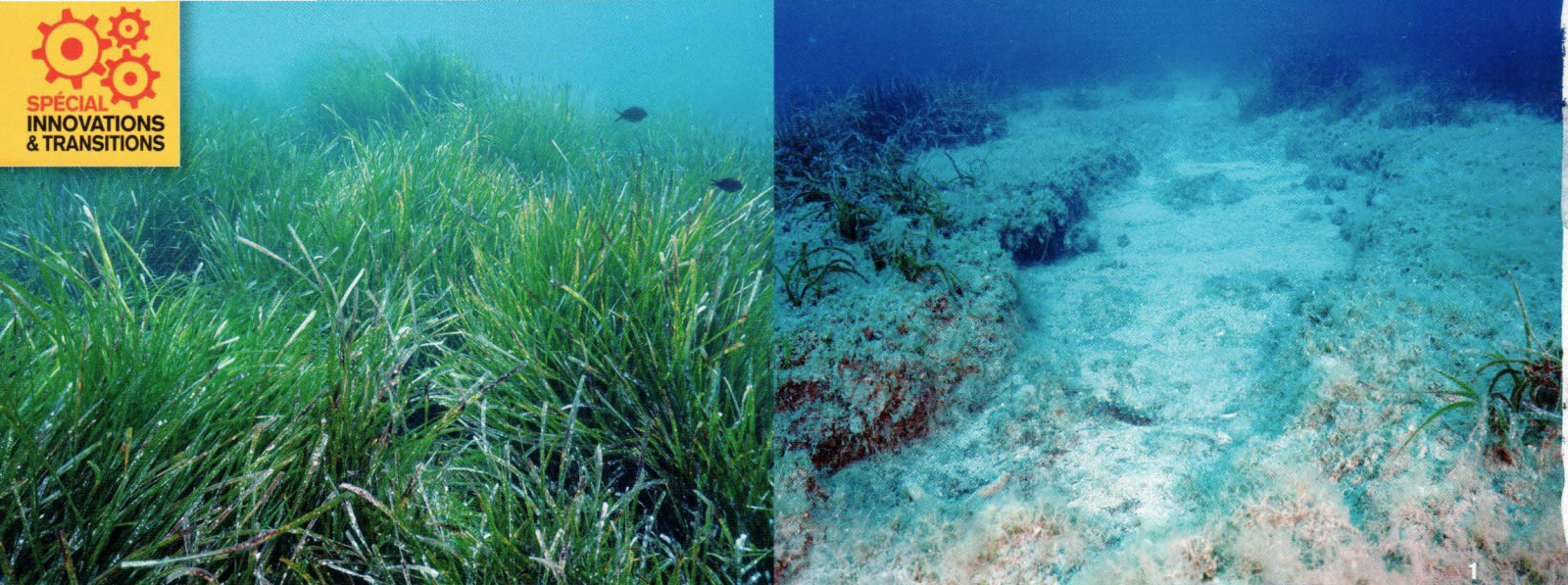




© G. PERGENT

SÉQUESTRATION DU CARBONE BLEU : UNE SOLUTION POUR RÉDUIRE LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

AUTEURS : GÉRARD PERGENT, PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, ÉQUIPE ÉCOSYSTÈMES LITTORAUX & GIS POSIDONIE, UNIVERSITÉ DE CORSE PASCAL PAOLI - BRIAC MONNIER, DOCTEUR, ÉQUIPE ÉCOSYSTÈMES LITTORAUX & GIS POSIDONIE, UNIVERSITÉ DE CORSE PASCAL PAOLI - CHRISTINE PERGENT-MARTINI, MAÎTRE DE CONFÉRENCE, ÉQUIPE ÉCOSYSTÈMES LITTORAUX & GIS POSIDONIE, UNIVERSITÉ DE CORSE PASCAL PAOLI

LA COMPENSATION CARBONE, QU'ELLE SOIT OBLIGATOIRE OU VOLONTAIRE, EST APPELÉE À SE DÉVELOPPER DANS LES PROCHAINES ANNÉES AU SEIN DE L'ENTREPRISE. L'ÉMERGENCE DE PROJETS À L'ÉCHELLE LOCALE OU RÉGIONALE, BÉNÉFICIAIRE D'UNE MEILLEURE TRAÇABILITÉ, EST AUJOURD'HUI RECHERCHÉE. LA COMPENSATION BASÉE SUR LE CARBONE BLEU APPARAÎT COMME UNE STRATÉGIE PERTINENTE EN COMPLÉMENT DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS. LES RÉSULTATS DU PROGRAMME RenforC PERMETTRONT DE DISPOSER D'UNE OU DE PLUSIEURS TECHNIQUES FIABLES ET SCIENTIFIQUEMENT VALIDÉES POUR PROPOSER DES ACTIONS DE COMPENSATION PERTINENTES.

CONTEXTE

L'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, depuis le début de l'ère industrielle et principalement depuis quelques décennies, se traduit par toute une série de dérèglements climatiques avec des conséquences majeures au niveau écologique, économique mais également humain (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021). La principale stratégie, mise en place pour limiter ces impacts, consiste en une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), initiée par le Protocole de Kyoto de 1997, et formalisée par l'Accord de Paris, en 2015. Une approche complémentaire permet de développer des actions pour renforcer la capture du carbone, et notamment celle du dioxyde de carbone (CO₂). En parallèle à la réduction des émissions, elle se propose, en effet,

de piéger ces GES au moyen de procédés techno-industriels mais également biologiques ("solutions basées sur la nature"). Ces approches ciblent principalement le milieu terrestre à travers la capture de CO₂ à la source et son stockage géologique (injection dans des aquifères profonds et des gisements pétroliers), sa valorisation (carbonatation du béton recyclé) ou plus traditionnellement des actions de reforestation (capture du carbone par la photosynthèse des végétaux).

La compensation carbone est un mécanisme financier qui consiste à contrebalancer ses propres émissions de CO₂ par le financement de projets de réduction et/ou de séquestration de carbone. À l'échelon national, cette approche s'inscrit dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), qui vise à réduire l'empreinte carbone de la consommation française et atteindre

1- Herbier de Posidonie (à gauche) et herbier dégradé par l'ancrage des bateaux de plaisance (à droite).

1- Posidonia oceanica (on the left) and seagrass harmed by anchoring of pleasure boats (on the right).

la neutralité carbone d'ici 2050, neutralité définie comme étant l'équilibre entre les émissions et séquestrations par les puits (bilan carbone = émission - séquestration). Cette démarche, qui peut être volontaire, est également utilisée dans des cadres institutionnels comme dans le protocole de Kyoto ou

le nouveau dispositif CORSIA, entré en application en janvier 2021⁽¹⁾.

Toutefois plus de la moitié de la fixation du carbone a lieu dans les océans (carbone bleu), à travers la photosynthèse du phytoplancton et de la végétation côtière. Cette végétation côtière (mangroves, prés salés et herbiers marins), qui n'occupent qu'une très faible surface (moins de 1 % de la surface des océans), fixe près de 18 % du carbone bleu mais surtout stocke plus de la moitié de ce carbone (accumulation du carbone sous forme de matière organique dans le sol marin). Parmi ces écosystèmes, les herbiers de Posidonie, une plante marine de Méditerranée, jouent un rôle particulier. En effet, cette plante, qui couvre plus de 2 millions d'hectares, stocke 8 fois plus de carbone que les sols forestiers au sein d'une structure bio-construite unique appelée "la matre" qui peut atteindre plusieurs

mètres d'épaisseur (jusqu'à 8 m). Les conditions anoxiques et la composition de cette structure rendent la matte très peu putrescible contribuant ainsi à la séquestration d'importantes quantités de carbone (2 500 à 3 000 t équivalent CO₂ par hectare) sur plusieurs milliers d'années (voir encadré "Posidonie"). Ces herbiers jouent donc un rôle majeur dans la fixation et la séquestration du carbone et contribuent à la réduction des impacts du changement climatique. Malheureusement, du fait des activités humaines, ces herbiers sont soumis à de forts impacts et régressent dans plusieurs secteurs de Méditerranée (environ 10 à 20 % au cours du XX^e siècle). Même si ces herbiers sont aujourd'hui protégés (conventions internationales, Directives Européennes, législations nationales), les surfaces perdues sont importantes, de même que les services écosystémiques qui en découlent. Par rapport aux années 60, on enregistre depuis le milieu des années 80, une forte augmentation des dommages mécaniques engendrés par certaines activités comme l'ancrage des grandes unités de plaisance qui provoque des destructions significatives de ces herbiers (figure 1).

Ainsi, dans plusieurs secteurs particulièrement attractifs, comme la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio (RNBB) en Corse qui reçoit plus des deux tiers des unités de plaisance de l'île, plusieurs dizaines d'hectares d'herbiers de Posidonie ont été détruits au cours de ces dernières décennies, principalement dans la baie de Sant'Amanza où une perte de 8 ha a été mesurée entre 2019 et 2020 (-16 % des surfaces présentes). Face à cette situation, de nouvelles mesures réglementaires ont été mises en place par les services de l'État (voir encadré "Mouillages"). Ainsi le mouillage des grandes unités de plaisance (supérieures à 24 m) est aujourd'hui interdit sur les herbiers dans toute la RNBB, 14 mouillages organisés ont été installés dans la baie de Sant'Amanza, associés à une zone d'interdiction de mouillage de 60 ha pour tous les bateaux, quelle que soit leur taille.

PROJET RenforC

Du fait des anciennes dégradations subies par l'herbier de Posidonie et des nouvelles mesures de protection mises en place, la baie de Sant'Amanza constitue aujourd'hui un site atelier unique pour tester de nouvelles méthodes de restauration de ces herbiers. La restauration de

POSIDONIE

La Posidonie (*Posidonia oceanica*) n'est pas une algue mais une plante à fleurs endémique de Méditerranée. Elle constitue de vastes herbiers entre la surface et 40 m de profondeur qui assurent de nombreux services écosystémiques (source de nourriture, pôle de biodiversité, oxygénation des eaux, protection du littoral contre l'érosion, frayère et nurserie et atténuation des impacts du changement climatique). Elle édifie une structure sous-marine bio-construite "la matte" (rhizomes, racines et sédiment qui colmate les interstices), qui constitue un puits de carbone majeur.

MOUILLAGES

Le développement de la grande plaisance et de ses impacts sur les herbiers de Posidonie a conduit les autorités maritimes à interdire l'ancrage des bateaux de plus de 24 m sur cet habitat (Arrêté Préfectoral N°123/2019). La délimitation précise de ces zones d'interdiction fait l'objet d'arrêtés spécifiques depuis 2020 en se basant sur les cartographies réalisées par les différentes équipes scientifiques. À l'intérieur de ces zones, des dispositifs de mouillage sur corps morts ou vis à sable peuvent être installés pour permettre l'accueil de ces bateaux sans que cela n'impacte significativement les herbiers (zone de mouillage et d'équipements légers - ZMEL).

la végétation côtière, qui vise à augmenter les surfaces occupées par ces habitats considérés comme de véritable puits de carbone naturels, constitue un objectif prioritaire dans un contexte de lutte contre le changement climatique. Si de nombreux programmes permettent d'ores et déjà de restaurer les mangroves avec des résultats intéressants (techniques fiables, coûts réduits, rapidité), les expérimentations sur les herbiers marins restent encore confidentielles du fait des limites inhérentes aux protocoles de transplantation utilisés, aux espèces ciblées (taux de survie et de croissance), des coûts engendrés (intervention en milieu marin) et des restrictions réglementaires (espèce protégée nécessitant des dérogations). D'autre part, les gestionnaires du milieu marin sont très vigilants vis-à-vis de "restaurations alibis" qui ne viseraient qu'à "compenser" de futures destruc-

tions dans le cadre d'aménagements littoraux.

Dans le cadre de l'appel à projets 2020 de la Fondation Setec sur la lutte contre le dérèglement climatique, le projet "RenforC - Renforcement des puits de carbone en milieu marin" du GIS Posidonie a été retenu afin d'initier un projet pilote de restauration écologique de ces herbiers. Suite à cette distinction, la RNBB (Office de l'Environnement de la Corse) et l'Office Français de la Biodiversité se sont associés à cette initiative (voir encadré "GIS Posidonie"). Plusieurs équipes scientifiques ont également été identifiées, au regard de leurs compétences dans le domaine de la restauration des herbiers, pour participer au projet : THALASSA Marine Research & Environmental Awareness (France) ; Université de Palerme-Bio-survey (Italie) ; Université des îles Baléares-IMEDEA (Espagne) ; Interna-

GROUPEMENT D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE GIS POSIDONIE

Le Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'Environnement marin, en particulier des Posidonies (GIS Posidonie) est une association loi 1901, créée en mars 1982, qui regroupe des chercheurs issus de quatre universités (Marseille, Corse, Nice et Perpignan). Il intervient dans l'acquisition de connaissances sur le milieu marin, la valorisation scientifique de ces connaissances, l'aide à la conservation, à la restauration et à la gestion de l'environnement marin (<https://gisposidonie.osupytheas.fr>).

tional School for Scientific Diving (ISSD) "Anna Proietti Zolla" (Italie).

Le programme RenforC consiste à élaborer et valider une stratégie pour le renforcement des puits de carbone en milieu marin à travers la mise en place d'un pilote expérimental pour l'herbier de Posidonie de la baie de Sant'Amanza. L'objectif de ce programme est de tester, sur un "site atelier" unique, différentes stratégies (conservation, recolonisation naturelle) et méthodes de restauration (techniques de fixation, bouturages) des herbiers de Posidonie dégradés, et d'évaluer leur coût au niveau écologique et financier, pour tenter de reconstituer le plus rapidement possible les services écosystémiques apportés par ces derniers. Les résultats obtenus pourront être extrapolés à l'ensemble du littoral méditerranéen national.

Le projet RenforC se déroule, dans un premier temps, sur une période de trois années (2021-2023) et s'articulera autour de plusieurs actions/phases successives :

Phase 1 - Printemps 2021 : réalisation d'un séminaire sur les stratégies de renforcement des puits de carbone en milieu marin et plus particulièrement sur la restauration des herbiers de Posidonie. Au cours de ce séminaire sont abordés, (i) les stratégies et les approches éthiques de restauration (code de bonne conduite, contraintes réglementaires), (ii) les techniques disponibles et leur efficacité, (iii) les techniques innovantes, (iv) la présentation du site pilote de la baie de Sant'Amanza et (v) la mise en place d'un calendrier pour la réalisation du pilote.

Phase 2a - Printemps/Été 2021 : réalisation des transplantations en collaboration avec les différentes équipes sélectionnées et mise en place d'un état de référence des sites récepteurs (photogrammétrie, dénombrement de faisceaux, évaluation de la vitalité des Posidonies présentes). Cet état de référence aura un intérêt particulier dans le suivi de la recolonisation naturelle de l'herbier, et ce afin de préciser l'apport réel des transplantations.

Phase 2b - Printemps/Été 2022 et 2023 : retours sur site pour suivre l'évolution des transplants et de l'herbier adjacent (recolonisation naturelle) en collaboration avec les équipes impliquées.

Phase 2c - Automne 2023 : séminaire de restitution pour dresser un bilan des actions engagées (sélection des protocoles les plus performants, évaluation coûts/bénéfices) et définir une stratégie à long terme (réplication à de nouveaux sites-atelier).

2- Représentations schématiques et photographies des zones de transplantations mises en œuvre dans la baie de Sant'Amanza (Bonifacio, Corse).

2- Schematic and photographic representations of the transplantation areas established in Sant'Amanza Bay (Bonifacio, Corsica).

TECHNIQUES DE TRANSPLANTATION MISES EN ŒUVRE

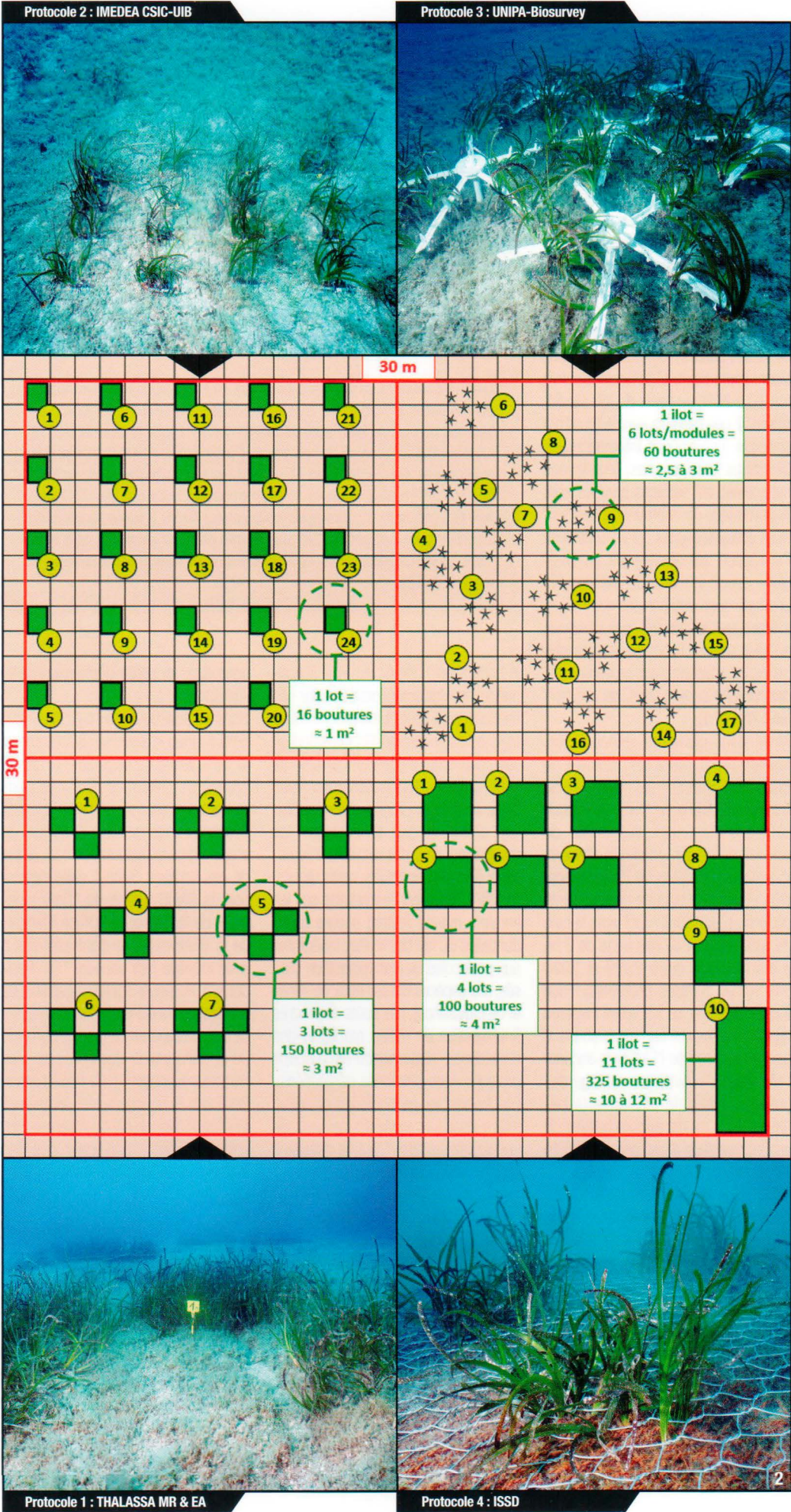
Quatre techniques de transplantations de Posidonies sont testées dans un site unique, constitué de mattes mortes suite à la dégradation de l'herbier par l'ancrage de grandes unités de plaisance, à proximité d'un herbier naturel. Au total, près de 12 000 Posidonies sont prélevées, en plongée sous-marine, dans un site proche, à une profondeur équivalente, en respectant un espacement minimum de 2 m entre les plantes pour ne pas endommager l'herbier en place. Ces boutures sont conservées dans de l'eau de mer et fixées sur différents supports avant d'être plantées dans le site expérimental entre 13 et 15 m de profondeur (figure 2).

1- Protocole de transplantation THALASSA Marine Research & Environment Awareness

Les boutures sont fixées sur des tuteurs en acier galvanisé puis fixées au substrat en plongée, sur une zone d'environ 225 m², en 7 îlots de 3 m² avec une densité élevée équivalente à l'herbier adjacent non impacté (200 plantes par m²), soit plus de 4 400 plantes (figure 2).

2- Protocole de transplantation de l'Université des îles Baléares-IMEDEA

Les boutures sont fixées par des tuteurs en fer en forme de "U" puis fixées au substrat en plongée, sur une zone d'environ 225 m², en 24 îlots de 1 m² avec une densité plus faible que celle de l'herbier adjacent non impacté (70 plantes par m²), soit près de 1 700 plantes (figure 2).



3- Protocole de transplantation de l'Université de Palerme-Biosurvey

Les boutures sont fixées à des modules en forme d'étoile à 5 branches de 75 cm de diamètre, sur une zone d'environ 225 m². Ces modules sont ancrés au substrat grâce à un système de piquet ou vis à sable. Ces systèmes innovants et brevetés sont constitués d'amidon et de polyesters biodégradables dérivés d'huiles végétales, avec une biodégradabilité sans effet toxique. Au total, 17 îlots constitués de 6 étoiles chacun sont positionnés, correspondant ainsi à plus de 3 000 plantes avec une densité moyenne de 23 plantes par m² (figure 2).

4- Protocole de transplantation de l'International School for Scientific Diving (ISSD)

Les boutures sont positionnées et maintenues en réalisant des perforations dans un tapis en fibres de coco préalablement fixé sur le substrat, comparable à ceux utilisés pour stabiliser le substrat et faciliter la re-végétalisation des pentes en milieu terrestre. Au total, 10 tapis de 4 à 12 m² sont positionnés sur une zone d'environ 225 m². Au sein de chaque tapis, les boutures sont regroupées en îlots de 50 plantes par m², soit près de 2 500 plantes (figure 2).

Un état de référence basé sur plusieurs descripteurs de l'herbier (recouvrement, densité, pourcentage de rhizomes "plagiotropes" - qui colonisent le substrat adjacent, ...) est réalisé tant pour les

4 expérimentations que pour l'herbier naturel adjacent. D'autres mesures prenant en compte notamment la biodiversité seront réalisées de façon à mettre en place un suivi le plus précis possible de la réinstallation de l'herbier suite à l'arrêt des pressions (ancrage). Ceci devrait permettre d'établir un bilan coût/bénéfice des transplantations par rapport à la recolonisation naturelle, d'évaluer si cela est pertinent et de sélectionner la méthode de transplantation la plus adaptée.

COMPENSATION BASÉE SUR LE CARBONE BLEU

Le marché de la compensation carbone est caractérisé par deux types de fonctionnement. D'une part, le marché de conformité (ou obligatoire) fait référence aux mécanismes de compensation carbone mis en place dans le cadre du protocole de Kyoto (MDP/MOC). Ce marché a pour objectif de permettre aux États de compenser une partie de leurs émissions via l'investissement dans des projets de réduction de GES hors de leur territoire (principalement vers les pays en voie de développement) au travers d'échanges de crédits carbonés certifiés par les Nations Unies. D'autre part, le marché volontaire, qui s'est développé parallèlement au précédent, dispose d'une plus grande flexibilité en ce qui concerne les conditions de mise en œuvre, le type de projets développés et la localisation. D'après l'ADEME, les principales catégories de projets mis en œuvre au titre de la compensation volontaire, sont axées

sur des offres associées aux énergies renouvelables, à l'utilisation rationnelle de l'énergie ou à la conservation ou la restauration d'écosystèmes terrestres (essentiellement forestiers), avec le plus souvent une dimension humanitaire. Bien que la localisation des réalisations soit très diversifiée, les projets de séquestration carbone sont le plus souvent menés hors d'Europe et concernent majoritairement des pays tropicaux d'Asie, d'Afrique et d'Amérique du Sud. Au cours des dernières années, le marché de la compensation volontaire s'est tourné vers une renationalisation des actions visant à favoriser le financement de projets pour la séquestration du carbone à l'échelle locale ou régionale. Cependant, à l'échelon du territoire national, les propositions de projets hors milieux forestiers sont très réduites voire inexistantes. Aussi, l'émergence de nouvelles approches pour diversifier les solutions et offres de séquestration naturelle du carbone s'avère nécessaire. Parmi les solutions fondées sur la nature, la conservation et la restauration des puits de carbone, associées aux écosystèmes à carbone bleu, permettraient de contribuer à lutter efficacement contre les effets du changement climatique. Ces écosystèmes représentent des candidats idéaux pour le développement de projets de compensation. En effet, au travers de l'achat de "crédits carbone bleu" visant à financer de la conservation et/ou du renforcement, de la séquestration et du stockage, c'est l'ensemble des services écosystémiques participant à atténuer

le changement climatique (protection contre les tempêtes, prévention de l'érosion du littoral, habitats pour de nombreuses espèces, sécurité alimentaire pour les communautés locales) qui bénéficiera de cette démarche. Du fait des vastes surfaces occupées par les herbiers de Posidonie et de leur grande capacité de stockage, notamment par rapport aux écosystèmes forestiers, cette stratégie semble tout particulièrement bien adaptée à l'ensemble du littoral méditerranéen.

Aujourd'hui, une multitude d'acteurs aux statuts juridiques variés (entreprises, associations, collectivités, ONG) ont d'ores et déjà pris part au marché de la compensation volontaire et le nombre de structures parties prenantes devrait augmenter dans les prochaines années. En effet, même si la SNBC arbore un caractère non-contraignant, les dernières évolutions législatives (Loi Climat et Résilience, août 2021) laissent à penser qu'une réglementation étendue et plus stricte verra le jour très prochainement.

Dans un contexte d'urgence climatique, l'intégration des écosystèmes à carbone bleu dans des démarches de compensation volontaire offrirait l'opportunité aux acteurs de réduire leur empreinte écologique et de s'engager en faveur de l'environnement marin et d'une société plus durable. □

1- Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale destiné à compenser la fraction des émissions de CO₂ des vols internationaux excédant leur niveau de 2020.

ABSTRACT

BLUE CARBON SEQUESTRATION: A SOLUTION TO MITIGATE THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE?

GÉRARD PERGENT - BRIAC MONNIER - CHRISTINE PERGENT-MARTINI

Carbon offsetting is a financial mechanism which consists in offsetting one's CO₂ emissions by funding projects for the reduction and/or sequestration of carbon. Over half of carbon fixation takes place in the oceans (blue carbon), especially through phytoplankton and coastal vegetation. *Posidonia oceanica*, a Mediterranean marine plant, plays a major role in carbon fixation and sequestration, because it stores 8 times more carbon than forest soils. The objective of the RenforC programme ("Reinforcement of carbon sinks in the marine environment"), supported by the Setec Foundation, the Corsican Office for the Environment and the French Office for Biodiversity, is to develop a strategy for reinforcing carbon sinks in the marine environment by establishing an experimental demonstration project in southern Corsica. The aim of this programme is to test, on a single "workshop" site, various strategies and methods for restoring *Posidonia oceanica* harmed by the anchoring of large pleasure boats (now prohibited), and evaluating their cost in ecological and financial terms. □

CAPTURA DEL CARBONO AZUL: ¿UNA SOLUCIÓN PARA REDUCIR LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO?

GÉRARD PERGENT - BRIAC MONNIER - CHRISTINE PERGENT-MARTINI

La compensación de carbono es un mecanismo financiero que consiste en contrarrestar las emisiones de CO₂ mediante la financiación de proyectos de reducción y/o captura del carbono. Más de la mitad de la fijación del carbono tiene lugar en los océanos (carbono azul), en especial a través del fitoplancton y la vegetación costera. Las praderas de *Posidonia*, una planta marina del Mediterráneo, desempeñan un papel clave en la fijación y la captura del carbono, ya que almacena ocho veces más carbono que los suelos forestales. El objetivo del programa RenforC "Refuerzo de los pozos de carbono en medio marino", apoyado por la Fundación Setec, la Oficina para el Medio Ambiente de Córcega y la Oficina Francesa de la Biodiversidad, consiste en elaborar una estrategia para reforzar sumideros de carbono en medio marino mediante la realización de una prueba piloto experimental en el sur de Córcega. La finalidad de este programa es probar, en una ubicación "taller" única, distintas estrategias y métodos de restauración de las praderas de *Posidonia* deterioradas por el anclaje de grandes yates (ahora prohibido) y evaluar su coste ecológico y financiero. □