

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DES
RESSOURCES HYDRAULIQUES ET DE
LA PECHE**

**.....
INSTITUTION DE LA RECHERCHE ET DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
AGRICOLES**

**MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
.....
UNIVERSITE DE CARTHAGE**

Institut Supérieur de Pêche et d'Aquaculture de Bizerte

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Licence Science de la Mer

Parcours :

Pêche et Aquaculture

Présenté par :

Nour Elyakine Ayadi

Intitulé :

**Etude géomorphologique et suivi de l'efficacité d'une gestion
de la côte de l'AMCP Kuriat avec la technique du
" Millefeuille "**

Soutenue le : 20/06/2022

Devant les membres de jury :

Président : Rafik BEN SAID

Examineur : Habib LANGAR

Encadrant : Raouia GHANEM

Encadrant Externe : Manel BEN ISMAIL

Invité : Nadia KHELIFI

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciement

J'adresse mes vifs remerciements à Mr **Ahmed GHEDIRA**, Président de l'association Notre Grand Bleu, qui a accepté de m'accueillir au sein de cette organisation.

Ma plus grande gratitude va à mon encadrante **Manel BEN ISMAIL**, de m'avoir formée, épaulée et guidée tout au long de ces mois, tout en me laissant beaucoup de liberté, grâce à elle mon stage s'est très bien déroulé, aussi pour son aide, son attention et sa gentillesse et la confiance qu'elle m'a accordée. J'ai profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont j'ai pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. J'aimerais aussi le remercier pour l'autonomie qu'il m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Merci pour ta gentillesse, ta patience et ton professionnalisme.

A mon enseignante et mon encadrante, Madame **Raouia GHANEM**, j'ai eu l'honneur d'être parmi vos élèves et de bénéficier de votre riche enseignement durant ces dernières années. Vos qualités pédagogiques ainsi qu'humaines sont pour moi un modèle. Je voudrais vous remercier pour vos judicieux conseils et votre encadrement qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Veuillez, madame, accepter mes remerciements pour le grand honneur que vous m'avez fait d'accepter l'encadrement de ce travail.

Je tiens à remercier toute l'équipe de l'association Notre Grand Bleu, pour tous les très bons moments de franche rigolade et d'amitié que nous avons partagés ensemble et leurs aides qui ont rendu ce stage particulièrement agréable, plus particulièrement : **Arij, Amjed, Sahbi, Seif, Rihab, Donia et Mohamed**.

Je dédie ce modeste travail à ma mère **Leila** qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles, qui a été à mes côtés et ma soutenu durant tout ma vie, qui sacrifie tout sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

Et Enfin, merci à ma chère meilleure amie **Emna**, il n'y a vraiment rien que nous ne puissions réaliser. Merci de m'avoir fait ressentir ça.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Présentation de l'association	3
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	4
I. L'érosion côtière	5
I.1. Définition de l'érosion	5
I.2. Elévation du niveau marin et érosion côtière	5
I.3. Les facteurs et les causes de la recule de trait de côte :	6
I.4. Les principaux processus en jeu dans le recul du trait de côte :	7
I.5. Impacts de l'érosion.....	9
I.6. Les techniques de défense lutte contre l'érosion côtière.....	10
II. Les banquettes de posidonie : piège pour les sédiments et un moyen de lutte contre l'érosion.....	12
II.1. Présentation de l'espèce <i>Posidonia océanica</i>	12
II.2. Description des banquettes de posidonie.....	13
II.3. Composition des banquettes de posidonie.....	14
II.4. Origine de formation des banquettes.....	15
II.5. Le rôle des banquettes dans la fonction hydro-sédimentaire, formation et stabilisation de la plage de sable	16
II.6. Les banquettes permettent le maintien du trait de côte, la lutte contre l'érosion et limitent les risques de submersion marine	17
II.7. L'impact de l'enlèvement des banquettes de posidonie sur la morphologie de la côte :	18
III. Technique mille-feuille	19
III.1. Définition	19
III.2. Description.....	19
III.3. Intérêt de la méthode	19
III.4. Les techniques de mille-feuille	20
III.5. Les Avantages de la technique mille-feuille.....	20
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	21
I. Présentation de la zone d'étude	22
I.1. Caractéristiques générales de la zone d'étude	22
I.2. Biodiversité de l'AMCP Kuriat	23
I.3. Environnement physique de l'île Kuriat.....	26
I.3.1. Morphologie de la cote	26
I.3.2. Courantologie	27

I.3.3. Marée	28
I.3.4. Houle	28
I.3.4. Vent	28
I.3.5. Pluviométrie	28
II. Méthodologie de collecte des données	29
II.1. Suivi spatio-temporel de l'érosion sur la petite Kuriat	29
II.2. Réalisation d'enquête	29
II.3. Prospection des plages sur la petite Kuriat	29
II.4. Aménagement de plage et création du millefeuille	31
II.5. Estimation des volumes utilisés pour la technique MF	33
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	37
I. Suivi spatio-temporel de l'érosion de la côte de la petite ile Kuriat (De 2014 à 2020)	38
II. Etude de l'efficacité de MF dans la lutte contre l'érosion	39
II.1. Identification des périodes d'intérêt	39
II.2. Etude de l'évolution du trait de côte	40
III. Estimation des volumes utilisés	43
CONCLUSION	44
REFERENCES	45
Annexe	48

Figures

Figure 1: Principes de formation, de propagation et de transformation de la houle	8
Figure 2: : Aspect général d'une Posidonie (Boudouresque et Meinesz, 1982)	12
Figure 3: Herbier de posidonie à l'île Kuriat (Sghaier, 2008).....	13
Figure 4: Les banquettes de posidonie à la petite île Kuriat (Ayadi, 2021).....	14
Figure 5: Aegagropiles (Ayadi, 2021).....	14
Figure 6: Enchevêtrement de feuilles de <i>Posidonia oceanica</i> formant les banquettes (Nour, 2021).....	15
Figure 7: Cycles accumulation / érosion subis par les banquettes de Posidonie (Mateo et al, 2003).....	16
Figure 8: Les banquettes protègent les plages contre l'érosion par la formation des arrière-dunes à la petite île Kuriat (Ayadi, 2022).....	17
Figure 9: Localisation des îles Kuriat (Google Earth 2020)	22
Figure 10: Couvert végétal aux îles Kuriat	24
Figure 11: Herbier de posidonie (CAR/ASP, 2011).	24
Figure 12: herbier de <i>Cymodocea nodosa</i> (sghair,2020)	25
Figure 13: Herbier à <i>Cystoseires</i> (Sghaier, 2020)	25
Figure 14: Bébés de Tortues marines (NGB, 2021).....	26
Figure 15: Cartes géomorphologique de la petite Kuriat	27
Figure 16: Enquête et concertation avec le gardien de l'île	29
Figure 17 : Matériel de géolocalisation (GPS mobile) et mensuration (Mètre ruban).....	30
Figure 18: Prise de mensurations des zones anciennes aménagées (Millefeuille enfoui).....	30
Figure 19: Prise de mensuration devant la cabane (zone non aménagée)	31
Figure 20 : Matériel utilisé pour le déplacement des feuilles mortes de posidonie	31
Figure 21: Première couche du Millefeuille	32
Figure 22: Emplacements des stations en structures de millefeuilles	32
Figure 23: Matériel utilisé pour l'estimation des fractions du millefeuille.....	33
Figure 24: Etapes de quantification de la teneur en sable et des banquettes de posidonie pour la technique de MF à 4 couches	33
Figure 25: Installation de piquets de référence	34
Figure 26: Images satellitaire des positions des sites utilisée pour le suivi de l'évolution du trait de côte	34
Figure 27: Création des dunes plage pour la fixation du sable	36
Figure 28: Fixation des dunes par les feuilles mortes de posidonie.....	36
Figure 29: Evolution de côte de la petite Kuriat durant les années 2014-2018-2020	38
Figure 30 : Evolution des conditions météorologiques entre (23/04/2022 et 28/05/2022).....	40
Figure 31: Evolution de trait de côte entre (23/04/2022 et 28/05/2022)	41
Figure 32: Evolution de trait cote selon les techniques utilisés	41
Figure 33: Résistance du site aménagé par la technique MF enfoui	42
Figure 34: Composition de Millefeuille en % de sable et de feuilles mortes de posidonie	43

Liste des abréviations

AMCP : Aire Marine et Côtière Protégé.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du littoral.

CAR/ASP : Centre d'Activités Régionales pour les Aires Spécialement Protégées

DREAL : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EN: Enfouir

INM : Institut National de Météorologie

IUCN: International Union for Conservation of Nature

IPCC : Intergouvernemental Panel on Climate Change

IFEN : Institut Français de l'Environnement

GPS : Global Positioning System

MF : Mille-feuille

NGB : Notre Grand Bleu

PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement.

PAM : Plan d'action pour la Méditerranée

SCET : Société Centrale pour l'Équipement du Territoire

Introduction générale

Les risques côtiers, leur compréhension et leur gestion sont aujourd'hui une préoccupation majeure, tant aux niveaux international que national et local. L'augmentation de la population sur le littoral et les aménagements que cela implique, associées à la raréfaction de la ressource sédimentaire et aux conséquences du changement climatique (le recul du trait de côte par exemple) représentent une réelle menace et peuvent induire à une extension des zones à risque. La gestion de ces risques est donc d'actualité et devrait être abordée à partir de différents aspects en l'occurrence une proposition de solutions techniques, aspects géomorphologiques et économiques

Environ 20 % des côtes de la planète sont constituées de plages, dont près de 70 % traversent une phase d'érosion, 20 % sont stables et 10 % manifestent des signes d'engraissement (Bird, 1985).

Le phénomène d'érosion se traduit par un recul du trait de côte et une réduction des plages engendrant une dégradation du littoral et de l'écosystème naturel marin sous plusieurs angles. La cause essentielle de ce phénomène provient du déficit naturel en sédiments dans le domaine côtier, qui est soit d'origine anthropique (occupation forte du linéaire côtier, extraction abusive des sables...etc.) ou naturelle (tempêtes, élévation du niveau de la mer...) (Bird, 1985).

Face à l'importance de ce recul, entraînant l'augmentation de la vulnérabilité des milieux et populations riveraines ainsi que de l'économie, il s'est avéré nécessaire de protéger ces espaces en réalisant des méthodes de défense du littoral dont le choix dépend de la nature du site et de l'usage que l'on veut faire de ce dernier.

Le cas de la petite Ile Kuriat est un exemple type de cette avancée de la mer. En effet, le phénomène est bien visible, et le rivage de ce site se trouve dans un état érosif intense (NGB).

En Tunisie, l'intérêt porté aux zones côtières et à leur gestion intégrée est justifié par leur poids économique et par l'importance des services écologiques qu'elles fournissent. Cet intérêt se traduit par les engagements contractés par la Tunisie dans le **cadre de la convention sur la diversité biologique, des accords de Rio (chapitre 17 de l'Agenda 21), de l'Agenda 21 de la Méditerranée (1994) et de la convention de Barcelone (1995).**

Un programme national de protection et de gestion des zones sensibles a été mis en œuvre, et une attention particulière a été portée à la zone sensible des îles Kuriat dans **la loi n° 2009-49**

du 20 juillet 2009, relative aux aires marines et côtières protégées dans un souci de protection, de réhabilitation et de valorisation des espaces littoraux naturels, cet espace est important dans l'équilibre de l'avifaune, puisque ces îles sont une étape de migration et un lieu de nidification pour plusieurs espèces, il est aussi un lieu de reproduction pour de nombreuses espèces de poissons (CAR/ASP, 2014).

Ce travail de fin d'étude intitulé « Etude géomorphologique et suivi de l'efficacité d'une gestion de la côte de l'AMCP Kuriat avec la technique du ' **Millefeuille**' » s'intéresse à l'étude de l'évolution de la côte sableuses de la petite ile kuriat dans une perspective d'apporter des nouvelles solutions basées sur la nature à mettre en œuvre pour la gestion de risque de l'érosion côtière.

L'objectif de ce travail serait alors de présenter notre méthode basée sur la nature pour lutter contre l'érosion après avoir identifié les causes et les conséquences de l'érosion sur ce site, le rôle que peut jouer cette technique de protection dans la valorisation des feuilles mortes de posidonie, stabilisation et le ralentissement du recul du trait de côte, ainsi que leur intégration dans l'environnement.

Afin de réaliser cet objectif, notre travail s'est divisé en trois volets :

- Un premier volet qui s'est focalisé sur : l'étude de la géomorphologie de la zone d'étude à partir des données collectées des différents organismes, à savoir des données climatiques (températures, précipitations...etc.) et des données de terrain (topographie, bathymétrie...etc.).
- Un second volet s'est intéressé à la création et le suivi de l'efficacité de la technique millefeuille
- Une dernière partie a concerné l'évaluation de l'efficacité du remaniement des banquettes en millefeuille.

Présentation de l'association

L'association Notre Grand Bleu (NGB), est une association écologique scientifique. Sa création a été déclarée le 09/06/2012 dans le journal officiel de la république tunisienne numéro 69.

L'activité de l'association se déroule essentiellement sur la commune de Monastir et touche un public d'enfants, jeunes, adultes, personnes âgées, handicapés et bien évidemment la biodiversité et l'environnement marin. Sa vision consiste à préserver la vie marine méditerranéenne des activités humaines qui en dépendent et à assurer un avenir durable.

La mission de NGB est de protéger l'environnement marin, de sensibiliser les jeunes écoliers et lycéens d'une part sur l'importance de la sauvegarde de notre mer et nos ressources naturelles marines en touchant l'importance de la biodiversité marine méditerranéenne ainsi que la protection de quelques espèces en voie d'extinction ou protégées et d'autre part sur l'impact de la pollution marine et la biodégradabilité des déchets dans la mer.

L'association Notre Grand Bleu et l'APAL ont signé le 30 Mai 2017 une convention tripartite avec l'Association pour le Financement Durable des AMP de Méditerranée (The MedFUND), pour mener le projet "Le soutien à la gestion durable des îles Kuriat (Tunisie)".

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I. L'érosion côtière :

Ce chapitre reprend l'essentiel des actions des éléments naturels pouvant agir séparément ou ensemble sur les phénomènes d'érosion côtière.

I.1. Définition de l'érosion :

L'érosion est un phénomène naturel qui se traduit par un recul du trait de côte et/ou un abaissement du niveau des plages avec la disparition progressive des stocks sédimentaires. L'érosion côtière se définit comme « une perte graduelle de matériaux vers la mer touchant tous les types de littoraux, qu'ils soient sableux, vaseux ou rocheux. Il résulte des effets combinés de la marée, de la houle et des courants induits des vents et des processus continentaux (par exemple pluie, ruissellement, etc.), ainsi que du déficit des sédiments côtiers » (Observatoire Côte Aquitaine, 2016)

I.2. Elévation du niveau marin et érosion côtière :

Le littoral est une interface entre Terre, Mer et Atmosphère et il s'agit par conséquent d'un milieu extrêmement dynamique.

Une élévation du niveau de la mer a été observée au niveau mondial depuis plusieurs années, est directement liée au phénomène de réchauffement climatique. **D'après le rapport du Groupe Intergouvernemental sur le Changement Climatique (IPCC, 2013)**, les scénarios de l'élévation du niveau de la mer sont de grande inquiétude. Le taux moyen mondial était de 1,7 [1,5 à 1,9] mm par an entre 1901 et 2010 pour une élévation totale du niveau de la mer de 0,19 [0,17 à 0,21] m. Entre 1993 et 2010, le taux était plus élevé à 3,2 [2,8 à 3,6] mm par an.

Les observations depuis 1971 indiquent que le réchauffement des océans et la fonte des glaciers représentent 75% de l'augmentation observée au XXe siècle. Les changements dans les courants océaniques, la densité des océans et le niveau de la mer sont tous étroitement couplés, de telle sorte que les changements à un endroit impactent le niveau de la mer local et le niveau de la mer loin du lieu du changement initial, y compris les changements du niveau de la mer sur la côte en réponse aux changements de température en haute mer (Landerer *et al.*, 2007).

L'accélération du taux de l'élévation du niveau de la mer rend non seulement la possibilité d'impacts plus intenses (érosion côtière, pertes d'habitat, intrusion saline), mais pourrait aussi provoquer une disparition complète des plages sableuses. En effet, les zones

littorales ont toujours présenté un grand intérêt dans le monde entier et sont, aujourd'hui, le siège d'activités multiples notamment de loisirs, de commerce ou encore agricoles. Ces zones connaissent des changements spectaculaires suite aux actions érosives des facteurs naturels (changement climatique, houle, marée, vent) et anthropiques (aménagement et constructions balnéaires). Ces facteurs sont à l'origine, en général d'un déséquilibre sédimentaire au niveau des côtes qui se manifeste par une érosion, qui est un processus progressif de dégradation et de transformation du relief côtier, plus ou moins importante et rapide (IPCC, 2007).

L'érosion englobe à la fois l'ablation des roches par effet d'abrasion et de corrosion sur les côtes rocheuses (falaises et estrans rocheux), mais aussi le déplacement des sédiments meubles par les divers agents de transport sur les côtes sableuses, et enfin les dépôts de ces sédiments dans les zones en accrétion. L'érosion côtière se traduit souvent par un recul de trait de côte et donc un déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental.

Les modifications morphologiques côtières sont devenues l'un des problèmes environnementaux les plus importants. D'ailleurs, des études ont montré que l'érosion des plages par l'urbanisation côtière aurait probablement des effets sur les schémas de nidification des tortues marines (Spanier, 2016).

I.3. Les facteurs et les causes de la recule de trait de côte :

Le déplacement de la ligne de rivage est le résultat de l'action d'un ensemble de facteurs : L'équilibre entre les processus eustatiques et isostatiques entraîne des variations du niveau marin relatif qui sont à l'origine de transgressions et de régressions, lesquelles ont une influence primordiale sur la géomorphologie et l'évolution des littoraux (Paskoff, 1994).

Une hausse accélérée du niveau marin relatif, associée à la hausse du niveau global des océans observés depuis un siècle (Gomitz, 1995), peut donc entraîner une submersion des terres, une accélération de l'érosion côtière et une modification de la dynamique sédimentaire dans la zone côtière (PNUE, 2002). D'autres conditions géologiques, comme les propriétés géotechniques des sédiments et la lithostratigraphie (Shaw *et al.*, 1998), l'équilibre entre l'apport en sédiments et l'espace d'accommodation créé (Catuneanu, 2002) de même que la physiographie et la pente générale de la côte (Bruun *et al.*, 1962) peuvent fortement influencer les processus et l'intensité de l'érosion côtière ainsi que le recul de la ligne de rivage.

L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes constitue également un facteur d'érosion et de risque de submersion des côtes (Paskoff, 2001 ; Forbes *et al.*, 2004). Les épisodes de précipitations intenses ainsi que l'instabilité des talus côtiers sont des facteurs déterminants du risque de mouvements de masse dans la zone côtière (Allard, 1984 ; Duchesne *et al.*, 2003). De plus, la réduction de l'extension et de la durée du couvert de glace de mer causée par le réchauffement climatique fait augmenter le fetch des eaux libres et contribue à intensifier l'énergie des vagues pour l'érosion des côtes (PNUE, 2002).

De plus, la pression anthropique grandissante sur les zones côtières peut entraîner une accélération de l'érosion et ainsi mettre en danger les populations riveraines à cause de la submersion potentielle des terres (Paskoff, 1994). Ces facteurs forcent donc les côtes d'un estuaire à se réajuster constamment aux nouvelles conditions du milieu (Fletcher *et al.*, 1990).

I.4. Les principaux processus en jeu dans le recul du trait de côte :

L'évolution du littoral et des fonds marins (avancée ou recul du rivage, érosion ou sédimentation des fonds) et les mouvements des sédiments dépendent de l'action de divers facteurs morphodynamiques d'origine météorologique ou marine (houles, courants, vents, mais également températures et précipitations) sur les matériaux de la côte et des fonds.

En outre, la pression sur les secteurs côtiers est fortement liée au développement touristique, industriel et commercial des zones littorales mais également aux changements climatiques planétaires tels que l'augmentation du niveau de la mer.

a. Houle :

La houle est un facteur clé des transports des sédiments dans la zone côtière. Quand les vagues s'approchent du rivage et déferlent, leur énergie est dissipée et transformée principalement en turbulence. Elles produisent des courants côtiers. Ces vagues et ces courants transportent les sédiments. (Mihoubi *et al.*, 2011)

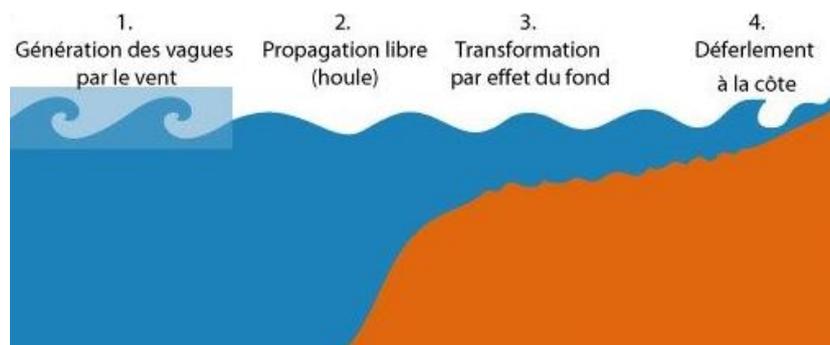


Figure 1: Principes de formation, de propagation et de transformation de la houle

(Source : www.shom.fr)

b. Les vents, les précipitations et les courants :

Les vents sont loin d'être négligeables. Ils sont à l'origine d'importants mouvements de sables dans toutes les zones dunaires. Ils peuvent enlever à la plage des milliers de m³ de sable (PNUE, 1985).

Les précipitations, dont le phénomène est renforcé sur les côtes, contribuent fortement, par l'écoulement ou l'infiltration, à faire évoluer les formes littorales.

Les rivages sont plus ventés que l'arrière-plage ; les régions littorales se caractérisent par la fréquence et la violence du vent. Au-delà de son influence sur la houle, les courants de surface ou les transports d'embruns, le vent transporte également les sables. Les vents peuvent influencer la dérive des littoraux et accroître la cambrure des vagues. (Van Heeswyck *et al.*, 2012)

Si les vents s'opposent aux vagues, ils ralentissent les vagues et favorisent un engraissement des plages (Van Heeswyck *et al.*, 2012).

Si les vents soufflent dans la même direction que les vagues, ils génèrent une cambrure plus importante des vagues et favorisent un démaigrissement des plages. Ils transportent les sédiments avant de les déposer plus loin. (Van Heeswyck *et al.*, 2012).

c. L'urbanisation et le tourisme :

Un autre phénomène accentuant l'érosion est l'urbanisation des côtes et notamment une urbanisation trop proche du milieu marin (Airoldi *et al.*, 2005 ; IFEN, 2009).

Dans la petite Ile Kuriat, le tourisme de masse a eu un rôle important dans la dégradation de l'environnement marin et côtier, les visiteurs ont accès à une côte de longueur 1400m.

Le nombre total de visiteurs de l'île Kuriat en 2018, indépendamment du type de la fréquentation (type touristique ou type particulier), est de l'ordre de 16814, avec 1080 visiteurs arrivants par des embarcations de particuliers et 15734 visiteurs arrivants par des embarcations touristiques. (Aguir, 2011 ; NGB et APAL, 2019).

I.5. Impacts de l'érosion :

Comme il a été démontré, tous les phénomènes précités ont pour cause une augmentation de l'érosion et engendrent des menaces côtières (European commission, 2004). Mais l'érosion engendre d'autres problèmes liés aux aspects économiques et écologiques (Airoldi L. *et al*, 2005).

- **Impact économique :** La plage, n'ayant plus le temps de se reconstituer après les tempêtes, voit sa taille se réduire au fil des ans après d'importants phénomènes d'intempéries (Durant., 2001). Les plages subissant le phénomène d'érosion engendrant ainsi une baisse de la fréquentation et réduisant l'avantage économique. Ajoutons à cela, une diminution de la fréquentation des espèces animales (principalement les tortues marine), provoquée par la diminution du milieu dunaire et aussi dû à la surpopulation pendant l'été provoquée par la réduction de la plage. Si les côtes disparaissent, l'impact économique sera très fort.
- **Impact paysager :** L'érosion trop forte et trop rapide cause un véritable désagrément dans le paysage. En effet, d'un point de vue urbain, elle impacte l'aspect et la taille de la plage. Ajoutons à cela que les infrastructures détruites lors d'une tempête représentent une pollution visuelle et surtout une pollution réelle du milieu marin, puisque les déchets sont emportés par la mer (Lambert *et al.*, 2007). Les milieux naturels littoraux (zones humides, surfaces en eau des secteurs en recul, etc.) sont aussi touchés par l'érosion causée par la montée du niveau marin (Esteves, 2014). Cette dernière peut créer d'importants dégâts écologiques, par la disparition de milieux naturels rares ou de grand intérêt biologique, mais aussi paysagers puisque ce sont des paysages typiques de la côte qui disparaissent. Ce phénomène ayant pour conséquence d'amplifier l'érosion (Pendle, 2013). En effet, le milieu qui formait une protection à son égard se voit, petit à petit, disparaître.

I.6. Les techniques de défense lutte contre l'érosion côtière :

a. Les méthodes dures :

Le principe consiste à fixer le trait de côte (Heurtefeux *et al.*, 2011) pour éviter toute érosion possible (digues), ou encore retenir un maximum de sable sur un lieu en particulier (épis) (Lageat *et al.*, 2012). Leur rôle est aussi d'augmenter la valeur d'agrément de la côte (Ailoldi *et al.*, 2005).

Dans de nombreux cas, ces méthodes ont aidé à la résolution des problèmes locaux à l'endroit sur lequel elles étaient placées mais l'ont aggravé ailleurs en modifiant la dynamique naturelle des côtes (Durant, 2001 ; Lenôtre, 2009). Des problèmes apparaissent, parfois allant jusqu'à des dizaines de kilomètres plus loin (Esteves, 2014).

Les défenses dures de lutte sont maintenant moins valorisées et ont un aspect plus négatif car on remarque que les coûts sont très élevés sur le long terme mais aussi l'impact environnemental est très marqué (Esteves, 2014). En effet, ils provoquent des désagréments paysagers (Durant, 2001) mais aussi une possible pollution lorsqu'ils ne sont pas entretenus fréquemment (Lambert *et al.*, 2007).

Certaines études ont démontré l'inefficacité de ces aménagements mais surtout révélé, qu'ils pouvaient avoir des effets aggravant l'érosion (Pendle, 2013).

En effet, ces constructions dénaturent les littoraux (Bacchiocchi et Airoldi, 2003) et provoque une très forte artificialisation des côtes. La plage sensée être une étendue « infinie » devient une séquence de petites plages du aux épis. Les digues figent un paysage changeant au fil des saisons.

b. Les méthodes souples :

Vouloir fixer le trait de côte pose des problèmes environnementaux (Paskoff, 1998) et des problèmes de coûts (Meur-Férec et Morel, 2004). Une gestion active souple basé sur la nature est alors à privilégier.

En effet, les méthodes souples induisent une interaction entre les techniques humaines et les dynamiques naturelles (Bower et Turner, 1998). Pour que cette gestion puisse faire face aux changements des conditions, à l'évolution des mentalités sociales, à l'amélioration des connaissances, etc, elle doit être capable de conserver un critère évolutif (Bower et Turner, 1998).

Plusieurs méthodes peuvent être citées notamment :

- **Le rechargement en sable des plages :** Lorsque la plage souffre d'érosion, les communes littorales font venir du sable d'ailleurs pour les réapprovisionner. Cette technique est faite principalement avant la période estivale pour redonner un aspect plus favorable à l'espace et ainsi permettre aux touristes de bien en profiter.

- **Restauration de dunes** (grâce notamment à l'ingénierie écologique) et leur fixation par plantations et ganivelles : Pour recréer une dynamique sédimentaire et un milieu naturel, un cordon dunaire est implanté. De plus, cela permet la protection des ouvrages à l'arrière de ces dunes.

- **Drainage des plages :** concept né aux États-Unis en 1940. Cette méthode consiste au drainage de la nappe sous la plage. En effet, lorsque celle-ci est élevée cela correspond à des époques d'érosion accélérée. (Lambert *et al.*, 2007). En France, cette technique se nomme « Ecoplage ». En 2007, quatre sites-tests sur les trois côtes en sont équipés (Lambert *et al.*, 2007).

- **La technique Millefeuille** que nous développerons par la suite.

Ces méthodes coûtent cher à mettre en place et à installer. Cependant au long terme, certaines études prouvent qu'après quelques années les coûts diminuent engendrant un coût total moins élevé que les méthodes dites « dures », qu'il faut très souvent restaurer.

Ces méthodes souples ont une ambition d'impacts positifs et de services écosystémiques à long terme. Elles permettent un trait de côte plus « mobile » et un aspect plus naturel de la plage car le paysage est moins dénaturé, mais l'ingénierie que cela demande a pour effet un impact environnemental négatif à court terme. En effet, l'utilisation de machines est très souvent nécessaire ce qui détériore le milieu déjà en place, amenant, lui aussi, des services écosystémiques et une qualité paysagère.

II. Les banquettes de posidonie : piège pour les sédiments et un moyen de lutte contre l'érosion :

II.1. Présentation de l'espèce *Posidonia océanica* :

L'espèce *Posidonia oceanica*, communément appelée en Tunisie DRIAA, TERCH ou LIF EL BAHR est une plante marine de structure classique. Elle est composée d'un système racinaire, de rhizome et de feuilles. Les organes de reproduction sont apparents, c'est donc une phanérogame marine. Les fleurs donnent des fruits appelés "olives de mer" qui atteignent leurs maturités au printemps. La dispersion de l'espèce se fait par l'intermédiaire de ces fruits une fois transportés par les courants marins. Les posidonies ont également une reproduction asexuée grâce à la croissance des rhizomes qui peut se faire verticalement et/ou horizontalement (Caye, 1980).

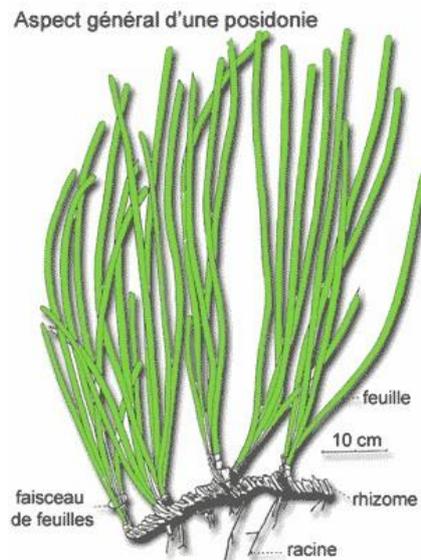


Figure 2: : Aspect général d'une Posidonie (Boudouresque et Meinesz, 1982)

Posidonia oceanica est endémique à la mer Méditerranée (Hartog, 1970 ; Boudouresque *et al*, 1977), largement distribuée aussi bien sur la côte européenne que nord-africaine mais ne pénètre pas la mer noire.

C'est une plante à fleur qui vit dans des profondeurs ne dépassant pas 40 mètres. Considérée comme étant le poumon des écosystèmes marins et représente des lieux de nurseries pour des nombreuses espèces animales. En effet près de 400 espèces végétales et 1000 espèces animales y trouvent refuge, fixées sur les rhizomes et/ou les feuilles de *Posidonia oceanica*, et constitue également une source importante de nourritures pour certains herbivores (oursin, saupe...) une

partie de la production des feuilles de l'herbier va se retrouver après un certain temps détachée et déplacée par les eaux vers les plages où elles forment des banquettes. Ses herbiers permettent la fixation des sédiments aux fonds marins grâce aux rhizomes qui forment une matte et forment aussi une barrière contre les vagues, les houles et les courants marins. Ainsi, ils protègent le littoral contre l'érosion. Cependant l'abondance des laisses de Posidonie sur la plage des îles Kuriat (qui peuvent atteindre plus d'1m de hauteur par endroits) laisse supposer une densité foliaire importante et par conséquent un herbier en très bon état (Ben Mustapha et Hattour, 2006).



Figure 3: Herbier de posidonie à l'île Kuriat (Sghaier, 2008)

II.2. Description des banquettes de posidonie :

La posidonie perd ses feuilles régulièrement tout au long de l'année, notamment en automne et en hiver. Une fois mortes, ces feuilles tombent sur le fond et forment, avec les sédiments, les rhizomes et les racines, la litière qui sert de support au développement de l'herbier appelé **matte** (Otero *et al*, 2018). Après la période d'accalmie estivale propice à l'accumulation de grandes quantités de feuilles mortes sur les fonds, l'occurrence combinée de vents du large, de tempêtes automnales, de courant et de surcotes marines, entraîne naturellement la remise en suspension, le transport puis le dépôt de ces paquets de feuilles mortes sur les plages (Boudouresque et Meinesz, 1982). Ces résidus de feuilles et de rhizomes mélangés à des sédiments de natures et de granulométries différentes, s'accumulent et finissent par former des **banquettes**. Il s'agit de structures très résistantes qui peuvent rester en place

plusieurs dizaines d'années (UICN, 2012) et qui peuvent atteindre plus de 2,5 mètres de hauteur et 20 m de large (Boudouresque et Meinesz, 1982).



Figure 4: Les banquettes de posidonie à la petite ile kuriat (Ayadi, 2021)

II.3. Composition des banquettes de posidonie :

Les banquettes de Posidonie sont composées en majorité de résidus **de feuilles** et d'écaillés de **rhizomes** à différents stades de dégradation. La quantité de rhizomes reste tout de même négligeable. On peut aussi trouver **des aegagropiles** (fig 5), qui sont des agglutinations de fibres de Posidonie autour d'un fragment de rhizomes. Elles sont formées par le mouvement de l'eau sur les petits fonds sableux.



Figure 5: Aegagropiles (Ayadi, 2021)

La composition des banquettes varie suivant les saisons, l'hydrodynamisme et les plages où les feuilles s'échouent (Jeudy De Grissac et Audoly, 1985). Ces formations présentent une teneur en eau comprise entre 30 et 90 % de la partie supérieure de la banquette (exposée au soleil et aux vents), à sa partie inférieure (Jeudy De Grissac et Audoly, 1985). Mais ces banquettes contiennent également une partie sédimentaire (sable) estimée entre 20 à 80 kg/m³ de banquette. Cette concentration en sédiment est toujours plus importante dans la partie supérieure de la plage (fond) que sur le devant (Simeone *et al.* 2008).

II.4. Origine de formation des banquettes :

Les feuilles de *Posidonia oceanica* ont une durée de vie d'environ 5 à 8 mois. Passé ce délai, le limbe des feuilles dégénère et se détache des rhizomes. Ces feuilles mortes se déposent généralement dans l'herbier ou dans des zones d'accrétion proches pour y former une litière. Cette litière peut être exportée vers les écosystèmes profonds (Boudouresque et Meinesz, 1982) ou vers le littoral. Lors des tempêtes d'automne, ces litières sont entraînées par les courants et peuvent former des dépôts considérables sur les plages (Boudouresque et Meinesz, 1982).

La dynamique de dépôts de ces banquettes est très complexe et peu étudiée. Ces banquettes sont soumises à une alternance de cycle d'accumulation et d'érosion en lien avec les conditions météorologiques et la dynamique de transport des feuilles (Mateo *et al.*, 2003 ; Cancemi et Buron, 2008 ; Simeone, 2008).

Le dépôt de cette litière est uniquement lié à l'action des vagues et des courants. Mais en général, la formation des banquettes est favorisée en automne quand le stock de litière dans l'herbier est maximal et quand les vents commencent à s'intensifier en octobre et en avril.



Figure 6: Enchevêtrement de feuilles de *Posidonia oceanica* formant les banquettes (Nour, 2021)

L'accumulation des feuilles s'effectue surtout dans la phase finale d'une tempête, lorsque l'intensité de la houle diminue progressivement. En effet, il faut qu'il y ait suffisamment d'énergie pour permettre le transport des feuilles sur la plage, mais pas trop pour que celles-ci se déposent (Cancemi et Buron, 2008). Il a été observé que les plages où les dépôts sont les plus importants sont généralement des plages de faible énergie (De Falco *et al*, 2008).

La persistance des banquettes est due à des conditions favorables de conservation des dépôts végétaux. La réduction des espaces d'air et l'accroissement de la compacité de la banquette augmentent sa résistance face aux vagues et ralentissent la décomposition aérobie des feuilles (Mateo *et al*, 2003).

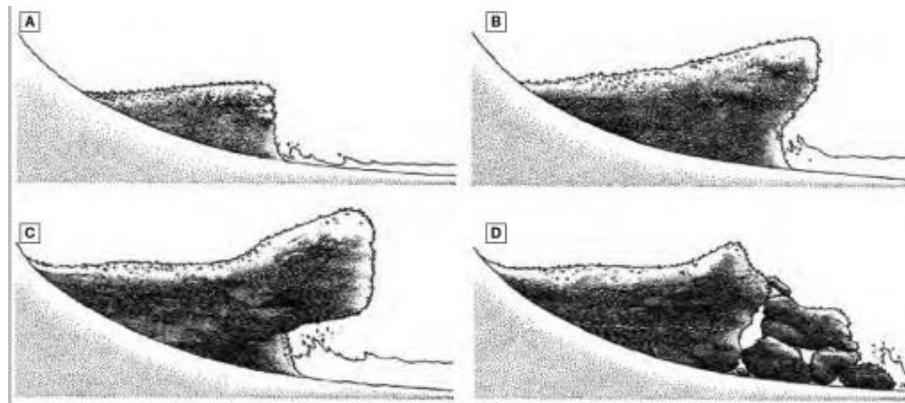


Figure 7: Cycles accumulation / érosion subis par les banquettes de Posidonie (Mateo *et al*, 2003)

a) Première accumulation ; b) Gain en taille et début d'érosion par les vagues ; c) Taille maximale atteinte ; d) Destruction d'une partie des banquettes sous l'action des vagues

II.5. Le rôle des banquettes dans la fonction hydro-sédimentaire, formation et stabilisation de la plage de sable :

Pendant l'hiver, période de mauvaises conditions météorologiques, les banquettes ont un rôle de protection du trait de côte. En effet, présentes sur le front de mer, elles subissent l'érosion et sont transportées lors des périodes de forte houle (Matéo *et al.*, 2003 ; Boudouresque *et al.*, 2006).

Grâce à ce processus, une partie de l'énergie des vagues et de la houle est dissipée par la mobilisation des feuilles, ce qui limite le transport des sédiments de la plage et donc son érosion (Boudouresque *et al*, 2006 ; Cancemi et Buron, 2008).

De plus, la présence des banquettes sur les plages favorise le piégeage des particules sédimentaires lors de leur transport par les vagues. Ces particules se déposent dans les fibres de la banquette, ce qui contribue encore au maintien de la plage (Cancemi et Buron, 2008).

La proportion de sable trouvée au sein des banquettes varie selon les études et peut aller de 10 à 37% (Belon, 2017), voire même 56% (Cantasano 2011).

Une étude estime qu'il y aurait près de 60kg de sédiments piégés par m³ de banquette (Vacchi *et al.* 2017). Ainsi, le sédiment est piégé au sein des banquettes, tant que celles-ci ne sont pas détruites. Les banquettes jouent donc un rôle dans la fonction hydro sédimentaire en fixant le sable lors de son transport (Passarella, 2019). Il semblerait qu'il y ait de plus grandes quantités de sédiments dans les parties en arrière plage des banquettes plutôt que sur l'avant plage (Simeone *et al.* 2013).



Figure 8: Les banquettes protègent les plages contre l'érosion par la formation des arrière-dunes à la petite ile Kuriat (Ayadi, 2022)

II.6. Les banquettes permettent le maintien du trait de côte, la lutte contre l'érosion et limitent les risques de submersion marine

Les banquettes permettent de protéger directement les plages de l'érosion causée par les vagues en amortissant leur impact (Simeone *et al.* 2013, Belon 2017, Balouin *et al.* 2018) bien qu'une étude semble contredire cet effet sur le long terme (Gómez-pujol *et al.* 2019)

Une étude récente affirme cependant que les banquettes permettraient même une accrétion de la plage deux jours après une tempête (Trogu *et al.* 2020). Les banquettes de posidonies vont aussi permettre de lutter contre la submersion marine de manière indirecte, non seulement en limitant l'érosion mais aussi en fertilisant la végétation terrestre et dunaire

ce qui permet de construire une barrière de plus contre l'érosion et contre la submersion marine (Cardona et García 2008, Del Vecchio *et al.* 2013).

II.7. L'impact de l'enlèvement des banquettes de posidonie sur la morphologie de la côte :

Le retrait des banquettes de posidonies à de forts impacts sur la morphologie des plages et accélère les processus érosifs (Pergent *et al.* 2013).

L'impact direct a été évalué par la quantité de sable perdu par mètre cube de banquette enlevée (De Falco, 2013). Suit à l'enlèvement des banquettes, le sable sera transporté vers la mer, car les plages ne sont plus protégées contre les houles et les vagues par les accumulations de ces derniers notamment lors des tempêtes hivernales (Pergent *et al.*, 2012 ; Simeone et de Falco, 2013, Boudouresque *et al.*, 2016). Le retrait de ces dernières provoque l'enlèvement combiné de près de 11,2 tonnes de sédiments pour 100m³ de banquettes (Cantasano 2011, Boudouresque *et al.* 2017).

Chaque mètre de largeur de revêtement de la plage par des feuilles mortes de *Posidonia oceanica* entraîne une progradation de 2m de la plage (Roig *et al.*, 2009). Par conséquent, l'érosion concerne principalement les plages où les opérations de retrait sont effectuées, en particulier lorsque le retrait est effectué avec une machine lourde (Roig *et al.*, 2009).

Outre l'aspect « inesthétique » et/ou « olfactif », les banquettes ont été considérées comme un produit dangereux alors que leur innocuité, a pourtant été confirmée par Chessa *et al.*, (2000) et Procaccini (2003) qui ont relevé respectivement que les teneurs en métaux lourds y sont très faibles, et que la qualité des eaux de baignade n'est pas affectée par la présence massive de ces banquettes.

III. Technique mille-feuille :

III.1. Définition :

Le millefeuille recouvert consiste, à aplatir et répartir les banquettes sur la plage puis de les recouvrir de sable (Martin et al. 2018)

III.2. Description :

En préparation de la saison, les banquettes sont retirées des plages très fréquentées et non concernées par une érosion du littoral. Elles sont alors stockées et réutilisées avec un mélange de sable pour la stabilisation, le profilage et même l'engraissement de plages soumises à des phénomènes d'érosion (Martin et al. 2018).

Afin de pallier aux contraintes des nuisances visuelles et olfactives causées par les banquettes et ressenties par les usagers, les feuilles mortes de Posidonie sont utilisées sous forme de sous couches de 30 à 40 de centimètres d'épaisseur recouverte d'une couche de sable, d'où son appellation de « mille-feuilles ».

Ainsi cette méthode permet non seulement de limiter les ré-ensablements tout en protégeant la plage, mais aussi de conserver l'apport en nutriments que représentent les banquettes sur l'écosystème de la plage. L'aspect de la plage reste propre et le nettoyage des macro-déchets peut être effectué manuellement de façon journalière en été.

Cette méthode évite donc la mise en décharge des feuilles de Posidonies retirées des plages en permettant leur réutilisation. De plus, selon la commune, elle permet de limiter les ré-ensablements qui deviennent moins réguliers et nécessitent moins de sable qu'avant la mise en place des mille-feuilles (Martin et al. 2018).

III.3. Intérêt de la méthode :

Le principal intérêt de cette méthode réside dans la réutilisation des banquettes qui ne sont plus traitées comme un déchet et déposées en décharge, mais réutilisées sur le littoral de la commune. De plus, la réutilisation des banquettes de Posidonie sur les plages réduit les apports en sable lors des ré-ensablements. Enfin, la présence de cette sous couche limite l'érosion de la plage en piégeant les grains de sable.

Cette technique permet de conserver l'intérêt écologique des banquettes de Posidonie sur les plages. Les banquettes avec leur dégradation continuent d'apporter des nutriments et de la matière organique sur l'étage supra littoral, tout en apportant une protection contre l'érosion du littoral.

Les impacts économiques et sociaux sont positifs puisque les banquettes sont recouvertes d'une couche de sable. Les usagers observent donc une plage de sable vierge et sans dépôt de feuilles de Posidonie. Cependant, l'implication de la commune doit être forte.

Les avantages restent tout de même nombreux : lutte contre l'érosion, diminution des coûts (comparé à une mise en décharge), et bonne image de la commune qui allie valorisation et satisfaction des usagers.

III.4. Les techniques de mille-feuille :

- **Mille-feuilles recouvert** : les banquettes sont réparties et étalées sur la plage puis recouvertes d'une épaisseur de sable (DREAL,2019).
- **Mille-feuilles enfoui** : cette opération consiste à creuser des tranchées éloignées de la ligne de rivage, et d'alterner en couches successives des banquettes de posidonie et de sable. Ces tranchées sont ensuite recouvertes (DREAL,2019).

III.5. Les Avantages de la technique mille-feuille :

Parmi les techniques novatrices de gestion de littoral et de lutter contre l'érosion côtière, la méthode du MILLE-FEUILLE semble intéressante (DREAL,2019)., elle permet de :

- ✚ **Garder** les banquettes sur la plage en conservant leur rôle de rempart contre les phénomènes d'érosion
- ✚ **Réduire les ré-ensablements des plages** puisque les banquettes remplacent une partie du sable et optimise la fixation de celui-ci.
- ✚ **Éviter les conflits avec les usagers** puisque la couche de Posidonie est recouverte par du sable. La plage conserve un aspect « **propre** ».
- ✚ **Réduire l'impact environnemental** en valorisant les feuilles de Posidonie en tant que matériel de remblais pour l'aménagement des plages.
- ✚ **Réduire les couts de traitement** comparé à une mise en décharge.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

I. Présentation de la zone d'étude :

Les îles **Kuriat** est le nom d'un archipel tunisien constitué de deux petites îles situées à l'Est de Monastir, disposant aujourd'hui du statut de zone sensible littorale, et constituent l'un des cinq sites sélectionnés pour bénéficier du statut d'Aire Marine et Côtière Protégé (AMCP) par le programme national de création d'AMCP en Tunisie.

Elles comprennent principalement deux îles, la plus petite île est appelée **Qûrya Essaghira** ou île Conigliera dont la superficie est de 50 ha et la deuxième île est environ cinq fois plus large 270 ha appelée **Qûrya El Kabira**, distante de la première de 2.5 Km (Bradai, 2002). Elles ont des altitudes basses ne dépassant pas 5 m (APAL/SCET-TUNISIE, 1999, 2000).



Figure 9: Localisation des îles Kuriat (Google Earth 2020)

I.1. Caractéristiques générales de la zone d'étude :

Une politique environnementale s'est engagée de protéger l'environnement marin et côtier de des îles Kuriat qui ne cessent de se dégrader (APAL/SCET-TUNISIE, 1999, 2000). Ceci est dû aux fortes pressions naturelles et anthropiques (réchauffement climatique, érosion marine, pêche, tourisme, activités récréatives).

Ces îles sont caractérisées par une richesse faunistique et floristique marine très importante (Aguir, 2011).

L'accès du public à la Grande Kuriat est interdit depuis 1997, car elle constitue le principal site de nidification d'une espèce de tortue marine « *Caretta caretta* » en Tunisie qui

se manifeste dans la liste rouge des espèces menacées et en voie d'extinction de l'UICN (Meylan et Donnelly, 1999 ; Seminoff et Shanker, 2008).

L'accès à la Petite Kuriat est libre pendant la saison estivale seulement. Cette île est fréquente par des touristes et des plaisanciers (CAR/ASP, 2014). Aux alentours de cette île se trouve une forte activité de pêche (CAR/ASP, 2014).

I.2. Biodiversité de l'AMCP Kuriat :

Les îles Kuriat sont dotées d'une richesse inestimable en termes de biodiversité et considérées comme un espace remarquable, car elles sont un refuge pour plusieurs espèces rares, endémiques et menacées, d'importance majeure au niveau de la biodiversité.

Ces îles présentent plusieurs intérêts écologiques : lieux d'habitat, de nourrissage et/ ou de reproduction pour de nombreuses espèces faunistiques et floristiques aussi bien en milieu terrestre que marin :

a. Biodiversité terrestre :

La biodiversité terrestre renferme une grande diversité faunistique qui se compose d'une avifaune, d'une importance internationale. En effet, ces îles, représentent à la fois une étape de passage et un lieu de nidification pour plusieurs espèces comme les laridés, les sternes et les limicoles (Aguir, 2011). Les différentes espèces fréquentent l'AMCP Kuriat sont le flamant rose (*Phoenicopterus ruber*), du grand cormoran (*Phalacrocorax carbo*), l'Héron cendré (*Ardea cinerea*) et le Goéland railleur (*Larus genei*) classé comme espèce vulnérable. L'herpétofaune tels que les serpents et certains mammifères terrestres comme les lapins sont aussi présents.

La diversité floristique sur les îles Kuriat se caractérise par le couvert végétal (**Fig. 10**) qui se répartit en trois paysages :

- ✚ La végétation halophile appelée aussi végétation azonale, elle est abondante sur les îles Kuriat là où le sol est salin. Cette végétation est liée à la chimie du sol et sa salinité.
- ✚ La végétation psammophile qui retient le sable transporté par le vent juste en arrière de la plage.
- ✚ La végétation ligneuse.



Figure 10: Couvert végétal aux îles Kuriat

b. Biodiversité marine :

La biodiversité marine des îles Kuriat renferme une richesse floristique et faunistique importante tels que :

◆ **L'herbier à *Posidonia oceanica* :** Inscrite dans l'Annexe II de la Convention de Barcelone, les herbiers de posidonie (**Fig. 11**) sont considérés comme un lieu de nurseries pour des nombreuses espèces animales, puisqu'il accueille entre 20 et 25% des espèces méditerranéennes (400 espèces végétales et 1000 espèces animales) (Boudouresque *et al.*, 2006).



Figure 11: Herbier de posidonie (CAR/ASP, 2011).

La qualité de l'eau de mer dans les îles Kuriat est excellente. Elle est bien éclairée et bien transparente favorisant une croissance très développée de la posidonie. Cet herbier est rencontré en très bonne santé dans les fonds sableux et rocheux (CAR/ASP, 2011).

- ◆ ***Cymodocea nodosa*** : est une Magnoliophyte marine, inscrite à l'annexe II de la convention de Barcelone, comme espèce en danger ou menacée. Dans les îles Kuriat elle se développe près de la surface entre 0 et 4 m de profondeur sur les fonds meubles à sable fin, grossier et vaseux et sur les fonds durs (roche) (**Fig. 12**). Elles sont très abondantes autour des îles que ce soit sur matie bordant le récif-barrière, ou colonisant les chenaux séparant les formations récifales (CAR/ASP, 2018).



Figure 12: herbier de *Cymodocea nodosa* (sghair,2020)

- ◆ **Les fonds de Maërl** : se développent sur des fonds meubles de l'étage circalittoral. Leur répartition bathymétrique est variable, en fonction de la transparence de l'eau. Ils sont caractérisés par les algues calcaires ou laminaires libres (CAR/ASP, 2014). Cette formation semble avoir un rôle écologique important puisqu'elle serait la frayère de plusieurs espèces halieutiques.

- ◆ ***Cystoseira spp*** : Les forêts à *Cystoseires* (**Fig. 13**) sont bien développées autour des fonds rocheux des îles Kuriat entre 0 et 10 m de profondeur. Les forêts les plus denses se situent autour de l'ancien port punique entre 0 et 1 m de profondeur (CAR/ASP - PNUE/PAM, 2014).



Figure 13: Herbier à *Cystoseires* (Sghaier, 2020)

- ◆ **La tortue caouanne *Caretta caretta*** : La tortue Caouane est une grande tortue qui peut mesurer jusqu'à 1,50 m, constitue un élément important dans la biodiversité marine et est considérée comme un facteur d'équilibre du milieu marin. Cette espèce est considérée en voie de disparition (Bradai, 2002) et est de ce fait protégée en Méditerranée.

Les îles Kuriat sont l'un des principaux sites de nidification de la tortue Caouanne au Sud de la Méditerranée, dont le suivi est assuré depuis plus de 20 ans (**Fig. 14**).



Figure 14: Bébés de Tortues marines (NGB, 2021)

I.3. Environnement physique de l'île Kuriat

I.3.1. Morphologie de la cote

Le littoral des îles Kuriat se caractérise par une côte de faible altitude, ne dépassant pas généralement les deux mètres (CAR/ASP, 2014).

La petite Kuriat a un total de 1000 m de plages sablonneuses, situées au Nord-Est, alors que le reste est formé essentiellement de côtes soit rocheuses soit bordées de Sebkhass. La Grande Kuriat, d'environ 6,9 km de linéaire côtier, est caractérisée par ses côtes rocheuses et des larges dépôts de banquettes de posidonies qui limitent l'accessibilité aux sites de nidification particulièrement aux plages situées au Sud et Sud-ouest.

La géologie de surface des îles Kuriat montre essentiellement des matériaux très récents, surtout sableux de plages, de dunes et de sebkhass, de chotts et de marais maritime (**Fig. 15**).

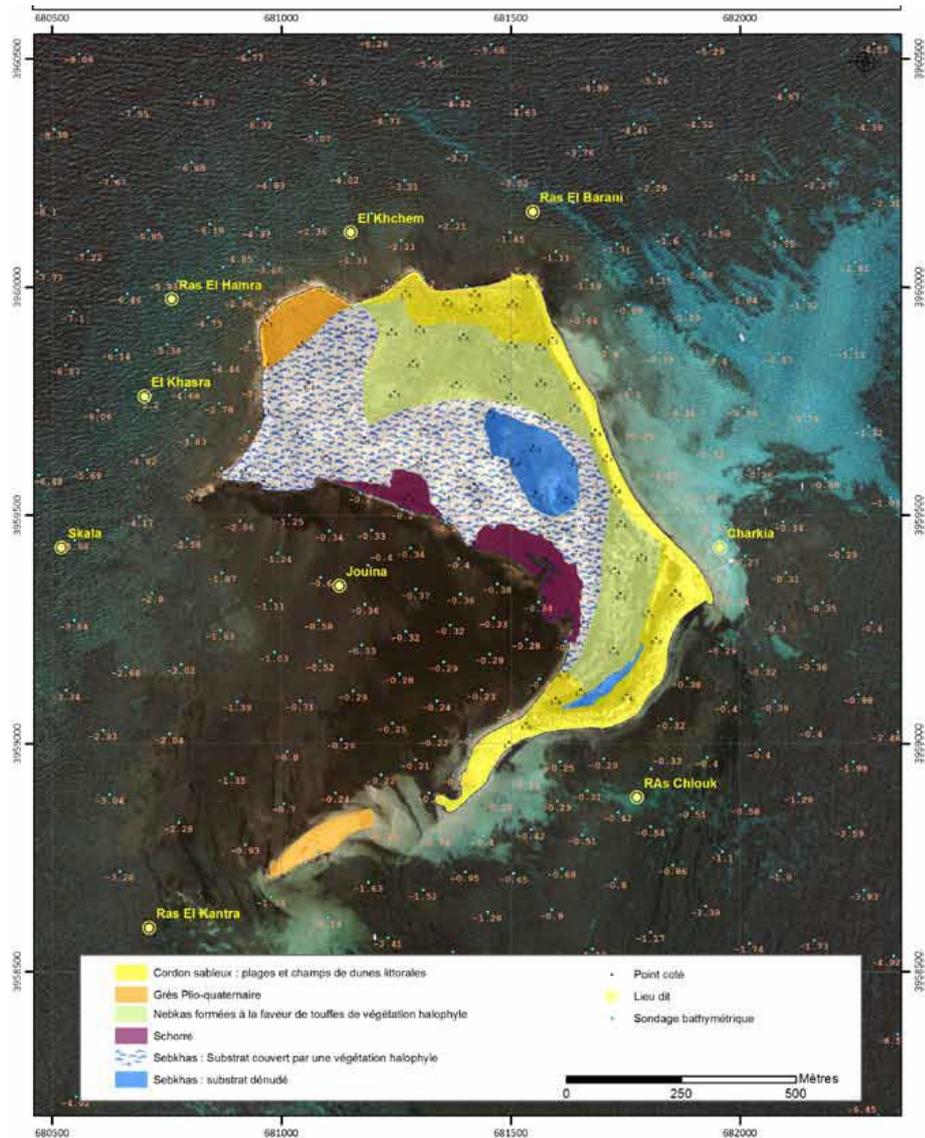


Figure 15: Cartes géomorphologique de la petite Kuriat

I.3.2. Courantologie :

La vitesse des courants est limitée vu la faible bathymétrie. Les courants sont généralement créés par les vents du NNE, NE, ENE, qui sont à l'origine d'un courant littoral ouvert Nord-Sud le long de la côte (APAL, 2010).

La branche du courant atlantique, de faible intensité, se fait sentir au-delà de l'isobathe - 50 m au large de Monastir. Elle contribue au renouvellement et au « rafraichissement » des eaux du golfe notamment en période estivale, mais n'a aucun effet sur la dynamique sédimentaire de la zone (PNUE/PAM, CAR/ASP, 2014)

I.3.3. Marée

Dans la baie de Monastir, la marée est du type semi-diurne et de faible amplitude. Le marnage est en moyenne de 30 cm et ne dépasse pas 40 cm en vives eaux. Les courants induits, très atténués, sont de l'ordre de 5 à 10 cm/s. Ils ne jouent presque aucun rôle dans la dynamique sédimentaire (APAL, 2019).

I.3.4. Houle

Sur l'ensemble de la baie de Monastir et plus particulièrement au niveau des îles Kuriat, le principal agent dynamique est la houle (APAL, 2005).

Les différentes houles se propageant vers la côte et présentant une certaine oblicité lors du déferlement sont à l'origine d'un courant local, parallèle à la côte, appelé courant de dérive littorale (CAR/ASP, 2014).

I.3.4. Vent

Les vents sont générateurs de houles et de courants superficiels, leur influence, jouent un rôle très important dans l'évolution géomorphologique des cotes (Guilcher, 1974).

Par leur position insulaire, les Kuriat sont très ventées, les situations calmes ne dépassent pas 15% des observations. Les coups de vents proviennent du secteur Nord et surviennent pendant la saison fraîche avec des vitesses souvent supérieures à 20 m/s. Les vents maxima enregistrés atteignent des vitesses considérables de l'ordre de 50 m/s (INM, 2020).

I.3.5. Pluviométrie

La zone de Monastir se situe entre les isohyètes 400 mm et 500 mm. Les pluies sont irrégulières et tombent pendant la saison fraîche, sous forme de violentes averses de durée limitée. En effet la pluviométrie du gouvernorat de Monastir varie de 280 à 400 mm par an d'après les dernières statistiques effectuées par l'Institut National de Météorologie (INM, 2010).

Les îles Kuriat enregistrent des moyennes pluviométriques plus importantes que celles de la station de Monastir.

II. Méthodologie de collecte des données

II.1. Suivi spatio-temporel de l'érosion sur la petite Kuriat

Afin d'évaluer le risque érosif au niveau de la petite Kuriat, nous avons réalisé une carte géographique synthétique autour du trait de côte de l'île à différentes années, à savoir en 2014 ; 2018 et 2020 moyennant le logiciel de système d'information géographique (SIG) et l'application de Google Earth.

Ce travail permettra une analyse spatiale du phénomène de l'érosion côtière à travers la reconnaissance des zones les plus vulnérables. Il constituera aussi un outil d'aide à la décision en permettant la localisation des sites prioritaires d'intervention par les actions de conservation de la côte de l'île Kuriat.

II.2. Réalisation d'enquête

Pour assurer une meilleure compréhension *in situ* du site et ses changements au fil des années, nous avons aussi réalisé une enquête (**voir annexe**) avec le gardien de la petite Kuriat, qui connaît bien le site depuis plus de 20 ans, et qui a entamé une méthode d'aménagement de la plage de façon spontanée, à savoir la technique de Millefeuille enfoui décrite dans la bibliographie (**Fig. 16**).



Figure 16: Enquête et concertation avec le gardien de l'île

II.3. Prospection des plages sur la petite Kuriat

Une première partie du travail, était consacrée à la collecte des informations et la prospection de toute la côte de la petite île Kuriat. Pour cela, nous avons utilisé un GPS mobile pour prendre les coordonnées géographiques et un mètre ruban pour prendre les mesures nécessaires (**Fig. 17**).



Figure 17 : Matériel de géolocalisation (GPS mobile) et mensuration (Mètre ruban)

L'objectif de cette partie est de prendre la géolocalisation, les longueurs, largeurs et hauteurs des plages aménagées ou pas par la technique de millefeuille enfoui, effectué par le gardien de l'île. Ceci va nous permettre d'évaluer l'efficacité de cette méthode par rapport à notre travail par la suite (**Fig. 18**).



Figure 18: Prise de mensurations des zones anciennes aménagées (Millefeuille enfoui)

Pour assurer une meilleure compréhension du phénomène de l'érosion, et l'implication de plusieurs facteurs, dont le rôle des dunes de sables, nous avons pris en considération la zone en face de la cabane de l'association (située sur la même ligne des zones aménagées par le gardien), où aucun traitement de plage n'a été fait.



Figure 19: Prise de mensuration devant la cabane (zone non aménagée)

II.4. Aménagement de plage et création du millefeuille

La deuxième partie était consacrée à effectuer une expérience consistant à la création de Millefeuille de sable et de feuilles mortes de posidonie selon un protocole élaboré suite à l'enquête faite et selon la bibliographie.

a. Création des millefeuilles

Pour notre étude, une partie de la plage a été choisie, car elle ne comportait pas une base touristique, ni d'activités balnéaires. Cette zone, étant la plus exposée à l'érosion, est située près de la cabane de l'association (à sa gauche), et qui va être aménagée en utilisant la technique de millefeuille. Pour assurer ceci, nous avons utilisé une brouette et pelle pour ramasser les feuilles des posidonie mortes (**Fig. 20**).



Figure 20 : Matériel utilisé pour le déplacement des feuilles mortes de posidonie

Les banquettes ont été remaniées en millefeuille d'une longueur d'environ 2,5 m et d'une largeur d'environ 1,5 m le 23/04/2022. Les feuilles mortes de posidonie ont été étalées et recouvertes de sable d'une épaisseur de 30 cm (**Fig. 21**).



Figure 21: Première couche du Millefeuille

Au total, on a créé trois stations de millefeuilles, avec différentes compositions comme suit :

- **MF_4** : constitué de 4 couches de sable et 4 couches de feuilles mortes de posidonie
- **MF_2** : constitué de 2 couches sables et 2 couche feuilles mortes de posidonie
- **MF1_** : constitué une seule couche de sable et une seule couche de feuilles de posidonie

Pour pouvoir les délimiter, des piquets en cannes à sucre ont été fixés aux extrémités de chaque station (**Fig. 22**).



Figure 22: Emplacements des stations en structures de millefeuilles

II.5. Estimation des volumes utilisés pour la technique MF

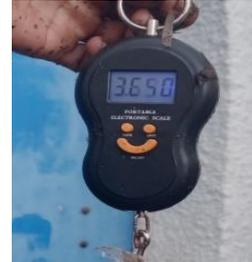
L'échantillonnage a été réalisé en utilisant une boîte cubique (20 cm par côté) pour un volume échantillonné de $0,008 \text{ m}^3$. Les feuilles ont été séparées des sédiments par la suite, en utilisant un tamis de 1,5 mm de maille afin de quantifier les volumes de sable et des feuilles mortes de posidonie utilisés dans la création du millefeuille (Fig. 23).



(1) Bascule mobile



(2) Boite cubique 20*20*20 (cm)



(3) Tamis

Figure 23: Matériel utilisé pour l'estimation des fractions du millefeuille

Pour quantifier ces deux fractions, elles ont été pesées séparément pour déterminer la quantité du sable (en Kg) et des banquettes de posidonie (en g).



Figure 24: Etapes de quantification de la teneur en sable et des banquettes de posidonie pour la technique de MF à 4 couches

III. Suivi de l'efficacité de la technique millefeuille

Afin d'obtenir des mesures de référence de recul de trait de côte au niveau de la même plage, nous avons installé des piquets en bois comme repères, ce qui nous permettra d'évaluer l'efficacité de notre méthode expérimentée (Fig. 25).



Figure 25: Installation de piquets de référence

Par ailleurs, nous avons essayé de comparer d'efficacité des différentes techniques de Millefeuilles utilisées au niveau de la Petite Kuriat, que ce soit dans les zones aménagées par MF enfouies ou par MF recouvertes, tout en ayant des sites de références aux alentours non aménagés (Fig. 26).



Figure 26: Images satellitaire des positions des sites utilisée pour le suivi de l'évolution du trait de côte

Pour résumer les sites choisis lors de notre étude, ce tableau présente les différentes stations, avec leurs caractéristiques.

Tableau 1 : les stations étudiées pour le suivi du trait de côte de la petite ile Kuriat

Stations	Nature de la plage	Description
MF0_1	Non aménagée	C'est la zone se situant devant la cabane de l'association n'ayant pas été traitée
MF0_2	Non aménagée	Il s'agit de la zone située entre le site aménagé à 4 couches (MF4) et celui à 2 couches (MF2)
MF0_3	Non aménagée	Il s'agit de la zone située entre le site aménagé à 2 couches (MF2) et celui à une seule couche (MF1)
MF0_4	Non aménagée	C'est le piquet de référence dans une zone non traitée N°1, se situant à la limite gauche de MF1
MF0_5	Non aménagée	C'est le piquet de référence dans une zone non traitée N°2, se situant à gauche de MF04
MF0_6	Non aménagée	C'est le piquet de référence dans une zone non traitée N°3, se situant à gauche de MF05
EN_1	Aménagée	Il s'agit de la zone traitée par la technique de millefeuille enfoui (point N°1)
EN_2	Aménagée	Il s'agit de la zone traitée par la technique de millefeuille enfoui (point N°2)
MF_1	Aménagée	Il s'agit de la zone traitée par la technique de millefeuille recouverte à une seule couche
MF_2	Aménagée	C'est la zone traitée par la technique de millefeuille recouverte à 2 couches
MF_4	Aménagée	Il s'agit de la zone traitée par la technique de millefeuille recouverte à 4 couches

IV. Création de plage à dune

Toujours en lien avec la gestion de l'île et de l'érosion, lors de la deuxième visite sur l'île Kuriat, on a créé des dunes, pour assurer la fixation du sable lors d'une mauvaise tempête, réduisant ainsi la circulation du sable et protège notre plage contre l'érosion (**Fig. 27**).



Figure 27: Création des dunes plage pour la fixation du sable

Dans certains cas, ces dunes sont recouvertes de feuilles de posidonies mortes (**Fig. 28**), ou elles étalées dans des couches de MF.



Figure 28: Fixation des dunes par les feuilles mortes de posidonie

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

I. Suivi spatio-temporel de l'érosion de la côte de la petite ile Kuriat (De 2014 à 2020)

L'évolution de trait de côte est un paramètre très important qui permet d'estimer sa dynamique. Pour réaliser cette étude, l'utilisation de photographies aériennes prise dans des années différentes s'est imposée.

La petite Kuriat possède deux zones présentant une régression importante de la ligne de côte. La première est celle devant les cinq bases touristiques, où les bancs de Posidonie sont enlevés quotidiennement, sous prétexte de paysage « propre » sollicité par les visiteurs de l'île, et la seconde partie où se trouve la sixième base touristique « Yasmine », devenue complètement isolée de l'île après une ouverture de brèche au cours de ces dernières années (**Fig. 29**).

La figure suivante met en évidence les variations qui ont touché le littoral de la petite île durant les années 2014, 2018 et 2020. Nous observons une zone où il y a une forte érosion, particulièrement au niveau de la zone Sud-Ouest de l'île. Ceci pourrait être expliqué par la présence de structure artificielle en béton armé, servant de cuisine et d'abri pour l'opérateur touristique. En effet, une étude a montré que lorsque l'écoulement de l'eau (précipitations ou vagues dans notre cas) et des sédiments sont entravés par des structures artificielles, des quantités d'eau et de sédiments atteignent la mer et l'érosion et le recul des côtes deviennent courants (Fanos, 1995).



Figure 29: Evolution de côte de la petite Kuriat durant les années 2014-2018-2020

II. Etude de l'efficacité de MF dans la lutte contre l'érosion

II.1. Identification des périodes d'intérêt :

Nous avons surveillé la météo et enregistré les données (vitesse du vent, vague, et précipitation) dès le premier jour de la création de la méthode millefeuille le 23 avril 2022 jusqu'au mois de juin 2022.

Les évènements identifiés par la météo ont conduit à identifier toutes les périodes dont les valeurs dépassent un seuil de vitesse de vent de 8 m/s (30 km/h), ou 0,9 m pour la hauteur de houle et 0,8 m/s pour la hauteur maximale des vagues. L'analyse réalisée nous a conduit à sélectionner 5 périodes d'intérêt :

- **23 avril** : Correspond au jour de la création des Millefeuilles : vent relativement fort (pic à 10m/s) d'orientation ouest et houle de sud-ouest avec un pic à 0,8 m de haut et la hauteur de vague dépasse 1m/s.
- **24-28 avril** : Il s'agit d'une période calme : très peu de vent (5 m/s) d'orientation sud-est et très peu de houle (0,6 m) d'orientation sud-est.
- **29-1 mai** : Faible coup de sud-ouest avec un vent d'orientation Est de 9 m/s et une houle importante jusqu'à 0,9 m de haut et 0,8 m/s de hauteur maximale de vague, plus un taux de précipitation de 0,8mm.
- **4-8 mai** : La vitesse du vent est très forte qui atteint 12 m/s, avec 2,1m de houle, et vague de 2,1 m/s de hauteur avec une journée de précipitation de 0,7 mm.
- **9-24 mai** : Une période plus ou moins calme : le vent est généralement de 5 à 7 m/s, d'orientation sud-est, et de houle moyenne de 0,6 m, avec une hauteur de vague pouvant atteindre 0,7 m/s.
- **25-27 mai** : La vitesse du vent est forte, de l'ordre de 11m/s, avec 1,1 m de houle, et 1,3 m/s de vagues.

Durant la période d'étude en fin du mois de mai et début juin (**Fig. 30**), aucun évènement météorologique majeur n'a pu être observé. En effet, les houles observées sur la période d'étude sont de maximum 0,8 m, quand elles peuvent atteindre jusqu'à 4 m en hiver d'après les données du modèle VENTUSKY.

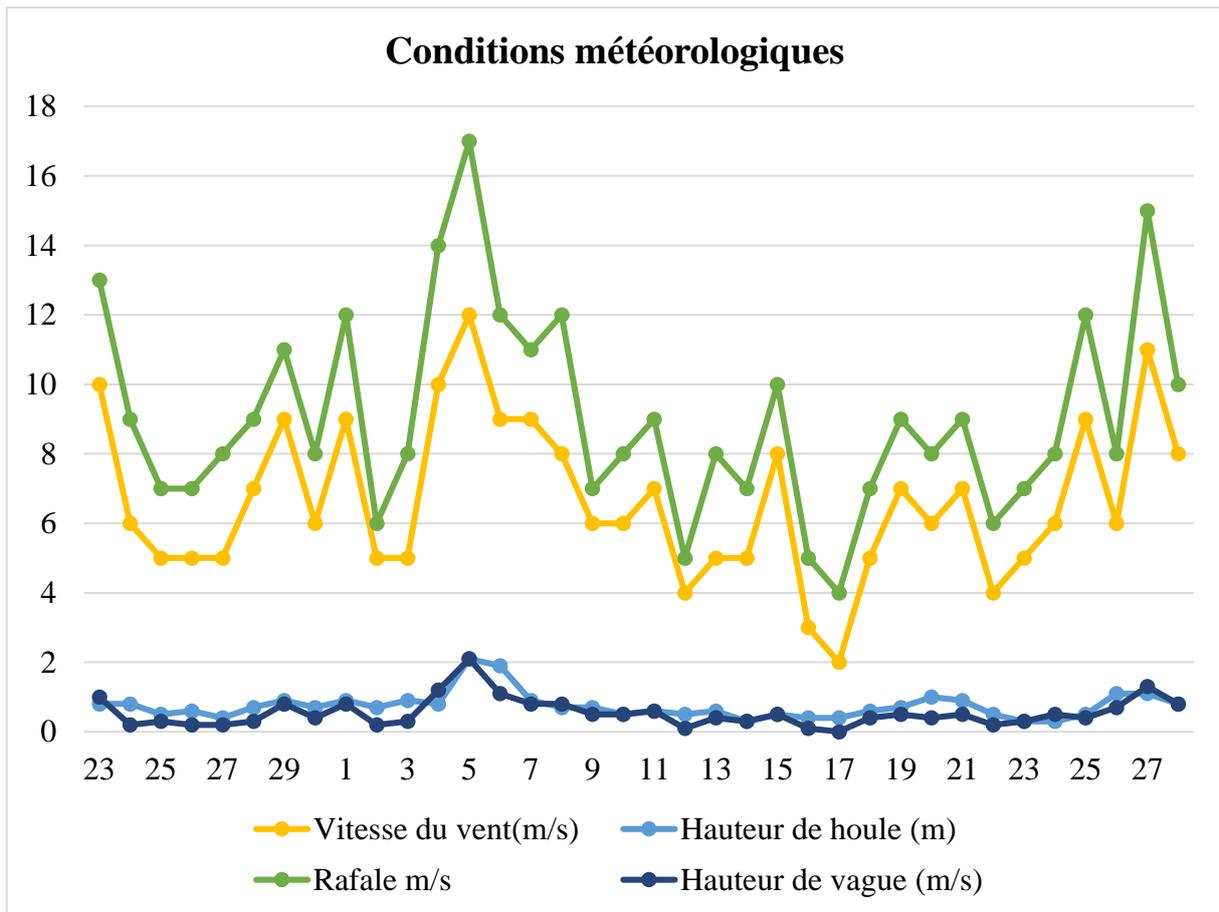


Figure 30 : Evolution des conditions météorologiques entre (23/04/2022 et 28/05/2022)

II.2. Etude de l'évolution du trait de côte :

Les résultats de notre travail ont montré que dans les zones d'étude des Millefeuilles, le trait de côte évolue parfaitement. En effet, il a été noté durant la période du 23/04/2022 à 10/05/2022, que la partie de la plage aménagée par des MF a évolué d'environ $\pm 2,5$ m.

De plus, la partie aléatoire située vers la cabane entre la dune que nous avons créé et notre millefeuille, s'est développée de 3 m (plage non aménagée). Par contre, dans la partie du millefeuille enfouis, le recul du trait de côte est d'environ 1,5 m.

Entre 10/05/2022 et 28/05/2022, le trait de côte a évolué de 0,3 m environ, malgré que la période fût marquée par un mauvais temps. En revanche, au niveau de la partie de la plage non aménagée, on a observé un recul de trait de côte d'environ 0,2 m.

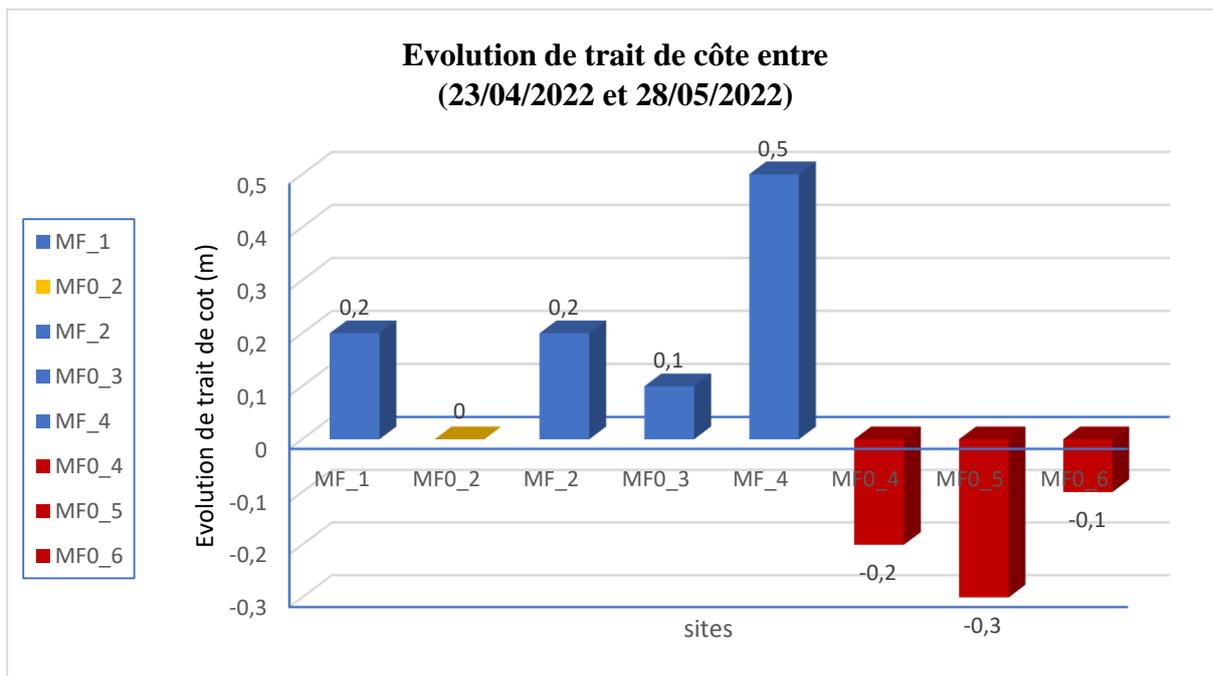


Figure 31: Evolution de trait de côte entre (23/04/2022 et 28/05/2022)

On remarque que malgré le mauvais temps, les parties aménagées de la plage par les millefeuilles résistent à l'érosion côtière et gagne même de l'espace littorale (MF_1, MF_2 et MF_4). Alors qu'au niveau des parties non aménagées correspondants aux piquets, on observe qu'il y a un recul de 0,3 m en moyenne.

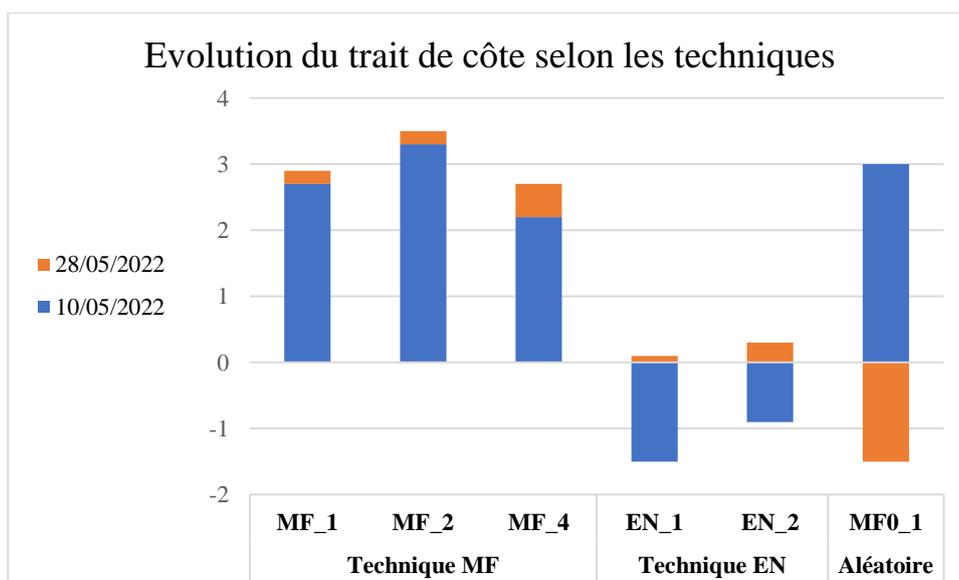


Figure 32: Evolution de trait cote selon les techniques utilisés

Cette figure montre que la technique de millefeuille recouverte présente un résultat positif, le trait de côte évolue de 3 m environ. Par contre, la technique en millefeuille enfoui, même si elle n'a pas gagné de l'espace et perdre 1,5m de la côte, elle résiste au maximum contre les vagues qui dépasse 44km/h de vitesse de vent par rapport au site de référence à côté, qui a perdu 4,90 m de sa plage (**Fig. 33**).



Figure 33: Résistance du site aménagé par la technique MF enfoui

De plus, on a remarqué un ajout de 3 m de côte en face de la cabane de l'association (entre l'aménagement par le technique millefeuille et l'aménagement par la dune). Ce résultat est considéré comme aléatoire, résultant de l'usage de deux techniques douces combinées, à savoir la technique de MF et la création de dune de sable. En effet, les dunes de sable font beaucoup de travail. Elles fournissent un approvisionnement futur en sable pour entretenir les plages, protéger les rivages de l'érosion côtière et assurer une protection contre les inondations côtières. Ce qui se concorde avec la méthode suivie par le gardien, qui à chaque fois crée des dunes, puis utilise leurs sables pour étaler la plage en suivant la méthode de MF enfoui.

A chacune des techniques son rôle dans la stabilisation de sédiments et la protection de la ligne de côte, mais sur l'ensemble de l'étude, on peut conclure que le trait de côte a évolué dans les parties contenant des millefeuilles (recouverts et enfouis), contrairement dans les parties non aménagées, la régression du trait de côte a été bien noté suite au vent violent et la mer agitée entre temps.

Ainsi, les millefeuilles n'ont seulement un rôle de protection des plages contre les vagues, mais elles favorisent aussi le piégeage des sédiments déplacés par les vents et les vagues. Par

ailleurs, si ces structures douces n'étaient pas présentes sur la côte de l'île, on aurait pu assister à une perte plus importante de quantités de sable, comme est le cas de la partie Est de l'île, de l'autre côté de millefeuille enfoui.

III. Estimation des volumes utilisés

Afin de connaître les volumes en sable et en feuilles mortes de posidonie que nous avons utilisée pour la création d'un millefeuille à l'aide de la boîte cubique, après tamisage et pèse des deux éléments séparément, on a obtenu environ 70% du sable et 30% de feuilles mortes.

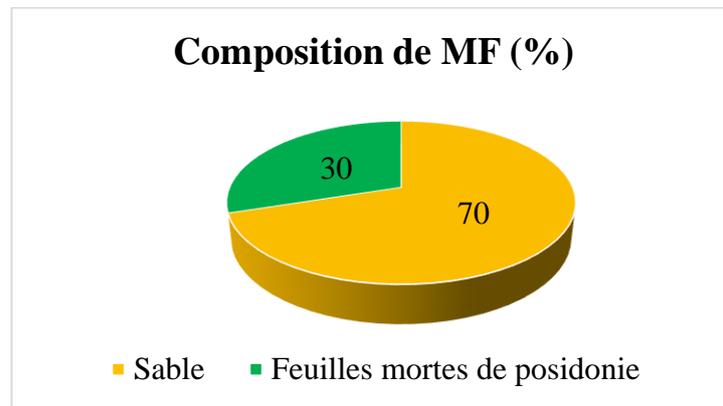


Figure 34: Composition de Millefeuille en % de sable et de feuilles mortes de posidonie

Il est à noter, que déjà, la proportion de sable trouvée au sein des banquettes varie selon les études et peut aller de 10 à 37% (Belon, 2017), voire même 56% (Cantasano, 2011), et une étude a estimé qu'il y aurait près de 60kg de sédiments piégés par m³ de banquette (Vacchi *et al.* 2017).

De ce fait, on pourrait stipuler que pour créer les Millefeuilles, nous n'aurions pas besoin de grandes quantités de sables, vu que les banquettes des feuilles mortes en comportent en grandes quantités.

CONCLUSION

Les systèmes côtiers sont des entités en équilibre dynamique à l'égard des facteurs hydrodynamiques, sédimentaires et géomorphologiques (Carter, 1988). Toutefois, cet équilibre est fragile, comme en témoigne l'érosion côtière sévère qui affecte les littoraux des différentes régions côtières du monde (Stone et Orford, 2004).

Le littoral tunisien, qui héberge 76 % de la population et abrite 87 % de l'activité industrielle et 80 % de l'activité touristique, est soumis à de fortes pressions qui menacent la gestion rationnelle de ses ressources naturelles, et par conséquent sa durabilité. A cela, se rajoutent les risques liés au changement climatique et plus particulièrement l'érosion côtière.

C'est pour cela, l'objectif principal de notre travail était de gérer l'érosion côtière en luttant contre la régression du trait de côte, où nous avons fait face à un autre objectif qui est la gestion des feuilles mortes de posidonie sur les plages touristiques. Les deux objectifs principaux étant de protéger la biodiversité, de limiter l'artificialisation du trait de côte et de conserver les feuilles mortes de posidonie, tout en respectant le secteur socio-économique.

La tendance actuelle des responsables et activistes de la protection du littoral est ce qu'on appelle la lutte active souple. En bref, il s'agit d'accompagner l'évolution du littoral plutôt que de le fixer, c'est-à-dire de ne pas avoir recours, sauf exception, à des protections artificielles en dur.

La présente étude, destinée aux gestionnaires du littoral, présente une solution dite **''Millefeuille''** avec ses avantages, afin de limiter l'érosion côtière et met en avant l'importance de cette méthode dans la mesure du possible. Bien souvent, cette solution douce n'est pas définitive et peuvent parfois être combinée avec d'autres solutions pour protéger des enjeux menacés à court terme. Mais il est à rappeler que sur le long terme il est illusoire de vouloir fixer définitivement le trait de côte, qui reste multifactoriel. Déjà, si le changement climatique n'est pas maîtrisé, nous assisterons à une érosion côtière majeure et à une élévation du niveau de la mer qui pourraient avoir des conséquences dévastatrices pour les communautés côtières.

La présente étude nécessite un suivi plus étendu dans le temps. En effet, dans le cadre de futures études d'évolution côtière, plusieurs sites pourraient être traités par cette technique, sur des périodes plus longues pour avoir une image plus claire de son impact.

REFERENCES

- Aguir A., 2011. Étude de l'impact de la protection du milieu marin sur les activités Socioéconomiques des îles Kuriat.
- APAL., 2015. Programme de développement des Aires Marines et Côtières Protégées en Tunisie.
- APAL., 2010. Programme de développement des Aires Protégées Marines et Côtières en Tunisie.
- APAL - CAR/ASP., 2010. Rapport de la Mission d'étude des habitats marins et des principales espèces des îles Kuriat (Tunisie) (octobre 2008).
- APAL / SCET-TUNISIE., 2009. Etude de gestion de la zone sensible littorale des îles Kuriat Rapport provisoire de Phase 3- Juin 2009.
- APAL/SCET-TUNISIE., 2001. Rapport définitif de Phase 2 : Gestion des zones sensibles littorales : Les îles Kuriat.
- APAL/SCET-TUNISIE., 2000. Etude de gestion de la zone sensible littorale des îles Kuriat. Rapport de synthèse.
- APAL et PNUD, 2012. Etude de la carte de la vulnérabilité du littoral tunisien à l'élévation du niveau de la mer due aux changements climatiques. Rapport de la Phase 2.
- Braik, 1989. Etude de la dynamique sédimentaire devant Bou Ismaïl: sédimentologie, morphologie, problème d'érosion du littoral, aménagement. Thèse de Magistère, Institut Sciences de la terre. USTHB., Alger.
- Ben Mustapha K., Hattour A., 2006. Les herbiers de Posidonie du littoral tunisien I-le Golf de Hammamet. Notes nouvelle série N°2 INSTOP Salammbô-2006.
- Boudouresque C.F., 2004., Marine biodiversity in the Mediterranean : status of species, populations and communities. Scientific Report of Port-Cros National Park.
- Boudouresque C.F., Pergent G., *et al.*, 2016. - The necromass of the *Posidonia oceanica* seagrass meadow: fate, role, ecosystem services and vulnerability. *Hydrobiologia*.
- Belon R (2017). Suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte en Haute- Corse.
- Belon R, *et al* (2014). Evolution des plages de poche de Corse : vers un modèle conceptuel.
- Brunel C, Sabatier F (2009) Potential influence of sea-level rise in controlling shoreline position on the French Mediterranean Coast. *Geomorphology*.
- CREOCEAN, CSIL (2011) Bilan de la gestion des banquettes de posidonie en Région Provence-Alpes Côte-d'Azur. Etude financée par DREAL PACA, l'ADEME et la région PACA.
- Cancemi G. and Buron K., 2008. Erosion du littoral et suivi des banquettes de posidonie sur les plages de Corse. DIREN Corse and EVEMar publ., Porto-Vecchio.
- CAR/ASP - PNUE/PAM., 2018. Cartographie des habitats marins clés et évaluation de leur vulnérabilité aux activités de pêche dans l'AMCP des îles Kuriat(Tunisie)- Phase 1 : Bilan et Diagnostic. Par Sghaier Y.R. Ed. CAR/ASP – Projet MedKeyHabitats. Tunis.

CAR/ASP - PNUE/PAM, 2014. Elaboration d'un Plan de Gestion pour l'Aire Marine et Cotiere Protegee des îles Kuriat (Tunisie) - Phase 1 : Bilan et Diagnostic. Par Thetis-Cabinet Sami Ben Haj. Ed. CAR/ASP - Projet MedMPAnet.

Chessa L.A., Fustier V., Fernandez C., Mura F., Pais A., Pergent G., Serra S., Vitale L., 2000. Contribution to the knowledge of 'banquettes' of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in Sardinia Island. Biol. Mar. Mediterr.

De Falco G., Molinaroli E, Conforti A., Simeone S. and Tonielli R., 2017. Biogenic sediments from coastal ecosystems to beach-dune systems: implications for the adaptation of mixed and carbonate beaches to future sea level rise. Biogeosciences.

DREAL PACA and ADEM, 2010. Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Bilan de la gestion des « banquettes » de Posidonie en région PACA.

Delangue J, Teillac-Deschamps P (2018) Ministère de la transition écologique et solidaire, Théma, Le service de régulation de l'érosion côtière en Aquitaine, EFESE, UICN.

DGEQV, UNDP et GEF, 2008. Etude de la vulnérabilité environnementale et socio-économique du littoral tunisien face à une élévation accélérée des niveaux de la mer due aux changements climatiques et identification d'une stratégie d'adaptation. Rapport de Synthèse.

Fanos A.M. (1995). The Impact of Human Activities on the Erosion and Accretion of the Nile Delta Coast. Journal of Coastal Research.

Jeu de Grissac, A. and Boudouresque, C.F., 1985. Rôle des herbiers de Phanérogames marines dans les mouvements de sédiments côtiers : les herbiers à *Posidonia oceanica*. Colloque franco-japonais d'Océanographie, Marseille.

Martin A, Bernard G, Ize S, Herlory O (2018) Analyse économique de la gestion des plages : cas des banquettes de Posidonie sur les communes du littoral méditerranéen français. In: XVèmes Journées Nationales Génie Côtier.

NGB and APAL. 2019. Suivi de la fréquentation estivale sur les îles de Kuriat.

Okianos. And APAL. 2008. Etude de gestion des banquettes de posidonie sur le littoral tunisien. Phase 1.

Otero M.M., Simeone, S., Aljinovic, B., Salomidi, M., Mossone, P., Giunta Fornasin M.E., Gerakaris V., Guala, I., Milano, P., Heurtefeux H., Issaris, Y., Guido, M. and Adamopoulou, M., 2018. POSBEMED : Gouvernance et gestion des systèmes plage/dunes à Posidonie. Rapport final.

Procaccini G, 2003., Rôle et impact des dépôts de feuilles mortes de posidonies sur les plages : qualité et protection du milieu contre l'érosion – Eléments pour une gestion raisonnée des dépôts. D.E.S.S. « Ingénierie de l'Ecologie ».

Pergent G, Kempf M (1993). L'environnement marin côtier en Tunisie. Rapp synthèse – IFREMER.

Quiterie Chaperon, 2020. Etude de l'efficacité d'une gestion des banquettes de posidonies avec la technique du « Millefeuille » par rapport à une banquette laissée au naturel. Diplôme d'ingénieur d'agroparistech, CREOCEAN.

Roche A, *et al* (2014). Apport de l'imagerie satellitaire pour le suivi du trait de côte.

Setec in vivo, Claudel, H., Leveque, F., & Chenos, M. 2016. Gestion des feuilles mortes de posidonies dans la Reppe.

Simeone S. and De Falco G., 2013. *Posidonia oceanica* banquettes removal: sedimentological, geomorphological and ecological implications. J. Coast. Res., special issue.

Simeone S., De Falco G., Quatrocchi G. and Cucco A. 2014. Morphological changes of a Mediterranean beach over one year (San Giovanni Sinis, western Mediterranean). Journal of Coastal.

SAMAT O. (2007). Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille I – Université de Provence.

Van Rijn LC (2011). Coastal erosion and control. Ocean Coast Manag.

ANNEXE

Enquête avec le gardien de l'île Kuriat

1. Pourquoi vous avez choisi cette technique ? Où avez-vous eu cette idée ?

.....

2. Quelle est la période où vous avez commencé de travailler avec cette technique ?

.....

3. Quels sont les engins que vous avez utilisés ?

.....

4. Quelle est la période et la durée de travail de cette méthode ?

.....

5. Pouvez-vous décrire la méthode ou le protocole de mise en place de cette technique ?

.....

6. Pourquoi vous avez utilisé le sable ?

.....

7. Combien de sable, de feuilles mortes et de posidonie avez-vous utilisé ?

.....

8. Combien de temps cela vous a-t-il pris ?

.....

9. A votre avis, quels sont ses avantages/ ses inconvénients ?

.....

10. Avez-vous remarqué la différence dans l'évolution de la côte de l'île ?

.....

11. Pouvez-vous me donner d'autres idées qui peuvent protéger l'île contre l'érosion ?

.....

Résumé : Depuis l'antiquité, la mer et le littoral ont constitué des espaces d'attraction et de convoitise où les plus grandes civilisations ont fleuri. En effet, l'histoire de la Tunisie a été depuis toujours intimement liée à la mer et au littoral. Aujourd'hui, ce patrimoine naturel précieux, qui a été pour longtemps le siège d'intenses activités humaines et qui constitue l'épine dorsale de l'économie du pays, présente une situation particulière de vulnérabilité environnementale. Cependant, des efforts doivent être faits afin d'améliorer la résilience des espaces littoraux par une meilleure gestion des sédiments et par la préservation d'un espace suffisant pour les processus côtiers notamment dans l'AMCP Kuriat.

Le présent projet, destiné aux gestionnaires du littoral, présente une solution basée sur la nature afin de limiter l'érosion côtière et met en avant l'importance de cette solution douce dite « **Millefeuille** » dans la mesure du possible, avec leur avantage et efficacité.

Le millefeuille ou faire enfouir les banquettes de posidonie sur la plage sont autant de méthodes qui permettent une transition des communes vers une gestion plus douce de leurs plages. Cette technique semble offrir compromis entre maintien du trait de côte, préservation d'une espèce à haute valeur patrimoniale et valeur touristique des plages. Cependant, cette technique, bien qu'inspirée par la nature, relève d'une pratique empirique dont les bénéfices n'ont jamais été étudiés jusqu'ici. Bien souvent, cette solution douce n'est pas définitive pour protéger des enjeux menacés à court terme. Mais il est rappelé que sur le long terme il est illusoire de vouloir fixer définitivement le trait de côte sans impact environnemental fort et de lourds investissements économiques.

Mots clés : *Erosion côtière, Trait de côte, Solution douce, Millefeuille, Banquettes de posidonie, AMCP Kuriat*

Abstract: Since antiquity, the sea and the coast have been areas of attraction and desire where the greatest civilizations have flourished. Indeed, the history of Tunisia has always been closely linked to the sea and the coast. Today, this precious natural heritage, which for a long time has been the seat of intense human activities and which constitutes the backbone of the country's economy, presents a particular situation of environmental vulnerability. However, efforts must be made to improve the resilience of coastal areas through better sediment management and the preservation of sufficient space for coastal processes, particularly in the MCPA Kuriat.

This project, aimed at coastal managers, presents a nature based solution to limit coastal erosion and highlights the importance of this soft solution called "Millefeuille" as far as possible, with their advantage and effectiveness.

Millefeuille or burying benches of Posidonia on the beach are all methods that allow municipalities to transition to a more gentle management of their beaches. This technique seems to offer a compromise between maintaining the coastline, preserving a species with high heritage value and the tourist value of the beaches. However, this technique, although inspired by nature, is an empirical practice whose benefits have never been studied so far. Very often, this soft solution is not definitive to protect short-term threatened issues. But it is recalled that in the long term it is illusory to want to definitively fix the coastline without strong environmental impact and heavy economic investments.

Key words: *Coastal erosion, Coastline, Soft solution, Millefeuille, Posidonia benches, MCPA Kuriat*