Étude de l'herbier marin Zostera noltei dans l'Aire Marine et Côtière Protégée (AMCP) des îles Kneiss

Réalisé par : Mhiri, S., Mosbahi, N., Keskes, S., Aloulou, C., & Taktak, S. – Association de Continuité des Générations – dans le cadre du projet Préserver les Îles Kneiss (PIK), avec l'appui du PMF/FEM – PNUD Tunisie – 2025-2026

Résumé

Zostera noltei, phanérogame marine à distribution biogéographique restreinte, forme aux îles Kneiss (golfe de Gabès) des herbiers intertidaux étendus qui assurent des fonctions écologiques majeures : stabilisation des sédiments, séquestration du carbone, nourricerie et refuge pour une biodiversité benthique remarquable. Espèce inscrite dans la liste rouge des espèces menacées et protégée par les Conventions de Barcelone, elle ne bénéficie en Tunisie d'aucun cadre législatif national dédié.

Réalisée dans le cadre du projet Préserver les Îles Kneiss (PIK), cette étude a suivi, de décembre 2025 à juin 2026, la phénologie de l'herbier et la biodiversité benthique associée sur seize stations, tout en s'appuyant sur des séries de données couvrant la période 2016-2026 pour analyser les tendances interannuelles.

Les résultats montrent que les paramètres physico-chimiques (température, salinité, pH) suivent un cycle saisonnier naturel et restent globalement favorables à l'espèce, écartant leur responsabilité directe dans la régression observée. Le suivi décennal révèle en revanche une diminution progressive des paramètres phénologiques de Zostera noltei (longueur des limbes de 20,4 à 16,5 cm, largeur de 1,44 à 0,98 mm, indice foliaire de 1,5 à 1,2 $m^2 \cdot m^{-2}$), attribuée principalement aux pressions anthropiques (collecte intensive des polychètes, piétinement, perturbations mécaniques du substrat) et, secondairement, aux effets du changement climatique. Parallèlement, une expansion continue de la phanérogame exotique Halophila stipulacea est constatée, avec un doublement du nombre d'espèces exotiques recensées (12 à 28 entre 2016 et 2026), tandis que l'abondance moyenne des communautés benthiques autochtones s'effondre malgré une richesse spécifique globale en hausse. L'évaluation de l'état écologique (indices AMBI, M-AMBI, BENTIX) révèle un gradient spatial, les stations les plus proches des zones de débarquement et d'exploitation des polychètes étant les plus perturbées, tandis que les secteurs mieux végétalisés en Zostera noltei conservent un meilleur état écologique.

Ces résultats plaident pour la mise en place d'un programme permanent de suivi écologique, le renforcement de la réglementation des activités de pêche dans les secteurs sensibles et une surveillance accrue des espèces exotiques, afin de préserver ce puits de carbone bleu et les services écosystémiques qu'il rend au golfe de Gabès.

Mots-clés : Zostera noltei, herbiers marins, îles Kneiss, biodiversité benthique, Halophila stipulacea, espèces invasives, carbone bleu, état écologique.

Introduction

Les zones littorales, à l'interface entre les domaines terrestre et marin, comptent parmi les écosystèmes les plus productifs mais aussi les plus anthropisés de la planète. En domaine intertidal et subtidal, les phanérogames marines y forment des herbiers tridimensionnels qui assurent des fonctions environnementales majeures : oxygénation du milieu, absorption des nutriments, stabilisation des fonds par le système racinaire, et création d'habitats stables — de véritables « ingénieurs de l'écosystème » — pour une grande diversité d'espèces. Ces milieux jouent un rôle de nurserie et de zone de reproduction pour de

nombreuses espèces d'intérêt économique, favorisant la production primaire et secondaire ainsi que la biodiversité côtière.

La concentration croissante des populations et des activités humaines près des côtes engendre cependant de profondes perturbations de ces zones sensibles, s'ajoutant à la vulnérabilité intrinsèque des phanérogames aux facteurs environnementaux globaux. À l'échelle mondiale, un déclin alarmant des herbiers est aujourd'hui documenté, affectant une surface estimée à près de 33 000 km² (environ 18 % de leur superficie connue), avec pour conséquence une diminution substantielle de la biodiversité et de la densité de la faune associée.

Parmi les cinq espèces majeures de Magnoliophytes marines présentes en Méditerranée — Posidonia oceanica (endémique), Cymodocea nodosa, Zostera marina, Zostera noltei et Halophila stipulacea (espèce lessepsienne) —, Zostera noltei présente un intérêt scientifique et écologique particulier. Cette espèce à distribution biogéographique restreinte colonise préférentiellement les baies abritées, lagunes peu profondes et zones intertidales sur substrats meubles. En Méditerranée centrale, elle est principalement présente dans les zones intertidales du golfe de Gabès, notamment aux îles Kneiss, où elle forme des herbiers étendus constituant des habitats essentiels pour une biodiversité remarquable.

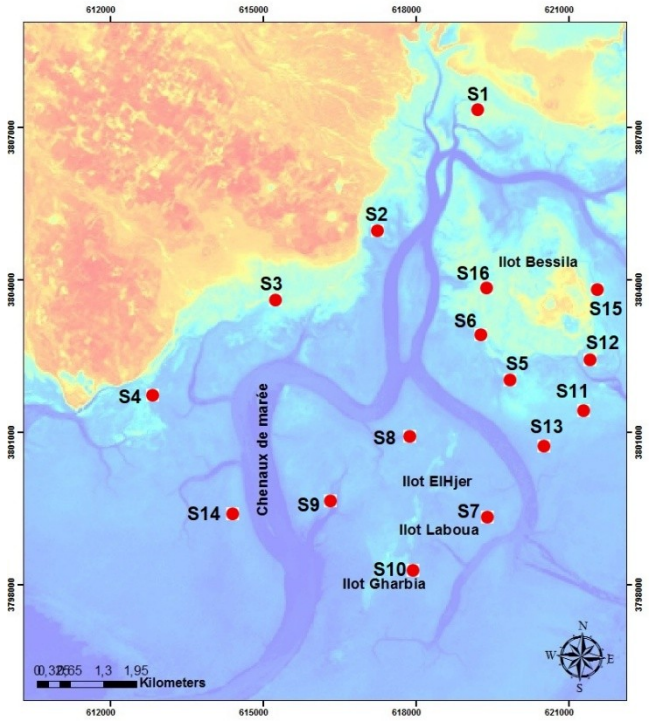
Ces herbiers sont aujourd'hui soumis à de multiples pressions anthropiques et environnementales : pratiques de pêche illicites, collecte intensive des polychètes destinée à la pêche récréative (remaniement du sédiment, dégradation physique de l'estran), effets du changement climatique (élévation des températures, modification des conditions hydrodynamiques), et expansion potentielle de la phanérogame exotique Halophila stipulacea, susceptible de modifier la composition et le fonctionnement des habitats au détriment des herbiers autochtones. Bien qu'inscrite dans le Livre rouge méditerranéen des espèces menacées et protégée par les Annexes des Conventions de Barcelone et de Berne, Zostera noltei ne bénéficie en Tunisie d'aucun cadre législatif national dédié ni de programme de gestion ou de restauration ciblé.

C'est dans ce contexte que la présente étude, conduite dans le cadre du projet Préserver les Îles Kneiss (PIK), vise à assurer le suivi de la phénologie et de la couverture de Zostera noltei, à analyser la biodiversité benthique associée, à étudier les relations entre paramètres biologiques et caractéristiques physico-chimiques et sédimentaires du milieu, à évaluer la variabilité saisonnière et interannuelle des paramètres étudiés, et à cartographier la distribution spatiale des herbiers.

Approche méthodologique

Stratégie d'échantillonnage

Un dispositif d'échantillonnage mensuel a été mis en place sur une période de sept mois, de décembre 2025 à juin 2026, portant sur seize stations (S1 à S16) suivies de manière périodique. L'accès aux sites a été assuré par une petite embarcation de pêche motorisée, et les coordonnées géographiques de chaque station ont été relevées au GPS (système WGS84).



Les prélèvements de macrofaune benthique ont été réalisés à l'aide d'un carottier métallique de 0,225 m², selon une stratégie basée sur des transects. À chaque station, 3 carottes ont été prélevées : destinées aux analyses biologiques et aux analyses sédimentologiques (texture, teneur en matière organique). Des paramètres physico-chimiques ont été mesurés in situ immédiatement après chaque prélèvement. Chaque échantillon de macrofaune a été tamisé sur une maille de 0,5 mm à l'eau de mer ; le refus de tamis a été récupéré, fixé et conservé en glacière isotherme jusqu'au traitement au laboratoire.

Traitement au laboratoire

Au laboratoire, les prélèvements ont été rincés au tamis de 0,5 mm, puis colorés au Rose Bengale pour faciliter le repérage des organismes lors du tri. Le refus de tamis a été trié à l'œil nu puis affiné à la loupe binoculaire ; l'identification taxonomique a été réalisée à l'aide de guides spécialisés et de clés de détermination standards, avec recours au microscope pour les cas nécessitant une observation plus fine. Les individus ont été identifiés au niveau spécifique dans la mesure du possible, dénombrés, puis conservés dans l'éthanol à 70 %.

Analyses des données

Les analyses univariées ont porté sur la richesse spécifique (S), l'abondance (N, en ind.m^{-2}), l'indice de diversité de Shannon-Weaver (H') et l'indice d'équitabilité de Piélou (J'). Les analyses multivariées ont mobilisé la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH, méthode de Ward, distance euclidienne), le positionnement multidimensionnel non métrique (n-MDS, distances de Bray-Curtis) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP), mettant en relation assemblages benthiques et variables environnementales.

L'évaluation de l'état écologique a reposé sur trois indices complémentaires : l'AMBI, fondé sur la répartition des espèces en cinq groupes écologiques selon leur tolérance à la pollution organique ; le M-AMBI, indice composite intégrant l'AMBI, la richesse spécifique et l'indice de Shannon-Weaver, dont les valeurs proches de 1 indiquent un état écologique élevé ; et le BENTIX, indice biotique simple reposant sur trois groupes

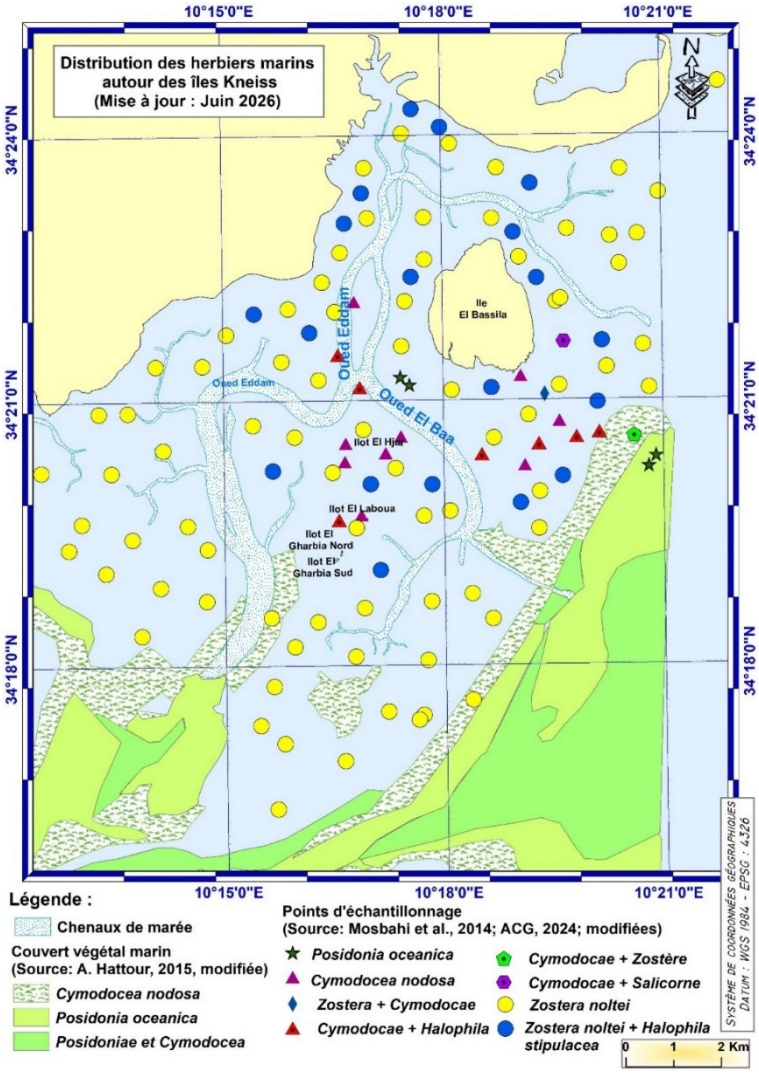
écologiques (sensibles, tolérantes, opportunistes), indépendant du type de substrat et de la taille des échantillons.

Déroulement des travaux

Le suivi de terrain s'est déroulé sur sept campagnes mensuelles consécutives, de décembre 2025 à juin 2026, couvrant seize stations réparties sur la zone intertidale des îles Kneiss, dont plusieurs colonisées à la fois par Zostera noltei et par Halophila stipulacea. Chaque campagne a combiné le relevé des paramètres physico-chimiques in situ (température, salinité, pH), le prélèvement de carottes de macrofaune benthique et de sédiment, ainsi que des observations phénologiques de l'herbier (densité des faisceaux, nombre et dimensions des feuilles, indice foliaire).

Les échantillons ont été acheminés en glacière isotherme vers le laboratoire pour traitement (tamisage, coloration, tri, identification taxonomique, dénombrement). En complément du suivi mensuel 2025-2026, l'étude a mobilisé des séries de données historiques couvrant la période 2016-2026, permettant de documenter l'évolution interannuelle des paramètres phénologiques de l'herbier, de la biodiversité benthique associée et de la progression des espèces exotiques sur une décennie.

Une cartographie de la répartition spatiale des herbiers de Zostera noltei et des autres phanérogames marines (Cymodocea nodosa, Halophila stipulacea) a par ailleurs été réalisée à l'échelle de l'archipel, permettant de localiser les zones de coexistence et de substitution entre espèces autochtones et exotique.



Répartition spatiale des différents herbiers marins dans les îles Kneiss

Équipe de terrain, matériel et équipements

Pilotage du projet

L'étude a été réalisée dans le cadre du projet Préserver les Îles Kneiss (PIK), coordonné par l'Association de Continuité des Générations (ACG) et financé par le Programme de Microfinancements du Fonds pour l'Environnement Mondial (PMF/FEM) du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) en Tunisie.

Matériel et équipements de terrain

- Embarcation de pêche motorisée pour l'accès aux seize stations de suivi.
- GPS (système WGS84) pour le géoréférencement précis de chaque station.
- Carottier métallique de 0,225 m² pour le prélèvement du macrofaune benthique et des échantillons sédimentaires.
- Tamis de 0,5 mm pour le tri des organismes sur le terrain.
- Appareillage de mesure in situ des paramètres physico-chimiques (température, salinité, pH).
- Seaux en plastique étiquetés et glacière isotherme pour la conservation et le transport des échantillons.
- Fiches de terrain standardisées pour l'enregistrement des coordonnées, dates, paramètres et végétation.

Matériel et équipements de laboratoire

- Rose Bengale pour la coloration des organismes benthiques facilitant leur repérage lors du tri.
- Loupe binoculaire et microscope pour le tri fin et l'identification taxonomique.
- Guides spécialisés et clés de détermination standards pour l'identification des macroinvertébrés benthiques.
- Flacons étiquetés contenant de l'éthanol à 70 % pour la conservation des spécimens.
- Logiciels d'analyses statistiques univariées et multivariées (CAH, n-MDS, ACP) et de calcul des indices d'état écologique (AMBI, M-AMBI, BENTIX).

Résultats

Paramètres physico-chimiques de l'eau

La température de l'eau présente une augmentation progressive de décembre à juin, passant d'environ 13 °C à près de 28 °C, traduisant le réchauffement saisonnier naturel. La salinité varie peu (38 à 40), reflétant la stabilité hydrologique du milieu, avec une légère diminution printanière. Le pH demeure globalement alcalin (7,5 à 8,5), avec une légère baisse hivernale liée à la réduction de l'activité photosynthétique et une remontée printanière coïncidant avec la reprise de la production primaire. Ces variations, d'amplitude modérée, restent globalement favorables au développement de Zostera noltei et ne semblent pas expliquer, à elles seules, la régression phénologique observée sur le long terme.

Dynamique phénologique de l'herbier

À l'échelle mensuelle, les sept paramètres phénologiques suivis présentent une dynamique stable, avec de légères augmentations printanières et estivales (température plus élevée, photosynthèse accrue) et de faibles diminutions automnales et hivernales, sans régression importante. À l'échelle interannuelle (2016-

2026), en revanche, le suivi révèle une diminution progressive et continue des principaux paramètres phénologiques :

Paramètre phénologique	2016	2026
Longueur des limbes (cm)	20,4	16,5
Largeur des limbes (mm)	1,44	0,98
Indice foliaire — LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$)	1,5	1,2

Cette régression est attribuée en premier lieu aux pressions anthropiques (activités de pêche, piétinement répété lors de la collecte des appâts, perturbations mécaniques des sédiments provoquant arrachage des pousses et fragmentation des rhizomes), et en second lieu aux effets du changement climatique (réchauffement des eaux, épisodes de chaleur marine, modification du régime hydrodynamique).

Répartition spatiale et invasion biologique

Les herbiers de Zostera noltei sont largement répartis sur la zone intertidale des îles Kneiss, en particulier dans les secteurs sablo-vaseux peu profonds entre les îlots, où ils forment des herbiers continus ou en mosaïque de quelques dizaines de mètres carrés à plusieurs hectares, parfois en association avec Cymodocea nodosa et Halophila stipulacea. Le suivi spatio-temporel décennal met en évidence une régression progressive de Zostera noltei dans plusieurs secteurs, voisine d'une expansion significative de l'herbier exotique envahissant Halophila stipulacea, qui colonise progressivement des surfaces auparavant occupées par l'espèce autochtone.

Biodiversité benthique associée

La variabilité spatiale des communautés benthiques, mesurée sur les seize stations, révèle une hétérogénéité modérée : richesse spécifique comprise entre 20 et 30 espèces (minimale à S4-S5, maximale à S3, S8, S9, S12, S15), abondance totale plus contrastée (jusqu'à 2 200-2 500 individus aux stations S8, S9, S10, S15, contre des valeurs nettement plus faibles à S2, S6, S11), indice de Shannon-Weaver élevé (3,8 à 4,3) et équitabilité de Piélou également élevée (0,78 à 0,90), traduisant des communautés diversifiées et globalement équilibrées.

À l'échelle mensuelle, une variabilité saisonnière marquée est observée, avec une augmentation progressive de la diversité et de l'abondance de décembre à juin, les valeurs les plus faibles étant enregistrées en hiver et les plus élevées en fin de période (juin), en lien avec l'amélioration des conditions climatiques et l'intensification de l'activité biologique.

Le suivi interannuel (2016-2026) révèle un phénomène paradoxal : la diversité des espèces augmente régulièrement tandis que l'abondance moyenne des individus s'effondre. Cette dynamique s'explique par le déclin des herbiers natifs traditionnels sous l'effet du réchauffement, entraînant la chute de l'abondance de la faune associée, concomitant à l'installation de Halophila stipulacea qui attire de nouvelles espèces thermophiles encore peu denses, insuffisantes pour compenser la perte numérique des espèces historiques.

Suivi des espèces exotiques

Entre 2016 et 2026, la richesse spécifique des espèces exotiques passe d'environ 12 à 28 espèces, avec une intensification particulièrement marquée entre 2018 et 2022, suivie d'un léger ralentissement. Parallèlement, le nombre d'espèces autochtones augmente également, passant d'environ 145 à 192 espèces, indiquant que l'enrichissement exotique ne s'est pas encore traduit par une baisse de la richesse spécifique

locale — sans que cela ne reflète nécessairement un bon état écologique, les invasions affectant surtout la composition et le fonctionnement des communautés.

État écologique de l'écosystème

Les trois indices d'état écologique révèlent un gradient spatial cohérent : les stations S1 à S6 présentent les valeurs les plus perturbées (AMBI 3,0-3,2 ; M-AMBI autour de 0,6 ; BENTIX proche de 2,8), probablement en raison des activités anthropiques locales (pêche, exploitation des polychètes, proximité des zones de débarquement), tandis que les stations S12 à S16 affichent un état écologique nettement meilleur (AMBI 2,0-2,1 ; M-AMBI jusqu'à 0,9 ; BENTIX supérieur à 5,0), en lien avec la présence d'herbiers de Zostera noltei plus développés.

Synthèse des résultats

Le tableau ci-dessous récapitule les principaux constats de l'étude de l'herbier de Zostera noltei aux îles Kneiss.

Dimension	Constat principal
Paramètres physico-chimiques	Cycle saisonnier naturel, globalement favorable à l'espèce
Phénologie mensuelle	Dynamique stable, faibles fluctuations saisonnières
Phénologie interannuelle (2016-2026)	Régression continue (limbes, LAI, faisceaux)
Répartition spatiale	Herbiers étendus mais en régression dans plusieurs secteurs
Biodiversité benthique spatiale	Hétérogénéité modérée, diversité globalement élevée (H' 3,8-4,3)
Biodiversité benthique interannuelle	Diversité en hausse, abondance en chute
Espèces exotiques	Richesse doublée en 10 ans (12 → 28 espèces)
Halophila stipulacea	Expansion continue au détriment de Zostera noltei
État écologique (AMBI/M-AMBI/BENTIX)	Gradient spatial : perturbation plus marquée près des zones d'exploitation
Facteur explicatif principal	Pressions anthropiques (collecte des polychètes, piétinement) > facteurs climatiques

Discussion et perspectives

L'ensemble des résultats converge pour montrer que les herbiers de Zostera noltei des îles Kneiss demeurent largement répartis et continuent d'assurer des fonctions écologiques essentielles : stabilisation des sédiments, séquestration du carbone bleu, maintien de la biodiversité benthique, nourricerie et refuge pour de nombreuses espèces marines ; mais présentent des signes clairs d'altération progressive de leur structure et de leur vigueur sur la dernière décennie.

La stabilité relative des paramètres physico-chimiques de l'eau au cours de la période d'étude permet d'écarter les variations naturelles du milieu comme cause principale de cette régression. Les éléments convergent plutôt vers une origine essentiellement anthropique : les activités de pêche, le piétinement répété de l'estran lors de la collecte des appâts (notamment des polychètes) et les perturbations mécaniques associées provoquent l'arrachage des pousses, la fragmentation des rhizomes et une dégradation progressive du couvert végétal, réduisant la capacité de régénération de l'herbier. Ce constat rejoint directement les

résultats de l'étude scientifique parallèle sur l'impact de la collecte des polychètes, qui documente une dégradation sédimentaire et une perte de biodiversité benthique dans les zones exploitées.

À ces pressions locales s'ajoutent les effets du changement climatique (réchauffement des eaux, épisodes de chaleur marine, modification du régime hydrodynamique) susceptibles de limiter la production foliaire et la capacité photosynthétique de l'herbier, et de favoriser l'expansion de l'espèce exotique thermophile Halophila stipulacea. Le doublement de la richesse en espèces exotiques en dix ans, conjugué à la substitution progressive de Zostera noltei par cette phanérogame envahissante, constitue un signal d'alerte pour la résilience à long terme de l'écosystème, même si la richesse spécifique autochtone globale n'a pas encore régressé.

Ces constats appellent plusieurs orientations pour la gestion future de l'AMCP des îles Kneiss :

- Mettre en place un programme permanent de suivi écologique de l'évolution de Zostera noltei, de la dynamique d'expansion de Halophila stipulacea, de la biodiversité benthique associée et des paramètres environnementaux, afin de constituer des séries chronologiques longues.
- Réglementer les activités de pêche et de collecte dans les zones les plus sensibles et limiter les perturbations mécaniques de l'estran (piétinement, fouissage).
- Mettre en œuvre un système de surveillance des espèces exotiques pour détecter précocement les invasions à fort impact.
- Conduire des études expérimentales sur les interactions entre Halophila stipulacea et les herbiers autochtones (compétition pour l'espace, la lumière et les ressources).
- Développer un programme national de suivi et de conservation des herbiers marins, incluant Zostera noltei dans un cadre législatif dédié, à ce jour absent en Tunisie.

Ces orientations s'inscrivent en cohérence avec les recommandations issues des autres volets du projet PIK (diagnostic socio-économique des collecteurs de polychètes, évaluation de l'impact écologique de la collecte), soulignant la nécessité d'une gouvernance intégrée associant suivi scientifique, réglementation adaptée et prise en compte des réalités socio-économiques locales.

Conclusion

Cette étude constitue une contribution importante à la connaissance de l'état écologique des herbiers de Zostera noltei dans l'écosystème marin des îles Kneiss et fournit une base de référence indispensable pour le suivi de cet habitat d'intérêt patrimonial. Les herbiers demeurent largement répartis dans la zone intertidale et continuent d'assurer des fonctions écologiques essentielles, mais les analyses révèlent une diminution progressive de leurs paramètres phénologiques sur la dernière décennie, davantage liée aux pressions anthropiques (pêche, collecte intensive des polychètes, piétinement de l'estran) qu'aux seules variations physico-chimiques naturelles, auxquelles s'ajoutent les effets du changement climatique et l'expansion continue de l'espèce exotique Halophila stipulacea.

Face à cette vulnérabilité croissante, le renforcement des mesures de conservation et de gestion de l'AMCP des îles Kneiss apparaît urgent : réglementation des activités de pêche dans les secteurs sensibles, limitation des perturbations de l'estran, surveillance des espèces exotiques et développement d'un programme national de suivi et de conservation des herbiers marins. La préservation de Zostera noltei représente un enjeu majeur non seulement pour la biodiversité marine du golfe de Gabès, mais aussi pour le maintien des services écosystémiques essentiels (carbone bleu, stabilisation des sédiments, nourricerie) que ces habitats rendent face aux défis croissants du changement climatique et des invasions biologiques.