquation** : cartographie générée par un modèle d'adéquation de l'habitat aux herbiers marins, en fonction

des conditions environnementales telles que la disponibilité de la lumière, la profondeur, le type de substrat, la qualité de l'eau, la vitesse du courant, l'exposition aux vagues, la salinité et la température ; et,

- **Cartographie logistique** : considérations pratiques, telles que l'accès routier, la proximité d'une jetée ou d'une marina, les distances à parcourir, la proximité entre le site donneur et le site de restauration, la nécessité d'utiliser un scaphandre autonome ou un bateau, etc.)

Quelques études suggèrent que l'ajout de nutriments dans les sédiments (engrais à libération lente) peut parfois aider à stimuler une croissance saine des herbiers transplantés (par exemple, dans des environnements de limon carbonaté à grain fin aux Caraïbes et en Floride). L'ajout d'engrais n'a montré aucun effet bénéfique dans la plupart des autres études réalisées dans le monde.

6. Principes de bonne pratique – Un protocole de restauration

6.1 Principes directeurs de planification de la restauration

Les six principes suivants sont apparus au cours des dernières décennies de pratique de restauration des herbiers marins à travers le monde, comme des considérations essentielles pour guider toute approche réussie de restauration d'herbiers marins (voir Treat et Lewis, 2006 ; Van Katwijk et al., 2016) :

- **Approche à grande échelle** : de nombreux projets de restauration d'herbiers marins ont échoué dans le passé parce que leur échelle spatiale était restreinte. L'un des problèmes de l'approche à petite échelle est que les parcelles d'herbes marines (re)plantées sont trop petites pour se maintenir naturellement dans le temps. Les recherches suggèrent que des parcelles d'herbiers restaurées d'un hectare ou plus sont mieux à même de résister aux conditions défavorables, de surmonter les rétroactions écologiques négatives et de survivre sur des échelles de temps plus longues que des parcelles plus petites ou des groupes de petites parcelles (Van Katwijk et al., 2016 ; Paolo et al., 2019). Cela semble, au moins en partie, être dû à l'auto-facilitation par la stabilisation du substrat et l'auto-ensemencement. En clair : pour une restauration réussie, il est préférable de penser à l'échelle d'hectares plutôt qu'en mètres carrés.
- **Travailler avec la nature** : contrairement à la petite échelle où l'effort humain - par le biais d'approches de « jardinage » - est capable de restaurer les prairies sous-marines, le processus naturel est plus efficace à des échelles beaucoup plus étendues, par le biais de la régénération naturelle, dans des délais relativement courts. Pour cela, deux conditions doivent être remplies : 1) les paramètres environnementaux doivent correspondre (à nouveau) aux exigences écologiques de l'espèce et 2) le recrutement naturel - à partir d'une banque de semences durable, par la dispersion des semences ou par l'apport de semis viables ou de fragments de plantes provenant de zones d'herbiers voisines non touchées) - doit être suffisant pour permettre la recolonisation (voir l'étude de cas 8). Les approches de restauration gagneraient à tirer parti de ce service « gratuit » que fournit la nature, concentrant leurs principaux efforts plutôt sur la restauration des conditions environnementales et de recrutement, puis en laissant « mère nature » et « père temps » faire le reste (c'est-à-dire « travailler avec la nature »).
- **Choix du site** : le choix inapproprié du site est de loin la cause la plus importante d'échec des projets de restauration des herbiers marins dans le monde. Les principaux aspects à prendre en compte sont les suivants :
 - l'adéquation des conditions environnementales (répondant aux exigences d'une croissance saine de l'herbier, notamment les effets de l'émersion et de la dessiccation, la limitation ou la surcharge en nutriments, les exigences en matière de lumière et la turbidité du site, les courants, l'exposition aux vagues, les tolérances en matière de salinité et de température ainsi que la stabilité du substrat).
 - le niveau de perturbation ou d'aménagement qui peut affecter la survie des herbiers marins
 - conseils des spécialistes de la région
 - considérations logistiques (accès au site, distances)
 - la présence à proximité de prairies sous-marines existantes
 - preuves de la présence historique d'herbiers marins
 - observations récentes de colonisation d'herbiers à proximité.

Les sites donneurs sur lesquels on récolte du matériel végétal ou des graines doivent être suffisamment étendus, en bonne santé et situés dans la même région biogéographique, de préférence à proximité immédiate pour minimiser les coûts de transport et les contraintes logistiques.

- **Répartition des risques** : pour maximiser les chances de succès de la restauration, il est souvent nécessaire de répartir le risque - de faible survie ou de perte de transplants - en étalant les efforts de restauration dans l'espace et dans le temps. La perte de semis, de transplants et de graines est susceptible d'être plus élevée dans les sites dynamiques qui sont exposés à de forts courants, à des vagues ou à des flux de marée, ou qui subissent une bioturbation excessive. Il peut toutefois s'agir de zones importantes à révégetaliser, si l'objectif du projet est d'améliorer la stabilité des sédiments. La mortalité et la perte des semis et des transplants peuvent également se produire en raison des tempêtes, de la dessiccation (intertidale) et des fluctuations saisonnières de la salinité et de la température. Ainsi, le moment de la plantation est également important par rapport aux saisons et aux marées. L'origine du matériel donneur peut également contribuer à la variabilité du succès. D'autres facteurs (non-identifiés) et la complexité des processus impliqués peuvent également contribuer à l'imprévisibilité du succès de la transplantation des herbiers. L'effet de tous ces facteurs peut être réduit en répartissant et en reproduisant le calendrier et l'emplacement des activités de restauration sur différents sites et à différents moments ainsi qu'en utilisant du matériel source provenant de différents sites donneurs (ce qui contribue également à maintenir la diversité génétique et la résilience). En d'autres termes, pour minimiser les risques d'échec, il est préférable de ne pas rassembler et planter tout le matériel en une seule fois et à un seul endroit mais de varier et de répéter les activités de restauration

dans l'espace et dans le temps. Une autre façon de répartir les risques consiste à utiliser plusieurs espèces de phanérogames dans la restauration plutôt qu'une seule (à condition que toutes les espèces sélectionnées soient adaptées au niveau de la marée), en particulier dans les régions à forte diversité biologique. Lors d'une récente expérience de restauration d'herbiers à Sulawesi (Indonésie), la survie et la couverture des transplants sur les sites de restauration ont augmenté avec le nombre d'espèces transplantées (Williams et al., 2017), obtenant de meilleurs résultats en transplantant plusieurs espèces ensemble plutôt qu'une seule espèce cible.

- **Maintenir les coûts (par unité de surface) à un niveau bas** : il est d'une importance cruciale pour le succès de la réimplantation que les moyens financiers qui sont disponibles pour la restauration des ressources environnementales marines sensibles (en particulier dans la région de l'OIO) soient utilisés de manière aussi efficace et efficiente que possible (Treat & Lewis, 2006). Il existe un scepticisme général et une perception mondiale que les projets de restauration des écosystèmes sont coûteux et n'ont souvent qu'un succès minimal. Afin d'obtenir un retour sur investissement aussi élevé que possible (en termes de travail et de coûts), il est donc d'une importance capitale de maintenir les coûts de chaque étape du processus de restauration aussi bas que possible, sur le plan pratique et technique. Cela permettra d'obtenir le meilleur résultat possible en matière de restauration (en termes d'hectares). Cependant, avant tout projet de restauration une étude de faisabilité complète et une sélection approfondie du site restent essentielles pour augmenter leur taux de réussite. Dans la mesure du possible, une collaboration étroite avec les programmes de recherche et de surveillance existants peut aider à réduire les coûts globaux des investigations auxiliaires.

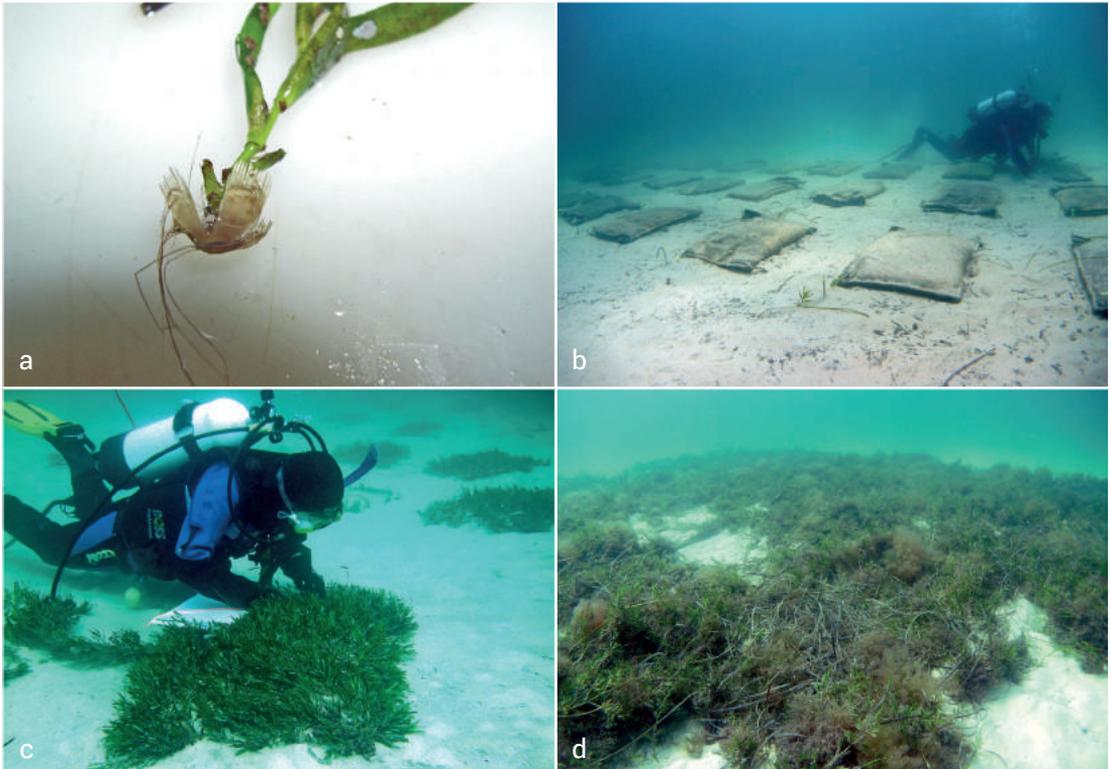
EC 8.

Facilitation du recrutement de semis d'*Amphibolis* avec des substrats artificiels.

Les eaux côtières au large d'Adélaïde (Australie-Méridionale) ont connu une perte significative supérieure à 6 000 ha d'herbiers marins depuis 1949, principalement en raison de la prolifération d'algues épiphytes résultant de l'apport de nutriments et de la turbidité d'origine anthropique. Malgré l'amélioration notable de la qualité de l'eau depuis la fin des années 1990, la régénération naturelle des herbiers (en particulier d'*Amphibolis antarctica*) a été faible, l'importance des mouvements de sable entravant la réussite de l'établissement des semis. Les premiers efforts de restauration se sont concentrés sur l'adaptation de techniques utilisées ailleurs, telles que la transplantation de pousses, de brins et de semis élevés en laboratoire, mais le succès et l'ampleur de ces efforts ont été limités. Au cours de ces premières études, un tapis de toile de jute a été utilisé autour des plants transplantés pour stabiliser les sédiments. Bien que cet objectif n'ait pas été atteint, il a été observé que les plantules de l'herbier *A. antarctica*, qui possèdent un "grappin" miniature à leur base, se sont naturellement enchevêtrées dans la toile de jute, ce qui a facilité leur établissement,

facilitant ainsi leur établissement. À la suite de cette observation, une série de techniques ont été testées en utilisant de la toile de jute et d'autres matériaux pour enchevêtrer les plants d'*A. antarctica* et leur permettre de s'établir. Des sacs de toile de jute standard remplis de sable ont finalement été choisis pour les travaux ultérieurs. Ces sacs peuvent simplement être déposés depuis un bateau et ne nécessitent aucune manipulation supplémentaire de la part des plongeurs (planche 18).

La période de mai à août s'est avérée être la meilleure période pour le déploiement des sacs afin de coïncider avec la dispersion naturelle des semis et de maximiser le succès du recrutement. Les caractéristiques structurelles d'*A. antarctica* (densité et longueur des tiges) étaient similaires à celles des prairies naturelles cinq ans après le déploiement des sacs. Les premiers déploiements ont commencé à se regrouper en parcelles plus grandes en 2013 et ont maintenant formé plusieurs parcelles plus grandes où les emplacements des sacs individuels ne peuvent plus être distingués (Tanner et al. 2014).



Cadre 18. Approche de facilitation du recrutement d'*Amphibolis antarctica* montrant : a) une plantule d'*Amphibolis* avec gros plan du grappin pour faciliter l'ancrage ; b) des sacs de sable récemment déployés et disposés pour le suivi ; c) un déploiement vieux de six mois, couvert de semis d'*Amphibolis* ; d) une parcelle restaurée d'*Amphibolis* montrant la coalescence de ~40 sacs.

EC 9.

« **Seeds for snapper / Des graines pour les vivaneaux** » : collecte, traitement et diffusion de graines de *Posidonia australis*.

Cockburn Sound est une baie naturelle d'environ 16 km de long et 7 km de large, au sud-ouest de Perth, en Australie occidentale.

Cockburn Sound a connu un déclin de 77% de la couverture de *Posidonia australis* (~2 000 ha) depuis 1967, en grande partie à cause des effets de l'eutrophisation, du développement industriel et de l'extraction de sable. Dans de petites zones localisées, le recrutement naturel a réussi, mais de nombreuses autres parties n'ont pas été en mesure de recruter et de se reconstituer naturellement. Un certain nombre de techniques ont été testées pour tenter de mettre au point des méthodes efficaces et rentables de régénération des herbiers sous-marins, notamment la transplantation de grandes mottes de terre, de carottes, de brins de transplantation et de semis. Toutefois, le coût et la main-d'œuvre sont des facteurs qui entravent l'application de bon nombre

de ces méthodes à grande échelle, tandis que la disponibilité du matériel végétal et l'impact sur les prairies existantes se sont révélés prohibitifs pour d'autres.

De nombreuses espèces de phanérogames marines produisent des graines en abondance (100 à 10 000 m⁻²) qui constituent une source importante d'unités de plantation qui, à l'instar de la collecte de semences en milieu terrestre et contrairement au matériel clonal, peuvent être obtenues sans impact négatif direct sur la végétation donneuse. L'objectif global de cette étude pilote était de mettre au point un processus de collecte, de traitement et de livraison à distance sur le plancher océanique à grande échelle pour la restauration de *P. australis*, une espèce dont les graines ne sont pas dormantes et se développent directement (planche 19).



Cadre 19. a) Fruits mûrs de *Posidonia australis* avant la collecte ; b) fruits récoltés dans une glacière de 100 litres pour le transport au laboratoire ; c) traitement de fruits après la collecte ; d) après traitement, les graines sont propres et prêtes à être livrées aux sites de terrain ; e) graines dispersées à la surface des sédiments (200 graines m⁻²) ; f) gros plan de graines stabilisées sur le fond marin ; g) plantules établies d'un an ; h) plantules établies en haute densité ; i) plantule de deux ans avec des pousses multiples.

Pour atteindre cet objectif, les actions suivantes, plus spécifiques à cette espèce, ont été poursuivies en développant des technologies permettant de : (1) collecter les fruits à maturité dans les herbiers sources (donneurs) à l'aide de filets spécialement conçus à cet effet, (2) traiter les fruits collectés pour obtenir des graines pures dans des réservoirs de stockage à température contrôlée en les agitant par aération pour obtenir de grandes quantités de graines qui se déposent au fond du réservoir de stockage, et (3) tester des approches permettant d'acheminer efficacement les graines vers le site de restauration, notamment : (a) l'ensemencement de précision assisté par des plongeurs en dispersant les graines près du fond marin, et (b) l'ensemencement à distance et à la volée à partir d'un bateau. L'un des principaux avantages de la méthode d'ensemencement à la volée, par opposition à la transplantation de brins et de pousses, est que les graines ont une flottabilité négative et se déposent naturellement sur le fond marin. Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer des opérations de plongée coûteuses et exigeantes en main-d'œuvre, en particulier pour les sites plus profonds ou lorsque la visibilité de l'eau est faible.

Les projets pilotes ont donné de bons résultats (Statton et al., 2017). *Posidonia australis* a été reproduite par semis à des densités de 200 graines m² dans

trois parcelles de 25 m² à quatre endroits dans le détroit de Cockburn. Le succès de l'établissement des semis a varié de 1 % (deux semis m²) à 10 % (20 semis m²) après deux ans. Au bout de 18 mois, les semis ont commencé à produire de nouvelles pousses, et au bout de 24 mois, les semis établis comptaient trois à cinq pousses et avaient commencé à s'étendre horizontalement sur le fond marin. Ce succès initial est maintenant transposé à plus grande échelle dans le cadre d'une approche communautaire innovante, en faisant appel à l'aide et à la participation des pêcheurs récréatifs locaux dans un programme appelé "Seeds for Snapper" (<https://ozfish.org.au/seeds-for-snapper/>). Dans le cadre de ce programme, 40 à 50 pêcheurs amateurs locaux se sont portés volontaires pour relâcher un million de graines d'herbes marines (collectées et fournies par les scientifiques) dans la mer, dans un effort massif pour restaurer les prairies d'herbes marines perdues de Cockburn Sound. Cela permettra d'augmenter l'échelle de l'ensemencement et la capacité à restaurer des endroits difficiles d'accès (profonds, turbides, turbulents ou restreints aux plongeurs), tout en aidant à identifier et à surmonter les facteurs environnementaux critiques qui limitent l'établissement des semis. Les évaluations préliminaires montrent que le succès de l'établissement est d'environ 14-38 semis m², équivalent à 7-19 % (Statton et al., 2017).

- **Minimiser les impacts sur les sites donneurs et éviter l'introduction d'espèces** : si l'approche de la restauration des herbiers implique l'utilisation de matériel provenant de sites donneurs éloignés, il est essentiel de prendre en compte les impacts de la récolte du matériel (qu'il s'agisse de graines, de plantes ou de mottes) sur ces sites donneurs et d'éviter l'introduction involontaire d'espèces exotiques ou envahissantes (plantes et animaux) sur le site de restauration.

6.2 Autres considérations pratiques

- **Choix des espèces et du matériel donneur** : la considération évidente serait intuitivement de planter les mêmes espèces (ou mélange d'espèces) que celles perdues sur le site, ce qui s'applique à la plupart des projets de restauration. Cependant, il peut parfois être préférable de planter une espèce différente, si les conditions du site ont évolué vers un autre état. Une espèce différente (par exemple une espèce pionnière ou un opportuniste) peut alors être mieux adaptée aux nouvelles conditions que

l'espèce qui dominait initialement le site. Le matériel donneur devrait idéalement provenir de la même zone ou région biogéographique. L'utilisation de matériel provenant de plusieurs sites donneurs est parfois envisagée pour améliorer et/ou préserver la diversité génétique. En tout état de cause, le matériel végétal doit toujours être manipulé avec une extrême prudence et maintenu humide à tout moment, car la plupart des phanérogames marines ont une très faible résistance à la dessiccation.

Posidonia australis a été semée à des densités de 200 graines m² dans trois parcelles répétées de 25 m² à quatre endroits de Cockburn Sound. Le succès d'établissement des semis a varié de 1 % (deux semis m²) à 10 % (20 semis m²) après deux ans. À 18 mois, les semis ont commencé à produire de nouvelles pousses et, à 24 mois, les semis établis avaient trois à cinq pousses et avaient commencé à s'étendre horizontalement sur le fond marin. Ce succès initial est maintenant mis à échelle dans le cadre d'une approche communautaire innovante en faisant appel à l'aide et à

la participation des pêcheurs récréatifs locaux dans un programme appelé « Seeds for Snapper » (<https://ozfish.org.au/seeds-for-snapper/>). Dans le cadre de ce programme, 40 à 50 pêcheurs récréatifs locaux se sont portés volontaires pour disperser un million de graines d'herbes marines (collectées et fournies par les scientifiques) sur les sites, dans un effort massif pour restaurer les prairies d'herbes marines perdues de Cockburn Sound. Cela permettra d'augmenter l'échelle de l'ensemencement et la capacité de restaurer des endroits difficiles d'accès (emplacements profonds, turbides, turbulents ou déconseillés aux plongeurs), tout en aidant à identifier et à surmonter les facteurs environnementaux critiques qui limitent l'établissement des semis. Les évaluations préliminaires montrent que le succès de l'établissement est d'environ 14-38 plantules m⁻², ce qui équivaut à 7-19 % (Statton et al., 2017).

- **Sélection de la méthode de restauration** : une pléthore de méthodes et de techniques de restauration a été développée au cours des dernières décennies et la plupart d'entre elles fonctionnent probablement bien pour la plupart des espèces d'herbiers sur lesquelles elles ont été testées, à condition que la sélection du site ait été prise en compte de manière adéquate. L'échelle souhaitée du résultat de la restauration et les coûts (par rapport au budget disponible) peuvent constituer des considérations importantes pour le choix de la méthode. Enfin de compte, la logistique pratique, la commodité par rapport aux conditions locales du site et la familiarité et/ou la préférence de l'opérateur viennent s'ajouter aux critères de choix.
 - **Participation communautaire** : les projets communautaires sont des projets qui se déroulent dans un cadre communautaire avec la participation des communautés côtières locales, de la conception à la mise en œuvre. Ces projets s'appuient sur les connaissances locales et d'autres contributions apportées par les partenaires commu-
- nautaires (ou d'autres parties prenantes locales) à la réussite du projet. Une participation communautaire efficace peut grandement contribuer à l'appropriation locale et à la durabilité à long terme des résultats d'un projet de restauration d'herbiers marins, au-delà de l'intervention initiale. Ce sera particulièrement le cas lorsque la communauté est (rendue) consciente des valeurs de l'écosystème d'herbiers restauré en tant qu'habitat de poisson et en tant qu'atout de protection du littoral, donc de sa contribution à la garantie de moyens de subsistance et d'un avenir meilleurs. Elle peut également jouer un rôle dans l'évaluation des compétences et de l'expérience par rapport aux coûts de mise en œuvre des objectifs de restauration. Des considérations similaires s'appliquent à la décision d'impliquer des citoyens volontaires (voir étude de cas 9). Dans tous les cas, il est nécessaire de gérer soigneusement des attentes réalistes quant aux résultats des efforts de restauration et de maintenir une communication transparente.
- **Engagement des parties prenantes et le rôle du gouvernement** : dans la plupart des projets, il peut être bénéfique d'impliquer les parties prenantes en amont, dans la planification, et la mise en œuvre d'un projet de restauration des herbiers (en plus de la participation communautaire). Les exemples incluent les ONG, les organisations communautaires, les entreprises locales, les opérateurs de plongée, la gestion des AMP et les gardes forestiers, les autorités portuaires, l'industrie du tourisme et de l'hôtellerie, etc. La contribution des organisations non-gouvernementales et communautaires peut être particulièrement précieuse et importante dans la région de l'OIO. Les municipalités et autres autorités locales et les représentants du gouvernement doivent être contactés pour obtenir les permis nécessaires et peuvent être en mesure de faciliter l'accès, de procurer des données et un soutien logistique.
 - **Approche multidisciplinaire** : il peut parfois être utile de demander l'avis et/ou la

participation d'experts de différentes disciplines (par exemple, des géologues, des ingénieurs) car une approche multidisciplinaire peut parfois être nécessaire pour relever les défis complexes sur le site d'un projet, afin de réussir la restauration.

- **Espacement des unités de plantation** : le choix d'un espacement approprié des unités de plantation dépendra de la méthode et de l'espèce. L'expérience pratique de la restauration de la zostère aux États-Unis suggère que l'espacement optimal se situe généralement entre 0,5 et 2 m. Évidemment, plus les unités de plantation sont rapprochées les unes des autres, plus - au fil du temps - elles combleront rapidement l'écart (ou atteindront un pourcentage de couverture désiré ou un motif semblable à ce qui existait auparavant). Cependant, l'avantage d'un taux de coalescence accru est rapidement compensé par les coûts substantiellement plus élevés dus au nombre d'unités de plantation impliquées. Par exemple, une zone de plantation de 100 m x 100 m (1 ha), plantée à des espacements de 2,0, 1,0 ou 0,5 m, nécessiterait respectivement 2 500, 10 000 ou 40 000 unités plantées. Des considérations similaires s'appliquent aux techniques basées sur les semences mais il faut garder à l'esprit les pourcentages relativement faibles de germination réussie et de survie des semis signalés pour ces méthodes.
- **Quand semer/transplanter ?** Lors de la planification de la restauration, il faut tenir compte des changements saisonniers des conditions météorologiques (par exemple, éviter les périodes de fortes pluies ou de perturbation par les ondes de tempête) ainsi que des conditions du site (par exemple, la qualité de l'eau) qui peuvent affecter la croissance et la survie des unités de plantation (ou des semis) et donc le succès de la restauration. Lorsque l'on travaille sur des plaines intertidales, le calendrier des travaux sur le terrain doit tenir compte des conditions de marée, car cela déterminera l'accessibilité et pourrait poser des problèmes de sécurité pour les membres de la communauté et les bénévoles participant à l'effort. Il convient d'éviter les périodes de marées d'équinoxe de printemps, lorsque la zone intertidale inférieure est exposée et qu'il peut y avoir une insolation extrême et un risque accru de dessiccation. La disponibilité du matériel donneur peut également varier de manière saisonnière, en particulier dans le cas de graines (ou de pousses fertiles) pour les espèces dont la reproduction est saisonnière.
- **Délais réalistes** : il est important de fixer des délais réalistes pour la réussite des projets de restauration des herbiers. Une bonne planification avant la mise en œuvre (y compris le choix du site et les autorisations) prendra souvent plus de temps (des mois) qu'on ne le pensait au départ, mais cela finit toujours par payer. En fonction de la méthodologie et de l'échelle, le travail de restauration lui-même peut prendre plusieurs jours ou semaines (ou plus) et peut être répété plusieurs fois, soit au cours de la même année, soit au cours d'années consécutives. L'évaluation de l'exercice ne doit pas être effectuée trop tôt après la plantation initiale. La meilleure pratique consiste à surveiller le succès, la croissance et la survie de l'herbier transplanté pendant une période de plusieurs années après la plantation (cinq ans, comme c'est le cas aux États-Unis, est une bonne référence, mais cette période peut être réduite pour les espèces pionnières à croissance rapide (par exemple *Halophila* spp.)). La restauration d'une couverture raisonnable d'herbiers peut être accomplie en quelques années (ou même moins pour les espèces à croissance rapide), mais le rétablissement complet des fonctions de l'écosystème prendra probablement beaucoup plus de temps. Ce délai est souvent sous-estimé et doit être précisé à toutes les entités participantes, aux parties prenantes et aux autres parties intéressées.
- **Planification d'un calendrier de restauration** : une planification soigneuse et réfléchie est cruciale pour le succès de tout projet de restauration d'herbiers marins et

implique généralement la plupart des étapes/considérations suivantes :

- évaluation des dommages (taille/échelle et cause des dommages/pertes de l'herbier)
- détermination de l'approche de restauration adéquate (qui comprendra d'abord et avant tout des mesures visant à inverser la dégradation de l'habitat)
- analyse coûts-avantages des options d'intervention potentielles
- considérations d'échelle
- perspectives saisonnières
- caractéristiques du cycle de vie des espèces
- sélection du matériel de plantation
- études préalables à la plantation sur les sites donneurs et de restauration
- évaluation de la composition, de la couverture, de la distribution et de l'étendue des espèces avant les dommages, ainsi que d'autres perspectives historiques
- identifier les objectifs de restauration et les critères de rendement
- évaluer les exigences en matière de permis et autres considérations juridiques
- choix du site
- obtenir le matériel de transplantation (plantes, mottes ou graines)
- choix de la méthode de plantation, des espèces et de l'espacement
- évaluation du meilleur moment pour la transplantation (ou la diffusion des graines)
- élaboration de critères et indicateurs de réussite
- mise en œuvre des travaux de restauration proprement dits
- surveillance des plantations (performance et survie des plantes)
- Plantation corrective et entretien du site (cela peut comprendre des interventions pour remédier à l'instabilité du substrat en réduisant la bioturbation ou l'affouillement par les vagues et les courants, au besoin).
- l'interprétation des résultats
- l'évaluation du succès
- partage des leçons apprises

- **Considérations de coût** : la restauration des herbiers marins est coûteuse. Cependant, en cas de succès, les services écosystémiques retrouvés peuvent compenser et éventuellement dépasser ces coûts d'investissement initiaux. Les coûts réels de tout projet de restauration d'herbiers marins comprennent les coûts de la cartographie et de la vérification de terrain, de la plantation (brins ou mottes) ou de l'ensemencement (graines), de la surveillance, de la participation de la communauté, de la participation des entrepreneurs et de la supervision du gouvernement. Les coûts typiques (tout compris) pour la restauration des herbiers dans le monde entier vont de 590 000 dollars à plus de 910 000 dollars par hectare, mais les projets communautaires dans la région de l'OIO (en fonction de leur échelle) sont susceptibles d'être beaucoup moins coûteux.

La restauration basée sur les semences, les projets aidant à la récupération naturelle et les initiatives de restauration impliquant les communautés locales ou des volontaires sont généralement les moins coûteux, tandis que les projets impliquant la modification du site, les mesures d'ingénierie (par exemple, la modification du substrat) et/ou ceux impliquant l'utilisation de matériel de plongée (dans les eaux plus profondes) ou d'équipements lourds (par exemple, une pelleteuse modifiée et des machines de récolte de semences ou de plantation/réinstallation de gazon) coûtent généralement plus cher (jusqu'à plus d'1 million de dollars par hectare). Il est fortement recommandé de se livrer à une analyse approfondie des coûts-avantages avant toute décision concernant un projet de restauration, en évaluant les coûts des différentes méthodes de restauration (ainsi que ceux des améliorations supplémentaires de l'habitat et d'autres mesures d'atténuation) par rapport à une réussite à plus grande échelle.

- **Suivi et évaluation du succès** : le suivi des progrès et de la réussite de la restauration (bien qu'il demande beaucoup de travail et soit coûteux) est une composante essentielle de tout projet de restauration d'herbiers. Un suivi approprié et suffisamment solide est essentiel pour garantir que tout travail sous-traité a été réalisé conformément aux spécifications et aux exigences des permis réglementaires (le cas échéant). Dans tous les cas, le suivi de la performance de la plantation à l'aide de méthodes standard fournit la base pour des corrections à mi-parcours (par exemple, des plantations correctives et/ou d'autres modifications du projet) et pour tirer des leçons afin d'améliorer la planification de projets ultérieurs ailleurs. Le suivi et l'évaluation sont donc un processus itératif, qui s'adapte et change si nécessaire. Il est généralement admis que les programmes de suivi de la restauration des herbiers doivent durer au moins cinq ans, avec un suivi trimestriel la première année, avant un suivi semestriel (et éventuellement annuel) les années suivantes.

7. Suivi de restauration

7.1 Introduction

La mise en œuvre d'un plan de surveillance systématique pour documenter les progrès, les défis, l'effet des mesures correctives et le degré final de réussite de la restauration est une composante essentielle de tout projet de restauration d'herbiers marins.

Bien que cela demande beaucoup de travail et que cela coûte cher, un programme de suivi systématique et statistiquement robuste, utilisant des méthodologies standard, est indispensable pour garantir que tout travail sous-traité a été réalisé conformément aux spécifications et aux exigences des permis réglementaires (le cas échéant). Dans toute situation, un suivi approprié de la performance de la plantation fournit la base des corrections à mi-parcours (par exemple, plantation corrective, modifications du site). Il est également essentiel de tirer des leçons précieuses pour améliorer la planification des futures initiatives de restauration des herbiers ailleurs.

Le suivi des performances des plantations et du succès de la restauration doit toujours être lié à des normes convenues et à des paramètres prédéfinis. Le succès doit être évalué par rapport à des critères de réussite clairement définis, de préférence quantitatifs et scientifiquement valides. Ces critères de réussite peuvent être aussi simples que l'étendue de la zone restaurée (en hectares) ou un pourcentage souhaité de couverture du fond marin par la végétation (% de couverture ou densité de pousses) et sa persistance dans le temps. Pour les projets plus récents, les critères comprennent souvent aussi des mesures et des indicateurs fonctionnels. Ce sont, par exemple, la colonisation de la faune, la biodiversité associée, le rôle dans la stabilisation des sédiments, la fonction de pépinière, la séquestration de carbone, etc., l'habitat restauré mesuré par rapport à des sites de référence naturels (locaux) similaires. Il est important d'envisager d'inclure des mesures de certaines variables environnementales générales (par

exemple, la température, la salinité et la turbidité), qui peuvent aider à expliquer et à attribuer un résultat décevant des efforts de restauration à certains endroits à des conditions environnementales qui échappent au contrôle de l'équipe de restauration (telles que de fortes pluies, des inondations fluviales, des vagues de chaleur, des gelées, des tempêtes majeures ou même des cyclones).

Les programmes de suivi de la restauration des herbiers sont mieux gérés sur une durée d'au moins cinq ans, avec une surveillance trimestrielle la première année, suivie d'une surveillance semestrielle (et éventuellement annuelle) les années suivantes. Le calendrier des événements de surveillance doit être choisi en tenant compte du cycle des marées de printemps et de la saisonnalité du climat (par exemple, moussons, saison des pluies, été-hiver). Dans le cas d'un suivi annuel, il est préférable de choisir la période de l'année où les herbes marines sont au sommet de leur croissance et de leur développement (récolte sur pied maximale). Les résultats de la surveillance de la première année (idéalement trimestrielle) aideront à définir le meilleur moment pour la surveillance des années suivantes. Cela peut également être utile pour choisir le meilleur moment pour la photographie aérienne ou la surveillance assistée par drone (le cas échéant, par exemple dans les zones où l'accès est plus difficile) pour le suivi de la persistance à long terme des zones restaurées dans les années suivantes.

7.2 Indicateurs de suivi

Les spécifications du suivi comprennent généralement la plupart (ou certains) des indicateurs suivants :

- **Survie** : le pourcentage du nombre de brindilles, de mottes ou de graines plantées qui ont survécu ;
- **Couverture aérienne** : d'un échantillon choisi au hasard, la surface (en m²) couverte

par unité de plantation doit être enregistrée jusqu'à la coalescence (lorsque des unités de plantation individuelles qui ont grandi ensemble deviennent indiscernables). En comptant le nombre total d'unités de plantation survivantes, on peut ensuite les multiplier par la surface moyenne par unité de plantation pour déterminer la surface totale couverte sur le site de restauration.

- **Densité des pousses** : une évaluation aléatoire de la densité des pousses doit être effectuée (en comptant). On peut aussi faire une estimation visuelle du pourcentage de couverture des parcelles replantées, qui peut ensuite être comparé aux densités de pousses connues d'une série de référence d'échantillons prélevés - à cette fin - de la même zone générale. Il est également important de savoir que le pourcentage de couverture visible de l'herbier, qui reflète la quantité de matière foliaire, peut varier considérablement au cours de l'année ou même selon les marées, en fonction du pâturage, de la dessiccation et des cycles de croissance, même si la densité réelle des pousses n'a pas changé. Les premières unités de plantation peuvent présenter une densité de pousses artificiellement élevée lorsqu'elle est exprimée par m², car elles sont encore associées à l'ancrage (ou à l'agrafe), mais les parcelles plantées finissent par s'étendre plus naturellement, d'une manière qui ressemble davantage à une colonisation naturelle. La densité des pousses est recommandée en plus de la couverture aérienne, car c'est un moyen plus précis d'évaluer la vigueur de la reproduction asexuée des plantations (leur degré d'établissement et de propagation). La densité des pousses peut varier de manière assez significative entre les sites (en fonction de l'adéquation du site) et selon les saisons (ce qui doit être pris en considération lors de l'interprétation des données de surveillance en comparaison avec celles des sites de référence ou avec les données des campagnes de surveillance précédentes).

- **Photographie/vidéo** : la photographie répétée des parcelles de restauration (de préférence à partir de positions standardisées) et les transects vidéo des zones restaurées peuvent être un moyen supplémentaire (attractif) de fournir des enregistrements utiles et potentiellement semi-quantitatifs des progrès de tout projet de restauration d'herbiers. Ce type de matériel est également très utile pour la sensibilisation du public et pour des présentations visant à tenir les entités participantes informées des progrès réalisés.
- **Fonctions de l'écosystème** : lorsque cela est souhaitable et identifié comme des indicateurs intrinsèquement précieux du succès du projet, des mesures quantitatives de certaines fonctions de l'écosystème (prédéfinies au début de la restauration), telles que la biodiversité associée, la qualité de l'eau, la stabilité des sédiments, les zones d'alevinage, les densités de poissons, la séquestration du carbone, peuvent être incorporées dans le programme de surveillance.

7.3 Rapports de suivi

Les rapports de suivi doivent (au minimum) contenir les informations suivantes :

- Les dates, heures et emplacements géographiques (GPS) des activités de surveillance ;
- Observations sur l'état de la mer et la marée au moment de la surveillance ;
- Des données quantitatives sur les paramètres mesurés (survie, couverture, densité, photographies/vidéos, fonctions de l'écosystème) pour chaque parcelle/site de transplantation ;
- Données et observations sur les variables environnementales et les conditions météorologiques pendant la période de surveillance.
- Interprétation des données, soutenue par une analyse statistique (le cas échéant).

8. Plan de gestion de la restauration des herbiers marins

La restauration des herbiers a peu de chances de réussir si elle consiste simplement à transplanter des herbiers sans évaluation adéquate du site et sans prise en compte des causes sous-jacentes de la disparition des herbiers sur le site. Pour garantir la réussite d'un projet de restauration d'herbiers, il convient de suivre un protocole généralisé de planification comprenant les étapes et considérations de base suivantes (Illustration 2) :

8.1 Phase de planification du projet :

- **Buts et objectifs** : établir des buts et des objectifs clairs pour le projet de restauration avant d'initier toute activité de restauration.
- **Études préalables à la plantation** : cartographie de la distribution des herbiers et délimitation des zones dégradées nécessitant une restauration. Étudier les sites potentiels à restaurer et déterminer : l'historique de l'herbier (composition des espèces, cause de la perte), l'exposition aux
- facteurs de stress environnementaux (en particulier l'air, les vagues et les courants), le type de substrat, la preuve d'un envasement ou d'une érosion important/te, la présence de bioturbation et d'autres perturbations animales. Pour les approches de restauration basées sur les graines, des études phénologiques peuvent être nécessaires pour identifier le moment de la floraison et de la production de graines des différentes espèces et/ou la présence de banques de graines.
- **Participation de la communauté et des parties prenantes** : l'implication et la participation des communautés locales, des parties prenantes et/ou des volontaires dans les projets de restauration des herbiers doivent être envisagées. Cela peut aider à réduire les coûts, offrir une source de main-d'œuvre locale, contribuer à garantir la persistance et la durabilité à long terme des zones d'herbiers restaurées et améliorer le succès

Phase de planification du projet :

- Établir les buts et les objectifs
- Études préalables à la plantation
- Participation de la communauté et des parties prenantes
- Sélection des sites, des espèces et des méthodes
- Considérations matérielles des donateurs
- Planification et budgétisation
- Définir les exigences de suivi
- Considérations de coûts
- Sauvegarde de l'environnement

Phase de mise en œuvre du projet :

- Délimitation et préparation du site
- Causes inversées de déclin
- Essais pilotes
- Mise en œuvre à grande échelle
- Plantation corrective (à mi-parcours)

Phase de suivi et d'évaluation du projet :

- Réalisation du programme de suivi
- Évaluation et retours (ajustements)
- Gérer et ajuster les attentes
- Signalement et partage des leçons apprises

Illustration 2. Étapes et considérations de base d'un plan de gestion de restauration d'herbiers marins.

des efforts de restauration en offrant la possibilité d'intégrer les connaissances locales (traditionnelles) de la zone à la planification et à la conception de l'approche de restauration. L'engagement précoce de la communauté est essentiel pour obtenir une participation significative et efficace, appelée à être maintenue pendant toutes les phases du projet de restauration.

- **Sélection des sites, des espèces et de la méthode de plantation** : le choix du site pour la restauration de l'herbier doit prendre en compte l'adéquation des conditions environnementales aux exigences d'une croissance saine de l'herbier. Les espèces sélectionnées pour la restauration doivent être dérivées de la composition historique de la communauté et être bien adaptées aux conditions actuelles du site. Le choix des méthodes de plantation doit être basé sur une évaluation de leur adéquation aux espèces et aux conditions du site, sur les objectifs, les résultats souhaités et l'échelle spatiale du projet, ainsi que sur une analyse approfondie (participative) des coûts et des avantages des différentes options.
- **Matériel donneur** : localiser un lit donneur qui satisfait les exigences de collecte de quantités appropriées de matériel d'herbiers marins à transplanter au site de restauration. Pour les méthodes végétatives, ce lieu doit être suffisamment proche pour permettre la transplantation des plants ou des mottes le même jour (et pas plus). Pour le matériel végétal sans sédiments et/ou les méthodes basées sur les semences, il faut tenir compte des besoins de stockage du matériel (dans de l'eau de mer en mouvement à température et salinité ambiantes). Il faut toujours s'efforcer de minimiser la perturbation des sites donneurs (en règle générale, il faut limiter l'enlèvement du matériel végétal à <10 % de la végétation de la zone donneuse) car il peut être frustrant pour toutes les personnes impliquées dans l'effort de restauration qu'un lit donneur sain subisse des dommages importants (nouveaux) en raison de la récolte de matériel pour la restauration, surtout si cette dernière est finalement un échec. Heureusement, dans la plupart des projets, les impacts sur les lits donneurs sont généralement de faible ampleur et le rétablissement est rapide.
- **Planification et budgétisation** : déterminer le calendrier et le budget en évaluant les besoins typiques en personnel et équipement. Un minimum de sept à neuf personnes est généralement nécessaire pour la plantation sans sédiments dans les zones intertidales et subtidales peu profondes. Le temps nécessaire à la planification, aux préparatifs avant le voyage, à la mobilisation et à la démobilisation (y compris les déplacements) doit également être pris en compte dans la planification et le budget. Le temps et les ressources nécessaires au suivi et à l'établissement de rapports sur le succès de la restauration doivent également être budgétisés.
- **Exigences de suivi** : définir les méthodes, les critères de réussite et la fréquence (et la durée en années) du suivi à long terme. Inclure le suivi des populations de donneurs (pour déterminer la récupération des impacts de la récolte de matériel végétal pour la restauration).
- **Coûts** : tenir compte de tous les frais potentiels du projet mentionnés ci-dessus, y compris la délimitation du site, les rapports, la mobilisation et la démobilisation, les opérations de plantation, la surveillance, la plantation corrective, les frais généraux (y compris peut-être l'assurance), la cartographie, le personnel, le transport et la nourriture/les boissons pour les bénévoles, etc. Pensez à des options de financement durable à long terme qui pourraient garantir des fonds suffisants pour couvrir tous les travaux, y compris la phase de suivi et d'évaluation.
- **Sauvegarde de l'environnement** : évaluer les impacts environnementaux des travaux de restauration, tant sur le site donneur que

sur le site de restauration (y compris le risque d'introduction d'espèces invasives si le matériel du donneur est importé d'ailleurs) et envisager des moyens pratiques de les minimiser.

8.2 Phase de mise en œuvre du projet :

- **Délimitation et préparation du site** : délimiter soigneusement les parcelles pour faciliter à la fois la transplantation et le suivi des zones de restauration. Cette phase peut également inclure des modifications des conditions du site (si nécessaire et faisable) pour préparer le site à la restauration et augmenter les chances de succès.
- **Inverser les causes du déclin** : faire tous les efforts possibles pour s'assurer que les menaces locales (bioturbation, herbivorie, instabilité des sédiments, activités humaines néfastes) et que les causes connues de déclin et de dégradation des herbiers sur le site de restauration soient comprises et inversées (réduites à un niveau aussi bas que raisonnablement possible).
- **Essais pilotes** : initiez d'abord des essais de restauration à petite échelle ou pilotes, avant de vous engager dans des projets de restauration à grande échelle (voir étude de cas 10). Les petits projets pilotes peuvent aider à tester l'adéquation de différentes méthodes - dont les techniques d'ancrage et les mesures correctives du site, telles que le conditionnement des sédiments ou l'élaboration de bancs de sable ou de récifs de coquilles de crustacés - aux espèces et aux conditions du site local, en se familiarisant à la manipulation du matériel végétal et de l'équipement, aux contraintes de temps, aux aspects pratiques, à la logistique et aux imprévus) avant d'appliquer le projet à une échelle spatiale plus étendue (Tanner et al., 2014).
- **Mise en œuvre à grande échelle** : un effort de restauration à grande échelle peut éventuellement être nécessaire car une masse

critique de plantes/superficie plantée est requise pour assurer la persistance à plus long terme des zones restaurées. Dans pareils cas, il est important de répartir les phases d'essais et de plantation sur différents sites et à différents moments de l'année afin d'accommoder les circonstances imprévues, la mauvaise compréhension des complexités du site et d'autres facteurs imprévisibles qui peuvent affecter la performance et le succès (Suykerbuyk et al., 2016).

- **Plantations correctives** : des mesures correctives (atténuation des développements indésirables ou des interférences locales) peuvent parfois être nécessaires à un certain stade d'un projet de restauration en cours. Il peut s'agir d'une plantation corrective en tant que réorientation de mi-parcours, sur la base d'observations faites au cours du programme de surveillance (par exemple, des niveaux de survie des transplants inattendus ou inférieurs aux attentes). Parfois, cela peut inclure des interventions qui aident à modifier les conditions du site (comme approprié et faisable) pour améliorer les chances de succès de la restauration. Comme expliqué ci-dessus, le processus doit être itératif - modifier ou ajuster le plan au fur et à mesure que des leçons sont tirées ou que de nouvelles informations ou méthodes apparaissent.

8.3 Phase de suivi et d'évaluation du projet :

- **Suivi** : cette phase est conduite en appliquant un plan de suivi (voir le chapitre précédent), les promoteurs devant être prêts à modifier le site et/ou à effectuer des plantations correctives si la survie est inférieure aux attentes.
- **Gérer et ajuster les attentes** : il est important d'entretenir des attentes réalistes quant aux résultats des efforts de restauration. Pour y parvenir, une stratégie de communication claire est essentielle. S'il y a un essai pilote de restauration, il doit être considéré comme tel, c'est-à-dire comme une expéri-

ence et un processus d'apprentissage, qui doit être étendu et modifié au fil du temps, avec un partage et un apprentissage transparents des échecs et des développements inattendus en cours de route, pour déterminer ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas. Le résultat d'un essai pilote déterminera si un programme de restauration complet vaut la peine d'être poursuivi. Les attentes peuvent être trop élevées si les gens attendent et concluent qu'une approche de restauration particulière sera couronnée de succès sans aucune expérience d'apprentissage préalable et/ou démonstration prouvée de succès dans des circonstances similaires (ou à partir d'essais pilotes antérieurs sur le site).

- **Signalement et partage des leçons apprises** : la publication des résultats et le partage des expériences sont essentiels et offrent aux autres une opportunité d'intégrer les leçons apprises à la planification et à la conception de nouveaux projets de restauration, sur d'autres sites, à l'avenir.

8.4 Recommandations pour la recherche :

Alors que l'objectif premier de la restauration ne devrait pas être de faire avancer la science mais d'accomplir un élargissement de la superficie des herbiers, les sujets de recherche suivants sont recommandés pour combler des lacunes critiques du savoir existant, ce qui bénéficierait aux résultats des efforts de restauration des herbiers dans la région de l'OIO :

- Étudier la saisonnalité de la floraison, de la production de graines et de la formation de banques de graines chez les espèces d'herbiers de l'OIO.
- Mener une évaluation du rapport coût-efficacité de différentes méthodes de restauration (basées sur des projets pilotes) pour une application à grande échelle dans les programmes de restauration des herbiers marins dans la région de l'OIO.
- Évaluer le caractère approprié des différentes méthodologies de restauration aux différentes espèces d'herbes marines dans la région de l'OIO.

EC 10.

Essais communautaires de restauration d'herbiers marins à Diani et à l'île Wasini, au Kenya.

Un certain nombre d'études préliminaires de restauration des herbiers marins et de projets pilotes à petite échelle ont été lancés le long de la côte kenyane à partir de 2007. Des essais expérimentaux de restauration de l'herbier marin ont été menés à la suite d'un déclin de l'herbier marin dû à l'herbivorie excessive des oursins à Diani. Ce premier essai de transplantation d'herbiers marins au large de la plage de Diani a été mené en utilisant la méthode du gazon et les espèces climaciques *Thalassodendron ciliatum* et *Thalassia hemprichii*. Bien que cet essai n'ait pas donné de résultats probants, il a permis de mieux comprendre les processus de restauration et a fourni de bonnes indications pour le suivi et les leçons à tirer sur le choix du site et l'optimisation des techniques de transplantation.

D'autres travaux expérimentaux dans le cadre d'un projet de recherche utilisant des imitations artificielles d'herbiers marins ont permis de comprendre le processus de colonisation par la (méio-) faune, le piégeage des sédiments et l'établissement de semis d'herbiers marins pionniers dans les parcelles de restauration (Mutisia, 2009).

En avril 2015, un projet communautaire prometteur de restauration des herbiers marins a été lancé sur

l'île de Wasini afin de restaurer les zones d'herbiers dégradées (Daudi et al., 2015 ; planche 20). L'une des principales composantes de ce projet était la formation des membres de la communauté locale à la restauration des herbiers marins. La formation comprenait un aperçu de l'importance des écosystèmes côtiers pour la santé des océans et les moyens de subsistance des communautés locales, les raisons de la restauration des herbiers, les procédures de restauration et une formation pratique aux techniques de restauration.

Le projet a permis de former 30 membres de la communauté locale et de dresser une carte des zones saines et dégradées de l'île de Wasini. Environ 2,3 ha d'habitat d'herbiers marins ont été restaurés à l'aide de pousses et de semis de *Thalassia hemprichii* prélevés sur un site donateur voisin. Les semis ont été plantés à l'aide de sacs de toile de jute pour l'ancrage et pour stabiliser les sédiments sur le site. La croissance, la performance et la survie à long terme des zones d'herbes marines restaurées sont surveillées par les communautés. Les résultats initiaux encourageants de cet essai et de sa méthodologie seront utilisés pour la planification d'autres activités participatives de restauration des herbiers marins le long de la côte kenyane.



Cadre 20. Projet communautaire de restauration des herbiers marins sur l'île Wasini, impliquant la plantation de semis d'herbiers marins en utilisant des sacs de toile de jute pour l'ancrage et la stabilisation des sédiments (à droite), après consultation et planification préalables auprès de la communauté locale (à gauche).

9. Références

- Amoné-Mabuto, M., S. Bandeira et A. da Silva, 2017. Changements à long terme de l'âge de la couverture des herbiers marins et liens potentiels avec les facteurs liés au climat : le cas de la baie d'Inhambane, au sud du Mozambique. *WIO Journal of Marine Science* 16 (2): 2017 13-25.
- Alcoverro, T. et S. Mariani, 2002. Effets du brouillage de l'oursin sur les herbiers (Thalassodendron ciliatum) d'un lagon kenyan. *Marine Ecology Progress Series* 226: 255-263.
- Bandeira, S.O. et F. Gell, 2003. Les herbiers marins du Mozambique et de l'Afrique du Sud-Est. Chapitre 8 in: Green, E.P. et Short, F.T. (eds.), *World Atlas of Seagrasses*. Préparé par le Centre mondial de surveillance de la conservation du PNUE. University of California Press, Berkeley (USA), pp. 93-100.
- Calumpang, H.P. et M.S. Fonseca, 2001. Transplantation d'herbes marines et autres méthodes de restauration des herbiers marins. Chapitre 22, p. 425-443. In : Short, F.T. et Coles, R.G. (eds.) *Global Seagrass Research Methods*, Elsevier Science B.V. Collier, C., K.K. van Dijk, P.L.A. Erftemeijer, N. Foster, M. Hipsey, E. O'Loughlin, K. Ticli et M. Waycott, 2017. Optimiser l'habitat du *Ruppia* de Coorong. Stratégies d'amélioration des conditions d'habitat du *Ruppia tuberosa* dans le Coorong (Australie du Sud) basées sur un examen de la documentation, des expériences de manipulation et une modélisation prédictive. CLLMM Management Action 15, Technical Report, University of Adelaide, Adelaide SA, 163 pp.
- Cuba, T.R., 2003. *Une évaluation indépendante, par des tiers, de la mega unité technique de relocalisation d'herbiers marins*. Communication présentée à la conférence Submerged Aquatic Habitat Restoration in Estuaries: Issues, Options and Priorities, 11 au 13 mars, 2003. Mote Marine Laboratory, Sarasota, FL, 51 pp.
- Daudi L., Alati V.M., Muthama C., Ndirangu, S., Olunga, G., Kimathi, A. et Uku, J., 2015. Rapport sur la restauration des herbiers marins à l'île Wasini, Kenya. Rapport pour le projet de développement côtier du Kenya, Kenya Marine and Fisheries Research Institute.
- Descamp, P., T. Cornu, M. Bougerol, P. Boissery, C. Ferlat, G. Delaruelle, J. Deter et S. Gobert, 2017. Transplantation expérimentale de *Posidonia oceanica*. Actes du 13^e congrès international MEDCOAST 2017 sur les sciences, l'ingénierie, la gestion et la conservation du littoral et de la mer. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/224188/1/descampetal-%20publi%20safebentmed-coast2017.pdf>
- Donatelli, C., Ganju, N.K., Kalra, T.S., Fagherazzi, S. et Leonardi, N. 2019. Changements dans l'hydrodynamique et l'énergie des vagues à la suite du déclin des herbes marines le long du littoral d'un estuaire microtidal d'arrière-cordon. *Advances in Water Resources* 12: 183-192.
- Eklöf, J.S. 2008. Perturbations anthropiques et changements dans les écosystèmes d'herbiers tropicaux. Thèse de doctorat, Université de Stockholm, Suède.
- Eklöf, J.S., de la Torre-Castro, M., Nilsson, C. et Rönnbäck, P. 2006. Quelle incidence la culture d'herbes marines a-t-elle sur les prises de la pêche locale dans un paysage dominé par les herbiers, à la Baie de Chwaka, Zanzibar ? *Aquatic Living Resources* 19: 137-147.
- Erftemeijer, P.L.A. et Lewis III, R.R. 2006. Impacts environnementaux du dragage sur les herbiers marins : examen. *Marine Pollution Bulletin* 52: 1553-1572.
- Erftemeijer, P.L.A., van Beek, J.K.L., Ochieng, C.A., Los, H.J. et Jager, Z. 2008. Dispersion des graines de zostère via des pousses génératrices flottantes in La mer des Wadden néerlandaise : une approche modèle. *Marine Ecology Progress Series* 358: 115-124.
- Fonseca, M.S. 1994. *Un guide pour planter des herbes marines dans le Golfe du Mexique*. Texas A&M University Sea Grant College Program, Publication TAMU-SG-94-601, 27 pp.
- Fonseca, M.S., Kenworthy, W.J. et Thayer, G.W. 1998. *Susceptibilité des herbiers marins aux marées noires : une étude de cas avec la zostère*,

- Zostera marina* dans la baie de San Francisco, États-Unis. NOAA's Coastal Ocean Program, Decision Analysis Series No.12. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Coastal Ocean Office, November 1998, 222 pp.
- Fonseca, M.S., Kenworthy, W.J., Julius, B.E., Shutler S. et Fluke, S. 2002. *Herbes marines*. Chapter 7 In: M.R. Perrow et A.J. Davy (eds.) *Manuel de restauration écologique, Vol. 2: La restauration en pratique*, Cambridge University Press, pp. 149-170.
- Fonseca, M.S., Piniak, G.A. et Cosentino-Manning, N. 2017. *Susceptibilité des herbiers marins aux marées noires : une étude de cas avec la zostère, Zostera marina dans la baie de San Francisco, États-Unis*. *Marine Pollution Bulletin* 115 (1-2): 29-38.
- GESAMP. 2001. Protéger les océans des activités terrestres : sources et activités terrestres affectant la qualité et les utilisations de l'environnement marin, côtier et des eaux douces associées. *Rapports et études* du GESAMP 71, GESAMP (ONU, PNUE, FAO, UNESCO-COI, OMS, OMI, AIEA), 162 pages.
- Greening, H. and Janicki, A. 2006. Vers l'inversion des conditions eutrophiques dans un estuaire subtropical : qualité de l'eau et réaction des herbiers marins aux réductions de charge d'azote dans la baie de Tampa, en Floride, USA. *Environmental Management* 38 : 163-178.
- Gullström, M., de la Torre Castro, M., Bandeira, S.O., Björk, M., Dahlberg, M., Kautsky, N., Rönnbäck P. Et Öhman, M.C. 2002. *Ecosystèmes d'herbiers marins dans l'océan Indien occidental*. *Ambio* 31 (7-8): 588-596.
- Irving, A.D., Tanner J.E. et Collins, G.J. 2014. *Réhabiliter les herbiers marins en facilitant le recrutement : accroître les chances de succès*. *Restoration Ecology* 22: 134-141.
- Service de la faune du Kenya. Stratégie de conservation des écosystèmes de récifs coralliens et d'herbiers marins, 2014-2018. Kenya Wildlife Service, mai 2013.
- Kenworthy, W.J., Cosentino-Manning, N., Handley, L., Wild, M. et Rouhani, S. 2017. Réaction des herbes marines après l'exposition au pétrole de Deepwater Horizon dans les îles Chandeleur, Louisiane (États-Unis). *Marine Ecology Progress Series* 576: 145-161.
- Lewis, R.R. III, 1987. La création et la restauration de prairies d'herbiers marins dans le sud-est des États-Unis, In : M.J. Durako, R.C. *et al.* (eds.), *Proceedings of the Symposium on Subtropical-Tropical Seagrasses of the Southeastern United States*. Florida Marine Research Publications 42: pp. 153-173.
- Lugendo, B. 2015. *Mangroves, marais salants et lits d'herbiers marins*. Chapitre 5. Pages 53-69. In: *The Regional State of the Coast Report: Western Indian Ocean*. UNEP et WIOMSA, Nairobi, Kenya, Mabuto, M.A. *et al.*, 2018. Réaction de l'herbe marine *Zostera capensis* aux perturbations physiques (récolte de palourdes) et évaluation de l'expérience de replantation utilisant la méthode des bouchons. Marine Botany Group, Seagrass restoration initiative. Department of Biological Sciences, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo. Mozambique.
- Marion, S.R. et Orth, R.J. 2010. Techniques innovantes pour la restauration à grande échelle d'herbiers marins en utilisant des graines de *Zostera marina* (zostères). *Restoration Ecology* 18(4): 514-526.
- MITADER. 2015. Stratégie nationale et plan d'action de la diversité biologique du Mozambique. Ministère de la terre, de l'environnement et du développement rural (MITADER), République du Mozambique, Maputo, 112 pages.
- Mutisia, L.N.D. 200. Restauration des herbiers marins du Kenya : une étude fonctionnelle de la faune et de la flore associées. Mémoire de maîtrise, Université libre de Bruxelles, 94 pages.
- Conseil national des lois, 2018. Loi sur la gestion et la coordination de l'environnement, n° 8 de 1999. Édition révisée 2018 [1999]. Lois du Kenya, République du Kenya. Publié par le National Council for Law, signalé avec l'autorisation du ministère de la Justice (www.kenyalaw.org), 77 pages.
- Nordlund, L.M. 2012. People and the intertidal. Changements induits par l'homme, perte de bio-

- diversité, implications sur les moyens de subsistance et gestion dans l'océan Indien occidental. Thèse de doctorat, Abo Akademi, Finlande.
- Obura, D. *et al.* 2017. Relancer l'économie de l'océan Indien occidental : actions pour un avenir durable. WWF International, Gland, Suisse. 64 pages.
- Ochieng, C.A. et Erfteimeijer, P.L.A. 2003. Les herbes marines du Kenya et de la Tanzanie. Chapitre 7 p. 82-91. *In*: E.P. Green et F.T. Short (eds.) *World Atlas of Seagrasses: Present Status and Future Conservation*. University of California Press, Berkeley, USA.
- Orth, R.J., et Marion, S.R. 2007. Techniques novatrices pour la collecte, le traitement et le stockage à grande échelle des graines de zostère (*Zostera marina*). ERDC/TN SAV-07-2. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. http://el.erdc.usace.army.mil/_elpubs/pdf/sav07-2.pdf
- Orth, R.J., Marion, S.R., Granger, S. et Traber, M. 2007. Restauration de la zostère (*Zostera marina*) à partir de graines : une comparaison des méthodes de plantation pour projets à grande échelle. ERDC/TN SAV-08-1. Vicksburg, MS : U.S. Army Engineer Research and Development Center. <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/sav08-1.pdf>
- Orth, R.J., Marion, S.R., Moore K.A. et Wilcox, D.J. 2010. Zostère marine (*Zostera marina* L.) dans la région de la baie de Chesapeake sur la côte médio-atlantique des États-Unis : défis pour la conservation et la restauration. *Estuaries and Coasts* 33: 139-150.
- Orth, R.J., Moore, K.A., Marion, S.R., Wilcox D.J. et Parrish, D.B. 2012. L'addition de semences facilite la récupération des zostères dans un système côtier de baies. *Marine Ecology Progress Series* 448:177-195.
- Paulo, D., Cunha, A.H., Boavida, J., Serrão, E.A., Gonçalves, E.J. et Fonseca, M. 2019. Restauration des herbiers de la côte ouverte. Peut-on le faire ? Transplantations d'herbes marines à grande échelle. *Frontiers in Marine Science* 6:52. doi: 10.3389/fmars.2019.00052
- Paling, E.I., van Keulen, M., Wheeler, K.D., Phillips, J., Dyhrberg, R. et Lord, D.A. 2001. Améliorer la transplantation mécanique des herbes marines. *Ecological Engineering* 18: 107-113.
- Reef Doctor. 2019. Transplantation d'herbes marines à Beravy pour créer des écosystèmes sains à Ranobe, afin de soutenir la pêche locale. Rapport initial, Reef Doctor, mai 2019, 11 pages. Statton, J., Montoya, L.R., Orth, R.J., Dixon, K.W. et Kendrick, G.A. 2017. Identification des goulots d'étranglement critiques du recrutement limitant l'établissement des semis dans un écosystème dégradé d'herbes marines. *Rapports scientifiques* 7: 14786 | DOI:10.1038/s41598-017-13833-y.
- Statton, J., Dixon, K. W., Irving, A.D., Jackson, E.L., Kendrick, G.A., Orth, R.J. et Sinclair, E.A. 2018. Écologie du déclin et de la restauration des prairies marines australiennes. Chapter 20 p. 665-704. *In*: Larkum, : A. W. D *et al.* (eds.), *Herbes marines d'Australie*, https://doi.org/10.1007/978-3-319-71354-0_20
- Suykerbuyk, W., Govers, L.L., Bouma, T.J., Giesen, W.B.J.T., de Jong, van de Voort, D.J. R., Giesen, K., Giesen, P.T. et van Katwijk, M.M. 2016. Imprévisibilité de la restauration d'herbes marines : analyser le rôle du retour positif et du stress environnemental sur des unités transplantées de *Zostera noltii*. *Journal of Applied Ecology* 53: 774-784.
- Swingle, S. 2003. Programme de restauration d'herbiers marins à Port Manatee. *Florida Engineering Society Journal*, avril 2003, pages. 12-13.
- Tanner, J.E., Irving, A.D., Fernandes, M., Fotheringham, D., McArdle, A. *et al.* 2014. Réhabilitation des herbes marines au large de la métropole d'Adélaïde : une étude de cas de perte, d'action, d'échec et de succès. *Ecological Management and Restoration* 15: 168-179. Treat, S.F. and Lewis III R.R. (eds.) 2006. *Restauration d'herbiers marins : réussite, échec et le coût des deux*. Selected papers presented at a workshop, Mote Marine Laboratory, Sarasota FL, March 11-12, 2003. Lewis Environmental Services, Valrico FL (USA), June 2006, 175 pp. UNEP. 2009. Analyse diagnostique transfrontalière des sources et activités terrestres dans la région de l'océan Indien occi-

- dental. Programme des Nations unies pour l'Environnement (PNUE) et le Fonds économique mondial (GEF), Nairobi, 271 pages.
- Van Katwijk, M.M., Thorhaug, A., Marbà, A.N., Orth, R.J., Duarte, C.M., Kendrick, G.A., Althuizen, I.H.J., Balestri, E., Bernard, G., Cambridge, M.L., Cunha, A., Durance, C., Giesen, W., Han, Q., Hosokawa, S., Kiswara, W., Komatsu, T., Lardicci, C., Lee, K.-S., Meinesz, A., Nakaoka, M., O' Brien, K.R., Paling, E.I., Pickerell, C., Ransijn, A.M.A. et Verduin, J.J., 2016. Analyse mondiale de la restauration des herbiers marins : importance de la plantation à grande échelle. *Journal of Applied Ecology* 53: 567-578.
- Van der Eijk, A., 2017. Nieuwsbrief Zeegrass, Mei 2017 (page 5). Téléchargé de : https://zeegrassherstelwaddenzee.files.wordpress.com/2015/10/2017-mei_nieuwsbrief-zeegrass-digitaaldef.pdf
- Vaudrey, J.M.P., Kremer, J.N., Branco, B.F. et Short, F.T. 2010. Rétablissement de la zostère après l'inversion de l'enrichissement en nutriments. *Aquatic Botany* 93: 237-243.
- Waycott, M., McMahon, K., Mellors, J., Calladine, A. et Kleine, D. 2004. *Guide des herbes marines de la région indo-pacifique occidentale*. James Cook University, Townsville, 72 pages.
- Wear, R.J., Tanner, J.E. et Hoare, S.L. 2010. Faciliter le recrutement d'*Amphibolis* comme une nouvelle approche de la réhabilitation des herbiers dans les eaux hydrodynamiquement actives. *Marine and Freshwater Research* 61: 1123-1133.
- Whitehead, S. 2015. La saisonnalité d'une herbe marine à courte durée de vie par rapport aux facteurs environnementaux et le développement d'un modèle de plante adaptable, fonctionnel et structurel. Mémoire de maîtrise, University of Western Australia, 69 pages.
- Williams, S.L., Ambo-Rappe, R., Sur, C., Abbott, J.M. et Limbong, S.R. 2017. La richesse des espèces accélère la restauration de l'écosystème marin dans le Triangle de Corail. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 114(4) : pages. 11986-11991.

