



ELSEVIER

Bulletin sur la pollution marine

Tome 201, avril 2024, 116193



## Premiers signes de rétablissement des herbiers *de Posidonie océanique* dans un contexte d'amélioration du traitement des eaux usées

Traduction en ligne du site original :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X2400170X?dgcid=coauthor>

### Faits marquants

- Les limites inférieures des herbiers français *de Posidonie océanique* progressent dans certaines zones.
- La télémétrie acoustique et la photogrammétrie permettent de suivre les limites inférieures *de Posidonia oceanica*.
- La conformité des traitements des eaux usées a un effet positif sur la limite inférieure.
- La récupération des herbiers de Posidonie est observée après des politiques environnementales ambitieuses.
- Il manque des données sur l'impact des eaux usées sur *Posidonia oceanica*.

### Résumé

La restauration écologique naturelle est la pierre angulaire de la science moderne de la conservation et les gestionnaires ont besoin de « réussites » plus documentées pour ouvrir la voie.

En Méditerranée française, nous avons suivi la limite inférieure *de Posidonia oceanica* par télémétrie acoustique et photogrammétrie et étudié les descripteurs à l'origine de ses variations, à l'échelle nationale et sur plus d'une décennie.

Nous avons montré des effets significatifs des descripteurs environnementaux (région, température de surface de la mer et température du fond) mais aussi des proxys des effluents des stations d'épuration des eaux usées (STEP) (taille de la STEP, temps écoulé depuis la conformité et distance à l'effluent le plus proche) sur la progression de la limite inférieure des prairies.

Ce travail indique une possible réponse positive des prairies de *P. oceanica* à l'amélioration du traitement des eaux usées et à un effet négatif des températures élevées. Si davantage de données sont nécessaires, l'exemple de la politique française des eaux usées devrait inspirer les acteurs et les gestionnaires côtiers dans leurs efforts pour limiter les pressions anthropiques sur les écosystèmes vulnérables.

### Introduction

Le Parlement européen a voté en juillet 2023 la « Loi sur la restauration de la nature » dont les objectifs sont de restaurer les écosystèmes, les habitats et les espèces sur les terres et les mers de l'UE d'ici 2050. Des stratégies de restauration écologique, qui visent à protéger et à renforcer la biodiversité (Gann et al., 2019), sont traditionnellement subdivisées en deux catégories : la restauration « naturelle » (ou spontanée), où la seule action est de stopper la cause de la dégradation, et la restauration « assistée » ou « reconstructive », où d'autres interventions humaines contribuent à la récupération de l'habitat et de la biodiversité. L'ancienne terminologie ambiguë « actif » ou « passif » doit être évitée (Atkinson et Bonser, 2020). L'évaluation des actions de restauration est cruciale mais souvent difficile à réaliser ou non réalisée (Wortley et al., 2013), en partie à cause de l'absence de lignes directrices pour évaluer le succès ou l'échec de ces actions (Boudouresque et al., 2021), ou du manque de mesures appropriées, objectifs et indicateurs quantitatifs et manque de financements à long terme.

Dernièrement, plusieurs pratiques favorisant d'abord la mise en œuvre d'une restauration naturelle, éventuellement accompagnée plus tard d'une restauration assistée ou reconstructive, ont émergé pour atteindre des objectifs écologiques définis (Jones et al., 2018 ; Larkin et al., 2019). Cependant, avant toute action de restauration, une connaissance fine des menaces à l'origine de la dégradation est nécessaire (Boudouresque et al., 2021) afin de commencer à les réduire/supprimer.

La pollution d'origine terrestre constitue une menace anthropique majeure pour les écosystèmes marins côtiers qui a été modélisée et cartographiée à l'échelle mondiale (Halpern et al., 2008), méditerranéenne (Micheli et al., 2013) et française (Holon et al., 2015b). En 1991, la directive européenne pour le traitement des eaux urbaines résiduelles (91/271/CEE) fixait des objectifs de qualité de l'eau pour prévenir les dommages sur les écosystèmes récepteurs, et imposait aux États membres de fournir des plans d'action pour se conformer à ces objectifs. Depuis, les réseaux français de collecte des eaux usées ont été améliorés réduisant les rejets directs non traités dans

l'environnement (communication personnelle de l'Agence française de l'eau), et les stations d'épuration (STEP) ont progressivement modernisé leurs systèmes de traitement pour inclure une étape biologique après les traitements physiques préliminaires ( [www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr](http://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr) ). Alors que le traitement physique se limitait souvent à des processus comme la filtration et la sédimentation, le traitement biologique permettait la biodégradation de la matière organique à l'aide de micro-organismes ( [https://environment.ec.europa.eu/topics/water/urban-wastewater\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/water/urban-wastewater_en) ) (Dhote et al., 2012).

Depuis 2000, une autre directive, la Directive-cadre européenne sur l'eau (2000/60/CE), impose aux États membres de surveiller la qualité de l'eau sur leur territoire, sur la base de masses d'eau homogènes en termes de qualité écologique et chimique. Très sensibles à tout changement dans leur environnement, les herbiers de *Posidonia océanique* sont utilisés comme proxy pour surveiller la qualité des eaux côtières pour cette directive mais aussi pour la directive-cadre stratégie pour le milieu marin (2008/56/CE) qui vise à protéger l'écosystème marin et la biodiversité lors de dont dépendent notre santé et nos activités économiques et sociales liées à la mer.

*Posidonia oceanica* L. Delille est une espèce d'herbier endémique d'importance écologique critique en mer Méditerranée (Boudouresque et al., 2006, Boudouresque et al., 2012). *P. oceanica* couvre 1 225 707 ha à travers la mer Méditerranée, 42 % dans le bassin occidental et 58 % dans le bassin oriental, avec des données cartographiques disponibles plus abondantes dans la partie nord-ouest et centrale (Telesca et al., 2015). Les prairies de *P. oceanica* fournissent de nombreux services écosystémiques importants (Campagne et al., 2015) parmi lesquels la séquestration du carbone (Pergent-Martini et al., 2021). *P. oceanica* pousse entre la surface et une profondeur moyenne de 40 m, en fonction de la disponibilité de la lumière. Il ne tolère pas une hydrodynamique trop forte (dégâts physiques des vagues et/ou érosion de la matre (Boudouresque et al., 2006 ; Ruju et al., 2018)), et des valeurs de salinité extrêmes (dessalement (Boudouresque et al., 2006) ainsi que eaux hypersalines (Capó et al., 2020 ; Blanco-Murillo et al., 2023)). *P. oceanica* est également sensible aux températures extrêmes de l'eau, *P. oceanica* vivant étant observé à des températures allant de 9 à 29 °C (Boudouresque et al., 2006) et des signes de réchauffement et des vagues de chaleur impactent la morphologie et la croissance des plantes (croissance limitée au-dessus 27 °C) (Guerrero-Meseguer et al., 2017 ; Stipcich et al., 2022). Si l'espèce fait preuve d'une résilience prometteuse (Bennett et al., 2022 ; Stipcich et al., 2023), le réchauffement climatique constitue donc une menace majeure pour les prairies de *P. oceanica* à travers l'augmentation de la température de l'eau (Litsi-Mizan et al., 2023), mais aussi l'élévation du niveau de la mer, l'introduction d'espèces exotiques et le remplacement des communautés d'herbiers marins (Pergent et al., 2014 ; Stramska et Aniskiewicz, 2019). Les pressions anthropiques peuvent également avoir un impact sur les prairies de *P. oceanica* (Boudouresque et al., 2009 ; Marbà et al., 2014), soit directement par la dégradation de l'habitat, comme le chalutage de fond marin (Pasqualini et al., 2000) ou l'ancrage (Deter et al., 2017), ou indirectement par la dégradation de la qualité de l'eau due à l'aménagement du littoral (Holon et al., 2015a) ou aux effluents d'eaux usées (Boudouresque et al., 2006). La croissance horizontale des herbiers de Posidonie est très lente (environ 1 cm/an) (Marbà et Duarte, 1998), ce qui rend très longue sa recolonisation naturelle sur les zones endommagées (Cunha et al., 2004). En raison de sa grande sensibilité aux changements des conditions environnementales, relativement stable à cette profondeur (par opposition à la limite supérieure, caractérisée par des conditions environnementales plus fluctuantes), la limite inférieure de l'herbier, c'est-à-dire la limite d'extension la plus profonde, mérite une attention particulière (Boudouresque et al., 2000), notamment pour le suivi à long terme.

En lien avec les besoins de la Directive Cadre sur l'Eau, des efforts importants sont menés pour suivre l'état sanitaire des herbiers de *Posidonia oceanica* en Méditerranée française, notamment le réseau TEMPO composé de 73 limites inférieures surveillées tous les trois ans depuis 2011 ( [www.medtrix.fr](http://www.medtrix.fr), projet « TEMPO »). Des méthodes innovantes et opérationnelles ont été développées pour localiser et cartographier avec précision la limite inférieure de la prairie telles que la télémétrie acoustique (Descamp et al., 2011) et la photogrammétrie (Marre et al., 2019, Marre et al., 2020). Ces méthodes permettent de cartographier avec précision les limites inférieures de *P. oceanica* avec une précision allant jusqu'à 1 cm en utilisant la télémétrie acoustique (Descamp et al., 2011) et 0,5 cm en utilisant la photogrammétrie (Marre et al., 2020).

Les herbiers de *Posidonia océanique* du littoral méditerranéen français ont connu un déclin au cours des dernières décennies, accompagné d'un recul de la limite inférieure, principalement dû à d'importantes pressions anthropiques telles que l'aménagement côtier, la pollution et l'ancrage (Boudouresque et al., 2009 ; Telesca et al., 2015 ; Holon et al., 2015b, Holon et al., 2015a). Cependant, bien que très lente, la récupération naturelle des prairies après suppression de la pression peut être observée (Agostini et al., 2002) : des signes de récupération ont été rapportés dans des études récentes (de los Santos et al., 2019), cohérents avec les observations de terrain le long de le littoral français (Andromède océanologie, 2021). Par exemple, une récupération suite à des traitements améliorés des eaux usées a été rapportée en limite supérieure de la prairie (Boudouresque et al., 2000) et tout près de l'effluent des eaux usées (Boudouresque et al., 2021). Ce travail est le premier, à notre connaissance, à tester directement le lien entre les proxys de traitement des eaux usées et un changement de surface en limite inférieure des herbiers de *Posidonia oceanica*. Nous espérons que les améliorations du traitement des eaux usées ont contribué, sur plus d'une décennie, à créer des conditions environnementales adéquates pour que les prairies commencent à se rétablir. Pourtant, de nombreuses covariables environnementales (par exemple la température de la surface de la mer) peuvent également influencer le rétablissement des herbiers à *P. oceanica*. Dans ce travail, nous avons analysé l'influence des pressions

environnementales et anthropiques sur la variation de la surface de la limite inférieure de prairie, à l'aide de modèles mixtes linéaires, à l'échelle nationale et sur plus d'une décennie de données. Notre objectif était d'abord d'identifier les paramètres anthropiques et environnementaux à l'origine du changement de surface de *P. oceanica* à sa limite inférieure, puis d'étudier l'effet possible d'une amélioration de la qualité des effluents d'eaux usées sur les prairies environnantes. Les résultats de cette étude soulignent l'importance de l'élimination des menaces en tant qu'action de restauration naturelle et aident à révéler le contexte local (environnemental et anthropique) dans lequel les retours sur investissement dans la restauration peuvent être attendus.

## Surface couverte par l'herbier de Posidonie océanique en limite inférieure

Les évolutions annuelles des surfaces couvertes par les herbiers de *Posidonie océanique* en limite inférieure ont été enregistrées au sein du réseau de surveillance TEMPO ( [www.medtrix.fr](http://www.medtrix.fr) , projet « TEMPO »), en Méditerranée française (1800 km de littoral). Les sites de surveillance du réseau TEMPO ont été initialement définis pour être localisés de manière homogène le long du littoral, représentatif de la masse d'eau environnante de la Directive Cadre sur l'Eau, et pour être équilibrés entre zones vierges et anthropisées.

## Résultats

Le taux annuel moyen d'évolution de la surface de l'herbier en limite inférieure est très hétérogène selon les régions et les années, l'Occitanie et la PACA affichant les valeurs moyennes les plus élevées (M = moyenne, SD = écart type, N = nombre d'échantillons) ces dernières années. : Occitanie (2022 : M = 6,0, SD = 0, N = 1 ; 2021 : M = 8,5, SD = 1,34, N = 2 ; 2018 : M = 9,3, SD = 14, N = 2) et PACA (2021 : M = 5,0, SD = 3,2, N = 9 ; 2017 : M = 7,0, SD = 10, N = 2) (Fig. S4).

Les descripteurs Affaires Suspendues (SM) cumulatifs

## Discussion

La réduction des menaces est la première étape de la restauration écologique et est considérée comme une condition préalable à toute autre action de restauration assistée ou reconstructive. Les bénéfices à long terme de la restauration naturelle sont cependant trop rarement évalués et documentés dans la littérature. Outre les pressions anthropiques, une meilleure compréhension des conditions environnementales adéquates et de leurs effets bénéficiera aux futures actions de protection et de restauration. Selon nos hypothèses, nous avons montré des effets significatifs de la STEP

## Conclusion

Ce travail montre que si l'augmentation de la température de la mer influence négativement les limites inférieures des herbiers de *Posidonie océanique* , l'amélioration du traitement des eaux usées peut avoir un effet positif. Cette étude de cas devrait inciter les parties prenantes à adopter de nouvelles réglementations et les gestionnaires côtiers à mieux les appliquer, dans leurs efforts visant à limiter les pressions anthropiques sur les écosystèmes vulnérables. Les STEP françaises sont désormais dans la plupart des cas équipées d'un traitement secondaire conforme (environ 98 % en 2022)

[www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/pages/data/carteIntSteu.php](http://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/pages/data/carteIntSteu.php)

## Financement

Ce travail s'inscrit dans le cadre des travaux de thèse de Thomas Bockel financés par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR), France Relance et Andromède océanologie (convention ANR-21-PRRD-0102-01 ) en collaboration avec l'UMR MARBEC et l'Université de Montpellier (contrat de collaboration de recherche n° 211672 ).

## Déclaration de contribution à la paternité du CRediT

**Thomas Bockel** : Rédaction – révision et édition, Rédaction – ébauche originale, Méthodologie, Enquête, Analyse formelle, Conservation des données. **Guilhem Marre** : Rédaction – révision & édition, Logiciel, Méthodologie. **Gwenaëlle Delaruelle** : Méthodologie, Curation des données. **Noémie Agel** : Conservation des données. **Pierre Boissery** : Rédaction – révision & édition, Conceptualisation. **François Guilhaumon** : Méthodologie. **Nicolas Mouquet** : Rédaction – révision & révision, Supervision. **David Mouillot** : Méthodologie, Conceptualisation. **Antonin Guilbert** :

## Déclaration d'intérêts concurrents

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun intérêt financier concurrent connu ni aucune relation personnelle qui aurait pu sembler influencer le travail rapporté dans cet article.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Solène Dedieu pour l'analyse préliminaire dans le cadre de son mémoire de maîtrise, tous les contributeurs au travail de terrain, ainsi que l'équipe d'Andromède Océanologie pour leur aide tout au long de ce travail.