

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

École 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  
d'état en sciences de la mer  
OPTION : Gestion et protection du littoral**

**Thème :**

**Etude de protection maritime frontale du bout de piste de  
l'aéroport de Béjaia (Algérie)**

Présenté par :

**CHELABI Amel**

Soutenu le 30/06/2022 devant le jury composé de :

Mme MAHDID S.	MAA, ENSSMAL	Présidente
Mr BELKESSA R.	Professeur, ENSSMAL	Promoteur
Mr OTMANI H.	MCB, ENSSMAL	Examinateur
Mme MOUHOUBI N-I	Docteur, LEM	Examinatrice

**Année universitaire : 2021-2022**

# *Remerciement*

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé, la force et la patience d'accomplir ce travail.

J'adresse des remerciements particuliers à monsieur BELKESSA R. pour la qualité son encadrement, sa grande disponibilité malgré toutes ses occupations, sa patience, sa gentillesse et ses conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion. J'ai eu la chance et le plaisir de travailler sous votre direction.

Je tiens également à exprimer ma respectueuse reconnaissance aux membres de Jury :

Madame MAHDID S. de m'avoir honoré de présider ce jury et apprécié la méthode de son enseignement, j'ai eu la chance de l'avoir comme enseignante de module de géologie dans ma première année universitaire.

Monsieur OTMANI H. d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail. Je le remercie également de m'avoir transmis son savoir avec largesse et patience.

Madame MOUHOUBI N-I d'avoir bien accepté de participer à ce jury et d'examiner ce manuscrit.

Je désire remercier tous les enseignants qui m'ont fourni les informations et outils nécessaires à la réussite de mes études ainsi qu'aux responsables et au personnel de l'école.

Un grand merci à ma famille, à ma chère sœur Radia en particulier pour son aide le long de ce travail.

J'exprime ma reconnaissance envers mes ami(e)s Batoul, Lina et Redouane pour leurs présence, soutien et aide.

Je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin au bon accomplissement de mon travail

# *Dédicace*

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, ma source d'amour, vos sacrifices, vos encouragements et votre patience m'ont toujours donné de la force pour continuer et prospérer dans la vie.

Merci d'être toujours là pour moi et pour mon bien être.

Mes grands-parents, qui m'ont accompagné le long de mon parcours scolaire par leurs prières que dieu vous accorde une longue vie pleine de bonheur, santé et prospérité.

Mes chers frères et sœurs qui m'ont encouragé et soutenu durant toutes ces années.

Mon cher oncle et tendre tante

Toute ma famille et mes proches

Mes amis, pour les souvenirs et les bons moments qu'on a vécu ensemble, à qui je souhaite beaucoup de réussite et de succès.

Tous ceux qui me sont chers

**Table des matières**

Liste des figures .....	iii
Liste des tableaux .....	v
Liste des abréviations .....	vi
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités .....</b>	<b>.....</b>
I. Problématique : .....	5
II. Situation géographique .....	5
II.1 Géographie et morphologie du site d'étude.....	6
II.1.1 Plage de Sidi Ali Labhar .....	6
II.1.2 Plage Club Hippique .....	7
III. Données géologiques .....	7
III.1 La tectonique .....	7
III.2 La sismicité.....	8
IV. Hydrologie .....	9
IV.1 Les bassins versants.....	9
IV.1.1 Les apports solides de l'oued Soummam.....	10
IV.1.2 Les apports liquides de l'oued Soummam .....	11
V. Couverture sédimentaire .....	11
VI. Morphologie sous-marine .....	12
VII. Conditions océanographiques .....	13
VII.1 Le vent .....	13
VII.2 La houle .....	14
VII.2.1 La houle au large .....	15
VII.2.2 La houle à la cote .....	16
VII.3 Les courants.....	18
VII.4 La marée et variations du niveau marin .....	18
VIII Changements climatiques.....	19
<b>Chapitre II : Etude hydromorphologique.....</b>	<b>.....</b>
I. Introduction.....	23
II. Logiciels utilisés .....	23
II.1 Mike 21 .....	23
II.2 Google Earth Pro : .....	24
II.3 ArcGIS 10.8 :.....	24

---

II.3.1	L'extension DSAS : .....	25
II.4	Surfer : .....	26
III.	Etude bathymétrique .....	26
III.1	Méthodologie.....	26
III.2	Résultats et discussions .....	29
III.2.1	Etude des profils bathymétriques : .....	32
III.2.2	Etude de la réfraction de la houle : .....	32
IV.	Evolution du trait de côte .....	35
IV.1	Méthodologie : .....	35
IV.2	Résultats et discussions : .....	36
<b>Chapitre III : Aménagement du littoral.....</b>		
I.	Introduction.....	40
II.	Solutions d'aménagement .....	40
II.1	Dimensionnement.....	40
II.2	Variante 1 : digue frontale en enrochements .....	42
II.3	Variante 2 : brise lame émergé : .....	43
II.3.1	Résultats des simulations : .....	44
II.4	Brise-lames immergés en géotubes : .....	45
III.	Comparaison des variantes proposées : .....	46
III.	GIZC .....	46
Conclusion générale .....		51
Références bibliographiques .....		53
Annexes .....		57

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Situation de la wilaya de Béjaia .....	5
<b>Figure I.2:</b> Localisation du site d'étude .....	6
<b>Figure I.3:</b> Situation du site d'étude par rapport aux plages Sidi Ali Lebhar et Club Hippique7	
<b>Figure I.4:</b> Situation de la marge algérienne et principales limites structurales d'une partie de la Méditerranée occidentale .....	8
<b>Figure I.5:</b> Carte de zonage sismique du territoire national .....	9
<b>Figure I.6:</b> Carte des bassins versants et des sous bassins de Béjaia .....	10
<b>Figure I.7:</b> Carte de répartitions spatiale de la médiane (D50) dans la partie Est de l'aéroport .....	12
<b>Figure I.8:</b> Roses trimestrielles et annuelle des vents au large des côtes de Béjaia.....	14
<b>Figure I.9:</b> Conditions des houles au large du littoral de Bejaia .....	14
<b>Figure I.10:</b> Carte océanographique générale du littoral de Béjaia.....	18
<b>Figure I.11:</b> Elévation du niveau des mers par rapport à la période 1986– 2005 .....	20
<b>Figure II.1:</b> Interface du Mike 21 .....	23
<b>Figure II.2:</b> Interface de Google Earth Pro .....	24
<b>Figure II.3:</b> Interface d'ArcGIS .....	25
<b>Figure II.4:</b> Interface du Surfer .....	26
<b>Figure II.5:</b> Carte du positionnement des 2611 points levés par le LEM .....	27
<b>Figure II.6:</b> Maillage du MeshGenerator sous Mike 21 .....	28
<b>Figure II.7:</b> carte représentant les trois directions dominantes.....	28
<b>Figure II.8:</b> Carte bathymétrique près du rivage de l'aéroport de Bejaia réalisée sous Mike 21 à partir des données du LEM.....	30
<b>Figure II.9:</b> Carte bathymétrique près du rivage de l'aéroport de Bejaia réalisée sous ArcGIS 10.8 à partir des données du LEM.....	30
<b>Figure II.10:</b> Carte bathymétrique près du rivage de l'aéroport de Bejaia en 3D réalisée sous Surfer à partir des données du LEM.....	31
<b>Figure II.11:</b> Profils transversaux du site réalisés sous Surfer à partir de la carte bathymétrique.....	32
<b>Figure II.12:</b> Epure de la réfraction de la houle annuelle direction 20° N incidente à la piste de l'aéroport de Béjaia .....	33
<b>Figure II.13:</b> Epure de la réfraction de la houle annuelle direction 45° N incidente à la piste de l'aéroport de Béjaia .....	33

---

<b>Figure II.14:</b> Epure de la réfraction de la houle annuelle direction 60° N incidente à la piste de l'aéroport de Béjaia .....	34
<b>Figure II.15:</b> Vecteurs Baseline et Shorelines.....	36
<b>Figure II.16:</b> Carte d'évolution du trait de côte entre 2006 et 2020 et de variations d'EPR au niveau du bout de piste de l'aéroport de Béjaia .....	37
<b>Figure II.17:</b> Variation d'EPR du trait de côte entre 2006 et 2020 au niveau du bout de piste de l'aéroport de Béjaia .....	37
<b>Figure III.1:</b> Epure de réfraction de la houle 20° N au rivage de l'aéroport de Béjaia avec implantation d'un brise lame .....	44
<b>Figure III.2:</b> Epure de réfraction de la houle 45° N au rivage de l'aéroport de Béjaia avec implantation d'un brise lame .....	44
<b>Figure III.3:</b> Epure de réfraction de la houle 20° N au rivage de l'aéroport de Béjaia avec implantation d'un brise lame .....	45
<b>Figure III.4:</b> Carte d'impacts d'oued Soummam sur les ouvrages de protection dans le golfe de Béjaia.....	47
<b>Figure III.5 :</b> Carte d'impacts des épis de Sidi Ali Lebhar et du point d'immersion des sédiments dans le golfe de Béjaia .....	47
<b>Figure III.6 :</b> Carte d'impacts de quelques ouvrages de protection dans le golfe de Béjaia ..	48

**Liste des tableaux**

**Tableau I.1** : Le débit moyen annuel des affluents de l'oued Soummam

**Tableau I.2** : Fréquences mensuelles des houles au large selon cinq (5) directions

**Tableau I.3** : L'état de la mer

**Tableau I.4** : Fréquence par direction des différents états de la mer au large

**Tableau I.5** : Les résultats de l'étude de la réfraction de la houle

**Tableau II.1** : Statistiques Calculés par DSAS

**Tableau II.2** : Les coordonnées des stations de référence

**Tableau II.3** : Conditions des houles (annuelles) moyennes

**Tableau II.4** : Conditions des houles extrêmes

**Tableau II.5** : Conditions des houles moyennes annuelles à la profondeur (-5) m

**Tableau II.6** : Conditions des houles extrêmes 20 et 50 ans à -10m et à (-5) m

**Tableau II.7** : Classification des traits de côte basée sur l'EPR

**Tableau III.1** : Comparaison des variantes proposées

**Tableau III.2** : Significations et caractéristiques des éléments des cartes

**Liste des abréviations**

CNL : Commissariat National du Littoral

CRAAG : Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique

DSAS: Digital Shoreline Analysis System

Esri: Environmental Systems Research Institute

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GIZC : Gestion Intégrée des Zones côtières

GPS: Global Positioning System

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

Kg: Kilogramme

Km: kilomètre

LCHF : Laboratoire de Conception Hydraulique Français

LEM : Laboratoire D'études Maritimes

M : mètre

NGA : Nivellement Général Algérien

POR : Piste Occasionnellement Roulable

RCP : Representative Concentration Pathway

RPA : Règles Parasismiques Algériennes

SIG : Système d'Information Géographique

SSMO: Summary of Synoptic Meteorological Observations

SW: Spectral waves

USGS: United States Geological Survey

UTM: Universal Transverse Mercator

WGS: World Geodetic System

ZH : Zéro Hydrographique

# **Introduction générale**

Selon le grand robert, « le littoral est ce qui est relatif à la zone de contact entre la terre et la mer. Ce même dictionnaire cite Emmanuel de Martonne : « le domaine des formes littorales n'est pas seulement la ligne idéale qui sépare, sur les atlas et les cartes à petite échelle, la terre ferme de la mer. Sur le terrain, il apparaît clairement que le domaine littoral comprend tout ce qui, soit au-dessous, soit au-dessus du niveau moyen des eaux, est soumis à l'action des forces responsables du tracé de la côte et de ses changements... La ligne de rivage est déterminée par le relief particulier de la zone littorale » (**Pumain, 2004**).

Les zones littorales et côtières représentent des zones où les enjeux écologiques et humains sont forts. En plus des conditions hydrodynamiques (houles, courants, ...) qui agissent sur la géomorphologie littorale, la présence envahissante de l'homme et l'anthropisation des rivages accélèrent les tendances d'évolutions qui mènent à d'autres interventions de l'homme en implantant des ouvrages de protection qui peuvent avoir d'autres impacts soient négatifs et même accélérer le phénomène d'érosion (**Bouhmadouche, Hemdane 2016**).

La région méditerranéenne a toujours été un lieu d'intenses activités humaines. La mer Méditerranée et son littoral recèlent de nombreuses ressources développées dans la région et sont des moteurs du commerce. Elle est une zone maritime relativement petite et fermée avec un accès limité aux bassins océaniques et d'une grande variété d'écosystèmes sensibles. Ces caractéristiques, combinées à la complexité politique de la région, font que la gestion et la protection de l'environnement marin et côtier nécessiteront des réglementations et des accords environnementaux multilatéraux validés à un niveau international (**UNEP, 2017**).

La connaissance du littoral en tant que système est nécessaire pour répondre aux différents questionnements posés dans la problématique.

La côte bougiote est sujette à l'érosion, causée localement par les activités humaines. De nombreuses études ont été faites sur ce problème et de nombreuses solutions ont été proposées, mais le problème s'aggrave avec le temps.

La section du rivage allant de Sidi Ali Lebhar au Club Hippique située au golfe de Béjaïa a subi dans le passé une érosion importante avec le recul du trait de côte.

Des investissements dans le but de protéger les terrains proches du rivage ont été consentis dans le passé à des périodes différents. Par conséquent, leur influence n'a pu être maîtrisée.

Une des conséquences de ces érosions qui se décalent vers l'Est, la protection provisoire du bout de piste de l'aéroport a subi dernièrement des affaissements menaçant le POR de la piste.

Une protection adéquate de ce site doit se mettre en place, son étude est donc classée prioritaire.

L'étude présente vise principalement la protection contre la mer du rivage attenant le bout de piste de l'aéroport de Bejaia. En effet, étant un site porteur d'enjeux et d'intérêt exceptionnel, la réponse face aux risques maritimes (franchissement et érosion) qui menacent le bout de piste en question est de construire des ouvrages de défense contre la mer.

Dans cette vision, cette étude sera cernée en trois (3) principaux chapitres

Le premier chapitre présente des généralités qui décrivent les caractéristiques générales : géomorphologiques, sédimentologiques, océanographiques et météorologiques de la zone d'étude.

Le second chapitre porte sur une étude hydromorphologique du site d'étude : étude de la bathymétrie locale, simulation de la réfraction de houles et évolution du trait de côte.

Le troisième et dernier chapitre est destiné à la présentation des solutions proposées, le choix de la variante qui semble adéquate et une partie concernant l'impact des ouvrages installés au long du golfe de Béjaia sur son évolution.

# **Chapitre I**

## **Généralités**

## I. Problématique :

L'aéroport de Béjaïa « ABANE Ramdane » se situe à environ 5 km au Sud de la ville de Béjaïa, il est construit en bordure de mer et dispose d'une piste orientée d'Ouest en Est d'une longueur de 2 400 m. La mer limite donc cette piste à l'Est et lui fait encourir les effets sous évoqués. La côte en général est sujette à un phénomène d'érosion (recul) et le bout de piste à des franchissements récurrents de la houle.

Les franchissements de vagues constatés, avec éjection de pierres, constituent un risque évident pour les appareils manœuvrant sur la raquette proche du POR (Prolongement de la piste, déclaré « utilisable » par l'administration de l'aérodrome, sur lequel l'avion peut s'arrêter en cas d'accélération arrêt. Il est aménagé de manière à supporter le poids de l'avion, sans lui occasionner des dommages de structure).

La section du terre-plein en prolongement du POR sur la mer, présente des affaissements importants, dus vraisemblablement au départ de sable au pied de l'ouvrage de protection provisoire. Ces affaissements constituent des points fragiles de la carapace qui favorisaient une érosion de la section (départ d'enrochement) et menaceraient le POR.

## II. Situation géographique :

Béjaïa est une wilaya côtière de la partie orientale de l'Algérie, septentrionale à 200 Km à l'Est de la capitale. Le golfe de Béjaïa. Le golfe de Béjaïa s'étend sur 70 km de côtes entre Cap Carbon à l'ouest et Cap Ziama Mansouria (Jijel) à l'est (Djouder, Makhoulouf, 2017). Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par les wilayas de Bordj-Bou Arreridj et de Sétif, à l'Est par la wilaya de Jijel et à l'Ouest par les wilayas de Bouira et de Tizi-Ouzou.

(Figure I.1)

Longitude : 05° 04' Est

Latitude : 36° 45' Nord

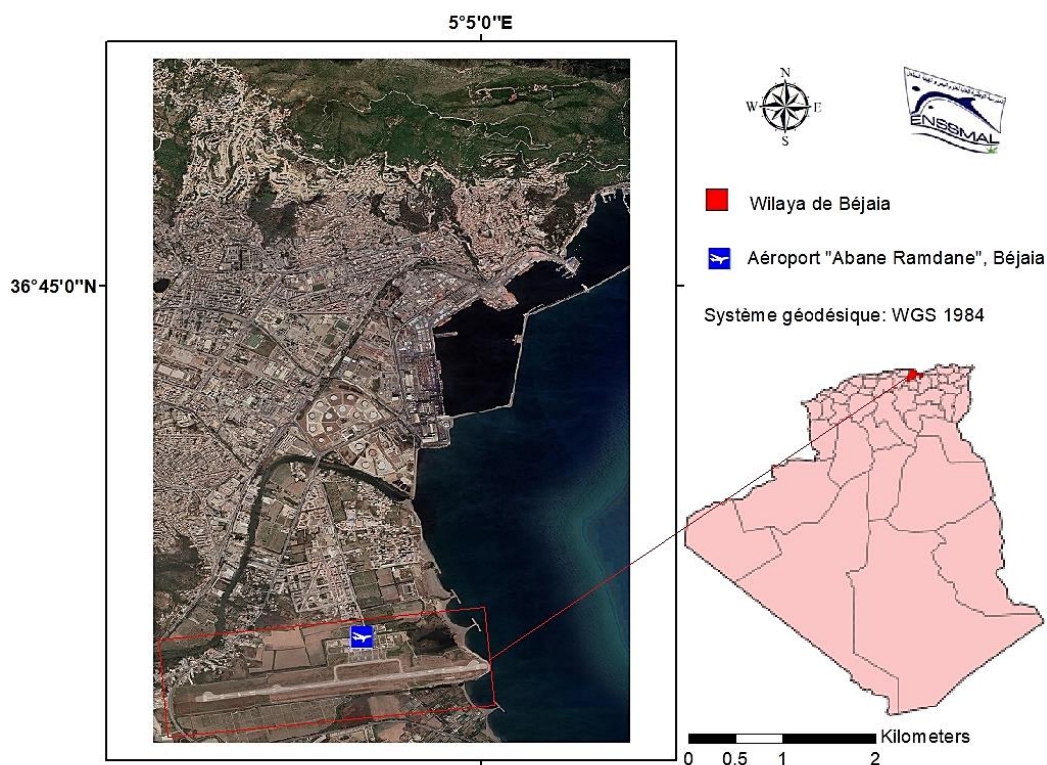


Figure I.1: Situation de la wilaya de Béjaïa (ighilali.free.fr)

## II.1 Géographie et morphologie du site d'étude :

L'aéroport de Béjaia ( $36^{\circ}42'43''\text{N}$   $05^{\circ}04'10''\text{E}$ ) (**Figure I.2**), baptisé ABANE Ramdane, a été inauguré en 1982 en vols nationaux et en 1993 en vols internationaux.

Le site d'étude fait partie de la côte Ouest du golfe de Bejaia, celle-ci se caractérise par une morphologie remarquable, formée essentiellement d'une longue et belle côte sableuse (50 Km). La largeur des plages est toutefois moins importante à l'Ouest qu'à l'Est de la baie. La cote à cet endroit est orientée sensiblement Nord-sud, le cap Carbon l'abrite des agitations venant de l'Ouest, du Nord-Ouest et à un certain degré ceux venant du Nord. Elle fait néanmoins face à ceux qui viennent des secteurs Nord-est et Est.



**Figure I.2:** Localisation du site d'étude (SAS.planet 2022)

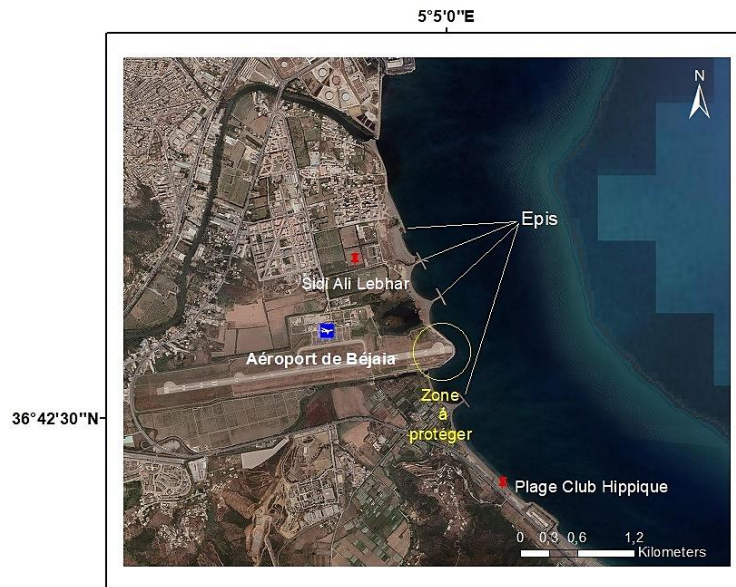
La présence de deux plages à proximité de l'aéroport affecte le bout de piste d'atterrissage et provoque certains problèmes majeurs qui sont les suivant :

### II.1.1 Plage de Sidi Ali Labhar :

Elle est située à l'est de l'enracinement de la jetée sud du port de Béjaia et s'étend sur une longueur d'environ 800 m et une largeur de 60 m ; elle est formée de sables bioclastiques fins à moyens et de petits galets. Elle comporte trois ouvrages mixtes de protection de type double épi « Épis en T » (**Figure I.3**). L'installation de ces épis bloque le transit sédimentaire au nord du site d'étude ce qui entraîne l'arrivée de sédiments sur la piste.

### II.1.2 Plage Club Hippique :

Elle est située immédiatement au Sud de la piste d'atterrissage, cette plage s'étale sur une longueur de plus de 800 m. Elle est sujette à une érosion qui se traduit localement par le recul du trait de côte qui a atteint des proportions alarmantes d'environ 80m menaçant même la route nationale n°09 (RN 9). Cette érosion provoque des franchissements de vagues sur le site et des flaques d'eau apparaissent au sud de la piste d'atterrissage.



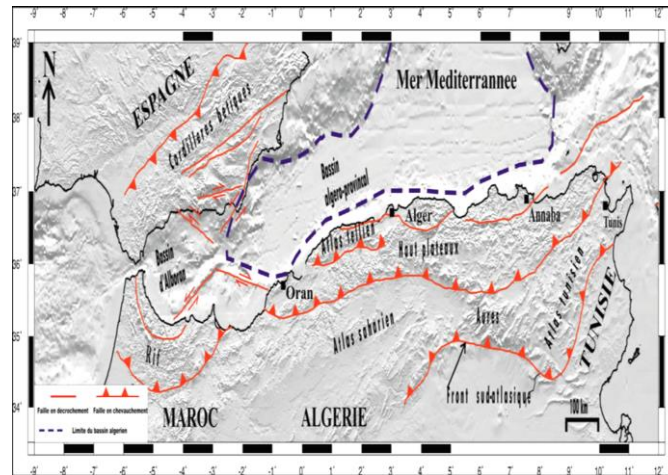
**Figure I.3:** Situation du site d'étude par rapport aux plages Sidi Ali Lebhar et Club Hippique (SAS.planet 2022)

## III. Données géologiques :

### III.1 La tectonique :

La marge algérienne fait partie de la Méditerranée occidentale (**Figure I.4**). Dans cette région on reconnaît les provinces géologiques suivantes (**Kherroubi, 2011**) :

- Le bassin d'Alboran, de direction NW-SE, constitué de deux sous bassins séparés par la ride d'Alboran.
- Le bassin algéro-provençal Nord comprenant la mer Ligure, le Golfe de Lion et le Golfe de Valence.
- Le bassin algéro-baléare comprenant le bassin Algérien.



**Figure I.4:** Situation de la marge algérienne et principales limites structurales d'une partie de la Méditerranée occidentale (**Kherroubi, 2011**)

Dans la région de Béjaïa, deux unités géologiques ont été mises en évidence (**LEM, 2020**) :

- Le synclinorium de la région littorale Ouest,  
Cette région a connu plusieurs phases tectoniques :
  - > Des failles (N70°) post- oligocènes découpant l'ensemble du synclinorium en compartiment disposés en gradins effondrés du Sud vers le Nord.
  - > Un grand accident Sud-ouest - Nord Est qui cisaille les anticlinaux des Djebels Arbalou et Gouraya, il est daté du pliocène.
- Le sillon de la vallée de la Soummam.

Ce sillon subsident est axé parallèlement sur le cours de l'oued Soummam entre Bouira et Sidi Aich, il est affecté par une faille longitudinale d'un rejet moyen de 800 m, ce sillon est essentiellement formé par accumulations grés-argileuses du miocène, surtout dans sa partie aval.

### III.2 La sismicité :

En Algérie, cinq (05) zones sont définies en fonction de leur sismicité croissante (**RPA, 2003**):

- Zone 0 : sismicité négligeable.
- Zone I : sismicité faible
- Zone II (II a – II b) : sismicité moyenne
- Zone III : sismicité élevée.

La sismicité au niveau de la zone littorale engendre un soulèvement de la côte.

La région de Bejaia est classée en zone II a d'après la carte de zonage sismique du territoire national (**Figure I.5**).

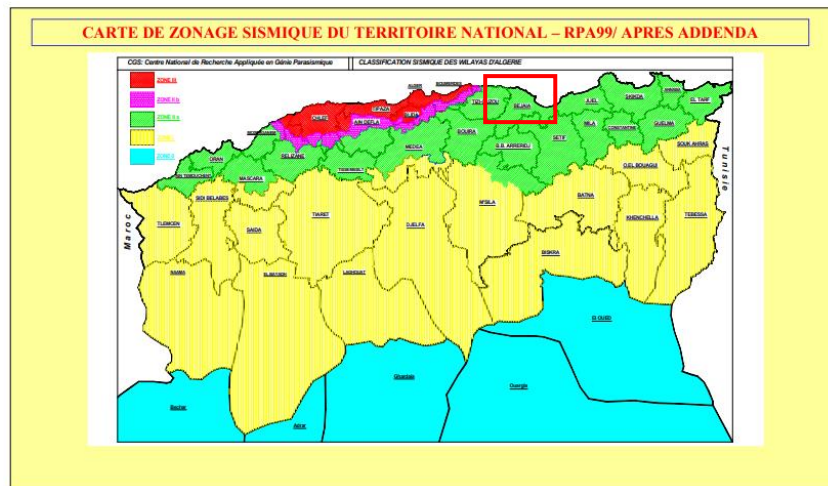


Figure I.5: Carte de zonage sismique du territoire national (PRA, 2003)

#### IV. Hydrologie :

##### IV.1 Les bassins versants :

Le bassin versant est l'ensemble des territoires superficiels et souterrains qui se drainent vers le même exutoire (Ould fah, 2016).

Le territoire de la wilaya de Bejaia est le résultat d'un enchevêtrement de trois grands massifs montagneux : le Djurdjura, les Babors et les Bibans. Plus de 75% de son territoire est montagneux avec un système de pentes très accentué.

Cette situation conjuguée avec une pluviométrie relativement abondante par rapport au territoire national a engendré un réseau hydrographique dense et important. Ce dernier est organisé autour de trois bassins versants dont le plus important est celui de la Soummam (Ramsar, 2018).

La zone littorale est concernée par :

- Le bassin versant des côtiers Algérois- Est

Ce bassin est représenté au niveau de la wilaya de Bejaia par le sous bassin des côtiers de Cap Sigli, qui correspond essentiellement au territoire des communes de Béni-Ksila, Toudja, Bejaia, Adekar et Taourirt Ighil.

Il est drainé par les oueds : Assif El Hammam, Saket, Fildoun et S'Karrou.

- Le sous bassin de l'oued Soummam maritime

Ce sous bassin couvre principalement le territoire des communes de : Chelata, Ouzellaguen, Chemini, Akfadou, Tifra, Tinebdar, Tibane, Sidi Aich, Souk Oufella, Ifelain Ilmathen, Leflaye, Sidi Ayad, El Kseur, Oued Ghir, Amalou, Seddouk, Sidi Said, Timezrit, Beni Djellil, Semaoun, Feraoun, Barbacha, Amizour et Tala Hamza. Il est drainé par l'oued Soummam, lui-même

alimenté par de nombreux affluents, parmi eux, les oueds : Ghir, Amizour, Beni Melikech, Seddouk, Bou-Sellam, Amassine.

- Le bassin versant des côtiers Constantinois-ouest

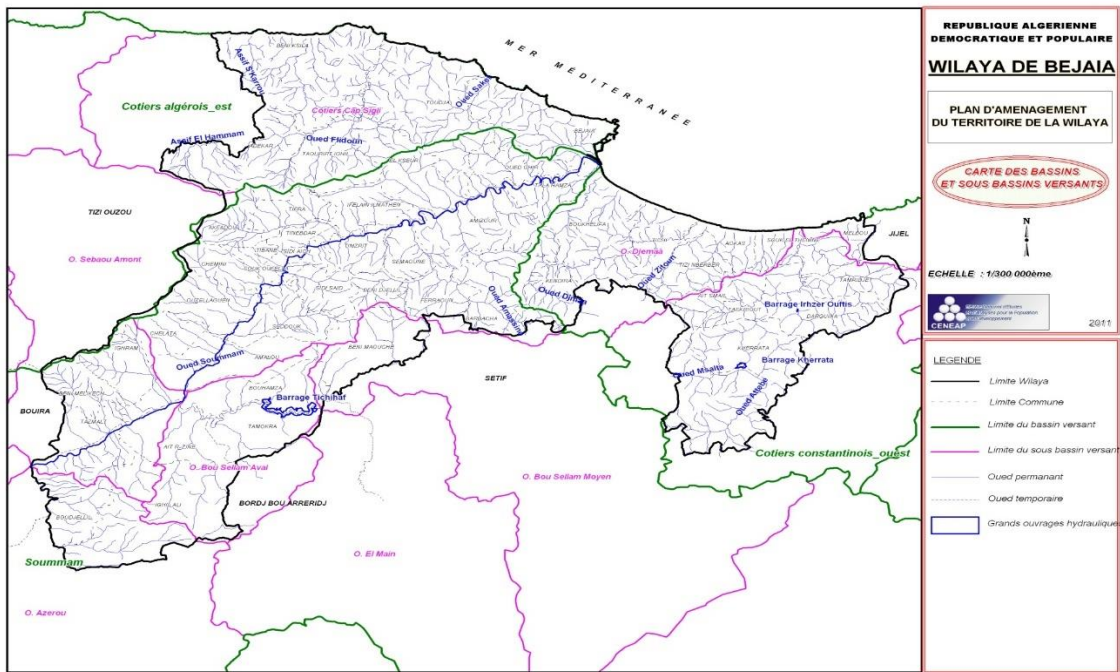
Il représente la partie Est de la wilaya, qui est répartie en sous bassins :

- Le sous bassin de l’oued Djemaâ

Ce sous bassin correspond au territoire des communes de Boukhelifa, Tichy, Aokas, Souk El Tenine, Kendira et Tizi Nberber. Il est drainé par une multitude de petits oueds côtiers, dont les principaux sont les oueds Djemâa et Zitoun.

- Le sous bassin des côtiers Jijeliens

Ce sous bassin est concerné uniquement par le territoire de la commune de Melbou.



**Figure I.6:** Carte des bassins versants et sous bassins de Béjaia (Miclait, 2018)

Les principaux oueds exoréiques de la wilaya de Bejaia sont d’Ouest en Est : l’oued Dass, l’oued Soummam, l’oued Djemaa, l’oued Zitouna, et l’oued Agrioun, ce dernier avec la Soummam sont des cours d’eau permanents.

**IV.1.1 Les apports solides de l’oued Soummam :**

L’analyse des résultats existants sur les transports solides pour l’oued Soummam des jaugeages effectués à la station de Sidi Aich entre 1973 et 1993 montre que les débits solides charriés par l’oued Soummam ont atteint un maximum qui dépasse 6000m<sup>3</sup>/an durant les deux années 1973 et 1974, ces valeurs témoignant du rôle que joue les crues fréquentes de l’Oued Soummam et de l’importance de leurs forces dans la mobilisation des apports. L’analyse de

l'histogramme des moyennes mensuelles des débits solides a révélé que les valeurs les plus élevées sont enregistrées durant les mois de Mars, Aout et Octobre alors que les plus faibles enregistrements sont observés durant le mois de Juillet ( $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### IV.1.2 Les apports liquides de l'oued Soummam :

Le bassin versant de l'oued Soummam est drainé par un réseau hydrographique dense composé de nombreux cours d'eau permanents et intermittents dont l'oued Soummam représente le collecteur principal. L'apport principal provient des affluents de la rive gauche, avec un total moyen de 68 millions  $\text{m}^3/\text{an}$ , et les affluents de la rive droite déversent un total moyen de 25 millions  $\text{m}^3/\text{an}$ . Les affluents de la rive gauche étant situés sur des versants plus arrosés en pluies et en neige, leur permettant canaliser un écoulement de surface plus important que celui des versants drainés par les affluents de la rive droite.

**Tableau I.1** : Le débit moyen annuel des affluents de l'oued Soummam (**Ramsar, 2006**).

	Affluents de l'oued Soummam	Superficie du bassin versant ( $\text{km}^2$ )	Débits moyens ( $\text{m}^3/\text{an}$ )
Rive gauche	Oued Sahel	3800	-
	Oued Illoula	40	$4 \times 10^6$
	Oued Ighzer Amokrane	80	$12 \times 10^6$
	Oued Remila	100	$28 \times 10^6$
	Oued El Kseur	55	$12 \times 10^6$
	Oued Ghir	50	$12 \times 10^6$
Rive droite	Oued Boussellam Oued	4300	-
	seddouk	125	$10 \times 10^6$
	Oued Amassine	195	$15 \times 10^6$
	Oued Amizour	55	-

#### V. Couverture sédimentaire :

Il existe dans le golfe de Bejaia trois faciès principaux (**Leclaire, 1972**) : les sables et sablons siliceux, les vases et les boues, la roche. Les sablons siliceux occupent tout le fond du golfe, de la côte jusqu'à 30-40m de profondeur. Dans le secteur de l'oued Soummam, les fonds de sables et sablons sont beaucoup plus étendus. On distingue donc :

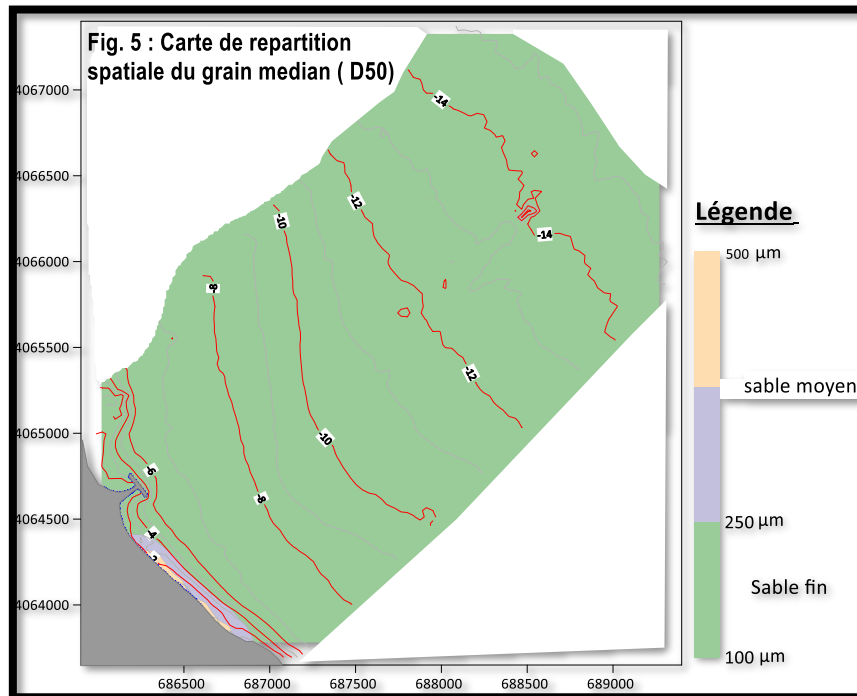
**Les sédiments calcaires** : Les sables, graviers et les vases calcaires siliceuses ; on retrouve ces faciès dans les deux extrémités de la baie.

**Les sédiments siliceux** : Ce sont les dépôts qui caractérisent la sédimentation dans cette région, car ils représentent le plus important pourcentage du recouvrement sédimentaire et de son

rebord. Les sables et sablons siliceux, les vases silico-calcaires, les boues silico-argileuses et les vases silico-argileuses.

**Les sédiments argileux :** L'unique faciès des sédiments argileux dans cette région sous-marine kabyle est représenté par les boues argilo-siliceuse.

Les résultats de l'étude sédimentologique (granulométrique) des sédiments des élaborée dans le cadre du PAC de Bejaia montrent que d'une manière générale les sédiments ont des tailles moyennes (Mz) allant de la gamme des fines à celles des tailles moyennes.



**Figure I.7:** Carte de répartitions spatiale de la médiane (D50) constatée dans la partie Est de l'aéroport (LEM, 2019)

## VI. Morphologie sous-marine :

L'étude de la morphologie sous-marine effectuée dans le cadre de l'étude du PAC de Bejaia réalisé par le LEM en 2016 en se basant sur la carte bathymétrique de **Leclaire (1972)** a permis de conclure de ce qui suit.

- Le plateau continental est très étroit au niveau de la partie Nord-Ouest du littoral de Bejaia (communes côtières de Beni Ksila et Toudja). Par ailleurs, le littoral Sud-Est du Bejaia se caractérise par un plateau continental assez large atteignant (ou dépassant) par endroits des largeurs d'environ 9 km ;
- Au niveau des caps et des promontoires, les isobathes tendent à se resserrer pour atteindre des pentes très abruptes (cap Sigli) ;

- La disparité observée au niveau de la morphologie sous-marine du littoral de Bejaia peut influencer l'effet des vagues à la côte. En effet, les pentes marines douces permettent aux vagues de se dissiper sur les hauts fonds, tandis que les pentes sous-marines abruptes laissent les vagues déferler directement (ou presque) sur la côte.
- Les pentes sous-marines douces sont principalement observées au niveau des petits fonds des communes côtières de Boukhelifa et du NE de Tichy.

## VII. Conditions océanographiques :

### VII.1 Le vent :

L'agitation de l'atmosphère par le vent fournit de l'énergie à l'océan par frottement (cisaillement à l'interface air-mer) pour générer des vagues. Ainsi, le vent est la cause originelle de tout transport sédimentaire associé à la houle et à la dérive littorale (**Mouyalou, 2017**).

L'observation de données de Summary of Synoptic Meteorological Observations (S.S.M.O) enregistrées entre 1963 à 1970 (zone centre) montre une répartition similaire (ou presque) pour les trois trimestres (hiver, printemps et automne) où la prédominance des vents issus des secteurs W et NW est notée avec des fréquences respectives de 29% et 7%. Les directions N, E et NE sont aussi fréquentes mais avec des fréquences relativement faibles. Une grande partie des vents issus de ces secteurs ont des vitesses supérieures à 8 m/s. Pour le troisième trimestre (estival), les directions de vent suscitées existent toujours, mais avec une nette prédominance des vents issus des secteurs E et NE avec des fréquences respectives de 31% et 22 %.

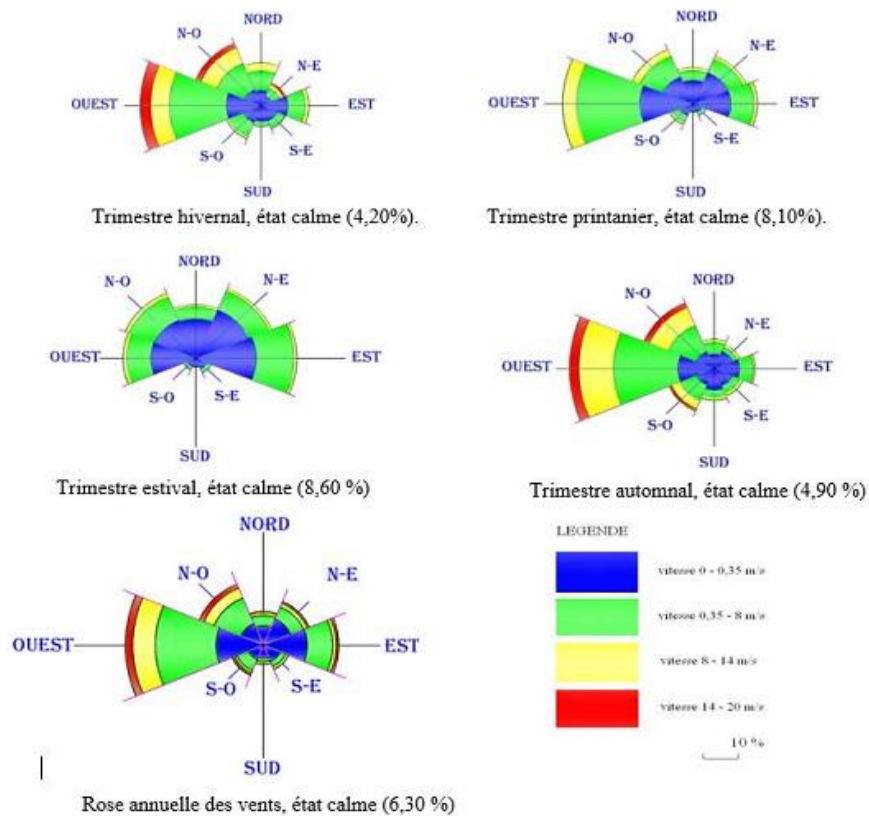


Figure I.8: Roses trimestrielles et annuelle des vents au large des côtes de Béjaia (Aoudj, Bouaziz, 2014)

VII.2 La houle :

La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui est formé par un champ de vent éloigné de la zone d'observation (vent lointain) (Mezouar, 2020).

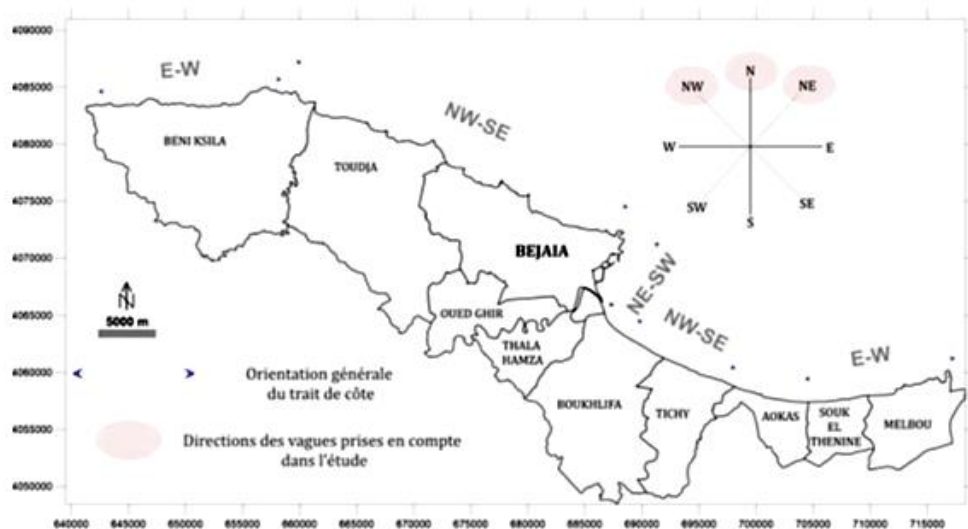


Figure I.9: Conditions des houles au large du littoral de Bejaia (Mezhoud, Aoudj, Houma-Bachari, 2017)

### VII.2.1 La houle au large :

Les données de la houle au large sont basées sur les observations faites à bord de navires (S.S.M.O). Les données sont reprises à partir du document de l'U.S Naval Weather Command. Ces observations s'étalent sur la période de 8 ans (1963 à 1970) et couvrent la zone au large des côtes Algériennes (centre) qui se situe entre 2° et 6° de longitude Est et 36.5° et 38° de latitude Nord. Les résultats des observations de la houle effectuées au large des côtes algériennes sont donnés ci-après, sous forme de roses des houles pour chaque trimestre et pour toute l'année (Idris, Saidani, 2021).

**Tableau I.2** : Fréquences mensuelles des houles au large selon cinq (5) directions (SSMO, 1963-1970)

Mois	Nord	Nord-Est	Est	Ouest	Nord-Ouest
<b>Janvier</b>	11.50	7.20	16.40	30.80	14.00
<b>Février</b>	8.40	6.00	12.40	39.60	14.5
<b>Mars</b>	8.50	5.50	12.90	35.50	20.40
<b>Avril</b>	6.40	8.80	15.20	39.40	18.60
<b>Mai</b>	8.60	15.90	17.30	31.70	13.10
<b>Juin</b>	10.10	15.30	19.50	30.10	14.60
<b>Juillet</b>	12.30	19.80	22.50	20.10	17.10
<b>Aout</b>	12.40	19.90	24.90	18.50	16.90
<b>Septembre</b>	12.00	14.20	29.20	17.70	15.80
<b>Octobre</b>	8.20	11.00	19.00	30.40	11.10
<b>Novembre</b>	4.20	3.60	7.90	40.10	19.60
<b>Décembre</b>	6.70	4.50	6.00	38.60	19.20

- Les houles de l'Ouest, de l'Est et du Nord-Ouest sont les plus fréquemment observées avec des fréquences de 40,1% ; 29,20% et 20,40% respectivement .
- Sur une phase annuelle, les houles d'Ouest sont prédominantes avec une fréquence de 40,1%.
- Les houles des secteurs Nord et Nord-Est sont les moins observées avec des fréquences de 4,20% et 3,60% respectivement.

**Tableau I.3 : L'état de la mer (SSMO, 1963-1970)**

Degré	Amplitudes en mer	Etat de la mer
<b>Calme</b>	< 0.25	Ridée ou belle
<b>0</b>	0.25-0.75	Ridée ou belle
<b>1</b>	0.75-1.75	Modérée
<b>2</b>	1.75-2.75	Agitée
<b>3</b>	2.75-3.75	Forte
<b>4</b>	> 3.75	Très forte ou supérieure

**Tableau I.4 : Fréquence par direction des différents états de la mer au large (LEM, 2020)**

Etat de la mer au large (degré)	Ouest	Nord-Ouest	Nord	Nord-Est	Est
<b>Calme</b>	2.9%	1.1%	2.0%	2.7%	4.0%
<b>0</b>	6.2%	2.0%	2.9%	7.0%	9.3%
<b>1</b>	10.9%	2.7%	2.6%	7.5%	9.1%
<b>2</b>	4.3%	0.6%	0.7%	1.20%	0.9%
<b>3</b>	0.9%	0.1%	0.1%	-----	0.10
<b>4</b>	0.3%	-----	-----	-----	----

La lecture du tableau I.3 permet de déduire :

- L'agitation provenant du secteur Ouest et du secteur Est est la plus fréquente, néanmoins pour les fortes houles, le secteur Ouest prédomine,
- Pour le secteur Nord et Nord-Ouest, par contre les fréquences d'apparition sont faibles,
- Les houles de tempête proviennent essentiellement du secteur Ouest.

### VII.2.2 La houle à la côte :

Dans le cas des ouvrages côtiers, il faut tenir compte des effets sur la houle incidente, de la diminution des hauteurs d'eau et de la forme des côtes. Ces facteurs entraînent la transformation de la houle incidente à cause des phénomènes de réfraction, de shoaling, de diffraction et finalement de déferlement de la houle.

**Réfraction :** La réfraction caractérise les changements de direction et de vitesse qui interviennent lors de la propagation d'une onde dans un milieu hétérogène à variation lente ou lorsqu'elle franchit une discontinuité. Quand les fonds remontent ( $d < L/2$ ), la direction de

propagation de la houle tend à s'orienter suivant la ligne de plus grande pente. Les crêtes des vagues ont tendance à se disposer parallèlement aux isobathes (Salhi, Talanzar, 2018).

**Shoaling** : c'est le phénomène de gonflement de la houle (phénomène de levée). Il se produit lorsque la houle du large aborde des profondeurs inférieures à la moitié de sa longueur d'onde (Aoudj, Bouaziz, 2014).

**Diffraction** : le changement dans la direction de propagation d'onde (contournement d'un obstacle) en l'absence de toute variation de la vitesse de propagation est appelé diffraction de la houle.

**Déferlement** : phénomène entraînant la dissipation de l'énergie de la vague à l'approche du fond (Otmani, 2020).

Donc, l'orientation du trait de côte est un des facteurs naturels intervenant dans la modulation de l'impact des vagues et des houles à la côte.

En raison de l'orientation générale NW-SE du trait de côte du littoral de Bejaia, les secteurs des vagues, houles et vents qui impactent les littoraux de la région sont ceux du N, NE, et ENE. Toutefois, l'observation plus détaillée de la morphologie côtière relative au littoral de Bejaia montre une certaine disparité au niveau de l'orientation du trait de côte. A titre d'exemple, les littoraux des communes côtières de Boukhelifa et du SE de Bejaia sont respectivement orientés NW-SE et NE-SW (Mezhoud et al, 2016).

**Tableau I.5** : Les résultats de l'étude de la réfraction de la houle (L.E.M, 1998).

Direction en degrés	Période (s)	Coefficient de réfraction (Kr) à -15m	Direction de la houle ( $\alpha$ ) à -15m
N 360°	6	0.89	N 005°
N 360°	8	0.89	N 001°
N 360°	10	0.91	N 010°
N 045°	6	0.89	N 045°
N 045°	8	0.96	N 046°
N 045°	10	0.96	N 046°
N 330°	6	0.80	N 342°
N 330°	8	0.67	N 350°
N 330°	10	0.63	N 357°

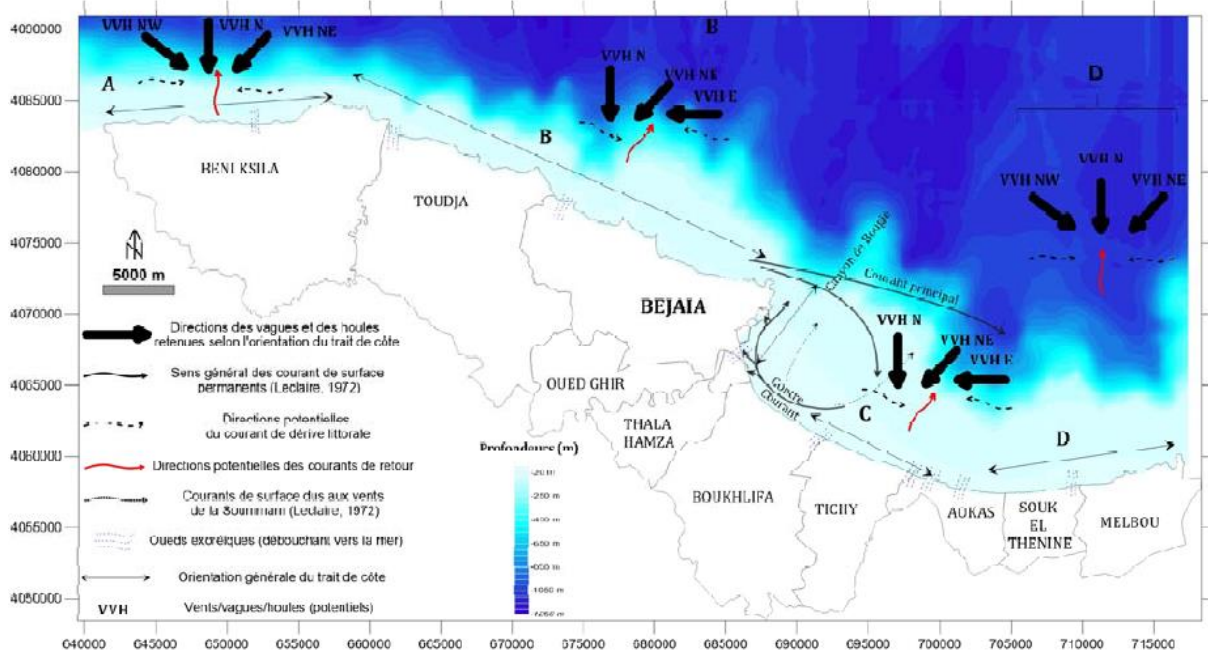


Figure I.10: Carte océanographique générale du littoral de Béjaia (LEM, 2019)

### VII.3 Les courants :

Le courant général est un mouvement de masse d'eau engendré par la densité différentielle de l'eau de mer. Ces courants peuvent être effectifs aussi bien au large (eaux profondes) qu'au niveau des eaux côtières (zone des eaux peu profondes). De ce fait, ils peuvent atteindre la côte et engendrer des échanges hydro sédimentaires.

Dans la baie de Bejaia le courant principal est celui pénétrant par le détroit de Gibraltar formant des tourbillons anticycloniques de 100 km de diamètre en se déplaçant vers l'est à une vitesse inférieure de 07 nœuds (12,6 km/h). Il génère alors des courants résiduels qui se dirigent vers la côte dont la vitesse est inférieure à 0,5 nœuds. Ces derniers, au contact de la côte, produisant une dérive littorale qui agit sur la zone de déferlement en remettant en suspension les sédiments (Millot, 1987).

### VII.4 La marée et variations du niveau marin :

L'amplitude de la marée en Méditerranée est généralement faible ; elle présente des différences importantes suivant l'époque lunaire, le plus souvent masquée par la montée ou la baisse du niveau de l'eau provoquée par des variations de conditions climatologiques.

Il convient d'indiquer que des études scientifiques récentes classent les côtes microtidales (faible marnage < 2 m) dans la catégorie des côtes à très forte vulnérabilité à l'érosion marine (Mujabar et Chandrasekar, 2013). Cette étude va concerner directement la piste de l'aéroport à laquelle elle est sujette.

En moyenne, la marée de pleine lune est de 25 à 30cm et celle de la nouvelle lune de 5 à 15cm. D'autres phénomènes peuvent se superposer à cet effet astronomique tels que la pression atmosphérique, les seiches, etc.

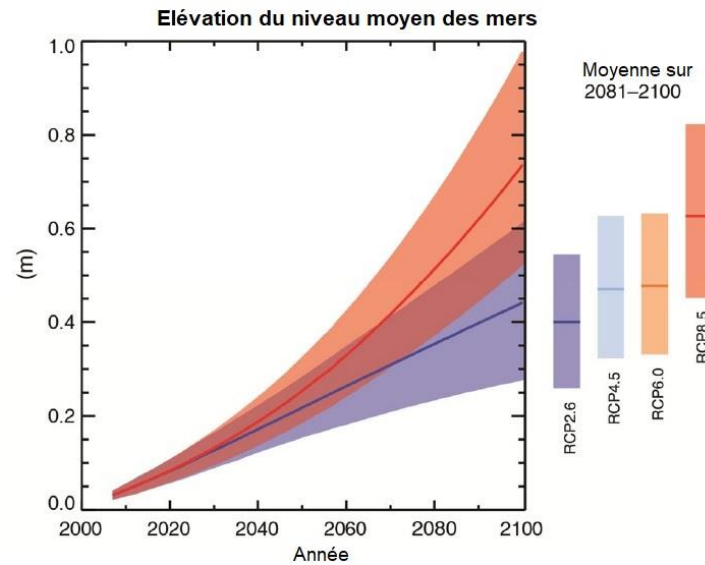
De forts vents marins locaux peuvent aussi, par action directe sur la surface de la mer, entraîner au rivage un gonflement du plan d'eau.

Le niveau de la surface de la mer pourrait ainsi atteindre une surélévation maximale de 1 m environ, du fait des phénomènes ci-dessus.

### VIII. Changements climatiques :

On assiste actuellement à un changement global du climat de la planète caractérisé par une augmentation des températures moyennes qui induit à une élévation remarquable du niveau des mers et des océans, ce qui provoque des graves problèmes sur la côte et donc sur notre site d'étude. Ils s'agissent de recul du trait de côte, montée des hauteurs des vagues et la récurrence des phénomènes de submersion marine (**Belkessa, 2021**).

Le projet d'étude est situé en bordure de la méditerranée concernée par le phénomène d'épisodes méditerranéens. Un épisode se caractérise par une période pendant quelques heures voire jours de fortes pluies, parfois accompagnées d'orages. Les épisodes de précipitations intenses se rencontrent principalement à la fin de l'été et à l'automne. A cette époque, la mer était encore chaude, constituant un réservoir de vapeur d'eau et d'énergie, tandis que la région a subi les premières descentes d'air froid du nord. La présence d'air chaud et humide dans les couches inférieures et l'air froid plus dense en altitude rendent les masses d'air au-dessus de la mer instables. En les ramenant vers la terre, les flux marins se heurtent au relief. Cela les oblige à s'élever ou les contraint à la contourner créant des zones où les flux convergent et remontent tour à tour les nouvelles masses d'air venues du large. En s'élevant dans l'atmosphère, la vapeur d'eau, ils contiennent des fraîcheurs, provoquant des précipitations. Les flux marins apportant continuellement de nouvelles masses d'air humides et instables au-dessus des terres, des orages se déclenchent à plusieurs reprises au même endroit, entraînant de fortes accumulations de pluie pouvant mener aux ruissellements, inondations, crues et glissements de terrain (**IPCC, 2014**).



**Figure I.11:** Elévation du niveau des mers par rapport à la période 1986– 2005 (GIEC ,2013)

Les séries chronologiques des projections et une mesure de l'incertitude (parties ombrées) sont présentées pour les scénarios RCP2,6 (en bleu) et RCP8,5 (en rouge).

Les risques pouvant faire face au présent projet sont les suivants :

- Augmentation du niveau moyen de la mer,
- D'autres en rapport avec le climat :
  - ✓ Niveaux extrêmes de la mer,
  - ✓ Direction et intensité du vent et les houles.

Ils peuvent avoir de multiples effets sur la zone littorale, parmi lesquels :

- Effets sur le profil de la plage, dû à l'augmentation du profil transversal et du recul des plages colmatés par des sédiments ou par l'augmentation de la hauteur de la houle ou du niveau de la mer,
- Effets sur la forme en plan de la plage, par des possibles basculements de la plage dû aux modifications de la direction la houle ou les possibles reculs et changement en tombolos, les saillants ou doubles saillants par la modification du niveau de la mer,
- Effets sur la fonctionnalité de l'ouvrage : la modification de la hauteur de la houle et le niveau moyen de la mer affectent à la réflexion, transmission et dépassement,
- Effets sur la stabilité des ouvrages : l'augmentation de la hauteur de la houle et le niveau moyen de la mer affectent à la stabilité des ouvrages maritimes en requérant des volumes et des pièces plus grandes.

Sur les côtes de Bejaia les modèles climatiques globaux (MCG), qui permettent de réaliser des projections climatiques futures mais celles-ci reposent sur des scénarios d'évolution

économique et démographique, donnent une élévation des niveaux de la mer prévisionnelle de l'ordre de 40 cm à l'horizon 2060 (+31 cm par rapport au niveau actuel) et 96 cm à l'horizon 2100.

# **Chapitre II**

## **Etude hydromorphologique**

## I. Introduction

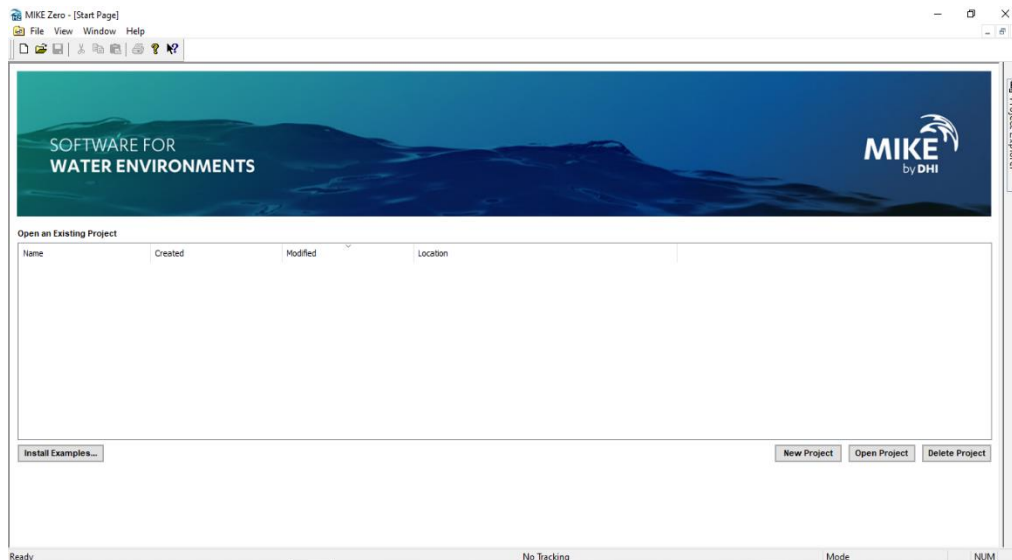
Ce chapitre nous permettra la compréhension d'un phénomène en relation avec l'hydrodynamisme côtier (la réfraction de la houle) qui semble indispensable, comme l'étude bathymétrique, à la présente étude afin de choisir une protection adéquate.

Le traitement de données bathymétriques permet d'établir, une carte bathymétrique, des profils reflétant la morphologie sous-marine locale ainsi que la réfraction de la houle. L'analyse des différents traits de côte de périodes différentes permet d'estimer le taux d'érosion (ou accrétion) au niveau du site.

## II. Logiciels utilisés :

### II.1 Mike 21 :

Le Mike 21 est une suite logicielle professionnelle développée par DHI Water & Environnement pour la modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre. Elle permet de simuler l'hydraulique et les phénomènes associés dans les zones côtières et les océans, elle se compose de différents modules répondant à des problématiques spécifiques : Mike 21 Fluid Dynamics Module HD, Mike 21 AD advection-dispersion Module (**Dahmani, 2019**).



**Figure II.1:** Interface du Mike 21

**Mike 21 SW** : Un modèle spectral de troisième génération similaire à SWAN, avec quelques améliorations. Il simule : la croissance des vagues en présence de vent, les interactions onde-onde non linéaires, la rupture et la dissipation par frottement sur le fond, la réfraction due aux changements de profondeur et les interactions onde-courant. Les calculs du modèle Mike 21 SW utilisent une grille flexible (**DHI, 2014**).

## II.2 Google Earth Pro :

Google Earth Pro est un logiciel open source qui permet la visualisation, l'évaluation, la superposition et la création de données géospatiales, bien que n'étant pas un "vrai" SIG. Cette source conviviale est souvent un intermédiaire utile pour les apprenants qui veulent en apprendre davantage sur le SIG et qui veulent commencer par les processus et les outils de base. Google Earth Pro peut également être utilisé pour afficher des images satellitaires de haute résolution (50 cm) et d'une incertitude de 4m selon les régions géographiques, télécharger des données géospatiales dans son format de fichier interopérable natif (.kml), et pour l'emplacement (le géocodage simple par exemple).

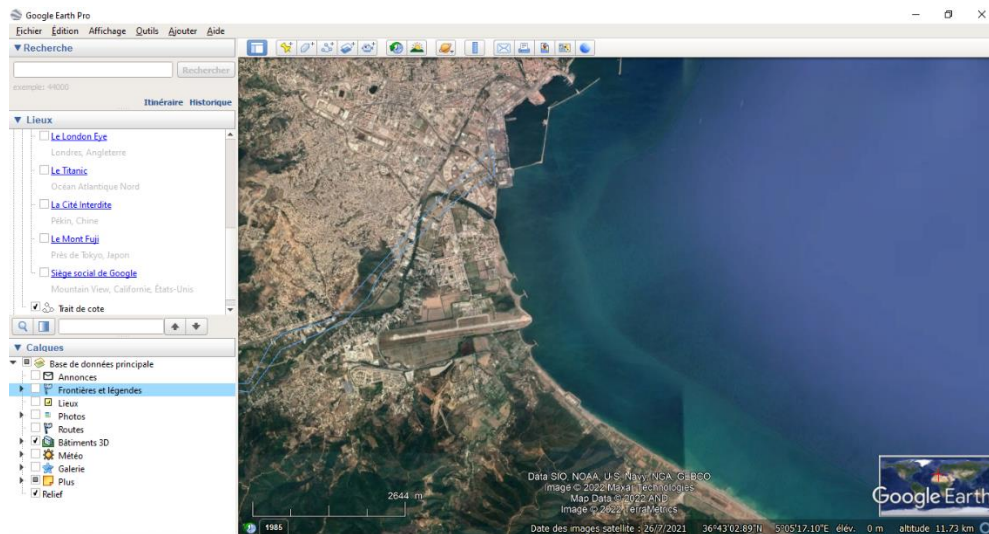


Figure II.2: Interface de Google Earth Pro

## II.3 ArcGIS 10.8 :

Un logiciel d'information géographique créé et développé par la société Esri, utilisé pour visualiser, gérer, créer, traiter, analyser et cartographier les données géographiques (Keraghel, 2019).

Il est structuré pour répondre aux besoins d'établissement et de gestion de SIG, il comporte trois principaux modules :

- ArcMap : il permet de créer, visualiser et modifier les données géographiques ainsi que d'élaborer des vues cartographiques et faire des requêtes et analyses d'informations.
- ArcCatalog : qui permet de gérer et de visualiser une base de données géographiques (jeux de classes d'entités, raster, tables attributaires). Il permet surtout de créer, modifier ou supprimer des fichiers « vecteur » (shapefiles).
- ArcToolbox (Boîte à outils) : il s'agit d'une boîte à outils permettant d'effectuer des analyses et traitements géographiques. ArcToolbox est un ensemble d'outils de

géotraitement qui utilisent des informations de jeux de données existants, appliquent des fonctions analytiques et écrivent les résultats dans de nouveaux jeux de données.

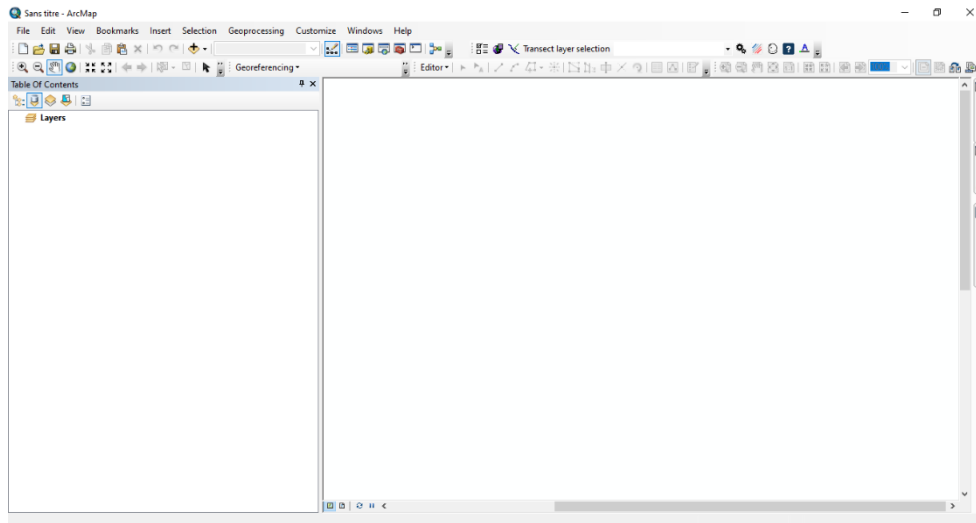


Figure II.3: Interface d'ArcGIS

**II.3.1 L’extension DSAS :**

DSAS est une extension gratuite développée par l'USGS qui s'exécute dans le logiciel ArcGIS. Il calcule les statistiques de taux de changement pour les données vectorielles côtières de séries chronologiques. Il permet de prendre en compte l’ensemble des traits de côte déjà digitalisés à partir des images retenues satellitaires ou aériennes et d’estimer la précision des taux d’évolution calculés (Assogba, 2018).

Tableau II.1 : La barre d’outils de l'extension DSAS

	Spécifier les paramètres de base, les noms de fichiers de référence, des traits de côte, paramètres des transects...
	Génère nouvelle classe d’entités des profils en fonction des paramètres par défaut spécifiés par l'utilisateur.
	Reconnaissance de tous les fichiers de transects actif dans le projet
	Calcul des différentes statistiques et les afficher dans des tableaux
	Cette icône permet de découper les transects selon la variation du trait de côte

Le principe de fonctionnement de la méthode DSAS (voir annexe) s’agit de créer tout au début une Géodatabase (base de données) personnelle composée essentiellement d’une entité

nommée Baseline et d'une seconde entité constituée de traits de côte déjà numérisés sur ArcMap nommée shorelines qui se regroupent avec l'outil 'Merge' (Thior et al, 2019)

#### II.4 Surfer :

Surfer est un logiciel qui fournit un ensemble de fonctions de visualisation 3D, de modélisation de contours et de surfaces fonctionnant sous Microsoft Windows. Surfer est largement utilisé pour la modélisation de terrain, la modélisation bathymétrique, la visualisation de paysage, l'analyse de surface, la cartographie de contour, la cartographie de bassin versant et de surface 3D, le maillage et les volumes.

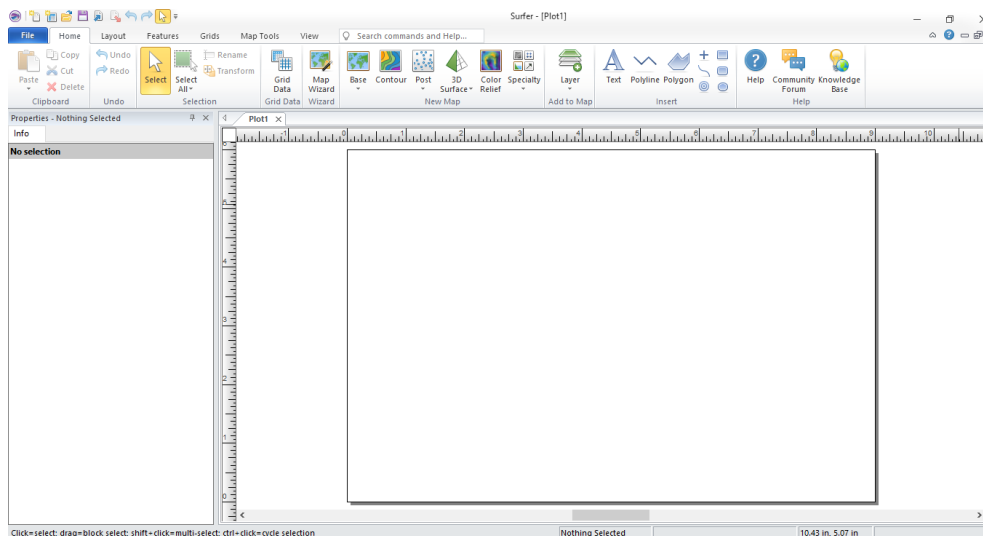


Figure II.4: Interface du Surfer

### III. Etude bathymétrique :

La bathymétrie est la science de mesure des profondeurs et du relief sous la surface de la mer pour déterminer la topographie des fonds marins (Salhi, Talanzar, 2018).

Pour pouvoir choisir une protection adéquate, il est nécessaire d'étudier la bathymétrie locale.

#### III.1 Méthodologie :

Le trait de côte est digitalisé manuellement sur une image satellitaire récente extraite du Google Earth pro après être géoréférencée sous ArcGIS 10.8.

Le levé bathymétrique réalisé par le LEM en 2019 consistait à déterminer les coordonnées tridimensionnelles (x,y,z) des points du fond marin à l'aide d'un récepteur GPS et d'un échosondeur.

Les altitudes des levés sont fournies par rapport au NGA, il est donc nécessaire de leur attribuer des corrections par rapport à la référence du ZH.

$$ZH + 0.34 = \text{NGA}$$

Le 0.34 est défini comme l'écart entre le niveau des plus basses mers et le NGA.

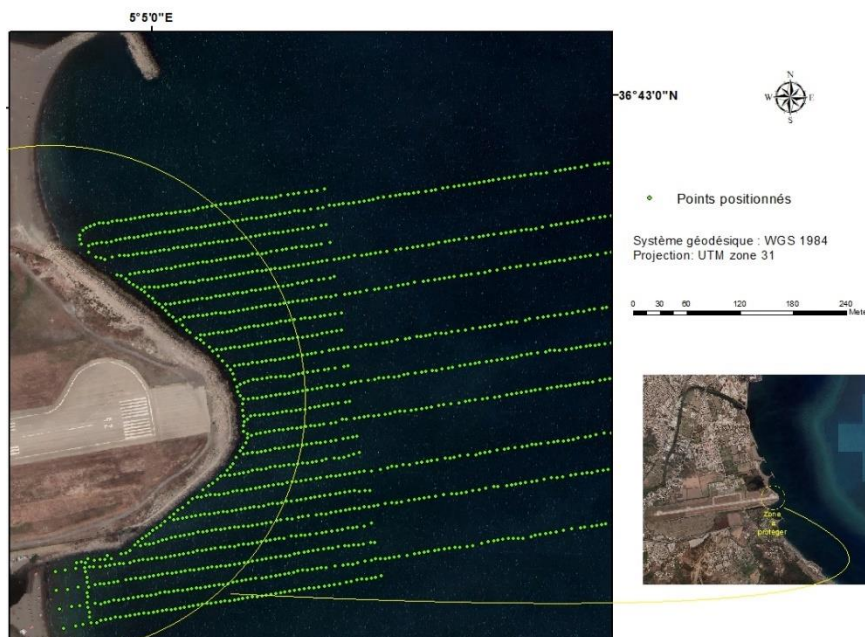
Un réseau d'appui, réalisé sur site, est constitué de trois (03) stations qui servent de référence pour les levés.

**Tableau II.2** : Les coordonnées des stations de référence (LEM, 2020)

	X UTM (mètre)	Y UTM (mètre)	Z NGA (mètre)
Station 1	685956.690	4065231.563	2.432
Station 2	686005.704	4065001.179	1.842
Station 3	685812.205	4065206.320	1.561

2611 points, représentés dans la carte suivante sur ArcGIS, ont été positionnés près du rivage.

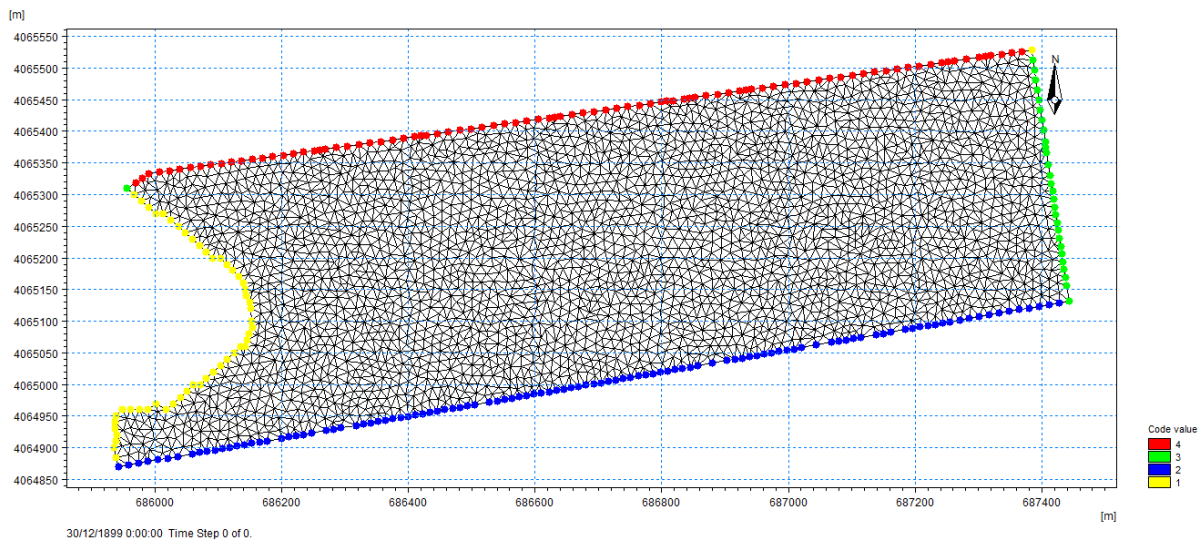
Le système géodésique optait dans cette étude est le WGS 1984, Projection UTM zone 31.



**Figure II.5** : Carte du positionnement des 2611 points levés par le LEM (SAS.planet 2022)

L'étude bathymétrique près de la cote est réalisée comme suit :

L'ensemble des coordonnées bathymétriques collectées est rassemblé dans un fichier Excel, pour pouvoir l'introduire dans le Mike 21, il est nécessaire de le transformer en fichier (.XYZ). Après avoir créé les arcs, qui sont utiles pour la détermination des conditions limites et des directions lors de la simulation, à l'aide du module '*MeshGenerator*, on obtient un maillage représentant la bathymétrie numérique détaillée.



**Figure II.6:** Maillage du MeshGenerator sous Mike 21

On lance le module Mike 21 SW qui permet de suivre la propagation des houles de différentes directions, le model a concerné 3 directions dominantes retenues : **N20°**, **N45°**, et **N60°**. Les niveaux d'eaux ont été considérés nuls et le forçage par les vents est négligé. La limite nord a été choisi comme étant ouverte avec des paramètres constants dans le temps et tout au long de ces limites.



**Figure II.7:** Carte représentant les trois directions dominantes (SAS.planet, 2022)

**Tableau II.3** : Conditions des houles (annuelles) moyennes (SSMO, 1963-1970)

Direction de la houle	Période de la houle $T_p$ (s)	Amplitude de la houle $H_s$ (m)
20° N	8	2.67
45° N	8	2.56
60 °N	8	2.53

Une simulation de quelques houles extrêmes est réalisée pour les trois directions précédemment citées.

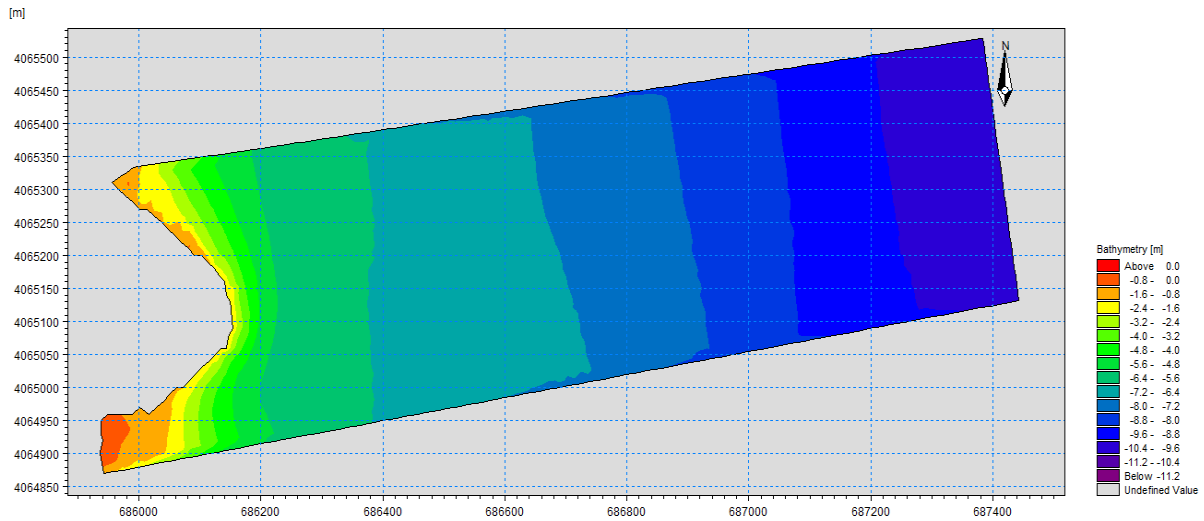
**Tableau II.4** : Conditions des houles extrêmes (LEM, 2019)

Direction de la houle	Période de retour	Période de la houle (s)	Amplitude de la houle (m)
20° N	20 ans	13.08	7.02
	50 ans	13.65	7.87
45° N	20 ans	12.81	6.79
	50 ans	13.36	7.53
60° N	20 ans	11.61	5.59
	50 ans	12.17	6.17

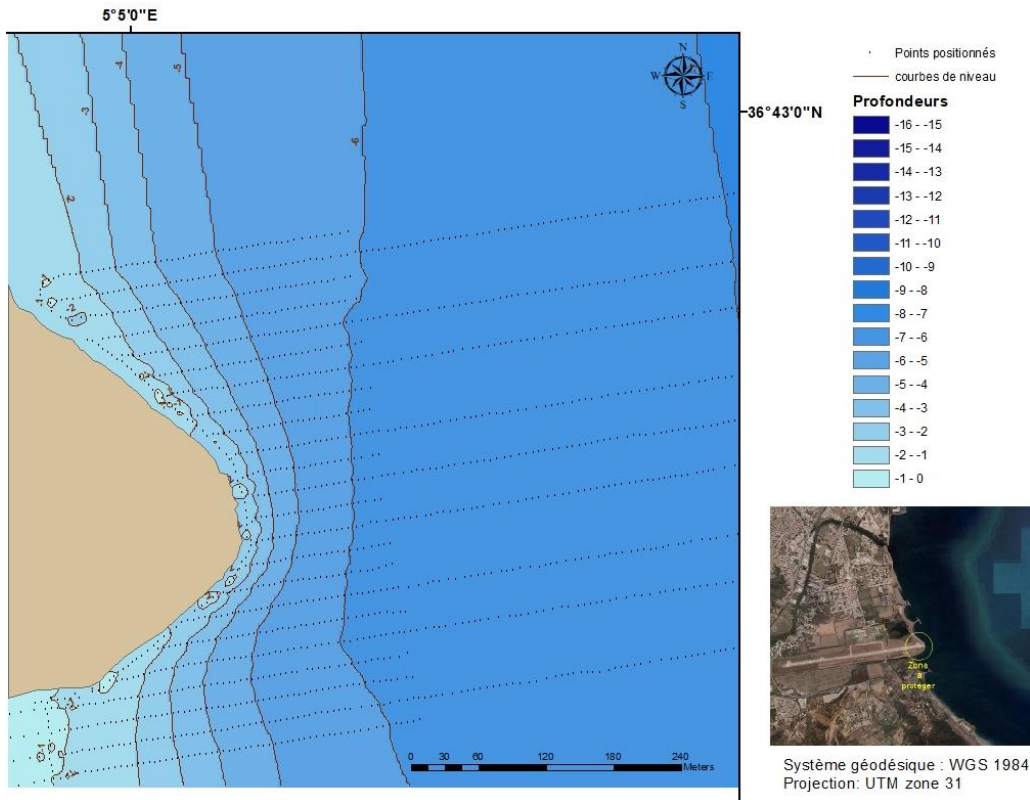
Afin d'avoir une vision sur la morphologie sous-marine locale, des profils transversaux ont été réalisés à l'aide du logiciel Surfer 15 en créant une carte de contours puis choisir les coupes voulues.

### III.2 Résultats et discussions :

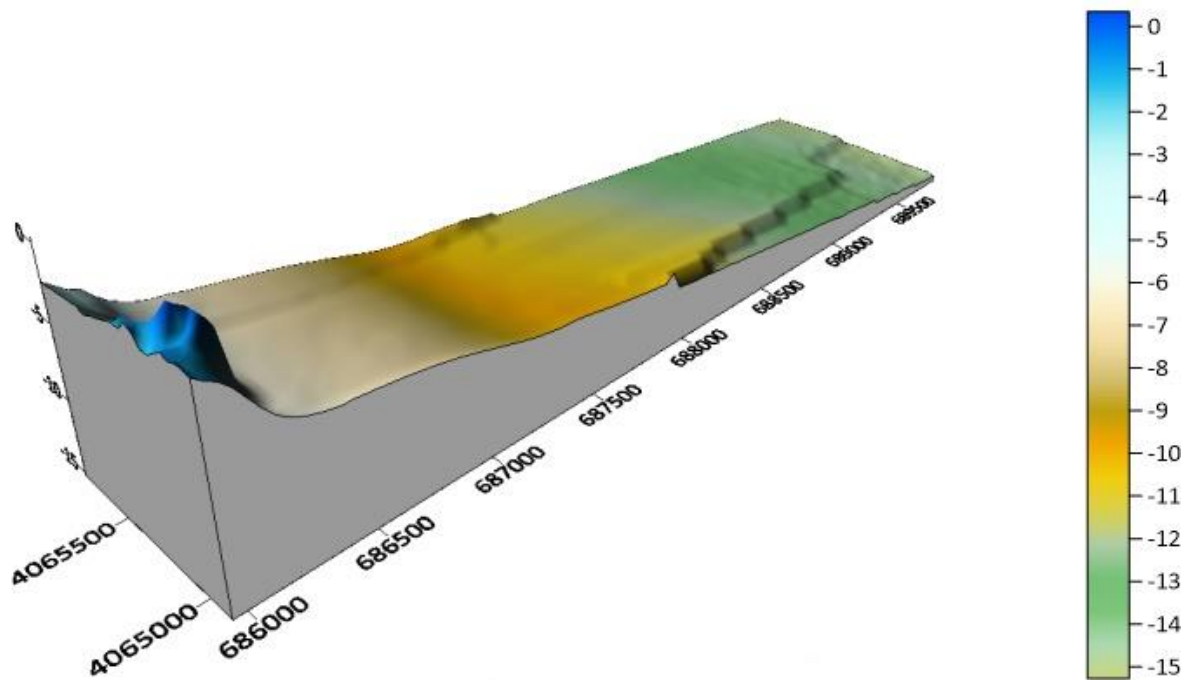
La carte bathymétrique locale est réalisée à l'aide de différents logiciels à partir d'une série de données bathymétriques.



**Figure II.8 :** Carte bathymétrique près du rivage de l’aéroport de Bejaia réalisée sous Mike 21 à partir des données du LEM



**Figure II.9:** Carte bathymétrique près du rivage de l’aéroport de Bejaia réalisée sous ArcGIS 10.8 à partir des données du LEM

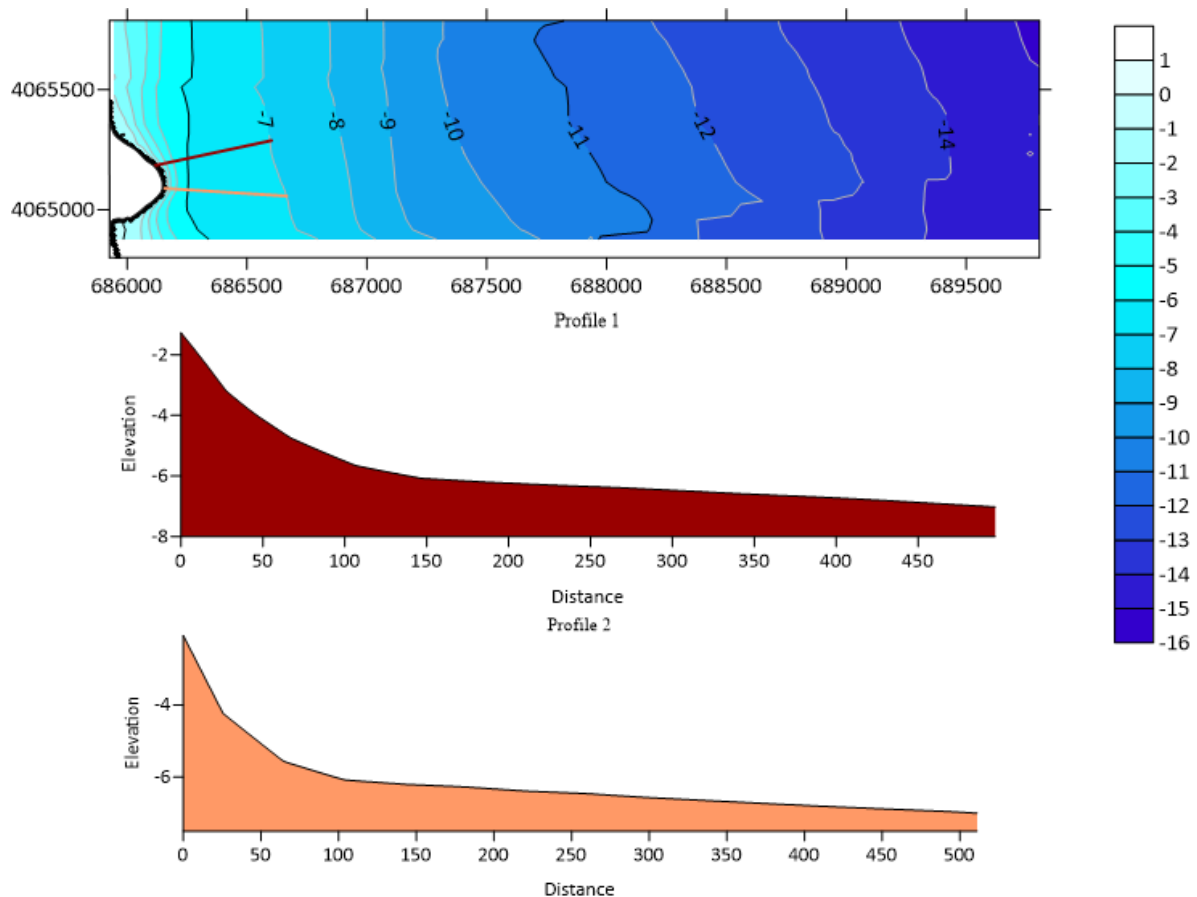


**Figure II.10:** Carte bathymétrique près du rivage de l'aéroport de Bejaia en 3D réalisée sous Surfer à partir des données du LEM

**Commentaire :**

La carte bathymétrique près de la ligne du rivage obtenue montre que les isobathes (lignes d'égaies profondeurs) sont disposées d'une manière serrée au droit du bout de piste de l'aéroport de Bejaia et ce jusqu'à l'isobathe (-6) m, cela indique relativement la présence de fortes pentes sous-marines près du rivage de la piste de l'aéroport. Au-delà de cette profondeur les isobathes sont beaucoup moins serrées traduisant des pentes douces et assez faibles.

### III.2.1 Etude des profils bathymétriques :



**Figure II.11:** Profils transversaux du site réalisés sous Surfer à partir de la carte bathymétrique

Les profils transversaux ci-dessus montrent que le fond descend avec une certaine forte inclinaison près du rivage ou des lignes bathymétriques de (-6) m sont enregistrés à environ 100 m de la côte. Cela représente une pente d'environ 6 %, ce qui peut confirmer le resserrement des isobathes relevé sur la carte bathymétrique. Au-delà de 100m de la cote, la pente est faible, les deux profils montrent une certaine régularité dans leurs allures ce qui reflète le caractère sableux des fonds marins adjacents (les plages sableuses adjacentes : plage Club Hippique à l'Est et plage Sidi Ali Lebhar à l'Ouest).

### III.2.2 Etude de la réfraction de la houle :

L'étude de la houle à la côte réalisée par un modèle de transformation numérique de la houle (Mike 21 SW), conçu pour fournir notamment des conditions de houle à des points de référence sur le site, qui seront utilisées comme données d'entrée à d'autres modèles numériques, pour le dimensionnement de l'ouvrage de protection maritime.

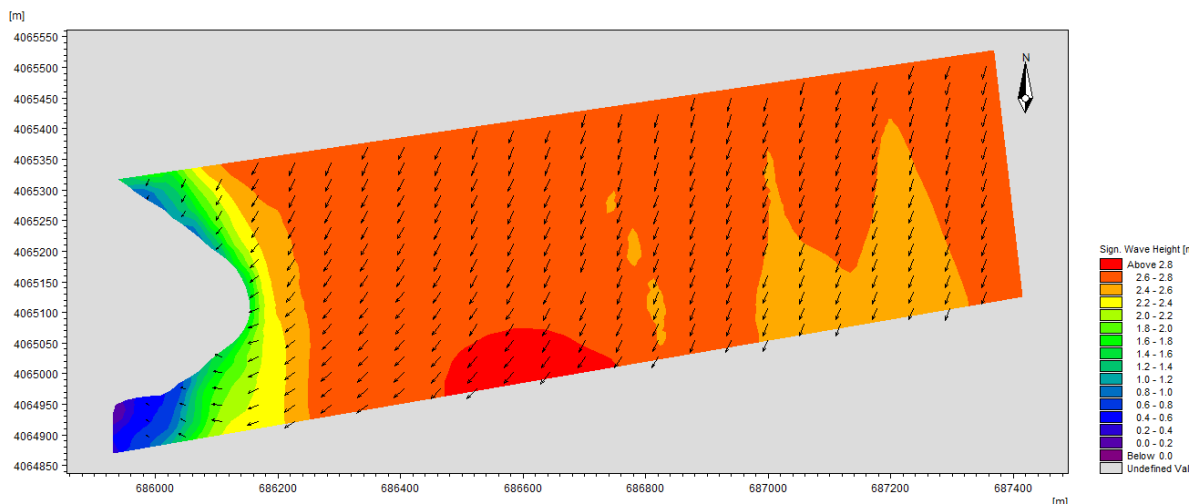
Les résultats des simulations numériques représentés ci-dessous, permettent de calculer le coefficient de réfraction ( $k_r$ ) pour chacune des directions retenues, pour une houle moyenne ( $T = 8s$ ) et une profondeur de (-5m). Le coefficient de réfraction est défini comme suit :

$$k_r = \frac{H_s \text{ locale}}{H_s \text{ large}}$$

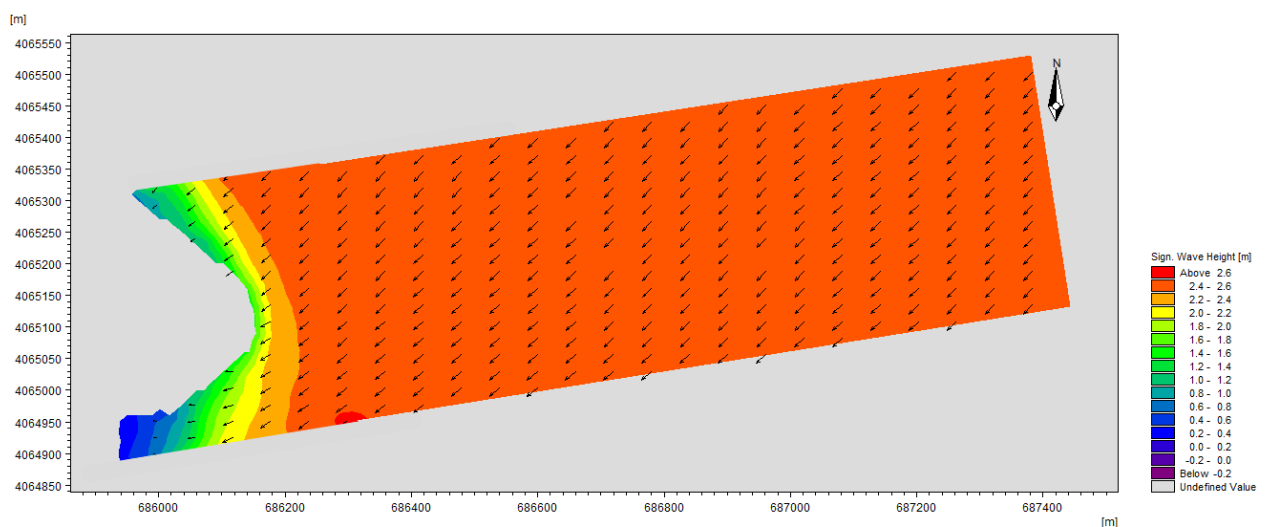
$H_s$  : hauteur significative de la houle (m)

**Tableau II.5 :** Conditions des houles moyennes annuelles à la profondeur (-5) m

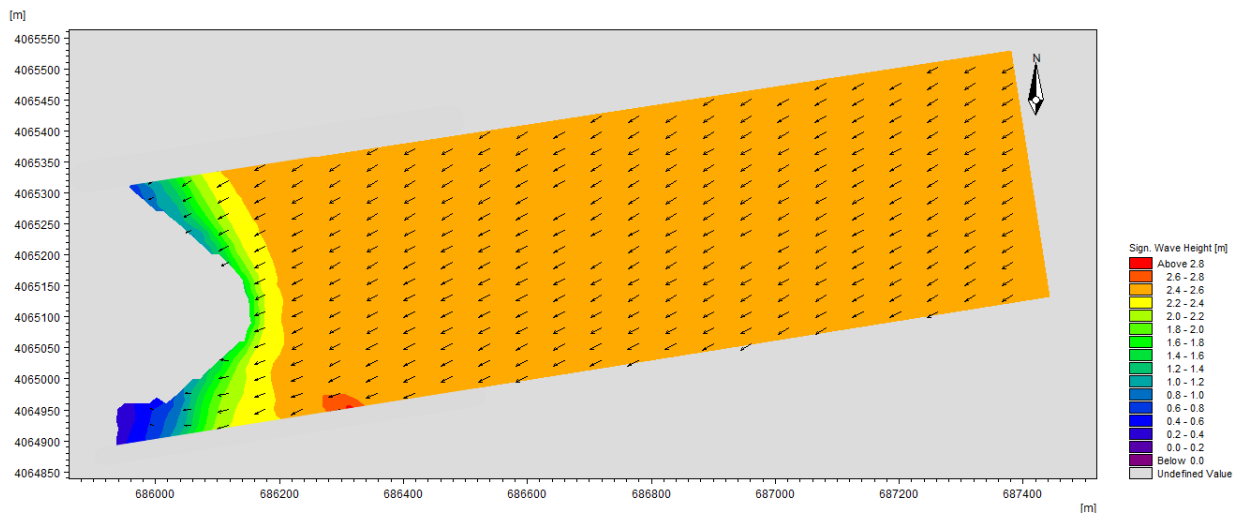
Direction de la houle	Amplitude de la houle $H_s$ (m)	Amplitude de la houle à (-5) m	Coefficient de réfraction	Direction de la houle à la cote
20° N	2.67	1.54	0,58	85° N
45° N	2.56	1.76	0,68	89° N
60° N	2.53	1.97	0,77	87° N



**Figure II.12:** Epure de la réfraction de la houle annuelle direction 20° N incidente à ma piste de l'aéroport de Béjaia



**Figure II.13:** Epure de la réfraction de la houle annuelle direction 45° N incidente à ma piste de l'aéroport de Béjaia



**Figure II.14:** Epure de la réfraction de la houle annuelle direction  $60^{\circ}$  N incidente à ma piste de l'aéroport de Béjaia

### Commentaire :

Les épures de simulation de l'état annuel moyen de la houle ( $T=8s$ ) montrent principalement un phénomène agissant sur la houle en se propageant vers la côte : il s'agit de réfraction ou le front d'onde a tendance à être parallèle au trait de côte. En effet, le secteur  $60^{\circ}$  N qui est perpendiculaire au site d'étude a été le moins réfracté. Ces houles arrivent presque sans changement de direction et gardent une partie considérable de leur énergie par rapport à l'énergie du large (couleurs rouge et orange). Celle-ci est étroitement liée aux amplitudes ( $H_s$ ) qui diminuent relativement moins que pour les directions  $45^{\circ}$  N et  $20^{\circ}$  N. Cette dernière est la plus réfractée des 03 secteurs en question et garde le moins d'énergie, elle arrive atténuée.

Les houles issues de la direction Nord ( $20^{\circ}$  N) sont les plus réfractées avec un coefficient de réfraction  $k_r$  de 0,58. Cela dénote que ces houles perdent presque la moitié de leurs amplitudes du large et donc de leurs énergies en arrivant à (-5) m de profondeur.

Les houles du secteur Nord-est ( $45^{\circ}$  N) et du secteur Est-nord-est ( $60^{\circ}$  N) sont moins réfractées avec des  $k_r$  de 0,68 à 0,77 respectivement. Elles gardent une partie importante de leurs amplitudes du large.

**Tableau II.6** : Conditions des houles extrêmes 20 et 50 ans à -10m et à (-5) m

Direction de la houle	Période de retour	Période de la houle (s)	Amplitude de la houle (m)	Amplitude de la houle à (-10) m	$k_r$	Amplitude de la houle à (-5) m	$k_r$
20° N	20 ans	13.08	7.02	4.12	0.59	2.42	0.34
	50 ans	13.65	7.87	4.21	0.54	2.47	0.31
45° N	20 ans	12.81	6.79	4.26	0.63	2.79	0.41
	50 ans	13.36	7.53	4.33	0.58	2.83	0.38
60° N	20 ans	11.61	5.59	4.12	0.74	2.80	0.50
	50 ans	12.17	6.17	4.23	0.69	2.91	0.47

La houle du projet à retenir pour le calcul des paramètres structuraux de la protection de cet ouvrage en mer aura une période de retour de 50 ans. Elle est la plus importante qui arrive au pied de l'ouvrage projeté parmi les secteurs retenus. Grace aux résultats du modèle numérique effectué précédemment, on peut relever qu'il n'y a pas une grande différence entre les amplitudes à de faibles profondeurs (-5 m).

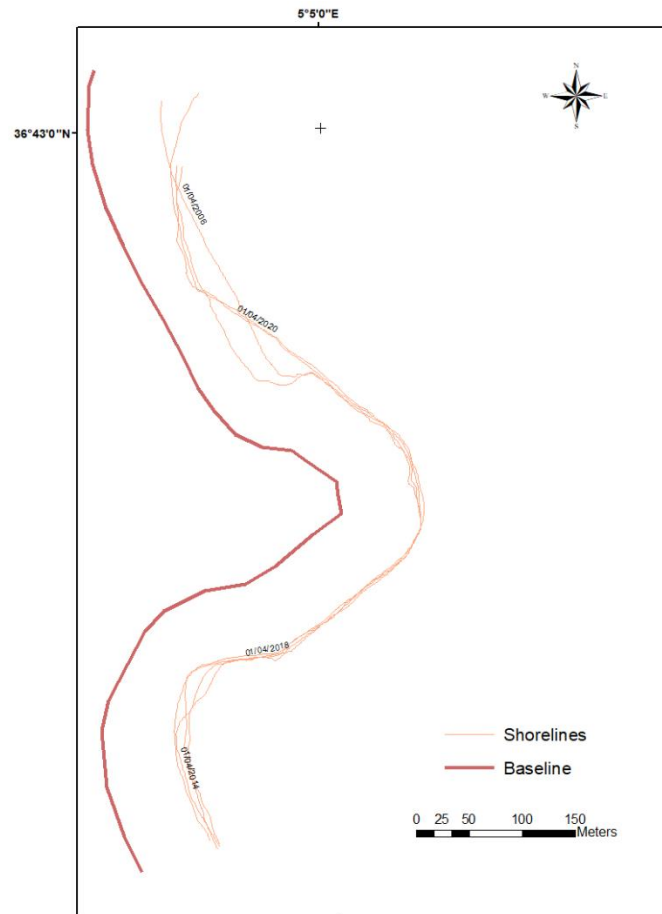
#### IV. Evolution du trait de côte

L'évolution du trait de côte est un phénomène naturel complexe résultant de l'action combinée de plusieurs processus dynamiques (océaniques, continentaux et biologiques), en fonction des caractéristiques géomorphologiques du système côtier. Cependant, ces phénomènes naturels sont accentués (exacerbés) par les activités anthropiques qui perturbent l'homéostasie (l'équilibre) des milieux côtiers (**Daniel & Hubaud, 1996**).

Dans la présente étude, la procédure utilisée est l'analyse diachronique par le biais d'ArcGIS et son module DSAS, basée sur la comparaison d'images de périodes différentes extraites de Google Earth.

##### IV.1 Méthodologie :

L'extraction de la ligne de référence a été réalisée par digitalisation manuelle sur fond d'images de Google Earth pour le mois d'Avril de chacune des années 2006, 2014, 2018 et 2020. Les fichiers sont enregistrés sous format (.kml), importés ensuite dans ArcGIS 10.8. Grâce à l'outil de conversion d'ArcGIS, les traits de côte digitalisés sous Google Earth ont été convertis en shapefile et intégrés dans une géodatabase personnelle comme données d'entrée dans le logiciel DSAS.



**Figure II.15:** Vecteurs Baseline et Shorelines

La ligne de base a été créée à une distance de 80 mètres coté terre (Onshore). Le programme DSAS a permis de générer des transects perpendiculaires à la ligne de base sur sa base et régulièrement espacés de 20 mètres et un lissage de 2500 mètres.

**Tableau II.7 :** Classification des traits de côte basée sur l’EPR ()

Catégorie	EPR (m/an)	Classification de trait de côte
1	< -2	Erosion élevée
2	> -2 à < -1	Erosion modérée
3	> -1 à < 0	Faible érosion
4	> 0	Accrétion

**IV.2 Résultats et discussions :**

Les différents outils et méthodes utilisés pour réaliser cette partie induisent une erreur significative qui affecte la précision des résultats générés.

La cinématique du rivage du site d'étude est définie par l'analyse des différents traits de cote (2006, 2014, 2018 et 2020) avec une incertitude de calcul de 0.6 m.

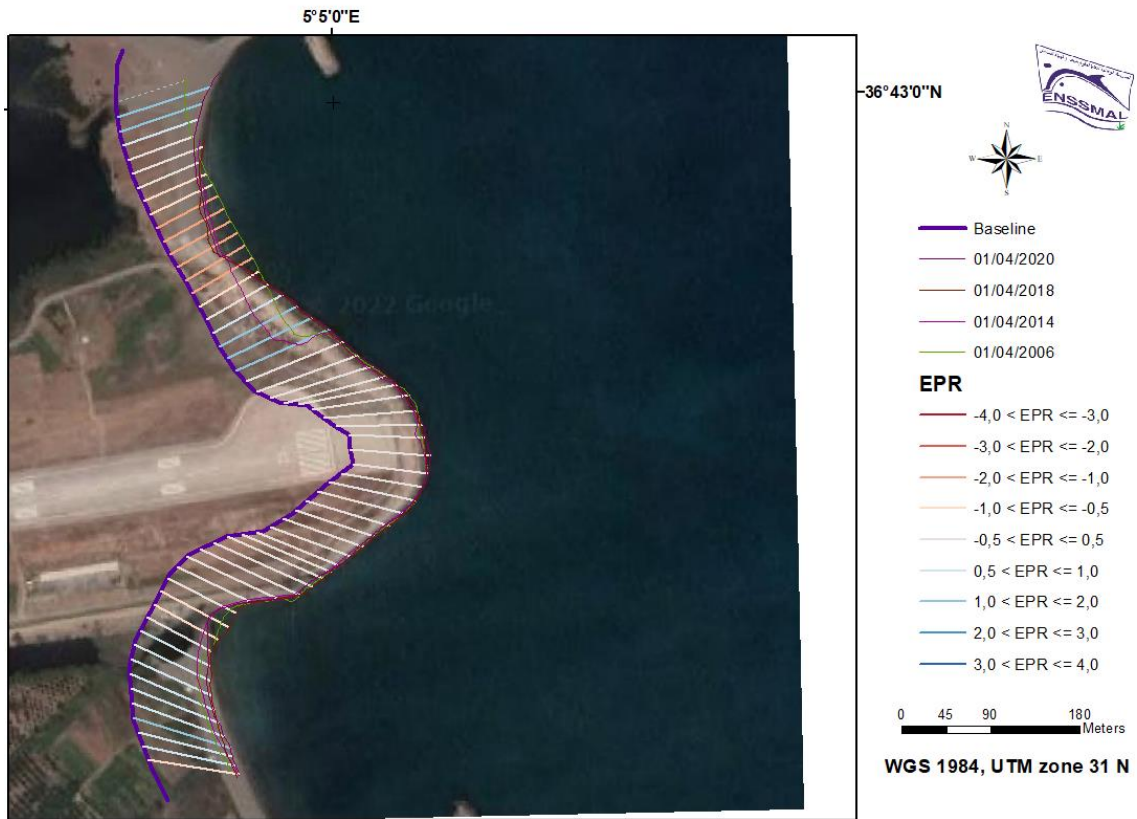


Figure II.16: Carte d'évolution du trait de côte entre 2006 et 2020 et de variations d'EPR au niveau du bout de piste de l'aéroport de Béjaia

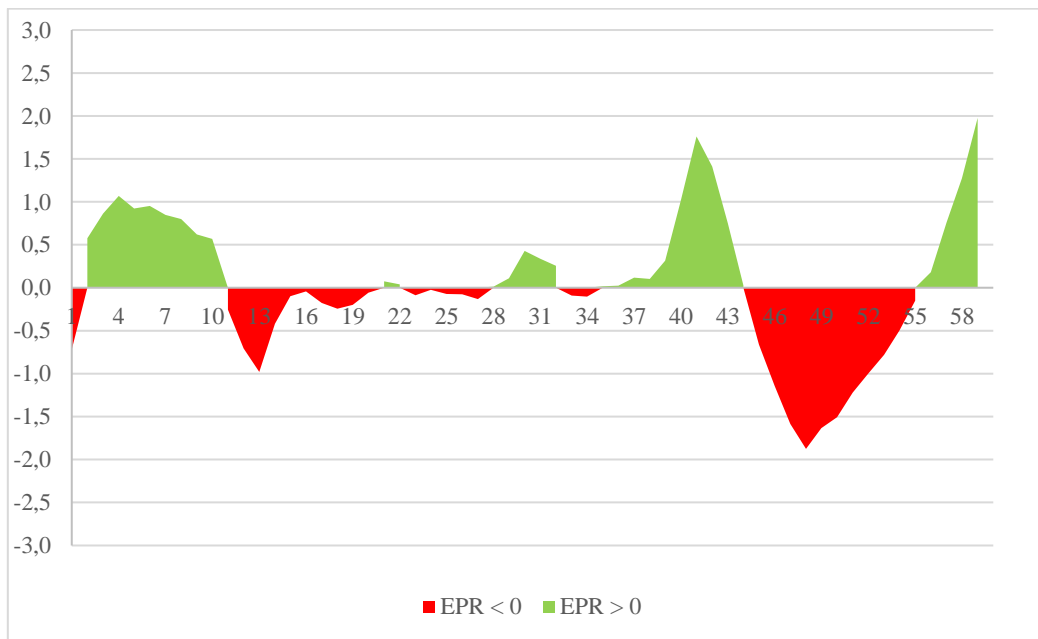


Figure II.17: Variation d'EPR du trait de côte entre 2006 et 2020 au niveau du bout de piste de l'aéroport de Béjaia

Le DSAS a permis de calculer l'indice EPR qui permet d'apprécier l'évolution globale du trait de côte dans le secteur étudié. L'analyse du graphe, en se basant sur les données du tableau n° 12, des variations d'EPR selon les transects montre d'une manière générale que le rivage marque un certain équilibre et stabilité, un recul et accrétion faibles à modérés tout le long des périodes prises en considération, l'EPR est compris entre (-2) et (+2). La partie Nord du segment est la plus érodée (avec un EPR = (- 1.876) au niveau du 48<sup>e</sup> transect), ce qui peut être causé par l'effet de la houle dominante (20° N).

L'installation des quatre (4) épis (3 à l'Ouest de la piste et 1 à l'Est) n'ont pas réglé les problèmes du site, malgré que le taux d'érosion soit faible mais les risques de franchissement et de perte de sédiments existent toujours.

# **Chapitre III**

## **Aménagement du littoral**

## I. Introduction

La présente étude porte sur la protection contre les vagues de bout de piste d'atterrissage de l'aéroport de Béjaïa. En fait, en tant que site plein de défis et d'intérêts socioéconomiques, sa protection est donc obligatoire, il s'agit est de construire une défense contre les risques maritimes qui est plus nécessaire à moyen et long terme, dans le cadre ou les impacts potentiels du changement climatique pourraient aggraver ces phénomènes.

## II. Solutions d'aménagement

Pour la résolution des problèmes qui font face au bout de piste de cet aéroport, il est nécessaire de suggérer de différentes variantes de protection puis choisir la plus appropriée.

### II.1 Dimensionnement

L'ensemble des formules de dimensionnement des solutions proposées sont les suivantes :

1- La formule d'Hudson (1) pour le dimensionnement de la carapace :

Le rôle de la carapace, qui fait l'objet principal des études de dimensionnement, est de protéger l'ouvrage de l'action de la houle et donc la dissipation de son énergie (**Bouheniche, 2021**).

$$M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_d \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1\right)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

$M_{50}$  : masse moyenne des blocs de carapace (kg)

$H$  : hauteur de la houle incidente (m)

$\rho_s$  : masse volumique du matériau constituant les blocs  $\text{kg/m}^3$

$\rho_e$  : masse volumique de l'eau  $\text{kg/m}^3$

$\alpha$  : angle de pente du talus par rapport à l'horizontale (degré)

$K_d$  : coefficient de stabilité : coefficient semi-empirique établi pour chaque type de bloc grâce à des essais en modèle réduit physique ou grâce à des observations réalisées sur des ouvrages déjà construits (**Dahmani, 2020**).

Dans le Shore Protection Manual (SPM), les valeurs de  $K_d$ , données pour un enrochement rugueux, angulaire et placé aléatoirement en deux couches sur la section courante d'une digue étaient  $K_d = 3.5$  pour des vagues déferlant en avant de l'ouvrage et  $K_d = 4$  pour des vagues ne déferlant pas en avant l'ouvrage.

2- Le dimensionnement de(s) sous couche(s) (2) :

La sous couche, que l'on désigne aussi comme filtre, doit réaliser un certain nombre de fonctions parmi lesquelles :

- Le rôle du filtre granulométrique entre le noyau et la carapace
- La fonction de fondation pour la carapace externe
- Le rôle du filtre hydraulique et dissipation de l'énergie de la houle après son passage par la carapace
- La protection du noyau pendant la construction de l'ouvrage

$$\frac{M_{50}(\text{sous couche})}{M_{50}(\text{carapace})} = \frac{1}{15} \text{ à } \frac{1}{10} \quad (2)$$

3- L'épaisseur des carapaces et de sous couches est estimé par la formule suivante (3) :

$$e = n \times c \times V^{\frac{1}{3}} ; \quad V = \frac{M_{50}}{\rho_s} \quad (3)$$

N : nombre de rangées

C : coefficient de couche dépendant de la forme des blocs

C (enrochement) = 1.15

V : volume du bloc (m<sup>3</sup>)

4- Le diamètre nominal moyen de l'enrochement  $D_{n50}$  (4) :

$$D_{n50} = \sqrt[3]{\frac{M_{50}}{\rho_s}} \quad (4)$$

5- La butée de pied (5) :

L'objet d'une butée de pied est d'assurer la stabilité de la carapace principale pour éviter sa ruine par glissement et ainsi d'offrir une sécurité supplémentaire vis-à-vis des affouillements du fond marin devant l'ouvrage qui affecterait la stabilité de la digue (**Bouheniche, 2021**).

$$M = \frac{\rho_s H^3}{K_d \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1\right)^3 \cot \alpha} \frac{h}{10 H} \quad (5)$$

h : hauteur de l'eau

6- La largeur de la berme B (6) :

Les fonctions de la berme se résument en : l'atténuation de l'action de la houle, du run-up et les

franchissements ainsi que la stabilité géotechnique additionnelle (Bouheniche, 2021).

$$B = 4 \times D_{n50} \quad (6)$$

Selon LCHF, les formules de dimensionnement du brise lame sont les suivantes :

7- La longueur du brise lame (7) :

$$l > 1.2 (l_c + 0.3 \times L) \quad (7)$$

$l$  : longueur du brise lame

$l_c$  : distance du brise lame à la cote

$$L : \text{longueur d'onde (8)}, L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} = \frac{g T^2}{2\pi} \sqrt{\tanh \frac{4\pi^2 D_p}{g T^2}} \quad (8)$$

$L$  (au large) = 1.56  $T^2$

$D_p$  : profondeur au déferlement

8- La distance du géotube à la cote  $D$  (Pilarczyk, 2000) (8) :

$$D = \frac{L}{2} \quad (8)$$

9- La largeur du géotube  $B'$  (9) :

$$B' = 4 \times H_b$$

$H_b$  : hauteur de la houle au déferlement

10- La hauteur du géotube  $H'$  (10) :

$$H' = 1.5 \times H_b$$

Les variantes proposées doivent être résistantes à une houle de retour de 50 ans (la houle de projet).

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $T = 8$ ,  $\rho_s$  (bloc artificiel) = 2.34 à 2.4 tonne/m<sup>3</sup>,  $\rho_s$  (enrochement naturel) = 2.65 tonne/m<sup>3</sup>

## II.2 Variante 1 : digue frontale en enrochements

La première variante s'agit d'une digue frontale en enrochements, positionnée plus au moins avancée sur la ligne actuelle du rivage qui se caractérise par une côte d'arase de la carapace dont la limite est de + 3,50 m, soit quasiment la même hauteur que le seuil de la piste d'atterrissage (soit environ + 3,00 m). La raison de fixer un niveau relativement bas est d'éviter

les obstructions qui peuvent présenter un risque au décollage et à l'atterrissage des avions. Afin de résoudre le problème de franchissement, la berme doit être suffisamment large.

Le profil type de la digue après le dimensionnement aura les caractéristiques suivantes :

- Un noyau en tout venant de carrière (TVC) de 1 à 500 kg arasé à la côte de + 1.40 m avec une pente du talus de 3/2,
- Un filtre de catégorie 0.5 à 1 tonnes, placé en deux couches avec une côte d'arase de +1.40 m et une pente de talus de 3/2,
- Une carapace en blocs de béton de type cubiques rainurés (BCR) de 5 tonnes (masse moyenne du bloc), épaisseur de 3 m et d'un diamètre nominal moyen de 1.28 m, arasée à la côte + 3.50 m avec une pente des talus de 3/2,
- Une berme de largeur égale à environ 5 m formée de blocs d'encrochements 0.5 à 1t placés en deux couches avec une cote d'arase de 3.15 m
- Une butée formée de blocs d'encrochements naturels de catégorie 1 à 3 tonnes mise sur un tapis en TVC et arasée à - 2,00 m,

Les altitudes sont données par rapport au NGA.

Pour cette variante, il n'est pas nécessaire d'exécuter des simulations de houle car leurs résultats seront invisibles et ne montrent pas l'impact de son implantation sur la piste d'atterrissage vu qu'elle se présente sur Mike 21 tel qu'une avancée du rivage uniquement.

Cette solution permet d'éviter la majorité des problèmes du site, les franchissements des houles en premier puisque la piste s'éloigne de la côte.

### **II.3 Variante 2 : brise lame émergé :**

La seconde variante s'est portée sur un brise lame émergé implanté à 100 m de la côte (à environ de (-6) m de profondeur), avec une longueur de 150 m (elle doit être supérieure à 141.59m), 12 m de largeur et un cote d'arase de +1 m.

- Une carapace d'encrochement naturel de 2- 5 tonnes avec une épaisseur de 2.80 m (1.40 m pour chaque couche) et une pente de 3/2.
- Un filtre d'encrochements de 1 à 2 tonnes disposée en deux couches et une pente de 3/2.
- Un noyau en TVC de 500 kg avec une pente de 3/2.

II.3.1 Résultats des simulations :

Dans le but de suivre l'effet du brise lame sur la propagation de la houle à la cote aéroportuaire, une simulation des trois directions a été réalisée pour la houle du projet et les résultats obtenus sont les suivants :

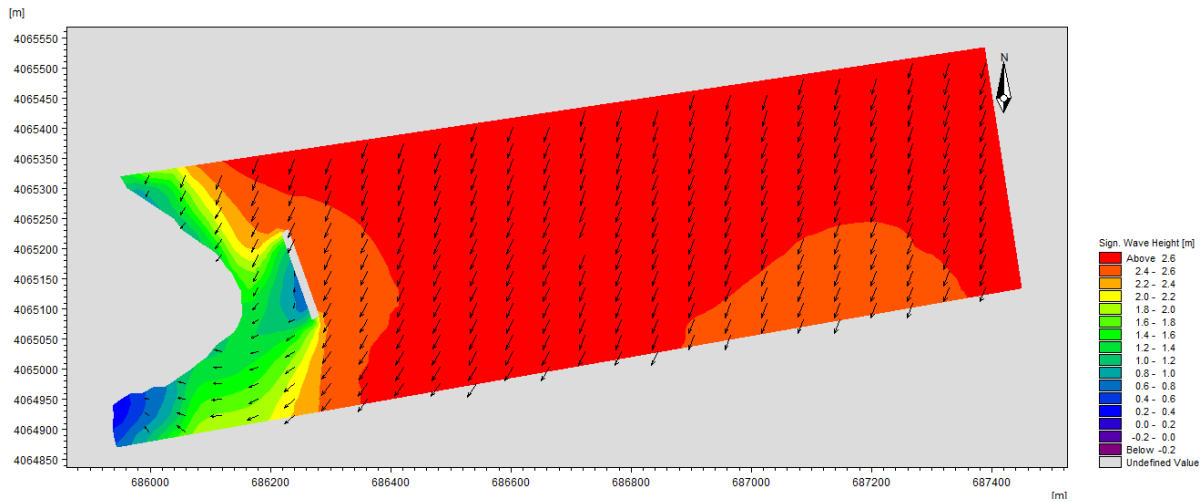


Figure III.1: Epure de réfraction de la houle 20° N au rivage de l'aéroport de Béjaia avec implantation d'un brise lame

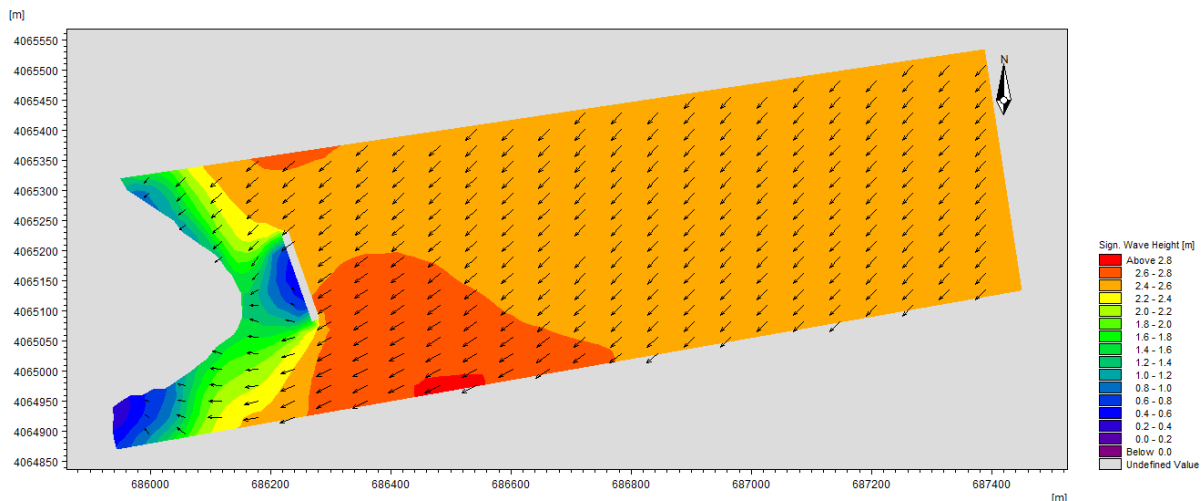
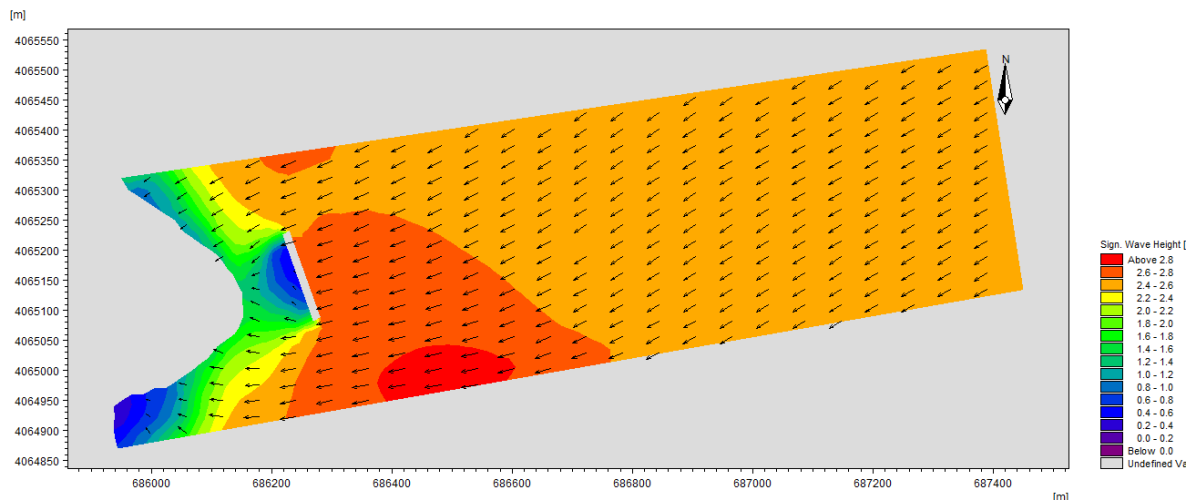


Figure III.2: Epure de réfraction de la houle 45° N au rivage de l'aéroport de Béjaia avec implantation d'un brise lame



**Figure III.3:** Epure de réfraction de la houle 60° N au rivage de l'aéroport de Béjaia avec implantation d'un brise lame

Les épures de réfraction des houles 20° N, 45° N et 60° N après implantation du brise lame montrent que les houles déferlent en arrivant au brise lame, donc le site d'étude ne reçoit pas la même énergie des houles incidentes que sans le brise-lame.

La construction du brise-lame a pour but de limiter l'érosion côtière et de favoriser la réfraction de la houle, il capte les sédiments et aide à la formation des tombolos et au reprofilage des plages. Il est préférable de l'installer pour la protection des plages et des côtes fragiles contre l'érosion.

#### II.4 Brise-lames immergés en géotubes :

Un géotube est une structure tubulaire constituée d'une enveloppe géotextile tissée à haute résistance remplie d'un matériau spécialement développé pour prévenir l'érosion. Il est idéal pour une installation à sec ou dans des profondeurs d'eau jusqu'à 5 mètres et a une durée de vie de 20 à 30 ans (Messaoud Khelifi, 2014).

Cette protection douce (une série de 3 géotubes) est implantée à 50 m de la côte, à (- 4.50 m) de profondeur et présente une longueur de 100 m, orientée approximativement parallèle à la côte et perpendiculaire aux houles dominantes (secteur 20° N).

- Hauteur de la structure : 3.5m
- Largeur du géotube : 4m

Le géotube joue le même rôle que le brise-lame, il ralentit la houle incidente et la déferle avant d'arriver à la côte, ne change pas d'esthétique de la zone mais le géotextile est fragile aux affleurements rocheux dans le cas de leur présence sous l'eau, qui peuvent causer sa rupture.

### III. Comparaison des variantes proposées :

Afin de pouvoir choisir la solution adéquate, on réalise un tableau de comparaison des trois (3) variantes selon un nombre de critères en attribuant l'échelle suivante :

0 : défavorable

1 : peu favorable

2 : favorable

**Tableau III.1** : comparaison des variantes proposées

Variantes Critères	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Réalisation (délai, difficultés, ...)	1	0	0
Coûts de réalisation	2	2	1
Entretien	1	1	2
Efficacité	2	1	1
Esthétique	1	1	2
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>6</b>

Sur la base de cette comparaison et vu les propriétés du site et les objectifs recherchés, il semble que la première variante soit la meilleure. Elle répond à l'ensemble des critères voulus et forme une extension de la côte, ce qui limite voire élimine les problèmes que la piste d'atterrissage subit.

Les brise-lames ainsi que les géotubes déferlent la houle et diminuent son énergie avant son arrivé au site mais ne peuvent pas éliminer le problème de franchissement qui soit le problème majeur de notre site d'étude.

### III. GIZC

La gestion intégrée des zones côtières décrit un processus de formule et de mise en œuvre des plans et des stratégies de gestion afin de promouvoir l'utilisation avisée et durable des différentes ressources des zones côtières, avec des contributions de la science (connaissance) et des pouvoirs décisionnels (gouvernance) (**Grimes, 2021**).

Sur le golfe de Béjaia, plusieurs ouvrages ont été construits : port, ouvrages de protection (épis en T, digue frontale), aéroport... les cartes suivantes les montrent.

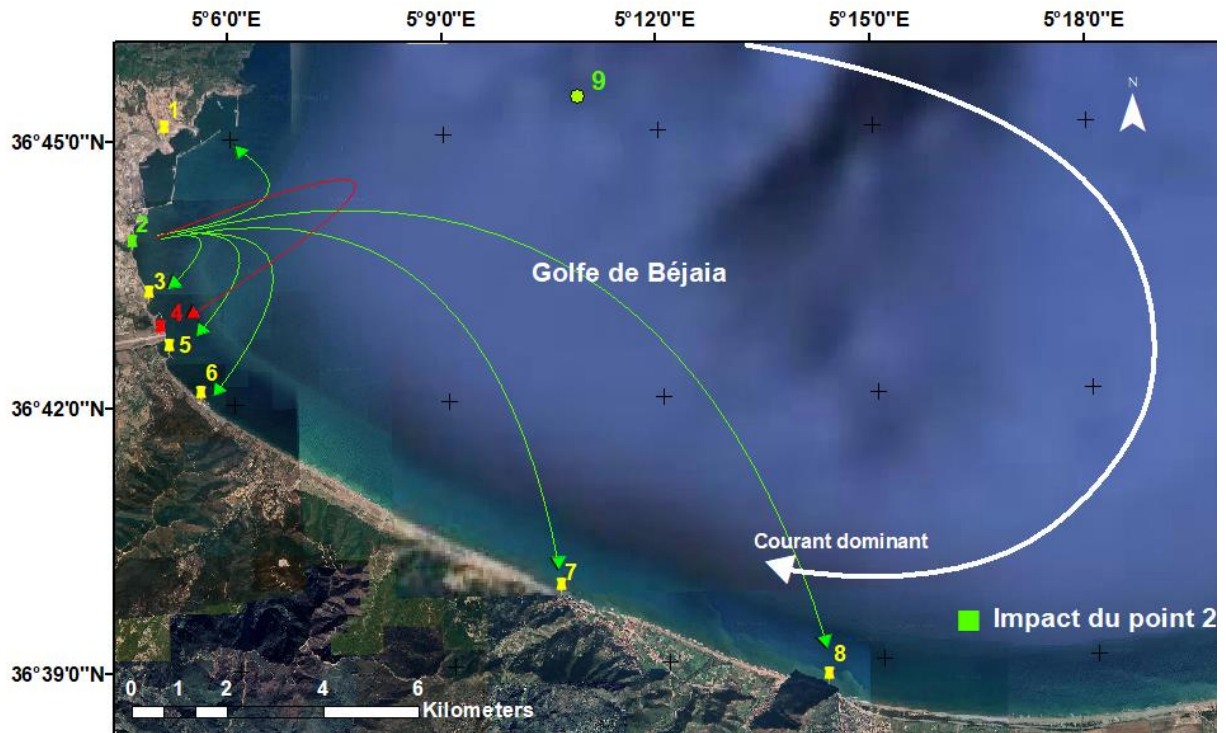


Figure III.4 : Carte d'impacts d'Oued Soummam sur les ouvrages de protection dans le golfe de Béjaia (SAS.planet, 2022)

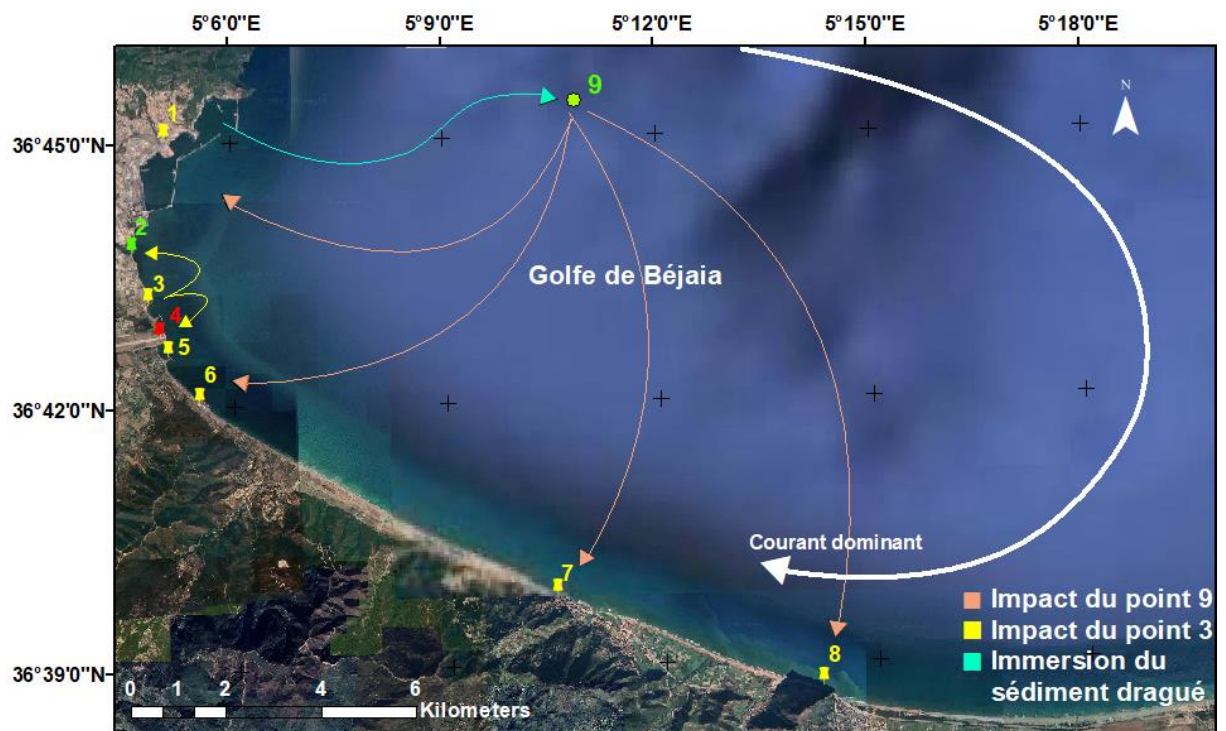
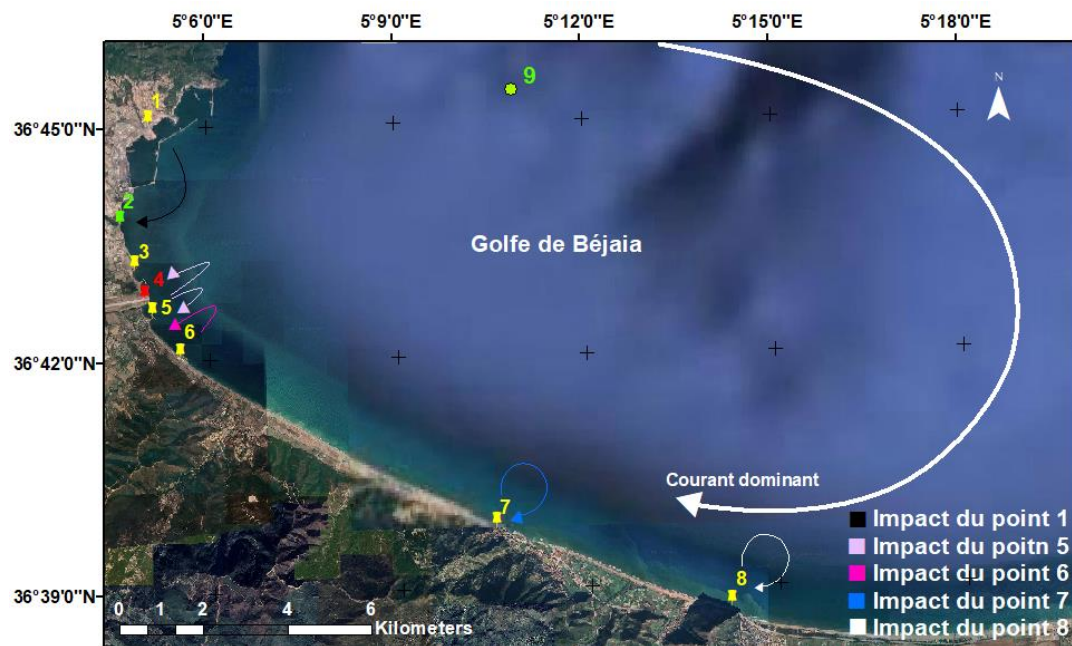


Figure III.5 : Carte d'impacts des épis de Sidi Ali Lebhar et du point d'immersion des sédiments dans le golfe de Béjaia (SAS.planet 2022)



**Figure III.6 :** Carte d'impacts de quelques ouvrages de protection dans le golfe de Béjaia (SAS.planet 2022)

**Tableau III.5 :** significations et caractéristiques des éléments des cartes

Elément	Signification	Caractéristiques
1 →	Port de Béjaia (36°45'04''N, 5°05'08''E)  Son impact	Il s'agit d'un port international de commerce et de pêche, abrité par le Cap Carbon.  Il impacte de façon directe l'embouchure d'oued Soummam en jouant le rôle d'un obstacle pour les sédiments venant de l'Est.
2 →	Embouchure d'Oued Soummam (36°43'46''N, 5°04'36''E)  Son impact	Il représente le cours d'eau permanent de la région (en plus d'Oued Agrioun).  L'oued impacte la quasi-totalité des ouvrages construits au niveau du golfe de Béjaia
3 →	Epis en T à Sidi Ali Lebhar (36°43'11''N, 5°04'47''E)  Son impact	Il s'agit d'une batterie de trois double épis (en T) installée pour la protection de la piste de l'aéroport.  Ils impactent directement l'embouchure de l'oued ainsi que la piste de l'aéroport et la plage de Sidi Ali Lebhar

4	<p><b>Piste de l'aéroport de Béjaia (36°42'49''N, 5°05'01''E)</b></p> <p>Son impact</p>	<p>Le bout de piste de cet aéroport arrive jusqu'au bord de la mer, il subit des problèmes de franchissement récurrents.</p> <p>Il impacte les zones adjacentes car il forme un éventuel obstacle pour les sédiments.</p>
5	<p>Epi en T à l'Est de l'aéroport (36°42'33'' N, 5°05'03''E)</p> <p>Son impact</p>	<p>Son emplacement a pour but de protéger la piste des houles Est, Sud-Est.</p> <p>Il impacte la piste d'atterrissage ainsi que la plage Club Hippique.</p>
6	<p>Plateforme aménagée (36°42'04''N, 5°05'34''E)</p> <p>Son impact</p>	<p>Elle est protégée par un ouvrage en enrochements.</p> <p>Elle impacte positivement la plage Club Hippique</p>
7	<p>Digue frontale de Tichy (36° 39'51'' N, 5°10'31''E)</p> <p>Son impact</p>	<p>Il s'agit d'une protection en enrochements, réalisée pour protéger la côte et la route nationale n°9.</p> <p>Elle impacte que les zones à voisinage</p>
8	<p>Digue frontale d'Aokas (36°38'41''N, 5°14'14''E)</p> <p>Son impact</p>	<p>De même pour cet ouvrage qui s'est installée pour la protection de la route nationale n°9</p> <p>Elle fixe la côte et impacte les côtes adjacentes</p>
9	<p>Point d'immersion des sédiments dragués du port</p> <p>Son impact</p>	<p>L'immersion des sédiments du dernier dragage au large était leur devenir choisi.</p> <p>A cause des courants dominants, il impact toute la zone Est de Béjaia.</p>

La multiplication des ouvrages de protection en enrochements mène à la fixation du rivage et induit à des perturbations hydrodynamiques, modifie l'esthétique de la côte et les caractéristiques du biotope qui affecte la biocénose.

Le port (ouvrage 1) est considéré comme un ouvrage de protection, il modifie les caractéristiques écosystémiques, la réfraction de la houle et le transport sédimentaire. Il impacte alors les côtes adjacentes. Le port de Béjaia est abrité par le Cap Carbon, il nécessite un dragage lors de son ensablement (envasement) et le devenir de ces sédiments dragués et leur immersion au large (point 9). Vu les courants dominants dans la méditerranée sont ceux qui passent par le

détroit de Gibraltar formant des tourbillons anticycloniques sur le littoral algérien, qui est le cas pour le golfe de Béjaïa, les sédiments dragués se retournent à la côte et provoquent de nouveaux problèmes (transit sédimentaire pollué).

L'Oued Soummam (2) est l'un des plus importants oueds de la région, il verse d'énormes quantités d'apports solides et liquides et alimente toute la côte. L'action humaine, extraction du sable, installation de barrages, a fait que les apports de ce cours d'eau diminuent, ce qui veut dire un manque d'alimentation du littoral.

Les épis en T (3) implantés au niveau de Sidi Ali Lebhar ont été installés afin de protéger la piste d'atterrissage de l'aéroport de Béjaïa, mais leur installation a provoqué d'autres problèmes au niveau de la plage de Sidi Ali Lebhar, une érosion marine s'est développée et le cordon dunaire a disparu, ce qui a poussé le CNL de Béjaïa à agir et à lancer un projet de réhabilitation de ce complexe écologique.

L'ouvrage (5), épi en T, s'est installé pour créer une zone calme à l'Est de la piste de l'aéroport de Béjaïa et d'éviter les franchissements des houles du secteur Sud-Est.

La plateforme aménagée est protégée par un enrochement, elle limite à l'Ouest la plage Club hippique qui subit depuis plusieurs années une érosion intense à tel point que la mer arrive à la route nationale n°9 lors des fortes tempêtes. Pour cela une étude de sa protection est lancée par le LEM en 2019.

Les digues frontales de Tichy et d'Aokas n'ont pas d'impacts négatifs sur la zone côtière à moins que la fixation du rivage qui modifie les caractéristiques écosystémiques et hydrodynamiques.

De manière générale, Oued Soummam (aussi Oued Agrioun) affecte toute la région littorale de la wilaya de Béjaïa car il est permanent et considéré le seul qui alimente la zone côtière. Donc le problème d'érosion est causé par la diminution des quantités des apports solides de ce cours d'eau qui est à son tour modifiée par l'être humain et l'anthropisation.

# **Conclusion générale**

Le milieu côtier se caractérise par une forte spécificité naturelle. Sa position géographique et sa richesse en matière d'écosystèmes le rend un espace souhaitable pour l'homme et un milieu d'échange favorable provoquant une forte concentration d'activités, ce qui explique l'indispensable relation entre l'homme et le littoral.

Le risque de l'érosion n'est source d'inquiétude que s'il s'opère dans un site porteur d'enjeux ou d'intérêt exceptionnel. Ici l'enjeu se traduit par la présence de l'aéroport de Bejaia d'une grande valeur : économique, sociale et stratégique.

Le but de cette étude est de proposer la meilleure solution pour la protection du bout de piste d'atterrissage de l'aéroport de Béjaia qui subit des problèmes néfastes, le franchissement des houles est considéré le plus grave.

La première partie de ce travail consistait à établir une étude bathymétrique locale près du rivage du site à protéger à base des données du LEM de 2019 qui a montré que la pente est forte dans les petites profondeurs (jusqu'à -6 m de profondeur, environ de 100m de la côte), au-delà de cette profondeur, la pente est douce ( -9 m à 1 km de la côte). Cette étude a servi de base à une étude de réfraction de la houle à l'aide d'un modèle de Mike 21 (Mike 21 SW) ayant but d'extraire les caractéristiques de la houle à la cote. Ces derniers ont été exploités lors de dimensionnement des variantes proposées dans le dernier chapitre.

Une analyse diachronique de la cinématique du trait de côte de quatre (4) périodes différentes s'est réalisée et a montré que la zone étudiée est majoritairement stable et équilibrée puisqu'il s'agit d'une côte déjà protégée provisoirement par une digue en enrochements. Cela, ne signifie pas que la côte bougiote est stable, bien au contraire, plusieurs plages subissent une énorme érosion vu que le golfe de Béjaia est exposé à un fort hydrodynamisme et l'action humaine accélère le phénomène.

Pour réduire voire éliminer les problèmes de la piste d'atterrissage de l'aéroport, après l'analyse des études réalisées dans la seconde partie de ce mémoire, trois (3) différentes variantes de protection ont été proposées : une digue frontale, un brise-lame émergé et une série de géotubes immergés.

Une étude comparative des trois variantes est réalisée, il semble que la protection par une digue frontale est le choix qui répond le plus aux objectifs visés.

Néanmoins, pour une meilleure maîtrise des problèmes et érosions futures qui pourront être induites par la protection choisie, il est judicieux de prévoir l'étude sur modèle réduit physique en bassin à houle qui englobe la protection proposée et les deux épis à ses extrémités.

## **Références bibliographiques**

**Aoudj C. & Bouaziz T. (2014).** *Fonctionnement morpho sédimentaire du littoral est de Béjaïa*. Mémoire d'ingénieur. Aménagement Du Littoral Alger. Algérie ; ENSSMAL.P 9.

**Assogba L. (2018).** *Etude de la dynamique du trait de côte et des stratégies de gestion du risque d'érosion côtière : cas de Cotonou au Bénin de 1955 à 2018*. Mémoire de Master. Spécialisation en gestion des risques et des catastrophes. Université de Liège : Arlon campus environnement, faculté des Sciences. P 10-11. Disponible sur le web : <http://hdl.handle.net/2268.2/5569>.

**Belkessa R. (2021).** *Réchauffement climatique*. Cours de changement climatique 5<sup>ème</sup> année gestion et protection de littoral, ENSSMAL.

**Bouheniche Dj. (2021).** *Notes de cours de Calculs d'ouvrages maritimes*. Cours de calculs d'ouvrages maritimes 5<sup>ème</sup> année Gestion et Protection du Littoral, ENSSMAL.

**Bouhmadouche M. & Hemdane Y. (2016).** *Erosion of a sandy coast: continuous follow-up of the coastal groynes of protection in Boumerdes (Algeria)*. Environ Earth Sciences. 75, 866. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5665-7>

**Dahmani AEA. (2020).** *Les ouvrages de protection du littoral*. Cours de génie côtier 4<sup>ème</sup> année Gestion et Protection de littoral.

**Dahmani AEA. (2020).** *Modélisation appliquée et application sur Mike*. Cours de modélisation numérique 4<sup>ème</sup> année Gestion et Protection du Littoral, ENSSMAL.

**Daniel F. & Hubaud M.O. (1996).** *Erosion côtière des systèmes littoraux sableux, ODEM*.

**DHI. (2014).** *Mike 21 spectral waves*. [En ligne]. [Consulté le 13.05.2022]. Disponible sur le web : <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves>

**Djouder F. & Boutiba M. (2017).** *Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socioeconomic parameters: case of the Gulf Coast of Bejaia, Algeria*. Arabian Journal of Geosciences. P 3. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3062-5>

**Grimes S. (2021).** *Introduction à la GIZC*. Cours de la Gestion Intégrée des Zones Côtières 5<sup>ème</sup> année Gestion et Protection du Littoral, ENSSMAL.

**Idris N. & Saidani S. (2021).** *Etude de protection du rivage Club Hippique dans la wilaya de Béjaïa*. Mémoire d'ingénieur. Gestion et Protection du Littoral. Alger : ENSSMAL. P 14-15.

**IPCC. (2014).** *Intergovernmental Panel on Climate Change. AR 5 synthesis report : Climate change*. [en ligne]. [ Consulté le 22.04.2022]. Disponible sur : [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)

**Keraghel M. (2020).** *Prise en main et modalités opératoires sur le logiciel ArcGIS*. Cours de cartographie 4<sup>ème</sup> année Gestion et Protection du Littoral, ENSSMAL.

**Kherroubi A. (2011).** *Etude de la sismicité de l'offshore algérien*. Thèse de doctorat en sciences de la terre et de l'univers. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid. P 16.

**Leclaire L. (1972).** *La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin algéro-baléares (pré-continent algérien)*. Mémoire Museum Histoire Naturelle. Paris. P 150-151-152-153-154-155-156

**LEM. (2019).** *Etude de protection du rivage Club Hippique de Béjaia*. Rapport : Mission : collecte et analyse des données de base et de la réfraction de la houle. Non publier. Alger. LEM.

**LEM. (2020).** *Etude de la protection du bout de piste de l'aéroport de Béjaia*. Rapport : Mission 5 : avant-projet détaillé. Non publier. Alger. LEM.

**LEM. (2020).** *Etude de la protection du bout de piste de l'aéroport de Béjaia*. Rapport : Mission 1 : reconnaissances du site et collecte de données. Non publier. Alger. LEM.

**Messaoud Khelifi A. (2014).** *Etude de protection de la plage Est de Boumerdes*. Mémoire de Master. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL. P 35-36.

**Mezhoud A. , Aoudj C. & Houma-Bachari F. (2017).** *Evaluation du risque de submersion marine sur le littoral de Béjaïa, Algérie*. P 163-164-165-166.  
<https://doi.org/10.5150/cmcm.2017.030>

**Mezouar K. (2020).** *Les processus physiques affectant la houle*. Cours d'hydrodynamique côtière 4<sup>ème</sup> année Gestion et Protection du Littoral, ENSSMAL.

**Millot C. (1987).** *La circulation générale en méditerrané occidental*. Annales de géographie n°549. Marseille : Antenne du centre d'océanologie. P 512-513.

**Mouyalou V. (2017).** *Dynamique morphosédimentaire d'un segment côtier sableux : du Lycée Léon Mba (Libreville) à La Sablière (Baie d'Akouango)*. Thèse de Doctorat. Géomorphologie littorale. Université Omar Bongo. P 43. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01772394>

**Mujabar S.P. et Chandrasekar N. (2013).** *Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS*. P 1303.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9962-x>

**Otmani H. (2020).** *Processus hydro-sédimentaires*. Cours d'aménagement du littoral 4<sup>ème</sup> année Gestion et Protection du Littoral, ENSSMAL.

**Ould Fah M. (2016).** *Etude hydrologique du bassin versant de la Soummam*. Mémoire de Master. Option : Ouvrage Hydraulique et Aménagement. M'sila : Université Mohamed Boudiaf. P 5.

**Pumain D. (2004).** *Littoral*. In : *encyclopédie Hypergeo*. [ Enligne ]. [ Consulté le 26.05.2022].  
Disponible sur : <https://hypergeo.eu/littoral-2/>

**RAMSAR, (2018).** *Algérie, Vallée de l'Oued Soummam*. Fiche descriptive Ramsar.  
<https://rsis.ramsar.org/ris/1898>

**RPA. (2003).** *Règles Parasismiques Algériennes 99 version 2003*. Document technique réglementaire. Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique. P 10-11.

**Salhi S. et Talanzar E. (2018).** *Hydrogéologie et modélisation hydrodynamique de la baie de Béjaia*. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ENSSMAL. P 48.

**SSMO. (1970).** *Summary of Synoptic Meteorological Observations. Mediterranean Marine Areas*. Volume 2. P 632.

**Thior M. et al. (2019).** *Analyse Spatiale de l'évolution du Trait de Côte Autour de l'embouchure du Fleuve Casamance (Sénégal) de 1968 à 2017, à Partir de l'outil DSAS*. European Scientific Journal ESJ, 15(9). <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n9p106>

**UNEP, (2017).** *United Nations Environment Programme. Environnement marin et côtier de la Méditerranée*. Rapport 2017 sur la qualité de la méditerranée. [En ligne]. [Consulté le 22.06.2022]. Disponible sur le web : <https://www.medqsr.org/fr/node/230>

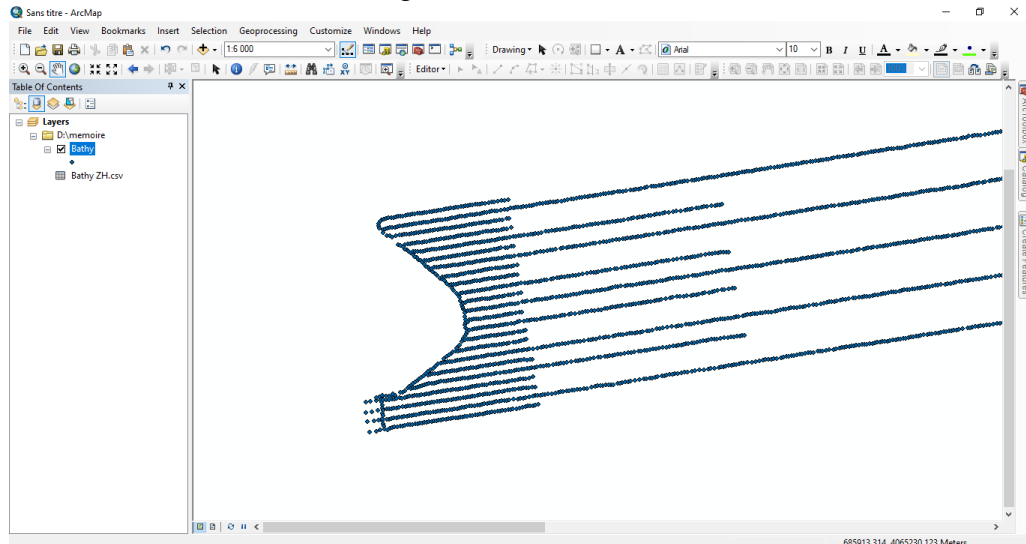
Sites web :

<https://uottawa.libguides.com/c.php?g=715386&p=5132223>

# **Annexes**

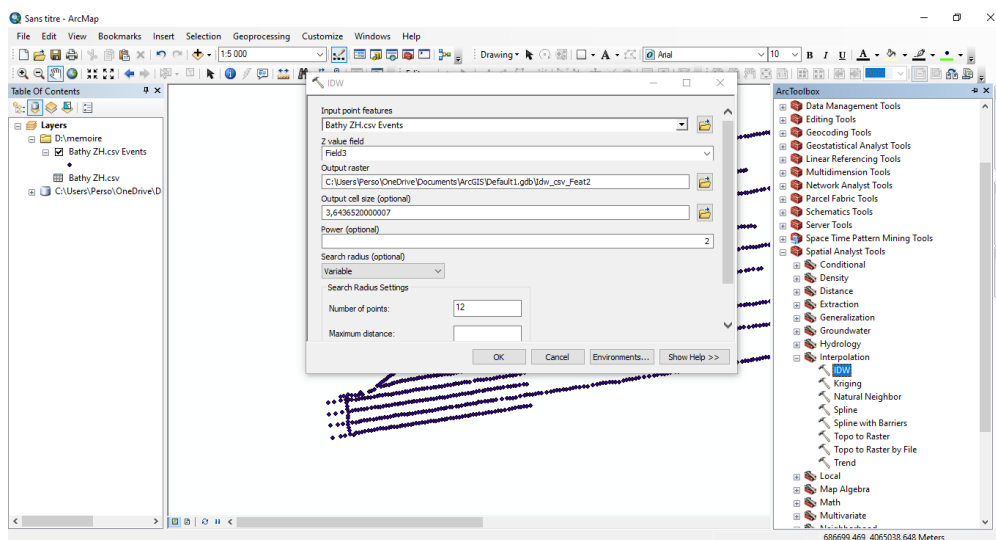
## Étapes de réalisation de la bathymétrie sous ArcGIS

- 1- Création d'un vecteur point, on choisit le système géodésique WGS 1984, projection UTM zone 31N ;
- 2- Digitalisation de la bathymétrie à partir du levé bathymétrique réalisé par le LEM, (ou à l'aide d'une carte marine locale géoréférencée extraite de Navionics) ;

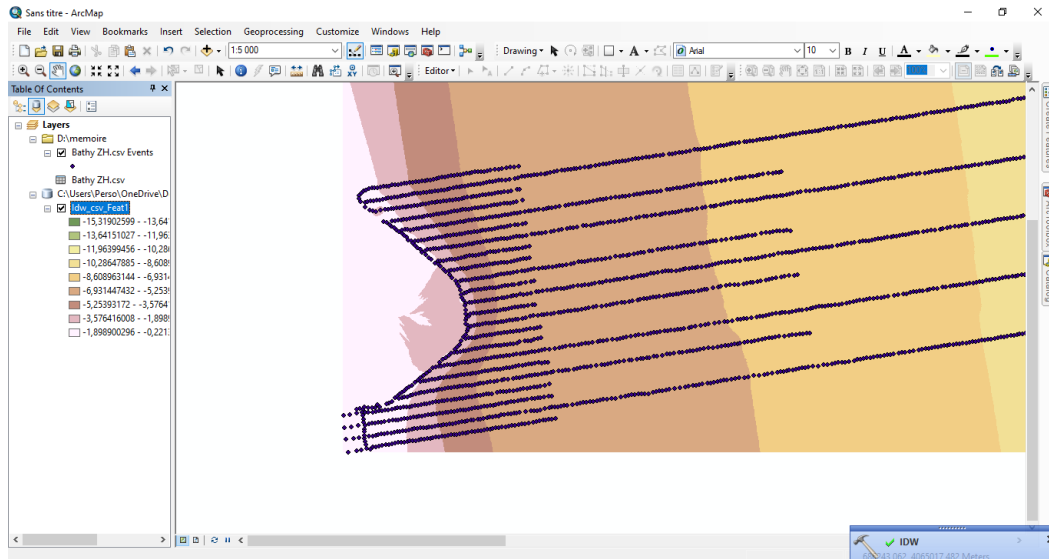


**Figure 1:** Bathymétrie obtenue à partir des données du LEM

- 3- Interpolation des valeurs ponctuelles de la bathymétrie : à l'aide de l'outil IDW (interpolation) dans Spatial Analyst Tools (ArcToolbox). On peut aussi la réaliser à l'aide de Kriging ou Spline.



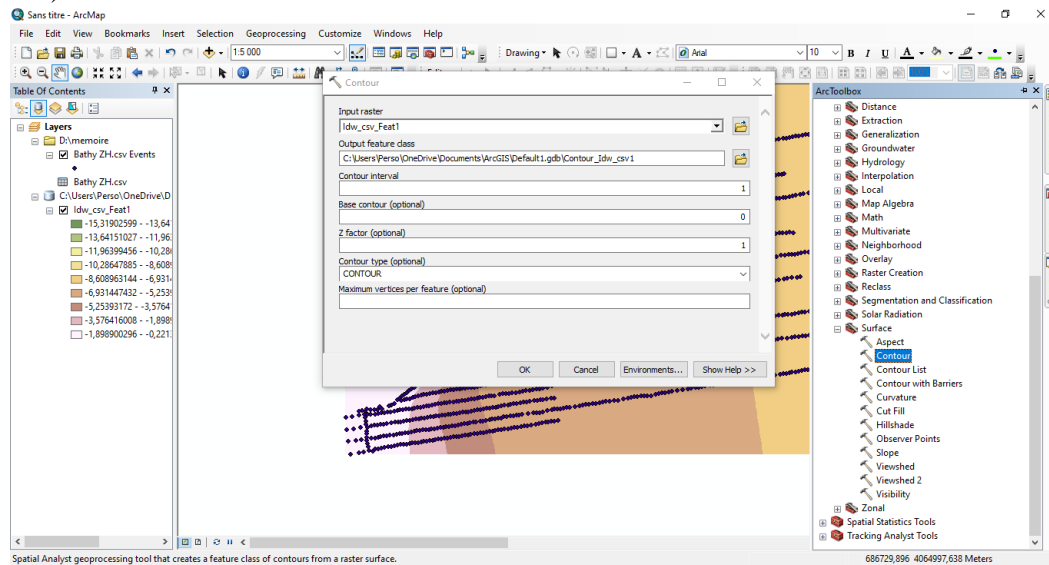
**Figure 2:** Étapes de l'interpolation des points de la bathymétrie sur ArcGIS



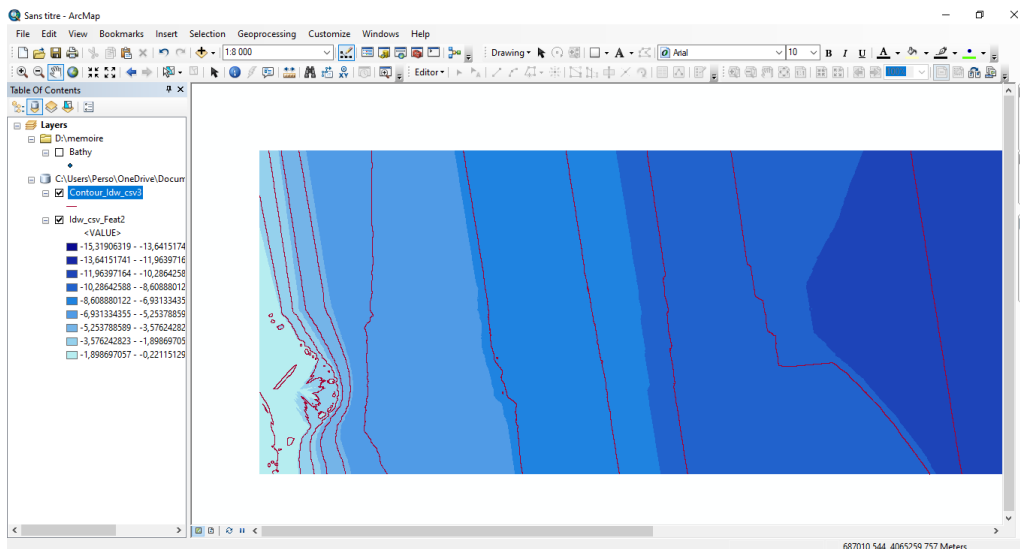
**Figure 3:** résultat de l'interpolation de la bathymétrie

Pour la modification de la symbologie : un clic droit sur la couche résultante, choisir propriétés et modifier la symbologie.

#### 4- Génération des isobathes : à partir de l'Outil Contour dans surface (Spatial Analyst Tools).



**Figure 4:** Etapes de la génération des isobathes sur ArcGIS



**Figure 5:** Résultat final de la Réalisation de la bathymétrie

Afin de réaliser une carte explicative : on ajoute une couche de la commune de Béjaia ainsi que tous les éléments cartographiques nécessaires : légende, échelle, orientation, système géodésique, grille de localisation, ...

## **Fonctionnement de l'extension DSAS :**

### **- La Baseline :**

Il s'agit de numériser une ligne de référence imaginaire à partir de laquelle DSAS crée des transects qui coupent les différents traits de côtes. Ainsi, tous les transects sont perpendiculaires à la ligne de base, qui doit également être parallèle à la côte. Cependant, du fait des irrégularités du littoral, les transects sont déformés. Cela provoque parfois l'apparition anormale de transects ou leur intersection avant les rives. Par conséquent, ils peuvent être corrigés en les redressant ou en les enlevant.

### **- Les shorelines :**

Les shorelines représentent les traits de côte déjà numérisés dans la géodatabase. Il s'agit en effet, des traits de côte auxquels la Baseline doit être parallèle et devant servir de mesure dans l'environnement de DSAS. Ainsi, pour pouvoir calculer des indices (Tableau II.2), les shorelines doivent être constitué d'au moins deux entités de dates ou d'heures différentes.

### **- Les Buffer shorelines :**

A partir de la zone tampon, on peut définir de quel côté de la Baseline les profils seront tracés. Elle donne deux possibilités de position de la Baseline : du côté de la mer (onshore) ou du côté de la terre (offshore) et cela en fonction du sens de la Baseline, défini par les sommets de départ et d'arrivée.

## **Les calculs statistiques :**

Cette étape s'est faite d'abord par la création de transects, puis par le calcul des indices ensuite la représentation graphique des tables attributaires des indices calculés selon leur pertinence. En effet, Le calcul statistique consiste, en fonction des indices considérés, à faire ressortir les données tabulaires calculées automatiquement par DSAS.

### **- Les transects :**

Les transects sont des sections perpendiculaires à la Baseline qui permettent de mesurer les changements des taux d'évolution des traits de côte (accrétion ou érosion).

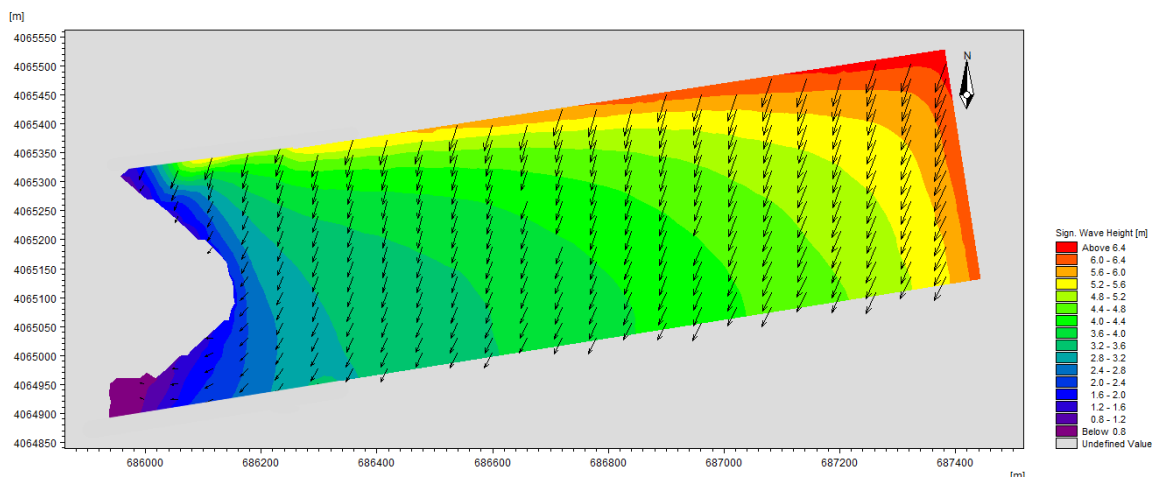
### **- Calcul des paramètres géostatistiques :**

Il s'agit de l'analyse automatique de tous les transects qui permet de définir des secteurs d'évolution et d'en calculer les valeurs moyennes. Ainsi, après calcul, on obtient dans la table attributaire des transects les différents indices pris en compte lors de la configuration.

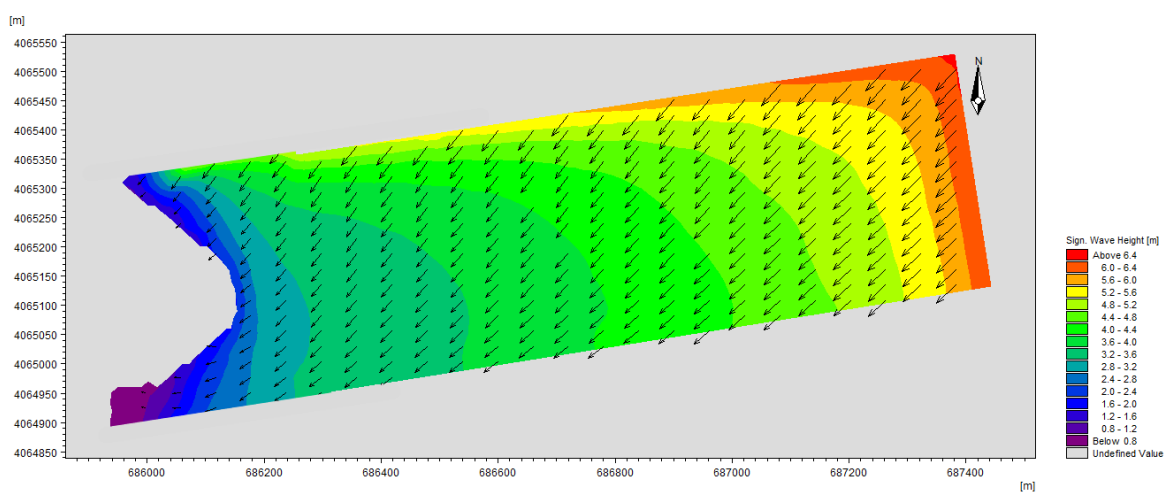
## **Tableau 1 : Statistiques Calculés par DSAS (Assogba, 2018)**

NSM	Net Shoreline Movement
LCI	Confidence Interval of Linear Regression
SCE	Shoreline Change Envelope
WLR	Weighted Linear Regression Rate
EPR	End Point Rate
WSE	Standard Error of Weighted Linear Regression
ECI	Confidence of End Point Rate
WR2	R-squared of Linear Regression
LRR	Linear Regression Rate
LMS	Least Median of Squares
LSE	Standard Error of Linear Regression

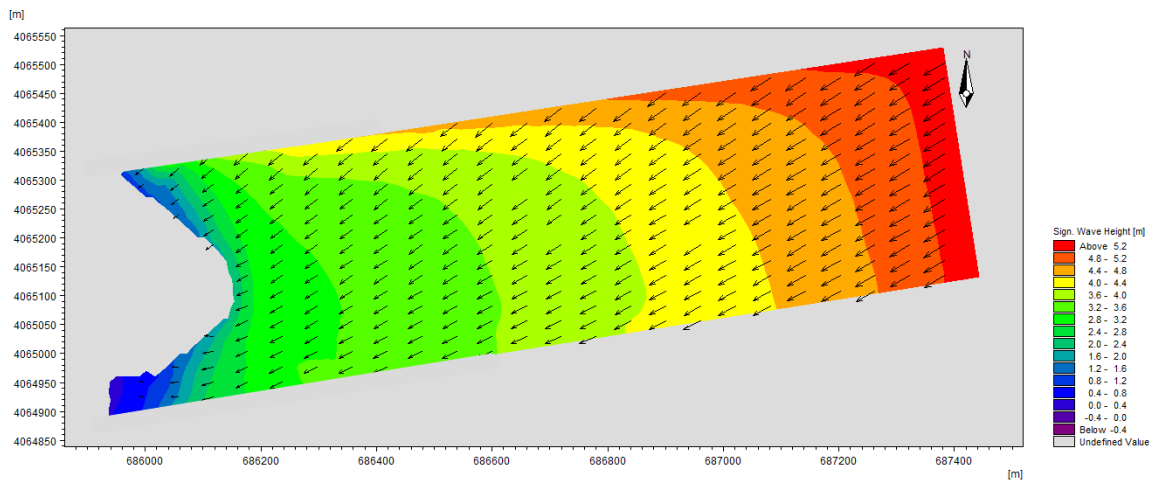
### Action de la houle vigtennale :



**Figure 6:** Epure de la réfraction de la houle vigtennale sur le rivage de l'aéroport de Béjaïa direction 20° N

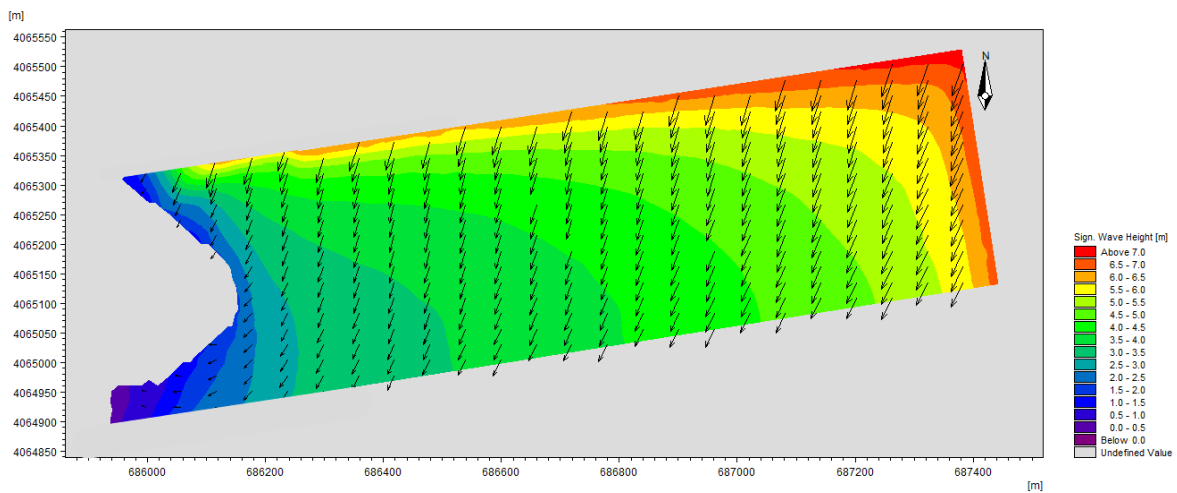


**Figure 7:** Epure de la réfraction de la houle vigtennale sur le rivage de l'aéroport de Béjaïa direction 45° N

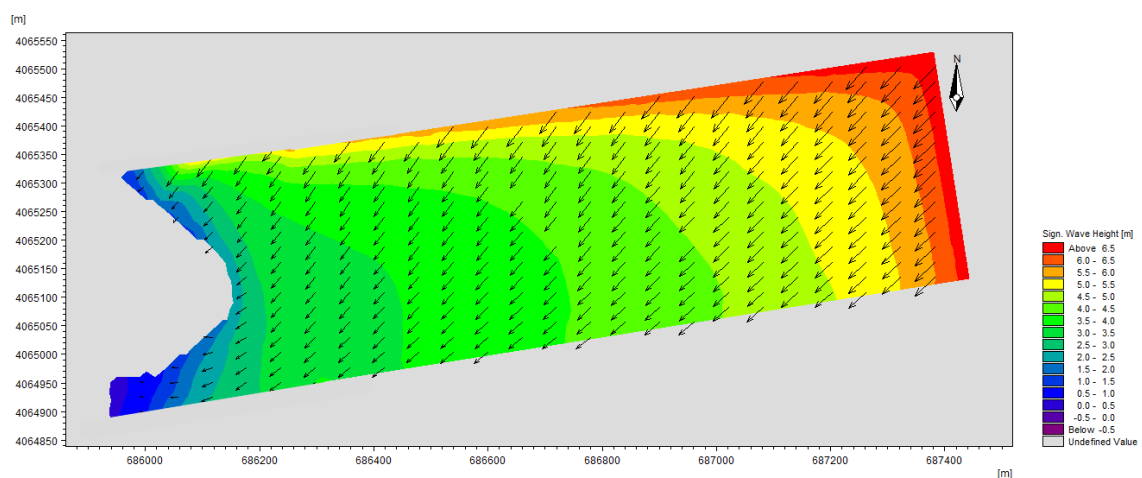


**Figure 8:** Epure de la réfraction de la houle vigntennale sur le rivage de l'aéroport de Béjaia direction 60° N

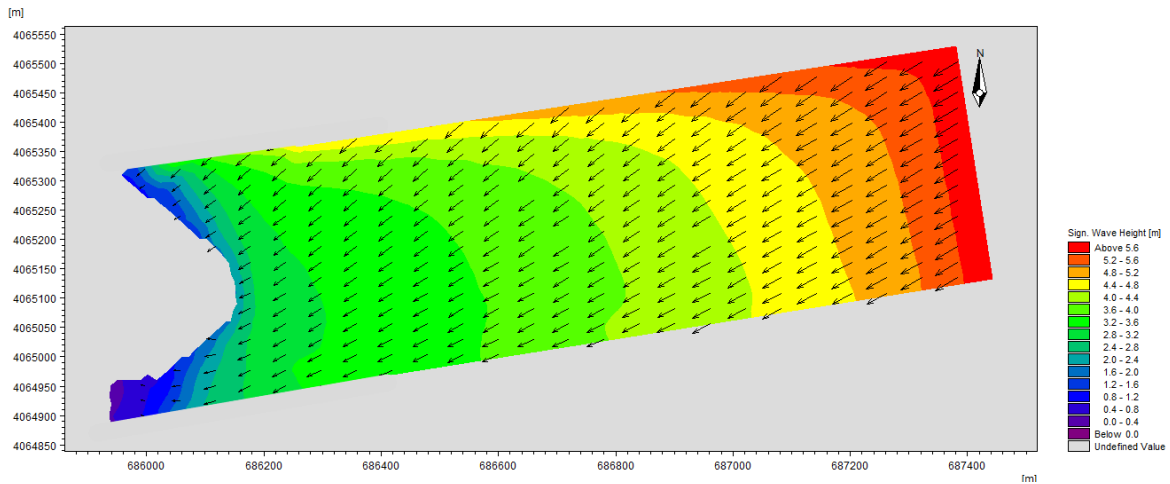
### Action de la houle cinquantennale :



**Figure 9** Epure de la réfraction de la houle cinquantennale sur le rivage de l'aéroport de Béjaia direction 20° N



**Figure 10:** Epure de la réfraction de la houle cinquantennale sur le rivage de l'aéroport de Béjaia direction 45° N

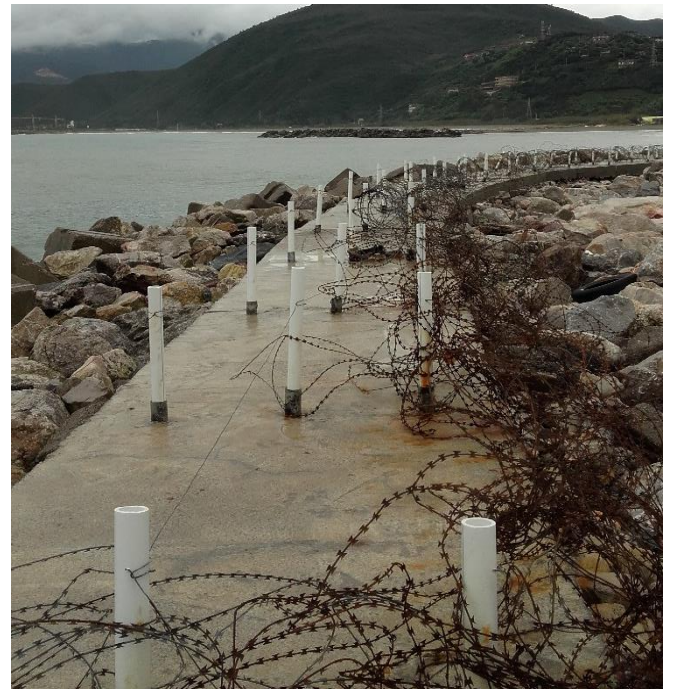


**Figure 11:** Epure de la réfraction de la houle cinquantennaire sur le rivage de l'aéroport de Béjaia direction  $60^{\circ}$  N

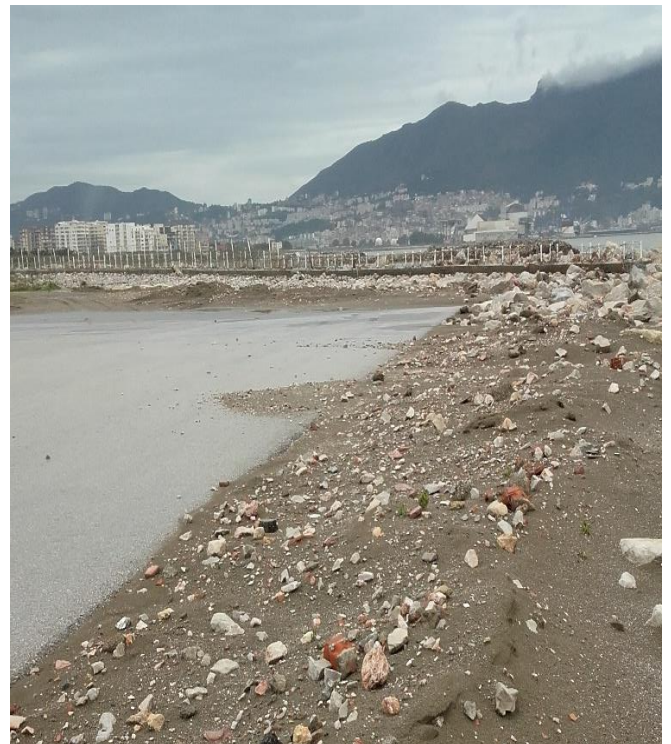
**Tableau II :** Table attributaire des transects réalisés pour les périodes choisies

TransOrder	Azimuth	TCD	SHAPE_Length	EPR < 0	EPR > 0	EPRunc
1	279,374	45	92,464	-0,720		0,212
2	281,978	60	95,508		0,577	0,061
3	284,755	75	98,526		0,862	0,061
4	287,522	90	102,889		1,068	0,061
5	290,013	105	98,432		0,924	0,061
6	291,805	120	95,592		0,953	0,061
7	293,449	135	93,071		0,848	0,061
8	294,615	150	89,300		0,800	0,061
9	295,688	165	85,067		0,621	0,061
10	296,679	180	79,751		0,568	0,061
11	297,706	195	73,254	-0,254		0,061
12	298,673	210	74,466	-0,706		0,061
13	298,045	225	78,245	-0,980		0,061
14	296,804	240	77,992	-0,418		0,061
15	295,591	255	84,027	-0,099		0,061
16	295,160	270	102,882	-0,044		0,061
17	294,720	285	110,628	-0,176		0,061
18	294,159	300	109,289	-0,242		0,061
19	293,572	315	105,156	-0,199		0,061
20	292,901	330	97,566	-0,059		0,061
21	291,852	345	90,849		0,075	0,061
22	290,561	360	86,809		0,040	0,061
23	289,342	375	86,267	-0,089		0,061
24	288,170	390	83,921	-0,025		0,061
25	286,345	405	87,720	-0,073		0,061
26	284,623	420	88,922	-0,078		0,061
27	282,247	435	89,509	-0,131		0,061

28	279,772	450	83,845		0,013	0,061
29	277,227	465	76,698		0,110	0,061
30	274,667	480	80,860		0,429	0,061
31	271,906	495	77,978		0,338	0,061
32	268,547	510	87,203		0,256	0,061
33	265,145	525	94,777	-0,091		0,061
34	261,668	540	99,262	-0,103		0,061
35	258,397	555	101,976		0,018	0,061
36	255,344	570	107,141		0,024	0,061
37	252,533	585	108,814		0,116	0,061
38	249,974	600	109,018		0,101	0,061
39	247,933	615	107,263		0,313	0,061
40	246,036	630	103,946		1,016	0,061
41	244,325	645	95,940		1,761	0,061
42	242,943	660	89,785		1,409	0,061
43	241,630	675	81,694		0,748	0,061
44	240,698	690	72,758		0,027	0,061
45	239,833	705	70,368	-0,662		0,061
46	239,455	720	70,749	-1,142		0,061
47	240,044	735	70,085	-1,587		0,061
48	239,817	750	70,186	-1,876		0,061
49	240,671	765	69,957	-1,634		0,061
50	241,597	780	70,372	-1,506		0,061
51	242,485	795	70,251	-1,221		0,061
52	244,198	810	70,367	-0,996		0,061
53	246,050	825	69,458	-0,780		0,061
54	247,521	840	70,121	-0,498		0,061
55	248,977	855	77,810	-0,151		0,061
56	249,888	870	71,945		0,181	0,061
57	250,834	885	80,569		0,759	0,061
58	251,521	900	87,948		1,273	0,061
59	252,129	915	98,737		1,977	0,061

**Photos prises lors de la Visite du Site**

**Figure 12:** Photos de la protection provisoire installée au bout de piste de l'aéroport de Béjaia



**Figure 13:** Images prises après une tempête à la piste d'aéroport de Béjaia



**Figure 14:** Le problème de franchissement de la houle au bout de piste de l'aéroport de Béjaia

## Résumé

L'aéroport de Béjaia est de type civil international, l'unique en Algérie qui s'est construit en bordure de mer. Sa situation, près de la mer, lui fait encourir des effets négatifs provoqués particulièrement par les assauts incessants de la mer qui conduisent fréquemment à des phénomènes d'érosion côtière. Le bout de piste de cet aéroport est sujet à des franchissements récurrents, il est donc nécessaire de mettre en place une protection permettant de consolider durablement le trait de côte et de supprimer ou, du moins, limiter les franchissements de la houle.

Le travail présent a pour but d'étudier certains phénomènes liés aux problèmes sous évoqués, de les analyser pour enfin suggérer des solutions de protection de ce site important.

Une étude hydro-morphologique est présentée dans ce mémoire, où la réfraction de la houle est réalisée sous Mike 21, SW modèle, l'évolution du trait de côte des années 2006, 2014, 2018 et 2020 est effectuée à l'aide d'une extension d'ArcGIS appelée DSAS. A partir des résultats obtenus, trois (3) variantes ont été proposées, après une étude comparative, il sort qu'une digue frontale soit meilleure pour limiter voire éliminer les problèmes du site.

**Mots clés :** Golfe de Béjaia, Aéroport de Béjaia, franchissement, bathymétrie, simulation, trait de côte.

## Abstract

Béjaia airport is an international civilian airport, the only one in Algeria that was built on the seashore. Because of its close location to the sea, the airport bears negative effects caused especially by the incessant sea attacks which frequently lead to coastal erosion phenomena. The runway end of this airport is subject to recurrent crossings, it is therefore necessary to put in place a protection allowing the shoreline to be consolidated in a sustainable manner and eliminating or at least limiting the swell crossings.

The present work aims to study certain phenomena related to the problems mentioned above, to analyze them and finally to suggest solutions for the protection of this important site.

A hydro-morphological study is presented in this thesis, where the refraction of the swell is carried out under Mike 21, SW model, the evolution of the coastline of the years 2006, 2014, 2018 and 2020 is carried out using an extension of ArcGIS called DSAS. Based on the results obtained, three (3) variants have been proposed, after a comparative study, it appears that a front dike is better to limit or eliminate the problems of the site.

**Key words:** Gulf of Bejaia, Bejaia airport, crossing, bathymetry, simulation, coastline.

## ملخص

مطار بجاية هو مطار مدني دولي وهو الوحيد في الجزائر الذي أقيم على حدود البحر. موقعه القريب من البحر جعله يعاني من آثار سلبية ناجمة بشكل خاص عن الهجمات المستمرة للبحر والتي تؤدي في كثير من الأحيان إلى ظاهرة تآكل السواحل. تخضع نهاية مهبط هذا المطار لعمليات العبور المتكررة، لذلك من الضروري وضع حماية تسمح بتدعيم الخط الساحلي بشكل دائم والقضاء على معابر الانتفاخ أو الحد منها على الأقل.

يهدف العمل الحالي إلى دراسة بعض الظواهر المتعلقة بالمشاكل المذكورة أعلاه، تحليلها وأخيراً اقتراح حلول لحماية هذا الموقع المهم.

تم تقديم دراسة هيدرو-مورفولوجية في هذه المذكرة، حيث تمت دراسة انكسار الامواج تحت نموذج Mike 21 SW، وتطور الخط الساحلي للأعوام 2006 و2014 و2018 و2020 تم تنفيذه باستخدام امتداد ArcGIS في DSAS. بناء على النتائج التي تم الحصول عليها، تم اقتراح ثلاثة (3) متغيرات، بعد دراسة مقارنة، تبين أن السد الأمامي أفضل للحد من مشاكل الموقع أو حتى القضاء عليها.

**الكلمات المفتاحية:** خليج بجاية، مطار بجاية، العبور، قياس الأعماق، المحاكاة، خط ساحلي.