

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de L'aménagement du littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master en sciences de la mer

Spécialité : Gestion et Protection du Littoral

Thème

**ANALYSE DE L'EVOLUTION DU CORDON DUNAIRE D'EL
KADOUS**

Présenté par :

Addou Soumia et Bettine Razika

Soutenue le 1 juillet 2025, devant le jury composé :

| | | |
|----------------------------|---------------|---------------|
| Mr. Zerrouki Mouhamed | MAA (ENSSMAL) | Président |
| Mr. Otmani Housseyn | MCA (ENSSMAL) | Promoteur |
| Mme. Moussaoui Meriem | DOCTORANTE | Co-promotrice |
| Mme. Keraghel Mehdiya Asma | MCA (ENSSMAL) | Examinatrice |

Année universitaire 2024/ 2025

لجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de L'aménagement du littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en sciences de la mer

Spécialité : Gestion et Protection du Littoral

Thème

**ANALYSE DE L'EVOLUTION DU CORDON DUNAIRE D'EL
KADOUS**

Présenté par :

Addou Soumia et Bettine Razika

Soutenue le 1 juillet 2025, devant le jury composé :

| | | |
|----------------------------|---------------|---------------|
| Mr. Zerrouki Mouhamed | MAA (ENSSMAL) | Président |
| Mr. Otmani Housseyn | MCA (ENSSMAL) | Promoteur |
| Mme. Moussaoui Meriem | DOCTORANTE | Co-promotrice |
| Mme. Keraghel Mehdiya Asma | MCA (ENSSMAL) | Examinatrice |

Année universitaire 2024/ 2025

Table des matières

| | |
|---|-----|
| DEDICACES..... | III |
| REMERCIEMENTS | IV |
| Liste des tableaux | V |
| Liste des figures..... | VI |
| Abréviations | IX |
| Introduction générale..... | 2 |
| 1 Chapitre I : Synthèse bibliographique | 4 |
| 1.1 Définitions : | 4 |
| 1.1.1 Le littoral et ses unités | 4 |
| 1.1.2 Sites sensibles protéger par Ramsar | 8 |
| 1.2 Les contraintes et risques côtiers : | 10 |
| 1.3 Etat actuel | 13 |
| 1.4 Description de la zone d’El kadous : | 15 |
| 1.5 Localisation du site : | 17 |
| 1.5.1 Localisation administrative : | 17 |
| 1.5.2 Localisation géographique : | 17 |
| 2 Chapitre II : Diagnostique physique..... | 22 |
| 2.1 Etude climatique : | 22 |
| 2.1.1 Les vents..... | 22 |
| 2.1.2 Les Température | 24 |
| 2.1.3 Les précipitations : | 27 |
| 2.2 Etude océanographique : | 29 |
| 2.2.1 Les houles : | 29 |
| 2.2.2 Les courants : | 30 |
| 2.3 Etude hydrographique : | 32 |
| 2.3.1 Les source d’alimentation d’eau : | 32 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.3.2 | Bassin versant : | 34 |
| 2.4 | Etude de l'évolution du trait de côte..... | 34 |
| 2.4.1 | Logiciels utilisés | 34 |
| 2.4.2 | Méthodologie suivie | 35 |
| 2.4.3 | Résultats | 37 |
| 2.4.4 | Discussion..... | 39 |
| 2.4.5 | Conclusion | 40 |
| 3 | Protocoles de restauration des dunes littoral | 42 |
| 3.1 | Etude approfondie su site..... | 42 |
| 3.1.1 | Etude de la dynamique des sables et analyse des vents dominants..... | 42 |
| 3.1.1.2 | Cartographie des directions et intensités des vents dominants..... | 44 |
| 3.1.2 | Le bilan sédimentaire des plages | 49 |
| 3.2 | Technique de restauration des dunes littorales | 54 |
| 3.2.1 | Reconstitution de la dune | 54 |
| 3.2.2 | Installation des clôtures | 56 |
| 3.2.3 | Plantation d'espaces végétale | 63 |
| 3.3 | Gestion de la fréquentation..... | 68 |
| 3.3.1 | Canalisation des flux de visiteurs | 69 |
| 4 | Conclusion générale | 73 |
| 5 | Références bibliographiques | 75 |
| 6 | Résumé | 80 |

DEDICACES

A nos très chers parents

Votre amour et vos sacrifices nous ont permis d'avancer chaque jour. Ce mémoire n'aurait
jamais vu le jour sans vous

A ceux qui nous aiment et que nous aimons

Chaque mot, chaque ligne de ce travail porte une part de vous.

A ceux qui nous ont encouragés dans les moments difficiles

Votre présence nous a permis d'avancer, merci du fond du cœur. Ce travail est pour vous.

A nos amis

Vous êtes tellement supers ! Comme le temps passe vite et comme nous aimerions qu'il
ralentisse.

Soumia et Silia

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions **Allah le Tout-Puissant** de nous avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur **Monsieur le Docteur Otmani Housseyn** pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce projet. Ses orientations scientifiques ont été déterminantes dans l'aboutissement de ce mémoire.

Nos sincères remerciements s'adressent également à notre co-promotrice **Madame l'Ingénieure Moussaoui Meriem** pour son accompagnement précieux, son expertise et le temps qu'elle nous a consacré.

Nous remercions chaleureusement **Monsieur le Docteur Zerrouki Mouhamed**, président du jury, qui nous fait l'honneur de présider la soutenance de ce mémoire.

Nos remerciements s'étendent à **Madame la Docteure Keraghel Mehdiya Asma**, examinatrice de ce travail, pour avoir accepté d'évaluer notre recherche et d'enrichir nos réflexions par ses remarques constructives.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet : famille, amis et collègues qui nous ont soutenus et encouragés dans cette aventure académique.

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : représentatif des caractéristiques principales de plage d'EL Kadous (Bellabad, 2020)..... | 34 |
| Tableau 2 : méthode de cartographie des direction et intensités des vents dominants (Belarbi,2021)..... | 44 |
| Tableau 3 : Modalités de reconstruction du cordon dunaire par rapport au bilan sédimentaire du secteur côtier (UICN ; 2012)..... | 51 |
| Tableau 4 : Cycle saisonniers d'érosion/accrétion. | 53 |
| Tableau 5 : Avantages et inconvénients des divers types de reconstruction topographique (UICN, 2012)..... | 54 |
| Tableau 6 : Synthèse comparative des méthodes courantes..... | 57 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Photo de la dune d'El kadous(OTMANI, 2021)..... | 4 |
| Figure 2: Photo d'un profil type d'une plage(OTMANI, 2021)..... | 5 |
| Figure 3: Profile type d'une cote à falaise (Houde-Poirier, M., Touchette, M., Bruyère, C. et all, 2018). | 6 |
| Figure 4 : photo d'une microfalaise de la dune d'El kadous(prise lors de la sortie, 2024). | 6 |
| Figure 5: Zonation des estuaires (Martineau,2011)..... | 7 |
| Figure 6: Les estuaires (Ifremer, 2024). | 7 |
| Figure 7 : Photo d'un marais (AquaPortail, 2018). | 8 |
| Figure 8: La zone humide côtière de Réghaia (Larid, 2008)..... | 9 |
| Figure 9: carte de situation géographique et délimitation de la réserve naturelle (élaborée à partir de la carte topographique 1/25000. Larid,2008). | 10 |
| Figure 10: Aléas, enjeux et risques (Hénaff, 2014)..... | 11 |
| Figure 11 : schéma des principaux mécanismes intervenant au cours d'une tempête (EID Méditerranée,2014). | 12 |
| Figure 12 : l'érosion côtier, au croisement de facteurs naturels et anthropiques d'après (Gharbi et Cherbali, 2021). | 15 |
| Figure 13 : Un large couloir de déflation au niveau des dunes d'El Kadous (prise lors de la sortie, 2024)..... | 15 |
| Figure 14 : Ecosystèmes dunaires | 17 |
| Figure 15 : carte de situation géographique de la zone d'étude..... | 18 |
| Figure 16 : Plage El Kadous prise lors de la sortie 2024. | 19 |
| Figure 17 : Localisation des plages sableuses dans la zone d'étude (Bellabed,2020). | 20 |
| Figure 18 : Roses des vents saisonniers et annuels de la plage d'El kadous (WaveClimate , 2022)..... | 23 |
| Figure 19 : les variations mensuelles des temperatures dans la regions d'el kadous (source : https://www.historique-meteo.net/). | 25 |
| Figure 20 : les variations annuelles des temperatures dans la regions d'el kadous (source : https://www.historique-meteo.net/). | 27 |
| Figure 21 : Les variations mensuelle des précipitations dans la region d'El kadous (source : https://www.historique-meteo.net/). | 28 |
| Figure 22 : Les variations mensuelle des précipitations dans la region d'El kadous (source : https://www.historique-meteo.net/). | 29 |

| | |
|--|----|
| Figure 23 : Les roses des houles saisonniers et annuels de la plage d'El kadous (WaveClimate , 2022). | 30 |
| Figure 24 : rose des courants annuels entre 2015 et 2024 (https://www.puertos.es/) | 31 |
| Figure 25 : roses des courants saisonniers entre 2015 et 2024 (https://www.puertos.es/) | 32 |
| Figure 26 : Réseau hydrographique et délimitation du bassin versant de la zone d'étude(Bellabad,2020). | 33 |
| Figure 27 : Principe du fonctionnement du DSAS..... | 35 |
| Figure 28 : Résultat cartographique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre EPR entre 2006 et 2025..... | 37 |
| Figure 29 : Résultat graphique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre EPR entre 2006 et 2025..... | 37 |
| Figure 30 : Résultat cartographique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre NSM entre 2006 et 2025..... | 38 |
| Figure 31 : Résultat graphique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre NSM entre 2006 et 2025..... | 38 |
| Figure 32 : Résultat graphique du bilan surfacique..... | 39 |
| Figure 33 : changement de l'embochure de l'oued (google earth pro) | 39 |
| Figure 34 : piège à sédiments utiliser. (Meur et Ruz, 2002). | 47 |
| Figure 35 : les différents modes de transport sédimentaire par le vent (Bourahla;Sakhari, 2013)..... | 48 |
| Figure 36 : les principaux éléments d'un profil littoral (https://www.batirama.com/article/54685-pas-de-lien-entre-l-extraction-de-sable-enmer-et-l-evolution-du-trait-de-cote-en-france.html). | 51 |
| Figure 37 : modelé du dépôt sableux selon divers types d'obstacles (Jean, 1983). | 57 |
| Figure 38 : photos de ganivelles (Boucher, 2011-2012). | 59 |
| Figure 39 : photo de brise-vents (ONF, 2023)..... | 60 |
| Figure 40 : photo de fascine (Attention fragile, 2021) | 61 |
| Figure 41 : photo d'installation et d'évolution de fascine (De Sinety, M., Bourgeois, M., et, Giroux, M-E., Avril 2017)..... | 62 |
| Figure 42 : photo d'un tapis de branchage en octobre 2016 (De Sinety, M., Bourgeois, M. et. Giroux, M-E., Avril 2017)..... | 63 |
| Figure 43 : schéma d'un système plage-dune (IFREMER, 2011)..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figure 44: La revégétalisation par plantation d’ammophile à ligule courte en juin 2015 (De Sinety, M., Bourgeois, M. et Giroux, M-E., Avril 2017). | 66 |
| Figure 45: Photo de chiendent de sable http://platier.free.fr/agropyrum_junceum.php | 67 |
| Figure 46: Photo de chiendent de sable https://ecobalade.fr/espece/chiendent-des-sabl.... | 67 |
| Figure 47: Les pratiques incontournable en milieu dunaire. | 68 |
| Figure 48: photo de balisage en randonnée (Le balisage en randonnée : suivez les bonnes balises ! - Mon GR®). | 69 |
| Figure 49 : passerelle d’accès à la plage (UICN, 2012)..... | 70 |
| Figure 50: illustration et photo du panneau Processus de restauration en cours (De Sinety, M., Bourgeois, M. et all., Avril 2017). | 71 |

Abréviations :

AFNOR : Association Française de Normalisation

ANAT : Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire

ArcGIS: Arc Geographic Information System

COMSALT: Computational Saltation Model

DSAS: Digital Shoreline Analysis System

EPR : End Point Rate

GES : Gaz à Effet de Serre

GPS : Global Positioning System

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

LiDAR: Light Detection and Ranging

NSM: Net Shoreline Movement

QGIS : Quantum Geographic Information System

RAMSAR : Convention relative aux zones humides d'importance internationale

SIG : Système d'Information Géographique

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

Introduction générale

Introduction générale

Les dunes côtières sont des écosystèmes terrestres situés dans la transition entre le milieu continental et marin, qui répondent à un certain nombre de fonctions uniques telles que la protection du littoral grâce à leur capacité d'amortissement face aux tempêtes, leur rôle de prévention des risques d'inondation. Etant donné que les systèmes de plage-dunes jouent un rôle essentiel en matière de réduction des risques de catastrophes (UICN, 2012).

Le littoral algérois, très diversifié (falaises, plages, dunes et zones humides), souffre dans sa majorité d'un problème d'érosion, qui ne cesse de croître en raison des forces naturelles et anthropiques auxquelles il est exposé à différentes échelles (Bouhamadouche, 1993). Ces contraintes induisent un recul du trait de côte qui provoque la disparition de certaines plages (Dean, 2000).

La restauration des systèmes dunaires dégradés est obtenue par l'élimination des causes d'altérations et par l'utilisation des techniques de reconstruction et de végétalisation. Dans tout projet de restauration, il est essentiel de bien préciser les objectifs poursuivis, et il est souhaitable que les interventions permettent de rétablir la structure (composition d'espèces) et le fonctionnement (processus de sédimentation et écologique) qui assurent la vitalité du système (SER, 2016). Ce travail vise à étudier l'évaluation du cordon dunaire de la plage el kadous ensuite d'élaborer un protocole de restauration des dunes d'El kadous, de définir les méthodes, les techniques à suivre pour restaurer les écosystèmes dunaires dégradés.

La méthodologie employée pour mener cette étude repose sur diverses approches, structurées en trois chapitres :

Chapitre 1 : Ce chapitre constitue une synthèse bibliographique des notions fondamentales indispensables à une compréhension approfondie de la thématique étudiée et la localisation géographiques et administrative du site.

Chapitre 2 : Ce chapitre présente un diagnostic physique complet d'el Kadous à travers quatre axes principaux : l'étude climatique (vents, températures, précipitations), l'océanographie (houles et courants), l'hydrographie (sources d'eau et bassin versant), et l'analyse de l'évolution du trait de côte.

Chapitre 3 : Ce chapitre décrit la méthodologie de restauration des dunes d'El kadous, les techniques de stabilisation (apports de sables, clôtures, végétalisation) et les mesures de gestion pour préserver la stabilité du milieu dunaire

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1 Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1 Définitions :

1.1.1 Le littoral et ses unités

Littoral : Le littoral désigne la zone de contact entre la terre et la mer, caractérisée par une interface dynamique soumise à l'action des vagues, des marées et des processus météo-marins (Paskoff, 2004). Cette zone comprend à la fois la partie terrestre influencée par la mer (arrière-côte) et la partie marine influencée par la terre (avant-côte), s'étendant généralement sur quelques kilomètres de part et d'autre de la ligne de rivage (Miossec, 2004). Le littoral constitue un géosystème complexe où interagissent les processus continentaux et marins, créant des paysages spécifiques et des écosystèmes particuliers (Verger, 2005). Il s'agit d'une zone de transition caractérisée par une forte dynamique morphologique et une grande diversité d'habitats naturels.

Dunes : Une dune est un milieu dynamique sujet à des échanges sédimentaires permanents avec la plage. Elle résulte de l'accumulation par le vent de sable apporté par la mer, constituant un bourrelet rectiligne parallèle au rivage (**PASKOFF, 2010**).

Le cordon dunaire : Le cordon dunaire est une zone sableuse formant une barrière naturelle entre la mer et l'arrière-pays terrestre. Il se compose de dunes, qui sont des élévations de sable dont les sommets sont toujours émergés. Le cordon dunaire se forme grâce à l'action du vent qui transporte et dépose le sable (**INPN, 2022**).



Figure 1: Photo de la dune d'El kadous(OTMANI, 2021).

Plage : Les plages sont des côtes basses d'accumulation dont les sédiments sont supérieurs aux constituants de vase. Ces sédiments sont libres (susceptibles d'être déplacés) sauf en cas de forte teneur en eau (cohésion). Les sédiments des plages sont caractérisés par des mouvements perpendiculaires ou parallèles au rivage sous l'effet des facteurs hydrodynamiques (OTMANI, 2021).

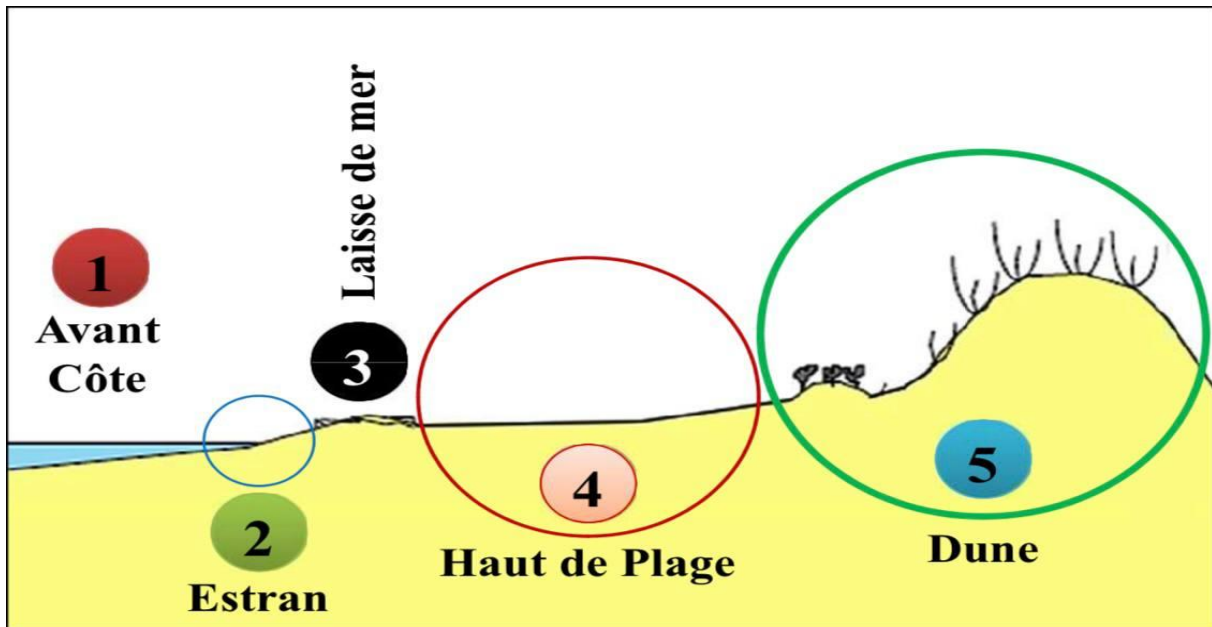


Figure 2: Photo d'un profil type d'une plage(OTMANI, 2021)

Les falaises marines : Versants côtiers de paroi quasiment verticale, raide à la base. Relief continental (montagne, colline, plateau) attaqué par la mer, érodé, avançant parallèle à lui-même, apparition d'une plateforme rocheuse légèrement en pente vers le large (La plateforme d'abrasion (Otmani, 2021).

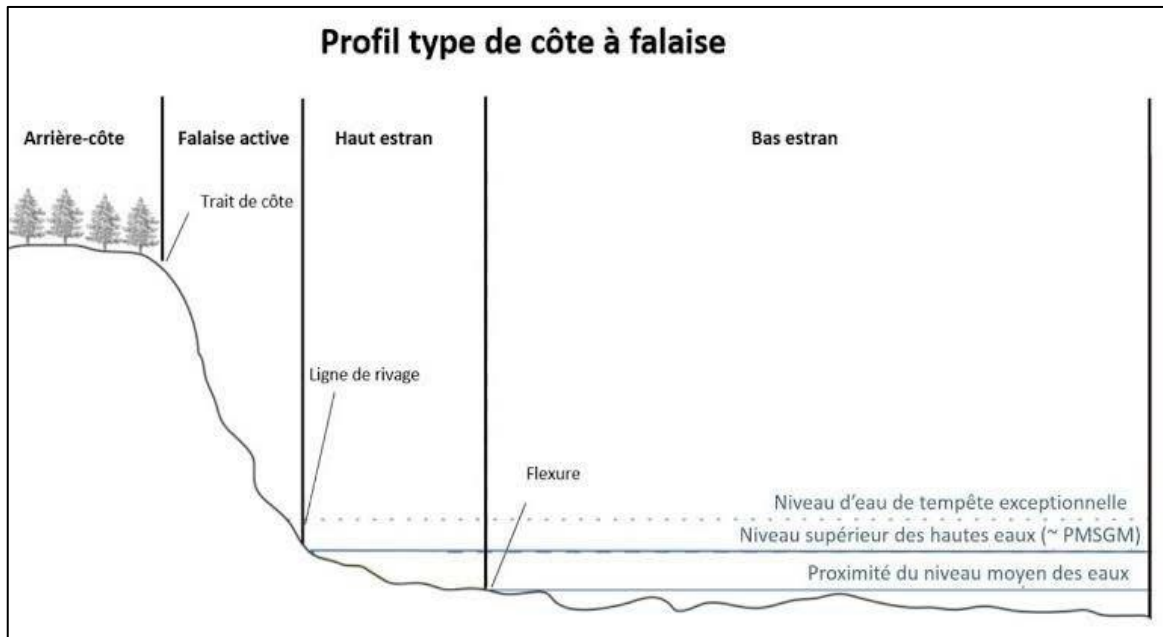


Figure 3: Profil type d'une cote à falaise (Houde-Poirier, M., Touchette, M., Bruyère, C. et all, 2018).



Figure 4 : photo d'une microfalaise de la dune d'El kadous (prise lors de la sortie, 2024).

Les estuaires : Les estuaires correspondent aux embouchures fluviales élargies où se mélangent les eaux douces et les eaux salées, créant des environnements spécifiques caractérisés par des variations de salinité (Pritchard, 1967). Ces zones constituent des milieux particulièrement productifs sur le plan biologique.

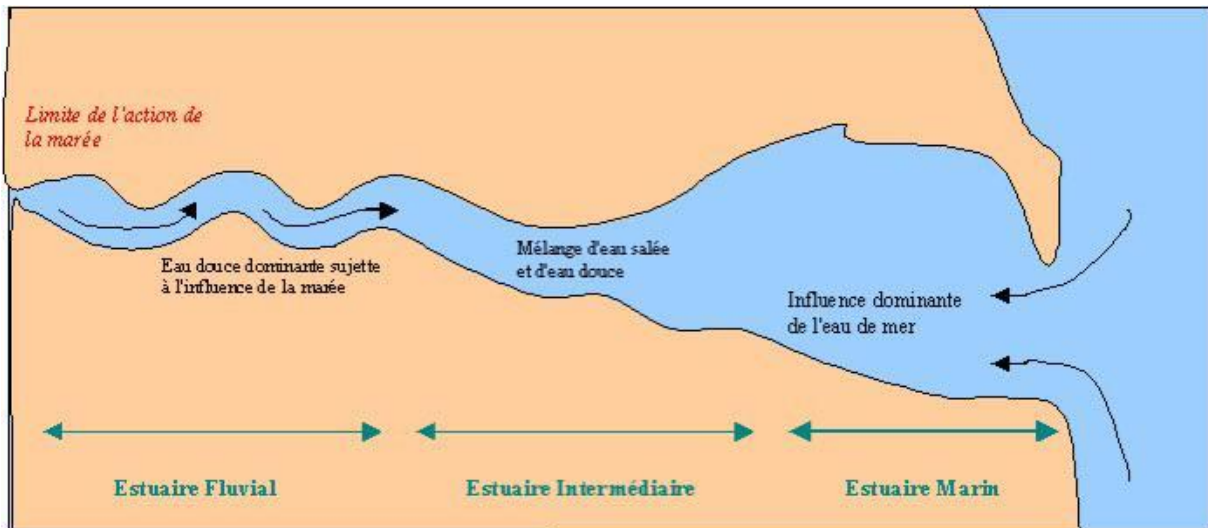


Figure 5: Zonation des estuaires (Martineau,2011).



Figure 6: Les estuaires (Ifremer, 2024).

Les marais littoraux : les marais littoraux sont des zones humides soumises à l'influence des marées, caractérisées par une végétation halophyte adaptée aux variations de salinité (Beefink, 1977). Ils jouent un rôle écologique majeur et constituent des zones d'amortissement face aux tempêtes.



Figure 7 : Photo d'un marais (AquaPortail, 2018).

1.1.2 Sites sensibles protégés par Ramsar

La plage El Kadous avec son linéaire rectiligne est ouverte et dont le matériau prédominant est le sable. La plage El Kadous par sa situation géographique s'inscrit dans la réserve naturelle du lac de Réghaia présentée comme zone humide côtière d'intérêt national et international (Site Ramsar). La préservation de la plage et des dunes du site El Kadous constitue une condition primordiale au bon fonctionnement de la zone humide. Cet espace fait partie de la réserve naturelle et sert de zone tampon (A.N.A.T. 2005).



Figure 8: La zone humide côtière de Réghaïa (Larid, 2008).

Les zones humides algériennes sont confrontées à de multiples menaces, et leur destruction se poursuit à un rythme préoccupant. C'est notamment le cas du lac naturel de Réghaïa et de ses environs, un patrimoine écologique classé depuis 2003 sur la liste de la Convention Ramsar, et pressenti pour devenir une réserve naturelle nationale. Ce site subit une pression croissante due à une urbanisation anarchique ainsi qu'à la pollution générée par les rejets toxiques, notamment ceux des unités industrielles locales, qui affectent les oueds d'El Biar et de Réghaïa – affluents essentiels du lac éponyme.

Malgré son statut de zone humide d'importance internationale, le lac et ses eaux sont de plus en plus souillés par les déchets industriels et domestiques. Cette dégradation continue de la qualité de l'eau, alimentée par les déversements de matières solides, de substances chimiques et d'eaux usées urbaines, met en péril de nombreuses espèces animales et végétales protégées. La situation suscite une vive inquiétude, comme l'indique la direction du centre cynégétique de Réghaïa. La principale entrave à la préservation du site demeure la pollution persistante des oueds d'El Biar et de Réghaïa, chargés en eaux usées et en éléments chimiques (Lila Soltani, 2014).

La croissance démographique et le développement urbain : une pression forte sur le territoire du projet de réserve et ses environs immédiats. Rejets des activités industrielles : Diverses sources de pollution liées à des activités menées à terre. Outre les diverses unités industrielles de la zone, le secteur marin est considéré et également exposé aux pollutions provenant de l'oued El Harrach et celle liée à l'activité du port d'Alger. Les activités industrielles localisées dans la zone industrielle de Réghaïa sont responsables partiellement des pollutions métalliques

enregistrées dans quelques stations de Réghaia. Cette zone industrielle s'étend sur 1000 hectares et regroupe 202 unités industrielles, dont 70% du secteur privé, abritant notamment des géants des industries mécaniques, chimiques et alimentaires comme SNVI, Nizière, Mittal steel, et le lac de Réghaia est aujourd'hui pollué par les rejets industriels et ménagers (Cybergegeo, 2010). Les activités agricoles, du fait de l'utilisation des engrais sont également une source de pollution par les nitrates et les phosphates, le lac Réghaia devient lui-même une source de pollution pour la partie marine attenante car charriant une charge de pollution métallique et organique directement en mer via le chenal qui le relie à celle-ci. Pêche sur les petits fonds, non-respect des tailles marchandes des espèces de poissons, pêche non conventionnelles et utilisation de techniques de pêche non sélectives. Prolifération de l'habitat précaire entraînant des dégradations des zones patrimoniales.

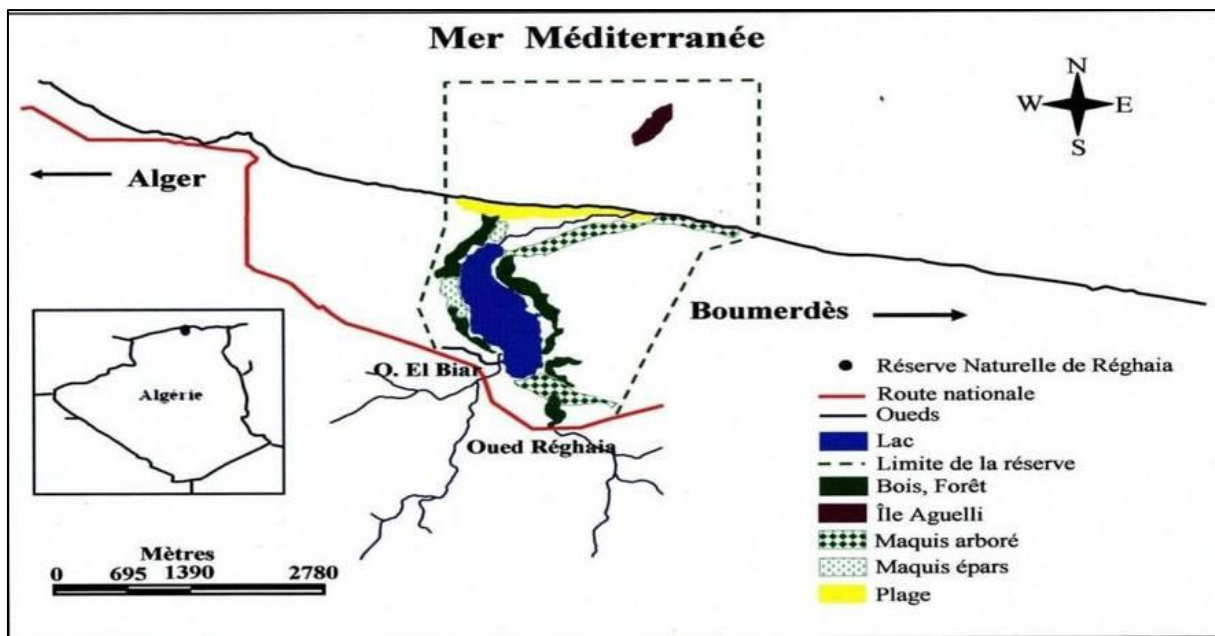


Figure 9: carte de situation géographique et délimitation de la réserve naturelle (élaborée à partir de la carte topographique 1/25000. Larid,2008).

1.2 Les contraintes et risques côtiers :

Le littoral subit des contraintes liées aux changements climatiques qui se présentent par les risques côtiers, ce qui le rend vulnérable.

Le risque côtier : est défini comme la perte possible (de vies, dommages économiques et physiques, dégradation de l'environnement) pouvant être provoquée par certains aléas naturels ou humains dans une région littorale lors d'une période spécifique. La gravité de ces risques potentiels dépend des enjeux pouvant être affectés, de leur degré de vulnérabilité et de leur

exposition à l'aléa (Cour de Gestion et intégration des zones côtières sur la gestion des risques côtiers)

L'aléa : évènement d'origine naturelle ou humaine potentiellement dangereux dont on essaie d'estimer l'intensité et la probabilité d'occurrence par l'étude des périodes de retour ou des prédispositions du site (Garry et al., 1997).

Les enjeux : représentent la valeur humaines, économique ou environnementale des éléments exposés à l'aléa, ils constituent ce que l'on risque de perdre et rassemblent à la fois les biens et les personnes (Garry et al., 1997 ; D'Ercole et Metzger, 2011). Le risque résulte de la combinaison d'un ou de plusieurs aléas d'un niveau donné avec les enjeux, c'est l'exposition des enjeux aux .

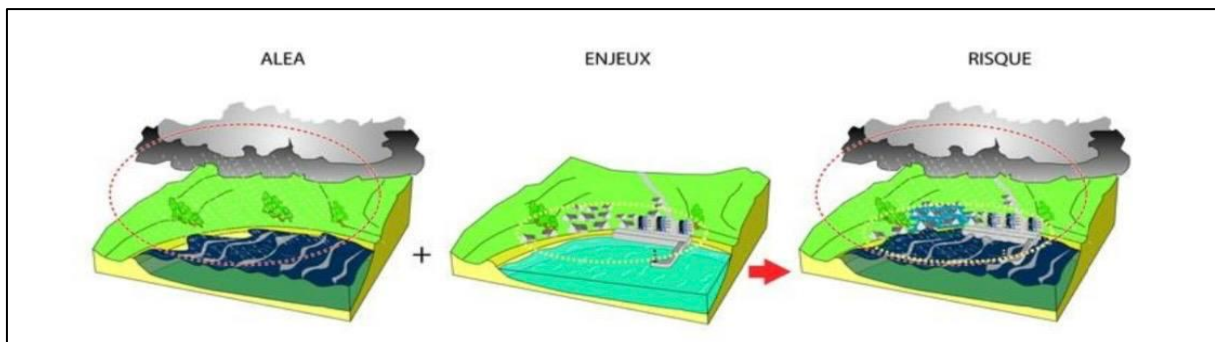


Figure 10: Aléas, enjeux et risques (Hénaff, 2014)

Erosion : L'érosion côtière correspond au recul du trait de côte résultant de l'ablation de matière par l'action des agents marins (vagues, courants, marées) et météoriques (Sunamura, 1992). Ce processus naturel s'exprime différemment selon la nature des formations littorales :

- Érosion des falaises : sapement basal par les vagues et éboulements
- Érosion des plages : déficit sédimentaire et transport vers le large
- Érosion des dunes : déflation éolienne et attaque marine directe

Facteurs de contrôle

L'intensité de l'érosion dépend de plusieurs facteurs (Bird, 2008) :

- Facteurs hydrodynamiques : énergie des vagues, orientation des houles, amplitude des marées
- Facteurs géologiques : résistance des roches, fracturation, disposition des couches
- Facteurs morphologiques : pente, exposition, géométrie du rivage

- Facteurs anthropiques : aménagements, extractions de matériaux, modifications du bassin versant

La submersion marine : elle désigne l'invasion temporaire de zones côtières par les eaux marines lors d'événements météo-marins exceptionnels (Pirazzoli, 2000). Elle résulte de la combinaison de plusieurs facteurs :

- Surcote météorologique : élévation du niveau marin due à la dépression atmosphérique et au vent
- Marée astronomique : cycle naturel des marées
- Vagues de tempête : déferlement et franchissement des ouvrages de protection

Trois types principaux de submersion peuvent être distingués (Garcin et al., 2008) :

- Submersion par débordement : dépassement de la cote de crête des ouvrages
- Submersion par franchissement : projections d'eau par-dessus les ouvrages
- Submersion par rupture : destruction des ouvrages de protection

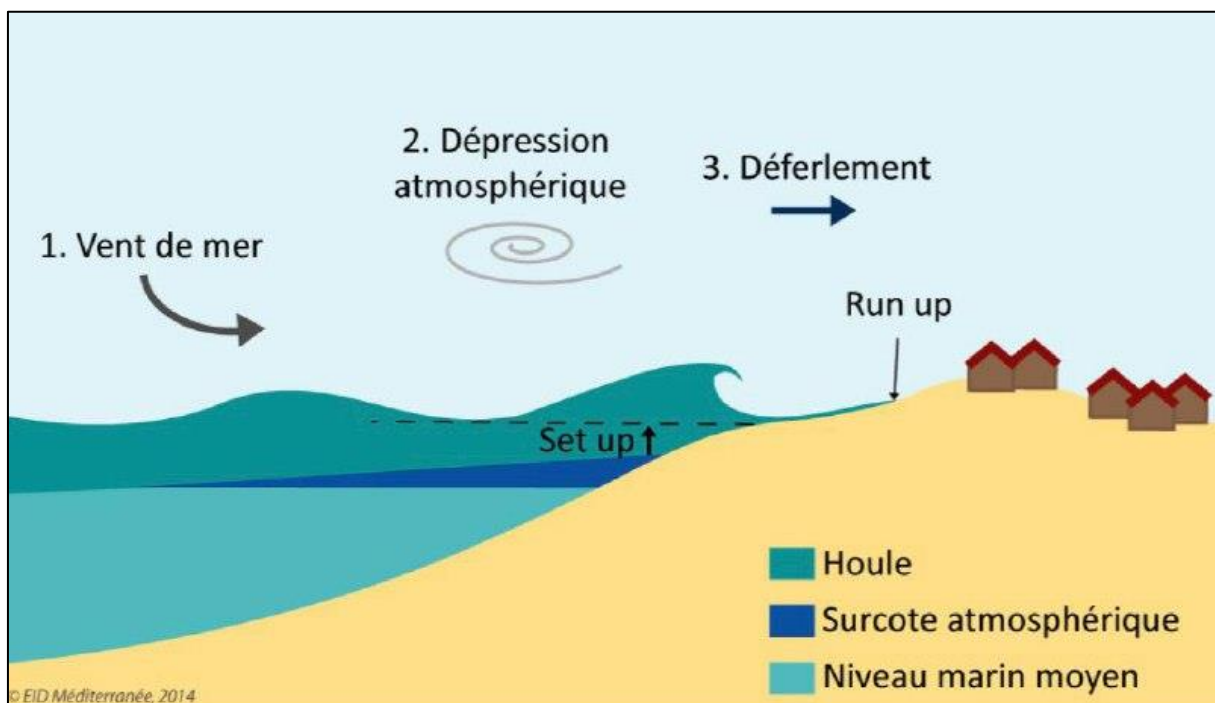


Figure 11 : schéma des principaux mécanismes intervenant au cours d'une tempête (EID Méditerranée, 2014).

Intrusion saline : elle désigne la pénétration d'eau salée dans les nappes phréatiques continentales, affectant la ressource en eau douce et les sols (Custodio, 2010). Ce processus résulte de :

- L'intrusion saline naturelle dans les aquifères côtiers
- La remontée de biseau salé due aux pompages excessifs
- Les projections d'embruns salés

Les risques anthropiques

→ Artificialisation du littoral

L'artificialisation correspond à la transformation des espaces naturels par l'urbanisation et les aménagements, entraînant (Miossec, 2004) :

- La perturbation des processus naturels
- L'augmentation de la vulnérabilité aux aléas
- La perte de biodiversité

→ Changement Climatique

Le changement climatique amplifie les contraintes littorales par (**IPCC, 2019**) :

- L'élévation du niveau marin
- L'intensification des événements extrêmes
- La modification des régimes de houles et de vents

1.3 Etat actuel

Les plages de l'Est d'Alger ont été les plus touchées par la corrosion côtière au cours du dernier demi-siècle. La plage d'El Kadous, pour sa part, a connu plusieurs scénarios en fonction de la période : Un recul du littoral variant de -0,6 à -1,2 m/an (période 1972-1993) et de -0,5 à -2,0 m/an (période 2003-2010) Une augmentation de la sédimentation, avec un taux moyen de progradation (EPR) de 1,13 m/an (période 1993-2003) et de 0,9 m/an (période 2010-2017) (Aoudj et al, 2020). L'érosion côtière résulte de la conjonction de facteurs d'origines naturelles et humaines. (Ifremer, 2013). Les causes naturelles de l'érosion sur la plage d'El Kadous sont principalement dues aux effets répétés et cumulatifs des tempêtes et à l'élévation relative du niveau moyen de la mer et les transports sédimentaires par les courants et les vents. Les

enregistrements des marégraphes indiquent que la mer Méditerranée s'est élevée à un rythme compris entre 1,2 et 1,5 mm par an au cours du siècle dernier, ce qui a entraîné la perte d'habitat pour de nombreux écosystèmes (Haddad, 2017 : Madelenat, 2019 : Otmani et al., 2019 : Sallye et al., 2022). Et l'augmentation du nombre de tempêtes enregistrées le long de la côte algérienne. Cette relation illustre une relation de causalité entre les deux phénomènes. En effet, une augmentation des températures maximales entraîne une plus grande évaporation et des processus thermo-convectifs, qui sont accompagnés de tempêtes et de précipitations intenses, favorisant ainsi l'érosion.

Les causes anthropiques de l'érosion côtière peuvent être dues à l'extraction massive, incontrôlée et illégale de minéraux pour le développement urbain dans la wilaya d'Alger depuis les années 1970 (Otmani et al., 2019). Sur la base de nos observations, il est clair que l'élimination du sable directement des plages et du cordon des dunes a eu un impact sérieux sur l'équilibre écosystémique des plages de la côte est de l'Algérie, et en particulier El Kadous (Fig. 21). Khelifi (2008) souligne que l'Ammophilaie est sérieusement menacée sur la côte de l'Algérie en raison de l'empiètement (extraction illégale de sable, développement de parkings et de campings, etc).

Le cordon dunaire d'El kadous est découpé par des formes d'érosion éolienne provoquées par l'action du vent qui se développent vers l'intérieur. Ces formes d'érosion sont marquées par la présence de grands couloirs de déflations. Leurs orientations dépendent de la direction des vents dominants. (BOUNOUA et KACI, 2017).

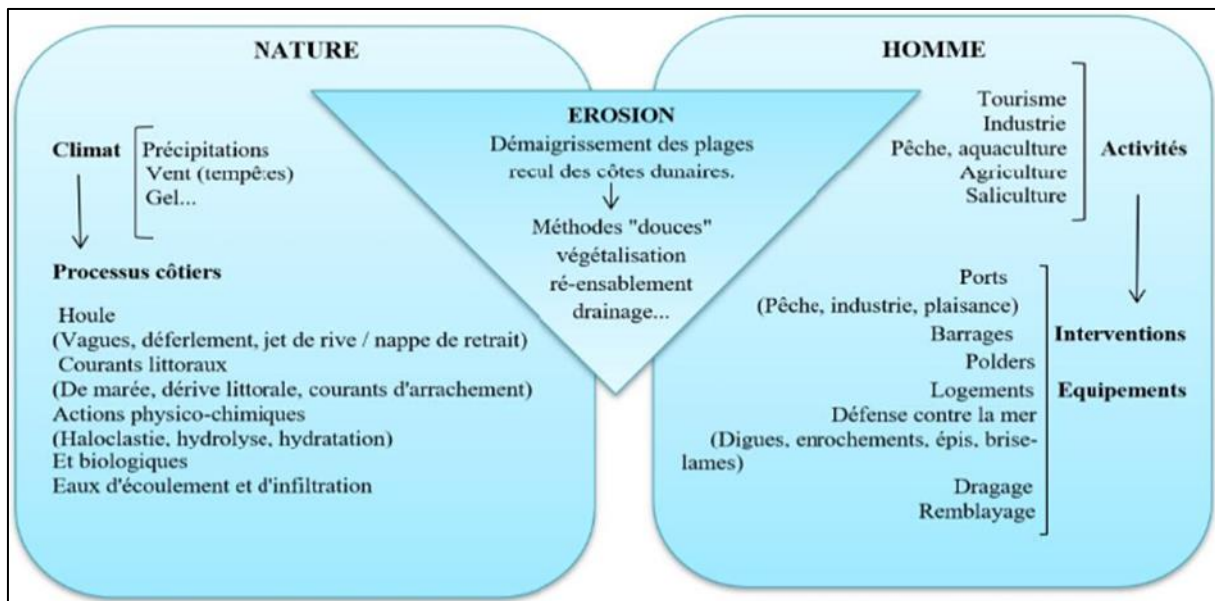


Figure 12 : l'érosion côtière, au croisement de facteurs naturels et anthropiques d'après (Gharbi et Cherbali, 2021).



Figure 13 : Un large couloir de déflation au niveau des dunes d'El Kadous (prise lors de la sortie, 2024)

1.4 Description de la zone d'El kadous :

La dune littorale d'El kadous s'allonge parallèlement au rivage dans le sens presque Est-Ouest en formant une barrière protectrice naturelle entre la plage et le lac lors des tempêtes.

Les dunes d'El kadous subissent une érosion continue, cette érosion est due à une combinaison des facteurs naturels (la houle, le vent, les vagues et les tempêtes) et anthropiques (urbanisation, extraction de matériaux et pressions diverses).

Au niveau de la dune de la plage El kadous, l'usage extensif le plus habituel est le pâturage. Cette pratique peut aboutir à une telle dégradation de la dune, et de telle conséquence pour la

mise en mouvement des sables dunaires ; érosion de la dune et l'envahissement des terres agricoles.

La végétation dunaire est relativement variée. Cependant, la zone subit une dégradation importante due à l'érosion et au recul du trait de côte.

Les dunes d'el kadous abritent des groupements végétaux caractéristiques des milieux sableux littoraux, adaptés aux conditions de salinité, de vent et de l'instabilité du substrat.

Les espèces les plus représentatives sont :

Ammophila arenaria (oyat) : une herbe cruciale pour la stabilisation des dunes.

Pancratium maritimum (lys de mer) : plante vivace à grande fleurs blanches

Lotus creticus.

Chamaerops humilis.

Elymus farctus (chiendent des sables).

Le lac de Réghaia est une ancienne lagune côtière dont l'embouchure est barrée par un cordon dunaire constitué par les dunes d'El kadous. Ces dunes forment une barrière naturelle qui sépare le lac de la mer méditerranée, isolant ainsi ce plan d'eau du milieu marin.

Les dunes d'El kadous jouent un rôle dans la formation, la conservation et la dynamique hydrologique et écologique du lac. Elles participent à la protection de ce site humide.

Les débits sédimentaires des dunes d'El Kadous diminuent principalement en raison de la réduction des apports solides des oueds locaux, conséquence des activités humaines et des changements environnementaux. Cette baisse entraîne une érosion progressive du cordon dunaire. (Benabdi M. et Bachetarzi R, 2015).



Figure 14 : Ecosystèmes dunaires

1.5 Localisation du site :

1.5.1 Localisation administrative :

La zone d'étude se situe dans la région de Reghaia, commune de Heraoua (wilaya d'Alger), située à environ 1.5 km au large de la cote d'Ain Taya et près de l'île de Bountah, située à environ 30 km à l'Est d'Alger, et a 14 km de la ville de Boumerdes. Elle s'étend sur une longueur de 1850 mètres et une largeur de 50 mètres le long du littoral.

1.5.2 Localisation géographique :

La plage d'El kadous est délimitée à l'Est par l'embouchure de l'Oued de Réghaia (commune de Réghaia) à l'Ouest par les falaises de Surcouf (commune d'Ain Taya), au Nord par la Méditerranée et au Sud par le lac de Réghaia.

Elle se situe entre 3°18'30'' et 3°21'30'' Est et 36°45' et 36°48' Nord.



Figure 15 : carte de situation géographique de la zone d'étude

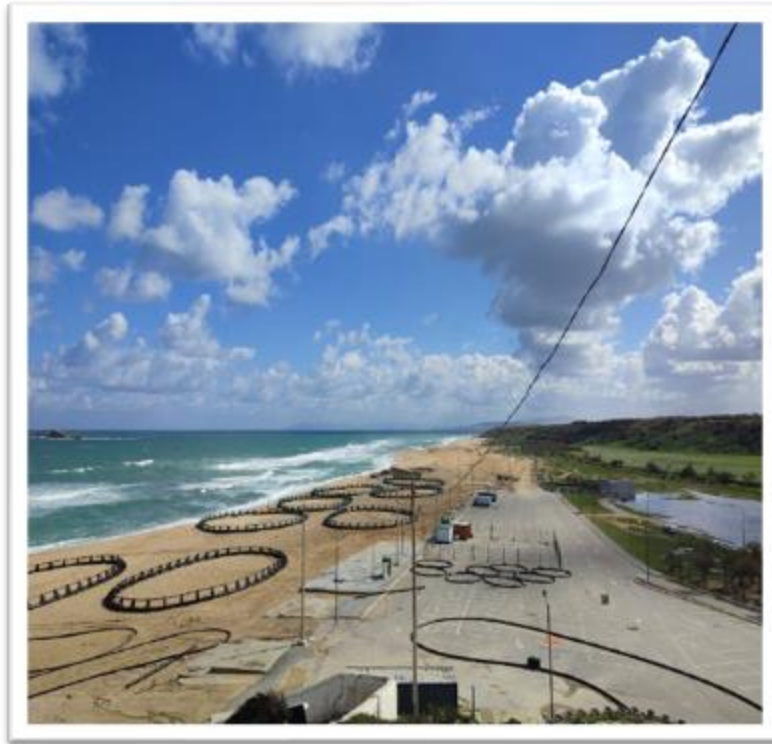


Figure 16 : Plage El Kadous prise lors de la sortie 2024.

La zone d'étude s'étend sur environ 3 km de façade maritime, comprenant deux plages autorisées à la baignade : El Kadous et Réghaia. Cette portion littorale est délimitée à l'est par la plage de Boudouaou El Bahri et à l'ouest par celle de Tarfaya.

À dominante sableuse, ces plages se présentent comme des zones ouvertes et rectilignes, orientées selon un axe nord-ouest / sud-est. Elles se distinguent également par la présence marquée du cordon dunaire d'El Kadous en arrière-plage.

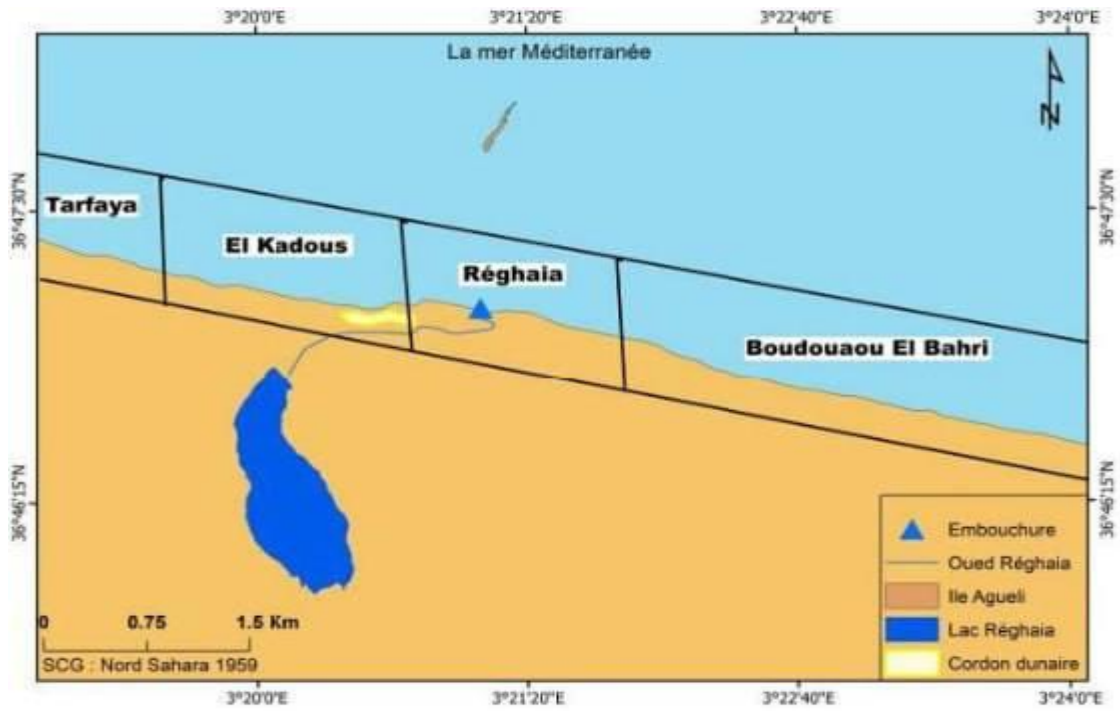


Figure 17 : Localisation des plages sableuses dans la zone d'étude (Bellabed,2020).

Chapitre II :

Diagnostic physique

2 Chapitre II : Diagnostic physique

2.1 Etude climatique :

2.1.1 Les vents

Le vent joue un rôle essentiel dans l'évolution du trait de côte ainsi que dans les phénomènes d'érosion et de submersion marine. Il intervient dans le transport sédimentaire, la reconstitution des dunes, la salinisation des sols et influe sur la biodiversité. Malgré son potentiel énergétique renouvelable considérable, le vent peut causer des dégradations importantes aux ouvrages et équipements, tout en perturbant diverses activités humaines. **(Buchou, 2019).**

Selon les données obtenues du wave Climate entre 1992 et 2022, sur l'ensemble de l'année, les vents dominants proviennent majoritairement du Est Nord-Est (13.26 %), suivis de l'ouest Sud-Ouest (10.98 %) et de l'Est (10.71 %). Cela reflète un régime de vent influencé par des conditions anticycloniques fréquentes, favorisant des circulations de nord-est, ainsi qu'une contribution régulière des flux d'ouest. Les vents de sud sont très peu fréquents tout au long de l'année.

Durant l'hiver, les vents du Ouest Sud-Ouest prennent leur place dominante (16.39 %), suivis de l'ouest (13.30 %) et du Sud-Ouest (10.42 %).

Printemps : l'analyse de la rose des vents révèle la prédominance de deux secteurs : l'Est Nord-Est avec un pourcentage de temps d'environ 13.02% et c'est la direction la plus fréquente de provenance du vent caractérisée par le pourcentage le plus important ; le Ouest Sud-Ouest, avec un faible pourcentage de 11.44%. Cependant, il est observable qu'une variation des vitesses du vent est globalement répartie de manière équitable, ce qui montre que pendant cette période, le régime des vents est dépourvu d'événements extrêmes.

Été : l'analyse de la rose des vents estivaux montre que la direction dominante est celle du secteur Est Nord-Est, avec un pourcentage de 23.02%, et l'Est représente une fréquence de 17% durant cette saison.

Automne : l'analyse de la rose des vents révèle la présence de deux directions dominantes : le Ouest Sud-Ouest avec un pourcentage de 12%, et l'Est Nord-Est avec un pourcentage de 10.76%.

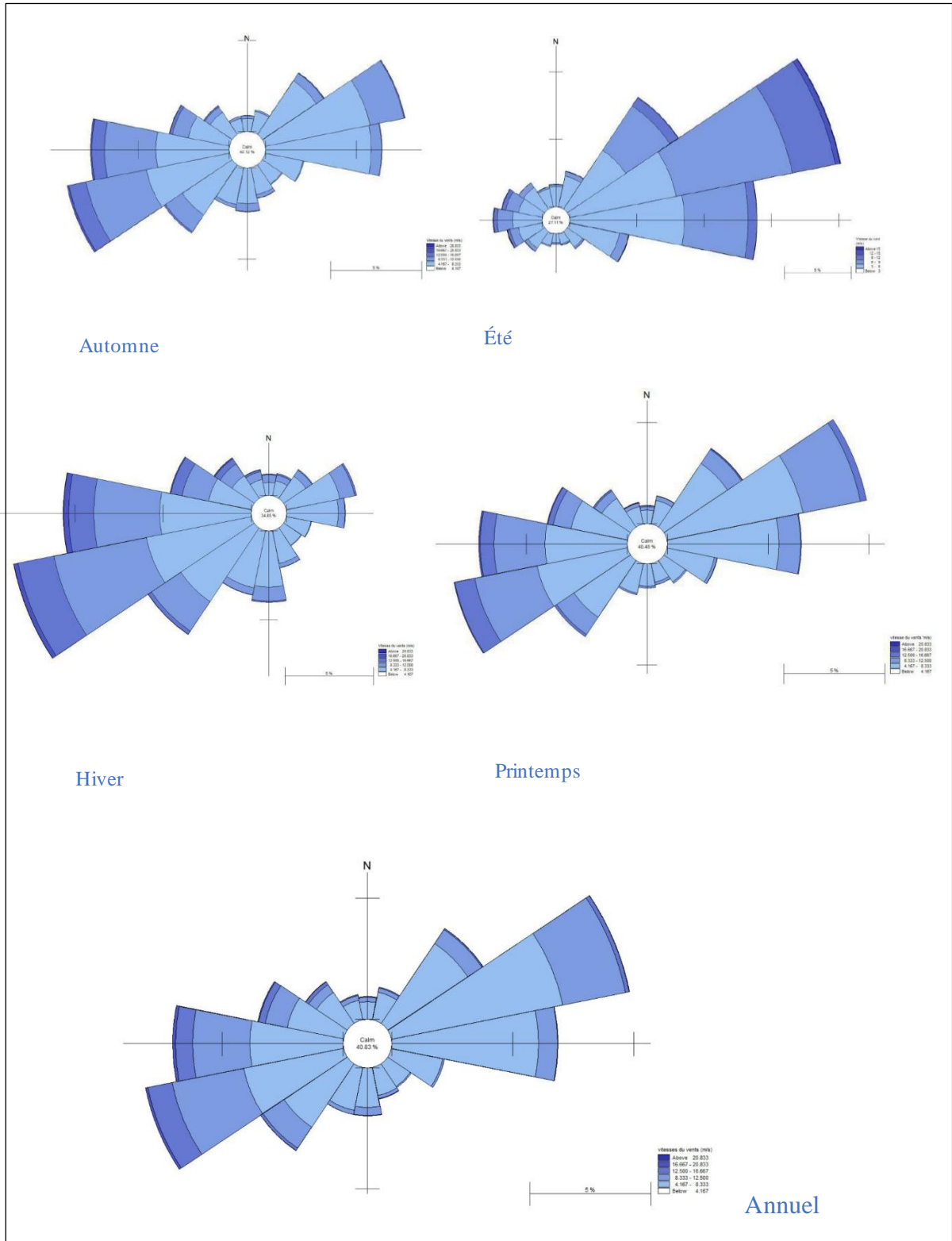


Figure 18 : Roses des vents saisonniers et annuels de la plage d'El kadous (WaveClimate , 2022).

2.1.2 Les Température

2.1.2.1 Variations mensuelles

La zone d'El kadous est régie par un climat méditerranéen humide : hivers froids et pluvieux, étés chauds et secs, caractéristique des régions méditerranéennes.

Variations mensuelles :

Mois les plus froids : Janvier et février sont les mois les plus froids, avec des températures moyennes autour de 14-16°C, des minimales proches de 12°C, et des maximales autour de 16-17°C.

Progression printanière : De mars à mai, les températures augmentent progressivement. En mai, la température moyenne atteint 21°C, avec des maximales à 23,9°C et des minimales à 18,1°C.

Mois les plus chauds :

Juillet et août sont les mois les plus chauds :

- En juillet, la température moyenne atteint 29°C, la maximale 32,7°C, et la minimale 25,6°C.
- En août, la moyenne est de 29,6°C, la maximale 32,6°C, et la minimale 26,4°C.

Refroidissement progressif : De septembre à décembre, les températures baissent progressivement. En décembre, la température moyenne redescend à 16°C, la maximale à 18,5°C, et la minimale à 13,4°C.

Variations saisonnières :

→ Hiver

- Températures moyennes : 15-17°C
- Minimales absolues : 10-12°C
- Maximales : 16-19°C
- Amplitude thermique journalière : 6-7°C
- Phase thermique la plus stable de l'année

→ Printemps

- Gradient thermique progressif : $+2^{\circ}\text{C}$ par mois en moyenne
- Mars : transition (17°C), Avril : réchauffement (19°C), Mai : pré-estival (25°C)
- Amplitude thermique maximale de l'année : $8-9^{\circ}\text{C}$
- Accélération du réchauffement en fin de période

→ Été

- Maximum thermique annuel : $29-30^{\circ}\text{C}$ en juillet-août
- Minimales élevées : $22-27^{\circ}\text{C}$ (effet d'îlot de chaleur nocturne)
- Maximales : $32-33^{\circ}\text{C}$
- Amplitude réduite : $5-7^{\circ}\text{C}$ (persistance de la chaleur)

→ Automne

- Décroissance thermique non-linéaire
- Septembre : maintien estival (29°C)
- Octobre : rupture thermique (-4°C)
- Novembre : retour aux valeurs printanières (20°C)

→ Caractéristiques thermodynamiques

- Inertie thermique : Décalage entre solstices et extrema (juillet-août $>$ juin)
- Continentalité modérée : Amplitude annuelle de 15°C (15°C hiver - 30°C été)

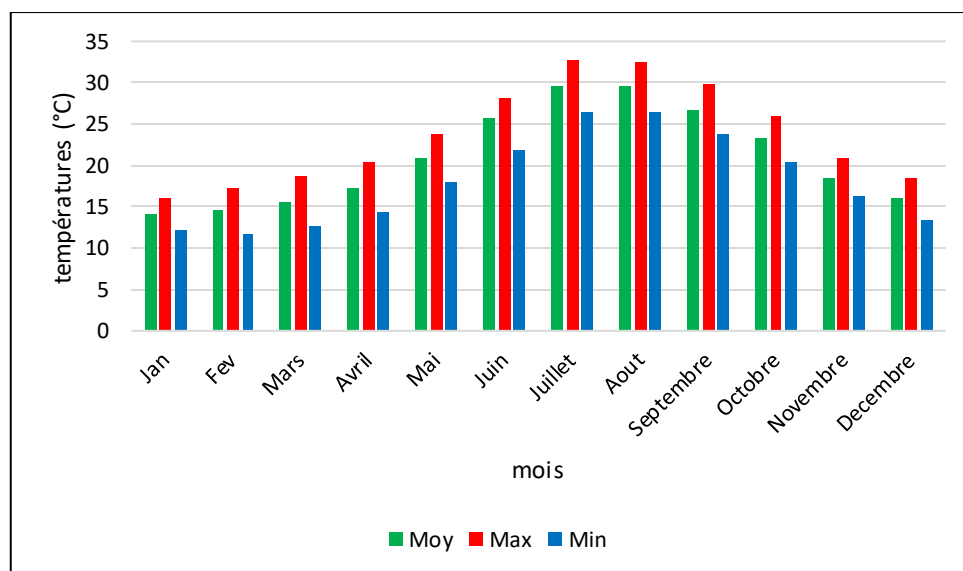


Figure 19 : les variations mensuelles des températures dans la région d'El Kadous (source :

<https://www.historique-meteo.net/>).

2.1.2.2 Variations annuelles

Les températures moyennes annuelles dans la région d'El Kadous montrent une tendance globale à la hausse entre 2015 et 2024, avec une augmentation d'environ 1°C sur la période (de

20°C environ en 2015 à 21°C en 2024). Cette hausse est également visible sur les températures maximales et minimales annuelles, qui augmentent respectivement d'environ 1 à 2°C et 1°C environ.

→ Hausses de température

Les années où la température moyenne annuelle augmente nettement (ex : 2019-2020, 2021-2022) peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs liés au changement climatique global. Le réchauffement climatique induit une augmentation progressive des températures moyennes, notamment à cause de l'effet de serre renforcé par les émissions de gaz à effet de serre (GES).

De plus, des phénomènes météorologiques locaux comme la prédominance de vents chauds venant du sud peuvent accentuer les températures annuelles, comme observé dans certaines années récentes où les vents de sud ont contribué à des anomalies thermiques significatives.

Par ailleurs, la région méditerranéenne, dont fait partie El Kadous, est particulièrement sensible au réchauffement, notamment en raison de la hausse des températures de surface de la mer Méditerranée qui influence le climat local.

→ Baisse ou stabilisations ponctuelles

Certaines années montrent une légère baisse ou stabilisation des températures moyennes annuelles (ex : 2017-2018, 2023-2024). Ces variations peuvent être attribuées à des phénomènes météorologiques temporaires, comme l'influence de masses d'air plus froides ou des précipitations plus importantes qui ont un effet rafraîchissant sur la région.

Par exemple, une année avec des précipitations plus élevées peut entraîner un effet de refroidissement par évaporation et couverture nuageuse, réduisant ainsi la température moyenne annuelle.

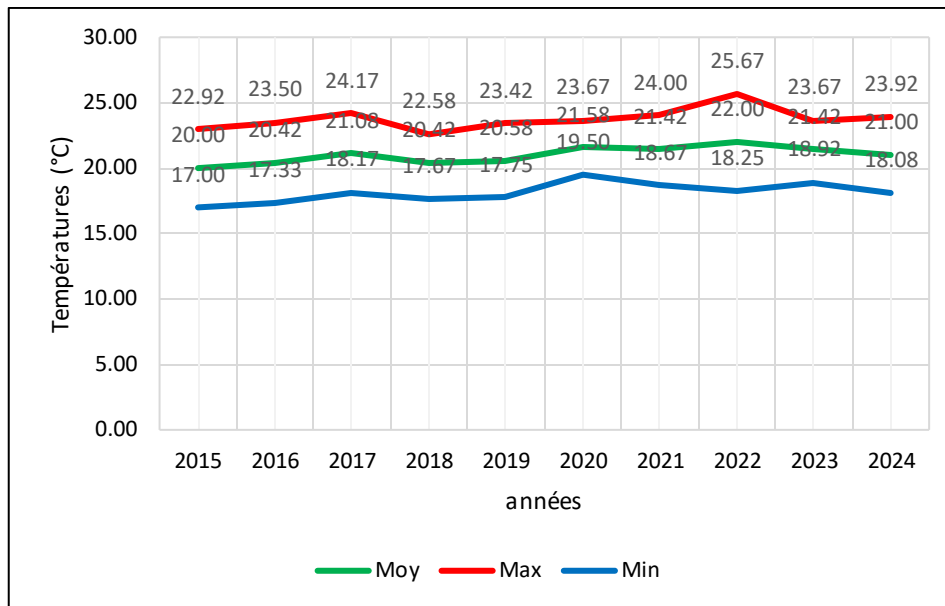


Figure 20 : les variations annuelles des températures dans la régions d'el kadous (source : <https://www.historique-meteo.net/>).

2.1.3 Les précipitations :

2.1.3.1 Variations mensuelles

Variations mensuelles :

- Les précipitations sont les plus élevées en novembre (96,5 mm), janvier (91,8 mm), mars (90,4 mm) et avril (73,2 mm).
- Les mois les plus secs sont juillet (3,7 mm) et août (7,8 mm), suivis de juin (20,6 mm) et septembre (34 mm).
- On observe une baisse progressive des précipitations du printemps (avril-mai) vers l'été, avec un minimum en juillet, puis une remontée à partir de septembre.

Variations saisonnières :

- Hiver (décembre, janvier, février) : Période très humide, avec des précipitations élevées (décembre : 72,8 mm ; janvier : 91,8 mm ; février : 61,1 mm).
- Printemps (mars, avril, mai) : Toujours humide, mais avec une tendance à la baisse (mars : 90,4 mm ; avril : 73,2 mm ; mai : 42,5 mm).
- Été (juin, juillet, août) : Saison sèche, précipitations très faibles (juin : 20,6 mm ; juillet : 3,7 mm ; août : 7,8 mm).
- Automne (septembre, octobre, novembre) : Retour progressif des pluies, culminant en novembre (septembre : 34 mm ; octobre : 55,6 mm ; novembre : 96,5 mm).

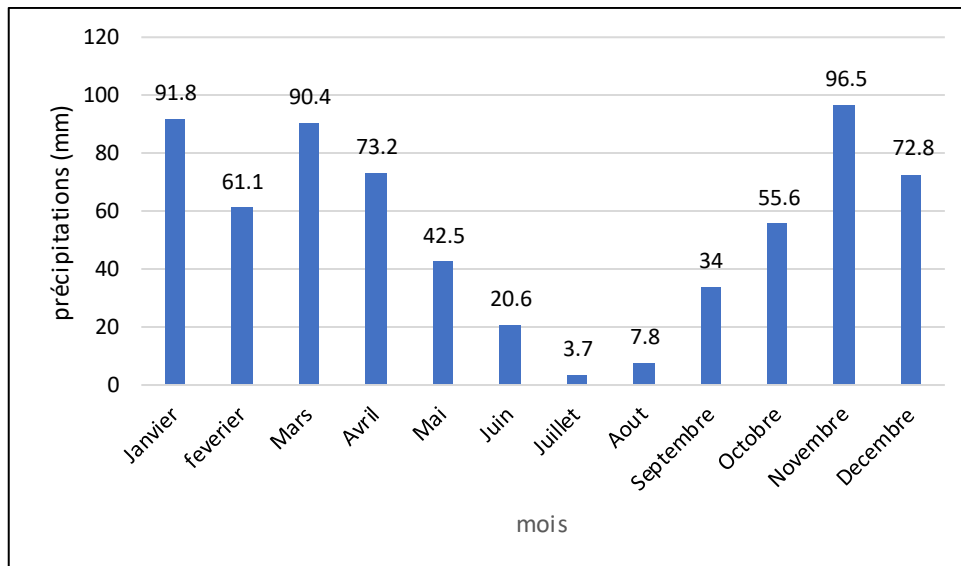


Figure 21 : Les variations mensuelles moyennes des précipitations dans la région d'El kadous (source : <https://www.historique-meteo.net/>).

2.1.3.2 Variations annuelles

Le figure ci-dessous montre l'évolution des précipitations moyennes annuelles à El kadous de 2014 à 2025, exprimées en millimètres.

- 2014-2018 : Période relativement stable, avec des précipitations variantes entre 74 et 98 mm L'année 2018 se distingue par un pic notable à 98,42 mm
- 2018-2022 : Forte chute des précipitations, qui passent brutalement de 98,42 mm en 2018 à seulement 11,92 mm en 2022, soit une diminution de près de 85 %.
- 2022-2025 : Les précipitations se stabilisent, mais à un niveau extrêmement bas, autour de 13 à 14 mm par an.

Cette évolution traduit un processus d'aridification marqué, voire une sécheresse persistante dans la région. La baisse drastique des précipitations pourrait indiquer :

1. Un changement climatique local prononcé
2. Une avancée potentielle de la désertification
3. De lourdes conséquences sur l'agriculture, la disponibilité en eau et les écosystèmes locaux.

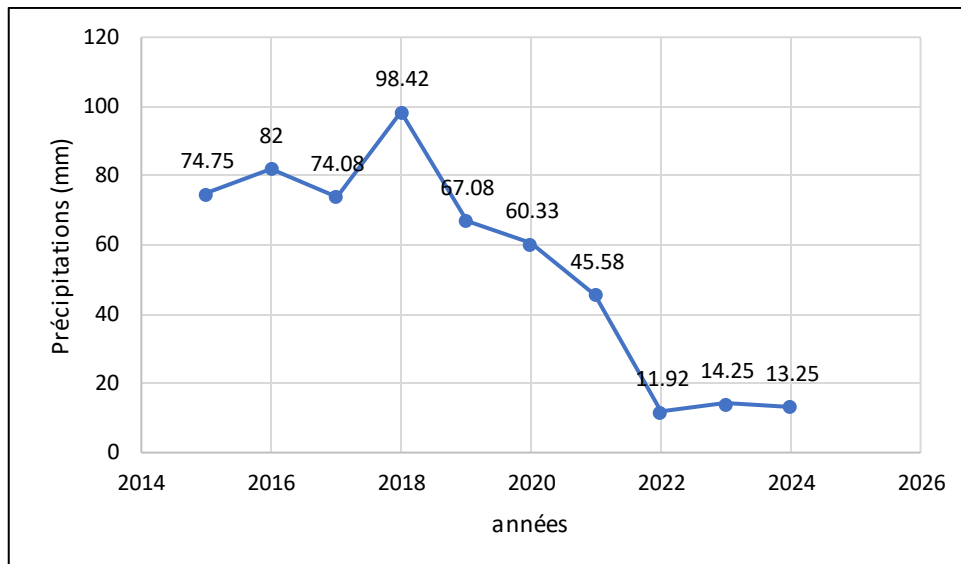


Figure 22 : Les variations annuelle des précipitations dans la region d'El kadous (source : <https://www.historique-meteo.net/>).

2.2 Etude océanographique :

2.2.1 Les houles :

Pour mieux cerner l'influence des différentes variables sur le climat de la houle au large de la zone d'étude, la figure présente un corrélogramme intégrant les directions dominantes et les hauteurs des houles. Cette représentation offre une meilleure compréhension du régime de houle au large.

Après l'analyse de la rose des **houles annuelles** (Figure 23), il a été observé que le Nord-Est est la direction la plus dominante représentant une fréquence 18.12%.

Automne : D'après la rose des houles automnales, une dominance de deux directions avec des intensités différentes est constatée, le Nord Est avec une fréquence de 18.47% et l'Ouest avec un pourcentage d'apparition de 18.86%.

Hiver : Après l'analyse de la rose des houles hivernales, à constater que deux secteurs sont prédominants, mais avec des intensités différentes. Le secteur le plus dominant est le Ouest avec une fréquence de 21.28%. Ensuite, c'est le Nord Nord -Est qui domine.

Printemps : Après l'analyse de la rose des houles printanières, il est à observer deux secteurs prédominants : le Ouest, avec une fréquence de 20.11% des houles enregistrées en printemps et le Nord Est représentant près de 18.54%.

Été : Après l'analyse de la rose des houles estivale, il est observable que deux directions dominantes avec des intensités différentes : la direction la plus dominante est l'Est Nord-Est avec un pourcentage d'apparition de 33.17%. Ensuite, c'est le Nord Est qui domine.

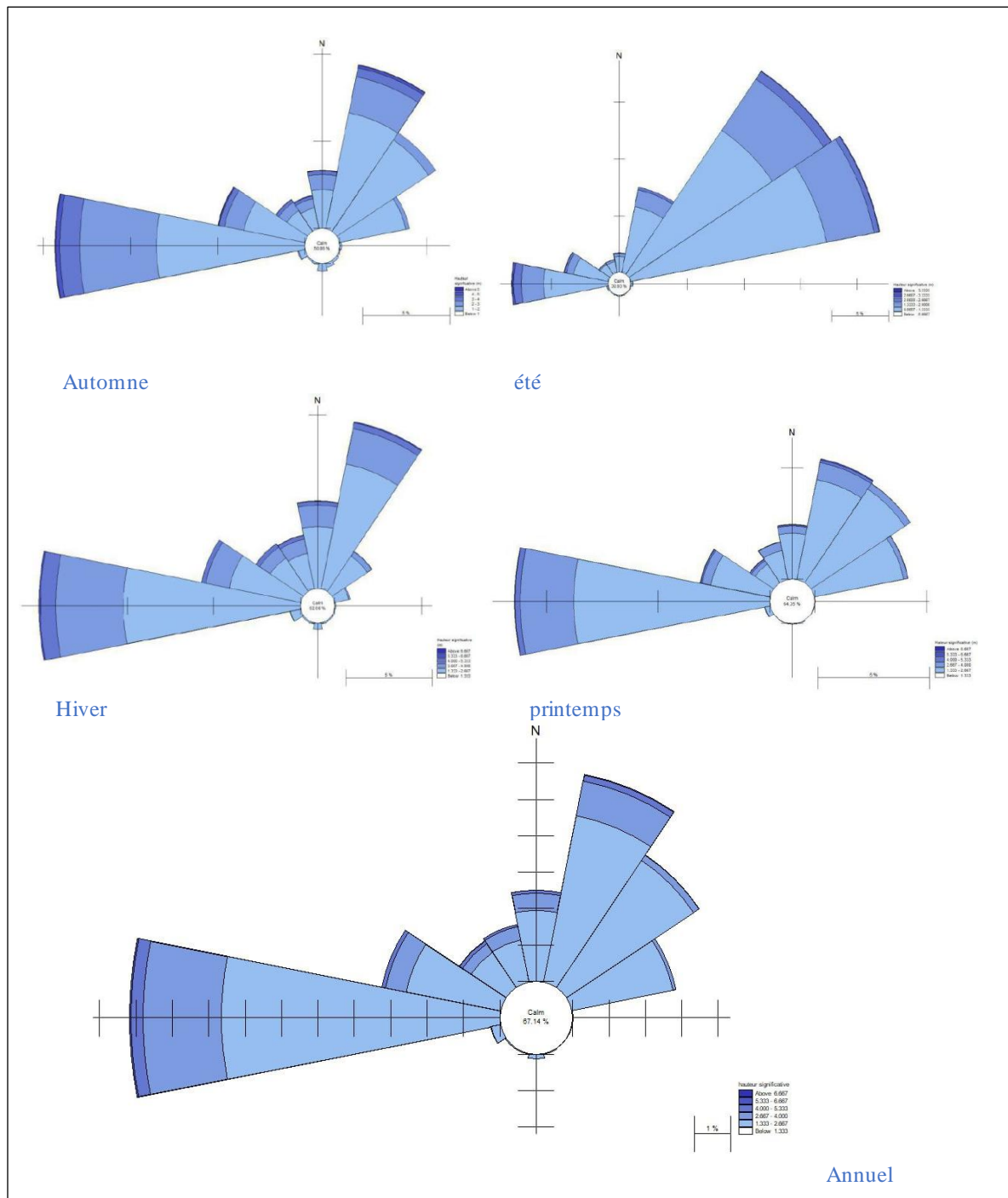


Figure 23 : Les roses des houles saisonniers et annuels de la plage d'El kadous (WaveClimate , 2022).

2.2.2 Les courants :

Dans le but d'avoir une visualisation générale et globale des courants côtiers de la plage d'El kadous, des roses annuelles et saisonnières des courants ont été extraites à partir de la plateforme Puertos Del Estado de 2015 à 2024. d'après la rose des courants au-dessous, il ressort

que durant les 9 ans derniers les directions les plus dominantes sont Est et Est Sud-Est avec des fréquences différentes, 27%, 13% respectivement.

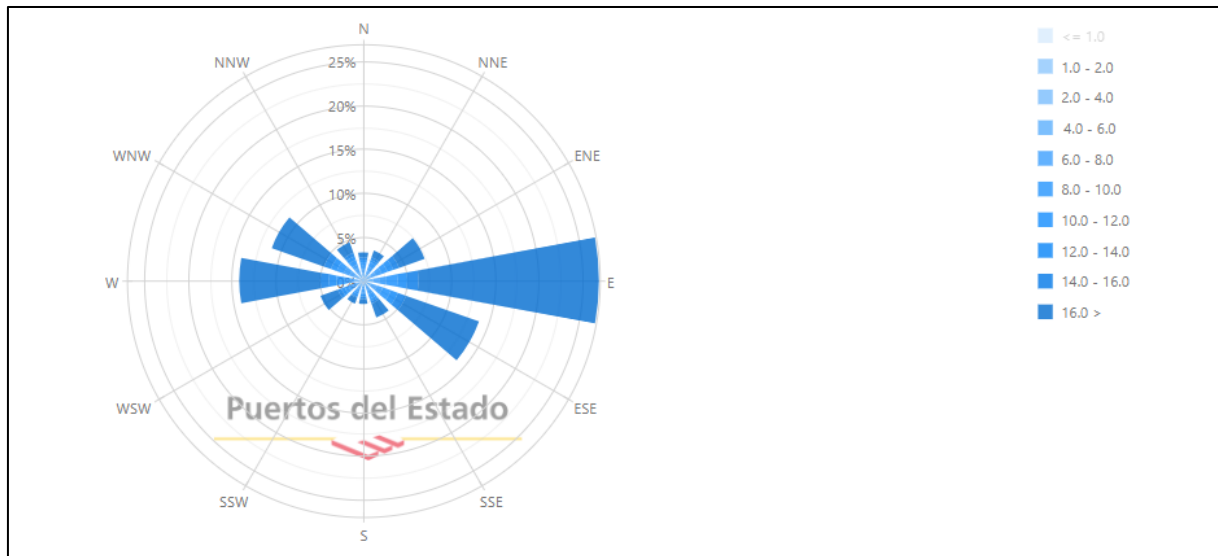


Figure 24 : rose des courants annuels entre 2015 et 2024 (<https://www.puertos.es/>)

Tandis que pour les courants saisonniers :

Hiver : courants dominants orientés vers l'Est avec une fréquence plus haute de 40%.

Printemps : des courants multidirectionnels avec une tendance vers l'Est et Sud-Est avec des fréquences différentes : 30%, 14% respectivement.

Été : courant très marquée vers l'ouest avec une fréquence de 18% et à l'Est 20% r avec une forte concentration directionnelle avec des conditions stables.

Automne : courant dominant vers l'Est et Sud-Est avec des hauteurs assez élevées : 30% et 15% respectivement.

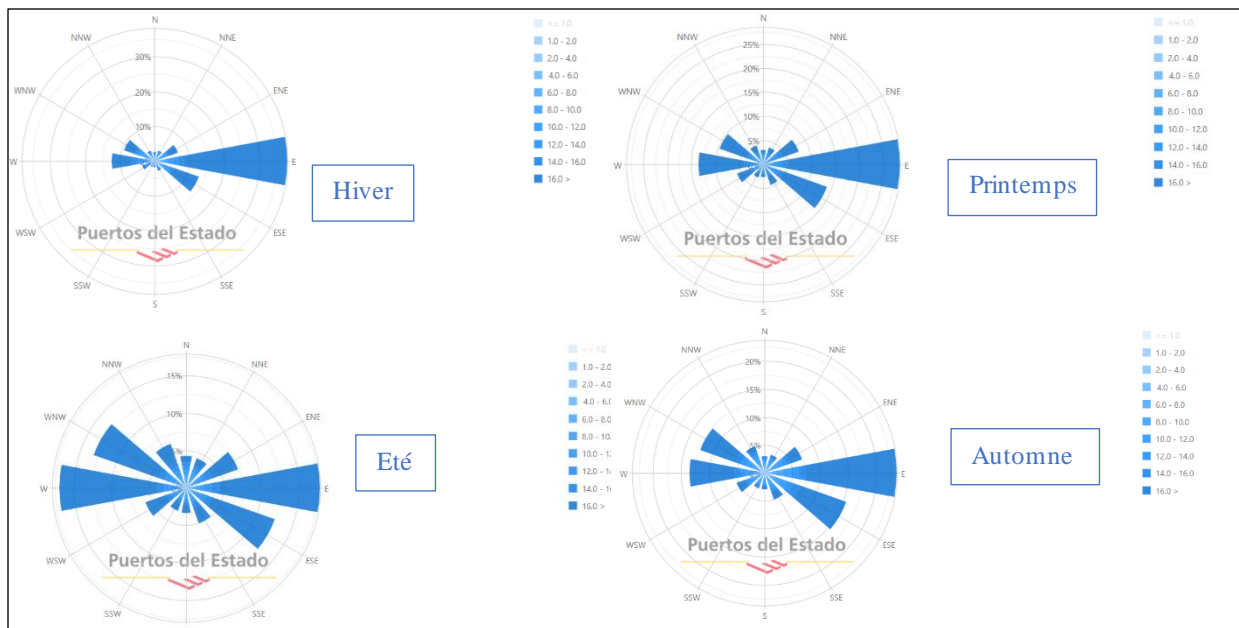


Figure 25 : roses des courants saisonniers entre 2015 et 2024 (<https://www.puertos.es/>)

2.3 Etude hydrographique :

2.3.1 Les source d'alimentation d'eau :

Oued Réghaia : Prend naissance au Nord de la ville de Ouled Moussa, le plan d'eau est situé à 4m au-dessus du niveau de la mer. Il est le plus important avec une longueur de 5500 m et une profondeur égale à 17 m. il est alimenté par deux affluents Oued Guesbai et Oued Berraba, son bassin versant occupe une superficie de 75 km (bellabad,2020), et se jette dans le lac de Réghaia, il est caractérisé par un écoulement permanent avec un débit variable.

Les limites géographiques de ce bassin sont :

- Au nord Par la mer méditerranéenne.
- A l'Ouest par le bassin d'Oued EL Hamiz.
- A l'Est par le bassin d'Oued Boudouaou.

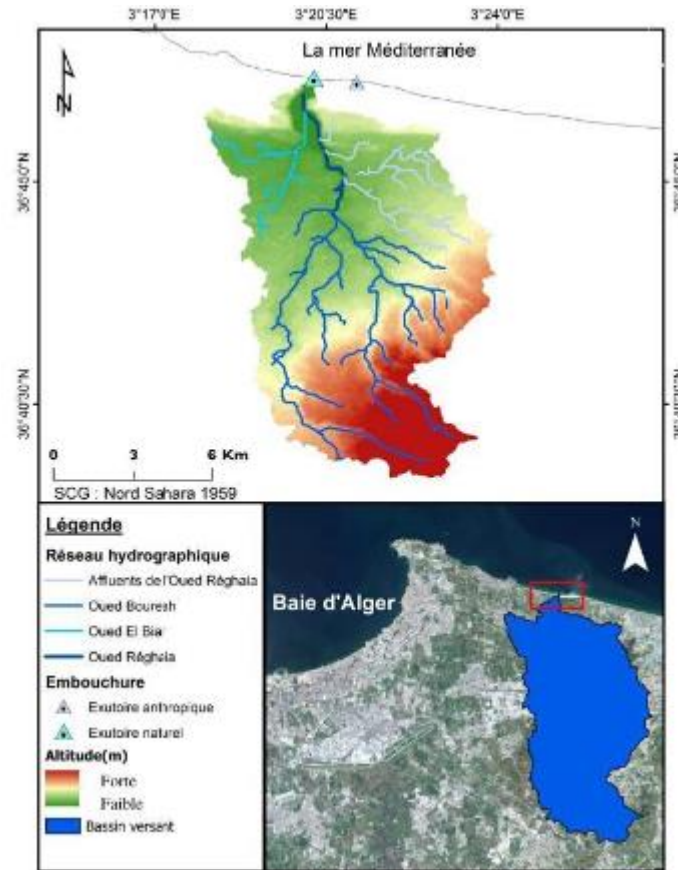


Figure 26 : Réseau hydrographique et délimitation du bassin versant de la zone d'étude(Bellabadi,2020).



Figure 29 : Oued Réghaia photo prise lors de la sortie 2024.

2.3.2 Bassin versant :

Le cordon dunaire d'El Kadous se trouve dans le bassin versant de l'Oued Réghaia. Ce bassin couvre une superficie d'environ 55 km², son principal exutoire est le lac de Réghaia, une zone humide d'importance écologique.

Le bassin subit des pressions anthropiques (pollution, sur exploitation des ressources en eau, artificialisation des sol) et des modifications climatiques (Asal.dz).

Tableau 1 : Caractéristiques principales de la plage d'EL Kadous (Bellabad, 2020).

| Plage d'El kadous | Superficie (km ²) | Longueur (m) | Largeur (m) | Pente | Orientation | Degré d'artérialisation | Présence des ouvrages de protection | Présence de cours d'eau | Nature lithologique de l'arrière plage |
|-------------------|-------------------------------|--------------|-------------|---------|-------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--|
| | 55 | 1700 | 20 à 90 | 3 à 5 % | NW-SE | Faible | Non | Non | Sableuse |

2.4 Etude de l'évolution du trait de côte

2.4.1 Logiciels utilisés

L'analyse de l'évolution du trait de côte requiert une approche numérique, s'appuyant sur des logiciels spécialisés pour traiter les données collectées et ainsi faciliter l'étude.

→ Arc GIS 10.4

Arc GIS est une suite de logiciels de Systèmes d'Information Géographique (SIG) développée par la société américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc). Un SIG est un système informatique intégrant du matériel, des logiciels et des processus, conçu pour collecter, gérer, manipuler, analyser, modéliser et visualiser des données géo référencées. Il permet ainsi de résoudre des problématiques complexes liées à l'aménagement du territoire et à la gestion des ressources (Moussaoui, 2024)

→ Extension DSAS

DSAS 5.0 (Digital Shore line Analysis System) est un plugin développé par l'USGS (United States Geological Survey) disponible gratuitement qui fonctionne au sein du logiciel ArcGIS d'ESRI (Environmental Systems Research Institute). Il calcule les statistiques du taux de changement pour une série chronologique de données vectorielles de traits de côte. Cet outil a été utilisé dans différentes études de mesure et suivi de la dynamique du trait de côte à travers le monde (Thieler and Danforth, 1994 ; Thieler et al., 2009).

→ Principe de fonctionnement du DSAS

L'utilisateur trace une ligne de base servant de référence pour la mesure des distances, à partir de laquelle DSAS génère des transects perpendiculaires à la ligne de base. Les changements du trait de côte sont évalués en mesurant les distances entre la ligne de base (baseline) et les points d'intersection du trait de côte avec chaque transect.

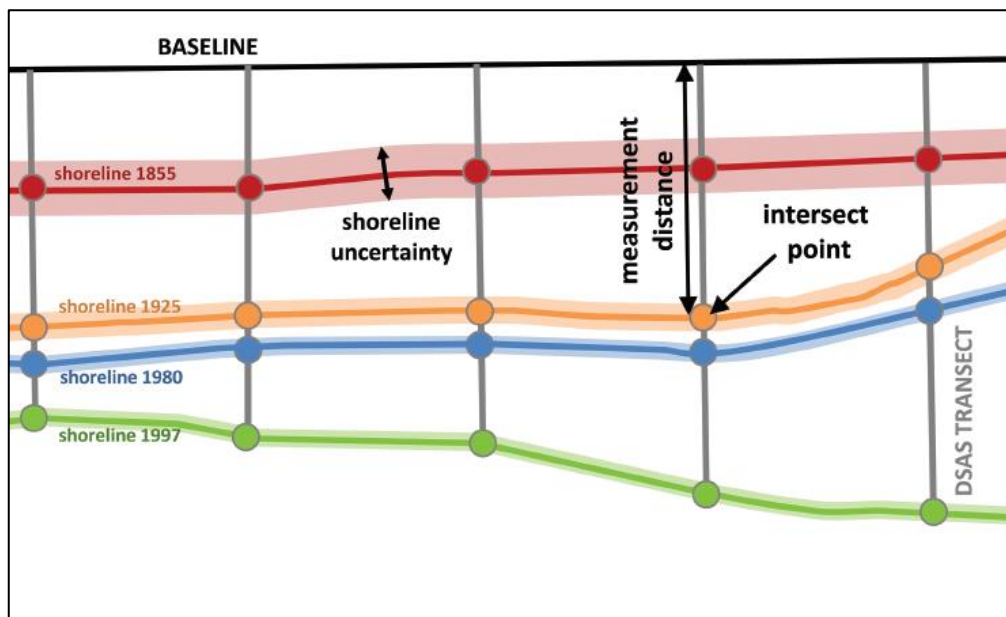


Figure 27 : Principe de fonctionnement du DSAS (U.S. Geological Survey. (2008)).

→ Google Earth Pro

Google Earth Pro est un logiciel conçu par Google qui offre la possibilité d'explorer la planète en 2D et en 3D à partir d'images satellites et de données géographiques. Il permet également l'importation et l'exportation de données SIG (systèmes d'information géographique).

2.4.2 Méthodologie suivie

2.4.2.1 Acquisition de la donnée

Sur Google Earth pro les images les plus claires et les plus exploitables ont été choisies : pas de couverture nuageuse, bonne résolution des images. Pour la plage d'El Kadous les trait cote choisis concernent les années suivantes : 2006 et 2025

La digitalisation des traits de côte est réalisée directement sur Google Earth Pro. Ces traits de côte ont été enregistrés par la suite sous le format KML.

2.4.2.2 Importation des traits de côte sur ArcGIS

Pour pouvoir manipuler sur ArcGIS les traits de côte digitalisés à partir de Google Earth Pro, une conversion du format KML au format Shapefile est indispensable (Arctoolbox >Conversion Tools > KML to layer).

2.4.2.3 Préparation et lancement des calculs sur le DSAS

L'outil DSAS requiert la création manuelle d'une ligne de base, située soit en mer, soit sur la terre ferme. Son utilisation implique également la définition d'un intervalle de positionnement pour les transects, ainsi que la disponibilité de traits de côte dans un système de coordonnées projetées unifié (WGS 1984 UTM zone 31 N).

2.4.2.4 Création de la couche baseline

La ligne de base, utilisée comme référence pour le DSAS, est essentielle à la génération des transects ainsi qu'au calcul statistique de l'évolution du trait de côte. Il s'agit d'une entité linéaire créée manuellement par digitalisation sous ArcGIS.

2.4.2.5 Création des transects

La création de ces transects a été rendue possible grâce à l'outil de dialogue proposé par DSAS. L'espacement entre les transects a été fixé à 10 m pour obtenir 196 transects pour la zone d'El kadous.

2.4.2.6 Lancement des calculs

Les taux de changements du rivage sont calculés en utilisant les paramètres NSM et EPR :

- EPR (End Point Rate) : est un paramètre statistique qui décrit la distance parcourue par les variations du trait de côte (Thieler & al., 2009) : c'est un taux calculé en divisant la distance entre la position du trait de côte initiale et la plus récente par le temps écoulé.
- NSM (Net Shoreline Movement) : traduit la distance entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent (en mètre).

L'avantage principal de ces paramètres est la facilité de calcul et les exigences minimales pour les données d'entrée (deux traits de côte) (To &Thao, 2008).

2.4.2.7 Cartographie des résultats

Deux cartes NSM/EPR ont été créés ainsi que leurs graphes.

2.4.3 Résultats

Deux cartes sont générées à partir d'ArcGIS, l'une pour le NSM l'autre pour l'EPR, afin de mieux comprendre ces tendances des graphes sont générés à partir de ces résultats, comme les montrent les figures ci-dessous.

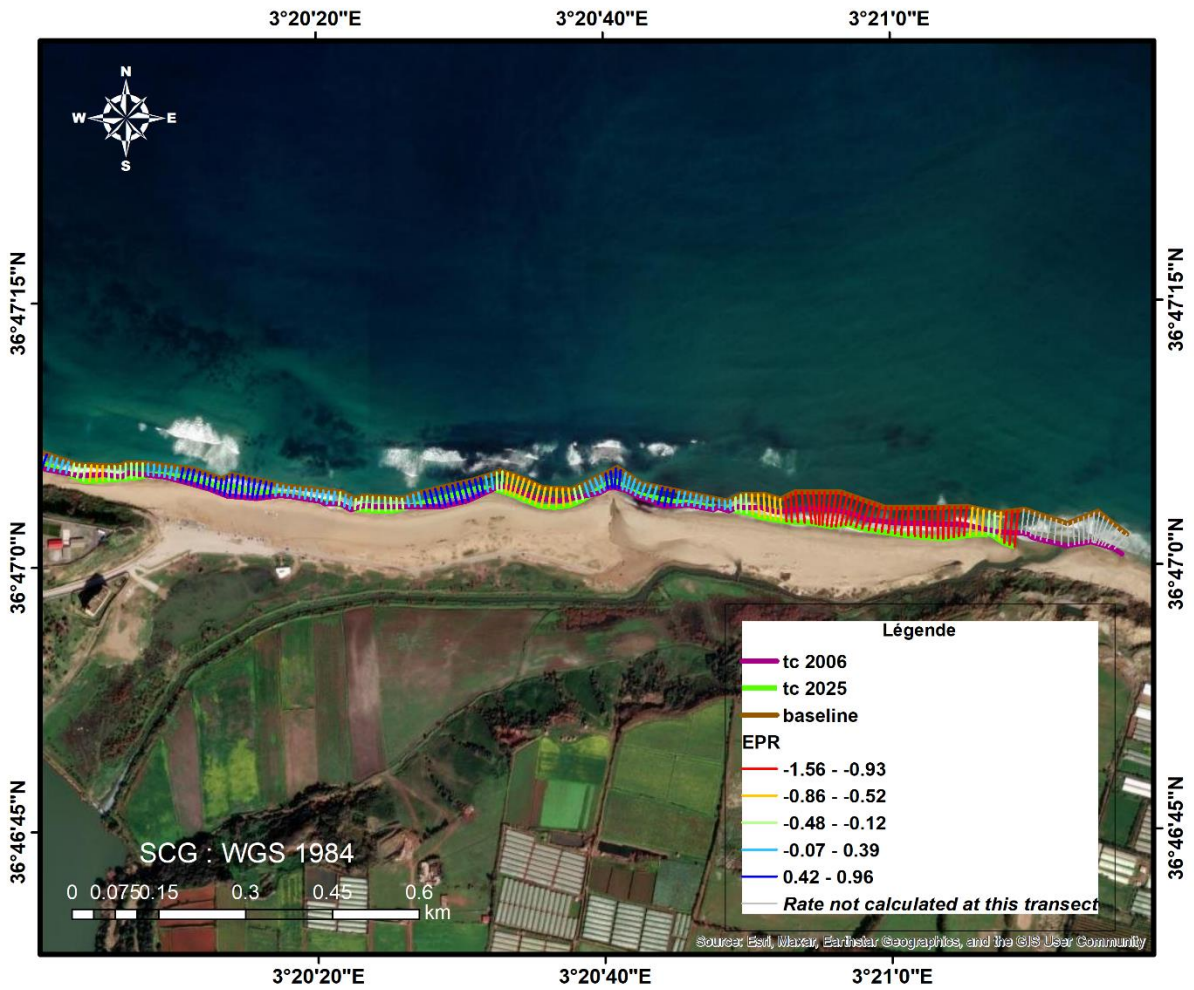


Figure 28 : Résultat cartographique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre EPR entre 2006 et 2025.



Figure 29 : Résultat graphique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre EPR entre 2006 et 2025.



Figure 30 : Résultat cartographique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre NSM entre 2006 et 2025

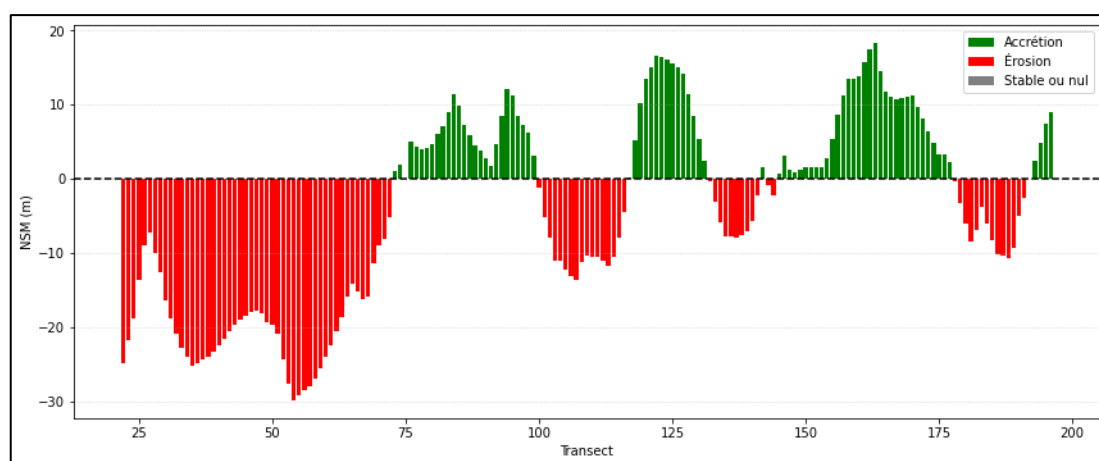


Figure 31 : Résultat graphique de l'état d'érosion et de l'accumulation en utilisant le paramètre NSM entre 2006 et 2025

Afin de connaître les volumes de surface perdus ou gagnés, le graphique ci-dessous est réalisé.

- Surface gagnée : 5956.30 m²

- Surface perdue : 13112.90 m²

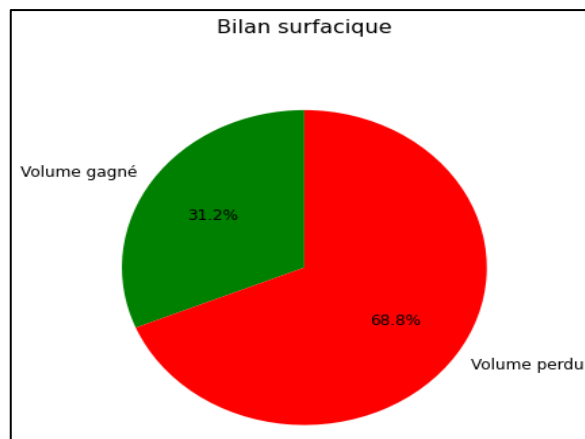


Figure 32 : Résultat graphique du bilan surfacique

2.4.4 Discussion

Une analyse de l'évolution du trait de côte pendant une vingtaine d'années a été faite où les résultats obtenus du NSM et EPR montrent une tendance d'érosion et d'accrétion entre les transects, comme il y a eu des transects où les deux paramètres ne sont pas calculés et cela est dû au fait du changement de l'emplacement de la zone d'embouchure de l'oued, comme il est possible de le constater sur la figure suivante :

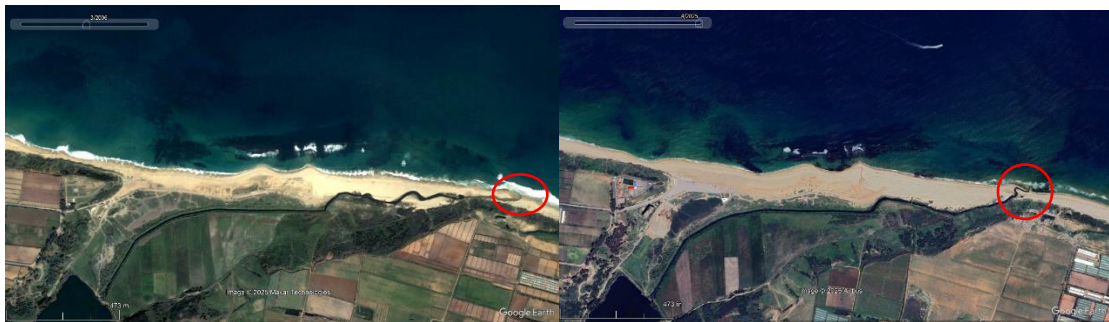


Figure 33 : changement de l'embouchure de l'oued (google earth pro)

Le linéaire perdu de la plage El Kadous à cause du changement de l'embouchure de l'oued Reghaia est de 155m.

Sur la gauche de l'oued, un linéaire de 470m a subi une perte énorme en sédiments calculée à une moyenne de 22m par transect, ce qui peut être dû à une dynamique littorale fortement perturbée, en grande partie due aux interventions anthropiques et aux caractéristiques hydro sédimentaires du système. En période sèche, le lit de l'oued se transforme en dépôt alluvial, et l'exutoire prend la forme d'un lac temporaire qui communique de façon intermittente avec la mer. L'ouverture saisonnière de ce lac, notamment en été, génère un flux brutal de sédiments fins, observé par la coloration jaunâtre de l'eau, traduisant un lessivage important du

bassin versant. Le fonctionnement de l'embouchure, assimilable à un « robinet », engendre une dynamique instable, empêchant toute accumulation sédimentaire durable au niveau du cordon littoral. Avant 2015, la dune littorale, située à l'ancienne embouchure, présentait une morphologie bien arrondie et consolidée, assurant une certaine stabilité. Toutefois, les aménagements récents visant à déplacer artificiellement l'embouchure, afin de gagner des surfaces exploitables à des fins économiques, ont profondément altéré l'équilibre morphodynamique de la zone. Cette perte surfacique est estimée à 68.8% du bilan surfacique.

Bien que le bilan surfacique global de la zone d'étude montre une prédominance de l'érosion (54,86 % des transects en recul), une partie du linéaire côtier, représentant 45,14 % des transects, présente une accrétion mesurée à une moyenne de 0,4 m/an. Cette dynamique positive peut être attribuée à plusieurs facteurs agissant localement. L'accrétion peut notamment résulter d'une configuration hydrodynamique favorable, induisant un transport sédimentaire longitudinal qui favorise le dépôt dans l'ouest de la plage.

2.4.5 Conclusion

L'analyse de l'évolution du trait de côte à El Kadous entre 2006 et 2025 révèle une dynamique littorale marquée par une forte érosion, particulièrement accentuée autour de l'embouchure de l'oued Reghaia. Bien que certaines zones montrent une accrétion modérée, la tendance globale reste négative, avec une perte surfacique significative. Cette étude souligne l'importance d'un suivi régulier et d'une gestion adaptée du littoral face aux pressions naturelles et anthropiques.

Chapitre III : Protocole de restauration dunaire

3 Protocoles de restauration des dunes littoral

3.1 Etude approfondie du site

3.1.1 Etude de la dynamique des sables et analyse des vents dominants

3.1.1.1 Analyse granulométrique des sédiments (taille, tri et origine)

La granulométrie est un procédé d'analyse permettant d'étudier la répartition des sédiments en fonction de la taille des particules. Selon Rivière (1977), elle consiste à évaluer le pourcentage de la masse totale correspondant à chaque classe de dimension des particules. Cette méthode permet également de classer les sédiments selon leur taille (**Aifoun, Bezghiche.2011**).

→ Principe

Ce procédé consiste à faire passer l'échantillon à travers une série de tamis dont les mailles sont de taille décroissante. On recueille ensuite le poids de matériau retenu sur chaque tamis.

Les tamis utilisés présentent des mailles dont les dimensions diminuent selon une progression géométrique. Cette disposition permet d'obtenir un espacement régulier des points sur une échelle logarithmique, facilitant ainsi la représentation graphique des résultats sur une large plage de taille.

→ Taille

La taille des grains correspond au diamètre des particules constituant le sédiment. C'est un paramètre fondamental en sédimentologie, car il influence directement la mobilité des grains sous l'action du vent ou de l'eau.

En raison de l'origine marine du sable, la fraction grossière des dunes côtières (supérieure à 0,5 mm) est généralement constituée de grains bien arrondis. Cependant, pour les grains inférieurs à 0,25 mm, l'abrasion est quasiment inexistante. Étant donné que la fraction sableuse prédominante dans les dunes se situe entre 0,125 et 0,250 mm, la majorité des grains présentent des formes allant de subangulaires à subarrondies. Au microscope, plusieurs caractéristiques typiques du sable des dunes peuvent être observées :

1. Bords arrondis,
2. Plaques inversées résultant de la rupture du quartz suivant les plans de fracture de sa structure cristalline,
3. Dépressions allongées causées par des fractures en écaille dues aux collisions entre grains,

4. Surfaces lisses formées par dissolution et reprécipitation de la silice. (UICN, 2012).

→ **Technique de mesure**

Tamissage : utiliser pour les sables moyens à grossiers.

Gamme de tamis : Série AFNOR (4000 μm à 63 μm)

Temps de tamissage : 15 minutes avec un agitateur mécanique.

Analyse par diffraction laser ou sédimentométrie : adaptée aux particules plus fines avec une mesure rapide et précise.

Analyse d'images numériques : permet de mesurer automatiquement la taille et la morphologie des grains, en utilisant des logiciels spécialisés pour traiter les images acquises.

→ **Le Tri**

Le tri granulométrique correspond à l'homogénéité des dimensions des grains au sein d'un sédiment, et constitue un indicateur des conditions de transport et de dépôt ayant influencé leur mise en place.

Un sédiment est qualifié de bien trié lorsque les grains présentent des tailles relativement uniformes, ce qui reflète l'action régulière et sélective d'un agent de transport, tel que le vent ou l'eau, dans des environnements dynamiques mais stables (par exemple, les dunes éoliennes).

À l'inverse, un sédiment mal trié se caractérise par une large gamme de tailles de grains, souvent issu de processus irréguliers ou de courants turbulents (ex : dépôts fluviaux ou tempêtes).

→ **L'origine**

La majorité des sables présents sur les plages et les dunes provient de l'érosion des terres, dont les débris sont acheminés par les fleuves. À l'arrivée sur le littoral, les particules les plus fines restent en suspension, sont emportées vers le large, puis se déposent lentement au fond de la mer. Alors, les grains de sable, plus grossiers, sont triés et déplacés par les courants marins et la houle, avant de se déposer dans des zones où la houle diminue.

Dans une moindre mesure, les sables trouvent aussi leur origine dans l'érosion des côtes sous l'effet de la houle, ainsi que dans les débris de la faune marine, comme les coraux, les coquilles et les squelettes.

L'action des vagues sur les côtes rocheuses génère environ 5 % des matériaux d'érosion qui parviennent aux plages à l'échelle mondiale. (UICN ,2012)

-L'ensemble des sédiments du système constitué de la plage sous-marine, de l'estran et des dunes forme une unité dynamique cohérente, au sein de laquelle les matériaux circulent entre ces trois zones selon les processus physiques dominants dans la région, tels que les marées, la houle et le vent (UICN ,2012).

3.1.1.2 Cartographie des directions et intensités des vents dominants

Une carte des vents dominants peut présenter des flèches ou vecteurs indiquant la direction des vents. Une échelle de couleurs représentant l'intensité moyenne (en m/s ou km/h). Une rose des vents synthétisant les résultats sur une station donnée

Le vent est responsable de la génération des houles au large, des vagues dans le domaine côtier, et des surcotes-décotes de marée (différence de hauteur d'eau entre marée prédite et marée observée) ainsi que des transports de sable sur l'estran et dans les dunes (les vents provenant de la mer ainsi que les vents obliques transportent du sable en quantité suffisante pour influencer l'évolution du littoral) (ENR ,1999).

Cartographie des vents dominants consiste à représenter graphiquement :la direction principale du vent (d'où il souffle), l'intensité (vitesse moyenne ou maximale), la fréquence (combien de fois il souffle dans une direction donnée sur une période). Ces cartes sont fondamentales pour analyser le transport éolien des sédiments, notamment dans les milieux dunaires et littoraux

Tableau 2 : méthode de cartographie des direction et intensités des vents dominants (Belarbi,2021).

| Etape | Description | Outils / logiciels |
|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| Collecte des données | Collecter les données de vitesse et de direction du vent dans la zone étudiée. | Station météo Bases de données |
| Prétraitement | Nettoyer les données et suppression des valeurs aberrantes. | |

| | | |
|--|--|--|
| Analyse statistique | Calculer les paramètres statistiques (vitesse moyenne, maximale, fréquence, etc.) | Matlab, Excel Python |
| Analyse directionnelle | Diviser la rose des vents en secteurs et calculer la fréquence/intensité par secteur. | Matlab, Excel |
| Détermination du secteur dominant | Identifier la direction la plus fréquent et ou la plus énergétique. | Matlab, Excel |
| Visualisation graphique | Crée des roses des vents pour illustrer la répartition des direction et intensités. | Matlab, Excel Logiciel de visualisation |
| Cartographie | Importer les résultats dans un SIG pour générer des cartes régionales de direction et d'intensité. | ArcGis, QGIS, MapInfo |
| 8.Analyse et interprétation | Localiser les zones à fort potentiel éolien et interpréter les résultats pour l'aménagement ou la planification. | Rapport, Figure |

3.1.1.3 Mesure des flux éoliens et transport sédimentaire

→ Méthodes :

1. Mesure des flux sédimentaires par piège à sédiments

- **Pièges à sédiments verticale de type Leatherman (modifié)**

Ce dispositif, conçu en laboratoire, a été testé sur le terrain pour capturer les sédiments transportés par le vent à proximité du sol. Il permet une mesure directe des quantités de sable déplacées sur les plages et les dunes.

Les pièges à sable verticaux de type Leatherman sont constitués de cylindres en PVC, insérés verticalement dans le sable. Ces cylindres possèdent deux ouvertures : une face au vent et une autre sous le vent, cette dernière étant équipée d'un filet avec un maillage de 0,063 mm **(Bourahla H., Sakhri S. 2013)**.

Ce dispositif qui capte le sable jusqu'à 46 cm. **(Meur et Ruz, 2002)**

- **Pièges à sédiments horizontaux de type Owens**

C'est un piège à sable horizontal très simple conçu par Owens (1927). Il se présente sous forme d'une boîte de 67 cm de long et 34 cm de haut et la moitié de la boîte est enterrée dans le sable. Cette boîte comporte deux ouvertures (face au vent et sous le vent) pour permettre l'entrée et la sortie de l'air. A l'intérieur de la boîte, il existe des écrans qui peuvent provoquer le dépôt de sable. Ce type de pièges ne capte les sédiments que jusqu'à 17 cm du sol. **(Pye K., Tsoar H., 2009)**. Ce dispositif qui ne piège les sédiments que jusqu'à 17 cm. **(Meur et Ruz, 2002)**

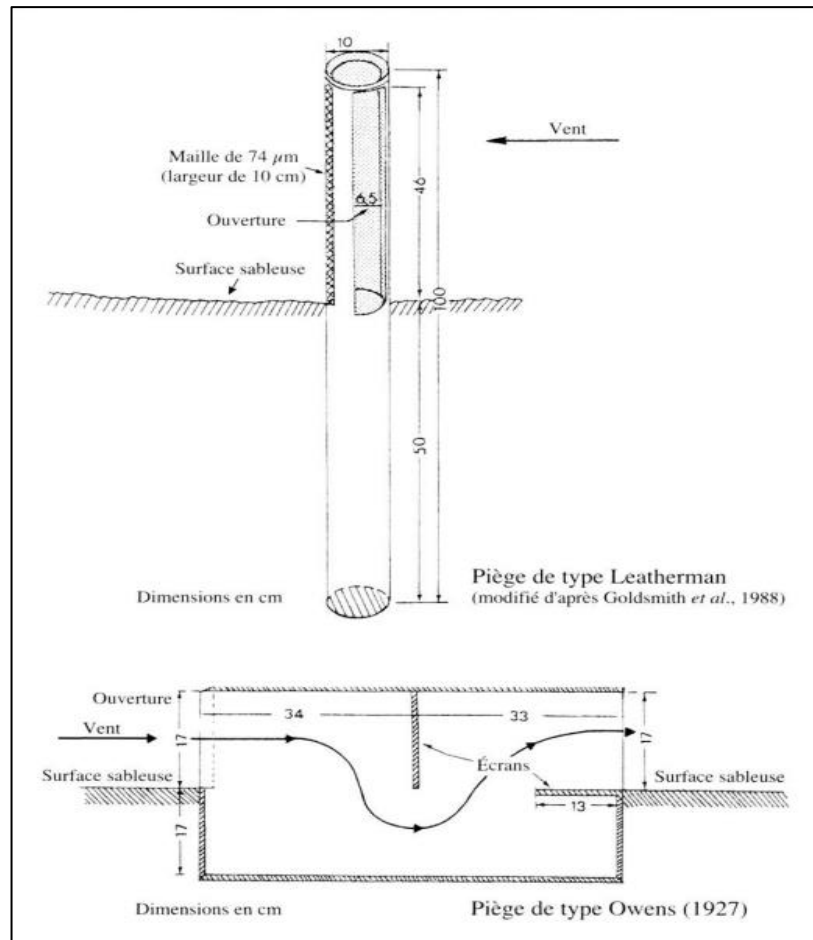


Figure 34 : piège à sédiments utiliser. (Meur et Ruz, 2002).

2. Mesure de la vitesse et direction du vent par anémomètres

Utilisation d'anémomètres installés à environ 2 mètres au-dessus du sol, proches des pièges à sédiments. Enregistrement continu de la vitesse moyenne et maximale du vent à intervalles réguliers (ex. chaque minute). Ces données permettent de corréler les quantités de sable piégées avec la dynamique du vent (vitesse, direction), essentielle pour comprendre les conditions favorisant le transport sédimentaire (Meur et Ruz, 2002).

3.1.1.4 Etude des processus de saltation et suspension des grains

→ Processus de saltation

Le transport du sable sous l'effet du vent peut être décrit comme un nuage de grains qui rebondissent à la surface. En l'air, les grains captent une grande partie de l'énergie du vent. Lorsqu'ils retombent, une portion de cette énergie est transmise aux grains au sol, ce qui en projette certains à leur tour. Ce mécanisme répétitif est connu sous le nom de « saltation successive ».

Les grains frappés à la surface effectuent également de petits sauts et des déplacements proches de la surface, un phénomène appelé « reptation ». Lors des impacts, les grains rebondissent à une vitesse équivalente à 50-60 % de leur vitesse d'atterrissage. Par ailleurs, après l'impact, les grains éjectés ne reprennent qu'environ 10 % de la vitesse du grain qui les a percutés. La réorganisation des grains sur le lit, provoquée par la saltation, entraîne un déplacement des grains à la surface sans décollage, appelé « charriage ». (UICN,2012).

→ Processus de suspension

Ce type de transport se produit lorsque l'écoulement est suffisamment puissant pour maintenir en suspension des particules à la fois cohésives et non-cohésives. Ces particules restent en suspension dans l'air tant que la vitesse du vent (Chauchat G., 2007). Dépasse leur vitesse de chute (Le Hir P., 2008). Ce phénomène concerne principalement les particules les plus fines,

Telles que les silts et les argiles, dont la taille est inférieure à 100 μm (Rioual F., 2002).

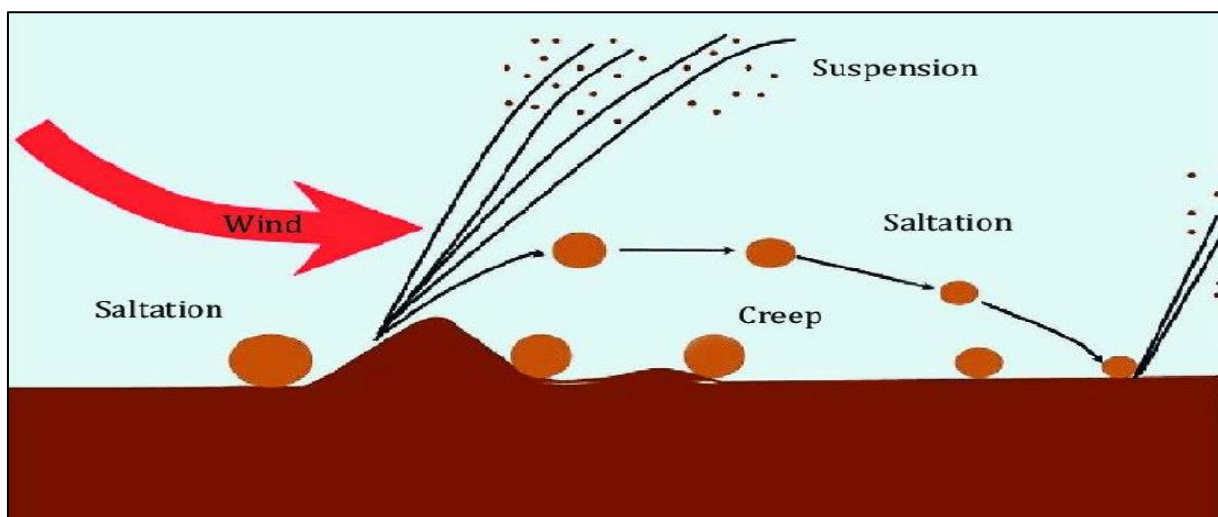


Figure 35: les différents modes de transport sédimentaire par le vent (Bourahla;Sakhari, 2013).

3.1.1.5 Impact de la topographie locale sur les écoulements d'air

La topographie locale exerce une influence déterminante sur la circulation de l'air, en modifiant les conditions climatiques et les phénomènes météorologiques à l'échelle locale. Les variations du relief telles que les hauteurs, les vallées ou les pentes modulent l'écoulement de l'air en déviant ou en accélérant les vents, en générant des phénomènes thermiques spécifiques (comme les brises de vallée ou de montagne), et en provoquant des effets orographiques. Ces éléments influencent également la stabilité de l'atmosphère ainsi que la qualité de l'air. Par ailleurs, la

nature du substrat (roche, neige, glacier, végétation) joue un rôle non négligeable dans la dynamique de l'air, en modulant les échanges thermiques avec l'atmosphère. Elle peut accentuer ou atténuer le refroidissement nocturne, ce qui impacte directement l'intensité et la fréquence des brises locales (**Beltrando, Dahech et al. 2012**).

3.1.1.6 Modélisation des trajectoires de déplacement du sable

La modélisation du transport sédimentaire éolien intègre les paramètres météorologiques, topographiques et sédimentologiques pour prédire les trajectoires de déplacement du sable (**Sherman & Li, 2012**). Les modèles empiriques, basés sur des relations statistiques entre les variables environnementales et les taux de transport, offrent une première approximation des flux sédimentaires (**Kawamura, 1951**).

Les modèles physiques, fondés sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, permettent une représentation plus précise des processus (**Anderson & Haff, 1988**). Le modèle COMSALT (**Kok & Renno, 2009**) simule la saltation en résolvant les équations du mouvement des particules dans un écoulement turbulent. Ces approches numériques s'avèrent particulièrement utiles pour évaluer l'efficacité des mesures de restauration et optimiser leur implantation spatiale.

La validation de ces modèles nécessite des campagnes de mesures sur le terrain combinant observations morphologiques, mesures de transport et monitoring météorologique (Ellis et al., 2009). L'intégration de données de télédétection (Lidar, imagerie satellite) permet de suivre l'évolution morphologique des systèmes dunaires à différentes échelles temporelles et spatiales (**Baird et al., 2012**).

3.1.2 Le bilan sédimentaire des plages

3.1.2.1 Quantification des entrées et sorties sédimentaires

La première tâche pour établir un bilan sédimentaire consiste à identifier les éléments essentiels, notamment les sources d'entrée et de sortie des sédiments, les types de sédiments présents ainsi que les mécanismes de transport impliqués. Cela inclut la reconnaissance des agents de transport principaux (eau, vent, gravité, glace), la nature des sédiments (détritiques, chimiques, bioclastiques, etc.), et les processus physiques qui contrôlent leur déplacement (charriage, suspension, saltation).

Parmi ces sources :

- La plage elle-même qui fournit les sédiments au littoral,
- La dérive littorale qui apporte des sédiments des zones adjacentes,
- Les cours d'eau qui transportent vers la côte les sédiments du continent,
- Vers la plage par le vent,
- L'érosion de certains secteurs des côtes (falaises, côtes basses, etc.),
- La zone intertidale et la zone marine qui apportent à la côte les sédiments déjà accumulés sous forme de bancs de sable ou de haut-fond. **(Othmani, 2020).**

Les pertes (zones puits) comprennent :

- La dérive littorale qui transporte des sédiments vers les zones voisines,
- Une exportation vers la zone intertidale et marine due aux courants de retour,
- Un transfert vers les dunes sous l'effet du vent **(Kadri, 2016).**

3.1.2.2 Evolution morphologique des profils de plage

Un profil de plage est un transect tracé perpendiculairement au rivage, permettant de mesurer les altitudes du terrain et du fond marin par rapport à un repère fixe connu. Il inclut des éléments comme la berme, l'estran, l'escarpement, les barres sous-marines, etc.

Parmi les diverses formes de profils, on distingue deux types opposés : le profil dissipatif et le profil réfléchissant

Le profil dissipatif caractérise les plages à sable fin et/ou à niveaux d'énergie élevés

Le profil réfléchissant est présent dans les plages à sables moyens ou grossiers, avec des niveaux d'énergie bas **(UICN,2012).**

Le bilan sédimentaire détermine l'état évolutif du profil de plage si ces systèmes sont en phase de régression : l'avant-dune recule sous l'effet de l'érosion liée aux tempêtes, formant une falaise marine instable. En équilibre : plage sèche se maintient grâce au transport éolien, permettant la formation d'une avant-dune développée. Progradant : des cordons d'avant-dunes successifs se forment, avec des dunes plus basses et une végétation croissante vers l'intérieur.

Tableau 3 : Modalités de reconstruction du cordon dunaire par rapport au bilan sédimentaire du secteur côtier (UICN ; 2012).

| Bilan sédimentaire | Construction du cordon dunaire |
|----------------------------|--|
| Positif : accrétion | En zone frontale |
| Stable | Au même endroit que le cordon dunaire préexistant |
| Négatif : érosion | En retrait vers l'intérieur, derrière le premier front dunaire |

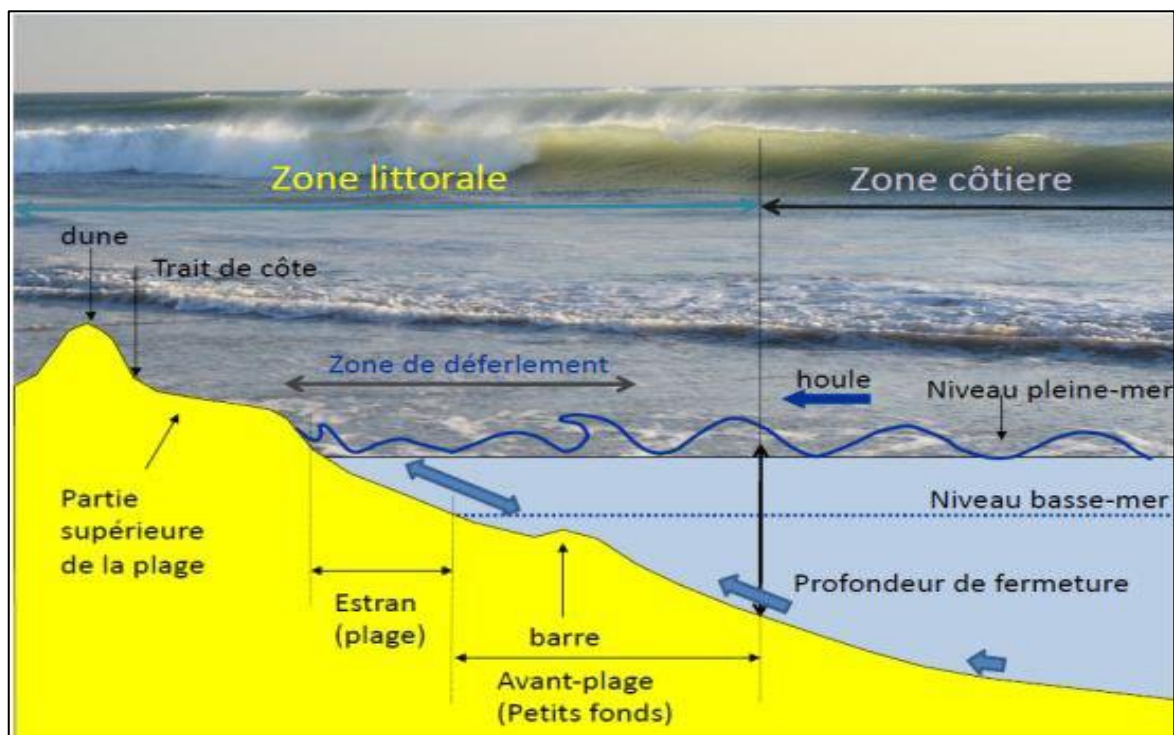


Figure 36: les principaux éléments d'un profil littoral (<https://www.batirama.com/article/54685-pas-de-lien-entre-l-extraction-de-sable-enmer-et-l-evolution-du-trait-de-cote-en-france.html>).

3.1.2.3 Impact des marées et des tempêtes sur le budget sableux

L'expression « budget sédimentaire » désigne le bilan des gains et des pertes en sédiments d'une côte. Ces sédiments regroupent tous les matériaux mobiles tels que les vases, les limons, les sables et les galets. Ce budget dépend de l'équilibre entre les entrées et les sorties de ces matériaux. Lorsqu'une plage reçoit plus de sédiments qu'elle n'en perd, on parle d'accrétion ; à l'inverse, lorsqu'elle en perd davantage, on parle d'érosion. Sur une même côte, les plages

peuvent avoir des budgets sédimentaires différents. Ainsi, une plage située sur un littoral globalement en recul peut tout de même connaître un bilan localement positif.

Les sédiments sont apportés par la dérive littorale, les fleuves, les vagues, ou encore par le vent. Des actions humaines peuvent aussi intervenir, comme la construction d'ouvrages bloquants (épis, digues) ou la recharge artificielle des plages, qui consiste à déposer du sable transporté par camions. Les pertes de sédiments, quant à elles, résultent également de l'action du vent, de la dérive littorale, des vagues, des courants marins et de certaines activités humaines. Ces dernières peuvent être directes (extraction de sable ou de gravier) ou indirectes, comme les barrages fluviaux qui retiennent les sédiments en amont.

Tout changement brusque ou progressif dans les entrées ou les sorties (forte tempête, construction d'ouvrages...) modifie le budget sédimentaire et est susceptible d'entraîner une évolution du trait de côte (**Blond, septembre 2024**).

3.1.2.4 Relation entre largeur d'estran et alimentation dunaire

La largeur de l'estran joue un rôle crucial dans le processus d'alimentation des systèmes dunaires côtiers. En effet, un estran large favorise une exposition prolongée du sable aux conditions atmosphériques, en particulier au vent. Cette situation facilite le séchage du sable, condition préalable indispensable à son transport éolien vers l'arrière-plage et les dunes. Comme l'expliquent les auteurs de Les Littoraux, « à données anémométriques égales, plus l'estran est large et plus vite il s'assèche entre deux hautes marées, plus le volume de grains mis en mouvement par le vent est important » (**Paskoff,2010**). Cette observation met en évidence une relation directe entre la morphologie de la plage intertidale et la capacité d'accumulation sédimentaire éolienne, élément essentiel dans la genèse et la croissance des dunes littorales.

3.1.2.5 Calcule des volumes érodés et accumulés

La quantification du sable sur les plages méditerranéennes constitue un défi technique important, qui exige une démarche rigoureuse fondée sur des modèles mathématiques précis et une connaissance approfondie des propriétés du sable.

→ Méthodologie de calcul

Le calcul du volume de sable repose sur une formule géométrique de base intégrant trois dimensions : la longueur de la plage, sa largeur jusqu'au rivage, et la profondeur de la couche sableuse.

→ **Outils et technique de mesure adaptés**

L'estimation du volume de sable sur les plages méditerranéennes nécessite une approche méthodique combinant diverses techniques de mesure. La modélisation topo-bathymétrique permet d'obtenir des données précises sur la distribution du sable. Les systèmes d'information géographique (SIG) servent à analyser ces informations et à créer des modèles numériques de profondeur. La méthode du krigeage est aussi employée pour interpoler les données topographiques et produire une représentation précise de la surface sableuse.

3.1.2.6 Cycle saisonniers d'érosion/accrétion

Les dunes littorales sont soumises à un cycle naturel d'érosion et d'accrétion, souvent liés à des rythmes saisonniers.

Tableau 4 : Cycle saisonniers d'érosion/accrétion.

| Saison | Processus dominant | Effets observés sur la dune |
|----------------------|---------------------------|--|
| Automne/Hiver | Erosion | Tempêtes et fortes houles arrachent du sable à la plage et à l'avant-dune, provoquant un recul du pied de dune, une diminution de la hauteur de l'avant-dune, voire des brèches ou des reculs de plusieurs mètres selon l'intensité des événements (OMDM,2023) . |
| Printemps/Été | Accrétion | Les conditions plus calmes (houles faibles, vents dominants) favorisent le dépôt du sable sur la plage et le piégeage par la végétation pionnière, permettant la reconstruction progressive de l'avant-dune et parfois même un avancement du trait de côte (ONF,2019) |

3.2 Technique de restauration des dunes littorales

3.2.1 Reconstitution de la dune

Est un processus qui permet de reconstruire une dune de sable qui a été détruite par l'érosion naturelle ou les activités humaines, cela peut inclure plusieurs techniques :

3.2.1.1 Technique de rechargement en sable

Apport de sable : est une technique qui consiste à ramener du sable pour restaurer la dune qui a perdu le sable à cause du vent, des vagues ou de l'activité humaine et pour lui redonner sa taille et sa forme naturelle.

Source de sable : le sable est extrait de la même cellule sédimentaire, en étant déplacé de l'aval vers l'amont, ou il provient de source locale. Il est crucial que la granulométrie des sédiments soit adaptée au milieu naturel.

Transport du sable : le sable peut être acheminé par voie terrestre (camions, engins de chantier) ou par voie maritime.

Tableau 5 : Avantages et inconvénients des divers types de reconstruction topographique (UICN, 2012).

| Type de reconstruction | Avantages | Inconvénients |
|--|---|---|
| Reconstruction à l'aide de machine | Rapidité | Cout plus élevé Morphologie moins naturelles Potentiellement nuisible à l'environnement |
| Reconstruction par système de piégeage de sable | Cout inférieur Morphologie naturelle Non nuisible à l'environnement | Lenteur |

3.2.1.2 Reprofilage et modelé optimal des dunes

Écrêter les dunes fortement érodées : pour réduire les brises au vent et limiter les risques d'effondrement de falaise sableuse.

Reconstituer les dunes par rechargement de sable en cas de risque de submersion

- Identifier les gisements de sédiments et privilégier des sédiments d'apport appropriés aux conditions de vent du site
- Déposer les sédiments d'apport en haut de plage, sur les versants maritimes ou terrestres de la dune.

Prévoir des dispositifs complémentaires pour retenir et accumuler le sable et canaliser la fréquentation. Les lignes de ganivelles permettent à la fois de piéger le sable mais aussi de canaliser les cheminements. **(DDTM,2018)**.

3.2.1.3 Création de noyaux de fixation

Cette méthode consiste à créer des points d'ancrage stables qui serviront à une accumulation progressive de sédiments.

Les Noyaux de fixation sont en général composés de structures tels que des fascines en bois, des géotextiles biodégradables ou des structures réalisées à partir de matériaux naturels, ces installations permettent de ralentir la vitesse du vent et favoriser l'accumulation du sable.

La végétation pionnière est installée autour de ces noyaux afin d'en accroître l'efficacité. **(ONF, 2024)**

3.2.1.4 Méthode de construction progressive

La construction progressive des dunes repose sur une approche par étapes en accord avec le processus d'accumulation des sédiments.

Préparation du site : nettoyage de la zone concerné et mise en place des installations de piégeage de sable.

Accumulation initiale : installation des barrières (rideaux brise vents) pour retenir les sédiments éoliens et former les dunes.

Plantation progressive d'une couverture végétale avec des espèces pionnières résistantes aux conditions extrêmes.

Consolidation : Amélioration de la couverture végétale par la plantation d'espèces variées. (ONF, 2023).

3.2.1.5 Gestion des apports sédimentaire artificielles

Le sable utilisé doit posséder une granulométrie compatible avec les caractéristiques naturelles du milieu local, les grains doivent être assez fins pour pouvoir être transporté par le vent et suffisamment grossier pour éviter la formation de poussières.

Les sédiments peuvent être apportés par rechargement directe par transport mécanique, le contournement d'obstacles (by-pass sédimentaire), ou le dragage de sable marins.

Les opérations d'apport sédimentaire doivent être planifiées en tenant compte des conditions météorologiques et des cycles biologiques de la végétation. Il est préférable d'intervenir lors de périodes de vents modérée afin de favoriser la redistribution naturelle du sable. (Climate-ADAPT, 2024).

3.2.1.6 Restauration des profils d'équilibre

La restauration des profils d'équilibre a pour objectif de reconstituer une morphologie dunaire de manière à assurer leur stabilité face aux agressions du vent et de la mer, tout en préservant ses fonctions écologiques et de protection.

L'élaboration du profil d'équilibre requiert au préalable une analyse approfondie des conditions hydrodynamique et éolienne.

3.2.2 Installation des clôtures

Les techniques utilisées pour capter le sable sont inspirées de la nature. Le bois mort, les algues et la végétation présents sur les plages ralentissent la vitesse du vent et favorisent l'accumulation de sable. Aux îles, mais aussi ailleurs dans le monde, les capteurs de sable composés de matière biodégradable sont construits pour jouer ce même rôle.

Parmi ces structures les fascine, les ganivelle, rideaux brise vents et tapis de branchage, Favorisent le maintien et la reconstitution du cordon dunaire, tout en comblant les siffles vents, qui luttent contre l'érosion du cordon dunaire et prévenir le recul de trait de côte. (**Attention fragile,2021**)

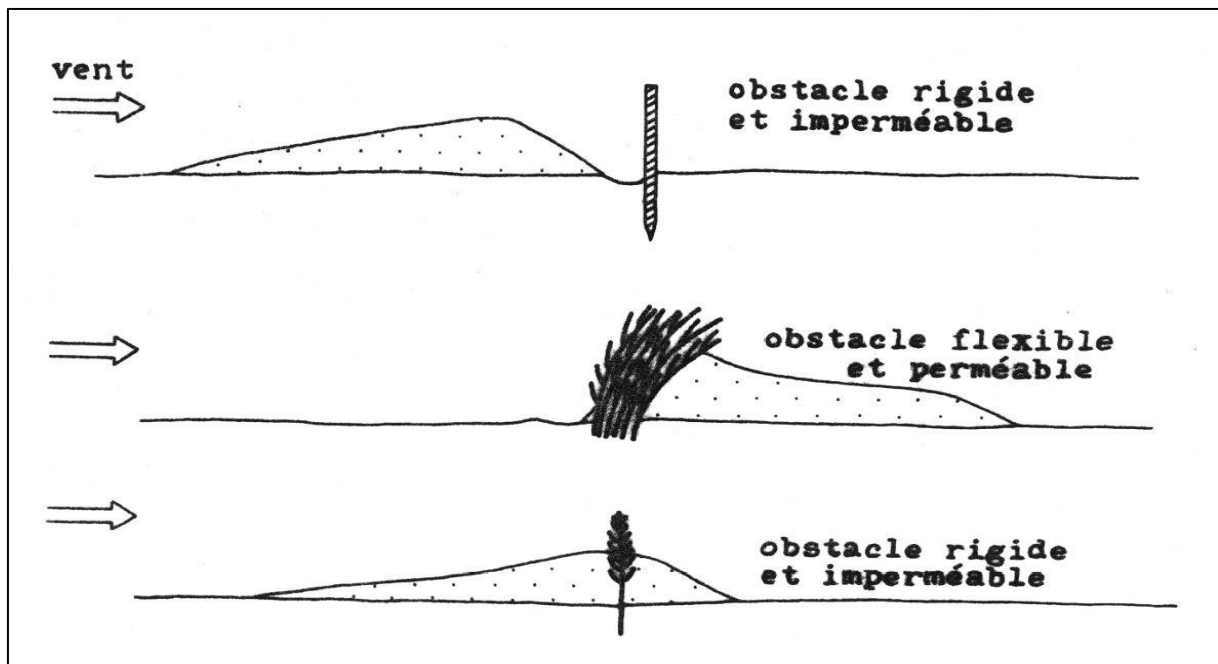


Figure 37: modelé du dépôt sableux selon divers types d'obstacles (Jean, 1983).

Tableau 6 : Synthèse comparative des méthodes courantes.

| Technique | Objectif principale | Matériaux utilisés | Avantages | Limites |
|-------------------|---|--|---|---|
| Ganivelle | Réduction de l'érosion induite par le vent et piéger le sable | Lattes de châtaignier | Durabilité Intégration paysagère | Cout élevé, Entretien régulier. |
| Brise vent | Réduire la vitesse du vent et protéger la végétation dunaire | Panneaux synthétiques perforés, filets plastiques ou textiles techniques | Protection efficace contre les vents forts Installation rapide Résistance aux intempéries | Impact visuel moins naturel Risque de dégradation par les UV Coût de remplacement |
| Fascines | Renforcer les berges et | Branchages liées | Matériaux biodégradables | Efficacité réduite dans |

| | | | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|--------------------------|
| | stabiliser les habitats | | | les zones de forte houle |
| Tapis de branchage | Protéger le sable | Branchages locaux | Cout faible | Durée de vie courte |

3.2.2.1 Installation des clôtures en ganivelles

La ganivelle est constitué d'un assemblage de lattes de bois de tremble ou de cèdre disposés verticalement reliées ensemble par des tiges de fer. Leur taille se situe entre 0.5 et 1 mètre de hauteur (entre 1.5 et 3 pieds). Les rouleaux de ganivelle sont vendus habituellement en rouleaux de 15 mètres. Elles sont vendues sur le marché en tant que clôturés à neige. Elles servent à accélérer l'accumulation de sable transporté par le vent et permettent de recréer une dune semblable à la dune initiale, contribuant ainsi à la reconstitution et à la stabilisation de la dune.

Ces clôtures protègent également la flore fragile des dunes en limitant le piétinement des visiteurs.

Elles peuvent aussi servir à délimiter les zones sensibles et à prévenir les intrusions, contribuant ainsi à la préservation de la biodiversité locale.

Possibilité de couvrir une grande surface

Achat nécessaire de matériaux.

Accumulation souvent nécessaire pour maintenir l'accumulation de sable

Clôture ayant tendance à se briser après quelques années. Elle se décompose rapidement, mais il est préférable de remplacer les lattes par de nouvelles pour maintenir l'accumulation de sable. (**Attention Fragile, 2021**).

→ Etapes

1. Contacter les organismes environnementaux pour une validation de la technique choisie.
2. Faire un plan de restauration avec les organismes pour cibler les bonnes interventions
3. Enfoncer les piquets de bois à au moins 0.5 mètre (1 pieds) dans le sol avec la masse en laissant un espacement de 3 mètres (10 pieds) entre chaque piquet.
4. Dérouler la ganivelle au sol, la relever à la verticale sur les piquets et s'assurer qu'elle soit bien étirée.

5. Utiliser la corde pour fixer la ganivelle sur chaque piquet en commençant par une des extrémités et en allant progressivement vers l'autre. Entre deux piquets, étirer la ganivelle afin de la tendre. Attacher solidement les lattes sur les piquets en les enroulant de plusieurs tours avec la corde. Les lattes devraient être attachées au piquet par au moins trois points d'attache. (Attention fragile, 2021).



Figure 38: photos de ganivelles (Boucher, 2011-2012).

3.2.2.2 Les rideaux brise-vents

Le fonctionnement des rideaux brise-vents :

- Renforcer le volume des dunes par piégeage éolien ;
- Installer les brise-vents avant l'été afin de :
 - Canaliser la fréquentation touristique ;
 - Retenir le sable éolien (mobilisable dès 30 km/h de vent).
- Choisir des caractéristiques adaptées en fonction du site :

Emplacement sur la dune : hors d'action des houles.

En général, les rideaux brise-vents sont installés en sommet de dune jusqu'au milieu de la dune afin d'éviter qu'ils soient emportés par la mer. Les premiers piquets doivent être positionnés en fonction des plus forts coefficients de marée et enfoncés suffisamment profondément (**DDTM, 2018**).

Porosité : comprise entre 30 et 50 % pour favoriser l'accumulation de sable de part et d'autre du rideau.

Hauteur : 0,5 à 1 mètre pour élargir une dune, 2 mètres pour augmenter sa hauteur.

Nombre de rangées : pour créer des dunes, proches des formes dunaires naturelles, plus larges avec des pentes plus faibles et des lignes de crêtes ondulées.

Orientation : le long du rivage pour conserver la morphologie du trait de côte et idéalement perpendiculaire à la direction du vent dominant.

Distance entre les rangées : 4 fois supérieure à la hauteur du rideau brise-vents pour augmenter la largeur de la dune.

Largeur des rangées : bandes continues et homogènes ou installations ponctuelles au niveau des cuvettes de déflation.



Figure 39: photo de brise-vents (ONF, 2023).

3.2.2.3 Les Fascines

Sont fabriquées avec des branchages récupérés et solidement attachés ensemble. Les branches proviennent généralement de conifères et mesurent entre 1 et 1.5 mètre (3.5 et 5 pieds) de longueur. Elles sont ensuite placées entre des piquets de bois de façon à former une clôture. Une fascine peut comporter plusieurs sections lorsque la zone à restaurer dépasse 1 mètre. Il faut compter de trois à six branches pour chaque section. Elles ont pour but de piéger le sable afin de reconstruire la dune en cas de brèche dunaire. Les fascines demandent un meilleur

ancrage et sont souvent placées en haut des dunes. Elles sont plus robustes. (**Attention fragile,2021**)



Figure 40: photo de fascine (Attention fragile, 2021)

→ **Etapas**

1. Faire un plan de restauration avec les organismes pour cibler les bonnes interventions.
2. Se procurer des branches entre 1 et 1.5 mètre (3.5 et 5 pieds) de longueur. De trois à six branches seront nécessaire pour former une section de fascine.
3. Assembler les branches en alternant leur direction et les attacher ensuite ensemble.
4. Placer une paire de piquets, distancés de 25cm (moins de 1 pied), à chaque extrémité de la brèche. Si la brèche est d'une largeur de plus de 1 mètre, il vous faudra ajouter des paires de piquets entre les extrémités pour former plusieurs sections de 1 mètre. Par exemple, une brèche d'une largeur de 4 mètres (13 pieds) pourrait contenir cinq paires de piquets.
5. Insérer les branches en alternance, entremêlées et tressées entre les sections et les attacher solidement aux piquets.
6. Une fois les branches disposées, attacher les paires de piquets avec de la corde. (**Attention fragile,2021**).



Figure 41: photo d'installation et d'évolution de fascine (De Sinety, M., Bourgeois, M., et, Giroux, M-E., Avril 2017)

3.2.2.4 Les tapis de branchage

Le tapis de branchages consiste en un assemblage de branches imbriquées pour couvrir le sol, souvent placé dans des dépressions sablonneuses ou sous des structures de stabilisation. Cette technique permet de piéger les sédiments transportés par le vent, en ralentissant les flux éoliens au sol et favorisant ainsi l'accumulation sableuse (Eichmanns et al., 2022 ; Itzkin et al., 2020).

Les matériaux employés sont des branches d'arbres issues de coupes responsables, valorisées localement et intégrées comme solutions fondées sur la nature.

En plus de retenir le sable, elles servent à dissuader la circulation humaine sur les dunes, protégeant ainsi les zones en cours de restauration et les végétaux pionniers (Grafals-Soto & Nordstrom, 2009).

→ Etapes

1. Contacter les organismes environnementaux pour une validation de la technique choisie
2. Faire un plan de restauration avec les organismes pour cibler les bonnes interventions
3. Contacter la municipalité pour obtenir les permis et les autorisations nécessaires
4. Rassembler une quantité suffisante de branches par rapport à la superficie de votre trou de sable. Prioriser les branches grandes et volumineuses.
5. Mettre les branches dans les creux et les imbriquer entre elles pour recouvrir toute la superficie visée. (Attention fragile, 2021).



Figure 42: photo d'un tapis de branchage en octobre 2016 (De Sinety, M., Bourgeois, M. et. Giroux, M-E., Avril 2017).

3.2.3 Plantation d'espèces végétales

3.2.3.1 Comprendre le rôle de la couverture végétale

La végétalisation ou recolonisation des plantes sur un milieu dunaire permet une stabilisation de ce dernier, afin d'optimiser son développement il est souvent nécessaire de mettre en place des capteurs de sable au préalable. (**Attention fragile, 2021**).

Fixer le sable en place et favoriser le développement dunaire par piégeage du sable en conservant les caractéristiques naturelles de la dune.

Offrir un substrat favorable à la reprise d'une végétation naturelle.

Améliorer la végétalisation de la dune : réaliser des semis ou plantations d'espèces prélevées sur site et adaptées au milieu, en début d'année avant le printemps. (DDTM, 2018).

Raisonner le nettoyage des plages : les laisses de mer sont propices au développement de dunes embryonnaires. (DDTM, 2018).

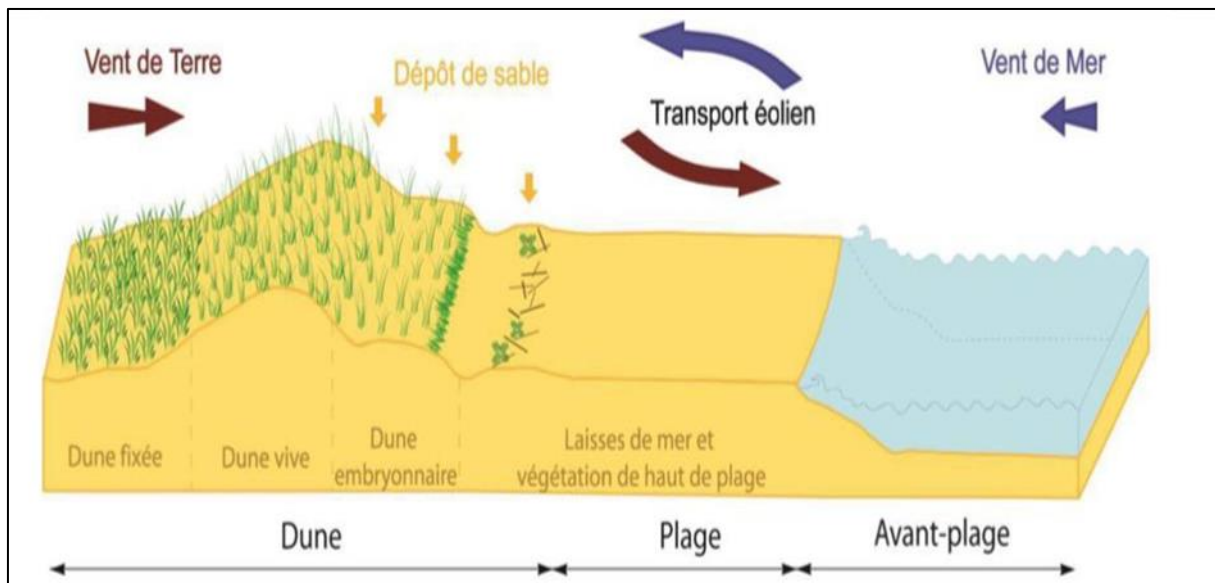


Figure 43: schéma d'un système plage-dune (IFREMER, 2011).

Quand on se déplace de la plage vers l'intérieur des terres on a une augmentation de la biodiversité liée à l'augmentation de la stabilité du substrat et à des conditions plus favorables pour le développement des espèces végétales.

3.2.3.2 Le choix des espèces

Les espèces qui jouent un rôle plus marquant sur les dunes côtières actives sont celles qui favorisent une accumulation et une sensibilisation adéquate du sable et celles qui permettent le maintien d'un équilibre dynamique. Deux espèces sont particulièrement intéressantes : le chiendent de sable (*Elymus farctus*) et l'oyat (*Ammophila arenaria*), et considérée comme structurante ou constructrice de dunes, le premier est caractérisé des dunes embryonnaires et la deuxième du premier cordon dunaire. Les deux espèces sont des Graminées (poacées) pérennes ayant un système racinaire très développé, adapté aux conditions du milieu côtier, capable de se disséminer par le vent et par l'eau de mer et résistantes à l'enfouissement dans le sable.

Ces espèces sont les plus utilisées dans les opérations de végétalisation des cordons dunaires et celles que l'on cultive les plus souvent pour cet usage. Les deux espèces ne peuvent être introduites que dans les zones où l'apport de sable est régulier, elles ne pourraient s'installer ni se développer. L'oyat, quant à lui, ne pousse pas bien dans des zones où l'apport de sable est inférieur à 30 cm/an. (UICN, 2012).

→ Une flore spécifique

Les conditions de vie sur le haut de plage sont particulièrement contraignantes pour les plantes :

- Vent très fréquent
- Mobilité du sable : ensevelissement/désensablement
- Sécheresse du sol
- Variation forte des températures au niveau du sol
- Salinité par les embruns

Aussi, les espèces pionnières qui s'y installent sont spécifiques à ces milieux et ont développé des adaptations particulières (feuilles charnues, système racinaire important...). Elles sont qualifiées de xérophiles (= « aiment les milieux secs »), de psammophiles (= « aiment le sable »), de nitrophiles (= « aiment l'azote ») et /ou de halophiles (= « aiment le sel »). Beaucoup sont des plantes annuelles ce qui est un avantage pour se développer sur ces habitats éphémères et mobiles mais ce sont les vivaces, tel le chiendent des sables ou l'oyat, qui peuvent jouer, en hiver, un rôle primordial dans le maintien de la dune.

3.2.3.3 Espèces utilisées pour la restauration des écosystèmes dunaires

➤ Ammophile à ligule courte(l'oyat) :

C'est la plante fixatrice des dunes mobiles par excellence. On la reconnaît à ses longues feuilles vert blond, raides, d'où leur pointe quelque peu piquante quand on y passe la main. Non seulement, l'oyat facilite le dépôt de sable à ses pieds en freinant le vent, mais son système racinaire très développé lui permet également de bien le fixer. Ses tiges souterraines, à croissance verticale, les rhizomes, réagissent à l'ensablement pour émettre de nouvelles feuilles et ses drageons, des tiges horizontales souterraines, lui permettent de coloniser rapidement les zones sableuses vierges. Aussi, elle est souvent plantée dans des parties de dunes érodées par le vent ou le piétinement.

La plantation de l'ammophile à ligule courte se réalise lorsqu'il n'y a pas de végétation suffisante sur un lieu donné, cette technique ne fonctionne que si un système dunaire est déjà développé. On coupe à l'avance des plantes en bon état dans une région à forte densité et aux conditions de régénération optimales et on les replante ensuite dans les sols de rétablissement. La disposition de l'ammophile à ligule courte doit se faire en quinconce et les plantes doivent être espacées d'environ 0.3 mètre(1pied). La plantation devrait avoir lieu entre la mi-mai et la fin

juin ou entre le début septembre et la mi-octobre. Dans les meilleures conditions, le taux de réussite atteint les 90%. (**Attention fragile, 2021**)

Les conditions idéales pour la pousse de l'ammophile sont :

- Apport en sable frais en tout temps (dune bordière)
- Pente douce ou replat
- Température variant entre 16 et 20°C
- Milieu où il n'y a pas de circulation piétonnière ou motorisée.



Figure 44: La revégétalisation par plantation d'ammophile à ligule courte en juin 2015 (De Sinety, M., Bourgeois, M. et Giroux, M-E., Avril 2017).

➤ **Chiendent des sables**

Le chiendent est une plante vivace, poussant en touffe de 25 à 50 cm de hauteur, est une plante pionnière halophile (très tolérante au sel) qui pousse sur le haut de plage pour former la dune embryonnaire. Le chiendent des sables est un piège de sable qui fixe la dune grâce à ses longs rhizomes rampants et plongeants. Il précède l'oyat qui pousse légèrement plus loin car celui-ci supporte moins les embruns salés. Le chiendent se différencie par ses touffes moins denses et son épi plus petit et plus fin. Contrairement à l'oyat, le chiendent des sables possède des feuilles planes qui se cassent facilement à la base. Les graines ont une disposition alternée.

Les racines forment un rhizome et peuvent atteindre plusieurs mètres de profondeur. Le réseau racinaire dense de chiendent des sables permet de maintenir le sable en place en dépit de la force des vents et limite l'érosion de dune par la mer.

La floraison de cette herbe a lieu de juillet à octobre. La reproduction du chiendent se fait par les graines contenues dans les épis. La plante se reproduit également par ces racines qui tracent dans le sable et font émerger de nouvelles pousses. (**Ecobalade, 1993**).



Figure 46: Photo de chiendent de sable
<https://ecobalade.fr/espece/chiendent-des-sabl>



Figure 45: Photo de chiendent de sable
http://platier.free.fr/agropyrum_junceum.php

3.2.3.4 La saison de plantation

Le moment idéal pour planter varie selon la localisation géographique. En générale, les plantations se font en automne ou en hiver. En cas de plantation tardive le nouveau système racinaire pourrait ne pas se développer suffisamment à temps pour faire face aux températures extrêmes de l'été. Sur les côtes méditerranéennes, la période idéale de plantation s'étend de la mi-novembre à la fin février. Ces dates peuvent varier selon les conditions climatiques. En cas d'automne précoce et humide, il est possible d'anticiper les plantations. À l'inverse, en période de sécheresse, il est préférable de les retarder. Lors de la plantation, il est préférable d'éviter les heures de forte luminosité ainsi que les vents violents. Les conditions climatiques idéales sont un ciel nuageux, et d'un sol sableux en surface, ce qui facilite l'ouverture des trous de plantation en limitant les éboulements des parois.

3.2.3.5 Entretien et protection des jeunes plants

L'entretien et protection des jeunes plants est essentiels à la réussite des opérations de restauration des dunes côtières, après la plantation, une surveillance régulière des jeunes plantes est indispensable.

→ Les points clés des travaux d'entretien (UICN, 2012).

Les replantations :

Les replantations sont effectuées dans les zones où une partie de la végétalisation a disparu à cause du piétinement ou de nouveaux processus érosifs sont apparus.

Remplacement des capteurs de sable :

Les capteurs seront remplacés en cas de détérioration, si les visiteurs accèdent aux zones en restauration, s'il est nécessaire d'augmenter la hauteur du cordon dunaire.

Restauration ou remplacement de la clôture :

La clôture sera remplacée en cas d'abattement, enfouissement ou dysfonctionnement.

Restauration des passerelles piétonnières :

Les passerelles devront être remplacées de manière à permettre l'accès aux plages en évitant les zones restaurées.

Élimination de la végétation envahissante :

L'élimination de la végétation envahissante demande un suivi constant pour empêcher sa propagation, en intervenant rapidement dès l'apparition de nouvelles repousses.

3.3 Gestion de la fréquentation

La gestion durable des milieux dunaires repose sur l'adoption de bonnes pratiques par les usagers. La figure ci-dessous illustre les comportements essentiels à respecter pour préserver l'intégrité écologique des dunes, limiter leur érosion et favoriser leur régénération naturelle.



Figure 47: Les pratiques incontournables en milieu dunaire.

3.3.1 Canalisation des flux de visiteurs

3.3.1.1 Sentiers balisés

L'objectif du balisage est d'assurer l'orientation des randonneurs en marquant leur itinéraire à l'aide de symboles normalisés. Ces marques, composées de formes et de couleurs précises, servent à guider, informer et rassurer les usagers tout au long du parcours.

Le balisage visible tout au long du parcours est opposé sur :

- Des poteaux directionnels normalisés.
- Des éléments de relief (arbre, rocher, pierre).



Figure 48: photo de balisage en randonnée ([Le balisage en randonnée : suivez les bonnes balises ! - Mon GR®](#)).

3.3.1.2 Organiser l'accès aux plages sans atteinte à la végétation dunaire

Pour éviter le piétinement, il est recommandé d'installer des passerelles transversales aux cordons dunaires.

Le vent transporte le sable vers l'intérieur en y créant des talus instables, ces talus s'agrandissent progressivement par l'action du vent et du piétinement jusqu'à fragmenter le cordon dunaire et le réduire. Le système le plus recommandé pour éviter ces dégradations consiste à installer une passerelle en bois montée sur des pilotis créant un espace suffisant entre la passerelle et la dune pour permettre que la végétation pousse et que le vent transporte le sable.

L'objectif des passerelles est : d'éviter ou de réduire l'effet négatif sur la végétation dunaire du piétinement des personnes ainsi que du passage des animaux, elles renforcent l'efficacité des techniques de restauration.

Les dispositifs qui permettent une traversée confortable des dunes sont toujours bien accueillis. Par conséquent, la conception du tracé doit tenir compte non seulement de la protection de la dune mais aussi de son utilité pour les usagers.

Il est recommandé d'installer une passerelle à une hauteur allant d'un à deux mètres maximums car une hauteur supérieure entraînerait des problèmes techniques et d'impact paysager (UICN, 2012).



Figure 49 : passerelle d'accès à la plage (UICN, 2012).

3.3.1.3 Signalétique et sensibilisation du publique

Les panneaux d'interdiction ou réglementaires ainsi que les supports pédagogiques ont pour objectif de dissuader les usagers d'emprunter les accès interdits et de les inciter à respecter les zones en cours de restauration. Ces outils jouent un rôle fondamental dans la protection des milieux dunaires en sensibilisant le public à leur fragilité écologique (Nordstrom et al., 2011). L'information environnementale, axée sur les caractéristiques du système dunaire, les pressions anthropiques et les efforts de réhabilitation entrepris, est essentielle pour favoriser l'adhésion sociale aux mesures de conservation (Defeo et al., 2009). La communication sur les enjeux locaux permet non seulement d'améliorer les comportements individuels, mais aussi de renforcer la participation citoyenne à long terme dans la protection de ces milieux sensibles (Schlacher et al., 2007).



Figure 50: illustration et photo du panneau Processus de restauration en cours (De Sinety, M., Bourgeois, M. et all., Avril 2017).

3.3.1.4 Impact du piétinement sur la végétation dunaire

Si on l'habitude de pointer du doigt l'érosion comme principale cause de la destruction des dunes, une autre menace est souvent sous-estimée : le piétinement. Les zones côtières attirent un nombre croissant de visiteurs qui veulent profiter de la beauté et de la tranquillité des plages. Mais leur affluence se traduit aussi par une pression accrue sur les dunes.

Le passage répété des touristes endommage la végétation qui se trouve en haut de la plage qui stabilise le sable, les dunes deviennent plus vulnérables. Le sable est emporté plus facilement par le vent et les vagues, cela accélère la dégradation des dunes. En revanche, le piétinement est une conséquence directe de l'activité humaine. Celle-ci est souvent exacerbée par le manque de sensibilisation ou de mesures de protection adéquates (Rojo,2024).

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude sur la dynamique côtière et les protocoles de restauration des dunes littorales d'El Kadous révèle une situation préoccupante caractérisée par une érosion dominante du littoral.

L'analyse de l'évolution du trait de côte entre 2006 et 2025 montre une perte surfacique nette de 7 156,60 m², avec 54,86% des transects en érosion. Le déplacement artificiel de l'embouchure de l'oued Reghaia constitue le facteur principal de cette dégradation, représentant 68,8% des pertes surfaciques. Cette intervention anthropique a profondément perturbé l'équilibre morphodynamique naturel de la zone.

Les solutions proposées s'articulent autour de trois axes : la reconstitution physique des dunes, leur stabilisation par des clôtures, et la végétalisation avec des espèces adaptées. Cette approche technique, complétée par une gestion contrôlée de la fréquentation, offre une réponse concrète aux problématiques d'érosion identifiées.

Cette étude souligne l'urgence d'une intervention rapide pour limiter la progression de l'érosion. Les protocoles de restauration doivent être mis en œuvre rapidement, accompagnés d'un suivi régulier de l'évolution du trait de côte. Il est également essentiel de réviser les pratiques d'aménagement du littoral pour éviter de reproduire les erreurs du passé.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Anderson, R. S., & Haff, P. K. (1988). Simulation of eolian saltation. *Science*, 241(4867), 820-823.

Baas, A. C., & Nield, J. M. (2007). Modelling vegetated dune landscapes. *Geophysical Research Letters*, 34(6), L06405.

Bagnold, R. A. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen.

Baird, T., Bristow, C. S., & Vermeesch, P. (2012). Measuring sand dune migration rates with COSI-Corr and Landsat: Opportunities and challenges. *Aeolian Research*, 4, 37-44.

Battiau-Queney, Y. (1993). Dunes et littoraux dunaires de la France atlantique. DATAR.

Beeftink, W. G. (1977). The coastal salt marshes of western and northern Europe: An ecological and phytosociological approach. Dans V. J. Chapman (Éd.), *Wet coastal ecosystems* (pp. 109-155). Elsevier.

Bellabed, F. (2020). Étude de l'évolution surfacique et volumique du cordon dunaire d'El Kadous (commune de Heraoua) [Mémoire d'ingénieur, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral].

Moussaoui, M. (2024). Gestion et valorisation des zones littorales à intérêt stratégique cas de wilaya de Tipaza [Mémoire d'ingénieur, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral].

Bird, E. C. F. (2008). *Coastal geomorphology: An introduction* (2e éd.). John Wiley & Sons.

Bounoua, N., & Kaci, S. (2017). Étude des écosystèmes dunaires algéroise : étude comparative entre les deux ensembles dunaires du Mazafran et d'EL Kadous [Mémoire d'ingénieur, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral].

CARR/ASP. (2015). Bilan diagnostique de la réserve naturelle de Réghaia en Algérie [Rapport technique]. Centre d'Activités Régionale pour les Aires Spécialement Protégées.

Carter, R. W. G. (1988). *Coastal environments: An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. Academic Press.

Custodio, E. (2010). Coastal aquifers of Europe: An overview. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 269-280.

Dahmani, A. (2023). Évolution morpho-dynamique de la baie d'Alger : observation et modélisation hydrodynamique et sédimentaire [Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral].

Davis, R. A. (1985). *Coastal sedimentary environments* (2e éd.). Springer-Verlag.

Références bibliographiques

- Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D. S., Schlacher, T. A., Dugan, J., Jones, A., Scapini, F. (2009). Threats to sandy beach ecosystems: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *81*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.022>
- Doing, H. (1985). Coastal fore-dune zonation and succession in various parts of the world. *Vegetatio*, *61*(1-3), 65-75.
- Durán, O., & Herrmann, H. J. (2006). Vegetation against dune mobility. *Physical Review Letters*, *97*(18), 188001.
- Eichmanns, C., Engel, M., & Schüttrumpf, H. (2022). Investigating the influence of sand-trapping fences on aeolian sediment transport and sediment accretion in coastal areas. *Frontiers in Built Environment*.
- Ellis, J. T., Sherman, J., Farrell, E. J., & Li, B. (2009). Temporal and spatial variability of aeolian sand transport: Implications for field measurements. *Aeolian Research*, *1*(3-4), 151-158.
- Frank, A., & Kocurek, G. (1996). Toward a model for airflow on the lee side of aeolian dunes. *Sedimentology*, *43*(3), 451-458.
- Garcin, M., Desprats, J. F., Fontaine, M., Pedreros, R., Attanayake, N., Gunasekara, K., Siriwardana, C. H. E. R. (2008). Integrated approach for the assessment of tsunami vulnerability: Application to the coastal zone of Sri Lanka. *Continental Shelf Research*, *28*(11), 1505-1518.
- Grafals Soto, R., & Nordstrom, K. F. (2009). Sand fences in the coastal zone: Intended and unintended effects. *Environmental Management*, *44*(3), 420-429. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9331-7>
- Guilcher, A. (1954). *Morphologie littorale et sous-marine*. Presses Universitaires de France.
- Hasnaoui-Slimani, A., Akziz, D., et al. (2024). Temporal changes in coastal dune vegetation in Algiers based on aerial photography [Rapport d'activité non publié].
- IPCC. (2019). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. Cambridge University Press.
- Itzkin, M., Moore, L. J., Ruggiero, P., & Hacker, S. D. (2020). The effect of sand fencing on the morphology of natural dune systems. *Geomorphology*, *352*, Article 106995. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106995>
- Jackson, P. S., & Hunt, J. C. (1975). Turbulent wind flow over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *101*(430), 929-955.
- Kawamura, R. (1951). Study of sand movement by wind. Report of the Institute of Science and Technology, University of Tokyo, *5*, 95-112.
- King, C. A. M. (1972). *Beaches and coasts*. Edward Arnold.

Références bibliographiques

- Kok, J. F., & Renno, N. O. (2009). A comprehensive numerical model of steady state saltation (COMSALT). *Journal of Geophysical Research*, 114, D17204.
- Larid, M. (2008). La zone côtière humide de Réghaïa dans le littoral Est Algérois (Algérie). Contribution méthodologique à son plan de gestion. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://journals.openedition.org/cybergeo/18852>
- Miossec, A. (2004). *Les littoraux entre nature et aménagement* (4e éd.). Armand Colin.
- Nordstrom, K. F., Jackson, N. L., & Korotky, K. H. (2011). Enhancing vegetation and dune formation in urban beach restoration. *Ecological Engineering*, 37(6), 955-963. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.007>
- Othmani, H. (2020). *Les falaises marines [Cours de 4ème année aménagement du littoral]*. École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
- Parsons, D. R., Walker, I. J., & Wiggs, G. F. (2004). Numerical modelling of flow structures over idealized transverse aeolian dunes of varying geometry. *Geomorphology*, 59(1-4), 149-164.
- Paskoff, R. (2004). *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution* (3e éd.). Armand Colin.
- CARR/ASP. (2015). Bilan diagnostic de la réserve naturelle de Réghaïa en Algérie. Rapport d'activité. Rapport technique. Tunis : Centre d'Activités régionale pour les aires spécialement protégées.
- Pirazzoli, P. A. (2000). Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanologica Acta*, 23(6), 643-661.
- Pritchard, D. W. (1967). What is an estuary: Physical view point. Dans G. H. Lauff (Éd.), *Estuaries* (pp. 3-5). American Association for the Advancement of Science.
- Psuty, N. P. (1988). Sediment budget and dune/beach interaction. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 3, 1-4.
- Ranwell, D. S. (1972). *Ecology of salt marshes and sand dunes*. Chapman and Hall.
- Schlacher, T. A., Thompson, L. M. C., & Price, S. (2007). Vehicles versus conservation of invertebrates on sandy beaches: Mortalities inflicted by off-road vehicles on ghost crabs. *Marine Ecology*, 28(3), 354-367. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2007.00176.x>
- Sherman, D. J., & Bauer, B. O. (1993). Dynamics of beach-dune systems. *Progress in Physical Geography*, 17(4), 413-447.
- Sherman, D. J., & Li, B. (2012). Predicting aeolian sand transport rates: A reevaluation of models. *Aeolian Research*, 3(4), 371-378.

Références bibliographiques

- Sunamura, T. (1992). *Geomorphology of rocky coasts*. John Wiley & Sons.
- Verger, F. (2005). *Zones humides du littoral français*. Belin.
- Walker, I. J., & Nickling, W. G. (2002). Dynamics of secondary airflow and sediment transport over and in the lee of transverse dunes. *Progress in Physical Geography*, 26(1), 47-75.
- Werner, B. T. (1995). Eolian dunes: Computer simulations and attractor interpretation. *Geology*, 23(12), 1107-1110.
- Wiggs, G. F., Livingstone, I., Thomas, D. S., & Bullard, J. E. (1996). Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the Kalahari Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(1), 19-34.
- UICN, (2012) : Conservation des dunes côtières : Restauration et gestion durables en méditerranée occidentale. [En ligne]. [Consulté le 04/03/2025].
- ONF, (2023) : le génie écologique au service de la gestion des dunes. [En ligne]. [Consulté le 06/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/%2B58d::le-genie-ecologique-au-service-de-la-gestion-des-dunes.html>
- Blond, N. (2024). Budget sédimentaire. *Geoconfluences*, ENS de Lyon [Consulté le 02/06/2025]. Disponible sur web : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/budget-sedimentaire>.
- Meur-Férec et Ruz, M. (2002). Transport éoliens réels et théoriques en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas- de Calais, France), vol. 8, n° 4, P 321-334.
- OMDM, (2024). Evolution du trait cote du littoral. [En ligne]. [Consulté le 06/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.omdm.fr/blog/actualites/evolution-du-trait-de-cote-du-littoral-omdm/>.
- European environment agency. (2022). Dune construction and strengthening Climate ADAPT. [En ligne]. [Consulté le 10/06/2025]. Disponible sur le web : <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/adaptation-options/dune-construction-and-strengthening>.
- Ecobalade (sans date). Chiendent des sables. [En ligne]. [Consulter le 04 /04/2025]. Disponible sur le web : <https://ecobalade.fr/espece/chiendent-des-sables>.
- Rajo. (2024). Erosion ou piétinement : quand les dunes s'écroulent. [En ligne]. [Consulté le 06/06/2025]. Disponible sur le web : <https://www.sur-la-plage.com/articles/erosion-ou-pietinement-quand-les-dunes-s-ecroulent-40.php>.
- Belarbi, R (2021). Cartographie direction du vent en mer méditerranée occidentale. Mémoire de master. Spécialité : conversion thermique. Université Saad dahleb de Blida faculté de Technologie. Page 65.

Références bibliographiques

De Sinety, M., Bourgeois, M., Giroux, M-E., (avril 2017) : Restauration dunaire et protection littoral des îles de la Madeleine 2016-2017. Rapport d'activité. Document non publié. Canada : Municipalité des îles de la Madeleine et partenaires.

Dubois, Jean-Claude. (1983). La restauration des dunes littorales de Gascogne.vol.hors-série, n°1, P.12.

Beltrando, G., Dahech, S et Madelin, M. (2008). L'intérêt de l'étude des brises thermiques : exemples des brises littorales et orographiques. Bulletin de la Société Géographique de Liège. Vol 51, P49-61.

ONF, (2019). Observation de la cote nouvelle-aquitaine. [En ligne].France [Consulté le06/06/2025].Disponible sur le web : <https://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/Comment-l-ONF-prend-soin-des-dunes-littorales-entre-chaque-saison-estivale>

Résumé

Ce travail traite de la dégradation du système dunaire de la plage d'El kadous fortement affecté par l'érosion côtière et les pressions anthropiques. Une étude des paramètres physiques du site (climat, vents, houle, courants et évolution du trait de côte) est réalisée, l'étude propose un protocole de restauration visant à rétablir l'équilibre de cet zone vulnérable. Ce protocole basé sur la reconstitution des dunes, la plantation des espèces végétalisées comme l'oyat, l'installation des dispositifs de protection (fascines, clôtures en ganivelles) et la gestion des flux touristiques.

L'objectif est de voir l'évolution de la zone littorale d'El Kadous ainsi d'expliquer la meilleure façon de gestion des dunes.

Mots clés : Plage El kadous, Restauration, érosion, système dunaire, Oyat.

Abstract

This work deals with the degradation of the dune system of El Kadous beach, which is severely affected by coastal erosion and anthropogenic pressures. A study of the physical parameters of the site (climate, winds, swell, currents and evolution of the coastline) is carried out, and the study proposes a restoration protocol aimed at re-establishing the equilibrium of this vulnerable area. This protocol is based on the reconstitution of dunes, the planting of vegetation species such as oyat, the installation of protective devices (fascines, ganivelle fences) and the management of tourist flows. The main aim is to restore the ecological balance and preserve this sensitive coastal zone.

Key words: el kadous beach, catering, erosion, dune system, oyat.

ملخص

يتناول هذا العمل تدهور نظام الكثبان الرملية في شاطئ القادوس الذي تأثر بشدة بالتآكل الساحلي والضغط البشرية. يتم إجراء دراسة للمعايير الفيزيائية للموقع (المناخ والرياح والأمواج والتيارات والتغيرات في الخط الساحلي)، وتقتصر الدراسة بروتوكول ترميم يهدف إلى إعادة التوازن لهذه المنطقة الضعيفة. ويستند هذا البروتوكول على إعادة تشكيل الكثبان الرملية وزراعة أنواع من النباتات مثل العياط، وتركيب أجهزة الحماية (اللفائف، وأسيجة الجانيفيل) وإدارة التدفقات السياحية.

الهدف الرئيسي هو استعادة التوازن البيئي والحفاظ على هذه المنطقة الساحلية الحساسة.

كلمات مفتاحية: شاطئ القادوس، الترميم، تآكل، انضمام الكثبان الرملية، نبات الاعويا.