



LIGNES DIRECTRICES POUR LA
RESTAURATION ACTIVE DE
Posidonia oceanica

Pergent-Martini C., André S., Castejon I., Deter J., Frau F., Gerakaris V., Mancini G., Molenaar H., Montefalcone M., Oprandi A., Pergent G., Poursanidis D., Royo L., Terrados J., Tomasello A., Ventura D., Villers F

LIGNES DIRECTRICES POUR LA RESTAURATION ACTIVE DE *POSIDONIA OCEANICA*

Ces lignes directrices ont été produites dans le cadre du "Mediterranean Posidonia Network", avec le soutien financier de l'Office Français de la Biodiversité, et la participation de tous les participants du groupe de travail "Restauration de la Posidonie" (voir la liste ci-dessous).

Akcali Baris (DEU/IMST - Tr), André Serena (Univ. Corsica – Fr), Astruch Patrick (GIS Posidonie – Fr), Bardolet Marcial (IBANAT – Sp), Bedini Roberto (IBEM Piombino – It), Bisel Kemal Can (Tr), Bockel Thomas (Andromède Océanologie – Fr), Borg Joseph A (Univ. Malta – Mt), Boudouresque Charles-François (Univ. Aix-Marseille – Fr), Boulenger Arnaud (Univ. Liège / Stareso – B/Fr), Boumaza Salima (Univ. Alger, Alg.), Buia Maria Cristina (Stazione Zoologica Anton Dohrn Napoli – It), Calvo Sebastiano (Biosurvey – It), Castejon Ines (CSIC-Sp), Delaruelle Gwenaëlle (Andromède Océanologie – Fr), Deter Julie (Andromède Océanologie – Fr), Dridi Akrem (Tn), Frau Francesca (MEDSEA Foundation - It), Gerakaris Vasilis (HCMR - Gr), Gobert Sylvie (Univ. Liège – B), Guala Ivan (IMC, International Marine Centre, Oristano – It), Jakl Zrinka (SUNCE - Cr), Karayali Onur (Ege Univ. – Tr), Macic Vesna (Univ. Montenegro - Montenegro), Mancini Gianluca (Univ. Roma – It), Mancini Ilaria (Univ. Genova – It), Molenaar Heike (Fr), Monnier Briac (Univ. Corsica – Fr), Montefalcone Monica (Univ. Genova – It), Nada Abdelkader (ISBST - Tn), Oprandi Alice (Univ. Genova – It), Pansini Arianna (Univ. Sassari – It), Papathanasiou Vasillis (Fisheries Research Institute - Gr), Peirano Andrea (ENEA – It), Pergent Gérard (Univ. Corsica – Fr), Pey Alexis (Thalassa – Fr), Piante Catherine (WWF – Fr), Piazzi Luigi (Univ. Sassari – It), Procaccini Gabriele (Stazione Zoologica Anton Dohrn Napoli – It), Poursanidis Dimitris (Foundation for Research and Technology Hellas / terraSolution m.e.r. – Gr), Robello Chiara (Univ. Genova – It), Roepstorff Jose Escaño (Medgardens – Sp), Royo Laura (Medgardens – Sp), Schies Jo-Ann (Andromède océanologie – Fr), Semroud Rachid (Univ. Alger – Alg), Terrados Jorge (CSIC-Sp), Tomasello Agostino (Univ. Palermo – It), Tursi Andrea (Univ. Bari – It), Ventura Daniele (Univ. Roma – It), Villers Frédéric (OFB - Fr), Zakhama-Sraieb Rym (Univ. Tunis/ ATUTAX - Tn), Zribi Salma (Univ. Tunis - Tn).

Les principaux contributeurs sont :

Pergent-Martini C., André S., Castejon I., Deter J., Frau F., Gerakaris V., Mancini G., Molenaar H., Montefalcone M., Oprandi A., Pergent G., Poursanidis D., Royo L., Terrados J., Tomasello A., Ventura D., Villers F.

Le document doit être cité comme suit :

Pergent-Martini C., André S., Castejon I., Deter J., Frau F., Gerakaris V., Mancini G., Molenaar H., Montefalcone M., Oprandi A., Pergent G., Poursanidis D., Royo L., Terrados J., Tomasello A., Ventura D., Villers F., 2024. Lignes directrices pour la restauration de *Posidonia oceanica*. Rapport d'accord de coopération entre l'Office Français de la Biodiversité (OFB) et l'Université de Corse Pasquale Paoli (UCPP) N°OFB-22-1310 : 29 p. + Annexes

TABLE DES MATIERES

1.	CONTEXTE, DEFINITIONS ET OBJECTIFS DES LIGNES DIRECTRICES	3
	1.A. Contexte général	3
	1.B. Définitions.....	4
	1.C. Objectifs des lignes directrices.....	5
2.	TRANSPLANTATIONS ET RESTAURATIONS OPERATIONNELLES.....	6
3.	ENSEIGNEMENTS TIRES DES EXPERIMENTATIONS PRECEDENTES	9
	3.A. Boutures (Annexe 8).....	9
	3.B. Semis (Annexe 9).....	10
4.	LIGNES DIRECTRICES POUR LES DECIDEURS.....	12
5.	RECHERCHE & DEVELOPPEMENT : QUE FAUT-IL TESTER MAINTENANT ?	14
	5.A. Disponibilité et origine du matériel de plantation.....	14
	5.B. Optimisation des conditions de transplantation	16
	5.C. Outils de suivi	18
6.	RECOMMANDATIONS GENERALES & PERSPECTIVES	19
7.	BIBLIOGRAPHIE	22

1. CONTEXTE, DEFINITIONS ET OBJECTIFS DES LIGNES DIRECTRICES

1.A. Contexte général

Posidonia oceanica (L). Delile est une Magnoliophytes marines endémique de Méditerranée qui forme de vastes herbiers (> 2 millions d'hectares) entre la surface et 40 mètres de profondeur. Cette espèce ingénieuse est la clé de voûte d'un écosystème majeur, qui offre plusieurs services écosystémiques, grâce à sa production primaire élevée (un record planétaire), sa biodiversité (1) et sa capacité à stocker et à séquestrer le carbone pendant des millénaires (2). En raison de leur rôle crucial, ces herbiers sont légalement protégés ou soumis à des réglementations spécifiques dans tous les pays méditerranéens où l'espèce est présente (3), ce qui ne garantit malheureusement pas l'absence de régression. Du fait de l'expansion des populations humaines côtières, la perte d'herbiers, sur des échelles temporelles, relativement courtes, a été signalée dans le monde entier, y compris en mer Méditerranée (4, 5). Même si une diminution de ces régressions est documentée en Europe, avec un taux de perte de surface d'herbiers marins de 27 % décennie⁻¹ observé dans les années 1980, et seulement 8,3 % décennie⁻¹ dans les années 2000 (6), d'importantes régressions localisées peuvent être observées (7, 8).

Les principales causes de régression des herbiers de Posidonie, habitat prioritaire 1120* au sens de la Directive Habitat (9), sont associées à la qualité de l'eau, à la construction d'infrastructures côtières, à la pose de pipelines et de câbles sous-marins, à l'ancrage, aux installations aquacoles et au chalutage. L'espèce est relativement résistante aux variations de température et à la compétition avec les espèces exotiques, alors qu'elle souffrirait de fluctuations même légères de la salinité et de la turbidité, ainsi que de l'augmentation du taux de sédimentation (10). En outre, *Posidonia oceanica* a un taux de croissance lent (en moyenne entre 100 et 1 000 cm par siècle), ce qui rend difficile son rétablissement en cas d'impact (1). En fait, en raison de ses caractéristiques intrinsèques et de ses besoins écologiques, les herbiers de Posidonie sont soumis à de multiples menaces dues à la pression anthropique forte et globale qui caractérise la Méditerranée. Comme la dégradation des herbiers de Posidonie concerne de nombreux pays méditerranéens, une approche régionale est nécessaire pour mieux protéger les herbiers de Posidonie. Cette approche a été initiée par le Centre d'Activités Régionales pour les Aires Spécialement Protégées (CAR/ASP) du Plan d'Action pour la Méditerranée (PNUE/PAM), qui aide les Parties contractantes à la Convention de Barcelone à remplir leurs obligations concernant le protocole ASP/DB et les plans d'action régionaux consacrés aux habitats et aux espèces menacés. Cette approche a été récemment renforcée par l'initiative du réseau méditerranéen pour la Posidonie : Mediterranean Posidonia Network (MPN). Le MPN a été initié après l'événement de mise en réseau des processus biogéographique Natura 2000 "Dehors les ancrés : atténuation des impacts anthropiques directs sur les herbiers de Posidonie" (11), organisé par le centre hellénique pour la recherche marine et supporté par la Commission européenne en 2019. L'objectif est de protéger 100 % des Posidonies menacées d'ici 2030. Le réseau regroupe 10 pays abritant des herbiers de Posidonie dans leurs eaux nationales. Le MPN vise notamment à empêcher le mouillage des navires au-dessus des herbiers de Posidonie, à partager des solutions communes à l'échelle méditerranéenne et à promouvoir des actions de sauvegarde des herbiers.

Parmi ces solutions, la première option doit être de suivre une hiérarchie d'atténuation, ce qui signifie éviter de causer des dommages, minimiser les dommages causés et appliquer des mesures de protection (12). Cependant, pour inverser les tendances négatives fortes, il est nécessaire de s'appuyer sur les restaurations écologiques, même si elles ne sont pas les premières et les meilleures options

pour la gestion de la conservation. Comme l'indiquent Gann *et al.* (13), la restauration écologique, lorsqu'elle est mise en œuvre de manière efficace et durable, contribue à i) protéger la biodiversité, ii) améliorer la santé et le bien-être humains, iii) renforcer la sécurité alimentaire et hydrique, iv) fournir des biens, des services et une prospérité économique et v) soutenir l'atténuation du changement climatique, la résilience et l'adaptation. Il s'agit d'une approche basée sur des solutions qui engage les communautés, les scientifiques, les décideurs politiques et les gestionnaires à réparer les dommages écologiques et à reconstruire une relation plus saine entre les Hommes et le reste de la nature. Associée à la conservation et à l'utilisation durable, la restauration écologique est le lien nécessaire pour faire passer les conditions environnementales locales, régionales et mondiales d'un état de dégradation continue à une amélioration positive nette.

1.B. Définitions

La "**restauration**" est le processus d'aide au **rétablissement** d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit (14). Dans le contexte de la stratégie de restauration de l'Union européenne (15), il s'agit du processus d'assistance **active ou passive** au rétablissement i) d'un écosystème vers le bon état, ii) d'un type d'habitat jusqu'au plus haut niveau de condition possible et de sa zone de référence favorable, iii) d'un habitat ou d'une espèce jusqu'à un niveau de qualité et de quantité suffisantes, ou des populations à des niveaux satisfaisants, dans le but de conserver ou d'améliorer la biodiversité et la résilience de l'écosystème. Le terme "**rétablissement**" fait référence à l'objectif des interventions de restauration écologique. Leur but est d'atteindre des conditions similaires à celles de l'état d'origine ou à celles d'un écosystème de référence, en termes de composition spécifique, de structure et de fonctionnalité. La "**restauration passive**" peut être définie comme l'atténuation des menaces humaines afin de favoriser la régénération naturelle lorsque le potentiel de rétablissement naturel est élevé, ce qui constitue l'approche la plus rentable. La "**restauration active**" est le processus qui consiste à aider activement au rétablissement ou à l'augmentation des organismes, ou des populations épuisées, par le biais d'une régénération ou d'une reconstruction assistée (13).

En termes généraux, la "**transplantation**" est définie comme l'action de relocaliser des plantes, comme des boutures de Posidonie, d'un site vers un autre ; en particulier, Calumpong & Fonseca (16) décrivent des "transplants" en se référant aux opérations de transfert de matériel végétal d'un herbier donneur vers un nouveau site receveur.

Dans ce document, "**opérationnel**", signifie que les techniques de restauration sont considérées comme les "meilleures" à ce jour. Elles présentent encore des limites, mais le retour d'expérience est suffisamment long pour valider le protocole et le pourcentage d'efficacité. Cela ne signifie pas que ces techniques permettent des mesures de compensation et/ou de transplantation à grande échelle. A l'opposé, le terme "**Recherche et Développement**" (R&D), implique de réaliser des expérimentations supplémentaires pour élargir la base de connaissance dans le but de concevoir de nouvelles techniques ou de découvrir des moyens innovants d'améliorer celles existantes.

La notion de "**succès de la restauration**" n'a pas de définition universellement acceptée. Frascchetti *et al.* (17) proposent un projet de restauration écologique très réussi lorsque les objectifs de restauration ont permis d'atteindre un taux de survie des organismes restaurés $\geq 50\%$ pour l'ensemble de la zone d'intervention. A l'inverse, un échec de restauration se caractérise par un résultat de survie $\leq 10\%$ des organismes restaurés. Dans le cas d'espèces ingénieurs à croissance lente telles que *Posidonia oceanica*, il pourrait être utile d'établir une distinction entre le "**succès de la transplantation**", qui se rapporterait à une valeur cible spécifique de survie, à atteindre dans un intervalle de temps prédéfini

après la plantation, et un "**succès de la restauration**", qui impliquerait le rétablissement de la structure de l'habitat, de la composition des espèces, du fonctionnement écologique ou des services écosystémiques qui ont été perdus dans un site spécifique, avec l'établissement de différentes cibles, en fonction de la variable ou du processus sur lequel on se concentre. Même si ces limites peuvent être utiles, il semble qu'une "**tendance de référence**", observée au niveau de l'herbier transplanté et comparée à celle d'un herbier indigène sain, pourrait être plus opérationnelle pour définir si une transplantation est réussie ou fonctionnelle (18). Le choix d'une telle "tendance de référence" dépendra de l'objectif visé, qu'il s'agisse d'une "transplantation" ou d'une "restauration", c'est-à-dire de la survie ou de la performance du matériel transplanté ou de tout autre aspect du fonctionnement écologique de la zone transplantée.

Le matériel végétal adapté à la plantation de Posidonie comprend des boutures, des mottes ou des semis. Les "**boutures**" sont prélevées sur un herbier donneur (19, 20, 21) ou collectées à partir de matériel "en épave" présent sur le fond (22, 23, 24) ou sur les plages, après des tempêtes (25) ou des activités anthropiques dommageables (comme l'ancrage ; 3, 7). Dans ce dernier cas, ils peuvent être désignés comme des "fragments" plutôt que comme des boutures. Il s'agit à la fois, de tronçon de rhizomes orthotropes ou plagiotropes avec un, deux ou plusieurs "**faisceaux**" (au sens 22, 23, 24), des "**faisceaux de feuilles**" (au sens 19, 20), ou des "**faisceaux foliaires**" (au sens 26). Les "**mottes**" (27, 28) ou "**blocs**" (au sens 29) sont des portions d'herbier comprenant des sédiments extraits du site donneur et transportés jusqu'au site receveur. Les "**semis**" peuvent être obtenus à partir de graines cultivées en aquarium et issus de fruits échoués sur les plages (30).

1.C. Objectifs des lignes directrices

Comme initié par d'autres accords internationaux ou régionaux (e.g. OSPAR, PNEU-PAM), les opérations de restauration de Magnoliophytes marines nécessite une analyse des pratiques actuellement disponibles afin d'identifier ce qui "marche" (techniques opérationnelles) et ce qui est encore considéré comme de la Recherche et Développement (R&D). Cette initiative vise à guider les politiques publiques, les gestionnaires d'Aires Marines Protégées (AMPs), les décideurs, les associations et les scientifiques. Le processus d'aide à la décision, la réglementation et les sources de financement seront différents selon que le projet de restauration est une activité opérationnelle ou de R&D.

Les principaux objectifs de ce guide de restauration sont les suivants :

- Présenter et décrire des études de cas, de mesures de restauration de la Posidonie qui ont été couronnées de succès (solutions fondées sur la nature),
- Analyser les précédentes expérimentations infructueuses afin d'identifier les causes d'échec,
- Enquêter sur les principaux sujets de R&D qui seraient nécessaires
- Et, ce faisant, élaborer des lignes directrices structurées pour la restauration de la Posidonie, comprenant les étapes successives suivantes : nécessité de restaurer, planification, sélection du site, mesures de restauration proprement dites, suivi et évaluation.

Le rapport n'aborde pas les différentes lois nationales/européennes qui peuvent être nécessaires quand on transplante des Posidonies.

2. TRANSPLANTATIONS ET RESTAURATIONS OPERATIONNELLES

Des programmes de recherche récents ont été mis en œuvre pour identifier les méthodes de restauration opérationnelle et proposer des lignes directrices pour garantir le succès de ces restaurations (comme détaillé dans les résultats du programme européen LIFE SEPOSSO – 31, 32). D'après ces publications, il existe plusieurs techniques opérationnelles de transplantation, basées sur les boutures, les mottes ou les semis. Néanmoins, actuellement, les mottes nécessitent des recherches plus approfondies (R&D), en raison du faible nombre d'expérimentations, du niveau élevé de mortalité et d'un suivi insuffisant. Même si la plantation de graines peut être considérée comme opérationnelle, son utilité est limitée par la disponibilité irrégulière des graines et possible uniquement à l'issue de floraison naturelle.

A partir des boutures, seul un très petit nombre d'expérimentations menées avant les années 2000, ont fait l'objet d'un suivi récent (Tableau 1). Les expérimentations récentes, bénéficiant d'une période de suivi suffisante pour évaluer leurs performances, restent assez limitées (33, Tableau 1). Selon les données disponibles¹, une période d'au moins quatre ans est nécessaire, à partir de l'établissement des transplants, pour évaluer le succès des expérimentations (pour plus de détails, voir les annexes 1 à 7).

Les principaux critères, communément utilisés pour évaluer le succès de la transplantation, sont le taux de survie des boutures ou des faisceaux, l'augmentation de la densité de faisceaux par m² ou de la surface du fond occupée par les faisceaux de Posidonie. Les critères utilisés pour évaluer le succès de la restauration sont plutôt la comparaison entre les critères mesurés dans un herbier sain, à proximité, et ceux observés sur le site de transplantation. Par exemple, dans l'expérimentation de Port-Cros (Tableau 1 ; Annexe 1) la densité de faisceaux par m² en 2023 (valeur moyenne : 515) est équivalente à celle observée dans les taches naturelles de Posidonie, entre et autour des transplants, à la même profondeur (valeur moyenne : 500 ; min. : 480 ; max. : 517). De même, dans le golfe de Palerme, la production primaire totale est en accord avec les estimations rapportées pour plusieurs herbiers méditerranéens.

L'analyse de ces critères (Tableau 1) montre que les résultats sont aussi différents que la diversité des conditions expérimentales :

(i) des sites correspondant à des AMPs, comme Port-Cros (Annexe 1) et Capo Carbonara (Annexe 4) et des sites anthropisés, comme Rapallo (Annexe 2), Palerme (Annexe 3) et Golfe Juan² (Annexe 7),

(ii) des transplantations effectuées à partir de boutures provenant d'un herbier donneur (par exemple Port-Cros, Rapallo, Palerme), de matériel en épave, déraciné naturellement par les tempêtes (baie de Pollenca ; Annexe 5) et/ou les éboulements de mattes (Capo Carbonara) ou de rhizomes déracinés (Golfe Juan) ou de mottes démantelées par l'ancrage des bateaux (île de Giglio ; Annexe 6),

(iii) des transplantations réalisées à faibles profondeurs (baie de Pollenca, Rapallo) et jusqu'à plus de 20 m de profondeur (île de Giglio).

Des succès significatifs ont été documentés sur des sites soumis par le passé, à des perturbations importantes (e.g Palerme) même si les résultats les plus remarquables sont observés au sein d'une

¹Ces données ne sont pas exhaustives et sont issues des discussions du groupe de travail du MPN sur la restauration.

²Golf Juan est un site Natura 2000 considéré comme une AMP en France

AMP. Les transplantations à partir de boutures issues d'un herbier donneur à une profondeur intermédiaire montrent les meilleurs résultats.

Tableau 1 : Principaux résultats des études de cas basées sur les boutures, avec un minimum de quatre années de suivi. A0 : année de mise en œuvre des expérimentations ; Am : dernière année de suivi ; Facteur multiplicateur = Am/A0 ; *boutures issues d'un herbier donneur ; **matériel en épave ; nb : nombre ; n.d. : non déterminé en raison de l'impossibilité de différencier les boutures les unes des autres ; - : pas de données ; sd : écart type standard.

Site expérimental	Paramètres	A0	Am	Facteur multiplicateur
Port-Cros*	Nb total de boutures	1988 - 1995 : 301	2023 : n.d.	
	Densité de boutures.m ⁻²	1988 - 1995 : 141 (min. 28 - Max. 849)	2023 : n.d.	
	Total nb de faisceaux	1988 - 1995 : 613	2023 : 53 400	87.1
	Densité de faisceaux.m ⁻²	1988 - 1995 : 241 (min. 99 - Max. 915)	2023 : 515 (min. 389 - Max. 725)	2.1
	Surface	1988 - 1995 : 3 m ²	2023 : 105 m ²	35.0
Rapallo*	Nb total de boutures	1996 - 1997 : 500 (200+300)	2019 : n.d.	
	Densité de boutures.m ⁻²	25	2019 : n.d.	
	Total nb de faisceaux	1996 - 1997 : 618 (mesuré à partir des 200 boutures) +600 (estimation pour 300 boutures) = 1 218	2019 : 4 567	3.8
	Densité de faisceaux.m ⁻²	1996 - 1997 : 61,8 (sur 200 boutures)	2019 : 195	3.2
	Surface	1996 - 1997 : 20 m ²	2019 : 24 m ²	1.2
Palerme*	Nb total de boutures	2008 - n 400 (=20 boutures. m ² *20 m ²)	2022 : n.d.	
	Densité de boutures.m ⁻²	2008 : 20	-	-
	Total nb de faisceaux	2008 : 1 313	2022 : 6 300	4.8
	Densité de faisceaux.m ⁻²	2008 : 66	2022 : 331.6	5.0
	Surface	20 m ²	19 m ²	1.0
Capo Carbonara AMP - Villasimius**	Nb total de boutures	2017 : 15 000	2023 : 6 500	0.4
	Densité de boutures.m ⁻²	2017 : 30	2023 : 13	0.4
	Total nb de faisceaux	-	-	
	Densité de faisceaux.m ⁻²	-	-	
	Surface	1 000 m ²	928 m ²	0.9
Baie de Pollenca**	Nb total de boutures	2018 - 2019 : 12 800	2023 : 12 010	0.9
	Densité de boutures.m ⁻²	2018 - 2019 : 16	2023 : 14 - 15	0.9
	Total nb de faisceaux	2018 - 2019 : 59 680	2023 : 4 2902	0.7
	Densité de faisceaux.m ⁻²	2018 - 2019 : 69-82	2023 : 43-63	0.6 - 0.9
	Surface	2018 - 2019 : 800 m ² dans 2 ha	800 m ² dans 2 ha	1
Île de Giglio**	Nb total de boutures	2019 - 2022 : 13 095	2023 : 11 431	0.9
	Densité de boutures.m ⁻²	2019 - 2022 : 6 ± 1 (sd)	2023 : 5 ± 1 (sd)	0.8
	Total nb de faisceaux	2019 - 2022 : 63 835	2023 : 75 612	1.2
	Densité de faisceaux.m ⁻²	2019 - 2022 : 30 ± 3 (sd)	2023 : 35 ± 2 (sd)	1.2
	Surface	-	-	
Golfe Juan**	Nb total de boutures	2019 : 5 262	2023 : 2 263	0.4
	Densité de boutures.m ⁻²	2019 : 71.9	2023 : 32.5	0.4
	Total nb de faisceaux	2019 : 16 923	2023 : 7 277	0.4
	Densité de faisceaux.m ⁻²	2019 : 225.3	2023 : 104.4	0.5
	Surface	2019 : 77.6 m ²	2023 : 69.7	0.9

Des solutions techniques opérationnelles existent donc pour réaliser des transplantations "réussies" (en termes de taux de survie des boutures au bout de trois ans ou de taux de survie des faisceaux au bout de cinq ans) dans des situations très variées. La plus grande limitation pour savoir si une transplantation est un succès est le manque d'information lié à l'évolution naturelle. En France, à titre d'exemple, les experts considèrent qu'un taux de survie des boutures (issues d'un herbier donneur) de 75 %, après trois ans, et un nombre de faisceaux, après cinq, supérieur au nombre de faisceaux après trois ans, peuvent être considérés comme un succès de transplantation. Cependant, le succès de la restauration (qui impliquera la récupération de la structure de l'habitat, de la composition en espèce, du fonctionnement écologique ou des services écosystémiques) n'a jamais été évalué et ne peut donc être quantifié, et reste du domaine de la R&D.

De même, bien que les exemples fournis concernent des surfaces limitées, dans plusieurs cas, les techniques utilisées ont ensuite été appliquées à des surfaces plus importantes (e.g. Palerme, l'île de Giglio et autres sites à proximité de Golfe Juan).

Le facteur multiplicateur, utilisé pour évaluer le niveau de réussite des expérimentations dans le temps, est plus élevé avec les boutures issues d'un herbier donneur, probablement en raison du meilleur état sanitaire des boutures (34). Cependant, en ce qui concerne les boutures issues de matériel en épave, même si ce facteur est moindre, le maintien en vie de faisceaux voués à mourir constitue néanmoins une forme de réussite d'autant plus que la récolte de faisceaux vivants est interdite dans certains pays ou fortement réglementée (3).

3. ENSEIGNEMENTS TIRES DES EXPERIMENTATIONS PRECEDENTES

Les expérimentations publiées en matière de transplantation de boutures ou de semis présentent plusieurs aspects qui peuvent être considérés comme des enseignements à prendre en compte avant d'entreprendre ce type de travaux. Afin de permettre une analyse approfondie, les publications sont, comme d'habitude, numérotées et compilées dans la bibliographie et les données principales sont synthétisées dans les annexes (Annexe 8 pour les boutures ; Annexe 9 pour les graines).

3.A. Boutures (Annexe 8)

Les éléments suivants peuvent être remarqués :

- Type et origine du matériel
 - Les transplantations de fragments avec un rhizome plagiotrope (20, 35), et en particulier ceux avec au moins trois faisceaux (un plagiotrope et au moins deux orthotropes), ont un taux de survie (19, 35, 36, 37), un taux de ramification (38) et une formation de racines (19, 36) plus élevés que les fragments uniquement orthotropes.
 - Au sein d'un rhizome orthotrope, le meilleur taux de survie se produit lorsque le fragment a au moins deux faisceaux (19, 20, 38) ou une longue section de rhizome (> 10 cm ; 39, 40).
 - Il est prouvé que les fragments de rhizomes générés par les tempêtes peuvent être utilisés pour les transplantations, sur la plage si la collecte est effectuée juste après la tempête (ce qui réduit le temps de séchage) (25) ou s'ils dérivent sous l'eau (22). Les fragments extraits de blocs d'herbier démantelé par l'ancrage de navires ou d'autres impacts mécaniques peuvent également être utilisés (23, 41).

- Conditions du site
 - Apparemment, le taux de survie augmente lorsque les fragments sont transplantés à des profondeurs moindres que celle d'origine (profondeur de récolte) (36, 42), mais *Piazzini et al.* (20) n'ont pas démontré d'effet de la profondeur d'origine des fragments. Ces résultats semblent être validés par la teneur en nutriments et en carbohydrates des transplants (42).
 - Le substrat qui maximise le taux de survie des transplants est la matrice morte, suivie des fonds sableux colonisés par *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson et/ou des macroalgues, quel que soit le type de fixation des transplants.
 - Les transplants réalisés sur du sable non végétalisé ont un taux de survie très faible après quelques mois, indépendamment des fixations. Ce type de substrat doit être écarté (22, 37, 39).

- Conditions de transplantation
 - Il faut considérer que la durabilité du système de fixation constitue l'un des points faibles du système, en particulier lorsqu'on travaille avec des fibres naturelles (22, 35).
 - Les différents systèmes de fixation comme différents types de grilles, en plastique, en fil enduit ou fibres naturelles, fixées par un cadre lourd ou sans cadre, mais fixées par des piquets ou autres, ont en général de bons résultats (19, 20, 24, 26, 36, 38), certains d'entre eux étant optimaux pour le long terme (21). L'usage de grilles métalliques nues est déconseillé (39).

- L'utilisation de fixations individuelles, agrafes ou piquets naturels ou métalliques, donnent de bons résultats (22, 23, 35, 37, 42). Certaines sont également optimales à long terme (41).
 - L'insertion de fragments dans des rochers ou des gravats, sans ancrage supplémentaire, présente un pourcentage élevé d'échec et de perte de transplants (25, 40).
 - Les transplantations réalisées pendant la phase d'activité métabolique élevée montrent un pourcentage de réussite plus élevé que celles réalisées plus tard (par exemple en août ; 43).
 - En ce qui concerne les dispositions, il y a peu de preuves à ce sujet, mais les boutures transplantées à une distance de 5 à 10 cm les unes des autres, montrent un taux de survie plus élevé (37).
- Suivi
 - Les résultats à court terme peuvent ne pas refléter les performances à long terme des transplants (21, 22, 23, 41).
 - Aucun des sites receveurs examinés par Pansini *et al.* (33), dans lesquels la présence antérieure d'un facteur de stress anthropique a été atténuée, n'a fait état d'un échec des interventions.
 - La variable de réponse la plus utilisée pour contrôler le succès de la transplantation est le taux de survie (pourcentage d'individus initialement planté) (33).

3.B. Semis (Annexe 9)

Les éléments suivants peuvent être remarqués :

- Type et origine du matériel
 - Les fruits récoltés sur la plage conviennent à la plantation après germination en aquarium (30, 44).
 - Les semis cultivés pendant deux mois en laboratoire atteignent une taille suffisante pour être plantés avec succès (30, 44, 45, 46).
- Conditions du site
 - Le substrat constitue le paramètre le plus important pour l'ancrage des semis (voir détails dans 47). La complexité et la rugosité du substrat favorisent la rétention et l'ancrage des semis (46, 48). Ainsi, les substrats végétalisés stables (c'est-à-dire les roches et la matre morte) maximisent la survie et le développement des semis (30, 44, 45, 49, 50) et des recrues naturelles (50, 51, 52). Une survie faible ou nulle des semis plantés ou des recrues naturelles est observée sur le sable (22, 53, 54) et le gravier. Ce type de substrat doit être éliminé (30, 44, 50, 51). L'utilisation de sable comme substrat de croissance pour les semis avant la plantation favorise la croissance des semis (quatre fois plus) que le maintien des semis sans substrat (verre d'aquarium) mais n'affecte pas le taux de survie (55).
 - La présence d'algues concrétionnantes (*Peyssonellia* sp. et *Lithophyllum* sp.) (50) et d'algues gazonnantes (*Halopteris* sp. et *Dilophus* sp) (52) sur des substrats rocheux ou de matre morte semble favoriser le recrutement naturel. La présence de l'algue envahissante *Caulerpa cylindracea* (Sonder) sur la matre morte augmente la survie à court terme des semis plantés (46).

- Des expérimentations sur les semis montrent des taux de survie plus élevés à des profondeurs modérées (10 m) qu'à des profondeurs plus faibles (2 m) sur de la matte morte (51), et présentent les mêmes résultats entre -12 m et -18 m à l'intérieur d'un herbier de Posidonie avec des interstices de sable (54).
 - Les semis présentent un meilleur taux de survie lorsqu'ils sont moins exposés à l'hydrodynamisme (50) et les zones peu exposées sont appropriées pour la culture des semis (50, 54, 56).
 - Les températures élevées (> 25 °C) et les salinités (> 39 PSU) diminuent le succès des semis (voir détails dans 47).
- Conditions de plantation
 - Les semis ne bénéficient pas de la fixation artificielle (30). L'association avec des macroalgues comme *Caulerpa cylindracea* ou avec l'herbier *Cymodocea nodosa* améliore la fixation des semis en augmentant la rugosité et la complexité du substrat (50).
 - Les semis bénéficient de la présence de grilles et de cages vis-à-vis de la prédation et du broutage, en particulier au cours des premiers mois suivant la plantation. Les herbivores peuvent constituer un problème, mais la protection des semis, avec des cages ou des filets, ne semble pas influencer les taux de survie et le développement (45).
 - Le niveau de plantation (au-dessus ou au-dessous du sol) n'influence pas la croissance des graines et des feuilles (30, 44, 55).
 - Il n'existe pas de données sur les meilleures dispositions à prendre pour la plantation des semis.
 - La thermo-stimulation ou "thermal-printing" (priming) en anglais, a prouvé que les semis exposés à des températures élevées dans des aquariums sont plus résistants aux températures extrêmes dans des conditions naturelles et ont des taux de croissance plus élevés (57).
 - Suivi
 - Une baisse significative de la survie ou de la densité se produit au cours de la première année, tant pour les semis plantés (30, 45, 46, 49) que pour les recrues naturelles (51, 52). La mortalité ou la réduction de la densité ralentit au cours de la deuxième et de la troisième année (30, 45, 49, 50, 51). Le délai maximum de surveillance publié est de 36 mois.

4. LIGNES DIRECTRICES POUR LES DECIDEURS

Les principales phases du processus de restauration de Posidonie concernent la planification, la mise en œuvre, le suivi et la gestion des transplantations et ont fait l'objet d'une analyse approfondie (voir plus de détails dans 32). Les points clés selon les connaissances scientifiques disponibles sont résumés ci-dessous.

On s'accorde à dire que si le succès de la transplantation dépend de nombreux facteurs, le principal est le choix des zones de transplantation, de sorte qu'un certain nombre de conditions préalables doivent être vérifiées avant d'envisager une restauration.

Éléments à privilégier lors de la réalisation d'une étude d'opportunité pour un site de transplantation :

- Avant la transplantation, il est obligatoire de s'assurer que la Posidonie a existé dans le passé sur le site.
- Il est inutile de vouloir restaurer un herbier si l'origine de sa disparition est inconnue.
- Les causes supposées de la disparition de l'herbier ont cessé d'opérer ou du moins sont sous contrôle pour permettre le maintien de la Posidonie en bonne santé.
- L'aptitude du site à la restauration de la Posidonie est attestée par des preuves de recolonisation (boutures naturelles) ou par la présence de rhizomes plagiotropes dans les parcelles d'herbier les plus proches.
- La restauration n'a pas pour but de compenser un impact évitable sur le site lié à un projet : les transplantations ne doivent pas devenir un moyen de justifier un impact qui conduit à la destruction d'un herbier naturel
- Un niveau de protection adéquat et efficace est requis avant le début de la mise en œuvre de la restauration et doit être maintenu jusqu'à la fin de la période de surveillance.
- Les réglementations et les contrôles (activités illégales, manque de respect des réglementations existantes) doivent être renforcés avant d'entamer la restauration.
- Veiller à l'application des règles de conservation des herbiers et/ou les adapter pour plus d'efficacité (sanctions, amendes) avant de restaurer.
- Afin de faciliter l'adaptation des transplants, les conditions environnementales et écologique entre le site donneur et le site receveur doivent être similaires.
- Les sites donneurs et receveurs doivent être reliés par un flux génétique minimal, garantissant leur appartenance au même groupe génétique.
- Des réunions de concertation avec les décideurs, les autorités locales, les financeurs, les gestionnaires d'AMP sont réalisées pour la conception, l'exécution, le suivi à long terme et la communication du projet.
- Une opération à grande échelle sur un site ne peut être réalisée qu'après une transplantation expérimentale de plusieurs centaines de boutures avec un suivi scientifique d'au moins trois ans, pour confirmer l'adéquation du site à la transplantation (cinq ans est le temps nécessaire pour évaluer le succès).

Matériel de transplantation :

- Les boutures issues d'un herbier donneur donnent de meilleurs résultats que les fragments issus de matériel en épave, mais ces derniers n'ont pas d'impact sur l'écosystème.
- Les graines, lorsqu'elles sont disponibles, constituent un matériel adéquat pour la transplantation.
- Il est prouvé que les boutures plagiotropes sont transplantées avec plus de succès que les orthotropes.
- Les boutures les plus appropriées doivent avoir au moins trois faisceaux (un plagiotrope et au

- moins deux orthotropes) ou une section de rhizome d'au moins 10 cm de long.
- Les boutures récoltées à la même profondeur que le site receveur ou légèrement plus profond, sont plus efficaces.
 - La plupart des restaurations réussies ont été effectuées à des profondeurs comprises entre 10 et 18 m, ce qui est considéré comme la plage de profondeur optimale où un herbier peut prospérer. Pour les boutures comme pour les semis, la meilleure option est un bon compromis entre une intensité lumineuse suffisante et un faible hydrodynamisme.
 - Le succès de la restauration augmente lorsque la proximité du site donneur diminue.
 - La complexité et la rugosité du substrat favorisent la rétention des semis et la fixation des semis et des boutures.
 - La matre morte et le sable colonisés par *Cymodocea nodosa* semblent être les substrats les plus appropriés pour les boutures, tandis que la roche et la matre morte maximisent le recrutement naturel, la croissance et la survie des semis.
 - Afin d'éviter d'endommager l'herbier donneur et d'assurer une grande représentation des génotypes, seules deux boutures par mètre carré doivent être récoltées.
 - Le printemps apparaît comme la saison la plus propice aux transplantations.
 - La plupart des échecs de transplantation sont attribués au détachement des modules de transplantation et/ou des boutures, ce point doit donc faire l'objet d'une attention particulière. A l'inverse, un ancrage artificiel n'est pas crucial pour les semis.
 - En ce qui concerne la fixation, il est recommandé d'utiliser des structures biodégradables ou des structures qui peuvent être facilement retirées après le temps nécessaire pour permettre l'ancrage (plus ou moins 3 ans).
 - Une distance de 5 à 10 cm entre les boutures semble la plus appropriée.
 - La protection des semis par des cages ou des filets peut être efficace contre les herbivores.

Suivi :

L'opération de transplantation ne peut être considérée comme réussie que lorsque les boutures ou les semis sont stabilisés, présentent une croissance persistante et montrent un processus de recolonisation actif, de sorte qu'une période de suivi est nécessaire pour évaluer cette réussite.

- Un suivi "à long terme" doit être planifié dès le début du processus.
- Il est important de prendre en compte un site de référence pour avoir une comparaison avec la tendance naturelle de la colonisation.
- Selon les expérimentations, une période de suivi d'au moins trois ans pour les graines et de cinq ans pour les boutures est nécessaire, avec une périodicité au moins annuelle.
- Le suivi doit être basé sur des descripteurs fonctionnels, faciles à mesurer, tels que : le taux de survie des unités transplantées ou de transformation des graines en plantules, le nombre de faisceaux par boutures ou de semis qui se ramifient et se transforment en petits clones, la densité de faisceaux par mètre carré, la longueur maximale des faisceaux foliaires, etc...
- Le suivi doit être effectué sur des échantillons statistiquement significatifs de matériel transplanté, à l'aide de techniques normalisées, et les méthodes non destructives doivent être privilégiées.
- Les technologies photogrammétriques sous-marines peuvent être mises en œuvre pour acquérir des informations à haute résolution et élaborer des micro-cartographies utiles pour suivre à la fois l'avancement des opérations de transplantation et la dynamique de recolonisation de la Posidonie.

En cas d'échec de la transplantation pendant la phase de suivi, les structures installées à cet effet doivent être enlevées et le site réhabilité.

5. RECHERCHE & DEVELOPPEMENT : QUE FAUT-IL TESTER MAINTENANT ?

Les expérimentations de transplantation de Posidonie se multiplient depuis une dizaine d'années, et la partie suivante ne peut être considérée comme exhaustive.

5.A. Disponibilité et origine du matériel de plantation

L'une des principales contraintes de la restauration de la Posidonie est la disponibilité de matériel pour la plantation. Si ce n'est pas un gros problème pour la "réparation" de petites sections d'herbier endommagées, ce sera certainement une limitation pour les cas réels de restauration d'herbier à grande échelle, sauf si la transplantation fait suite à l'enlèvement de plantes (par exemple, câble sous-marin, pipelines).

- Herbier donneur vs fragments en épave sur le fond marin

Les dernières transplantations ont été réalisées à l'aide de fragments de rhizomes de Posidonie soit extraits d'herbiers soit collectés auprès de populations de fragments, d'origine inconnue, trouvés dérivant sur le fond marin et généralement accumulés en lisère ou dans les trouées d'herbiers. L'avantage d'utiliser des fragments en épave est qu'ils n'endommagent pas l'herbier donneur. Toutefois, comme l'origine et l'histoire de ces fragments ne sont pas connues, il n'est pas certain que la performance de ces fragments en épave soit similaire à celle des fragments directement issus de l'herbier. **Des recherches sont donc nécessaires pour évaluer i) les performances (taux de survie, développement végétatif) des fragments en épave sur le fond marin par rapport aux boutures issues de l'herbier, et ii) les effets de l'extraction de ces boutures sur les herbiers donneurs.** Si des expérimentations sont en cours concernant la différence de performance, avec des résultats préliminaires qui montrent une légère diminution du taux de survie des boutures après un an et du nombre moyen de faisceaux par bouture (34), elles doivent être confirmées. En ce qui concerne le seuil admissible pour l'extraction de boutures d'un herbier donneur, les recommandations actuelles sur l'intensité de l'extraction (< 1 par m^2 , 58) sont basées sur quelques expérimentations non publiées (Molenaar H., communication personnelle). Dans les années 1990, à Galéria, un linéaire de 20 m de bordure d'un herbier de Posidonie à 12 m de profondeur a été marqué et une soixantaine de rhizomes plagiotropes ont été prélevés le long de cette limite. Après deux ans, tous les rhizomes prélevés avaient repoussé et il y avait environ 80 nouveaux rhizomes plagiotropes qui s'étaient ramifiés à partir des rhizomes orthotropes, situés en arrière du prélèvement initial. Plus récemment, à Monaco, une estimation de la collecte de 1 450 boutures d'herbier vivant a été réalisée. Compte tenu de la densité moyenne (300 faisceaux. m^{-2}) et de la surface occupée par l'herbier ($30\ 000$ m^2) dans la zone d'échantillonnage, la disponibilité des faisceaux est de $9\ 000\ 000$. La collecte de 1 450 boutures, avec une moyenne de 3,8 faisceaux foliaires chacune, représente moins de $5\ 600$ faisceaux, soit un prélèvement de $0,06\ \%$ des faisceaux, quantité qui peut être largement régénérée en un an dans des conditions de croissance normale (Molenaar H., communication personnelle).

- Maintient à long terme des unités de plantation

Un objectif important, lorsqu'on envisage une restauration à grande échelle, serait de ne pas dépendre de la nature pour obtenir ce matériel, mais de pouvoir le produire dans des installations désignées, ce qui est la norme pour les plantes terrestres utilisées dans les projets de reboisement ou de restauration. **L'un des principaux axes de recherche pour l'avenir consisterait à développer les connaissances en biotechnologie végétale afin de produire des unités de Posidonie viables et**

performante en milieu naturel, semblables à celles utilisées pour les opérations de plantation actuelle, et d'étendre cette procédure à une production de masse. La première étape préliminaire pourrait être d'obtenir du matériel viable pour une croissance ultérieure dans des conditions contrôlées - mésocosme (45, 59), mais aussi de pouvoir conserver ces unités de plantation, *in situ*, dans des zones spécifiques (avec des conditions optimales de conservation), dans le cas de projets de gestion d'intérêt public établi (par exemple, l'installation de câbles ou de pipelines), avant leur future transplantation. **Il s'agit d'élucider les besoins environnementaux pour l'entretien à long terme des unités de plantation**, qu'il s'agisse de graines, de semis ou de fragments de boutures, afin de produire un stock de matériel végétal collecté dans la nature chaque fois qu'il est disponible et de le sauvegarder en bon état pour le planter chaque fois que cela est nécessaire.

- Augmentation de la diversité génétique et génotypes plus efficaces

Les graines ou les semis obtenus à partir des fruits de Posidonie collectés sur les plages sont une source de matériel pour la plantation (30). Leur utilisation assure a priori une plus grande diversité génétique du matériel par rapport aux rhizomes, bien que cela mérite une évaluation quantitative. En effet, les plantes marines peuvent se reproduire à la fois par voie végétative et par voie sexuée. La propagation clonale permet aux populations de s'étendre dans l'espace, formant le plus souvent des populations monoclonales à faible diversité génétique (60). A l'inverse, la reproduction sexuée favorise l'augmentation de la diversité génétique (61) et une plus grande diversité génétique du matériel transplanté pourrait favoriser de meilleures performances (62, 63) et permettre l'émergence de populations plus résistantes et résilientes (57). En termes de restauration, le grand défi sera de choisir entre la transplantation d'individus locaux, traditionnellement considérés comme les mieux adaptés aux conditions actuelles, ou la transplantation de génotypes ajustés au climat ou issus de mélanges, qui pourraient fournir des options plus durables pour assurer la survie des herbiers restaurés, mais qui auront peut-être initialement une capacité d'adaptation moindre aux conditions environnementales locales (64). Néanmoins, l'importation de génotypes étrangers dans les sites de transplantation peut favoriser la pollution génétique, et l'évaluation de la connectivité réalisée par la population et les principaux modèles de flux de gènes permettant l'identification de la sous-structure génétique devraient être pris en considération (64).

De plus, la floraison des herbiers de Posidonie est irrégulière dans l'espace et dans le temps (65, 66) et essentiellement imprévisible. Comprendre ce qui détermine la floraison de la Posidonie est essentiel pour prédire quand les fruits seront disponibles pour la restauration. **Un sujet de recherche pertinent pour la restauration est d'élucider le mécanisme de floraison, l'état physiologique requis pour que la floraison se produise et les signaux environnementaux qui la contrôlent** (voir 61). Il semble que les températures élevées de l'eau de mer pendant l'été et/ou l'activité solaire induisent la floraison (67, 68, 69), il s'agit possiblement d'une réponse au stress thermique, ce qui suggère que la floraison pourrait être plus fréquente dans les prochaines décennies, dans le scénario de réchauffement climatique dans lequel nous sommes plongés (70).

Une autre **ligne de recherche pertinente pour la restauration, actuellement en cours de développement, consiste à identifier les populations et les génotypes de Posidonie qui se comportent mieux dans différentes conditions environnementales**, par exemple en cas de vagues de chaleur, de forte salinité, de faible disponibilité de lumière. Cela permettrait de choisir le matériel génétique et les populations les plus appropriés pour un projet de restauration en tenant compte des conditions locales, présentes ou prévues à l'avenir (57). Les initiatives qui vont déjà dans ce sens sont les études de Marín-Guirao *et al.* (71, 72), Bennet *et al.* (73) et Stipcich *et al.* (74) concernant les

tolérances à la chaleur contrastées des différentes populations de *P. oceanica* et celles de Dattolo *et al.* (75) et Pazzaglia *et al.* (57, 76) sur les possibilités d'acclimatation au stress thermique de cette espèce.

L'intégration des techniques d'évolution assistée (e.g. priming, 57, 77, 78) et des connaissances épigénétiques dans les pratiques de restauration des phanérogames marines pourrait devenir, dans les années à venir, un aspect important pour améliorer le taux de réussite et renforcer les capacités de résilience des transplants (79 ; Fig. 1).

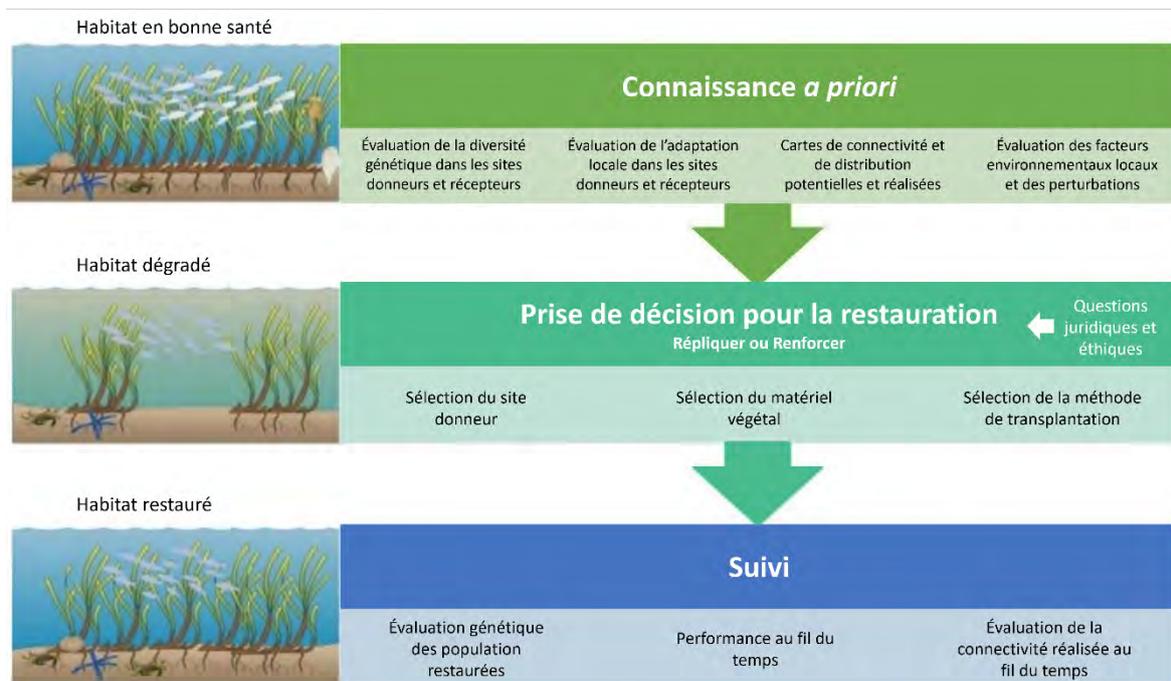


Fig. 1 : Diagramme montrant les différents aspects de la restauration des herbiers marins, en mettant l'accent sur l'intégration de l'analyse de la diversité génétique dans les différentes étapes (d'après 64 ; https://www.mdpi.com/water/water-13-00829/article_deploy/html/images/water-13-00829-g001.png).

5.B. Optimisation des conditions de transplantation

- Relation plante-sédiment

Si la matre morte est considérée comme l'un des meilleurs substrats pour la croissance de la Posidonie, plusieurs études soulignent d'importantes variations spatiales à la fois pour les transplantations de boutures mais aussi lors de la recolonisation naturelle de l'herbier (80, Molenaar H., communication personnelle). Ainsi, les concentrations en hydrogène sulfuré restent élevées, pendant une longue période, suite à la dégradation de l'herbier (80) et pourraient limiter la croissance des boutures et/ou des plantes naturelles (81). L'interaction plante/sédiment mérite une attention particulière afin d'optimiser les chances de succès d'une transplantation ; des travaux sont en cours intégrant cet aspect mais aussi la caractérisation des communautés bactériennes fixatrices d'azote qui pourraient être impliquées dans la croissance de la Posidonie (82, Boulenger A., communication personnelle). L'étude de l'association des herbiers marins avec des bivalves porteurs de communautés bactériennes fixatrices d'azote montre également le potentiel d'amélioration des performances de transplantation en mettant en œuvre des associations bénéfiques (83).

- Amélioration de la fixation des transplants

Comme déjà établi précédemment, la fixation du transplant sur le fond marin est une question clé dans la mise en œuvre des transplantations. Différentes solutions ont été testées (31) et sont fonctionnelles mais seules certaines d'entre elles peuvent être considérées comme durables (58) et faciles à enlever lorsque les systèmes de fixation naturelle se développent et deviennent opérationnels. Par ailleurs, plusieurs aspects doivent encore être testés ou sont en cours de réalisation afin d'améliorer ces procédés, tant pour les boutures que pour les graines. L'utilisation de filets/nappes de fibres biodégradables pour faciliter l'ancrage du matériel de transplantation est l'un d'entre eux (24 ; programme RenforC 2023 – Pergent G., communication personnelle). Cette technique s'inspire de la série évolutive de l'herbier où les espèces pionnières construisent un réseau de racines et de stolons pour piéger les boutures en épave et faciliter leur fixation au substrat (84). Une comparaison dans les mêmes conditions expérimentales (site, nature et origine des transplants) est en cours pour évaluer l'intérêt de cette approche (e.g. programme RenforC 2023 – Pergent G., communication personnelle).

De même, d'autres expérimentations sont en cours pour identifier les meilleures fibres/structures pour les filets/nappes ou pour tester l'utilisation de structures d'établissement biodégradables (e.g. 85, programme REPOSEED – 82, REPAIR Project – Boulenger A., communication personnelle).

Les semis de Posidonie sont capables de s'établir sur un substrat rocheux (50, 52, 86) et les herbiers de Posidonie peu profonds (profondeur < 10 m) sont commun sur les côtes rocheuses. Les études sur la morphologie des poils racinaire et l'attachement des semis au substrat (48, 87, 88) sont des étapes préliminaires pour concevoir une méthodologie de transplantation dans les substrats rocheux. Balestri *et al.* (86) et Guerrero-Meseguer *et al.* (55) ont montré que les racines des semis présentent une plasticité morphologique, en fonction du substrat dans lequel elles poussent, qui pourrait être exploitée à cette fin. Des expérimentations sur fonds rocheux sont en cours tant pour les graines (86) que pour les boutures (voir aussi les compléments dans 31, 40, 91). Néanmoins, une amélioration de ces techniques est indispensable pour réaliser des transplantations sur substrats rocheux, tant en ce qui concerne l'élément d'ancrage, réalisé avec une structure radiale en béton armé à cinq bras (Calvo *et al.*, dans 31), qu'avec les gabions grillagés, remplis de pierres concassées de taille appropriée (40).

- Design de la transplantation

Il conviendrait de passer d'une recherche, visant à produire les conditions nécessaires pour répondre aux différentes contraintes liées à la plantation de vaste surface, à de futures recherches, qui devraient se concentrer sur i) l'évaluation de la récupération des fonctions écologiques dans les zones transplantées, et ii) du temps nécessaire pour y parvenir, c'est-à-dire du réel succès de la restauration. Des recherches supplémentaires doivent être menées pour quantifier le développement à moyen et à long terme des unités plantées et pour déterminer comment le design de la plantation peut améliorer ce développement à long terme. La disposition géométrique des transplants pendant la phase de positionnement peut être d'une importance cruciale. Ces géométries peuvent être spécifiques à chaque technique, mais doivent généralement permettre de créer des noyaux de recolonisation capables de se rejoindre et de former un herbier continu au fil du temps. En ce qui concerne cet aspect, les études fondamentales sont celles de Molenaar et Meinesz (37) sur la disposition spatiale et la distance entre les fragments plantés. Cela nécessite des expérimentations à long terme et donc l'ajout d'une composante de suivi à long terme aux plantations effectuées. Il reste encore à évaluer la récupération du fonctionnement écologique (temps, structure interne de l'herbier - densité et taille des faisceaux), étendue requise), qui variera en fonction de l'objectif étudié (par exemple, comparer le rétablissement de l'habitat pour l'épifaune avec l'atténuation des vagues ou le stockage à long terme du carbone dans les sédiments). Compte tenu de la lenteur de la croissance de la Posidonie, des

recherches incluant des substitutions espace-temps, c'est-à-dire incluant plusieurs expérimentations sur le même site permettant d'avoir plusieurs résultats dans la même période de temps, sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Une expérimentation récente (e.g. programme RenforC 2023 – Pergent G., communication personnelle) a été menée en 2023 pour comparer plusieurs modèles de plantation afin d'optimiser cet aspect (densité, distance ou disposition entre les boutures).

- Protection contre les herbivores

La protection des transplants contre la pression des herbivores constitue également un axe de recherche particulièrement intéressant. En effet, cet impact peut conduire à un surpâturage des boutures et surtout des semis qui peut conduire à un échec de l'expérimentation (86). La mise en place de structures spécifiques doit assurer une protection efficace des transplants contre les herbivores mais aussi permettre un bon renouvellement de l'eau et plus généralement assurer le maintien des conditions environnementales (lumière, teneur en nutriments, sédimentation, etc.). Des essais de protection des semis ont été initiés, suite à la floraison massive de 2022, et les résultats préliminaires sont encourageants (programmes REPOSEED et RenforC - 86).

5.C. Outils de suivi

Aujourd'hui, le suivi des opérations de transplantation nécessite de nouveaux outils capables de certifier de manière irréfutable l'étendue des interventions et leur position dans l'espace, afin que toute personne (scientifiques, techniciens, etc.) puisse vérifier à tout moment l'efficacité et la performance de ces opérations. Les technologies de photogrammétrie sous-marines offrent des outils pour acquérir et restituer des informations de manière extrêmement précise afin de suivre la dynamique de la restauration de la Posidonie, en la contextualisant dans une représentation cartographique. Des technologies de cartographie précises et à très haute résolution sont nécessaires (92). L'intégration d'images sous-marines à haute résolution spatiale avec la technique d'analyse d'image orientée objet (OBIA) permet de compter les fragments de Posidonie transplantés et d'estimer la couverture du fond exprimée en pourcentage du fond marin couvert par ces fragments (92, 93). Cependant, le temps total nécessaire au traitement des données, qui dépend de la résolution, de la qualité et du nombre d'images acquises, reste très élevé, et pour les grandes surfaces, la photogrammétrie nécessite une puissance de calcul importante pour générer des produits à haute résolution (92). Ces limitations existantes devront être résolues afin de proposer des protocoles de suivi standardisés efficaces pour les futures actions de restauration des herbiers marins.

6. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES & PERSPECTIVES

Au vu de l'expérience acquise (parties 2 & 3), quelques lignes directrices ont été formulées (partie 4) et plusieurs projets de R&D évoqués (partie 5). Il convient néanmoins de rappeler un certain nombre de recommandations générales qui devraient être systématiquement prises en considération, avant d'envisager ou de réaliser des transplantations de Posidonie (Fig. 2) :

- La priorité doit toujours être donnée à la conservation et à la protection des herbiers de Posidonie existants, car ces actions sont souvent plus rentables et plus efficaces que les efforts de restauration.
- La restauration ne peut pas remplacer la conservation, elle doit être considérée comme une action complémentaire et doit être envisagée en synergie avec celle-ci.
- Les efforts de restauration ne doivent pas se limiter à la plantation active, mais doivent aussi adresser en priorité l'élimination ou la réduction des pressions et des facteurs de stress qui pèsent sur les herbiers marins. Cette approche, également appelée restauration passive ou restauration assistée, est la première étape d'un projet de restauration et fait partie intégrante d'un rétablissement réussi.
- Des solutions techniques opérationnelles sont disponibles pour réaliser des transplantations "réussies" (en termes de taux de survie des boutures après cinq ans) dans un large éventail de situations. La plus grande limitation pour évaluer si une transplantation est un succès est le manque d'informations relatif à l'évolution naturelle. *En France, par exemple, les experts considèrent qu'un taux de survie des boutures, issues d'un herbier donneur, de 75 % après trois ans, et un nombre de faisceaux après cinq ans supérieur au nombre de faisceaux après trois ans, peut être considéré comme un succès de transplantation.*
- Cependant, le succès de la restauration (qui impliquerait le rétablissement de la structure de l'habitat, de la composition en espèce, du fonctionnement écologique ou des services écosystémiques) n'a jamais été évalué, ne peut donc pas être quantifié jusqu'à présent et doit être considéré comme un projet de R&D.
- Une opération à grande échelle ne peut être envisagée qu'après une transplantation expérimentale de plusieurs centaines de boutures sur le site receveur avec un suivi scientifique d'au moins trois ans démontrant l'aptitude du site à la transplantation.
- Une restauration active réussie doit nécessairement intégrer pendant la phase de planification la mise en œuvre de mesures de protection continue et le contrôle associé. Ce contrôle / surveillance doit être effectué, non seulement pendant la phase de mise en œuvre mais aussi après, afin que ces zones restaurées ne soient pas exposées à de nouvelles menaces ou dégradations.
- L'évaluation du coût de la restauration active est complexe, en raison de l'absence de norme : la densité des faisceaux au m² n'est pas toujours la même, la profondeur est différente, etc. Le coût doit englober le coût de la restauration passive et de la surveillance ou du suivi associé.
- La restauration active de la Posidonie ne doit pas être considérée comme une mesure compensatoire pour les projets qui ont un impact négatif sur les écosystèmes des herbiers marins. La compensation suppose, au minimum, de pouvoir équilibrer les pertes dues à la dégradation ou à la destruction d'un herbier, en termes de diversité biologique, de fonctionnalité ou de services écosystémiques, par les gains réalisés par le nouvel herbier transplanté. Cela suppose un véritable "succès de restauration" avec un succès complet à court terme des transplantations, suivi de la récupération de toutes les fonctions et services écologiques, ce qui, jusqu'à présent, n'a jamais été observé, même en tenant compte des expériences les plus longues. Cela étant, à l'heure actuelle, il est donc essentiel d'éviter autant que possible ce type de projets et de prévenir leurs impacts négatifs par une planification responsable et la mise en œuvre d'actions d'atténuation.

- Les porteurs de projets de restauration doivent consulter les autorités environnementales responsables avant de commencer les projets, pour connaître les autorisations potentielles requises dans le pays du site.
- L'implication de toutes les parties prenantes (décideurs, utilisateurs, financeurs) est essentielle, non seulement pour la conception et l'exécution du projet mais aussi pour le suivi à long terme et la réussite éventuelle de celui-ci.
- Dans le cadre de projets de développement d'utilité publique, les restaurations peuvent être envisagées, au cas par cas, comme une mesure additionnelle à l'issue de la procédure "Eviter, Réduire, Compenser" et accompagné d'un suivi obligatoire d'au moins 10 ans et/ou aussi longtemps que les impacts du projet sur la Posidonie.
- Dans les pays où la destruction des herbiers de Posidonie est interdite par la loi ou par d'autres réglementations, sur la base du principe du "pollueur-payeur", les restaurations doivent être considérées par le tribunal comme une mesure de réparation ("arracheur-plantateur") avec une priorité donnée à la restauration passive et à la surveillance associée du site (car la récupération de toutes les fonctions et services écologiques par la restauration active est toujours considérée comme de la R&D).
- Il est important d'encourager la prise en compte de la connectivité de l'habitat dans la planification de la restauration. Des herbiers de Posidonie sains et bien connectés peuvent améliorer la biodiversité et la résilience des écosystèmes.
- De même, lors de la planification des stratégies de restauration et de conservation, une approche holistique de la gestion des herbiers marins, qui intègre la qualité de l'eau, la sédimentation et les habitats adjacents, doit être privilégiée.
- Des efforts continus de recherche et de surveillance sont nécessaires pour améliorer notre compréhension des écosystèmes de Posidonie, y compris leur dynamique, leurs faiblesses et leurs processus de rétablissement. Ces connaissances peuvent éclairer une meilleure prise de décision.
- Compte tenu du fait que la Posidonie est une espèce à longue durée de vie, la restauration de l'écosystème ne peut être envisagée que par un engagement à long terme. Les projets de restauration peuvent prendre des années avant de produire des résultats significatifs, et un entretien continu est souvent nécessaire.
- Des moyens financiers appropriés et des ressources suffisantes pour mener des actions de conservation et de restauration doivent être alloués au regard des services écosystémiques fournis.

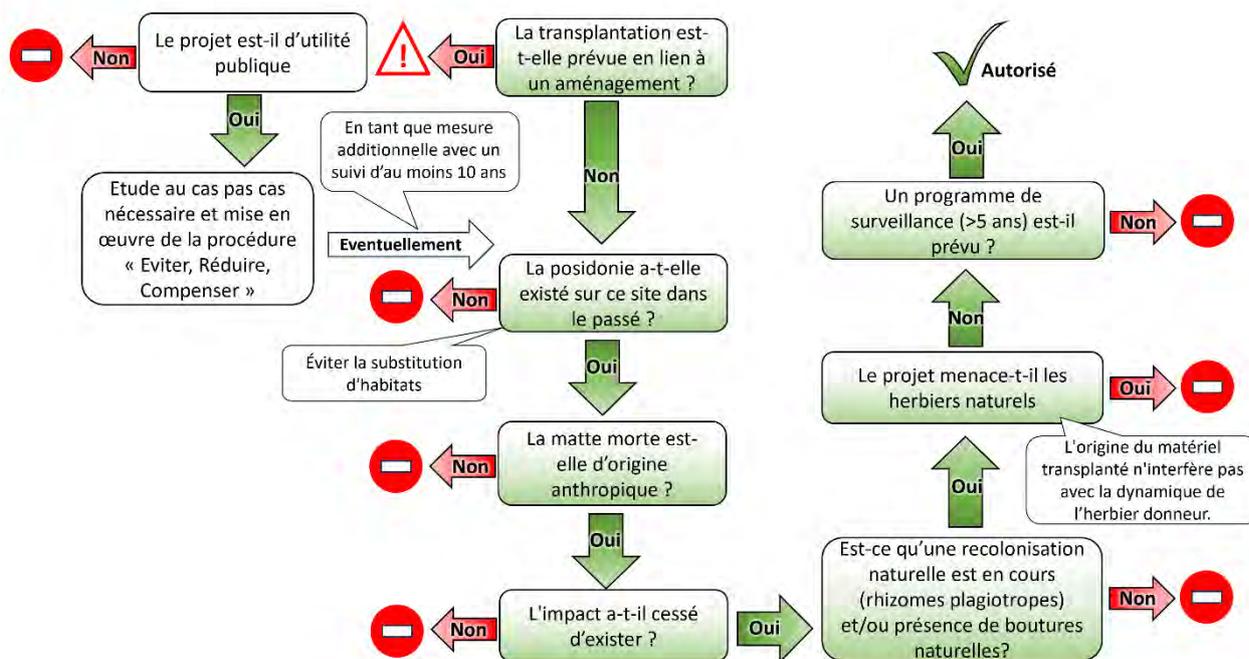


Fig. 2 : Diagramme montrant les principales considérations qui doivent être prises en compte pour autoriser une transplantation de Posidonie.

Il est donc important de garder à l'esprit que la restauration des herbiers de Posidonie est nécessairement une activité à long terme, qui peut être coûteuse et doit être incluse dans une approche de gestion globale. En outre, plusieurs éléments doivent être étudiés dans les futures activités de R&D afin d'améliorer : la sélection du site, la performance du matériel de plantation, la disponibilité dans le cadre d'un projet à grande échelle, l'efficacité des techniques de transplantation, les outils de suivi, etc., ou de déterminer les conditions préalables nécessaires pour obtenir une véritable restauration de l'écosystème (durée, résultats, critères de suivi). Le principal défi sera d'identifier, puis de résoudre tous ces aspects afin de rendre opérationnelle la restauration de l'écosystème des Posidonies, dans un contexte de changement climatique.

7. BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Boudouresque, C.F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., Tunesi, L. (2012). Protection and conservation of *Posidonia oceanica* meadows. RAMOGE & RAC/SPA publisher, Tunis: 202 p.
- 2 - Monnier, B., Pergent, G., Mateo, M.Á., Clabaut, P., Pergent-Martini, C. (2022). Quantification of blue carbon stocks associated with *Posidonia oceanica* seagrass meadows in Corsica (NW Mediterranean). *Science of The Total Environment*, 838: 155864. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155864>.
- 3 - Pergent-Martini, C., Bouafif, C., Burzio, P., Rais, C., Torchia, G., Maganza, A., Bezzo, T., Sohlobji, E., Villers, F. (2022). Anchoring on *Posidonia oceanica* meadows: Synthesis on the existing regulations and distribution maps as a benchmark for action in the Mediterranean. In “*Proceedings of the 7th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation*” (Genoa, Italy, 19-20 September 2022), Bouafif C. & Ouerghi A. edits, SPA/RAC publ., Tunis: 143-148.
- 4 - Marbà, M., Duarte, C.M., Díaz-Almela, E., Terrados, J., Álvarez, E., Martínez, R., Santiago, R., Gacia, E., Grau, A.M. (2005). Direct evidence of imbalanced seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot population dynamics in the Spanish Mediterranean. *Estuaries*, 28(1). [10.1007/BF02732753](https://doi.org/10.1007/BF02732753).
- 5 - Waycott, M., Duarte, C.M., Carruthers, T.J.B., Orth, R.J., Dennison, W.C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J.W., Heck, K.L., Randall Hughes, A. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems ». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30): 12377-81.
- 6 - de Los Santos, C.B., Krause-Jensen, D., Alcoverro, T., Marbà, N., Duarte, C.M., Van Katwijk, M.M., Pérez, M., Romero, J., Sánchez-Lizaso, J.L., Roca, G., *et al.* (2019). Recent trend reversal for declining European seagrass meadows. *Nature Communications* [en ligne]. Décembre 2019, 10(1). DOI [10.1038/s41467-019-11340-4](https://doi.org/10.1038/s41467-019-11340-4).
- 7 - Deter, J., Lozupone, X., Inacio, A., Boissery, P., Holon, F. (2017). Boat anchoring pressure on coastal seabed: Quantification and bias estimation using AIS data. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2): 175-81. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.065>.
- 8 - Pergent-Martini, C., Monnier, B., Lehmann, L., Barralon, E., Pergent, G. (2022). Major regression of *Posidonia oceanica* meadows in relation with recreational boat anchoring: A case study from Sant’Amanza bay. *Journal of Sea Research*, 188: 102258.
- 9 – EC (1992). Council Directive 92/43/EEC of the European Council of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. Official journal of EC, N°L206/7.
- 10 - Pergent, G., Bazairi, H., Bianchi, C.N., Boudouresque, C.F., Buia, M.C., Clabaut, P., Harmelin-Vivien, M., Mateo, M.A., Montefalcone, M., Morri, C., *et al.* (2012). Resilience and Contribution to Climate Change Mitigation, A Short Summary IUCN pub. Gland, Switzerland and Málaga, Spain, 40 p.
- 11 – Salomidi, M., Issaris, Y, Nikolic, V. (2020). A roadmap for protecting *Posidonia* meadows. Report of the Natura 2000 Biogeographical Process Networking Event “Anchors Away: Mitigating Direct Anthropogenic Impacts on *Posidonia* beds”.
- 12- Jacob, C., Buffard, A., Pioch, S., Thorin, S. (2018). Marine ecosystem restoration and biodiversity offset. *Marine Policy*, 120: 585-594.

- 13 - Gann, G.D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C.R., Jonson, J., Hallett, J.G., Eisenberg, C., Guariguata, M.R., Liu, J., *et al.* (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46.
- 14 - SER (2004). Society for Ecological Restoration international's primer of ecological restoration (available from <http://www.ser.org/resources/resources-detail-view/ser-international-primer-on-ecological-restoration>)
- 15 - EC (2022). Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on nature restoration. European Commission, COM (2022) 304 final, Brussels, 22.6.2022. CE, 2022.
- 16 - Calumpong, H.P., Fonseca, M.S. (2001). Seagrass transplantation and other seagrass restoration methods. In: *Global Seagrass Research Methods*. Eds: Short F.T. and Coles R.G., Elsevier Science publ., 22: 425-442.
- 17 - Frascchetti, S., McOwen, C., Papa, L., Papadopoulou, N., Bilan, M., Boström, C., Capdevila, P., Carreiro-Silva, M., Carugati, L., Cebrian, E., *et al.* (2021). Where Is More Important Than How in Coastal and Marine Ecosystems Restoration. *Frontiers in Marine Science*, 8: 626843. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.626843>.
- 18 - Calvo, S., Calvo, R., Luzzu, F., Raimondi, V., Assenzo, M., Cassetti, F. P., Tomasello, A. (2021). Performance assessment of *Posidonia oceanica* (L.) Delile restoration experiment on dead mat twelve years after planting—structural and functional meadow features. *Water*, 13(5): 724.
- 19 - Molenaar, H., Meinesz, A., Caye, G. (1993). Vegetative reproduction in *Posidonia oceanica*. Survival and development in different morphological types of transplanted cuttings. *Botanica Marina*, 36(6) : 481-488.
- 20 - Piazzzi, L., Balestri, E., Magri, M., Cinelli, F. (1998). Experimental transplanting of *Posidonia oceanica* (L.) Delile into a disturbed habitat in the Mediterranean Sea. *Botanica Marina*, 41: 593-601.
- 21 - Pirrotta, M., Tomasello, A., Scannavino, A., Di Maida, G., Luzzu, F., Bellissimo, G., Bellavia, C., Costantini, C., Orestano, C., Sclafani, G., *et al.* (2015). Transplantation assessment of degraded *Posidonia oceanica* habitats: Site selection and long-term monitoring. *Mediterranean Marine Science*, 16, 591–604. doi: 10.12681/mms.1045.
- 22 - Castejón-Silvo, I., Terrados, J. (2021). Poor success of seagrass *Posidonia oceanica* transplanting in a meadow disturbed by power line burial. *Marine Environmental Research*, 170: 105406.
- 23 - Mancini, G., Casoli, E., Ventura, D., Lasinio, G. J., Belluscio, A., Ardizzone, G.D. (2021). An experimental investigation aimed at validating a seagrass restoration protocol based on transplantation. *Biological Conservation*, 264: 109397.
- 24 - Piazzzi, L., Acunto, S., Frau, F., Atzori, F., Cinti, M. F., Leone, L., Ceccherelli, G. (2021). Environmental engineering techniques to restore degraded *Posidonia oceanica* meadows. *Water*, 13(5): 661.
- 25 - Balestri, E., Vallerini, F., Lardicci, C. (2011). Storm-generated fragments of the seagrass *Posidonia oceanica* from beach wrack - A potential source of transplants for restoration. *Biological Conservation*, 144(5): 1644-1654.
- 26 - Augier, H., Eugene, C., Harmand-Desforges, J.M., Sougy, A. (1996). *Posidonia oceanica* re-implantation technology of the marine gardeners is now operational on a large scale. *Ocean and Coastal Management*, 30: 297–307.

- 27 - Descamp, P., Cornu, T., Bougerol, M., Boissery, P., Ferlat, C., Delaruelle, G., Deter, J., Gobert, S. (2017). Experimental transplantation of *Posidonia oceanica*. . In Ozhan E. (Ed.), *13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation*, Mellieha, Malta - 31 oct. - 4 Nov 2017: 471-482.
- 28 - Bedini R., Bedini M., Salvadori E. (2020). A new transplanting method of *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, 1813 plants. Eighth International Symposium “*Monitoring of Mediterranean Coastal Areas. Problems and Measurement Techniques*” Firenze University Press: 492-500.
- 29 - Sánchez-Lizaso, J.L., Fernández-Torquemada, Y., González-Correa, J.M. (2009). Evaluation of the viability of *Posidonia oceanica* transplants associated with a marina expansion. *Botanica Marina*, 52(5): 471-476.
- 30 - Terrados, J., Marin, A., Celdran, D. (2013). Use of *Posidonia oceanica* seedlings from beach-cast fruits for seagrass planting. *Botanica Marina*, 56(2): 185-195.
- 31 - Bacci, T., La Porta, B. (2021). Manual of techniques and procedures for the transplantation of *Posidonia oceanica*. LIFE SEPOSSO (LIFE 16 GIE/IT/000761), Rome - Italy.
- 32 - La Porta, B., Bacci, T. (2022). Manual for the planning, implementation and monitoring of transplantation of *Posidonia oceanica*. LIFE SEPOSSO (LIFE16 GIE/IT/000761), Rome – Italy.
- 33 - Pansini, A., Bosch-Belmar, M., Berlino, M., Sara, G., Ceccherelli, G. (2022). Collating evidence on the restoration efforts of the seagrass *Posidonia oceanica*: Current knowledge and gaps ». *Science of the Total Environment*, 851: 158320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158320>.
- 34 - Pergent, G., Pergent-Martini, C., Monnier, B., Acunto, S., Andre, S., Barralon, E., Boudouresque, C.F., Calvo, S., Castejón-Silvo, I., Culioli, J.M., *et al.* submitted. Comparison and optimization of *Posidonia oceanica* meadows strengthening protocols. In 2024 World Seagrass Conference & 15th International Seagrass Biology Workshop “*Seagrass in the Anthropocene*” - Napoli, Italy, June 17th to June 21st, 2024.
- 35 - Ward, E.A., Meek, S.K., Gordon, D.M., Cameron, T.C., Steer, D. J., Ward, E.A., Meek, S.K., Gordon, D.M., Cameron, T.C., Steer, M.D., *et al.* (2020). The use of storm fragments and biodegradable replanting methods allows for a low-impact habitat restoration method of seagrass meadows, in the eastern Aegean Sea. *Conservation Evidence*, 17: 1-6.
- 36 - Molenaar, H., Meinesz, A. (1992). Vegetative Reproduction in *Posidonia oceanica*: II. Effects of Depth Changes on Transplanted Orthotopic Shoots. *P.S.Z.N.I.: Marine Ecology*, 13(2): 175-185.
- 37 - Molenaar, H., Meinesz, A. (1995). Vegetative reproduction in *Posidonia oceanica*: survival and development of transplanted cuttings according to different spacings, arrangements and substrates. *Botanica Marina*, 38: 313-322.
- 38 - Meinesz, A., Molenaar, H., Bellone, E., Loques, F. (1992). Vegetative reproduction in *Posidonia oceanica*: I. Effects of rhizome length and transplantation season in orthotopic shoots. *P.S.Z.N.I.: Marine Ecology*, 13(2): 163-174.
- 39 - Vangeluwe, D., Lepoint, G., Bouquegneau, J. M., Gobert, S. (2004). Effect of transplantation on *Posidonia oceanica* shoots. *Vie et Milieu*, 54(4): 223-230.

- 40 - Alagna, A., D'Anna, G., Musco, L., Vega Fernández, T., Gresta, M., Pierozzi, N., Badalamenti, F. (2019). Taking advantage of seagrass recovery potential to develop novel and effective meadow rehabilitation methods. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110578.
- 41 - Mancini, G., Ventura, D., Casoli, E., Belluscio, A., Ardizzone, G.D. (2022). Transplantation on a *Posidonia oceanica* meadow to facilitate its recovery after the Concordia shipwrecking. *Marine Pollution Bulletin*, 179: 113683.
- 42 - Genot, I., Caye, G., Meinesz, A., Orlandini, M. (1994). Role of chlorophyll and carbohydrate contents in survival of *Posidonia oceanica* cuttings transplanted to different depths. *Marine Biology*, 119: 23–29.
- 43 - Maggi, P. (1973). Le problème de la disparition des herbiers à Posidonies dans le golfe de Giens (Var). *Science et Pêche*, 221: 7-20.
- 44 - Domínguez, M., Celdrán, D., Muñoz-Vera, A., Infantes, E., Martínez-Baños, P., Marín, A., Terrados, J. (2012). Experimental Evaluation of the Restoration Capacity of a Fish-Farm Impacted Area with *Posidonia oceanica* (L.) Delile Seedlings. *Restoration Ecology*, 20(2): 180-187.
- 45 - Balestri, E., Piazzì, L., Cinelli, F. (1998). Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in a damaged coastal area. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 28(2): 209-225.
- 46 - Pereda-Briones, L., Tomas, F., Terrados, J. (2018). Field transplantation of seagrass (*Posidonia oceanica*) seedlings: Effects of invasive algae and nutrients. *Marine Pollution bulletin*, 134, 160-165.
- 47 - Escandell-Westcott, A., Riera, R., Hernández-Muñoz, N. (2023). *Posidonia oceanica* Restoration Review: Factors Affecting Seedlings. *Journal of Sea Research*, 191, 102337. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102337>.
- 48 - Alagna, A., Fernández, T. V., D'Anna, G., Magliola, C., Mazzola, S., Badalamenti, F. (2015). Assessing *Posidonia oceanica* seedling substrate preference: An experimental determination of seedling anchorage success in rocky vs. sandy substrates. *PLoS ONE*, 10(4): e0125321.
- 49 - Meinesz, A., Caye, G., Loques, F., Molenaar, H. (1993). Polymorphism and development of *Posidonia oceanica* transplanted from different parts of the Mediterranean into the National Park of Port-Cros. *Botanica Marina*, 36: 47. <https://doi.org/10.1515/botm.1993.36.3.209>.
- 50 - Pereda-Briones, L., Terrados, J., Agulles, M., Tomas, F. (2020). Influence of biotic and abiotic factors of seagrass *Posidonia oceanica* recruitment: identifying suitable microsites. *Marine Environmental Research*, 162: 105076.
- 51 - Piazzì, L., Acunto, S., Cinelli, F. (1999). In situ survival and development of *Posidonia oceanica* (L.) Delile seedlings. *Aquatic Botany*, 63(2), 103-112.
- 52 - Alagna, A., Fernández, T. V., Terlizzi, A., Badalamenti, F. (2013). Influence of microhabitat on seedling survival and growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 119: 119-125.
- 53 - Balestri, E., Lardicci, C. (2008). First Evidence of a Massive Recruitment Event in *Posidonia oceanica*: Spatial Variation in First-Year Seedling Abundance on a Heterogeneous Substrate. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76, 634–641. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.07.048>.

- 54 - Infantes, E., Orfila, A., Bouma, T.J., Simarro, G., Terrados, J. (2011). *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* seedling tolerance to wave exposure. *Limnology and Oceanography*, 56(6): 2223-2232.
- 55 - Guerrero-Meseguer, L., Sanz-Lázaro, C., Marín, A. (2018). Understanding the sexual recruitment of one of the oldest and largest organisms on Earth, the seagrass *Posidonia oceanica*. Bianchi, C.N., Ed., *PLOS ONE*, 13, e0207345. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207345>.
- 56 - Zenone, A., Badalamenti, F., Alagna, A., Gorb, S.N., Infantes, E. (2022) Assessing Tolerance to the Hydrodynamic Exposure of *Posidonia oceanica* Seedlings Anchored to Rocky Substrates. *Frontiers in Marine Science*, 8, 788448. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.788448>.
- 57 - Pazzaglia, J., Badalamenti, F., Bernardeau-Esteller, J., Ruiz, J.M., Giacalone, V.M., Procaccini, G., Marín-Guirao, L. (2022). Thermo-Priming Increases Heat-Stress Tolerance in Seedlings of the Mediterranean Seagrass *P. oceanica*. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113164. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113164>.
- 58 - Boudouresque, C. F., Blanfuné, A., Pergent, G., Thibaut, T. (2021). Restoration of seagrass meadows in the Mediterranean Sea: a critical review of effectiveness and ethical issues. *Water*, 13(8): 1034.
- 59 - Carrasco-Acosta, M., Garcia-Jimenez, P. (2021). Maintaining and Storing Encapsulated Cells for Propagation of *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Aquatic Biology*, 30, 47–57. <https://doi.org/10.3354/ab00740>.
- 60 - Arnaud-Haond, S., Duarte, C.M., Diaz-Almela, E., Marbà N., Sintes, T., Serrao, E.A. (2012). Implications of Extreme Life Span in Clonal Organisms: Millenary Clones in Meadows of the Threatened Seagrass *Posidonia oceanica*. *Plos One*, 7, e30454–e30454.
- 61 - Jahnke, M., Pagès, J.F., Alcoverro, T., Lavery, P.S., McMahan, K.M. and Procaccini, G. (2015). Should We Sync? Seascape-level Genetic and Ecological Factors Determine Seagrass Flowering Patterns. Rafferty, N., Ed., *Journal of Ecology*, **103**, 1464–1474. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12470>.
- 62 - Procaccini, G., Piazzini, L. (2001). Genetic polymorphism and transplantation success in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Restoration Ecology*, 9(3): 332-338.
- 63 – Pazzaglia, J., Reusch, T.B.H., Terlizzi, A., Marín Guirao, L., Procaccini, G. (2021). Phenotypic plasticity under rapid global changes: the intrinsic force for future seagrasses survival. *Evolutionary Applications*, 14:1181–1201. DOI: 10.1111/eva.13212.
- 64 - Pazzaglia, J., Nguyen, H.M., Santillán-Sarmiento, A., Ruocco, M., Dattolo, E., Marín-Guirao, L., Procaccini, G. (2021). The Genetic Component of Seagrass Restoration: What We Know and the Way Forwards. *Water*, 13, 829. <https://doi.org/10.3390/w13060829>.
- 65 - Balestri E. (2004). Flowering of the Seagrass *Posidonia oceanica* in a North-Western Mediterranean Coastal Area: Temporal and Spatial Variations. *Marine Biology*, 145, 61–68.
- 66 - Diaz-Almela, E., Marbà, N., Alvarez, E., Balestri, E., Ruiz-Fernandez, J.M., Duarte, C.M. (2006). Patterns of Seagrass (*Posidonia oceanica*) Flowering in the Western Mediterranean. *Marine Biology*, 148, 723–742.

- 67 - Diaz-Almela, E., Arnaud-Haond, S., Vliet, M.S., Alvarez, E., Marbà, N., Duarte, C.M., Serrao, E.A. (2007). Feed-Backs between Genetic Structure and Perturbation-Driven Decline in Seagrass (*Posidonia oceanica*) Meadows. *Conservation Genetics*, 8, 1377–1391.
- 68 - Ruiz, J.M., Marín-Guirao, L., García-Muñoz, R., Ramos-Segura, A., Bernardeau-Esteller, J., Pérez, M., Sanmartí, N., Ontoria, Y., Romero, J., Arthur, R., Alcoverro, T., Procaccini, G. (2018). Experimental Evidence of Warming-Induced Flowering in the Mediterranean Seagrass *Posidonia oceanica*. *Marine Pollution Bulletin*, 134, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.037>.
- 69 - Montefalcone, M., Giovannetti, E., Morri, C., Peirano, A., Bianchi, C.N. (2013). Flowering of the Seagrass *Posidonia oceanica* in NW Mediterranean: Is There a Link with Solar Activity? *Mediterranean Marine Science*, 14. <https://doi.org/10.12681/mms.529>.
- 70 - Marín-Guirao, L., Entrambasaguas, L., Ruiz, J.M., Procaccini, G. (2019). Heat-stress Induced Flowering Can Be a Potential Adaptive Response to Ocean Warming for the Iconic Seagrass *Posidonia oceanica*. *Molecular Ecology*, 28, 2486–2501. <https://doi.org/10.1111/mec.15089>.
- 71 - Marín-Guirao, L., Ruiz, J.M., Dattolo, E., Garcia-Munoz, R., Procaccini, G. (2016). Physiological and Molecular Evidence of Differential Short-Term Heat Tolerance in Mediterranean Seagrasses. *Scientific Reports*, 6, 28615. <https://doi.org/10.1038/srep28615>.
- 72 - Marín-Guirao, L., Entrambasaguas, L., Dattolo, E., Ruiz, J.M., Procaccini, G. (2017). Molecular Mechanisms behind the Physiological Resistance to Intense Transient Warming in an Iconic Marine Plant. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1142. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01142>.
- 73 - Bennett, S., Alcoverro, T., Kletou, D., Antoniou, C., Boada, J., Buñuel, X., Cucala, L., Jorda, G., Kleitou, P., Roca, G., *et al.* (2022). Resilience of Seagrass Populations to Thermal Stress Does Not Reflect Regional Differences in Ocean Climate. *New Phytologist*, 233, 1657–1666. <https://doi.org/10.1111/nph.17885>.
- 74 - Stipcich, P., Marín-Guirao, L., Pansini, A., Pinna, F., Procaccini, G., Pusceddu, A., Soru, S., Ceccherelli, G. (2022). Effects of Current and Future Summer Marine Heat Waves on *Posidonia oceanica*: Plant Origin Matters? *Frontiers in Climate*, 4, 844831. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.844831>.
- 75 - Dattolo, E., Marín-Guirao, L., Ruiz, J.M., Procaccini, G. (2017). Long-term Acclimation to Reciprocal Light Conditions Suggests Depth-related Selection in the Marine Foundation Species *Posidonia oceanica*. *Ecology and Evolution*, 7, 1148–1164. <https://doi.org/10.1002/ece3.2731>.
- 76 - Pazzaglia, J., Dattolo, E., Ruocco, M., Santillán-Sarmiento, A., Marín-Guirao, L., Procaccini, G. (2023). DNA Methylation Dynamics in a Coastal Foundation Seagrass Species under Abiotic Stressors. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290, 20222197. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.2197>.
- 77 – Nguyen, H.M., Kim, M., Ralph, P.J., Marín-Guirao, L., Pernice, M., Procaccini, G. (2020). Stress memory in seagrasses: first insight into the effects of thermal priming and the role of epigenetic modifications. *Frontiers in Plant Science*, 11: 494 <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00494>.

- 78 – Provera, I., Martinez, M., Zenone, A., Giacalone, V.M., D'Anna, G., Badalamenti, F., Marín-Guirao, L., Procaccini, G. (2024). Exploring priming strategies to improve stress resilience of *Posidonia oceanica* seedlings. *Marine Pollution Bulletin*, 200: 116057. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116057.
- 79 - Procaccini, G., Dattolo, E., Ruocco, M. (2023). Genetic Diversity and Connectivity in the Mediterranean Seagrass *Posidonia oceanica*: State of Art and Future Directions. *Cahier Biologie Marine*, 64: 105-114.
- 80 - Abadie, A., Lejeune, P., Pergent, G., Gobert, S. (2016). From Mechanical to Chemical Impact of Anchoring in Seagrasses: The Premises of Anthropogenic Patch Generation in *Posidonia oceanica* Meadows. *Marine Pollution Bulletin*, 109, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.022>.
- 81 - Calleja, M.L., Marbà, N., Duarte, C.M. (2007). The relationship between seagrass (*Posidonia oceanica*) decline and sulfide porewater concentration in carbonate sediments. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 73, 583–588.
- 82 - Mohr, W., Lehnen, N., Ahmerkamp, S., Marchant, H.K., Graf, J.S., Tschitschko, B., Yilmaz, P., Littmann, S., Gruber-Vodicka, H., Leisch, N., Weber, M., Lott, C., Schubert, C.J., Milucka, J. and Kuypers, M.M.M. (2021) Terrestrial-Type Nitrogen-Fixing Symbiosis between Seagrass and a Marine Bacterium. *Nature*, 600, 105–109. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04063-4>.
- 83 - Cardini, U, Marin-Guirao, L, Montilla, L.M., Marzocchi, U., Chiavarini, S., Rimauro, J., Quero, G.M., Petersen, J.M., Procaccini, G. (2022). Nested interactions between chemosynthetic lucinid bivalves and seagrass promote ecosystem functioning in contaminated sediments. *Frontiers in Plant Science*, 13:918675; doi: 10.3389/fpls.2022.918675.
- 84 - Molinier, R., Picard, J. (1952). Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. *Annales Institut océanographique*, 27(3) : 157-234.
- 85 - Gagnon, K., Christie, H., Didderen, K., Fagerli, C. W., Govers, L. L., Gräfnings, M. L. E., Heusinkveld, J. H. T., Kaljurand, K., Lengkeek, W., Martin, G. *et al.* (2021). Incorporating facilitative interactions into small-scale eelgrass restoration—challenges and opportunities. *Restoration Ecology*, 29(5), Article e13398. <https://doi.org/10.1111/rec.13398>.
- 86 - Astruch P., Belloni B., André S., Schohn T., Goirand-Maubert C., Lucchini N., Boudouresque C.F., Pergent G., Pergent-Martini C., Monnier B., submitted. Restoring *Posidonia oceanica* seagrass meadows using seeds: the opportunity of 2022 mass flowering in northwestern Mediterranean Sea. In 2024 World Seagrass Conference & 15th International Seagrass Biology Workshop “*Seagrass in the Anthropocene*” - Napoli, Italy, June 17th to June 21st, 2024.
- 87 - Balestri, E., Menicagli, V., Vallerini, F., Lardicci, C. (2017). Biodegradable Plastic Bags on the Seafloor: A Future Threat for Seagrass Meadows? *Science of The Total Environment*, 605–606, 755–763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.249>.
- 88 - Badalamenti, F., Alagna, A., Fici, S. (2015). Evidences of Adaptive Traits to Rocky Substrates Undermine Paradigm of Habitat Preference of the Mediterranean Seagrass *Posidonia oceanica*. *Scientific Reports*, 5, 8804. <https://doi.org/10.1038/srep08804>.
- 89 - Zenone, A., Alagna, A., D'Anna, G., Kovalev, A., Kreitschitz, A., Badalamenti, F., Gorb, S.N. (2020). Biological adhesion in seagrasses: the role of substrate roughness in *Posidonia oceanica* (L.) Delile seedling anchorage via adhesive root hairs. *Marine Environmental Research*, 160, 105012 <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105012>.

- 90 - Balestri, E., De Battisti, D., Vallerini, F., Lardicci, C. (2015). First evidence of root morphological and architectural variations in young *Posidonia oceanica* plants colonizing different substrate typologies. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 154, 205-213.
- 91 - Tomasello A., Pirrotta M., Calvo S. (2019). Construction underwater landscape by using *Posidonia oceanica* transplanting combined with innovative artificial reefs. In: *Proceedings of the 6th Mediterranean Symposium on Marine vegetation*, Antalya, Turkey. 92–96.
- 92 - Rende, S.F., Bosman, A., Menna, F., Lagudi, A., Bruno, F., Severino, U., Montefalcone, M., Irving, A.D., Raimondi, V., Calvo, S., *et al.* (2022). Assessing Seagrass Restoration Actions Through a Micro-Bathymetry Survey Approach (Italy, Mediterranean Sea). *Water*, 14: 1285. doi: 10.3390/w14081285.
- 93 - Ventura, D., Mancini, G., Casoli, E., Pace, D.S., Lasinio, G.J., Belluscio, A., Ardizzone, G. (2022). Seagrass Restoration Monitoring and Shallow-Water Benthic Habitat Mapping through a Photogrammetry-Based Protocol. *Journal of Environmental Management*, 304: 114262.

ANNEXE 1

Résumé des boutures de *Posidonia oceanica* transplantées il y a 28 à 35 ans dans le Posidonium du Parc National de Port-Cros

Heike Molenaar

Contexte

De 1988 à 1995, des boutures et des semis (graines germées) de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, prélevés dans divers sites du bassin méditerranéen, ont été transplantés dans le Parc National de Port-Cros. Cette collection de souches a été baptisée "Posidonium" par le professeur Alexandre Meinesz en 1993.

Les apports successifs de différentes souches de Posidonie transplantées en un même lieu protégé de toute perturbation anthropique constituent aujourd'hui un capital biologique unique par la diversité des origines des plantes. En effet, dans toute la Méditerranée, les herbiers de Posidonie sont constitués de grandes touffes monoclonales (multiplication végétative des rhizomes en place), la floraison est rare et donc l'enrichissement génétique au sein d'un herbier est très rare.

Opérations de transplantation et techniques appliquées

Les boutures et les semis du Posidonium ont été plantés sur la matre morte entre 13 et 15 m de profondeur près de 5 touffes naturelles de Posidonie en expansion, l'ensemble formant une surface de 625 m². Les boutures proviennent de 13 origines différentes autour de la Méditerranée et les semis issus de graines germées proviennent de 6 sites différents en France.

Certaines boutures y prospèrent depuis 35 ans, d'autres depuis 34 ans, 33 ans, 32 ans, 31 ans et 28 ans. Les semis, selon les lots, s'y développent depuis 35 ans, 33 ans, 31 ans et 28 ans. Le Posidonium de Port-Cros est donc une expérience unique par le suivi à très long terme des boutures et des semis. Ce rapport ne concerne que les transplantations de boutures.

L'année de transplantation, le nombre de boutures et les provenances se répartissent comme suit : - En 1988, transplantation de 122 boutures provenant d'Athènes (Grèce), de Golfe Juan (Alpes Maritimes, France), d'Izmir (Turquie), de San Bainsu (Corse du Sud, France) et de Port-Cros (Var, France), lot témoin. - En 1989, transplantation de 105 boutures provenant d'Alger (Algérie), de Banyuls-sur-Mer (Pyrénées-Orientales, France) et de Piantarella (Corse du Sud, France). - En 1990, 16 boutures de Taranto (Italie du Sud). - En 1991, 3 boutures de Majorque (Iles Baléares, Espagne). - En 1992, 51 boutures provenant de deux sites de l'île d'Ischia en Italie (Castello et Lacco Ameno). - En 1995, 4 boutures de Malte.

Le tableau 1 indique pour chaque origine - l'année de transplantation dans le Posidonium, - le nombre de boutures transplantées, - le nombre total de faisceaux de feuilles au moment de la transplantation, - la morphologie des boutures au moment de la transplantation, - le nombre de faisceaux de feuilles portés par chaque bouture au moment de la transplantation, - la position dans laquelle les boutures ont été transplantées (horizontalement avec le rhizome principal reposant sur le substrat ou verticalement avec le rhizome planté dans le substrat), - le mode de fixation (en lots sur un grillage, individuellement sur un tuteur vertical plastifié ou individuellement sur un tuteur en acier galvanisé courbé à une extrémité pour insérer le rhizome en position horizontale avec la tige du tuteur enfoncée dans le substrat).

Ainsi, 301 boutures ont été transplantées dans le Posidonium entre 1988 et 1995, ce qui représente à l'instant T0 pour chaque provenance, des lots très variables tant en nombre de boutures qu'en morphologie (de 2 à 56 boutures par lot, certaines orthotropes avec 1 à 3 faisceaux foliaires, d'autres plagiotropes avec 2 à 6 faisceaux foliaires).

Ce n'est qu'à partir de 1990 que nous avons recueilli les premiers résultats qui nous ont permis de

définir le type morphologique de boutures le plus approprié pour obtenir les meilleurs résultats de survie (plagiotrope avec 3 à 6 faisceaux de feuilles).

D'autres expériences menées entre 1989 et 1992 à Cannes (Alpes Maritimes, France), à Nice (Alpes Maritimes, France) et en Corse (Galéria, Haute Corse et Lavezzi, Corse du Sud, France), sur près de 4 000 boutures expérimentales ont permis de définir, outre la morphologie, un certain nombre de critères permettant d'obtenir des taux de survie des boutures supérieurs à 80 %. Ces critères sont notamment : la profondeur de récolte en fonction de la profondeur à laquelle on veut effectuer les transplantations, la saison de transplantation, l'espacement entre les boutures, la disposition des boutures, le substrat, le mode de fixation des boutures au fond.

Tableau 1 : Origine et statut des différents lots de boutures de *Posidonia oceanica* au temps T0 de leur plantation dans le Posidonium du Parc National de Port-Cros. Nb : nombre ; Plagio : rhizome plagiotrope ; Ortho : rhizome orthotrope ; GSS : tuteur en acier galvanisé.

Origine des lots	T0 : année de la transplantation	Nb de lots	Nb de faisceaux	Type de lots	Nb de faisceaux /lots	Position	Technique de fixation
Athènes	1988	2	6	Plagio.	3	Horizontal	GSS
Golfe Juan	1988	56	56	Ortho.	1	Horizontal et vertical	Grillage Piquet en plastique
Izmir	1988	5	7	Ortho.	1 - 2	Horizontal	GSS
San Baínzu	1988	7	28	Plagio.	3 - 5	Horizontal	GSS
Port-Cros	1988	52	52	Ortho.	1	Horizontal et vertical	Grillage Piquet en plastique
Alger	1989	8	12	Ortho.	1 - 3	Horizontal	GSS
Banyuls	1989	60	65	Ortho.	1 - 2	Horizontal	GSS
Piantarella	1989	37	37	Ortho.	1	Horizontal	GSS
Tarento	1990	16	80	Plagio.	3 - 6	Horizontal	GSS
Majorque	1991	3	7	Plagio.	2 - 3	Horizontal	GSS
Ischia Castello	1992	11	46	Plagio.	3 - 5	Horizontal	Grillage
Ischia Lacco Ameno	1992	40	205	Plagio.	3 - 6	Horizontal	Grillage
Malte	1995	4	12	Plagio.	3	Horizontal	Grillage

Activités de suivi

Chaque année, de 1989 à 1995, lors des nouvelles transplantations, un suivi des boutures transplantées les années précédentes a été effectué afin d'évaluer soit le nombre total de faisceaux de feuilles dans les différents lots, soit les surfaces occupées par les différents lots. Quatre suivis ont été réalisés au cours des 28 années suivantes :

En 1997, le nombre de faisceaux de feuilles a été compté dans chaque lot des 13 provenances.

En 2006, le nombre de faisceaux de feuilles et la surface des touffes formées par les différents lots ont été mesurés.

En 2012, la surface occupée par chaque lot de chaque provenance a été mesurée.

En 2023, chaque lot a vu sa surface mesurée, sa densité mesurée (en nombre de faisceaux de feuilles par mètre carré), ce qui a permis d'estimer le nombre total de faisceaux de feuilles présents dans chaque lot de différence de provenance.

Résultats

Le tableau 2 montre une partie des résultats recueillis par les mesures effectuées en février 2023.

Tableau 2 : Evolution du nombre total de faisceaux de feuilles des lots, de la surface occupée par les lots à l'instant T0 de leur plantation et en février 2023, soit 28 à 35 ans plus tard.

	T0 : Plantation de 1988 à 1995	T+28 à +35 Février 2023	Facteur de multiplication
Nombre total de faisceaux foliaires transplantés	613	53 400	X 87
Surface totale transplantée	3 m ²	105 m ²	X 35
Variation de la surface transplantée	0.07 m ² à 0.38 m ²	2.9 m ² à 15.5 m ²	X 10 à X 116

Le nombre de faisceaux de feuilles portés par les 301 boutures transplantées entre 1988 et 1995 était de 613 au temps T0, soit en moyenne deux faisceaux de feuilles par bouture. Ce nombre est passé à 53 400 faisceaux de feuilles en 2023, soit environ 87 fois plus, ce qui représente en moyenne 177 faisceaux de feuilles par bouture.

Bien entendu, chaque bouture n'a pas évolué exactement comme sa voisine. Certaines boutures ont formé plus de nouveaux faisceaux que d'autres en fonction de leur origine, de leur morphologie initiale, de l'espace dont elles disposaient et de leur proximité avec d'autres touffes de l'herbier voisin. Globalement, elles ont formé 2 à 3 nouveaux faisceaux de feuilles par année de transplantation, ce qui correspond au développement normal des rhizomes plagiotropes.

Les surfaces occupées par les différents lots à l'instant T0 sont très variables et dépendent du nombre de boutures transplantées (nombre variant de 2 à 56 boutures selon les origines). Les touffes initiales étaient toutes inférieures à 0.5 m² et certaines atteignent aujourd'hui 15.5 m².

La surface totale occupée par les boutures des 13 provenances additionnées était de 3 m² au temps T0 et cette surface est passée à 105 m², soit une surface 35 fois plus importante après 35 ans de croissance.

En ce qui concerne le nombre de faisceaux de feuilles, trois grands groupes ont été distingués :

- Les boutures dont le facteur de multiplication des faisceaux de feuilles en 35 ans est faible, entre X 27 et X 69 avec le facteur le plus faible pour celles de Taranto, puis Ischia Lacco Ameno, puis Golfe Juan et enfin celles de Banyuls.
- Les boutures dont le facteur de multiplication des faisceaux de feuilles varie de X 91 à X 155 avec par ordre croissant celles de Piantarella, San Bainsu, Malta, Port-Cros puis Ischia Castello.
- Les boutures dont le facteur de multiplication des faisceaux de feuilles est très élevé, entre X 301 et X 524 avec par ordre croissant celles d'Alger, puis d'Izmir et celles de Majorque qui présentent le facteur le plus élevé de toutes les origines.

ANNEXE 2

Efficacité d'une transplantation de *Posidonia oceanica* dans le golfe de Rapallo 23 ans plus tard

Monica Montefalcone^{1,2} et Chiara Robello¹

¹DISTAV, Dipartimento di Scienze della Terra dell'Ambiente e della Vita Università degli Studi di Genova, corso Europa 26, 16132, Genova, Italia

²NBFC (National Biodiversity Future Center), Palermo, Italia

Contexte

Le site choisi pour la transplantation de *Posidonia oceanica* est situé dans le port de plaisance de Rapallo (Gênes), dans le golfe du Tigullio, au nord-ouest de la mer Ligure (Fig. 1). La régression des herbiers de *P. oceanica* en Ligurie est devenue particulièrement importante depuis les années 1970, en raison de l'énorme développement côtier qui a caractérisé cette région. Au cours de cette période, l'herbier à *P. oceanica* qui se développait dans le port de plaisance de Rapallo a été affecté par l'extension de la digue du port touristique, qui a entraîné la disparition de vastes zones d'herbier dans le port de plaisance. En outre, deux événements importants ont eu lieu au cours de la même période : i) la construction du port Carlo Riva ; et ii) l'urbanisation massive le long du littoral près du Rio Tuja. Ces deux événements ont provoqué, pendant plusieurs années, une turbidité importante de l'eau dans l'ensemble du golfe du Tigullio. L'entrée étroite du port de Rapallo et la diminution des échanges d'eau avec la haute mer qui en résulte ont augmenté la turbidité des eaux à l'intérieur du port de plaisance, endommageant encore plus l'herbier en raison de l'apport continu de sédiments fins. Un herbier sain n'a subsisté que dans la partie orientale du golfe du Tigullio.



Figure 1 : Zone sélectionnée (étoile jaune) pour la transplantation de *Posidonia oceanica* dans le port de plaisance de Rapallo (Gênes).

Opérations de transplantation et techniques appliquées

Environ deux décennies plus tard, une intervention pionnière de restauration d'herbier a été planifiée pour reconstruire une petite partie de l'herbier dans le port de plaisance de Rapallo (Bavestrello & Cattaneo-Vietti, 1997). Une première transplantation a été effectuée en novembre 1996 dans les eaux peu profondes devant la rue Avenaggi. Au total, 200 boutures ont été prélevées dans l'herbier voisin de San Michele di Pagana à une profondeur de 12 m et transportées dans des conteneurs jusqu'au port de Rapallo. Cinq grilles métalliques, couvrant chacune une surface de 2 m², ont été fixées au fond caractérisé par une matre morte, à une profondeur de 5 m. Les boutures ont été fixées aux grilles à

l'aide de bandes en plastique.

Une deuxième transplantation a été effectuée dans la même zone en mars 1997. Au total, 300 boutures ont été prélevées à proximité de l'anse de Prelo, à une profondeur de 5 m. Chaque bouture a ensuite été fixée à un piquet métallique et les piquets ont été plantés au fond le long de six transects parallèles, chacun d'une longueur de 10 m et à des intervalles de 20 cm. Après la transplantation, les cordes utilisées pour visualiser les transects sur le fond ont été enlevées. A la fin de l'intervention, 500 boutures ont été transplantées sur une surface d'environ 20 m², soit une densité de 25 boutures par m².

Résultats

Un an après la transplantation, les deux techniques ont donné des résultats positifs en termes de survie des faisceaux et de longueur des rhizomes. Les boutures sur les grilles ont enregistré une perte d'environ 15 %, tandis que celles fixées par des piquets ont subi une perte d'environ 50 % (Bavestrello & Cattaneo-Vietti, 1997). Trois tempêtes majeures ont eu lieu pendant la période hivernale ; les boutures sur les grilles ne semblent pas avoir subi de dommages, mais les boutures fixées par des piquets ont été largement endommagées, bien qu'elles n'aient subi qu'une seule tempête. Néanmoins, les boutures transplantées avec des piquets ont montré, après seulement deux mois, une meilleure stabilité des rhizomes dans le substrat que celles attachées aux grilles, la grille métallique étant susceptible de ralentir le processus d'enracinement. Après la première année suivant l'intervention, aucune autre activité de suivi n'a été menée sur cet herbier à *P. oceanica* transplanté.

En 2019, un nouveau suivi a été effectué sur ce site pour vérifier l'existence, après 23 ans, de la parcelle transplantée de *P. oceanica* dans le port de plaisance de Rapallo. L'herbier transplanté était toujours là, et sa surface semblait augmentée. Les grilles métalliques utilisées lors de la première transplantation étaient encore visibles sur le fond (Fig. 2), tandis que les piquets utilisés lors de la deuxième transplantation n'ont pas été retrouvés.



Figure 2 : Les grilles utilisées lors de la première intervention de transplantation sont encore visibles sur le fond 23 ans plus tard.

En utilisant la technique du polygone fermé, l'herbier transplanté a été cartographié en détail (Fig. 3) et la surface totale couverte a été mesurée sur une plateforme SIG. La densité de faisceaux a également été mesurée à l'aide d'un carré de 20 cm x 20 cm.



Figure 3 : Surface couverte par l'herbier transplanté dans le port de plaisance de Rapallo en 2019.

La surface totale couverte par l'herbier a légèrement augmenté au cours des 23 dernières années, passant de 20 m² à 24 m² (Fig. 4). Le résultat le plus significatif concerne la densité de faisceaux : le nombre estimé de faisceaux sur la surface totale couverte par l'herbier en 2019 est d'environ 4 767, avec une valeur moyenne de 195 ± 8 faisceaux par m², par rapport aux 25 faisceaux par m² en 1996 (Fig. 5). Bien que la superficie de l'herbier n'ait augmenté "que" de 17 %, le succès de la transplantation est particulièrement évident si l'on considère la densité de faisceaux, qui a été multipliée par huit environ.

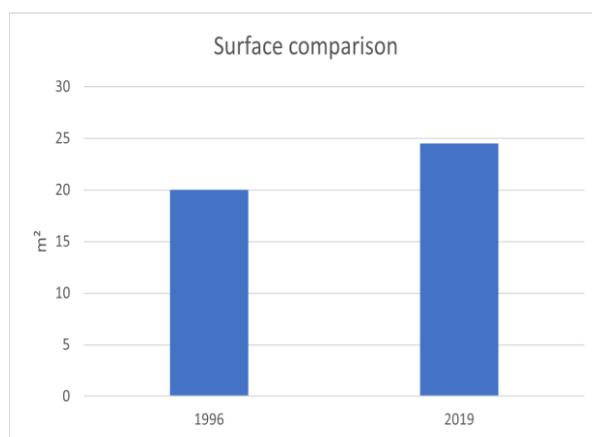


Figure 4 : Surface totale (en m²) couverte par l'herbier transplanté en 1996 et en 2019.

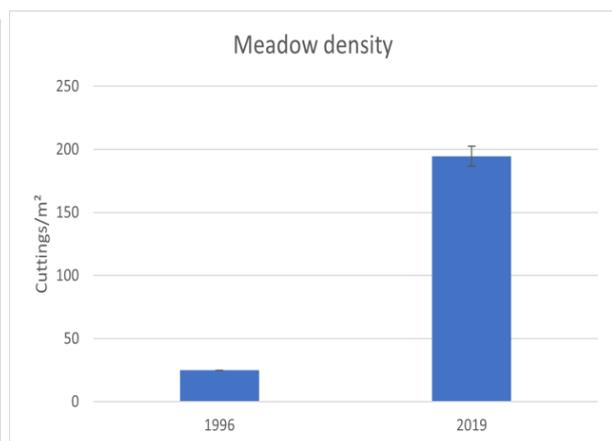


Figure 5 : Densité de faisceaux (boutures m⁻²) de l'herbier transplanté en 1996 et en 2019.

L'emplacement de l'herbier transplanté au sein d'un port de plaisance touristique doit être pris en compte lors de l'examen de la réussite de cette intervention pionnière. Étant donné que nous nous trouvons dans une zone fortement anthropisée qui est souvent exposée à une turbidité élevée de l'eau et à un hydrodynamisme intense, le succès de cette transplantation est encore plus remarquable.

Cependant, l'emplacement du site dans la partie orientale du golfe de Rapallo protège la zone transplantée des tempêtes les plus violentes (Oprandi *et al.*, 2020), assurant ainsi la survie des faisceaux au cours des 23 dernières années. Cette intervention de restauration représente un cas unique, car il n'y a pas d'autres exemples documentés dans la littérature de transplantations réussies sur une période aussi longue.

Principales références

Bavestrello G, Cattaneo-Vietti R, 1997. Trapianto sperimentale di *Posidonia oceanica* nel golfo di Rapallo – Relazione finale.

Oprandi, A., Mucerino, L., De Leo, F., Bianchi, C. N., Morri, C., Azzola, A., Benelli, F., Besio, G., Ferrari, M. & Montefalcone, M. (2020). Effects of a severe storm on seagrass meadows. *Science of the Total Environment*, 748, 141373.

ANNEXE 3

Un cadre chronologique multicritère pour la restauration des herbiers de *Posidonia oceanica* dégradés dans le golfe de Palerme (Italie) : une histoire de 15 ans, de la localisation à la mise à l'échelle.

Sebastiano Calvo, Geraldina Signa, Salvatrice Vizzini, Antonio Mazzola, Agostino Tomasello.

Contexte

Suite au rétablissement des conditions environnementales par la réduction des pressions humaines responsables de la dégradation de l'environnement, la reforestation est actuellement considérée comme une option appropriée pour accélérer la restauration des herbiers à *Posidonia oceanica*. Le golfe de Palerme, situé le long de la côte nord-ouest de la Sicile (Fig. 1), est exposé à de multiples sources de pollution depuis plusieurs décennies en raison d'une expansion urbaine chaotique, d'une élimination inappropriée de déchets et d'eaux usées non traitées. Une augmentation de l'état trophique due à des concentrations élevées de nutriments et de chlorophylle-a dans la colonne d'eau a été enregistrée dans la partie sud du golfe (Calvo *et al.*, 1994), ainsi que des changements dans les caractéristiques géochimiques des couches sédimentaires de surface, reflétant l'augmentation du ruissellement et de la charge terrigène au cours de la seconde moitié du siècle dernier (Di Leonardo *et al.*, 2012). En conséquence, les herbiers à *P. oceanica* qui poussaient dans cette zone ont régressé et il ne reste plus que des parcelles résiduelles dans la zone de 11 à 21 m de profondeur (Tomasello *et al.*, 2007). Au cours des dernières décennies, la qualité de l'eau s'est nettement améliorée, avec un Indice Trophique (TRophic IndeX - TRIX) allant de bon à élevé (Pirrotta *et al.*, 2015).

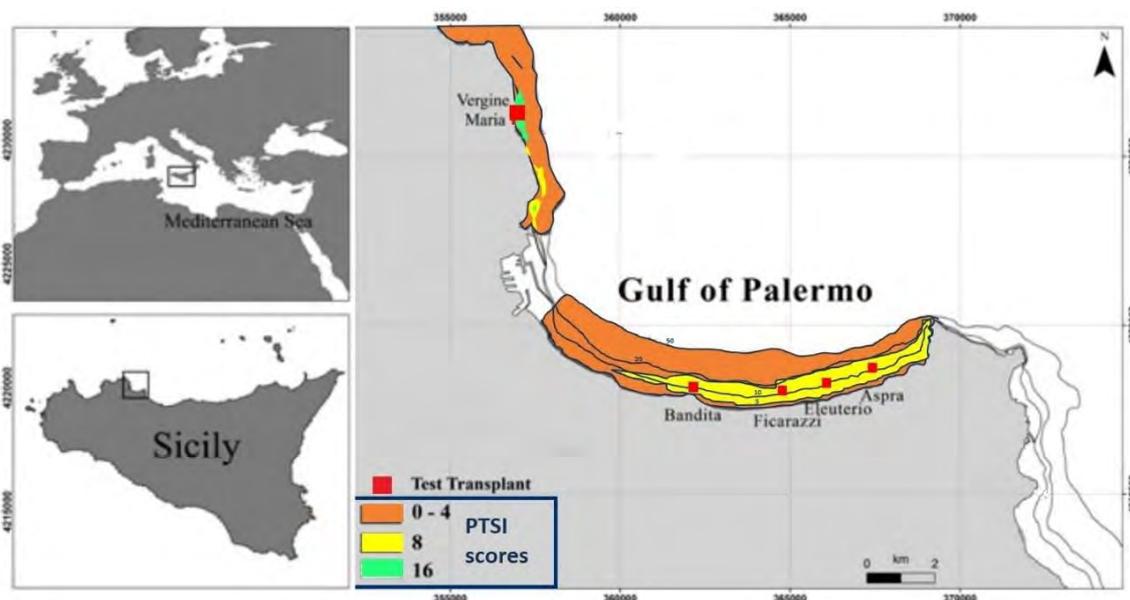


Figure 1 : La zone d'étude (carte des scores de l'indice préliminaire d'aptitude à la transplantation - PTSI) et les lieux de transplantation pilote sont indiqués. D'après Pirrotta *et al.* (2015).

Opérations de transplantation et techniques appliquées

Dans ce contexte, une approche en plusieurs étapes pour la restauration de *P. oceanica* a été développée, comprenant les phases suivantes : 1) mise en œuvre et application d'un modèle multicritère de sélection de sites, comprenant des informations historiques et bibliographiques, des données de référence et des mesures sur le terrain dans le cadre d'essais pilotes ; 2) intervention de transplantation à petite échelle et programme de suivi décennal pour tester le succès de la restauration ; 3) augmentation de l'échelle de transplantation pour mettre en œuvre un projet de

restauration à grande échelle en utilisant une approche bio-inspirée innovante.

1) Le modèle de sélection des sites a permis d'identifier les zones appropriées à prioriser pour la restauration de *P. oceanica*. Le modèle comprenait l'intégration de l'indice préliminaire d'aptitude à la transplantation (PTSI), de l'indice d'aptitude à la transplantation (TSI) et de multiples transplantations pilotes à environ 13 m de profondeur (largeur totale de 15 m²) (Pirrotta *et al.*, 2015) (Fig. 1). Les deux indices sont basés sur le calcul de multiples paramètres et sur l'évaluation relative dans un environnement SIG. Récemment, l'indice PTSI a été perfectionné avec l'introduction de paramètres obtenus à partir de données satellitaires et le développement d'un outil téléchargeable gratuitement (pour plus de détails, voir Calvo *et al.*, 2021a ; 2022a).

2) Un programme de suivi réalisé à différents niveaux hiérarchiques 12 ans après la transplantation a permis d'évaluer la performance de 20 m² de *P. oceanica* transplanté dans la zone côtière de Bandita (Fig. 1), avec une densité moyenne de 66 faisceaux.m⁻² fixés sur la matre morte par des grilles métalliques (Calvo *et al.*, 2021b). Les photomosaïques ont révélé 23 parcelles transplantées de forme régulière et irrégulière, allant de 0.1 à 2.7 m² avec une superficie totale de près de 19 m². La densité de l'herbier était de 331.6 ± 17.7 faisceaux.m⁻² (cinq fois plus élevée que la valeur initiale), ce qui est à peu près identique à l'herbier naturel le plus proche (331.2 ± 14.9 faisceaux.m⁻²). La production primaire totale, estimée par lépidochronologie combinée à la densité de l'herbier et aux variables phénologiques, variait entre 333.0 et 332.7 g dw m⁻² /an dans les peuplements transplantés et naturels, respectivement, en accord avec les estimations rapportées pour plusieurs herbiers méditerranéens (Fig. 2), démontrant que certaines caractéristiques structurales et fonctionnelles de l'herbier à *P. oceanica* ont été restaurées avec succès en seulement 12 ans après la transplantation.

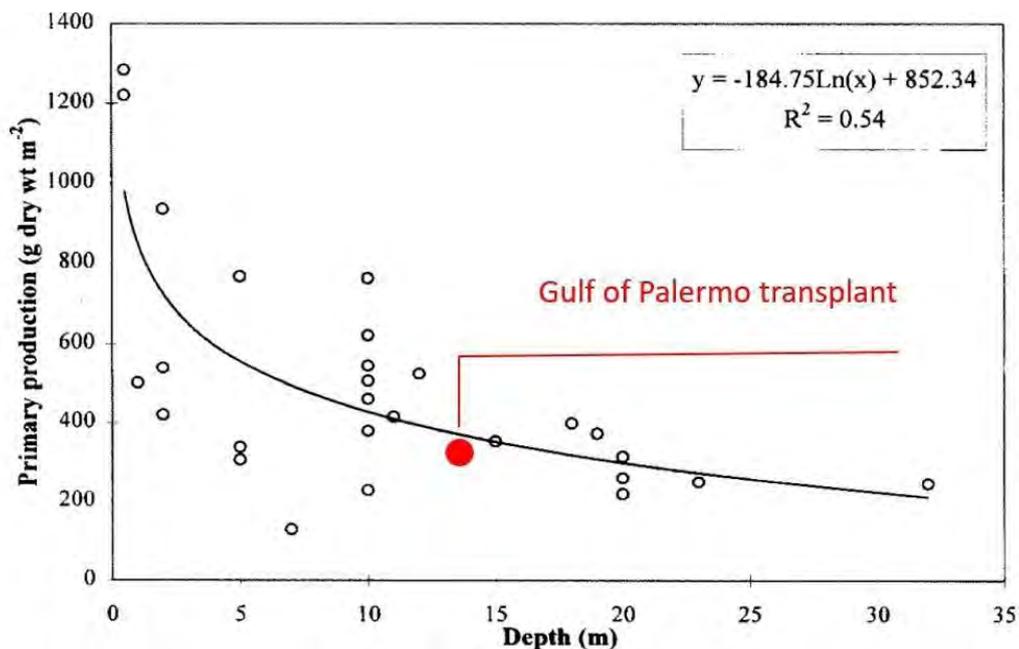


Figure 2 : Relation entre la production primaire et la profondeur estimée dans plusieurs sites de la mer Méditerranée (d'après Pergent *et al.*, 1997). La valeur enregistrée dans l'herbier transplanté de la zone côtière de Bandita est indiquée.

3) Plus de 22 000 faisceaux de *P. oceanica* provenant d'un herbier donneur ont été transplantés en hiver 2021 sur un substrat de matre morte dans la zone côtière de Bandita, en utilisant le système modulaire d'ancrage biodégradable (Fig. 3) décrit par Calvo *et al.* (2022b), couvrant une surface totale de 1 200 m².



Figure 3 : Système modulaire biodégradable (Mater-Bi) d'ancrage des boutures (dessin européen n° : 003000686- 0001/2016 et brevet italien n° 10201500008182/2018) (Calvo *et al.*, 2022b).

Résultats

Au cours de la première année suivant la transplantation, la performance des plantes, en termes de détachement des boutures et de survie, a été meilleure que lors de l'intervention précédente réalisée dans la même zone avec des supports d'ancrage traditionnels (grilles métalliques), ce qui suggère une amélioration due à la nouvelle technologie employée.

De plus, des recensements visuels sous-marins ont montré que quelques mois après la transplantation, l'assemblage de poissons était plus similaire entre les herbiers transplantés et les herbiers donneurs qu'entre eux et la zone de matte morte voisine (Bruno *et al.*, 2023). En outre, l'augmentation de la similarité entre les deux sites végétalisés au fil du temps était principalement due à l'augmentation de l'abondance des poissons associés aux herbiers (c'est-à-dire les labridés et les sparidés) dans l'herbier transplanté. Bien que le suivi à long terme soit considéré comme primordial pour évaluer les effets des interventions de transplantation d'herbiers marins, ces nouveaux résultats ont montré que les premiers signes de rétablissement des herbiers transplantés sont déjà évidents au cours de la première année suivant la transplantation, ce qui prouve qu'une certaine dynamique de rétablissement se produit même à court terme.

Principales références

Bruno D, Signa G, Vaccaro A, Cilluffo G, Raimondi V, Assenzo M, Calvo S, Mazzola A, Tomasello A, Vizzini S, 2023. Short-term recovery dynamics of fish assemblage following *Posidonia oceanica* restoration. *XXXII Congresso della Società Italiana di Ecologia*, Catania, 6-8 settembre 2023, p. 137.

Calvo S, Galluzzo M, Viviani G, 1994. Water pollution problems in the Palermo area. p. 73-87. In: *Proceedings UETP-EEE Annual Conference "Improving the Urban Environment"*. Dellow, B., Puusola, T. (eds.), London, G.B., 1-2 June 1994.

Calvo S, Pampalone V, Tomasello A, 2021a. Implementazione del PTSI Indice Preliminare di Idoneità al Trapianto. Progetto LIFE SEPOSSO (Supporting Environmental governance for the *Posidonia oceanica* Sustainable transplanting Operations), LIFE16 GIE/IT/000761. Roma, pp. 68 https://lifeseosso.eu/wp-content/uploads/SEPOSSO_Azione_B.3.2_Implementazione_PTSI.pdf

Calvo S, Calvo R, Luzzu F, Raimondi V, Assenzo M, Cassetti F-P, Tomasello A, 2021b. Performance Assessment of *Posidonia oceanica* (L.) Delile Restoration Experiment on Dead matte Twelve Years after Planting—Structural and Functional Meadow Features. *Water* 13, 724. <https://doi.org/10.3390/w13050724>

Calvo S, Pampalone V, Tomasello A, 2022a. Implementazione del PTSI Indice Preliminare di Idoneità al Trapianto. Manuale tecnico tool PTSI. Progetto LIFE SEPOSSO (Supporting Environmental governance for the *Posidonia*

oceanica Sustainable transplanting Operations, AZIONE B3.2), LIFE16 GIE/IT/000761. Roma, pp. 34. https://lifeseposso.eu/wp-content/uploads/SEPOSSO_Action_B.3.2_PTSI_plugin_tecnical_manual.pdf.

Calvo S, Calvo R, Vincenzo Raimondi V, Assenzo M, Pipitone G, Tomasello A, 2022b. Biodegradable modular supports. In Bacci T., La Porta B. Manual of techniques and procedures for the transplantation of *Posidonia oceanica*. LIFE SEPOSSO (LIFE 16 GIE/IT/000761), Roma, 58-70. https://lifeseposso.eu/wp-content/uploads/LIFESEPOSSO_Manuale_tecniche_procedure_operative_trapianto_Posidonia_oceanica.pdf

Di Leonardo R, Cundy A-B, Bellanca A, Mazzola A, Vizzini S, 2012. Biogeochemical evaluation of historical sediment contamination in the Gulf of Palermo (NW Sicily): Analysis of pseudo-trace elements and stable isotope signals. *J. Mar. Syst.* 94, 185 -196. doi: 10.1016/j.jmarsys.2011.11.022

Pergent G, Rico-Raimondino V, Pergent-Martini C, 1997. Fate of Primary Production in *Posidonia oceanica* Meadows of the Mediterranean. *Aquat. Bot.* 59, 307–321. doi: 10.1016/S0304-3770(97)00052-1

Pirrotta M, Tomasello A; Scannavino A, Di Maida G, Luzzu F, Bellissimo G, Bellavia C, Costantini C, Orestano C, Sclafani G, Calvo S. (2015). Transplantation assessment of degraded *Posidonia oceanica* habitats: Site selection and long-term monitoring. *Mediterr. Mar. Sci.* 16, 591–604. doi: 10.12681/mms.1045

Tomasello A, Calvo S, Di Maida G, Lovison G, Pirrotta M, Sciandra M, 2007. Shoot age as a confounding factor on detecting the effect of human-induced disturbance on *Posidonia oceanica* growth performance. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 343, 166–175. doi: 10.1016/j.jembe.2006.11.017

Remerciements

Projet PON Marine Hazard Cod. PON03PE_00203_1 pour le Plan Stratégique "Ricerca e innovazione 2015- 2017" du PON "Ricerca e Competitività". Projet PON01_03112 intitulé : "Tecnologie avanzate eco-sostenibili finalizzate alla bonifica ed al ripristino di aree marine costiere degradate".

ANNEXE 4

Restauration de *Posidonia oceanica* dans l'Aire Marine Protégée de Capo Carbonara par l'application de techniques d'ingénierie naturaliste

Francesca Frau, Maria-Francesca Cinti, Stefano Acunto, Fabrizio Atzori, Nicoletta Cadoni, Maria Leonor Garcia Gutierrez, Luigi Piazzì

Contexte

Mis en œuvre dans le cadre du programme LIFE+ (2007-2013), le projet RES MARIS (LIFE13 NAT/IT/000433) "Recovering Endangered habitats in the Capo Carbonara MARine area, Sardinia" vise à restaurer et à conserver les écosystèmes marins et terrestres du système de plages émergées et submergées et, parmi eux, l'habitat prioritaire 1120* conformément à la Directive Habitats de l'UE : herbiers de Posidonie (*Posidonia oceanica*). Les principales mesures prises pour cet habitat ont été la restauration des zones endommagées et la mise en place de zones de mouillage pour empêcher l'ancrage libre sur les herbiers de Posidonie.

L'action de restauration a eu lieu dans l'Aire Marine Protégée de Capo Carbonara, municipalité de Villasimius, Sardaigne (Italie), caractérisée par des herbiers de *Posidonia oceanica* étendus et bien structurés où plusieurs touffes de matte morte ont été détectées. Ces touffes ont montré des signes de longue date allant de 15 à 20 mètres de profondeur, probablement en raison de l'impact mécanique des engins de pêche ou de l'ancrage libre causé avant l'établissement de l'AMP (Acunto *et al.*, 2017). Une surface d'environ 1 000 m² de matte morte de *Posidonia oceanica* a été restaurée.

Opérations de transplantation et techniques appliquées

La procédure appliquée s'inspire des techniques d'ingénierie naturaliste habituellement employées dans les systèmes terrestres. Des géomats renforcés (Macmat® R), obtenus par une matrice polymère tridimensionnelle extrudée sur une maille d'acier doublement torsadée, ont été utilisés. La décision d'utiliser ce produit spécifique a été guidée par la bonne adhérence de ces nattes sur la matte morte (Cinelli *et al.*, 2007, 2014). Quarante géomats de différentes tailles ont été utilisés pour couvrir toute la surface (1 000 m²) et ancrés au substrat à l'aide de piquets en fer d'environ 120 cm de long.

Pour la première fois parmi les expériences de transplantation de *Posidonia oceanica* réalisées à ce jour, des fragments de la plante déracinés naturellement par les ondes de tempête et/ou les éboulements de matte collectés sur les fonds environnants ont été utilisés (Frau *et al.*, 2023). Une fois collectés et placés de manière appropriée dans des conteneurs, ils ont été traités pour faire des boutures, c'est-à-dire pour obtenir des parties de la plante qui pourraient être utilisées comme matériel de transplantation dans les géomats préalablement posés sur le fond marin (Fig. 1).



Figure 1 : Phases de la transplantation.

Chaque bouture consistait en un fragment de rhizome d'environ 20 cm avec 1 à 3 faisceaux. Environ 500 parcelles formées de 30 boutures chacune ont été transplantées. Ces opérations seront effectuées par du personnel qualifié (plongeurs scientifiques certifiés).

Activités de suivi

La restauration a été achevée au printemps 2017 (Fig. 2) et a fait l'objet d'un suivi annuel pendant six ans. Lors de chaque relevé, le nombre de parcelles transplantées encore *in situ* sur l'ensemble de la zone a été compté, de plus, le nombre moyen de boutures par parcelle a été estimé sur un nombre statistiquement significatif de parcelles (au moins 3 pour chaque géomats). Le nombre de faisceaux par parcelle a également été évalué à partir de 2019 (Fig. 2).



Figure 2 : Images des transplants après la mise en place (à gauche) et activités de suivi (à droite).

Résultats

Six ans après la mise en place, 93 % des parcelles transplantées étaient toujours *in situ*. Entre 2018 et 2019, quelques géomats ont été perdus suite à des tempêtes. En 2023, la survie moyenne des boutures dans les parcelles était de 43.3 % et le nombre de faisceaux de 19.5 ± 9.0 .

La survie des boutures et le nombre de faisceaux ont diminué au cours des premières années, mais sont restés relativement stables après 2020 (Fig. 3).

La perte de boutures dans les premiers stades après la transplantation est une tendance courante pour *Posidonia oceanica* (Piazzi *et al.*, 1998). En outre, il faut tenir compte du fait que l'utilisation de boutures naturellement déracinées ne permet pas de contrôler la qualité du matériel transplanté d'origine. La survie peut être évaluée comme n'étant pas négative, car la perte de parcelles a été faible, la perte a été interrompue au fil des années et 30 % des parcelles établies sont considérées comme suffisantes pour conduire à une recolonisation réussie du site (Pirrotta *et al.*, 2015).

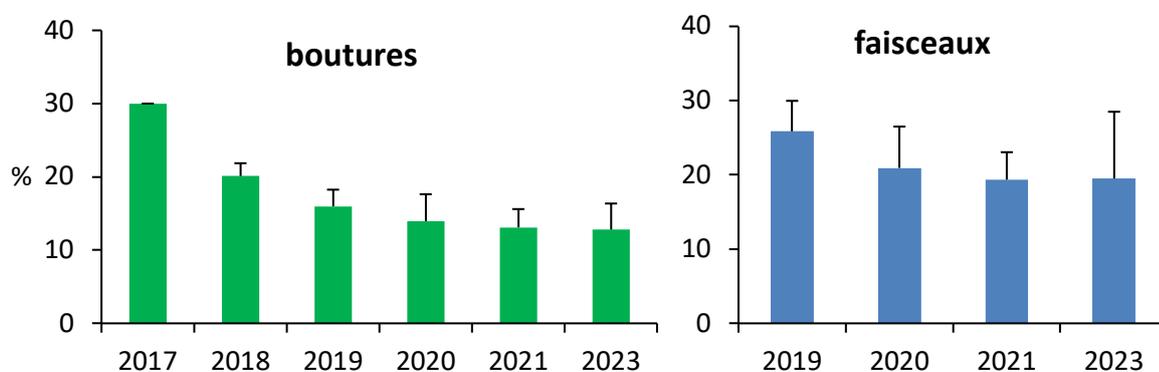


Figure 3 : Survie des boutures (moyenne \pm SD, gauche) et densité des faisceaux lors de la transplantation (moyenne \pm SD, droite).

Principales références

Acunto S, Bacchetta G, Bordigoni A, Cadoni N, Cinti MF, Duràn Navarro M, Frau F, Lentini L, Liggi MG, Masala V, Meloni F, Pinna R, Podda L, Sanna A, 2017. The LIFE+ project " RES MARIS-Recovering Endangered habitatS in the Capo Carbonara MARIne area, Sardinia ": first results. *Plant Sociology*, 54, 85-95.

Cinelli F, Boccalaro F, Burgassi M, Rende F, Piazzì L, Zanella M, 2007. Utilizzo sperimentale in mare di sistemi tecnici già impiegati dall'ingegneria naturalistica terrestre. *Biologia Marina Mediterranea* 14, 342-343.

Cinelli F, Boccalaro F, Rende FS, Piazzì L, Burgassi M, 2014. Riforestazione di praterie di *Posidonia oceanica* all'isola d'Elba con l'uso di rivestimenti antierosivi (2007 – 2008). In: *Conservazione e gestione della naturalità negli ecosistemi marino-costieri. Il trapianto delle praterie di Posidonia oceanica*. ISPRA, Manuali e Linee Guida 106/2014 - pp.55-60.

Frau F, Acunto S, Atzori F, Cinti MF, 2023. Ripristino della prateria di *Posidonia oceanica* mediante tecniche di ingegneria naturalistica Nell'area Marina Protetta Capo Carbonara (sud Sardegna). *Biologia Marina Mediterranea* 27, 145-148.

Piazzì L, Balestri E, Magri M, Cinelli F, 1998. Experimental transplanting of *P. oceanica* (L.) Delile into a disturbed habitat in the Mediterranean Sea. *Botanica Marina* 41, 593-601.

Piazzì L, Acunto S, Frau F, Atzori F, Cinti MF, Leone LM, Ceccherelli G, 2021. Environmental engineering techniques to restore degraded *Posidonia oceanica* meadows. *Water* 13, 661

Pirrotta M, Tomasello A, Scannavino A, Di Maida G, Luzzu F, Bellissimo G, Bellavia C, Costantini C, Orestano C, Sclafani G, Calvo S, 2015. Transplantation assessment of degraded *Posidonia oceanica* habitats: site selection and long-term monitoring. *Mediterranean Marine Science* 16/3, 591-604.

ANNEXE 5

Red Eléctrica de España (REE) Marine Forest, une plantation de 2 ha de *Posidonia oceanica* dans la baie de Pollença, Majorque, Îles Baléares, Espagne

Jorge Terrados et Ines Castejón-Silvo

Mediterranean Institute of Advanced Studies, IMEDEA (CSIC-UIB). Esporles, Mallorca, Balearic Islands, Spain - terrados@imedea.uib-csic.es, icastejon@imedea.uib-csic.es

Un projet de restauration financé par Red Eléctrica de España avec le soutien du gouvernement des îles Baléares et du ministère de la défense espagnol.

Contexte

La transplantation de *Posidonia oceanica* a été effectuée pour promouvoir la récupération d'un herbier perdu dans la partie intérieure de la baie de Pollença, au nord de Majorque, dans les îles Baléares, en Espagne. Il s'agit d'un endroit peu profond (profondeur <5 m), abrité des vagues. Le substrat est une matre morte colonisée par *Cymodocea nodosa*, *Caulerpa prolifera* et d'autres macroalgues photophiles. La principale perturbation dans la zone est l'ancrage des bateaux de plaisance. La présence de recrues naturelles (plantules) dans la zone de transplantation et l'observation d'une croissance active des rhizomes en bordure de l'herbier à *P. oceanica* existant (situé à 200 m de la zone de transplantation) indiquent qu'une recolonisation naturelle est en cours. Le projet est un test de faisabilité de la mise à l'échelle d'une méthodologie de plantation de *P. oceanica* utilisée dans un projet précédent (Castejón-Silvo et Terrados, 2021).

Opérations de transplantation et techniques appliquées

Le matériel végétal utilisé pour la transplantation était constitué de fragments de rhizomes plagiotropes de *P. oceanica* (Molenaar et Meinesz 1995) produits par des processus naturels (tempêtes) qui ont été collectés manuellement par des plongeurs sous-marins à partir de matériel en épave accumulé dans les trouées de l'herbier de la baie de Pollença. Les fragments sélectionnés pour la transplantation présentaient au minimum un faisceau apical (plagiotrope, horizontale) et deux faisceaux verticaux. Les fragments ont été ancrés individuellement à l'aide d'une agrafe constituée d'une barre de fer ondulée de 6 mm de diamètre, d'une longueur de 60 cm et pliée en forme de "U" (Fig. 1).



Figure 1 : Fragment attaché à une agrafe pour un ancrage individuel

Le fragment est attaché à l'agrafe à l'aide d'un morceau de corde en fibre synthétique et de deux colliers de serrage. Ce système permet d'ancrer le fragment de rhizome jusqu'à ce qu'il produise des racines (Castejón-Silvo et Terrados, 2021).

Les fragments ont été plantés manuellement par des plongeurs sous-marins en groupes (parcelles) de 16 (quatre lignes de quatre fragments) et la distance entre les fragments était de 20 cm (Fig. 2). Les parcelles couvraient une surface d'environ 1 m² et ont été établies selon un quadrillage de 5 m par 5 m dans la zone de transplantation. Au total, 12 800 fragments ont été transplantés et 800 parcelles ont été établies. La transplantation a été effectuée en quatre étapes, de mars 2018 à novembre-décembre 2018, mars-avril 2019 et, enfin, décembre 2019-février 2020, jusqu'à ce que la zone cible de 2 ha soit achevée. La zone de transplantation a été délimitée à l'aide de bouées de surface afin d'éviter toute perturbation due à l'ancrage des bateaux de plaisance.



Figure 2 : Établissement d'une parcelle de 16 fragments transplantés

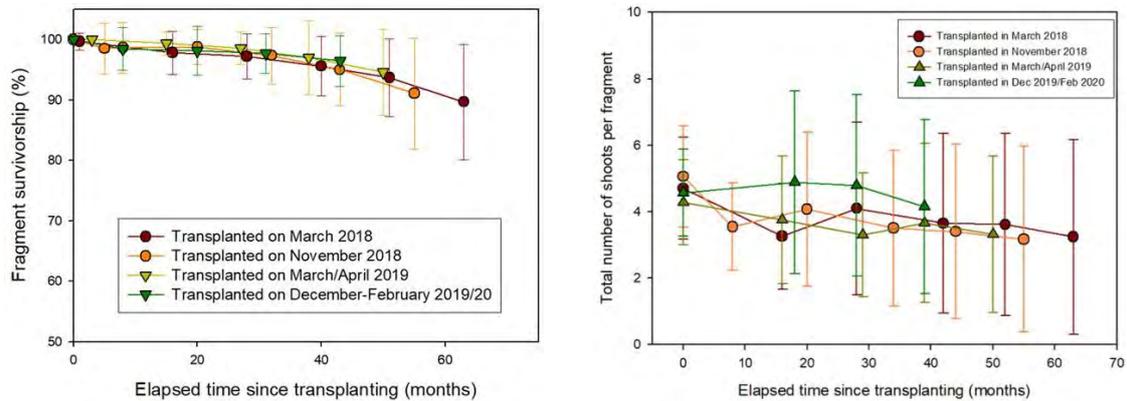
Le projet initial d'utiliser à la fois des semis de *Posidonia oceanica* et des fragments de rhizomes pour la transplantation n'a pas été possible en raison de la faible disponibilité des fruits au cours des années de transplantation (2018 et 2019). Cependant, certains fruits ont été collectés sur une plage et ont produit suffisamment de semis pour effectuer deux petites plantations d'essai. La première (en septembre 2018) a consisté à établir quatre parcelles de 40 cm x 40 cm comprenant chacune 16 semis. Les semis ont été plantés manuellement sans ancrage par des plongeurs sous-marins (Terrados *et al.*, 2013). Le second test (en septembre 2019) a consisté à établir neuf parcelles de 40 cm x 40 cm comprenant 16, 32 ou 64 semis (n=3 pour chaque niveau de densité de plantation) en suivant la même méthodologie (Terrados *et al.*, 2013).

Le suivi de la survie et du développement végétatif des fragments transplantés est effectué annuellement. La caractérisation des fragments est effectuée *in situ* par des plongeurs sous-marins et comprend le comptage du nombre de faisceaux apicaux (plagiotropes) et verticaux de chaque fragment. Cela permet d'évaluer les changements de taille (nombre de faisceaux) des fragments (N = 10 parcelles de chaque cohorte de plantation, 40 parcelles suivies). En outre, le comptage du nombre de fragments vivants dans les parcelles (N = 160 parcelles contrôlées) fournit une estimation de la survie des fragments (% par rapport au nombre initial). La survie des semis (% de semis vivants dans chaque parcelle) et le développement végétatif (surface foliaire calculée à partir de mesures *in situ* de la longueur et de la largeur de toutes les feuilles de 10 semis dans chaque parcelle) sont contrôlés chaque année.

Résultats

La survie des fragments (moyenne \pm SD) au cours des 3.5-5.5 premières années après la transplantation était supérieure à 90 %, tandis que la taille des fragments, quantifiée comme le nombre total de

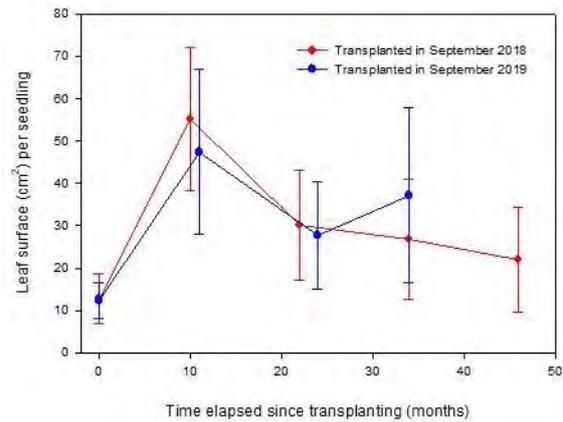
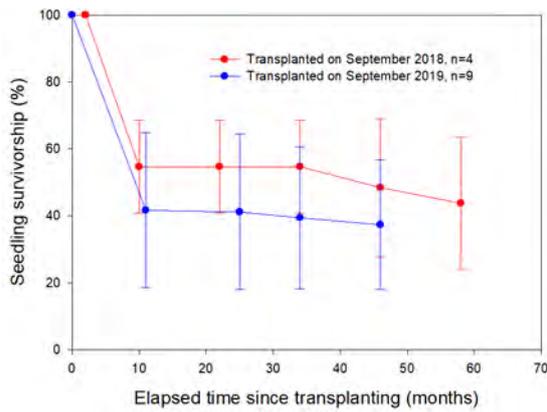
faisceaux dans le fragment, n'a pas changé au cours du même intervalle de surveillance, bien qu'une tendance à la réduction soit suggérée (Fig. 3 & 4). Le pourcentage de fragments ayant un nombre de faisceaux identique ou supérieur à celui de la période de transplantation varie entre 19 % et 44 %.



La comparaison des résultats avec les transplantations précédentes de rhizomes plagiotropes montre que la survie des fragments dans la REE Marine Forest se situe dans la partie supérieure des valeurs obtenues précédemment (Tab. 1) :

Survivorship	Time elapsed	Source
>90 %	3,5 - 5,5 years	Red Eléctrica Marine Forest
90-95%, 70%	1 year, 2 years	Mancini et al 2022 <i>Marine Pollution Bulletin</i> 179, 113683
75%	4.5 years	Mancini et al 2021 <i>Biological Conservation</i> 264, 109397
46 % - 55 %	1-3 years	Piazzini et al 2021 <i>Water</i> 13, 661
~40 %, ~30 %	3 years, 6 years	Pirrota et al 2015 <i>Mediterranean Marine Science</i> 16 : 591-604
76 %	3 years	Piazzini et al 1998 <i>Botanica Marina</i> 41: 593-601
85 %	3 years	Molenaar & Meinesz 1995 <i>Botanica Marina</i> 38: 313-322
100 %	1 year	Molenaar et al 1993 <i>Botanica Marina</i> 36: 481-488
20 % - 100 %	2-3 years	Meinesz et al 1993 <i>Botanica Marina</i> 36: 209-216

La survie des semis 4-5 ans après la transplantation varie entre 37 % et 44 %. La plus grande partie de la mortalité se produit au cours de la première année de vie des semis (Fig. 5). La surface foliaire des semis transplantés a augmenté 5 fois au cours de la première année mais a diminué par la suite pour atteindre des valeurs supérieures à 20 cm² par semis (au moins le double de la taille initiale ; Fig. 5).



La comparaison des résultats avec les plantations précédentes montre que le taux de survie des semis dans la REE Marine Forest se situe dans la fourchette des valeurs rapportées précédemment, y compris celles des semis établis par des processus naturels (Tab. 2).

Survivorship	Time elapsed	Source
37% - 44 %	4 - 5 years	Red Eléctrica Marine Forest
73 % , 48 %	2 , 3 years	Terrados et al , unpublished results (Mallorca, Alcanada)
62 %	1 year	Piazzzi et al 2021 <i>Water</i> 13, 661
75 % , 44 %	1, 2 years	Terrados et al 2013 <i>Botanica Marina</i> 56: 185-195
70 %	3 years	Balestri et al 1998 <i>J. Exp. Mar. Biol. Ecol.</i> 228: 209-225
50% , 45% , 20%	1, 2, 3 years	Meinesz et al 1993 <i>Botanica Marina</i> 36: 209-216
70 % - 40 % (natural)	2 years	Piazzzi et al 1999 <i>Aquatic Botany</i> 63: 103-112

Les résultats obtenus jusqu'à présent (septembre 2023) dans le cadre du projet REE Marine Forest montrent qu'il est possible de transplanter des fragments plagiotropes et des semis de *Posidonia oceanica* lorsque le substrat est de la matte morte et que l'emplacement est peu profond et à l'abri de l'action des vagues. La survie des fragments et des semis est similaire ou supérieure à celle des plantations précédentes, tandis que la taille des fragments (nombre total de faisceaux par fragment) reste similaire à celle observée au moment de la transplantation. Ces résultats sont encourageants pour le succès des restaurations de *P. oceanica*, mais préliminaires en raison de la croissance lente qui caractérise l'espèce. Pirrota *et al.* (2015) ont montré qu'un minimum de cinq ans de suivi après la transplantation est nécessaire pour évaluer le résultat réel de la transplantation de fragments plagiotropes de *P. oceanica*. Par conséquent, plus de cinq années de suivi pourraient être nécessaires pour évaluer le succès des actions de restauration de *P. oceanica*.

Principales références

- Balestri E, Piazzzi L, Cinelli F (1998) Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in a damaged coastal area. *J.Exp.Mar.Biol.Ecol.* 228:209-225
- Castejón-Silvo I, Terrados J (2021) Poor success of seagrass *Posidonia oceanica* transplanting in a meadow disturbed by power line burial. *Marine Environmental Research* 170, 105406.
- Mancini G, Casoli E, Ventura D, et al, 2021. An experimental investigation aimed at validating a seagrass restoration protocol based on transplantation. *Biological Conservation*, 264, 109397.
- Mancini G, Ventura D, Casoli E et al, 2022. Transplantation on a *Posidonia oceanica* meadow to facilitate its recovery after the Concordia shipwrecking. *Marine Pollution Bulletin* 179:113683.

- Meinesz A, Caye G, Loquès F, Molenaar H (1993) Polymorphism and development of *Posidonia oceanica* transplanted from different parts of the Mediterranean into the National Park of Port-Cros. *Bot.Mar.* 36:209-216
- Molenaar H, Meinesz A (1995) Vegetative Reproduction in *Posidonia oceanica*: Survival and Development of Transplanted Cuttings According to Different Spacings, Arrangements and Substrates. *Bot.Mar.* 38:313-322
- Molenaar H, Meinesz A, Caye G (1993) Vegetative Reproduction in *Posidonia oceanica*. Survival and Development in Different Morphological Types of Transplanted Cuttings. *Bot.Mar.* 36:481-488
- Piazzì L, Balestri E, Magri M, Cinelli F (1998) Experimental transplanting of *Posidonia oceanica* (L.) Delile into a disturbed habitat in the Mediterranean Sea. *Bot.Mar.* 41:593-601
- Piazzì L, Acunto S, Cinelli F (1999) In situ survival and development of *Posidonia oceanica* (L.) Delile seedlings. *Aquatic Botany* 63: 103-112
- Piazzì L, Acunto S, Frau F, Atzori F, Cinti MF, Leone L, Ceccherelli G (2021) Environmental Engineering Techniques to Restore Degraded *Posidonia oceanica* Meadows. *Water* 13, 661.
- Pirrota M, Tomasello A, Scannavino A, Di Maida G, Luzzu F, Bellissimo G, Bellavia C, Costantini C, Orestano C, Sclafani G, Calvo S (2015) Transplantation assessment of degraded *Posidonia oceanica* habitats: site selection and long-term monitoring. *Medit. Mar. Sci.* 16/3: 591-604
- Terrados J, Marín A, Celdrán D (2013) Use of *Posidonia oceanica* (L.) Delile seedlings from beach-cast fruits for seagrass planting. *Bot. Mar.* 56:185-195.

ANNEXE 6

Restauration de *Posidonia oceanica* après le naufrage du Costa Concordia sur l'île du Giglio

Giandomenico Ardizzone, Andrea Belluscio, Gianluca Mancini, Daniele Ventura, Edoardo Casoli, Sara Cardone, Lorenzo Donnini, Fulvia Farina.

Contexte

Après la collision avec les rochers émergents "Le Scole", près de la côte de l'île du Giglio (archipel de Toscane, mer Tyrrhénienne), le navire de croisière Costa Concordia a coulé le 13 janvier 2012. Les impacts sur les fonds marins, dus à la présence physique de l'épave et à toutes les opérations consécutives nécessaires à son enlèvement, ont nécessité des interventions complexes pour faciliter la restauration. Deux années ont été nécessaires pour le renflouement et l'enlèvement de l'épave (2012-2014), trois années pour les opérations de nettoyage impliquant l'enlèvement des débris, des plateformes, du ciment et des sédiments fins (2015-2018), et cinq autres années d'interventions pour la restauration de l'environnement (2019-2024). Au cours de la première période, les opérations de forage jusqu'à l'installation de la plateforme et des blocs d'ancrage, la mise en place des matelas remplis de ciment et l'enlèvement des roches ont provoqué une vaste production de sédiments fins qui se sont répandus dans toute la zone de l'épave. En plus des assemblages coralligènes, une grande partie des impacts a touché l'herbier à *Posidonia oceanica*, qui dans cette zone est mort en peu de temps à cause de l'ombre projetée par la coque de l'épave et des sédiments fins recouvrant le fond marin.

Opérations de transplantation et techniques appliquées

A la fin des opérations de nettoyage, toutes les sources de perturbation ont été retirées de la zone. Des produits cartographiques à fine échelle basés sur des données acoustiques à haute résolution (20 cm/pixel) (sondeur multifaisceaux, MBES) validées par un échantillonnage direct in situ en plongée sous-marine et des observations vidéo à distance (R.O.V.) ont été utilisés pour évaluer l'état des fonds marins. La seule partie restante de l'herbier original de *Posidonia oceanica* était le substrat biogène connu sous le nom de "matte morte", composé de rhizomes morts qui ne pouvaient pas se régénérer. Sur la base d'une analyse cartographique, trois zones d'intervention pour la transplantation de *P. oceanica* ont été identifiées sur environ 2 000 m². Bien que l'impact sur l'herbier ait affecté le fond marin jusqu'à -30 m de profondeur, nous avons décidé de n'intervenir qu'entre -10 et -23 mètres, en excluant à la fois les eaux peu profondes (en raison de l'hydrodynamisme élevé) et les eaux profondes (en raison de la faible intensité de la lumière qui atteint le fond marin, et qui aurait pu créer des problèmes pour la croissance des plantes transplantées). Ces conclusions sont basées sur une étude publiée antérieurement et sur une étude pilote (commencée en 2016) basée sur des parcelles expérimentales (1 x 1 m), couvrant la plage de profondeur de la future transplantation à grande échelle afin de vérifier l'efficacité de la méthodologie. Les meilleures pratiques pour trouver et conserver le matériel végétal et les méthodes de fixation des mottes et des rhizomes ont également été testées. Au moment de la transplantation, la "matte" morte était compacte et peu endommagée, partiellement recouverte d'une fine couche de sable grossier. Comme nous ne voulions pas modifier le fond marin en plaçant des structures de soutien artificielles, telles que des filets en fer, des cadres en béton, des matelas, etc., qui pourraient modifier l'habitat, nous avons décidé de transplanter les boutures en les attachant au fond marin avec des piquets en fer capables de se dégrader en quelques années (dans les 8-24 ans) une fois que l'enracinement complet de la plante a été atteint. Les tuteurs ont été spécialement conçus et construits pour être facilement insérés et maintenir les rhizomes dans la "matte" (Fig. 1). Une fois plantés dans la "matte", les tuteurs sont presque invisibles. Le matériel végétal comprenait à la fois des faisceaux orthotropes et plagiotropes, provenant de mottes détachées naturellement par les tempêtes et les événements d'érosion le long des limites inférieures des herbiers.

La plus grande partie du matériel provient des mottes détachées lors de l'ancrage des bateaux qui, à la fin du printemps et au début de l'automne, sont très nombreux le long de la côte de l'île du Giglio. Les mottes de *P. oceanica* collectées par les plongeurs autour de l'île et ramenées à la surface à l'aide de sacs en plastique ont été rapidement transférées à l'aide de bateaux pneumatiques vers la zone de chantier.



Figure 1 : Images du pieu composé de tiges de fer de 0.6 cm de diamètre soudé en un ou plusieurs points, chacune étant incurvée à une extrémité pour former deux bras courbes (croissants) contenant les rhizomes de *P. oceanica*.

À l'intérieur de la zone de transplantation, des cages immergées ont été utilisées pour stocker les mottes jusqu'à 3 jours. Avant la transplantation, les mottes ont été nettoyées et les parties mortes ou endommagées ont été enlevées. Les plus grandes boutures ont été divisées en morceaux plus petits avec plusieurs faisceaux foliaires et racines. Le matériel optimal comprend de préférence des rhizomes plagiotropes de 10 à 30 cm de long, chacun avec 2 à 4 faisceaux foliaires et des racines en bon état. Les opérateurs sous-marins ont implanté chaque bouture manuellement, en les fixant à l'aide d'un ou deux piquets, en fonction de leur longueur. Cette opération a été réalisée avec beaucoup de précautions par les plongeurs sous-marins afin d'éviter de couper le rhizome. Le fond marin est préparé à l'avance en divisant toute la zone de transplantation en carrés de 10 x 10 m délimités par des cordes fixées au substrat et géoréférencées pour faciliter les activités de transplantation et de suivi. À l'intérieur du carré, chaque opérateur utilise un cadre portable en aluminium de 1 x 1 m. Le cadre a été utilisé pour assurer une couverture à 100 % de la zone à transplanter avec une densité constante de boutures. La densité des boutures et des faisceaux dans la zone transplantée sur le Giglio est de 5-9 boutures/m², correspondant à 26-33 faisceaux/m².

Activités de suivi

La transplantation de Posidonie a fait l'objet d'un suivi constant avec cinq occasions d'échantillonnage par an depuis 2019 avec un échantillonnage direct en plongée sous-marine, en comptant le nombre de faisceaux pour estimer la permanence et la croissance des Posidonies dans des carrés de suivi prédéterminés qui couvrent 3 % de chaque zone de transplantation. Une partie du suivi a également été réalisée avec une technique innovante, utilisant la photogrammétrie sous-marine pour reconstruire une photomosaïque précise et des modèles 3D des zones, utiles pour le suivi à grande échelle du paysage marin au fil du temps.

Résultats

Quatre ans après le début des activités, 2 170 m² de *P. oceanica* ont été transplantés, avec une densité d'environ 26-33 faisceaux/m². La superficie totale a été atteinte progressivement de 2019 à 2022 en divisant les interventions en cinq zones avec une surface moyenne d'environ 430 m² par an pour faciliter les activités sous-marines (par exemple, la recherche et la collecte de matériel végétal, la cartographie et le suivi). Dans toutes les zones, une perte initiale de faisceaux a été observée au cours de la première année, suivie d'une augmentation des densités. Dans la zone A9 (Fig. 2), la première zone à être transplantée, 46 mois après la transplantation, la densité moyenne des faisceaux (\pm SD) est égale à 31 ± 3 faisceaux/m², ce qui correspond à un pourcentage de variation (\pm SD) de 123 ± 1 %.

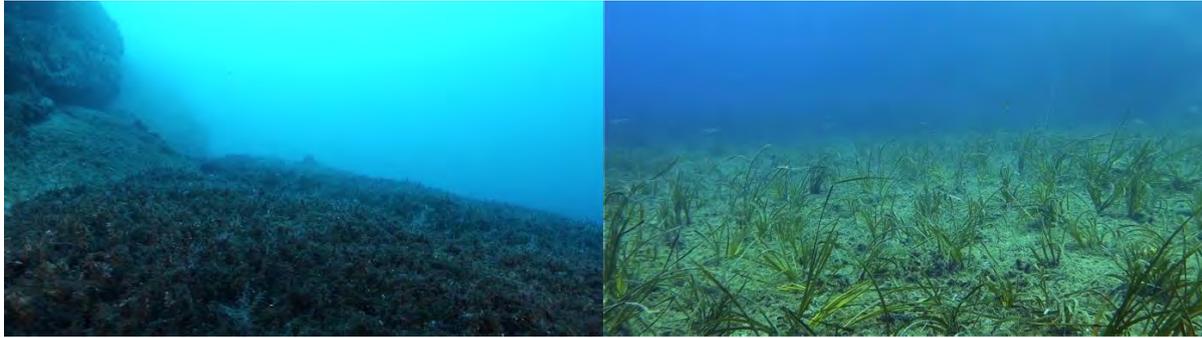


Figure 2 : Zone A9 avant la transplantation (à gauche) et après (à droite), ce qui indique le succès de la transplantation.

La zone expérimentale réalisée en 2017 montre une augmentation de 250 % de la densité des faisceaux en 90 mois, indiquant le bon succès de la transplantation (Fig. 3).

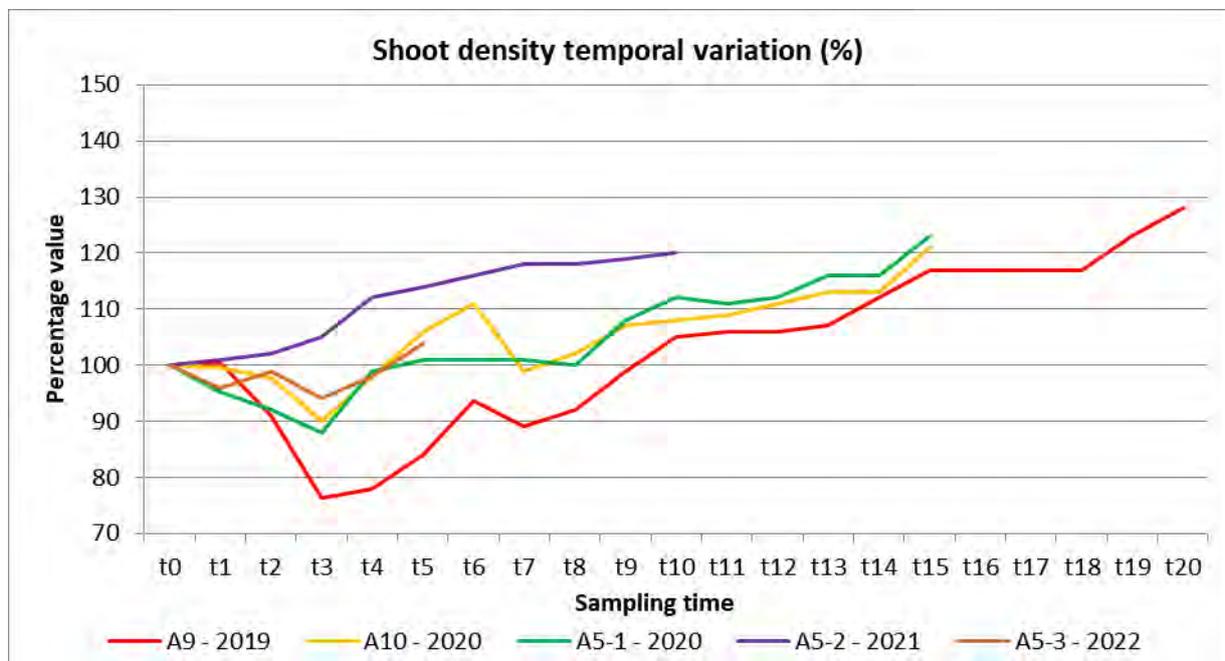


Figure 3 : Variation temporelle de la densité des faisceaux de *P. oceanica* (exprimée en pourcentage de variation par rapport à la densité des faisceaux au moment de la transplantation) transplantées sur l'île de Giglio à partir de 2019. Les couleurs correspondent aux différentes zones de transplantation selon les années : 2019 en rouge (524 m²), 2020 en jaune (196 m²) et vert (429 m²), 2021 en violet (594 m²), et 2022 en marron (427 m²).

Principales références

Ardizzone GD, Belluscio A, Casoli E, Ventura D., Cardone S, Donnini L, Farina F, Mancini G, 2023. Il restauro ambientale dei fondali interessati dal naufragio della Concordia. In *Scienza e Società. L'Ecologia per un futuro migliore. S.It.E. - Quaderni di Ecologia*, Secondo Volume, 2032: 10-25., 2023.

Bacci T., La Porta B. (2021). Manual of techniques and procedures for the transplantation of *Posidonia oceanica*. LIFE SEPOSSO (LIFE 16 GIE/IT/000761), Rome.

Mancini G, Casoli E, Ventura D *et al*, 2019. Impact of the Costa Concordia shipwreck on a *Posidonia oceanica* meadow: a multi-scale assessment from a population to a landscape level. *Marine Pollution Bulletin*, 148: 168-181.

Mancini G, Casoli E, Ventura D, et al, 2021. An experimental investigation aimed at validating a seagrass restoration protocol based on transplantation. *Biological Conservation*, 264, 109397.

Mancini G, Ventura D, Casoli E et al, 2022. Transplantation on a *Posidonia oceanica* meadow to facilitate its recovery after the Concordia shipwrecking. *Marine Pollution Bulletin* 179:113683.

Ventura D, Bonifazi A, Gravina M-F et al, 2018. Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and object-based image analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 10(9): 1331

Ventura D, Mancini G, Casoli E et al, 2021. Seagrass restoration monitoring and shallow-water benthic habitat mapping through a photogrammetry-based protocol. *Journal of Environmental Management*, 304: 114262

ANNEXE 7

Programme REPIC : Restauration d'herbiers à *Posidonia oceanica* impactés par l'ancrage des bateaux sur la Côte d'Azur

Gwénaëlle Delaruelle, Sébastien Personnic, Florian Holon, Pierre Descamp, Jo-Ann Schies.

Contexte

Une perte de 10 % des surfaces d'herbiers de Posidonie a été estimée sur 100 ans dans le bassin méditerranéen. En Méditerranée française, la région sud est la plus impactée par la pression d'ancrage, représentant 80 % des mouillages AIS enregistrés entre 2010 et 2020. Dans le golfe de Saint-Tropez, plus de 145 hectares ont disparu depuis 2010, tandis que plus de 225 hectares ont été perdus à Golfe-Juan depuis 2006.

Mené par Andromède Océanologie en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et NAOS, et avec le soutien de nouveaux partenaires en 2022, à savoir la Fondation de la mer et la Fondation Artelia, le programme REPIC (REstaurer la Posidonie Impactée par les anCres) replante des fragments (faisceaux, rhizomes, racines) d'herbiers déracinés par des ancres pendant la saison estivale (ou cassés naturellement).

Les autorités françaises ont adopté en 2019 une nouvelle réglementation interdisant tout ancrage dans les herbiers à *P. oceanica* pour les bateaux de plus de 24 m. Le nombre de grands navires (>24 m) ancrant dans les herbiers à *P. oceanica* a significativement diminué après l'application de la réglementation. Cette diminution a entraîné une baisse de la pression sur l'herbier et la mise en œuvre de mesures de restauration.

Depuis 2019, l'objectif du programme REPIC est donc d'initier un processus de restauration (renforcement des populations) de ces herbiers dans plusieurs zones sélectionnées afin d'accélérer la reconstitution des herbiers restants et de reconquérir les zones qui ont été détruites. Il permettra également de mieux comprendre les phénomènes complexes liés à la recolonisation des herbiers de Posidonie.

Opérations de transplantation et techniques appliquées

Trois sites géographiques dans les Alpes-Maritimes ont été identifiés pour le programme REPIC : Golfe-Juan à partir de 2019, Beaulieu-sur-Mer à partir de 2021 et Villefranche-sur-Mer à partir de 2023. Ces sites ont été sélectionnés en fonction de la présence de matte morte, du gradient de profondeur et de la forte pression d'ancrage à proximité de l'emplacement permettant de récolter facilement des fragments. Suite aux dégâts subis par l'herbier de Posidonie dans le passé et aux nouvelles mesures de protection mises en place (notamment les règles d'ancrage), ces sites sont aujourd'hui des zones idéales pour tester de nouvelles méthodes de restauration de l'herbier. Ils font l'objet d'un suivi scientifique pendant au moins cinq ans.

Les différentes techniques de restauration testées dépendent de la morphologie, de l'agrégation, de la disposition, de la densité et des types de préparation des fragments. Les méthodes de suivi comprennent le suivi individuel des fragments dans des quadrats permanents, le suivi visuel de toutes les zones restaurées à l'aide de la photogrammétrie, le suivi des réserves de carbohydrate dans les fragments et le suivi de l'évolution des paramètres environnementaux (température, mais aussi d'autres données à grande échelle disponibles auprès de diverses sources) dans la zone de restauration. Chaque année, ces expériences de restauration ont été autorisées par des arrêtés préfectoraux.

La méthodologie utilisée dans le programme REPIC est basée sur l'expérience passée en matière de transplantation (voir section I. Contexte) et sur l'optimisation des travaux à grande échelle.

La méthodologie de restauration est divisée en trois phases :

- la récolte des fragments : elle s'effectue à une profondeur comprise entre -8 m et -13 m. Les fragments préférés sont plagiotropes, de 5 à 7 cm de long, avec plusieurs faisceaux ;
- la préparation des fragments : elle a lieu sous l'eau la première année, puis sur le bateau, où des agrafes métalliques biodégradables (la dégradation complète est estimée à 10 ans +/- 3 ans) sont fixées aux fragments avant d'être stockées dans des caisses remplies d'eau de mer ;
- la restauration *in situ* des fragments : Les fragments sont fixés dans le substrat à l'aide d'agrafes (Fig. 1). La disposition des fragments varie en fonction des zones à restaurer :
 - o carrés de 0.25 m² à 1 m² à Golfe-Juan ;
 - o cercles de 0.5 m² dans des parcelles de différentes densités (lignes de 5, 10, 20 et 30 faisceaux par cercle) à Beaulieu-sur-Mer et Villefranche-sur-Mer.



Figure 1 : Fragment transplanté sur le site de restauration de Beaulieu-sur-Mer, ©Laurent Ballesta 2023

Activités de suivi

Différentes méthodes de suivi sont utilisées chaque année :

- Suivi du nombre de fragments et de la densité des faisceaux dans des quadrats permanents :
 - o Suivi du nombre de faisceaux par fragment identifié par une marque (deux zones à Golfe-Juan et trois zones à Beaulieu-sur-Mer)
 - o Suivi du nombre de faisceaux total par quadrat (deux zones à Golfe-Juan, presque toutes les zones à Beaulieu-sur-Mer). Cette méthode est utilisée principalement pour le suivi depuis 2021 et sera privilégiée pour les suivis futurs afin d'établir la dynamique de croissance des fragments (régression ou progression).
- Contrôle visuel des zones restaurées à l'aide de la photogrammétrie (Fig. 2)
- Suivi des réserves en carbohydrate des rhizomes : Le protocole de suivi des carbohydrates a été réalisé à Golfe-Juan en 2020, 2021, 2022 et 2023, et à Beaulieu-sur-Mer en 2022 et 2023 pour évaluer les réserves de carbohydrate stockées dans les rhizomes, au moment de la récolte puis tous les ans (trois ans) après la restauration. Ces valeurs sont comparées à celles d'un herbier naturel à la même profondeur que l'herbier restauré. Trois échantillons par site et par année sont analysés.
- Suivi des conditions environnementales pour tester l'effet du site (température, salinité, courants, chlorophylle a, etc.).

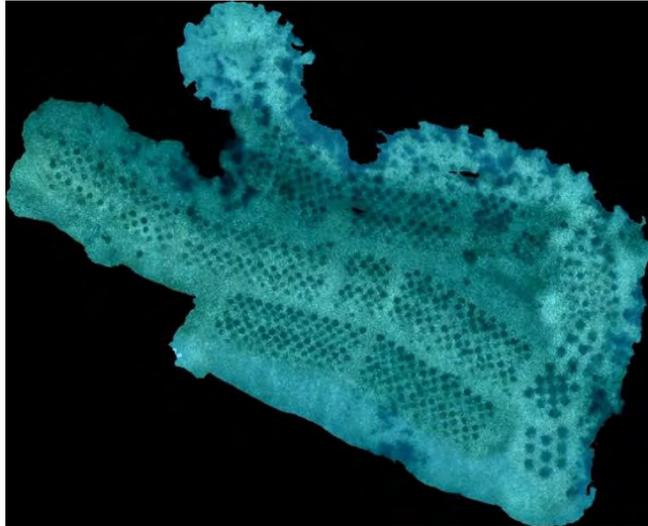


Figure 2 : Orthophotographie du site de restauration de Beaulieu-sur-Mer (1 700 m²) obtenue par photogrammétrie ©Andromède Océanologie

Résultats

Depuis 2019, cinq à sept plongeurs et biologistes ont passé 358 jours sur les opérations REPIC. Au total, environ 730 heures de plongée (266 heures de prélèvement, 320 heures de transplantation et 144 heures de suivi scientifique) ont été nécessaires. L'année 2023 se traduit par 5 années de suivi des zones les plus anciennes transplantées entre 2019 et 2022 (94 205 faisceaux ou 28 160 fragments ; Fig. 3). Au vu des premiers résultats de 2019, il a été délibérément décidé de privilégier une plus grande densité de faisceaux, pour une meilleure réussite de l'opération, plutôt qu'une grande surface couverte.

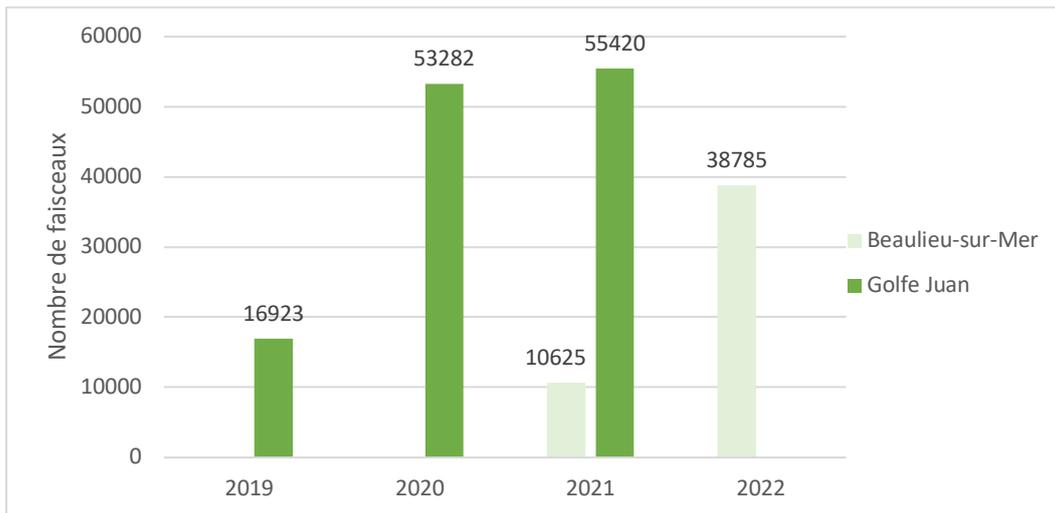


Figure 3 : Nombre cumulé de faisceaux transplantées par site entre 2019 et 2022.

Le taux de survie des zones transplantées les plus anciennes à Golfe-Juan (sur 152 m² depuis 2019) était de 57 % en 2023 (T+4 ans). Le taux de perte le plus élevé a été observé entre la première et la deuxième année. Par la suite, le nombre de faisceaux s'est stabilisé, voire a augmenté.

Au fil des années, nous avons affiné la méthodologie en fonction des observations et des premiers

résultats étudiés. En ce qui concerne les transplantations, nous continuons à transplanter en utilisant la méthode des patches circulaires et nous remarquons une meilleure récupération et une meilleure survie sur les cercles ayant une densité plus élevée (Fig. 4).

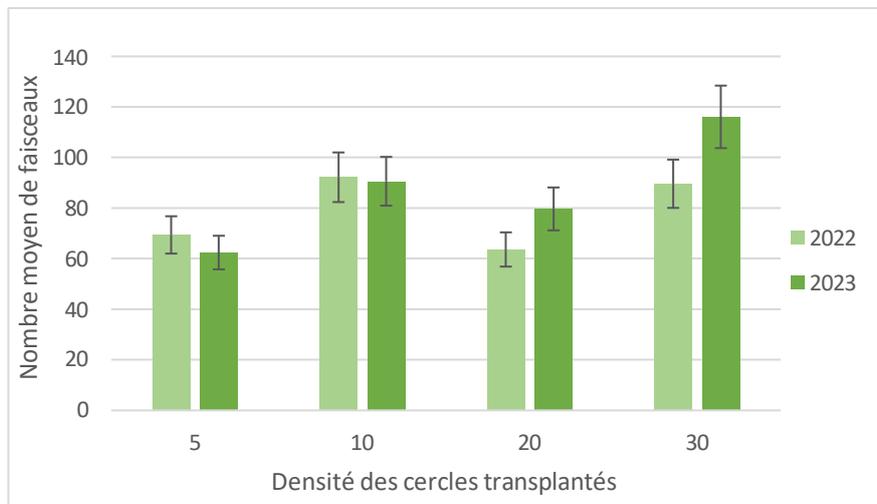


Figure 4 : Nombre moyen de faisceaux comptés dans les quadrats permanents à Beaulieu-sur-Mer à l'année de plantation (2022) et à T+1 (2023) Erreur = variabilité inter-compteur de 10.65 %.

Nous étudions l'effet de la profondeur sur les taux de survie : ils sont plus élevés dans les zones de -18 m (Beaulieu-sur-Mer ; Fig. 5) que dans les zones de -3 m (Golfe-Juan) et -30 m (une seule zone suivie à Beaulieu-sur-Mer, Fig. 6). Le taux de survie entre 2021 et 2023 est de 59 % à Golfe-Juan (-3 m ; Fig. 7) contre 72 % à Beaulieu-sur-Mer (-18 m ; Fig. 8) pour la même période.

La suite du programme REPIC tiendra compte de ces changements afin d'affiner la méthodologie de réimplantation de ces transplants.

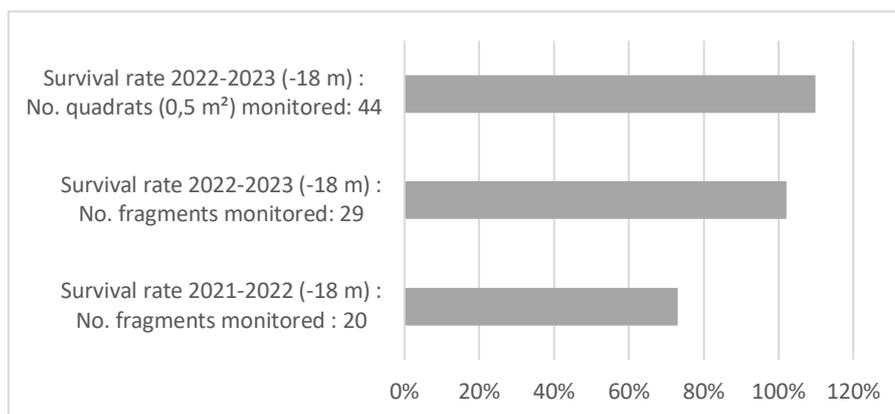


Figure 5 : Taux de survie des faisceaux suivis à T+1 année à Beaulieu-sur-Mer, dans les zones plantées en 2021 ou 2022. Le suivi a été effectué dans des quadrats ou sur des fragments spécifiquement suivis.

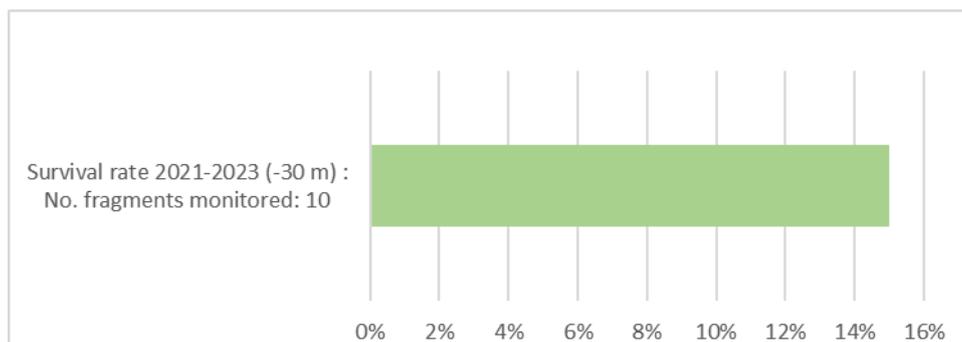


Figure 6 : Taux de survie des faisceaux suivis entre 2021 et 2023 (T+2 ans) dans la zone la plus profonde de Beaulieu-sur-Mer.

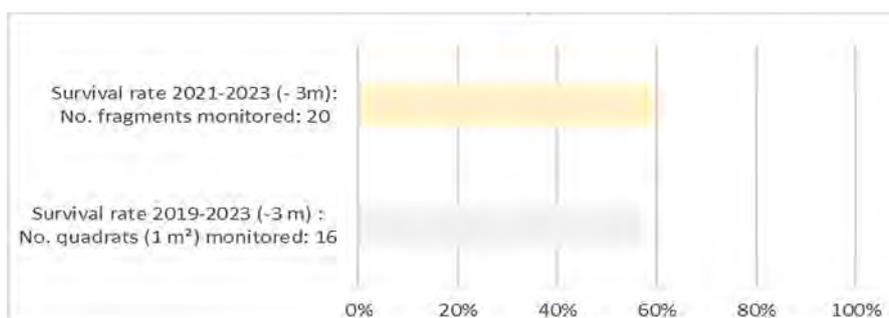


Figure 7 : Taux de survie des faisceaux plantés en 2021 et suivis en 2023 (T+2 ans ; faisceaux comptés sur les fragments suivis) et des faisceaux plantés en 2019 et suivis en 2023 (T+4 ans ; faisceaux comptés dans les quadrats suivis) à Golfe-Juan.

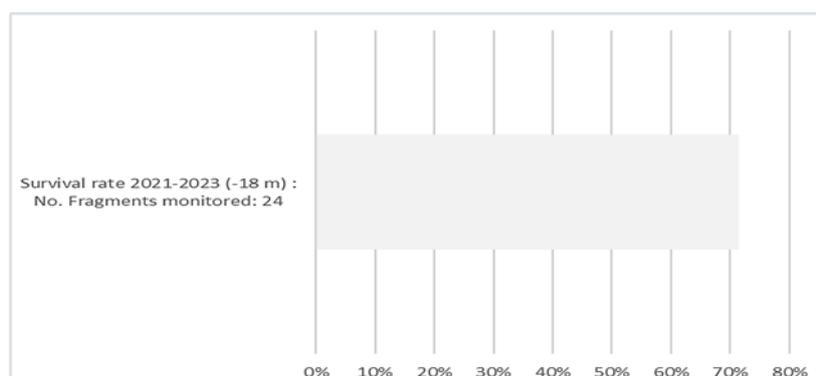


Figure 8 : Taux de survie des faisceaux suivis plantés en 2021 et suivis en 2023 (T+2 ans) à Beaulieu-sur-Mer (-18 m).

Principales références

Bockel, T., Marre, G., Delaruelle, G., Holon, F., Boissery, P., et al. Anchoring pressure and the effectiveness of new management measures quantified using AIS data and a mobile application. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 195, pp.115511. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115511>

Deter, J., Lozupone, X., Inacio, A., Boissery, P., Holon, F., 2017. Boat anchoring pressure on coastal seabed: quantification and bias estimation using AIS data. *Marine Pollution Bulletin*, 123, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.065>.

Deter, J., Bockel, T., Delaruelle, G., Holon, F., Ballarin, M., Duschene, T., & Boissery, P. (2022). Préservation des posidonies: les resorts d'une collaboration efficace. Sfecologie.org (web archive link, 22 juin 2022). <https://sfecologie.org/regard/r104-juin-2022-j-deter-et-al-posidonies/>

Marre, G., Deter, J., Holon, F., Boissery, P., & Luque, S. (2020). Fine-scale automatic mapping of living *Posidonia oceanica* seagrass beds with underwater photogrammetry. *Marine Ecology Progress Series*, 643, 63-74.

Marre, G., Holon, F., Luque, S., Boissery, P., & Deter, J. (2019). Monitoring marine habitats with photogrammetry: a cost-effective, accurate, precise et high-resolution reconstruction method. *Frontiers in Marine Science*, 6, 276.

Medtrix. 2019.Cahier de la surveillance N°6 – Edition spéciale : impact du mouillage des grands navires en méditerranée française. <https://medtrix.fr/wp-content/uploads/2019/09/cahier6.pdf>

Suivi du mouillage de la grande plaisance par données AIS - Plateforme de surveillance MEDTRIX (<https://plateforme.medtrix.fr>).

ANNEXE 8

Synthèse des principales publications, classées par année, concernant la transplantation de boutures.

N°	Référence	Substrat	Anchorage	Durée (en mois)	Saison de plantation	Profondeur	Principaux résultats	Informations pertinentes pour l'avenir
43	Maggi, 1973	Sable coquillier	Bétons	12 - 17	Mars et août	8	Pour les boutures transplantées en mars : pourcentage de couverture supérieur à 60 % et pour celles transplantées en août : pourcentage de couverture de 30 à 40 %.	L'essai de transplantation de mars 1971, réalisé au début de la phase de forte activité métabolique, a donné un pourcentage de réussite beaucoup plus élevé que l'essai d'août 1971, réalisé pendant la phase de faible activité métabolique.
38	Meinesz <i>et al.</i> , 1992	Matte morte	Grille en plastique	12	Juin + sept. + déc. + mars	5.3	Orthotrope (deux faisceaux) : Survie 76 %	Pas d'effet de la longueur du rhizome sur la survie. Les plantations de septembre ont mieux survécu
36	Molenaar & Meinesz, 1992	Matte morte	Grille en plastique	12	Août		Orthotrope (1 prise de vue à 30 m) : Survie % Formation racines % 3 93 43 14 96 44 20 100 28 36 72 0	Meilleure survie lorsque l'origine de la profondeur est supérieure à la profondeur de plantation
19	Molenaar <i>et al.</i> , 1993	Matte morte	Grille en plastique	12	Août	14	Plagiotrope (1 ap + 2 vert) : Survie 100 %, formation de racines 97 % Orthotrope (1 et 2 fscx) : Survie 31 % et 94 %, formation de racines 14 % et 62 %.	Moins bonne performance des fragments orthotropes à faisceau unique.
42	Genot <i>et al.</i> , 1994		Piquet individuelle en acier inoxydable	6	Janvier	8 10 15 20	Orthotrope : survie 86 % lorsque la profondeur d'origine > à la profondeur de plantation, 59 % lorsque la profondeur d'origine < la profondeur de plantation	Meilleure survie lorsque l'origine de la profondeur est supérieure à la profondeur de plantation Plus de [Rhl] et de carbohydrates dans les transplants lorsque l'origine de la profondeur > la profondeur de plantation

37	Molenaar & Meinesz, 1995	<i>C. nodosa</i> sur sable <i>C. nodosa</i> Sur matte morte + sable	Piquet métallique individuel	36	Avril, juin, octobre (le temps est un facteur trompeur, il n'est pas pris en compte dans les résultats) Juin	6-8	Plagiotrope (1 ap + 2 vert) : Survie 85 %, ramification 99 % Orthotrope (1 et 2 faisceaux) : Survie 39 % et ramification 96 %. Plagiotrope (1 ap + 2 vert) : Survie 92 %, ramification 99% Orthotrope (1 et 2 faisceaux) : Survie 39 % et ramification 96 %.	Pas de survie sur le sable non végétalisé. Meilleure survie des fragments plagiotropes. Pas de différence claire entre les arrangements Meilleurs résultats à 5 cm qu'à 10 cm sur sable + <i>C. nodosa</i> Meilleurs résultats à 5 cm qu'à 10, 15, 20 cm sur matte morte + <i>C. nodosa</i>
26	Augier <i>et al.</i> , 1996	Sable/boue	Cadres en béton	115	Mai	10	La densité passe de 120 -> 475 - 873 faisceaux * m ⁻² Augmentation de la surface initiale * 7	Deux séries de transplants : 1/ Transplantée en mai 1983 et suivie en janvier 1992 2/ Transplantée en mai 1990 et suivie en janvier 1992
20	Piazzini <i>et al.</i> , 1998	Matte morte	Grilles métalliques plastifiées	36	Juin à septembre	10	Plagiotrope (1 faisceau) : Survie 76 %, 5-6 mois de production de nouveaux faisceaux, % d'élongation du rhizome 70 %. Orthotrope (2 faisceaux) : Survie 59 %, >12 mois de production de nouveaux faisceaux, % d'élongation du rhizome 22 %.	Une survie, une croissance et une ramification plus élevées des plantes plagiotropes Pas d'effet de l'origine de la profondeur
39	Vangeluwe <i>et al.</i> , 2004	Matte morte Sable + <i>C. nodosa</i> Sable	Grille métallique non couverte	6	Décembre		Orthotrope (1 faisceau, 10 cm de rhiz.) Après 6 mois, la teneur en nutriments des feuilles n'est pas rétablie dans les transplants. La teneur en CNP des rhizomes et des racines est rétablie. Développement des racines après 6 mois de transplantation	Dégradation et défaillance de l'ancrage Très faible taux de survie sur le sable non végétalisé.

25	Balestri <i>et al.</i> , 2011	Récif artificiel de débris calcaires	Logés dans les débris	12	Octobre	1.5	Fragments (plag. + ortho.) : Survie 50 %, nouveaux faisceaux 40 %. Le meilleur résultat de ce travail concerne la culture des fragments : conservés pendant une longue période (3 ans) pendant la culture, la survie et la régénération étaient meilleures dans les plag. que dans les ortho.	Les fragments générés par la tempête peuvent être transplantés s'ils sont collectés sur la plage juste après la tempête. Défaillance de l'ancrage, 40 % de pertes
21	Pirrota <i>et al.</i> , 2015	Matte morte	Grillage en fer électro soudé galvanisé	70	Juillet		Plagiotrope (1 ap + 2 vert) Survie 32 %, diminution de la densité de 66 à 32 faisceaux m ² , augmentation des faisceaux par fragment de 4 à 11.	Production de faisceaux par les fragments à partir de la quatrième année après la transplantation Les résultats obtenus au cours de la troisième année ont changé au cours de la quatrième année
40	Alagna <i>et al.</i> , 2019	Matelas de gabion rempli de roches	Cinq ancres différents aux gabions et/ou aux roches	30	Mai	12	Orthotrope (1 faisceau, 10 - 15cm, poches de grillage insérées dans la couche supérieure du gabion) : survie 93 %, ramification 57 %, Augmentation de la biomasse relative des structures de réserve de 19 à 43 % (rhiz.), de 1 à 11 % (racine). La densité a été multipliée par quatre, passant de 36 à 106 faisceaux m ²	Meilleurs résultats de l'ancrage avec des poches de grillage insérées dans la couche supérieure du gabion Les fragments logés dans les roches n'ont pas développé de système d'ancrage, 60 % des pertes.
24	Piazzini <i>et al.</i> , 2021	Matte morte	Filet grossier en fibres naturelles	36	Printemps	15 20	Survie des fragments (plag. + ortho.) 46 %.	Le système d'ancrage a réussi

35	Ward <i>et al.</i> , 2020		Deux morceaux de bambou en "V" inversé Pots en fibre de coco inversés	15	Mai	4.5 8	Survie plagiotrope 89 % Survie orthotrope 60 %	De meilleurs résultats pour l'ancrage en bambou Meilleurs résultats des plagiotropes
22	Castejón-Silvo & Terrados, 2021	Sable Sacs en toile de jute remplis de gravier	Pièce de fer en forme de U (agrafe)	48	Mai - Juillet	15 20 25	Plagiotrope (1 ap + 2 vert) Survie 31 % Production de nouveaux faisceaux après 1 an mais pas de développement du système racinaire après 2 ans	Très faible taux de survie sur le sable non végétalisé. Échec de l'ancrage - Meilleurs résultats à des profondeurs plus importantes Échec de la mesure de stabilisation (sac de gravier en toile de jute) pour la transplantation Résultats après 2 ans changements à la 4 ^{ème} année
23	Mancini <i>et al.</i> , 2021	Matte morte	Piquets en fer	52	Août - septembre	8-21	Boutures plagiotropes avec un minimum de 4-5 faisceaux : survie 75 %. Augmentation de la densité de 30 à 48 faisceaux m ⁻²	Les fragments générés par l'ancrage des bateaux conviennent à la transplantation Ancrage réussi
41	Mancini <i>et al.</i> , 2022	Matte morte	Piquets en fer	24	Juin septembre	10-23	Survie 79.5 % (type de fragment non décrit) Densité initiale 100 faisceaux m ⁻² jusqu'à 105 faisceaux m ⁻²	Les fragments générés par l'ancrage des bateaux conviennent à la transplantation Les résultats en matière de densité ont changé entre le premier mois et le 24 ^{ème} mois. La densité la plus faible à 8 mois s'est rétablie à 24 mois.

ANNEXE 9

Synthèse des principales publications concernant la transplantation de semences

N°	Référence	Substrat	Anchorage	Durée (en mois)	Saison de plantation	Profondeur	Principaux résultats	Informations pertinentes pour l'avenir
49	Meinesz <i>et al.</i> , 1993	Matte morte	Piquet ou grille en métal	36	Sept.	11	1 ^{ère} année 50 %, 2 ^{ème} année 45 %, 3 ^{ème} année 20 %.	Croissance en aquariums pendant 14 mois
45	Balestri <i>et al.</i> , 1998	Matte morte	Grille en plastique fixée par des barres métalliques	36		10	Survie : 1 ^{ère} année 83 %, 2 ^{ème} année 80 %, 3 ^{ème} année 70 %. Ramification 3 ^{ème} année 14 % Survie : 1 ^{ère} année 20 %, 3 ^{ème} année 0 %.	Les fruits récoltés sur la plage conviennent à la transplantation. Croissance en aquariums pendant 2 mois. La survie et la taille des semis plantés sur la matte morte étaient équivalente à la survie naturelle des recrues (66 %).
51	Piazz <i>et al.</i> , 1999	Matte morte Roche Gravier	Pas de plantation	26		2-10	Pas d'expérience de manipulation. Il n'y a pas de plantation mais les résultats sur le recrutement naturel peuvent être utilisés pour des initiatives de restauration. Survie : Matte 10m : 1 ^{ère} année 87 %, 2 ^{ème} année 70 % Matte 2m : 1 ^{ère} année 87 %, 2 ^{ème} année 40.5 % Roche (10m) : 1 ^{ère} année 62 %, 2 ^{ème} année 46.4 % Gravier (z=2-10) : 2 ^{ème} année 0 %	Diminution importante de la densité des semis au cours de la première année et stabilisation la deuxième année. Recrutement naturel (indicateur de la réussite de la plantation ?), développement des rhizomes favorisé sur la matte morte et la roche Pas de survie des recrues (indicateur de l'échec de la plantation ?) dans le gravier non végétalisé et le lit rocheux peu profond.
54	Infantes <i>et al.</i> , 2011	Zone sablonneuse Herbier de Posidonie avec trous de sable	Aucun	7	Août	12 & 18	Après les tempêtes, tous les semis de Posidonie ont disparu.	Germination en aquarium Les semis de <i>P. oceanica</i> ont survécu dans une proportion plus élevée dans les sites profonds que dans les sites peu profonds

44	Dominguez <i>et al.</i> , 2012	Matte morte Herbier vivant	Pot en maille	9	Juillet	8-12	Survie : Matte : 1 ^{ère} année 75 % Herbier vivant : 1 ^{ère} année 22 %	Croissance en aquariums pendant 2 à 3 mois Meilleure survie et taille des semis plantés sur de la matte morte
52	Alagna <i>et al.</i> , 2013	Roches végétalisées Sable non végétalisé Gravier non végétalisé	Pas de plantation	24		3	Pas d'expérience de manipulation. Il n'y a pas de plantation mais les résultats concernant le recrutement naturel peuvent être utilisés pour des initiatives de restauration.	Survie nulle des recrues naturelles sur le gravier et le sable (proxy de l'échec de la plantation ?) Recrutement naturel (indicateur du succès de la plantation ?), développement des rhizomes et des racines favorisé sur les substrats rocheux colonisés par des algues gazonnantes (Halopteris spp. Et Dilophus spp.) Une baisse significative de la densité des semis sur les roches colonisées par les algues gazonnantes a été enregistrée après la première année
30	Terrados <i>et al.</i> , 2013	Herbier vivant Matte morte	Pot en maille Aucun	36	Juillet		Pas de survie des semis plantés sur un herbier vivant Survie : 75 % 1 ^{ère} année, 44 % 3 ^{ème} année. Ramification : 0 % 1 ^{ère} année	Croissance en aquariums pendant 2 à 3 mois La survie des semis ne bénéficie pas de l'ancrage artificiel Pas de survie des semis plantés dans un herbier vivant
46	Pereda-Briones <i>et al.</i> , 2018	Matte morte	Aucun	6	Juin	3	Survie : 50 % sans <i>C. cylindracea</i> 70 % avec <i>C. cylindracea</i>	Croissance en aquariums pendant 2 à 3 mois L'espèce envahissante <i>Caulerpa cylindracea</i> ne nuit pas à la survie des semis. L'ajout de nutriments a réduit le taux de survie mais a induit la production de feuilles de semis.
50	Pereda-Briones <i>et al.</i> , 2020	Roche Matte morte Gravier et sable	Pas de plantation	19		1.5-4.5	Pas d'expérience de manipulation. Il n'y a pas de plantation mais les résultats concernant le recrutement naturel peuvent être utilisés pour des initiatives de restauration. Survie : Roche : >80 % 1 ^{ère} année, 80 % 2 ^{ème} année Matte morte : >80 % 1 ^{ère} année, 70 % 2 ^{ème} année Gravier et sable : 0 % 2 ^{ème} année	Faible recrutement naturel (proxy de l'échec de la plantation ?) dans le sable ou les graviers non végétalisés. Recrutement naturel et TLA améliorés dans les zones d'abri (<) avec substrats rocheux et matte morte colonisés par des macroalgues, en particulier les crustacés (c'est-à-dire <i>Peysionellia</i> et <i>Lithophyllum</i> sp.).

