



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Sciences de la Mer

Option : Gestion et Protection du Littoral

Thème :

***Cartographie des formations géologiques de la zone côtière  
de Collo (Skikda, Algérie) et analyse de leur comportement  
vis-à-vis de l'érosion***

Présenté par :

**KABACHI YOUSRA  
ALILI AMINA**

Soutenu le 28/06/2025, devant le jury suivant :

Mme SALEM CHERIF Y.	Maitre de Conférences B - ENSSMAL	Présidente
Mme MAHDID S.	Maitre Assistante A - ENSSMAL	Examinatrice
M. SEFFARI A.	Maitre de Recherche B - CRAAG	Promoteur
Mme FEZAA N.	Professeur - ENSSMAL	Co-Promotrice

Année universitaire : 2024/2025

## Remerciement

Nous exprimons, en tout premier lieu, notre gratitude à **Dieu** le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la santé, la force et la détermination nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier sincèrement **nos parents** pour avoir rendu ce parcours possible, pour leur soutien indéfectible au fil des années pour avoir toujours cru en nous. Ce travail n'aurait pas vu le jour sans leur amour et leur encouragement.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à **M. Seffari**, Maître de recherche au C.R.A.A.G et encadrant de ce travail, pour son engagement remarquable tout au long de cette expérience. Il nous a offert bien plus qu'un simple accompagnement scientifique : un encadrement attentif, un temps précieux, des efforts constants, et un savoir transmis avec générosité et bienveillance. Sa présence, aussi bien dans les moindres détails que dans les étapes clés, ainsi que sa volonté sincère de nous voir progresser, ont largement contribué à faire de ce travail une réalisation particulièrement enrichissante et significative.

Nous adressons nos sincères remerciements à **Mme Fezaa**, Professeur à l'ENSSMAL et co-encadrante de ce travail, pour sa disponibilité constante, sa gentillesse, et son soutien à chaque étape où nous avons eu besoin d'elle. Son aide précieuse, sa bienveillance et son accompagnement ont été essentiels pour nous permettre de surmonter les difficultés rencontrées tout au long de ce parcours.

Nous remercions **M. Zerrouki C**, professeur à l'USTHB, pour le temps qu'il nous a consacré et pour avoir partagé avec nous son expertise avec bienveillance

Nous tenons à remercier **Mme Salem Cherif .Y** maitre de Conférences B - ENSSMAL d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à **Mme MEHDID S**, Maitre Assistante A - ENSSMAL, pour avoir accepté d'examiner notre travail. Nous lui sommes reconnaissantes pour le temps qu'elle y consacrera ainsi que pour la richesse de ses observations, qui ne manqueront pas de contribuer à l'amélioration de notre démarche.

Nous remercions chaleureusement **M. Ben Djelloul Hichem**, dont la disponibilité, la bonne humeur et le précieux soutien logistique ont grandement contribué au bon déroulement de la sortie sur terrain organisée par le CRAAG.

Nous tenons à remercier le Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG) pour son appui et sa collaboration dans le cadre de ce travail.

Nous exprimons notre gratitude à l'ensemble de la grande famille de l'ENSSMAL — qu'il s'agisse des enseignants, des étudiants ou du personnel — pour leur bienveillance et leur contribution à rendre notre passage au sein de l'école aussi enrichissant qu'agréable.

Nous tenons à remercier tout particulièrement nos amies, pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur présence réconfortante tout au long de ce parcours. Nous remercions également toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce présent mémoire.

## Dédicace

### *Yusra*

Louange à **Dieu**, qui m'a donné la force d'accomplir ce travail. À **ma mère et mon père**, mon soutien, ma force et ma motivation dans ce parcours et dans ma vie. Que Dieu vous protège et vous récompense pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À **ma sœur et mes frères**, ma force et mon refuge dans les moments de faiblesse. Merci pour votre présence.

À **ma belle-sœur**, ma sœur de cœur, qui m'oriente lorsque je suis perdue et qui me soutient dans les épreuves. Merci pour ton affection.

À mes neveux et nièces (**Mohamed, Meriem, Youcef et Younes**), ma joie et ma source d'espoir pour l'avenir.

À ma collègue dans ce projet, **Amina**, pour ton soutien, ton sérieux exemplaire, ta gentillesse et ta persévérance. Ton amitié précieuse et ta solidarité ont rendu cette aventure plus belle et plus sereine.

Un grand merci à **Monsieur Seffari**, notre promoteur, pour votre accompagnement remarquable, vos conseils avisés, votre patience et votre disponibilité tout au long de ce parcours. Votre soutien constant et vos orientations précieuses ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

À **Madame Fezaa**, une enseignante d'une grande qualité humaine et professionnelle, toujours présente pour nous guider avec générosité et patience. Je vous remercie sincèrement pour votre disponibilité, votre dévouement et la richesse de votre accompagnement qui ont été pour moi un véritable appui.

À mes amies, mes sœurs de cœur (**Achwaq, Belkis, Marya, Chaima et Sabrina**) qui ont été à mes côtés pendant ces cinq années : merci pour votre aide, votre patience et votre soutien indéfectible. Votre amitié m'a portée dans les moments les plus difficiles.

À **mes professeurs**, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance pour vos efforts, vos conseils avisés et votre engagement constant tout au long de ma formation.

## *Amina*

Nothing I have achieved would have been possible without the will, mercy, and guidance of **Allah**.

I want to thank **myself**

For giving my very best over these five years,

For moving forward despite fear and hardship,

For pushing myself to the absolute limit.

I have never been this proud of myself.

I want to thank **my mum and dad**,

For always being there, for believing in me when I didn't,

For every drop of sweat that rolled down your faces to ensure my comfort.

I'll be forever in debt for your enormous sacrifices.

**To my two sisters and my little brother**

For your love, your support, and the unspoken strength you always give me, thank you.

**To my partner Yousra,**

For your patience, your calm in chaos, and your quiet strength, thank you.

Your incredible work and dedication made a real difference.

Your support truly mattered more than words can say.

**To my friends,**

Thank you for making this chapter of my life more joyful, more colorful, and a lot less heavy.

**To my cousin Kenz,**

Thank you for always being there when I needed a hand.

**To my teachers,**

Thank you for your guidance and your support throughout the years.

**To my co-supervisor Mme Fezaa,**

Thank you for being the sweet soul you are, for your care, your kindness, and for making the best out of this journey. You were more than just a professor; you were a guide, an inspiration, and a reassuring presence.

And finally, a special thank you to **my supervisor Mr Seffari**

For being there, literally all the time

For turning what seemed like a terrifying experience into something safer, clearer, and meaningful.

For taking well care of us and for making us love what we do, thank you.

## Table des matières

<b>Liste des figures</b> .....	9
<b>Liste des tableaux</b> .....	12
<b>Liste des équations</b> .....	13
<b>Liste des acronymes</b> .....	14
<b>Introduction générale</b> .....	17
<b>I.Généralités</b> .....	19
I.1    Le système littoral .....	20
I.1.1    Définition du littoral .....	20
I.1.2    Zonage du littoral .....	20
I.2    Caractéristiques et dynamiques des principaux types des cotes.....	21
I.2.1    Les côtes rocheuses et sableuses.....	21
I.2.2    Cotes vaseuses / mixtes.....	22
I.3    Moteurs de la dynamique côtière.....	22
I.3.1    Les vagues.....	22
I.3.2    Les Courants marins .....	23
I.3.3    Les marées .....	25
I.3.4    Les tempêtes.....	25
I.3.5    Les surcotes marines .....	26
I.3.6    La submersion marine.....	26
I.4    Rôle de la géologie dans la morpho dynamique.....	26
I.5    Interaction entre activité humaine et morpho dynamique .....	28
I.6    Notion de trait de côte .....	28
I.7    Évolution morphologique du littoral et changements climatiques .....	29
<b>II.Cadre géographique</b> .....	30
II.1    Contexte général .....	31
II.2    Situation géographique de la zone s'étude .....	31
II.3    Cadre géomorphologique .....	32
II.3.1    La géomorphologie côtière de Tamanart.....	34
II.3.2    La morphologie de Collo.....	35
II.3.3    Le littoral du Cap Bougaroun.....	35
II.4    Morphologie sous-marine de la région de Collo .....	35
II.5    Réseaux hydrographique .....	36
II.5.1    Evaluation de la susceptibilité aux instabilités.....	37
II.5.2    Evaluation de la vulnérabilité côtière.....	39

II.5.3	Evaluation de la turbidité .....	40
II.6	Les caractéristiques climatiques et hydrodynamiques de la région de Collo : .....	41
II.6.1	Les températures .....	41
II.6.2	Les précipitations .....	42
II.6.3	Le vent.....	43
II.6.4	La houle.....	44
<b>III.</b>	<b>Cadre géologique .....</b>	<b>47</b>
III.1	Introduction .....	48
III.2	Evolution géodynamique de la marge algérienne : structuration d'AlKaPeCa et ouverture du bassin algérien. ....	48
III.3	Les différents faciès lithologiques .....	50
III.3.1	Le socle kabyle.....	50
III.3.2	Aperçu magmatique .....	50
III.3.3	Notion tectonique .....	51
III.4	Conclusion .....	51
<b>IV.</b>	<b>Analyse structurale de la région de Collo .....</b>	<b>55</b>
IV.1	Introduction .....	56
IV.2	Carte géologique de la région de Collo. ....	56
IV.2.1	Socle et formations anciennes .....	56
IV.2.2	Activités magmatiques. ....	57
IV.2.3	Dépôts sédimentaires néogène et quaternaire. ....	57
IV.2.4	Le réseau de failles. ....	59
IV.3	Détail de la cartographie structurale et géologique de la zone côtière de Collo .....	60
IV.4	Structures tectoniques dans la région côtière de Collo (Nord-Est algérien) : observations par images satellitaires. ....	62
IV.5	Structures tectoniques dans la région côtière de Collo (Nord-Est algérien) : observations de terrain.....	63
IV.6	Analyses structurales des failles mesurées sur terrain.....	66
IV.7	Modèle structural (Reidel) appliqué sur les structures de la région de Collo.....	67
IV.7.1	Analyse détaillée de la carte structurale de la région de Collo .....	67
IV.7.2	Distribution spatiale et densité des failles .....	68
IV.7.3	Projection stéréographique : contraintes principales et régime tectonique .....	68
IV.7.4	Modèle de Riedel : architecture cinématique du cisaillement.....	70
IV.8	Impact de la géodynamique méditerranéenne sur la morphogénèse côtière de Collo (Nord-Est algérien) .....	71
IV.8.1	Structures tectoniques majeures identifiées .....	72

IV.8.2	Héritage de la convergence Afrique–AlKaPeCa.....	72
IV.8.3	Conclusion : une tectonique qui façonne le trait de côte.....	72
<b>V.</b>	<b>Analyse des événements extrêmes</b> .....	<b>74</b>
V.1	Introduction .....	75
V.2	Analyse des événements extrêmes .....	75
V.2.1	Théorie des valeurs extrêmes .....	75
V.2.2	Hauteur significative .....	76
V.2.3	Période de pic .....	76
V.3	Méthode Peaks Over Threshold (POT) .....	77
V.4	Conclusion .....	82
<b>VI.</b>	<b>Modélisation hydrodynamique</b> .....	<b>83</b>
VI.1	Introduction .....	84
VI.2	Présentation du modèle.....	84
VI.2.1	Mesh Generator .....	84
VI.2.2	Le module de vague spectrale : Mike 21 SW (Spectral Wave).....	85
VI.2.3	Le module hydrodynamique : Mike 21 HD (Hydrodynamic Module) .....	85
VI.3	Construction du modèle numérique et présentation des résultats.....	86
VI.3.1	Génération de la Mesh.....	86
VI.3.2	Mesh et bathymétrie résultante .....	86
VI.4	Scénarios de simulation .....	88
VI.5	Résultats des simulations.....	89
VI.5.1	Période de retour de 10 ans : .....	89
VI.5.2	Période de retour de 30 ans : .....	90
VI.5.3	Période de retour de 100 ans : .....	91
VI.6	Interprétation des résultats.....	92
VI.7	Conclusion.....	92
<b>VII.</b>	<b>Évolution du trait de côte</b> .....	<b>94</b>
VII.1	Introduction .....	95
VII.2	Méthodologie de travail.....	95
VII.2.1	Collecte des données .....	95
VII.2.2	Outils de traitement .....	96
VII.2.3	Méthodologie d’analyse de l’évolution du trait de côte .....	98
VII.2.4	Estimation des incertitudes associées à la délimitation du trait de côte.....	101
VII.3	Résultats et discussion .....	103

VII.3.1	Evolution du littoral nord-est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora)	104
VII.3.2	Evolution du littoral dans les secteurs de Cap Bougaroun, Tamanart et Collo	107
VII.4	Conclusion	117
<b>VIII.</b>	<b>Modélisation prédictive avec le filtre de kalman</b>	<b>118</b>
VIII.1	Introduction	119
VIII.2	Méthodologie	119
VIII.2.1	Définition du filtre de Kalman	119
VIII.3	Résultats des prédictions du trait de côte pour 2034 et 2044 à partir du filtre de Kalman	119
VIII.4	Résultats des Modélisations du Trait de Côte par Beta Shoreline Forecasting	122
VIII.5	Analyse de l'évolution du trait de côte selon les prédictions à 10 et 20 ans	122
VIII.5.1	Le filtre de Kalman	122
VIII.5.2	Le modèle Beta Shoreline Forecasting	124
VIII.6	Conclusion	125
	<b>Conclusion générale</b>	<b>127</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>129</b>
	<b>Annexe</b>	<b>134</b>
A.	Méthodologie SIG	134
B.	Carte géologique détaillée de la zone d'étude	136
C.	Méthodologie et résultats de l'analyse spatio-temporelle du trait de côte	137

## Liste des figures

<b>Figure I-1</b> :Les éléments d'une zone littorale (Bird, 2008).....	20
<b>Figure I-2</b> : Terminologie des vagues et schéma des courants à mesure que les crêtes et les creux des vagues se déplacent vers le rivage. (Bird, 2008).....	23
<b>Figure I-3</b> : Schéma illustrant le principe de la dérive littorale (Planet-terre.ens-lyon.fr).....	25
<b>Figure I-4</b> : Les différents types de failles en fonction des différents régimes de déformation. .....	27
<b>Figure I-5</b> : Les mouvements de terrains associés au jeu des différents types de failles. ....	28
<b>Figure II-1</b> : Situation géographique de la zone d'étude. ....	32
<b>Figure II-2</b> : Carte des pentes de la région de Collo, réalisée par le traitement Slope des MNT sur ArcGis. ....	33
<b>Figure II-3</b> : carte d'orientation des pentes de la région de Collo, réalisée par le traitement Aspect des MNT sur Arc Gis. ....	34
<b>Figure II-4</b> : Représentation 3D de la bathymétrie de la zone d'étude réalisée sur Surfer à partir d'une bathymétrie de 115 m de résolution issue via le service WCS (Web Coverage Service) EMODnet Bathymetry. ....	35
<b>Figure II-5</b> : Réseau hydrographique et bassins versants de la région de Collo réalisée par un traitement MNT sur ArcGis. ....	37
<b>Figure II-6</b> : Carte de susceptibilité aux instabilités de la région de Collo, réalisée par le traitement des MNT sur ArcGis en se basant sur les paramètres (Pentes, orientation des pentes, nature du sol et végétation à travers l'indice NDVI). ....	38
<b>Figure II-7</b> : Carte de vulnérabilité de la région de Collo, réalisée par le traitement des MNT sur ArcGis en se basant sur les paramètres (Pentes, orientation des pentes et courbure). ....	39
<b>Figure II-8</b> : Évolution de la turbidité côtière de la région de Collo (1990–2005), réalisée par le traitement des images satellitaires Sentinel et Landsat sur Google Earth Engine.....	40
<b>Figure II-9</b> : Évolution de la turbidité côtière de la région de Collo (2005–2024), réalisée par le traitement des images satellitaires Sentinel et Landsat sur Google Earth Engine.....	40
<b>Figure II-10</b> : Représentation graphique des températures moyennes à El Milia, Collo et Skikda (1990, 1995, 2000 et 2005). ....	42
<b>Figure II-11</b> : Représentation graphique des températures moyennes à El Milia, Collo et Skikda (2010, 2015, 2020 et 2024). ....	42
<b>Figure II-12</b> : Représentation graphique des précipitations d'El Milia, Collo et Skikda (1990, 1995, 2000, 2005).....	43
<b>Figure II-13</b> : Représentation graphique des précipitations d'El Milia, Collo et Skikda (2010, 2015, 2020, 2024).....	43
<b>Figure II-14</b> : Roses saisonnières et annuelles du vent au large de la zone d'étude entre 1990 et 2023. ....	45
<b>Figure II-15</b> : Roses saisonnières et annuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1990 et 2023. ....	46
<b>Figure III-1</b> : Illustration de la structuration du micro-continent AlKaPeCa et ouverture du bassin algérien (Rosenbaum G. et al, 2002).....	49
<b>Figure III-2</b> : Modèle géodynamique illustrant la formation du bassin d'arrière-arc Algéro-Provençal (Seranne, 2007). ....	49
<b>Figure III-3</b> : Carte géologique de la zone d'étude modifiée en se basant sur les cartes géologiques d'Oued Zhou, Collo et Skikda, 1968-70, (1/50000).....	52

<b>Figure III-4:</b> Coupes géologiques montrant les relations entre les différents faciès lithologiques dans la zone d'étude. Les traits de coupes sont localisés dans la carte de la figure III-03.....	54
<b>Figure IV-1:</b> Carte géologique de la région de Collo montrant les différents faciès lithologiques affleurant et les failles qui les affectent.....	57
<b>Figure IV-2 :</b> Agrandissement sur les différentes zones côtières de la région de Collo.....	58
<b>Figure IV-3:</b> Identification des faciès géologiques observés sur terrain.....	59
<b>Figure IV-4:</b> Image satellitaire (Google Earth) montrant les principaux linéaments (failles).62	
<b>Figure IV-5 :</b> Photographies de terrain illustrant les principaux systèmes de failles observés le long du littoral de la région de Collo.....	63
<b>Figure IV-6:</b> Photographies de terrain illustrant les principaux systèmes de failles observés le long du littoral de la région de Collo.....	64
<b>Figure IV-7:</b> Photographies de terrain illustrant un effondrement de terrain (glissement de terrain) observé dans la région de Beni Saïd.....	65
<b>Figure IV-8:</b> Projections stéréographiques des systèmes de failles mesurés in situ dans la région de Collo.....	66
<b>Figure IV-9:</b> Application du modèle structural de Reidel aux failles identifiées dans la région de Collo.....	69
<b>Figure IV-10:</b> Différents régimes de déformation identifiés dans la région de Collo : failles normales, inverses, décrochements et glissements de terrain.....	71
<b>Figure V-1:</b> Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT.....	75
<b>Figure V-2:</b> Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées.....	76
<b>Figure V-3 :</b> Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées.....	76
<b>Figure V-4:</b> Moyenne des excès de la série des hauteurs Omnidirectionnelle de l'enregistrement.....	77
<b>Figure V-5 :</b> Représentation des événements extrêmes sur les hauteurs de houle de 1990 – 2023.....	78
<b>Figure V-6 :</b> Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction.....	80
<b>Figure VI-1 :</b> Maillage de la Mesh à l'échelle de la zone d'étude.....	86
<b>Figure VI-2:</b> Carte bathymétrique de la zone d'étude.....	87
<b>Figure VI-3 :</b> Champs des houles dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 10 ans.....	89
<b>Figure VI-4:</b> Champs des courants dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 10 ans.....	89
<b>Figure VI-5:</b> Champs des houles dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 30 ans.....	90
<b>Figure VI-6:</b> Champs des courants dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 30 ans.....	90
<b>Figure VI-7:</b> Champs des houles dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 100 ans.....	91
<b>Figure VI-8:</b> Champs des courants dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 100 ans.....	91
<b>Figure VII-1:</b> Schéma de génération des transects pour le suivi du rivage.....	98
<b>Figure VII-2 :</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM.....	104
<b>Figure VII-3:</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM.....	104

<b>Figure VII-4:</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur EPR du littoral nord-est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora. ....	105
<b>Figure VII-5:</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur EPR.....	105
<b>Figure VII-6:</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur LRR du littoral nord est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora.....	106
<b>Figure VII-7 :</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur LRR .....	106
<b>Figure VII-8:</b> Evolution du trait de côte du littoral-nord est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora. ....	107
<b>Figure VII-9:</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM/LRR dans Cap Bougaroun, Tamanart et Collo.....	108
<b>Figure VII-10:</b> Variations de l'évolution du trait de côte de la zone d'étude selon l'indicateur NSM. ....	108
<b>Figure VII-11 :</b> Variations de l'évolution du trait de côte de la zone d'étude selon l'indicateur LRR. ....	109
<b>Figure VII-12:</b> Photographies de terrain illustrant Cap Bougaroun (a) et Tamanart (b). ....	110
<b>Figure VII-13:</b> Photographies de terrain illustrant la baie de Beni Saïd (a) et la baie du Sable d'Or (b).....	111
<b>Figure VII-14:</b> Photographies de terrain illustrant les embouchures des oueds de la baie de Sable d'Or : (a) oued Guergoura ; (b) oued Guebli.....	112
<b>Figure VII-15:</b> Évolution du trait de côte de la zone d'étude selon le NSM. ....	112
<b>Figure VII-16:</b> Evolution du trait de côte de la zone d'étude selon le LRR. ....	113
<b>Figure VII-17:</b> Localisation des secteurs littoraux les plus affectés par l'érosion (NSM). ..	114
<b>Figure VII-18:</b> Localisation des secteurs littoraux les plus affectés par l'érosion (LRR). ...	115
<b>Figure VII-19:</b> Localisation des secteurs à tendance d'accrétion littorale (NSM) .....	116
<b>Figure VII-20:</b> Localisation des secteurs à tendance d'accrétion littorale (LRR). ....	116
<b>Figure VIII-1:</b> Projection des traits de côte de 2034 (A) et 2044 (B) obtenu par l'utilisation du filtre de Kalman.....	120
<b>Figure VIII-2 :</b> Projection des traits de côte de 2034 et 2044 obtenus par l'utilisation du filtre de Kalman pour les secteurs de Tamanart, Collo et Cap Bougaroun. ....	121
<b>Figure VIII-3 :</b> Projection des traits de côte pour 2034 et 2044 obtenus par l'utilisation du modèle Beta Shoreline Forecasting.....	122
<b>Figure VIII-4:</b> Variations de l'évolution des traits de côte pour 2034 et 2044 selon l'indicateur NSM.....	123
<b>Figure VIII-5 :</b> Variations de l'évolution des traits de côte pour 2034 et 2044 selon l'indicateur EPR. ....	124
<b>Figure VIII-6:</b> Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM/EPR.....	125

## Liste des tableaux

<b>Tableau III-1:</b> Légende stratigraphique de la carte géologique de la figure III-03. ....	53
<b>Tableau V-1 :</b> Tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT. .....	81
<b>Tableau VI-1:</b> Les inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retour (10, 30 et 100 ans) de houle de direction Nord dans la région de Collo. ....	88
<b>Tableau VII-1 :</b> Satellites, capteurs et résolutions spatiales des images téléchargées.....	96
<b>Tableau VII-2:</b> Estimation des incertitudes liées à la résolution spatiale. ....	101
<b>Tableau VII-3:</b> Principales sources d'incertitude et leurs valeurs estimées. ....	102
<b>Tableau VII-4 :</b> Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir des paramètres LRR/EPR/NSM. ....	103
<b>Tableau VII-5:</b> Répartition des états de l'évolution du trait de côte selon NSM. ....	113
<b>Tableau VII-6:</b> Répartition des états de l'évolution du trait de côte selon LRR. ....	114

## Liste des équations

Équation V-1 .....	77
Équation VII-1 .....	101
Équation VII-2 .....	103
Équation VIII-1 .....	119

## Liste des acronymes

**AlKaPeCa** : Alboran – Kabylie – Peloritani – Calabre

**CRAAG** : Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique

**°C** : Degré Celsius

**DHI** : Danish Hydraulic Institute (Institut danois d'hydraulique)

**DSAS**: Digital Shoreline Analysis System

**E**: Est

**EMODnet**: European Marine Observation and Data Network

**ENSSMAL** : Ecole Nationale Supérieure de Science de la Mer et d'Aménagement du Littoral

**EPR** : End Point Rate

**ERA5** : Réanalyse climatique de 5<sup>e</sup> génération produite par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF)

**Esri**: Environmental Systems Research Institute

**ESA**: European Space Agency

**Fig**: Figure

**GCS**: Geographic Coordinate System

**GEE**: Google earth engine

**GEV**: Generalized Extreme Value

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**GPS**: Global Positioning System

**GPD**: Generalized Pareto Distribution

**HD** : Hydrodynamic (Module hydrodynamique)

**Hs** : Hauteur significative

**ID** : Identifiant

**IDE** : Integrated Development Environment

**Km<sup>2</sup>** : Kilomètre carré

**Km** : Kilomètre

**LaSRC** : Land Surface Reflectance Code

**LCI** : Linear Confidence Interval

**LEDAPS** : Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System

**L1TP**: Level 1 Terrain Precision

**L2**: Level 2

**LRR** : Linear Regression Rate

**Ma** : Millions d'années

**m/an** : Mètre par ans

**m/s** : Mètre par seconde

**mm**: Millimètre

**MNDWI**: Modified Normalized Difference Water Index

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**NDWI** : Normalized Difference Water Index

**N** : Nord

**NGA** : Niveau Général de l'Algérie

**NSM**: Net Shoreline Movement

**O:** Ouest  
**OMK:** Oligo-Miocène Kabyle  
**POT:** Peaks Over Threshold  
**S :** Sud  
**Sen2Cor :** Sentinel-2 Correction  
**SIG :** Système d'information géographique  
**SW :** Spectral Waves  
**Tp:** Période de pic  
**TVE :** Théorie des valeurs extrême  
**U10 :** Vitesse du vent à 10 mètres  
**U10 dir (°) :** Direction du vent à 10 mètres, exprimée en degrés  
**URM:** Universal Transverse Mercator  
**USGS:** United States Geological Survey  
**UTM:** Universal Transverse Mercator  
**WGS 84:** World Geodetic System 1984

## *Introduction générale*

### Introduction générale

Le littoral de Collo, situé dans le nord-est algérien, représente un système côtier de la méditerranée où les processus géodynamiques internes et externes sont très actifs. Cette interface terre-mer-atmosphère subit en permanence l'influence de processus physiques complexes, tels que l'érosion, les mouvements tectoniques et l'hydrodynamisme, qui la rendent particulièrement vulnérable aux effets du réchauffement climatique, se manifestant, par une élévation du niveau marin, une intensification des événements tempétueux et une modification des régimes hydrodynamiques. La région de Collo a bénéficié d'une intégration stratégique dans plusieurs cadres nationaux de planification, notamment à travers le Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT 2025) et le Schéma Directeur d'Aménagement Touristique (SDAT 2025). Ce qui rend le choix d'étudier cette zone littorale judicieux. L'étude de l'évolution du trait de côte est essentielle pour analyser les dynamiques côtières, évaluer la vulnérabilité du littoral et anticiper ses évolutions futures. Une approche pluridisciplinaire est alors nécessaire, combinant la modélisation numérique, techniques de télédétection, analyse de séries temporelles et analyse structurale. Dans ce cadre, le croisement entre les données météo-marines (houle, vent, niveau marin) et les caractéristiques géologiques et structurales locales permettent de mieux cerner les mécanismes d'érosion en jeu. Cette analyse intégrée permet également de cartographier les secteurs les plus vulnérables aux aléas naturels et de construire des scénarios prospectifs d'évolution du littoral.

La région de Collo, qui fait l'objet de cette étude, s'étend depuis l'est de la plage de Ben Zouitjusqu'au Cap Bougaroun à l'ouest. Ce secteur est marqué essentiellement par des falaises rocheuses qui exposent en affleurement une grande diversité de formations géologiques ainsi que par des cotes sableuses, ce qui en fait un site particulièrement intéressant pour l'étude de l'érosion côtière.

Cette diversité géologique résulte d'un long héritage tectonique et sédimentaire lié à l'orogénèse alpine. Le substrat côtier de la région associe des formations métamorphiques, des intrusions plutoniques, des éruptions volcaniques et des dépôts sédimentaires d'âges variés. L'hétérogénéité lithologique de ces unités influence directement leur comportement vis-à-vis de l'érosion marine et continentale. Au sein de ce contexte, la structuration tectonique joue un rôle déterminant dans la répartition spatiale de l'érosion. La présence de nombreuses failles actives ou réactivées, héritées des grandes phases de déformation alpine, conditionne le tracé du littoral, la fracturation des roches et la stabilité des versants côtiers. Ces discontinuités structurales participent ainsi à la variabilité de la réponse du littoral face aux attaques marines, en facilitant localement les processus d'érosion.

Ce travail a pour objectif d'évaluer l'érosion différentielle des formations rocheuses dans la zone d'étude, en fonction de leur nature lithologique. Il accorde une attention particulière à l'impact des structures géologiques, telles que les failles, sur la dynamique du trait de côte et la stabilité des versants. L'étude intègre également les facteurs hydrodynamiques, notamment les régimes de houle et de courant simulés par modélisation numérique, qui jouent un rôle déterminant dans l'érosion marine. L'analyse est menée sur une période de 34 ans, pour reconstituer l'évolution historique du littoral. Enfin, une prédiction de l'évolution future du trait de côte sera réalisée par l'utilisation du filtre de Kalman.

Afin d'atteindre ces objectifs, les travaux effectués dans ce mémoire sont présentés dans les chapitres suivants :

Le chapitre I : présente les notions de base et le contexte général nécessaires à la compréhension du sujet de ce mémoire.

Le chapitre II : est dédié à la présentation du contexte environnemental et spatial dans lequel s'inscrit la problématique. Les caractéristiques climatiques, géomorphologiques, hydrographiques et hydrodynamiques de la zone d'étude seront présentées dans ce chapitre.

Le chapitre III : concerne le contexte géologique. Il met en évidence les phases tectoniques majeures ainsi que les processus géodynamiques qui ont façonné cette portion du littoral. Il présente également une description des formations géologiques qui affleurent dans la région, la structure du terrain en profondeur à l'aide de coupes géologiques et une carte géologique réalisée dans le cadre de ce travail.

Le chapitre IV : est consacré à l'analyse structurale basée sur les mesures et observations réalisées sur terrain. L'analyse structurale a pour but de décrire et interpréter les déformations subies par les roches à différentes échelles, d'identifier les forces et contraintes responsables de ces déformations, et de comprendre les mécanismes et l'évolution tectonique qui ont façonné la région étudiée.

Le chapitre V : a pour objet d'analyser et de décrire les phénomènes météorologiques exceptionnels qui dépassent les conditions normales dans la région de Collo.

Le chapitre VI : dans ce chapitre, sont exposées les modélisations hydrodynamiques obtenues grâce à l'application du modèle « Mike 21 », qui a permis de réaliser des simulations détaillées de la propagation des vagues et des courants, afin de fournir des éléments de réponse pertinents à la problématique étudiée et à évaluer précisément l'état de vulnérabilité de la zone.

Le chapitre VII : présente une analyse des changements spatiaux et temporels du littoral sur la période allant de 1990 à 2024 afin de mieux comprendre les processus d'érosion ou d'accumulation et d'évaluer la dynamique côtière.

Le chapitre VIII : est consacré à la modélisation basée sur l'utilisation du filtre de Kalman pour prédire avec précision les variations futures du trait de côte, sur une période de 20 ans, en intégrant les données historiques et les incertitudes liées aux mesures et au modèle.

Le chapitre IX : est une conclusion qui présentera une analyse synthétique de l'ensemble des résultats obtenus à l'issue de cette étude.

# ***CHAPITRE I***

## ***Généralités***

## I.1 Le système littoral

### I.1.1 Définition du littoral

Le littoral est une zone de largeur variable, englobant le rivage et la zone proche du rivage, s'étendant au moins jusqu'à la ligne de déferlement des vagues et vers l'intérieur jusqu'à la limite de pénétration des influences marines (falaises, estuaires, dunes, lagunes, etc...).

### I.1.2 Zonage du littoral

Le littoral se divise en plusieurs zones distinctes, définies en fonction de leur position par rapport à la mer et de leur hydrodynamique. La figure ci-dessous illustre cette subdivision (Bird, 2008, p. 2) :

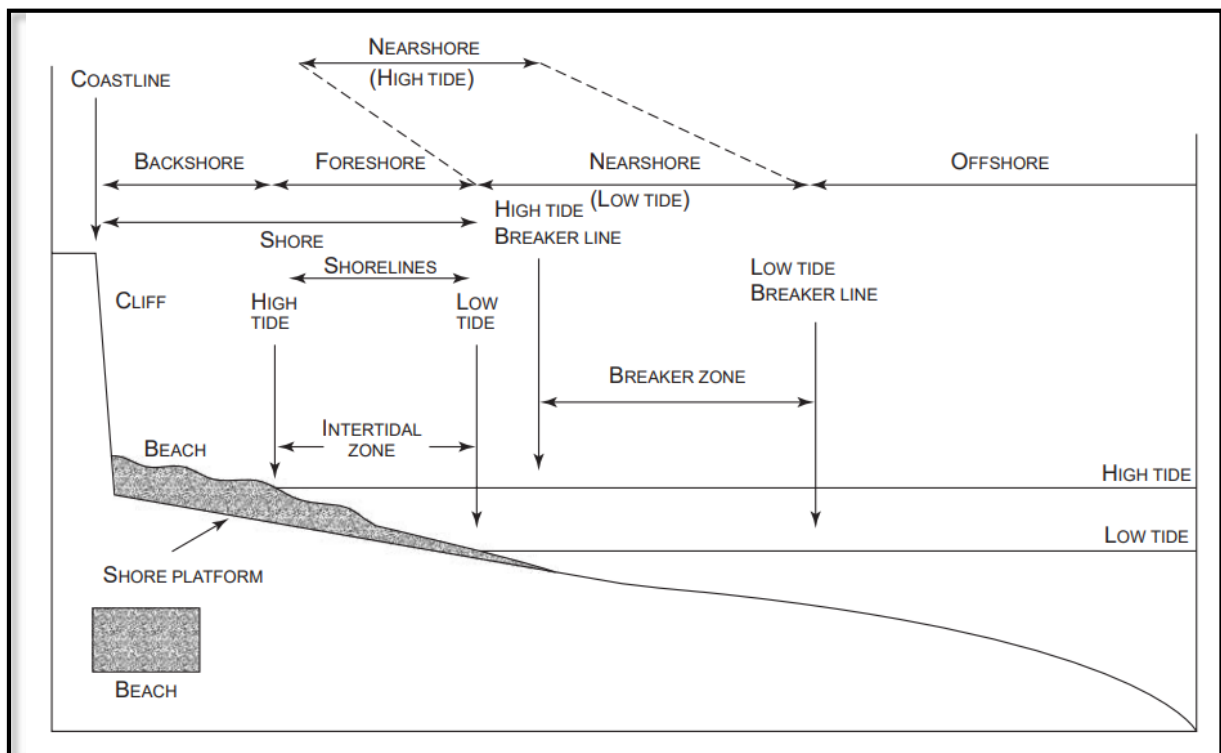


Figure I-1 : Les éléments d'une zone littorale (Bird, 2008)

- **Zone proche du rivage (Nearshore zone)** : comprend la zone de déferlement (où les vagues se brisent) et la zone de ressac (où les vagues balaient l'estran), toutes deux évoluant avec la marée.
- **Zone de brisants (Breaker zone)** : zone où les vagues commencent à se briser, marquant la transition vers des eaux moins profondes.
- **Zone au large (Offshore zone)** : zone située au-delà des brisants, s'étendant vers les eaux profondes.
- **Plage (Beach)** : accumulation de sédiments meubles (sable, gravier ou galets), souvent répartie entre l'estran et l'arrière-plage.

- **Ligne de côte (Coastline)** : limite terrestre atteinte par les plus hautes marées normales, souvent marquée par la végétation ou la base des falaises. (Bird, 2008, pp. 2-3)

*Remarque* : les termes ligne de rivage et ligne de côte sont souvent confondus. La ligne de rivage évolue avec la marée (rivage à marée basse, rivage à marée moyenne, rivage à marée haute), tandis que la ligne de côte reste stable, sauf en cas de conditions extrêmes. (Bird, 2008).

## I.2 Caractéristiques et dynamiques des principaux types des cotes

Les côtes d'ablation se caractérisent par un recul inévitable du rivage, souvent lié à l'érosion des falaises, qui ne peuvent naturellement se régénérer. À l'opposé, les côtes d'accumulation, ou côtes d'accrétion, permettent, du moins localement, une avancée du rivage grâce au dépôt de sédiments. (Géoconfluences, 2024)

En géomorphologie littorale, on distingue plusieurs types de côtes, qui varient en fonction de la nature des matériaux en place, les processus géomorphologiques dominants et l'influence des agents marins et continentaux. On distingue principalement trois grands types de côtes : rocheuses, sableuses, et vaseuses ou mixtes.

### I.2.1 Les côtes rocheuses et sableuses

Les côtes rocheuses composées principalement de roches dures, présentent généralement des falaises abruptes, des plateformes d'érosion ou des rochers saillants. Façonnées par l'action continue de la houle, des marées et des embruns, elles évoluent lentement sous l'effet de l'érosion, entraînant un recul progressif du rivage. En revanche, les côtes sableuses se distinguent par une pente douce propice à l'accumulation de sédiments. Ces littoraux abritent des plages formées de sable ou de galets, très sensibles aux dynamiques côtières telles que le vent, la houle ou la dérive littorale. Cette mobilité constante entraîne des alternances d'érosion et de dépôt, modifiant régulièrement la morphologie de ces côtes. (Géoconfluences, s.d.)

#### I.2.1.1 Les Falaises

La falaise étant comme un escarpement rocheux en pente forte, quasiment vertical, dépourvu de végétation, elle est principalement formée par l'érosion marine le long d'une côte. Elle se distingue d'une côte sableuse en pente douce par son profil abrupt et par le fait que son pied reliée à une plateforme d'érosion.

Elles peuvent être classées comme suivant

##### a. Les falaises vives

Également appelées falaises à érosion active, sont affectées par les vagues à leur base. Elles subissent une érosion soutenue due aux forces mécaniques et chimiques, ce qui entraîne le recul progressif. (Emery & Kuhn, 1982).

## **b. Les falaises mortes**

Appelées aussi falaises fossiles qui n'est plus attaquée directement par la mer en raison d'un déplacement du trait de côte vers l'intérieur des terres ou d'une baisse relative du niveau marin. Alors que leur forme reste typique des falaises, leur évolution est principalement gouvernée par les processus subaériens (Trenhaile, 2011).

## **c. Les falaises plongeantes**

Ce type est des falaises dont la pente est très abrupte à verticale, descendant directement dans la mer ou un plan d'eau profond, sans estran (plage) notable à leur pied ( Guilcher, 1981). Elles sont dites "plongeantes correspondent à des falaises immergées dont la base se prolonge sous le niveau des eaux. Elles restent soumises aux forces hydrodynamiques marines et peuvent être active ou fossile (Sunamura & al, 2014).

### **I.2.1.2 Les plages**

Les plages se transforment constamment sous l'influence des vagues, des courants, des marées et des vents, résultant d'une interaction complexe entre les processus marins, terrestres et atmosphériques. Composées de sédiments comme le sable, les graviers ou les galets, elles représentent des environnements côtiers dynamiques et temporaires (Masselink & Gehrels, 2014) .

### **I.2.2 Cotes vaseuses / mixtes**

Ces côtes se développent généralement dans les zones basses. Les matériaux y sont fins (vases, limons) et issus du dépôt continental ou marin.

Ce type des côtes est très sensible aux apports sédimentaires, aux marées et à la végétation. Leur stabilité dépend de l'équilibre entre les apports (sédiments fluviaux, dépôts marins) et l'érosion liée aux courants ou à l'activité humaine humaine (Allen, 2000), ( Paskoff, 2004).

## **I.3 Moteurs de la dynamique côtière**

### **I.3.1 Les vagues**

Les vagues sont des ondulations de la surface de l'eau causées par l'action du vent Elles se forment à partir des variations de pression entre la pente au vent et la pente sous le vent d'une onde.

Le mouvement des vagues est orbital et diminue avec la profondeur jusqu'à devenir imperceptible au niveau de la base des vagues (profondeur =  $L/2$ ).

#### **I.3.1.1 Caractéristiques des vagues**

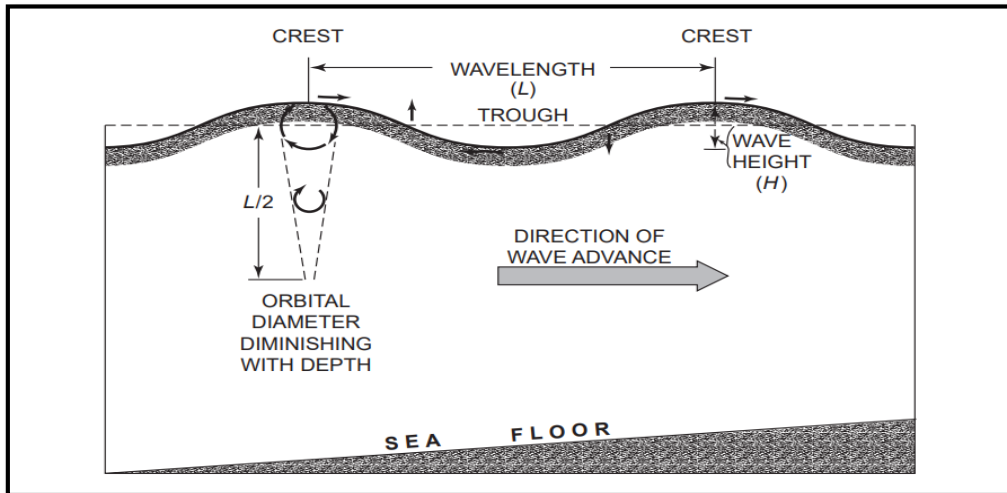
**Hauteur de la vague (H) :** distance entre crête (Crest) et creux (trough).

**Longueur d'onde (L) :** distance entre deux crêtes successives.

**Période (T) :** temps entre deux crêtes.

**Vitesse (C) :** vitesse de déplacement de la crête.

**Forte dépendance au vent :** vitesse, durée, fetch (distance sur laquelle souffle le vent).



**Figure I-2 :** Terminologie des vagues et schéma des courants à mesure que les crêtes et les creux des vagues se déplacent vers le rivage. (Bird, 2008).

### I.3.1.2 Types de vagues

**Vagues de tempête :** générées localement par des vents violents, peuvent dépasser 5 m.

**Houle océanique (swell) :** vagues longues et régulières formées en haute mer, parcourant de grandes distances.

### I.3.1.3 Impacts côtiers

Les vagues de tempête peuvent provoquer érosion ou dépôt bien au-dessus du niveau des marées. En arrivant en zone côtière, les vagues sont freinées par le fond marin peu profond.

## I.3.2 Les Courants marins

Les courants marins sont des déplacements continus de masses d'eau dans les océans et les mers, à la surface ou en profondeur. Ils sont générés par plusieurs facteurs, notamment le vent, les marées, la densité de l'eau, la température et la rotation de la Terre, et jouent un rôle essentiel dans le transport de sédiments, de chaleur et de nutriments.

### a. Les courants d'arrachement ou sagittal (ou rip currents) :

Ce sont des courants localisés qui ramènent vers le large l'eau accumulée près du rivage par les vagues déferlantes. Ils apparaissent généralement à intervalles réguliers le long des plages, surtout là où il y a des variations du niveau d'eau causées par les vagues (appelé wave set-up).

Ces courants sont généralement espacés de 50 mètres à plus d'un kilomètre, en fonction de la hauteur des vagues et de la pente de la plage. Chaque courant peut atteindre jusqu'à 30 mètres de largeur, avec une vitesse pouvant aller jusqu'à 8 km/h. Lors de fortes houles, ces courants

deviennent moins nombreux mais plus concentrés et puissants. Ils peuvent creuser des canaux à travers les barres sableuses du proche rivage, puis déposer des sédiments en mer, là où leur vitesse diminue. À marée basse, leur intensité peut s'accroître. Enfin, lorsque les vagues arrivent en oblique, les courants de retour suivent une trajectoire diagonale et creusent des canaux inclinés dans la zone de surf. Source (Bird, 2008, p. 23)

### **b. Le courant de retour**

Le courant de retour, aussi appelé "undertow" ou courant de compensation, est présent sur toutes les côtes exposées à la houle. Lorsqu'elle arrive sur le littoral, la houle pousse de l'eau vers la plage, notamment dans la zone où les vagues déferlent. Pour équilibrer cet apport, une partie de l'eau repart vers le large sous la surface : c'est le rôle du courant de retour.

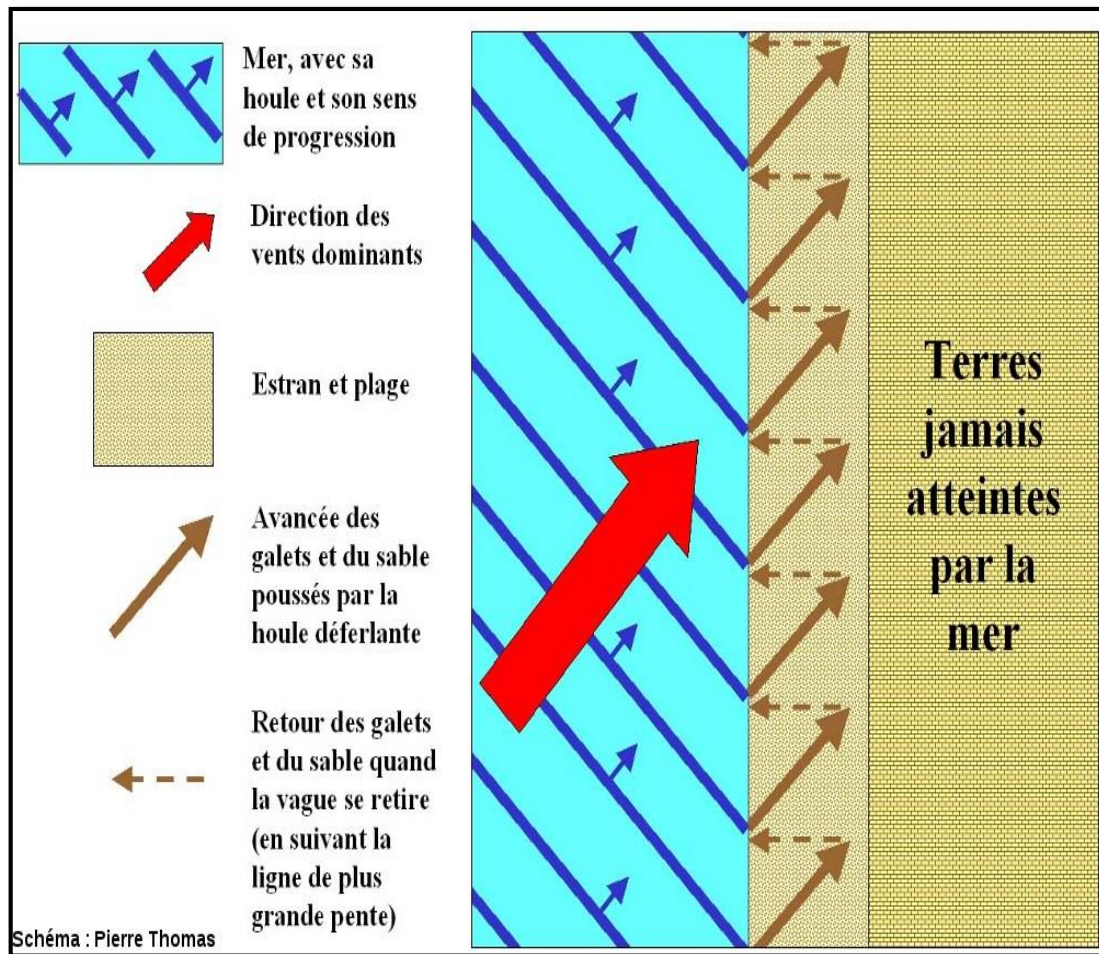
Ce courant n'est pas réparti de manière égale dans la profondeur de l'eau : sa vitesse est généralement plus forte près du fond. Il joue un rôle important dans le transport des sédiments vers le large, et il peut entraîner la migration des barres sableuses pendant les tempêtes.

### **c. Le courant de dérive**

Le courant de dérive littorale, ou courant longitudinal, est généré par des vagues provenant du large qui atteignent la côte avec un certain angle par rapport au rivage. Dans la zone de déferlement, des vagues donnent naissance à un courant parallèle au rivage, avec une vitesse pouvant atteindre plusieurs mètres par seconde.

Ce courant joue un rôle essentiel dans le transport des sédiments le long de la plage, un phénomène appelé dérive littorale. En raison de l'intensité de ces courants et des volumes importants de sédiments qu'ils peuvent déplacer, certains auteurs parlent de véritables "fleuves littoraux" pour décrire ces courants côtiers.

Lorsque des ouvrages maritimes (comme des digues, des jetées ou des épis) sont construits le long de la côte, ils perturbent ce transit sédimentaire : on observe alors une accumulation de sédiments en amont de l'ouvrage, et une érosion de la plage en aval. (Aoudj, A. & al, 2014)



**Figure I-3:** Schéma illustrant le principe de la dérive littorale (Planet-terre.ens-lyon.fr).

### I.3.3 Les marées

La marée correspond à la variation périodique du niveau de la mer, généralement semi-diurne (environ toutes les 12 heures), bien qu'elle puisse être diurne dans certaines régions. Ce phénomène est principalement provoqué par l'attraction gravitationnelle de la Lune, complétée par celle du Soleil, qui en modifie l'amplitude selon les phases lunaires et divers cycles astronomiques. Dans certaines zones côtières, les marées peuvent engendrer des courants particulièrement puissants. À l'échelle globale, ces courants participent au brassage vertical de l'océan, contribuant ainsi au refroidissement de la surface par contact avec les eaux profondes. Sur le long terme, les marées influencent également la rotation de la Terre, qu'elles ralentissent, tout en éloignant progressivement la Lune. (Carton, 2018)

### I.3.4 Les tempêtes

Les tempêtes sont des perturbations atmosphériques intenses des latitudes tempérées, avec des vents soutenus dépassant 89 km/h pendant au moins dix minutes. Elles se forment généralement au-dessus de l'Atlantique ou de la Méditerranée, à la suite de la rencontre entre de l'air chaud en surface et des vents forts en altitude. Accompagnées de nuages épais, de fortes pluies et de contrastes thermiques marqués, elles peuvent causer d'importants dégâts : toitures arrachées,

arbres déracinés, perturbations des transports et coupures d'électricité. Contrairement aux orages ou tornades, leurs effets s'étendent sur de vastes zones. (Tempête, s.d)

### I.3.5 Les surcotes marines

Les surcotes marines désignent une élévation anormale et soudaine du niveau de la mer, généralement provoquée par des conditions atmosphériques extrêmes, telles que la baisse de pression et des vents violents qui poussent l'eau vers le littoral. Ce phénomène peut entraîner des submersions marines, en particulier lors de tempêtes ou de dépressions intenses. Il s'ajoute au niveau normal de la marée, dépassant les hauteurs habituellement observées, ce qui accroît le risque d'inondation et d'érosion. (Ullmann & Guyard, 2018)

### I.3.6 La submersion marine

La submersion marine désigne l'envahissement temporaire de zones normalement hors d'eau, souvent continentales ou poldérisées, par l'eau de mer. Ce phénomène résulte de la combinaison de plusieurs facteurs naturels tels que les vents forts générant une surcote (wind set-up), une pression atmosphérique basse amplifiant le niveau de la mer (wave set-up), et les seiches, oscillations d'eau dans des zones semi-fermées comme les baies peu profondes. La submersion peut se produire par débordement, rupture d'ouvrages de protection ou franchissement de paquets de mer. Elle constitue un risque majeur, notamment dans les contextes de changement climatique et d'élévation du niveau marin. (Chevillot-Miot, 2017)

## I.4 Rôle de la géologie dans la morpho dynamique

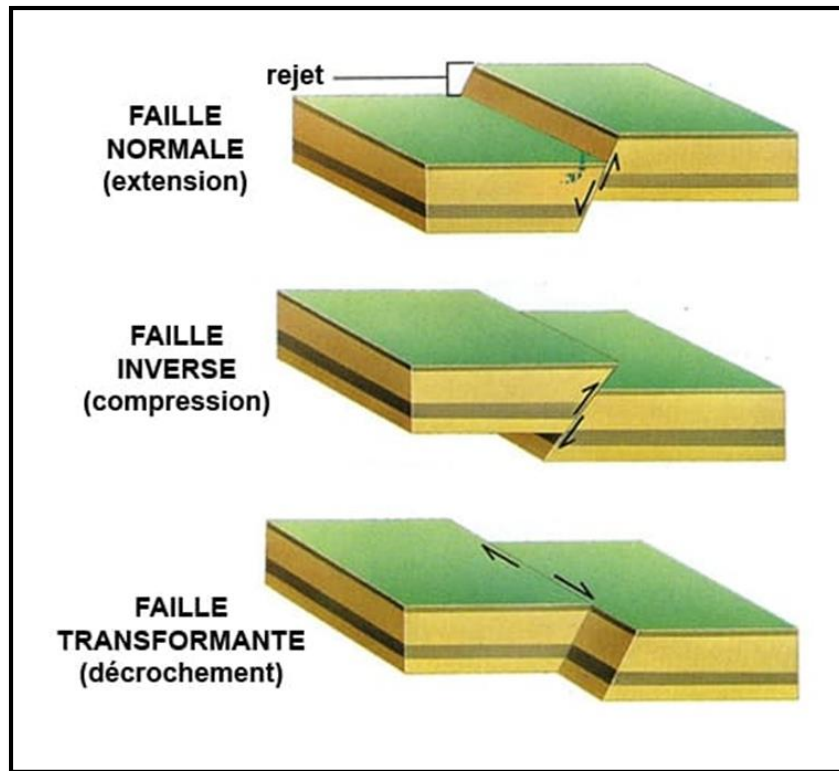
La nature lithologique, la disposition stratigraphique et la déformation tectonique des roches sont les principaux facteurs structuraux pris en compte pour expliquer l'aspect des paysages.

La géologie d'une zone côtière constitue donc un facteur fondamental pour l'évolution morpho-dynamique. La nature des roches, leur résistance aux agents d'érosion, ainsi que les structures tectoniques présentes influencent la forme du littoral et sa stabilité.

La résistance des côtes à l'érosion marine dépend de la nature des formations géologiques présentes, ce qui induit une érosion différentielle. On distingue deux grands types :

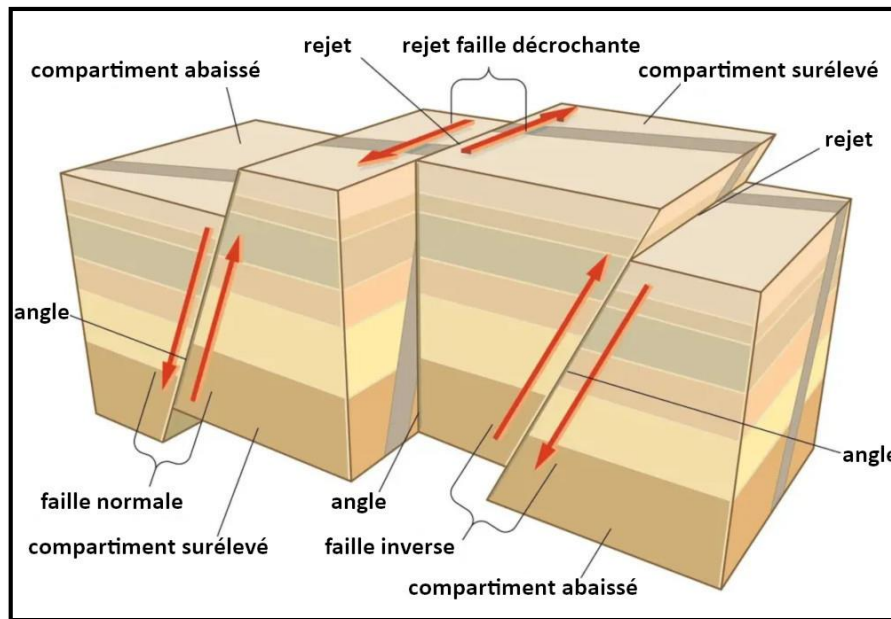
- **Les roches dures** (telles que le granite, basalte, grès, calcaire), plus résistantes à l'action des vagues, tendent à former des falaises abruptes, des promontoires rocheux ou des plateformes d'abrasion. Leur évolution est lente, dominée par des phénomènes de fracturation, altération chimique ou effondrements localisés (Paskoff, 2004).
- **Les roches tendres** (telles que les marnes, argiles et sédiments meubles) sont plus vulnérables. Elles se traduisent généralement par des côtes basses et meubles, sujettes à une érosion rapide notamment sous l'effet des pluies, de la houle et des mouvements de terrain (Bird, 2008).

Les différents régimes de la déformation tectonique sont liés au cadre géodynamique et les contraintes tectoniques générées par le mouvement (convergent, divergent ou coulissage) des plaques tectoniques. Les marqueurs de la déformation observés dans les côtes rocheuses étudiées dans le cadre de ce travail sont généralement les failles. Le type de failles (normales, inverses ou transformantes) formées dépend du régime de la déformation (extension, compression ou décrochement) (Fig I-4).



**Figure I-4 :** Les différents types de failles en fonction des différents régimes de déformation.

Le mouvement relatif des deux compartiments séparés par le plan de la faille, appelé jeu de la faille, modifie l'aspect des paysages. Ces mouvements tectoniques engendrent des escarpements par des abaissements, surélévations de compartiments dans le substratum rocheux (Fig.I-5).



**Figure I-5:** Les mouvements de terrains associés au jeu des différents types de failles.

### I.5 Interaction entre activité humaine et morpho dynamique

L'activité humaine applique une influence observable sur les dynamiques naturelles du littoral. Les aménagements côtiers, bien qu'ayant pour objectif de protéger les zones habitées et favoriser les activités (économiques, tourisme, infrastructures), entraînent souvent une modification et une déstabilisation profonde des systèmes naturels côtiers.

Les impacts des aménagements ne sont pas aux zones d'intervention directe. Ils ont des effets sur l'ensemble du système morpho-sédimentaire.

### I.6 Notion de trait de côte

Le trait de côte représente la ligne de délimitation entre la terre et la mer. Pour les côtes de type falaise, il est défini comme le pied de la falaise. Il s'agit de l'endroit où la base rocheuse abrupte rencontre la plage ou l'estran. Cette limite peut être facilement identifiable lorsque la falaise est constituée de roches résistantes et présente une pente raide. Cependant, dans certains cas, la transition peut être plus progressive, avec la présence de talus ou d'éboulis rocheux (Sunamura, Tsujimoto, & Aoki, 2014).

Pour les côtes de type plage, le trait de côte correspond généralement à la limite supérieure du rivage atteinte par les plus hautes marées ou par les vagues de tempête. Cette limite peut être matérialisée par une berme, une microfalaise d'érosion, une ligne de débris ou de végétation. Cependant, la position précise du trait de côte sur les plages peut varier considérablement en fonction des conditions météorologiques, des cycles de marée et des processus d'érosion ou d'accumulation sédimentaire (Boak & Turner, 2005).

### **I.7 Évolution morphologique du littoral et changements climatiques**

Le niveau de la mer connaît des variations naturelles depuis des millénaires, liées aux cycles glaciaires et interglaciaires, principalement causés par les changements orbitaux de la Terre. Au cours de la dernière déglaciation, le niveau marin a fortement augmenté, atteignant une remontée de 130 m entre 21 000 et 6 000 ans avant le présent. Aujourd'hui, l'élévation du niveau marin s'accélère sous l'effet du réchauffement climatique, en raison de l'expansion thermique des océans, de la fonte des glaciers de montagne, et de la perte de masse des calottes polaires. Les observations récentes, notamment par satellites, confirment une hausse moyenne actuelle est d'environ 4mm/an, qui devrait se poursuivre en s'accroissant selon les scénarios climatiques futurs d'après le 6<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC publié en février 2022. Le réchauffement climatique augmente la fréquence et l'intensité des tempêtes. Ceci amplifie l'érosion du littoral et les risques de submersions marines.

***Chapitre II***  
***Cadre géographique***

### II.1 Contexte général

La région d'étude s'inscrit dans la partie nord-est du littoral algérien qui s'étend de la wilaya de Béjaïa jusqu'à Skikda. Ce littoral présente une géomorphologie remarquablement variable ; comprenant des falaises rocheuses, des baies abrités, des plages sableuses et embouchures fluviales ; sous influence des facteurs dynamiques marins et continentaux de la région.

Dans la wilaya de Béjaïa, le littoral présente une grande diversité de formes côtières, avec des plages ouvertes, notamment autour de l'embouchure de l'oued Soummam, qui sont des zones basses d'accumulation alimentées par les sédiments allochtones provenant du continent et les produits de l'érosion côtière. Toutefois, cette dynamique naturelle est perturbée par l'érosion, particulièrement visible sur la plage de Sidi Ali Lebhar, où la construction de la piste d'atterrissage de l'aéroport a accéléré la perte de sédiments. Les côtes rocheuses de la région sont constituées de deux types de falaises : celles issues de roches dures et celles formées dans des roches tendres. Ces falaises, constamment soumises à l'érosion, présentent une dénivelée marquée de 5 à 6 mètres et un talus sinueux, contribuant à l'alimentation des plages limitrophes en sédiments. (Aoudj & al, 2014).

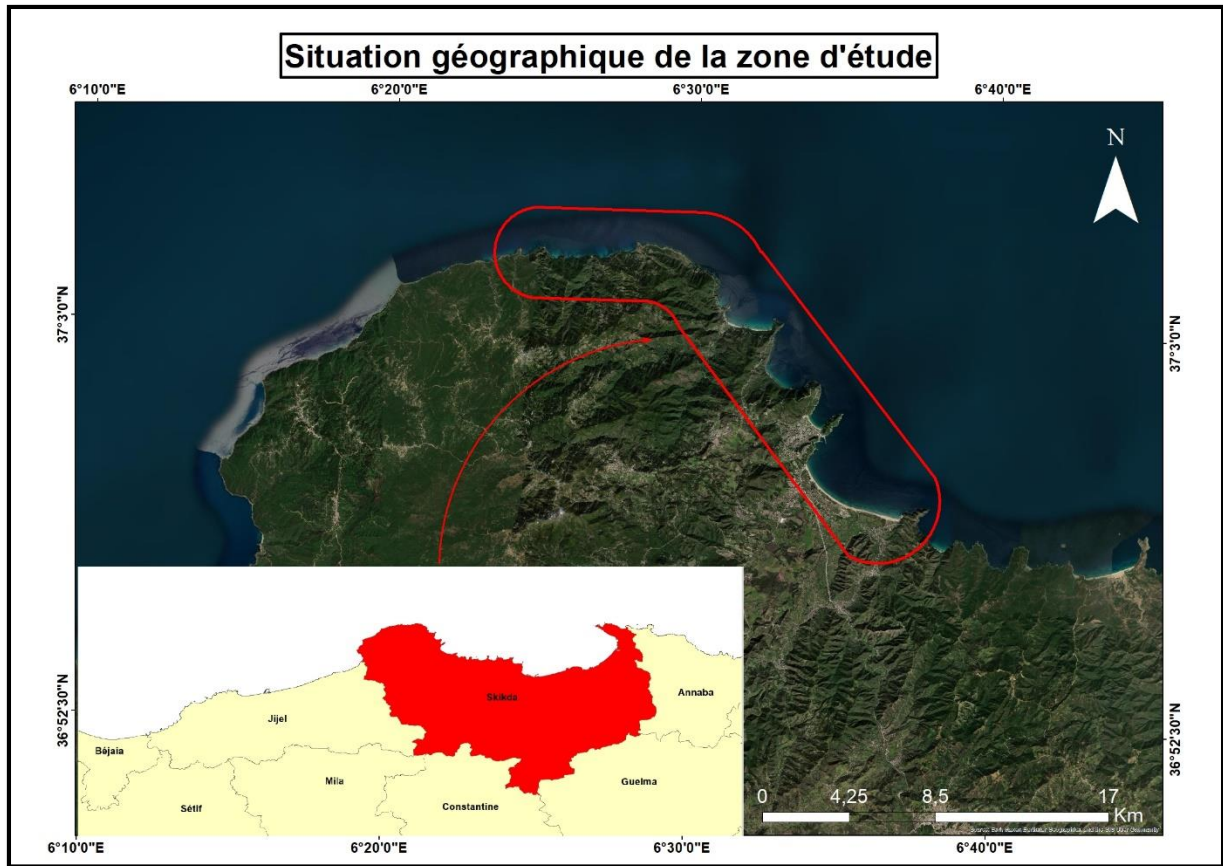
Le littoral de Jijel se caractérise par une alternance de côtes rocheuses abruptes et de plages sableuses, dominé par un relief montagneux notamment les massifs anciens de la Petite Kabylie qui plongent directement dans la mer à l'ouest, formant des falaises escarpées. Vers l'est, l'atténuation progressive de ces reliefs favorise le développement de vallées alluviales, notamment celles des oueds El-Kébir, Nil et Djendjen. A l'extrême est, Oued Zhor joue un rôle essentiel dans le modelé du littoral. Ces cours d'eau transportent des sédiments qui alimentent les plages et les petites plaines côtières, comme celles d'El-Aouana et du bassin de Jijel (Daghbaj & Ahmed, 2015).

Le littoral de Skikda présente une grande diversité géomorphologique, alternant entre côtes rocheuses, plages sableuses et un vaste champ dunaire. La plage de Larbi Ben M'hidi, l'une des plus étendues, est bordée par des dunes atteignant 20 mètres de hauteur et de largeur variable. (BENAZZOUZ, 2019)

L'alimentation en sédiments est assurée par l'oued Saf-Saf et d'autres petits bassins versants comme l'oued El Gasseb et l'oued El Gat. Géologiquement, la région appartient au piémont nord du massif côtier du socle Kabyle. Les falaises vives, soumises à l'érosion marine et aux processus chimiques et biologiques, sont particulièrement exposées aux tempêtes fréquentes qui accélèrent leur recul (BENAZZOUZ, 2019).

### II.2 Situation géographique de la zone s'étude

La zone d'étude est située dans la wilaya de Skikda, elle fait partie de la chaîne côtière de l'Atlas Tellien, au nord-est de l'Algérie. La zone d'étude comprend les secteurs de Collo, Tamanart et du Cap Bougaroun.



**Figure II-1:** *Situation géographique de la zone d'étude.*

Elle est bordée par la mer Méditerranée au nord et à l'est, par la commune de Kanoua à l'ouest, et par les communes de Zitouna et Kerkra au sud.

Les coordonnées géographiques de la zone d'étude sont :

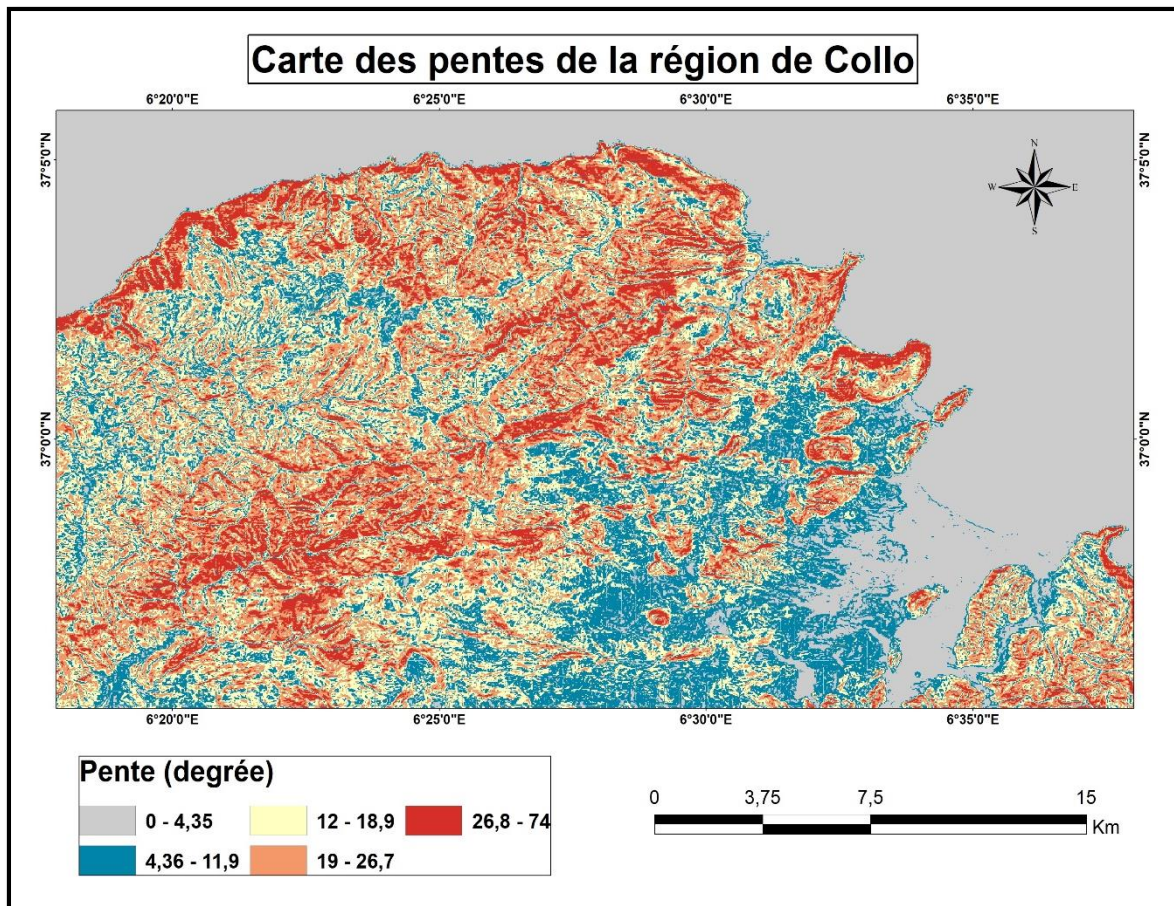
Latitude entre  $36^{\circ} 55'$  et  $37^{\circ} 05'$  Nord.

Longitude entre  $6^{\circ} 25'$  et  $6^{\circ} 38'$  Est.

### **II.3 Cadre géomorphologique**

La zone est caractérisée par une diversité de reliefs, incluant des montagnes, des vallées fluviales, des plaines côtières et un littoral escarpé.

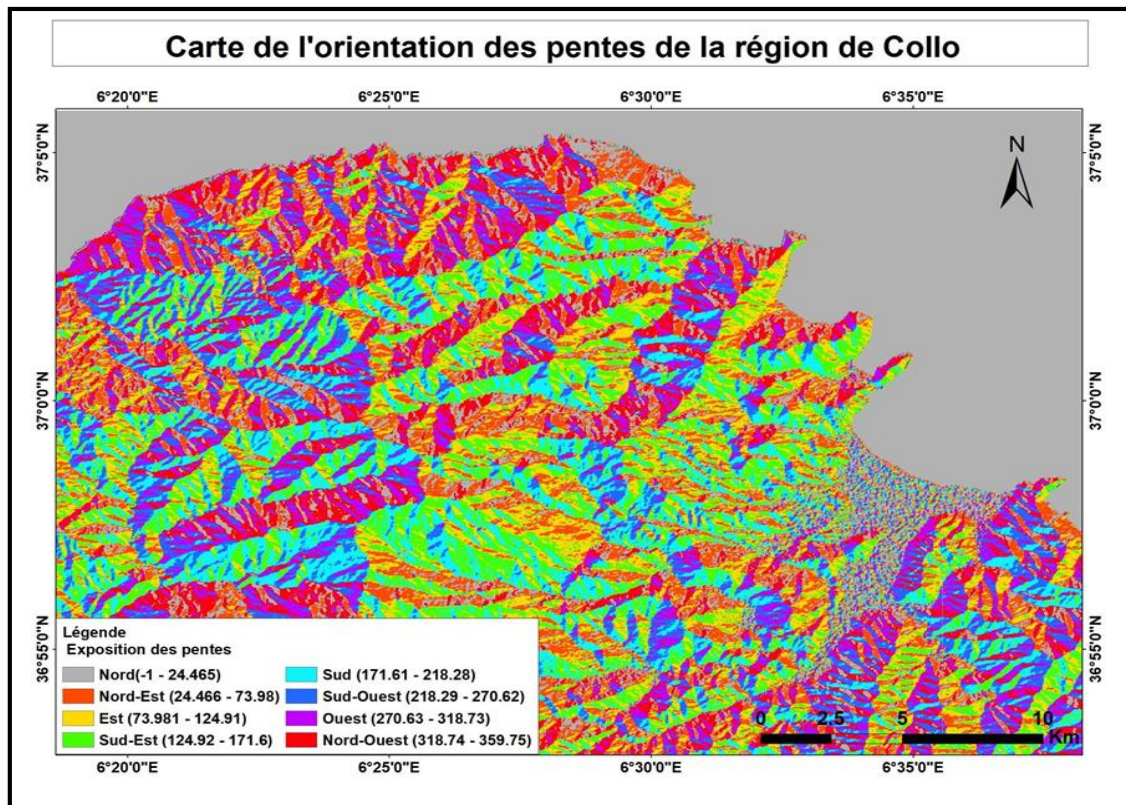
Le traitement des MNT de 15m sur le logiciel ArcGIS a permis d'obtenir la carte des pentes suivante :



**Figure II-2 :** Carte des pentes de la région de Collo, réalisée par le traitement Slope des MNT sur ArcGis.

- **Zone littorale nord-ouest :** On remarque la dominance des pentes fortes, indiquant un relief escarpé et montagneux typique de la région de Collo.
- **Zone littorale nord-est :** Présence des pentes moyennes, donc un relief modérément escarpé.

Le traitement des MNT de 15m sur le logiciel ArcGis a permis d’obtenir la carte d’orientation des pentes suivante :



**Figure II-3 :** carte d'orientation des pentes de la région de Collo, réalisée par le traitement Aspect des MNT sur Arc Gis.

Le territoire présente une grande diversité d'orientations, signe d'un relief accidenté, avec des vallées, des crêtes et des versants nombreux.

Dans cette zone côtière :

On observe une grande dominance des teintes rouges, oranges, violettes et jaune ce qui correspond à des versants orientés vers le Nord-Est, le Nord-Ouest, l'Est et l'Ouest.

Ces orientations peuvent influencer les conditions microclimatiques, l'ensoleillement, la végétation, et même la vulnérabilité à l'érosion.

- La méthodologie de la réalisation des 2 cartes (Fig II-02 et II-03) est présentée à l'annexe A.

### II.3.1 La géomorphologie côtière de Tamanart

Se caractérise par un relief jeune et fortement accidenté, en pleine évolution morphologique. La région est dominée par des montagnes escarpées qui entourent l'oued Tamanart, où l'érosion continentale est particulièrement active en raison d'une forte pluviosité et de cours d'eau au trajet court mais à fort dénivelé. Le paysage est marqué par la présence de nombreux ravins et gorges profondes, accentuant le caractère abrupt du littoral. Les altitudes élevées, atteignant plus de 700 à 800 mètres à seulement quelques kilomètres de la mer, témoignent de la rudesse du relief. De plus, l'influence des processus tectoniques, notamment les failles et les soulèvements, contribue à la complexité géomorphologique de la région. L'interaction entre la

mer, les précipitations abondantes et la topographie escarpée engendre une érosion intense, façonnant continuellement le littoral et accentuant le caractère abrupt de cette portion de la côte algérienne. (Zouaouid M. , 2018).

### II.3.2 La morphologie de Collo

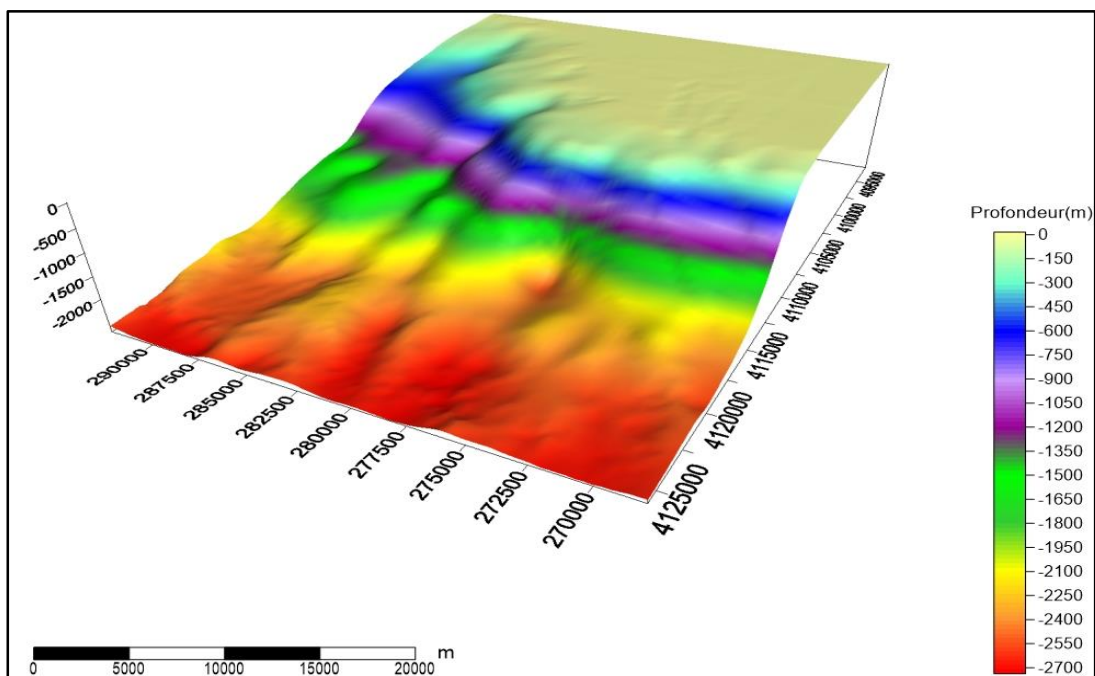
Est caractérisée par une topographie variée, influencée par la tectonique et le climat. Elle est installée au fond de la baie de Collo, s'étendant sur 31 km de l'embouchure de l'oued Jimly au Kef Hachmi. La région abrite des plages de sable fin, notamment sur la partie orientale de la côte, entourées des cordons dunaires sableux en mouvement sous l'effet du vent. La zone se caractérise aussi par des escarpements rocheux, en particulier autour de la Koudiat Telezza. Ces côtes sont marquées par des falaises abruptes et des points rocheux qui se prolongent au-delà de la ligne de rivage. Enfin, des zones marécageuses, comme le lac de Ghedir El Mohken, sont présentes au sud, dues à la nature argileuse des sols (Boulabeiz, 2017).

### II.3.3 Le littoral du Cap Bougaroun

Présente un plateau continental réduit, caractérisé principalement par des formations rocheuses complexes. Les côtes y sont majoritairement rocheuses, avec des falaises abruptes, mais ces parties rocheuses alternent par endroits avec de petites plages.

### II.4 Morphologie sous-marine de la région de Collo

La carte bathymétrique 3D ci-dessous est réalisée sur le logiciel Surfer à partir d'une bathymétrie de 115 m de résolution issue via le service WCS (Web Coverage Service) EMODnet Bathymetry.



**Figure II-4 :** Représentation 3D de la bathymétrie de la zone d'étude réalisée sur Surfer à partir d'une bathymétrie de 115 m de résolution issue via le service WCS (Web Coverage Service) EMODnet Bathymetry.

La représentation offre une lecture détaillée du relief sous-marin de la région de Collo, révélant la diversité géomorphologique sous-marine. Elle met en évidence une forte variabilité des fonds marins, avec l'alternance de pentes douces dans certaines parties de la baie et de pentes beaucoup plus abruptes notamment autour des caps et des escarpements rocheux (ex. Cap Bougaroun et les abords de la Koudiat Telezza).

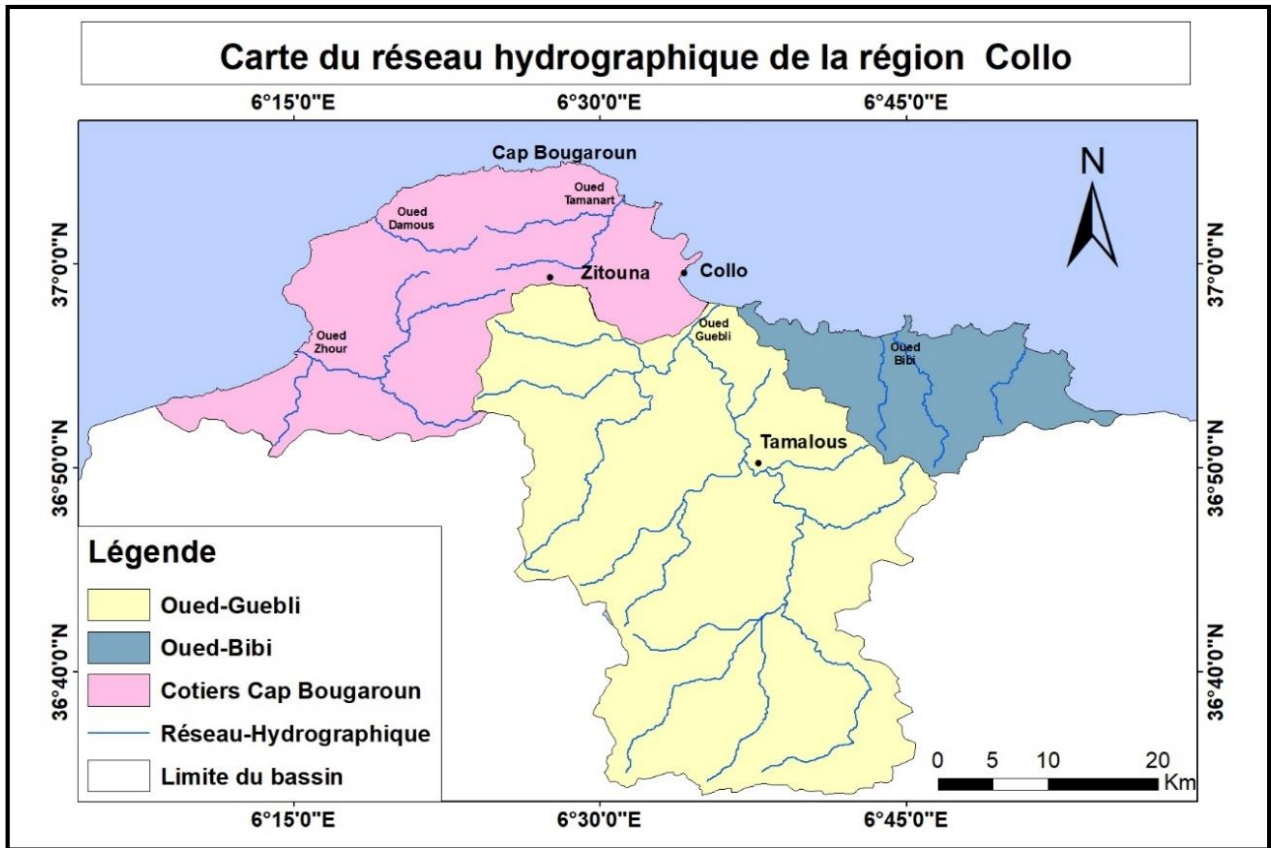
### II.5 Réseaux hydrographique

Les réseaux hydrographiques de la région d'étude jouent un rôle important dans la dynamique côtière. La carte du réseau hydrographique a été générée à partir d'un MNT de 15 m extrait depuis Google Earth Engine (GEE), puis traitée et analysée sur ArcGIS Pro afin d'identifier les principaux bassins versants de la région d'étude. Cela a permis de distinguer plusieurs oueds majeurs dans la région.

- **Oued Guebli** : Ce cours d'eau est le principal de la région. Il résulte de la jonction de plusieurs oueds, dont l'Oued Fessa et l'Oued Essouk. L'Oued Guebli se déverse dans la Méditerranée à environ 7 km à l'est de Collo et drainera une superficie de 993 km<sup>2</sup> avec une longueur d'environ 45 km. Il est alimenté par divers affluents, notamment l'Oued Meraya et l'Oued Bir Recade (DOUADI, 2015-2016)
- **Le bassin versant de l'Oued Tamanart**, situé au Nord-Ouest de la ville de Collo, débute sous le col de Taras, coule au pied de Zitouna et contourne par le Sud Est la masse importante du Djebel Ghorbah. Sur sa rive gauche, il reçoit deux affluents importants, l'oued Bou N'ébat et surtout l'oued Mekkarrat (Oued Affensou) (Zouaouid & Mouloud).
- **Le bassin versant de l'oued Zhour** est le plus vaste de la région. Sa crête principale délimite un espace de forme grossièrement rectangulaire, dont les quatre sommets sont : le Djebel Di El Mezara au nord-ouest, le Djebel Bou Bazil au sud-ouest, le Djebel Khenak Eli Laffeur au nord-est et le Djebel Tamazouch au sud-est.

Oued Zhour et ses nombreux affluents traversent et délimitent plusieurs massifs importants. Parmi eux, on trouve principalement deux prolongements secondaires de la grande dorsale méridienne : la montagne de Khenak Eli Laffeur et celle du Djebel Tamazouch. (Zouaouid & Mouloud)

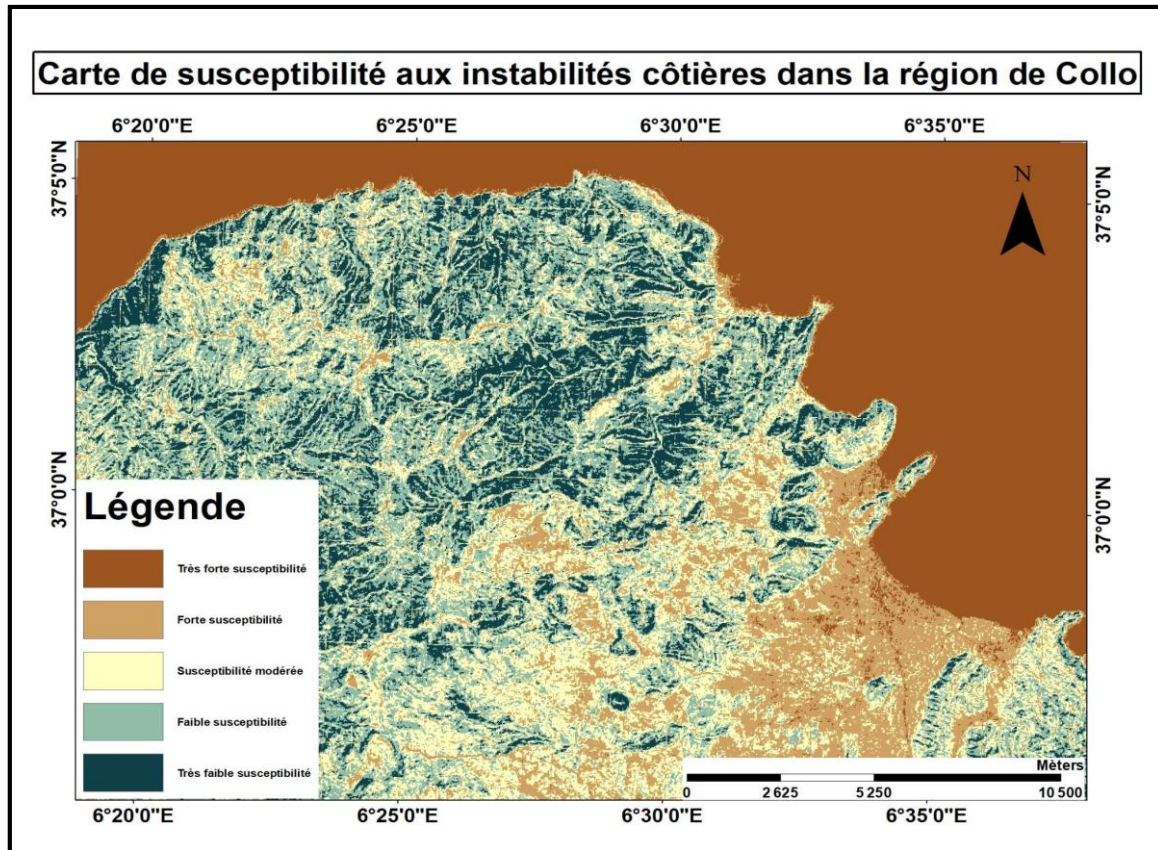
- **Oued Bibi** : est un cours d'eau situé à proximité de la ville de Sidi Mansour (Rabah Sitour), à environ 17 km du centre-ville de Skikda. Il est entouré par des montagnes forestières et débouche dans la Méditerranée (BeachSearcher, n,d).



**Figure II-5:** Réseau hydrographique et bassins versants de la région de Collo réalisée par un traitement MNT sur ArcGis.

**II.5.1 Evaluation de la susceptibilité aux instabilités.**

Le traitement des MNT de 15m sur le logiciel ArcGis a permis d’obtenir la carte de susceptibilité aux instabilité (Fig II-05) en se basant sur les paramètres (Pentes, orientation des pentes, nature du sol et végétation à travers l’indice NDVI).



**Figure II-6:** Carte de susceptibilité aux instabilités de la région de Collo, réalisée par le traitement des MNT sur ArcGis en se basant sur les paramètres (Pentes, orientation des pentes, nature du sol et végétation à travers l'indice NDVI).

#### a. Zones à forte susceptibilité (dégradation du marron)

Les zones à forte susceptibilité sont principalement localisées en mer et sur les terrains quaternaires composés de sable, gravier, vase ou cailloutis. Ces matériaux meubles et peu cohésifs favorisent l'instabilité, notamment sous l'effet des agents naturels comme l'érosion marine, les courants ou les fortes houles. Ces secteurs présentent un risque élevé de glissements ou d'affaissements, et pourraient nécessiter des mesures de protection ou de limitation des activités humaines afin de préserver leur équilibre.

#### b. Zones à faibles susceptibilité (dégradation du vert)

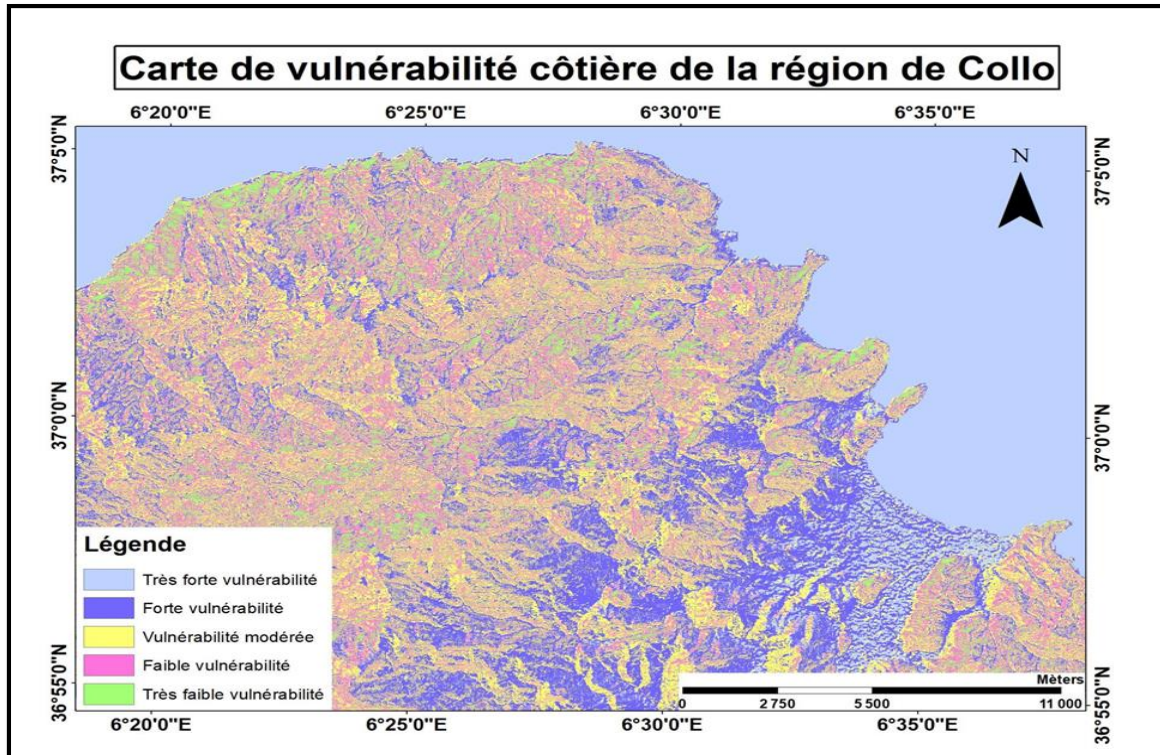
Les zones à faible susceptibilité se trouvent essentiellement sur des formations rocheuses. Leur structure plus stable et résistante leur confère une meilleure résilience face aux facteurs de déstabilisation.

Ces zones pourraient ainsi être priorisées pour certains types d'aménagements ou valorisées dans le cadre d'une gestion durable, sans risque majeur d'instabilité.

- La méthodologie de la réalisation de la carte (Fig II-06) est présentée à l'annexe A.

### II.5.2 Evaluation de la vulnérabilité côtière

Le traitement des MNT de 15m sur le logiciel ArcGis a permis d'obtenir la carte de vulnérabilité côtière (Fig II-06) en se basant sur les paramètres (Pentes, orientation des pentes, courbure).



**Figure II-7:** Carte de vulnérabilité de la région de Collo, réalisée par le traitement des MNT sur ArcGis en se basant sur les paramètres (Pentes, orientation des pentes et courbure).

#### a. Zones à forte vulnérabilité (dégradation du bleu)

Les zones à forte vulnérabilité sont principalement localisées en mer et sur les terrains quaternaires (sable, gravier, vase, cailloutis), cela signifie que ces zones sont plus susceptibles de subir des impacts importants en raison de leur composition et leur exposition aux phénomènes naturels tel que l'érosion.

Ces zones pourraient nécessiter des mesures d'atténuation spécifiques pour minimiser les risques.

#### b. Zones à faible vulnérabilité (couleur rose et vert)

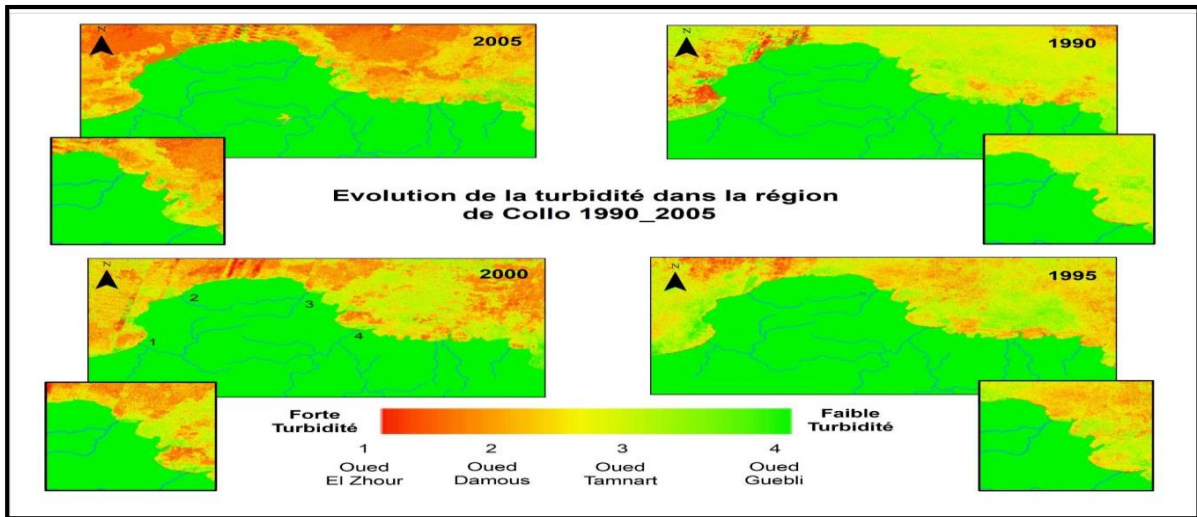
Les zones à faible vulnérabilité se trouvent principalement sur des formations rocheuses, elles sont moins susceptibles de subir des dommages significatifs car leur composition est plus stable et résilientes.

Ces zones pourraient être considérées comme étant des zones favorables pour les aménagements ou la préservation.

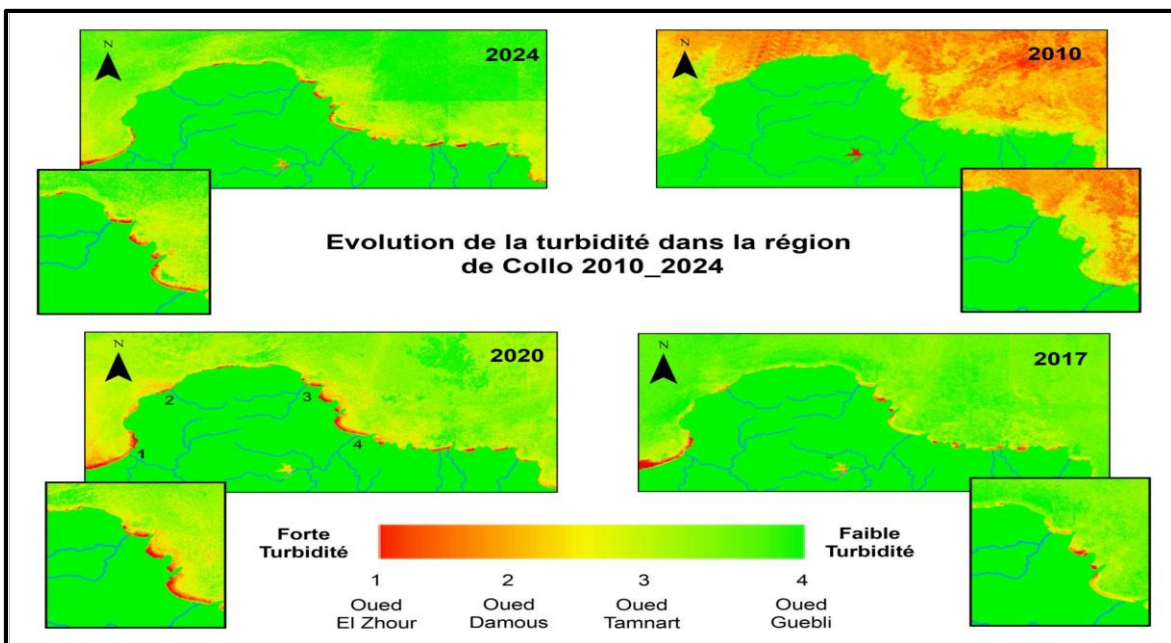
- La méthodologie de la réalisation de la carte (Fig II-07) est présentée à l'annexe A.

**II.5.3 Evaluation de la turbidité**

La turbidité est un bon indicateur de la présence de particules en suspension (sables, limons, argiles) souvent issues de l'érosion, du ruissellement ou de l'apport fluvial. Cette analyse de la turbidité vise à interpréter l'impact des flux sédimentaires dans l'eau. Les images satellitaires utilisées dans cette étude ont été extraites depuis GEE, proviennent des satellites Sentinel (2017, 2020 et 2024) avec une résolution de 10 m, et des satellites Landsat (1990 à 2010) avec une résolution de 30 m.



**Figure II-8:** *Évolution de la turbidité côtière de la région de Collo (1990–2005), réalisée par le traitement des images satellitaires Sentinel et Landsat sur Google Earth Engine.*



**Figure II-9:** *Évolution de la turbidité côtière de la région de Collo (2005–2024), réalisée par le traitement des images satellitaires Sentinel et Landsat sur Google Earth Engine.*

L'analyse des cartes de turbidité dans la région de Collo entre 1990 et 2024 met en évidence une forte concentration des eaux turbides le long du littoral, en particulier à proximité des

embouchures des oueds El Zhour, Damous, Tamanart et Guebli. Les cartes issues des satellites Sentinel (2017, 2020 et 2024), grâce à leur meilleure résolution spatiale, permettent de localiser avec grande précision ces foyers de turbidité concentrés aux embouchures. En comparaison, celles élaborées à partir des images Landsat (1990 à 2010) présentent parfois des taches rouges s'étendant jusqu'au large, ce qui résulte des limitations de résolution et de traitement. L'analyse révèle également que les années les plus turbides coïncident souvent avec des périodes relativement humides, soulignant le rôle central des précipitations et du réseau hydrographique dans l'acheminement des sédiments vers la mer.

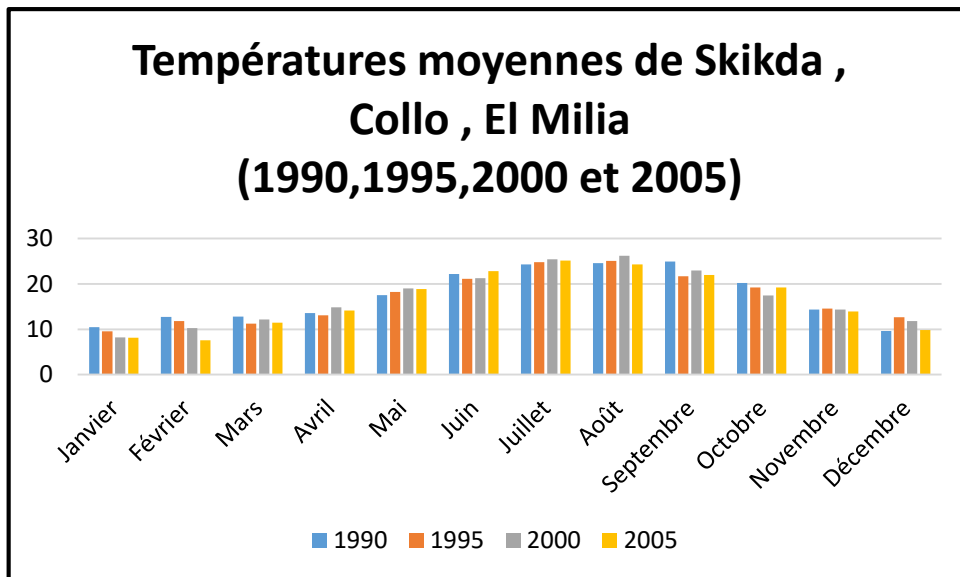
## **II.6 Les caractéristiques climatiques et hydrodynamiques de la région de Collo :**

La zone d'étude bénéficie d'un climat méditerranéen. Ce type de climat est généralement à hivers doux, pluvieux et étés chauds et secs. L'humidité est très forte en raison du contexte marin.

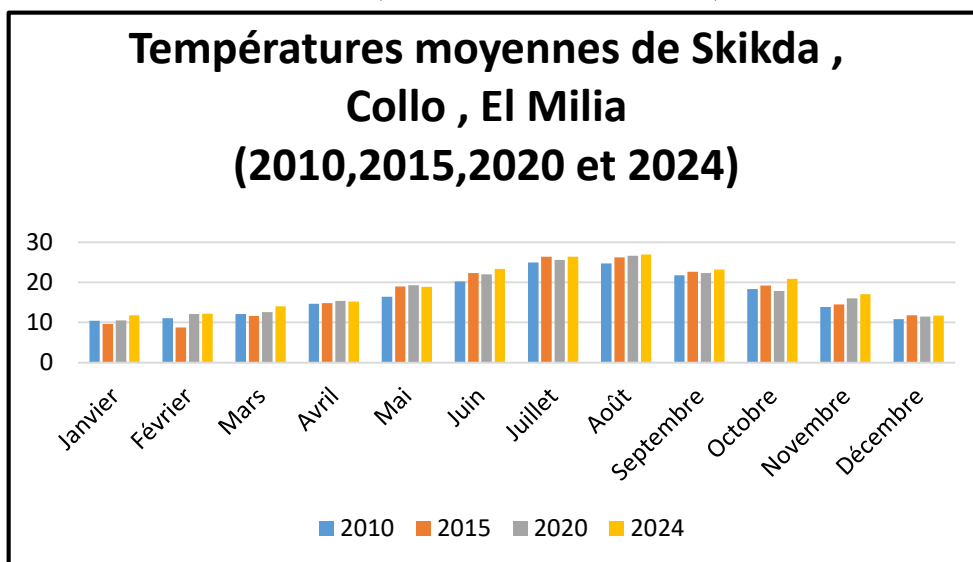
Les données climatiques concernant les températures (maximales, moyennes et minimales) ainsi que les précipitations, ont été extraites depuis Google Earth Engine (GEE) au format CSV, puis traitées à l'aide du logiciel Excel.

### **II.6.1 Les températures :**

Les zones côtières présentent généralement des températures plus modérées grâce à l'influence régulatrice de la mer. Dans le cas de notre zone d'étude, les données climatiques moyennes montrent une variation saisonnière marquée. Les températures estivales sont relativement élevées, atteignant en moyenne 26,9 °C en août (2024), 26,3 °C en juillet (2015) et 23,1 °C en juin (1995), ce qui correspond à la période la plus chaude de l'année. Par contre, les températures les plus basses sont enregistrées en hiver, avec une moyenne de 10,4 °C en janvier (2010) et 10,9 °C en février (2000), traduisant une fraîcheur notable. On peut ainsi distinguer une période froide allant de novembre à mars, avec des températures moyennes comprises entre 8,2 °C (janvier 2000) et 14,5 °C (avril 2000), et un minimum enregistré en janvier (2000). En revanche, la période allant d'avril à octobre constitue la phase la plus chaude de l'année, avec un pic enregistré en août 2024. Cette année se distingue par des températures maximales supérieures à celles des années précédentes, traduisant les effets du changement climatique qui accentue les épisodes de chaleur extrême et bouleverse les conditions climatiques régionales.



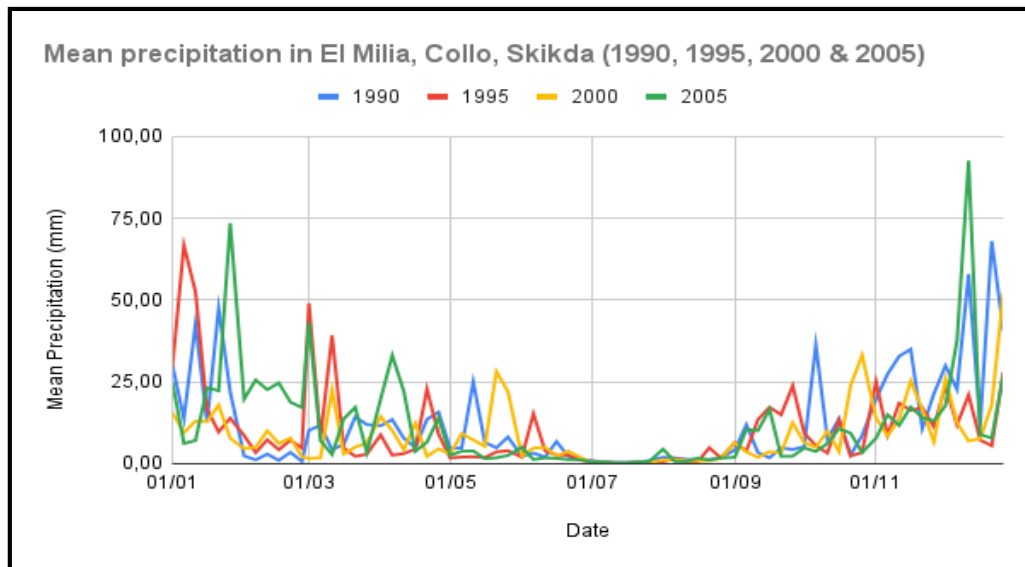
**Figure II-10:** Représentation graphique des températures moyennes à El Milia, Collo et Skikda (1990, 1995, 2000 et 2005).



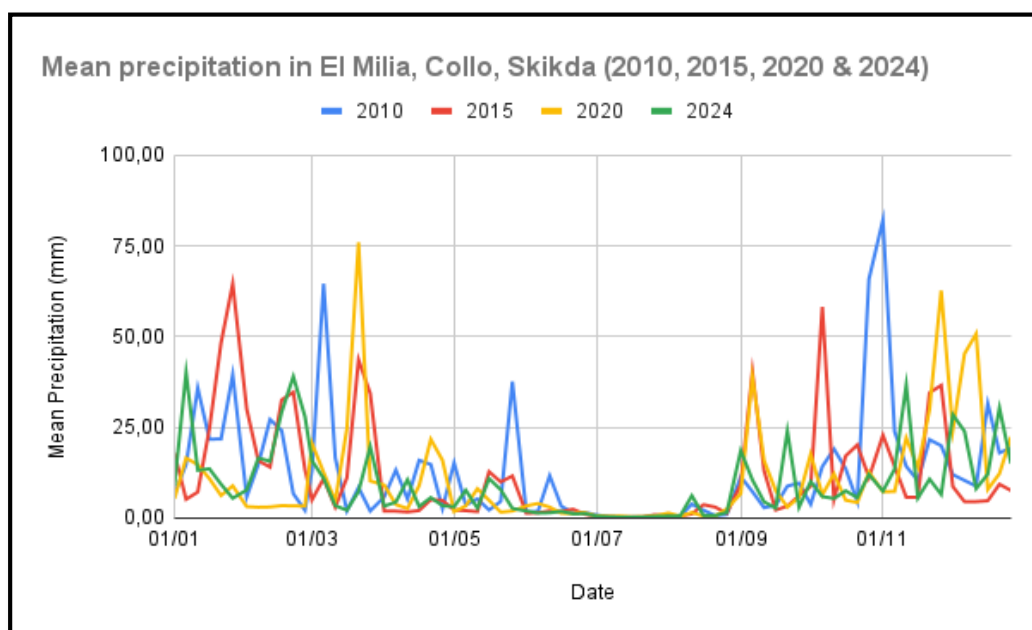
**Figure II-11 :** Représentation graphique des températures moyennes à El Milia, Collo et Skikda (2010, 2015, 2020 et 2024).

**II.6.2 Les précipitations :**

Les deux graphiques représentent l'évolution des précipitations moyennes enregistrées à El Milia, Collo et Skikda sur période allant de 1990 jusqu'à 2024. L'analyse montre une forte variabilité interannuelle, avec des pics de précipitations irréguliers selon les années, en particulier en hiver (janvier-février) et en automne (novembre-décembre), ce qui est caractéristique du climat méditerranéen. Certaines années, comme 2005 et 2010, se distinguent par des précipitations exceptionnellement élevées dépassant les 75 mm lors de certains épisodes. En revanche, d'autres années présentent des périodes prolongées de sécheresse, notamment durant l'été. Ces fluctuations traduisent une instabilité climatique croissante, pouvant être liée à des facteurs de variabilité naturelle mais aussi au changement climatique.



**Figure II-12:** Représentation graphique des précipitations d'El Milia, Collo et Skikda (1990, 1995, 2000, 2005).



**Figure II-13 :** Représentation graphique des précipitations d'El Milia, Collo et Skikda (2010, 2015, 2020, 2024).

### II.6.3 Le vent

Une bonne compréhension du régime des vents permet de mieux anticiper les impacts sur le trait de côte et permet de mieux étudier les milieux côtiers, car il influence directement le régime des houles, qui joue un rôle majeur dans la dynamique littorale. En effet, les caractéristiques des houles telles que leur direction, leur hauteur et leur fréquence dépendent largement de la direction, de la force et de la persistance des vents. Ces houles, générées au large, transportent

de l'énergie jusqu'au rivage, provoquant des phénomènes comme l'érosion, l'accumulation de sédiments ou encore la formation de courants littoraux.

Les roses des vents, générées pour la période 1990-2023 à l'aide de l'outil en ligne Portus Puertos, (Fig II-14) mettent en évidence un régime éolien marqué par des directions dominantes variables selon les saisons. Les vents les plus fréquents proviennent notamment des secteurs est, ouest-nord-ouest et ouest, avec des intensités plus marquées en hiver. En été, les vents sont généralement plus faibles et d'origines plus diversifiées.

#### II.6.4 La houle

Les roses de houle, également établies à partir de l'outil Portus Puertos, présentées dans la (Fig II-13) illustrent la répartition directionnelle des conditions de houle au large de la région de Collo. L'analyse des données montre que cette zone côtière est principalement soumise à l'agitation marine provenant des secteurs nord, nord-nord-ouest, nord-est et ouest-nord-ouest. Cette exposition explique l'importance des processus d'érosion et de transport sédimentaire dans la zone d'étude.

Les figures associées présentent les roses annuelles et saisonnières des vents et des houles, révélant la variabilité des conditions hydrodynamiques au fil des saisons :

- En hiver, les houles et les vents sont plus intenses, avec une nette prédominance des directions **ouest-nord-ouest** et **nord-nord-ouest**.
- Au printemps et en automne, les directions restent similaires, mais les intensités sont légèrement moindres.
- En été, l'agitation est plus réduite et les directions des vents et des houles sont plus dispersées, incluant notamment des flux d'origine **est**.

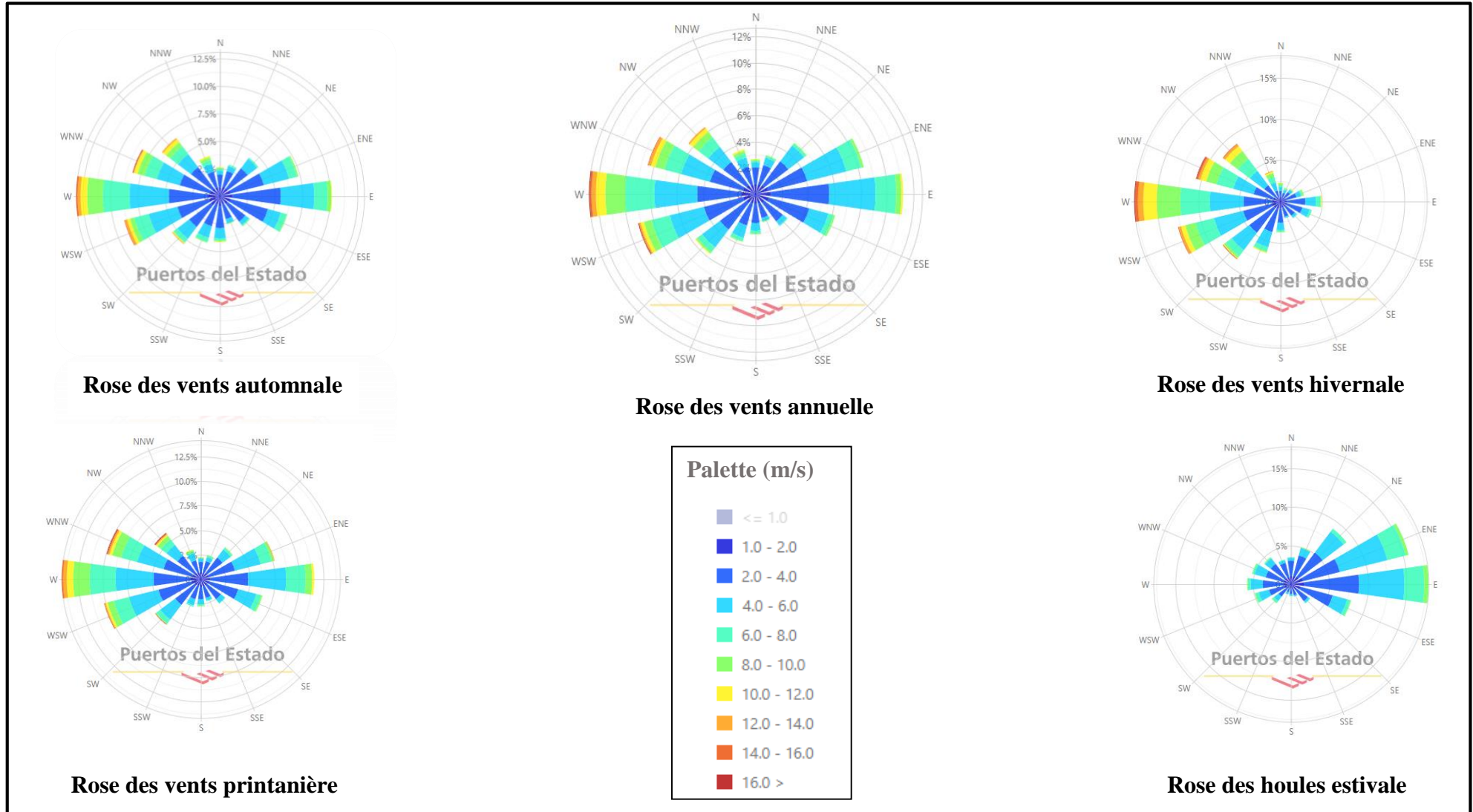


Figure II-14: Roses saisonnières et annuelles du vent au large de la zone d'étude entre 1990 et 2023.

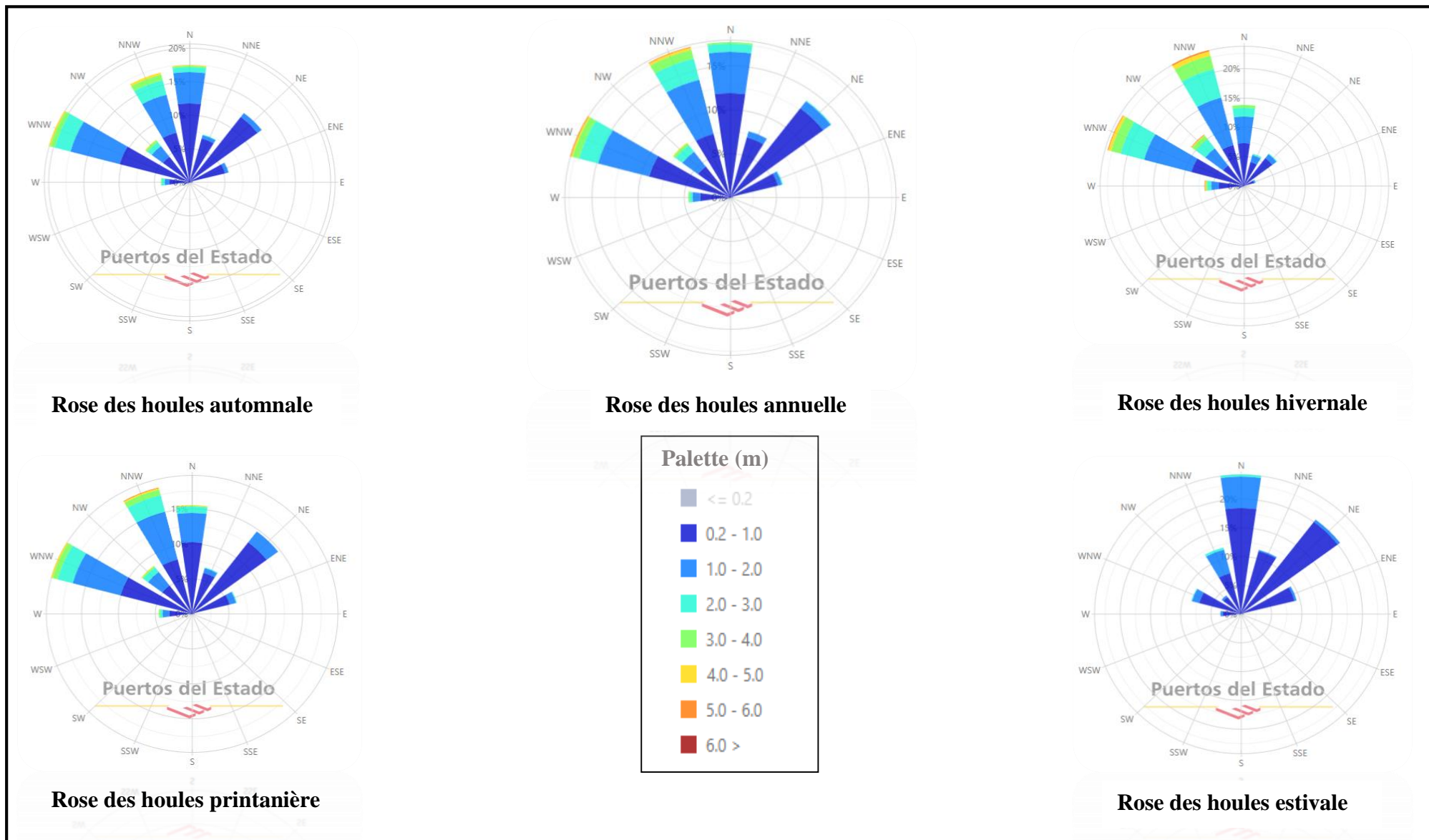


Figure II-15: Roses saisonnières et annuelles des houles au large de la zone d'étude entre 1990 et 2023.

***Chapitre III***  
***Contexte géologique***

### III.1 Introduction

La chaîne des Maghrébines, qui correspond à la chaîne alpine d'Afrique du Nord, appartient à l'orogène alpin périméditerranéen (Durand-Delga, 1969). Cette chaîne Tertiaire couvre une distance d'environ 2000 km d'ouest en est, reliant le sud de l'Espagne à la région calabro-sicilienne. Les études géologiques et géophysiques de cette chaîne de montagnes ont permis de caractériser sa structure comme étant le résultat d'une orogénèse alpine, impliquant la superposition d'unités allochtones sur le substrat autochtone pré-saharien (Arab et al., 2016; Bouillin, 1986; Bouyahiaoui et al., 2015; Hamai et al., 2018; Leprêtre et al., 2018; Medaouri et al., 2014; Wildi, 1983).

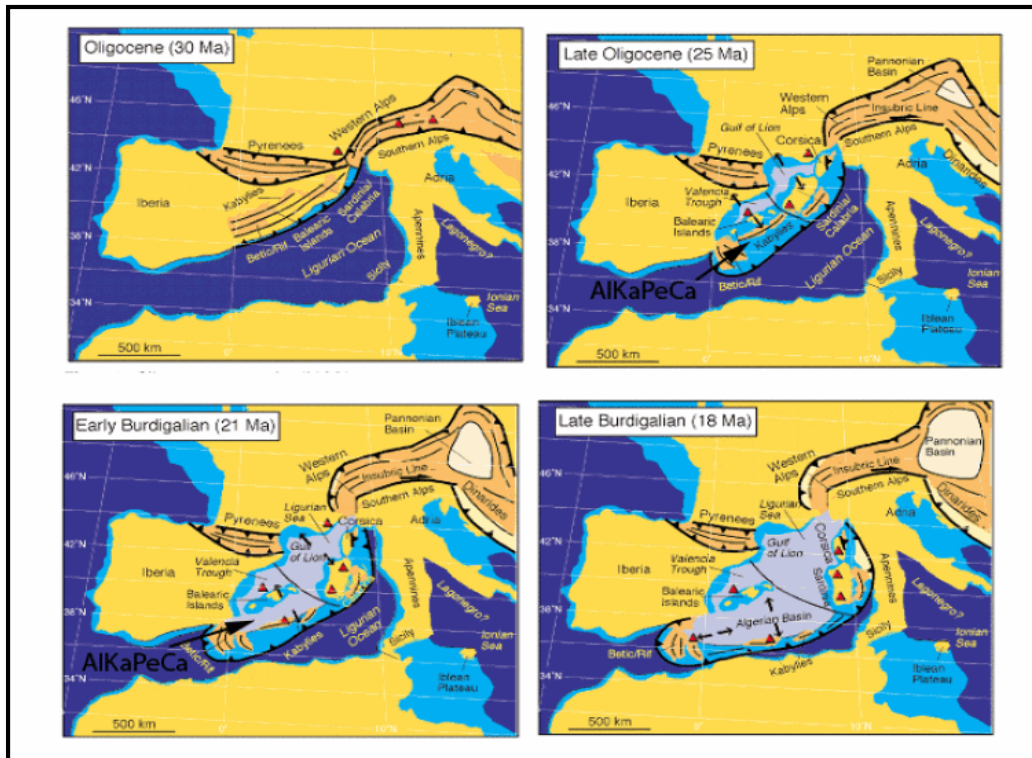
Dans cette structure orogénique en forme d'anneau aplati, on distingue classiquement deux grands ensembles : les zones internes, constituées de massifs magmatiques et métamorphiques au centre, elles contrastent avec les zones externes, qui se trouvent en périphérie et sont composées de terrains moins touchés par le métamorphisme.

L'Est de l'Algérie, notamment dans la région de Collo, fait partie de ces zones internes. Elle est caractérisée par la présence de socles métamorphiques (gneiss, micaschistes), de terrains magmatiques (plutoniques et volcaniques) et de formations sédimentaires d'âges Mio-Plio-Quaternaires, témoignant d'une histoire géodynamique complexe liée à la convergence des plaques africaine et eurasiennne (Bouillin, 1986).

L'objectif de ce chapitre est de présenter succinctement le contexte géodynamique de la marge algérienne d'ont fait partie la zone d'étude ainsi que de cartographier, de décrire les différentes faciès lithologiques affleurant dans la zone d'étude et d'identifier les principales déformations qui les affectent. Les éléments présentés reposent principalement sur l'analyse des cartes géologiques réalisées par l'Agence Nationale de la Géologie et du Contrôle Minier, couvrant la région concernée ainsi que sur les observations de terrain relevées lors des plusieurs missions sur terrain effectuées, en 2017, 2018, 2019, 2022, 2023, 2024 et 2025 par monsieur Seffari A. Les documents utilisés dans le cadre de cette étude sont : 1) La feuille n°12 d'Oued Zhour, 1968-70, 1/50000, Agence Nationale de la Géologie et du Contrôle Minier ; 2) La feuille n°14 de Skikda, 1968-70, 1/50000, Agence Nationale de la Géologie et du Contrôle Minier ; 3) La feuille n°13 de Collo, 1968-70, 1/50000, Agence Nationale de la Géologie et du Contrôle Minier ; 4) Modèle Numérique de Terrain, résolution 16 m, issue de l'GEE.

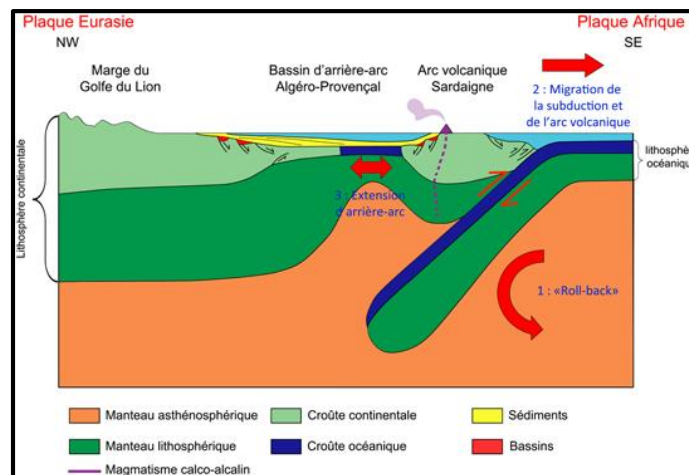
### III.2 Evolution géodynamique de la marge algérienne : structuration d'AlKaPeCa et ouverture du bassin algérien.

La structuration des chaînes alpines en Méditerranée occidentale, notamment la formation du complexe micro-continental AlKaPeCa (Alboran, Kabylies, Peloritains, Calabre), est directement liée aux processus de subduction en recul (rollback) et à la dynamique du manteau induite par la disparition de la Téthys ligurienne (Fig. III-1). Depuis 35 millions d'années (Fig. III-1), le retrait de la plaque lithosphériques océanique plongeants sous les Apennins, la Calabre, l'arc de Gibraltar et sous le domaine des Kabylides a provoqué une extension crustale majeure, responsable de l'exhumation des unités métamorphiques d'AlKaPeCa et de leur dispersion actuelle (Arab et al., 2016; J. Bouillin, 1986; Durand-Delga, 1980; Frizon de Lamotte et al., 2000; Leprêtre et al., 2018; Medaouri et al., 2014; Seffari et al., 2023).



**Figure III-1:** Illustration de la structuration du micro-continent AlKaPeCa et ouverture du bassin algérien (Rosenbaum G. et al, 2002).

L’ouverture du bassin algérien (partie occidentale du bassin liguro-provençal) s’inscrit dans ce contexte de back-arc lié au recul de la subduction et à la migration de la plaque AlKaPeCa vers le Sud-Est (Fig III-2). Durant le Miocène inférieur, l’extension crustale associée au retrait du slab a conduit à l’amincissement crustale de cette microplaque continentale, voire à l’exhumation du manteau supérieur (Seffari, 2023 ; Seffari et al., 2023), formant une marge passive typique avec des dépôts sédimentaires syn et post rift (Oligo-Miocène kabyle) (Arab et al., 2016). Le bassin algérien, aujourd’hui, résulte donc de la combinaison entre le retrait des zones et les mécanismes géodynamiques clés impliqués dans l’évolution de la méditerranée occidentale :



**Figure III-2:** Modèle géodynamique illustrant la formation du bassin d’arrière-arc Algéro-Provençal (Seranne, 2007).

### III.3 Les différents faciès lithologiques

La région de Collo est située dans la Petite Kabylie, qui fait partie de la chaîne de montagnes des Maghrébides.

La chaîne des Maghrébides est composée de trois domaines principaux s'étendant du nord au sud : les zones internes, le domaine du flysch et les zones externes, qui sont recouvertes en discordance par des matériaux allant du Miocène au Quaternaire.

La nature des différents faciès lithologiques qui affleurent dans la région d'étude sont présentés sur la carte géologique réalisée (Figure III-3).

#### III.3.1 Le socle kabyle

Les études et observations de terrain menées par Durand Delga, 1969, 1980, (Vila, 1980), (Bouillin, 1977, 1986), (Djellit, 1987), (Mahdjoub, 1991), (Drareni, 1988), (Nemmour, 1993) et (Boufaa, 1998) indiquent que la Petite Kabylie est principalement composée de zones internes caractérisées par des massifs de socle métamorphique dont l'âge reste débattu. Ces massifs sont localement recouverts par une couverture de terrains paléozoïques souvent peu ou pas métamorphisés.

La géologie du socle du Cap Bougaroun diffère du reste de la Petite Kabylie par la présence d'un massif de serpentinites contenant des gisements de chromite dans la baie de Béni Saïd (Leblanc & Temagout, 1989). Ces serpentinites sont associées à des paragneiss appelés kinzigites, décrits pour la première fois par (Bouillin & Kornprobst, 1974). De plus, l'orthogneiss, décrit pour la première fois par (Seffari, 2023) comme un granite gneissifié à cordiérite-sillimanite associé à des roches ultrabasiques et à des kinzigites, est présent. L'ensemble « gneiss-serpentinite » forme ce que l'on appelle communément le socle septentrional de la Petite Kabylie ou socle kabyle septentrional. Il est également désigné comme « socle kabyle du Cap Bougaroun », par opposition au socle kabyle proprement dit, constitué de micaschistes, ou socle kabyle méridional (socle de la Petite Kabylie), constitué de phyllades, de gneiss et de cipolins. Le socle kabyle, beaucoup plus étendu, est caractérisé par l'absence de péridotites et de serpentinites. L'ensemble « gneiss-serpentinite » ou socle du Cap Bougaroun est limité à l'est, au nord et à l'ouest par des roches volcaniques miocènes. Au sud, le contact se fait par des failles inverses avec l'Oligo-Miocène kabyle du bassin marginal algérien, lui-même intrudé par les mêmes roches volcaniques. L'Oligo-Miocène kabyle est représenté par des formations sédimentaires composées de grès, de marnes et de calcaires. Ces formations sédimentaires, ainsi que les roches volcaniques miocènes associées, séparent le socle kabyle septentrional du Cap.

#### III.3.2 Aperçu magmatique

La région de Collo présente également des manifestations volcaniques, notamment sous forme d'affleurements de roches volcaniques, localisés à proximité de la côte (Bouillin, 1977). Ce volcanisme post-collisionnel est interprété comme étant lié à des processus de remontée mantellique.

Ces produits volcaniques sont souvent associés à des granitoïdes intrusifs dans la région, témoignant d'un contexte géodynamique évolutif, passant de la compression à l'extension locale (Bracène & al, 2016) ; (Hamai & al, 2018).

### III.3.3 Notion tectonique

La région est marquée par une structuration compressive d'âge miocène, à présent manifestée par des failles et des plis serrés affectant les formations métamorphiques et sédimentaires. Ces structures témoignent de la phase de collision alpine entre l'Afrique et l'Eurasie qui a entraîné la superposition d'unités allochtones sur le socle autochtone (Arab & al, 2016). La présence d'unités kabyle, associées aux terrains de flysch, souligne cette dynamique de subduction et d'accrétion tectonique typique des zones internes maghrébines (Wlidi, 1983).

### III.4 Conclusion

La région de Collo présente une structure géologique complexe, marquée par l'interaction entre formations métamorphiques, magmatiques et sédimentaires, héritées d'une histoire géodynamique toujours active liée à l'évolution de la chaîne des Maghrébides.

Cette diversité lithologique, allant des roches ultrabasiques et gneissiques du socle aux formations sédimentaires quaternaires littorales ainsi que les déformations qui affectent ces formations géologiques, influencent fortement la morphologie côtière et les processus d'érosion et de sédimentation. Comprendre ce contexte géologique constitue une étape fondamentale pour interpréter les dynamiques actuelles du littoral.

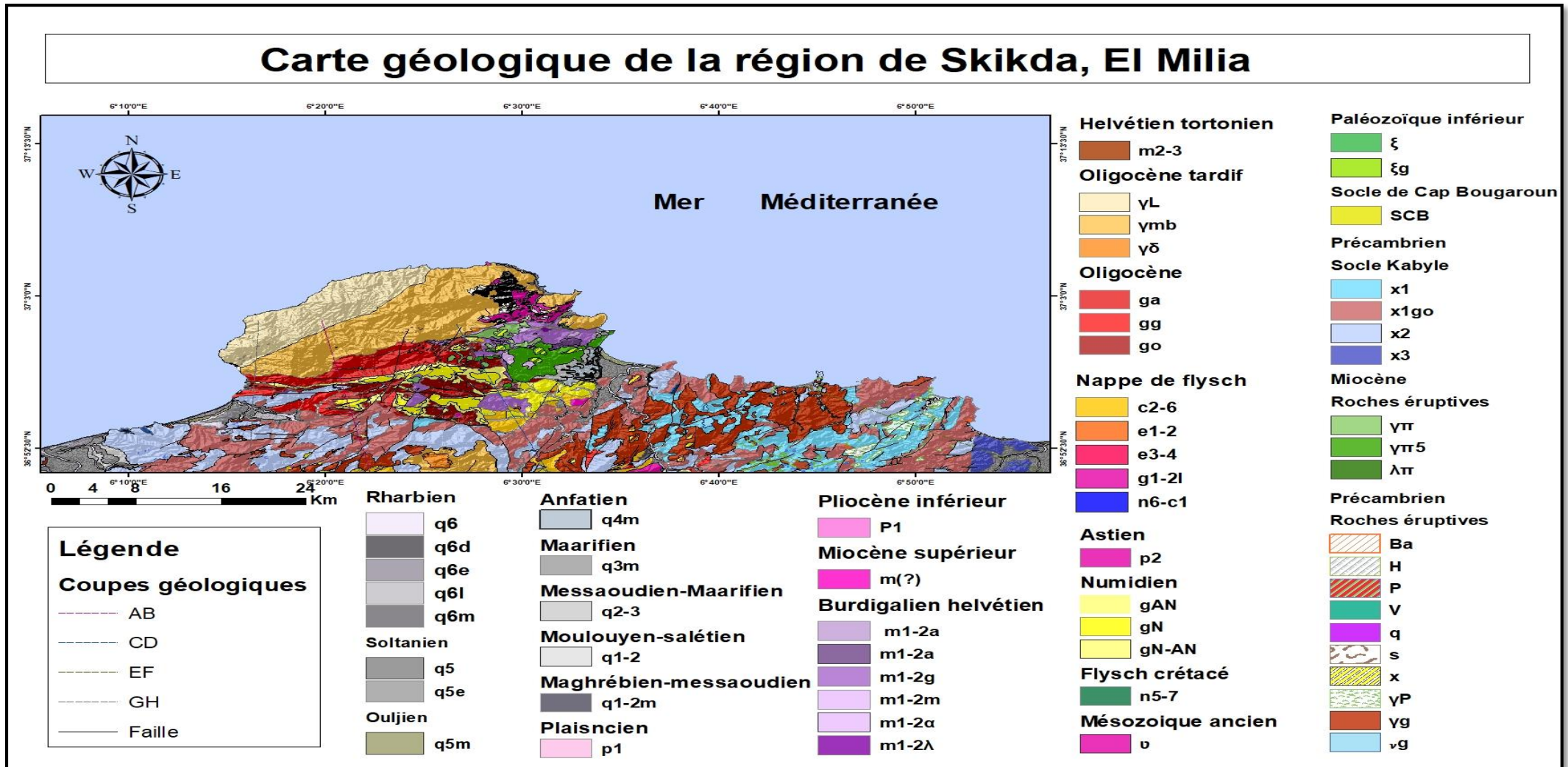
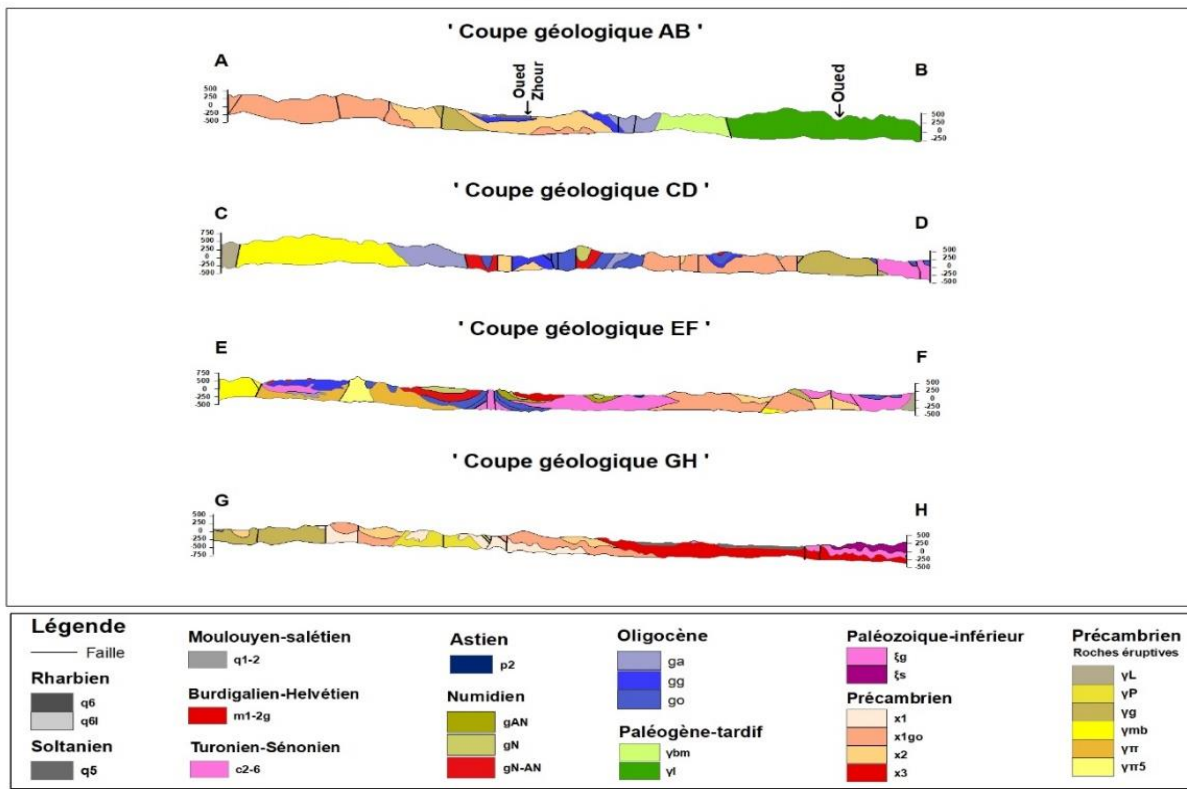


Figure III-3 : Carte géologique de la zone d'étude modifiée en se basant sur les cartes géologiques d'Oued Zhou, Collo et Skikda, 1968-70, (1/50000).

<p><b>01. Quaternaire</b>  <b>-Rharbien</b>  <b>q6</b> : Cailloutis. sables. limons  <b>q6a</b> : Alluvions  <b>q6d</b> : Sols et éboulis  <b>q6e</b> : Grès éoliens  <b>q6l</b> : Vase et sables lacustro-marécaquex/ Limons / Argiles.  <b>q6m</b> : Sable marins/ Sables, cailloutis marins.  <b>Soltanien</b>  <b>q5</b> : Cailloutis, sable, limons  <b>q5e</b> : Sables éoliens  <b>Ouljien</b>  <b>q5m</b> : Sable des plages/ Sables marins/Sables, cailloutis marins.  <b>Anfatien</b>  <b>q4m</b> : Sable et cailloutis  <b>Maarifien</b>  <b>q3m</b> : poudingues et grés marins.  <b>Messaoudien-Maarifien</b>  <b>q2-3</b> : Poudingues grès, limons  <b>Moulouyen-Salétien</b>  <b>q1-2</b> : Grès, graviers cimentés, conglomérats  <b>Maghrébien-Messaoudien</b>  <b>q1-2m</b> : Conglomérats et grès marins  <b>Plaisancien</b>  <b>p1</b> : marnes  <b>2. Néogène</b>  <b>Pliocène inférieur</b>  <b>P1</b> : marnes  <b>astien</b>  <b>p2</b> : Conglomérats, Sables  <b>Miocène supérieur</b>  <b>m (?)</b> : Calcaires massifs blancs et Conglomérats de base  <b>Burdigalien-Helevétien</b>  <b>m1-2 λ</b> : Laves et tufs acides  <b>m1-2 α</b> : Laves et tufs neutres  <b>m1-3 a</b> : Argiles à klipptes sédimentaire, grès  <b>m1-2 m</b> : Marnes, argiles, grès calcaireux  <b>m1-2 g</b> : Grès calcaireux ; g-grès conglomérats  <b>Hélvétien-tortonien</b>  <b>m2-3</b> : Conglomérats, grès</p>	<p><b>3. Numidien</b>  <b>gN</b> : Grès et argiles  <b>gN-AN</b> : Argiles, quartzites, grès  <b>gAN</b> : Argiles à Tubotomaculum, lentilles de roches bitumineuses, lits de grès/ Grès.  <b>4. Flysch créacé</b>  <b>Albo aptien</b>  <b>n5-7</b> : Grès quartzeux et argiles.  <b>5. Nappe de flysch</b>  <b>Oligocène</b>  <b>g1-2 f</b> : Conglomérats, grès calcaireux et micacés  <b>Yprésien-Lutétien</b>  <b>e3-4</b> : Grès calcaireux, microbrèches  <b>Paléocène</b>  <b>e1-2</b> : Grès quartzeux, argiles, calcaires massifs à concrétions de marcassite  <b>Turonien-Sénonien</b>  <b>C2-6</b> : Argiles, marnes à bancs minces de calcaire microbréchiques, calcaires sublithographique microbrèche, grès calcaireux  <b>Cénomanién</b>  <b>C1</b> : Phtanites, microbrèches  <b>Albo-Cénomanién</b>  <b>n6-c1</b> : Argiles, grès, Phtanites  <b>Aptien-Albien</b>  <b>n5-7</b> : Grès, quartzites, argilites  <b>6. Couverture socle kabyle</b>  <b>Oligocène</b>  <b>ga</b> : Argilites schisteuses, marnes, quartzites, silexities/ Grès micacés/  <b>go</b> : Olistostromes  <b>gg</b> : Grès micacés, conglomérats  <b>7. Socle kabyle</b>  <b>Paléozoïque inférieur (?)</b>  <b>ξ / ξs</b> : Calcaires et schistes  <b>ξg</b> : Quartzites, conglomérats, schistes  <b>Précambrien</b>  <b>x3</b> : Phyllites, quartzites  <b>x2</b> : Micaschistes, lentilles de calcaires, quartzites et gneiss de base  <b>x1go</b> : Gneiss oeillés  <b>x1</b> : Gneiss fins avec des cipolins, amphibolites et quartzites</p>	<p><b>8. Roche Eruptives</b>  <b>Miocène</b>  <b>γ π</b> : Dykes et filons : Granitoporphyrés  <b>λπ</b> : Dykes et filons : Felsitoporphyrés et porphyres à quartz  <b>γπs</b> : Dykes et filons : Amas subvolcaniques  <b>υβ</b> : Diabases, gabbro-diabases, gabbros et péridotites  <b>Paléogène tardif</b>  <b>i</b> : Dykes et filons d'aprites  <b>γL</b> : Granites leucocytes  <b>γδ</b> : Granodiorites  <b>γmh</b> : Granites et homblende (Granites mélanocrates)  <b>γmb</b> : Granites à biotite (Granites mélanocrates)  <b>Mésozoïque ancien ?</b>  <b>υ</b> : Péridotites serpentinisées  <b>Précambrien</b>  <b>P</b> : Pegmatites  <b>γg</b> : Granites gneissoides à deux micas  <b>γ δg</b> : Granodiorites gneissoïdes à biotite  <b>av</b> : Ortoamphibolites  <b>Ba</b> : Filons de barytine  <b>vg</b> : Gabbros gneissifiés, Ortoamphibolites.  <b>γP</b> : Granites pegmatoïdes.  <b>H</b> : Niveaux et lentilles de marbre  <b>V</b> : Petits lits de roches méta volcaniques.  <b>s-q</b> : Roches d'altération hydrothermale, s-sulfidisation , q-quartzitation .</p>
--	---	---

Tableau III-1 : Légende stratigraphique de la carte géologique de la figure III-03.

## Carte des coupes géologiques de Skikda , Collo , El Milia



**Figure III-4:** Coupes géologiques montrant les relations entre les différents faciès lithologiques dans la zone d'étude. Les traits de coupes sont localisés dans la carte de la figure III-03.

***Chapitre IV***  
***Analyse structurale de la région de***  
***Collo***

## IV.1 Introduction

La région de Collo, située dans le nord-est de l'Algérie, constitue une portion structurale clé de la chaîne des Maghrébides. Cette zone est caractérisée par une intense fracturation et un réseau de failles bien développé, traduisant une évolution tectonique complexe en lien avec la convergence entre les plaques africaine et eurasiatique en méditerrané occidentale. Ce chapitre présente une analyse structurale détaillée visant à identifier les principales familles de failles, à reconstituer le régime de contrainte actif et à proposer un modèle tectonique interprétatif cohérent avec les observations de terrain et les données géospaciales. L'analyse repose sur trois types de données principales :

(i) une carte géologique réalisée à l'échelle locale sur la région de Collo, intégrant les principaux accidents structuraux ; (ii) des images satellitaires haute résolution issues de Google Earth, permettant d'identifier les linéaments majeurs visibles depuis l'espace ; et (iii) des observations et informations relevées sur le terrain concernant la géométrie des failles de différentes orientations, il s'agit de mesures des directions et des pendages de failles localisées avec un GPS, d'analyse de la cinématique apparente et d'illustrations par des photographies géoréférencées. Les failles identifiées ont été reportées sur une carte géologique et analysées à l'aide de projections stéréographiques (réalisées à l'aide du logiciel faultkin) pour déterminer les familles structurales et leurs orientations préférentielles. Une classification des failles a été effectuée selon leur cinématique apparente (décrochante, inverse, normale). L'ensemble de ces données a ensuite permis de reconstituer un modèle de déformation de type Riedel, couramment utilisé pour interpréter les mouvements tectoniques des zones déformées.

## IV.2 Carte géologique de la région de Collo.

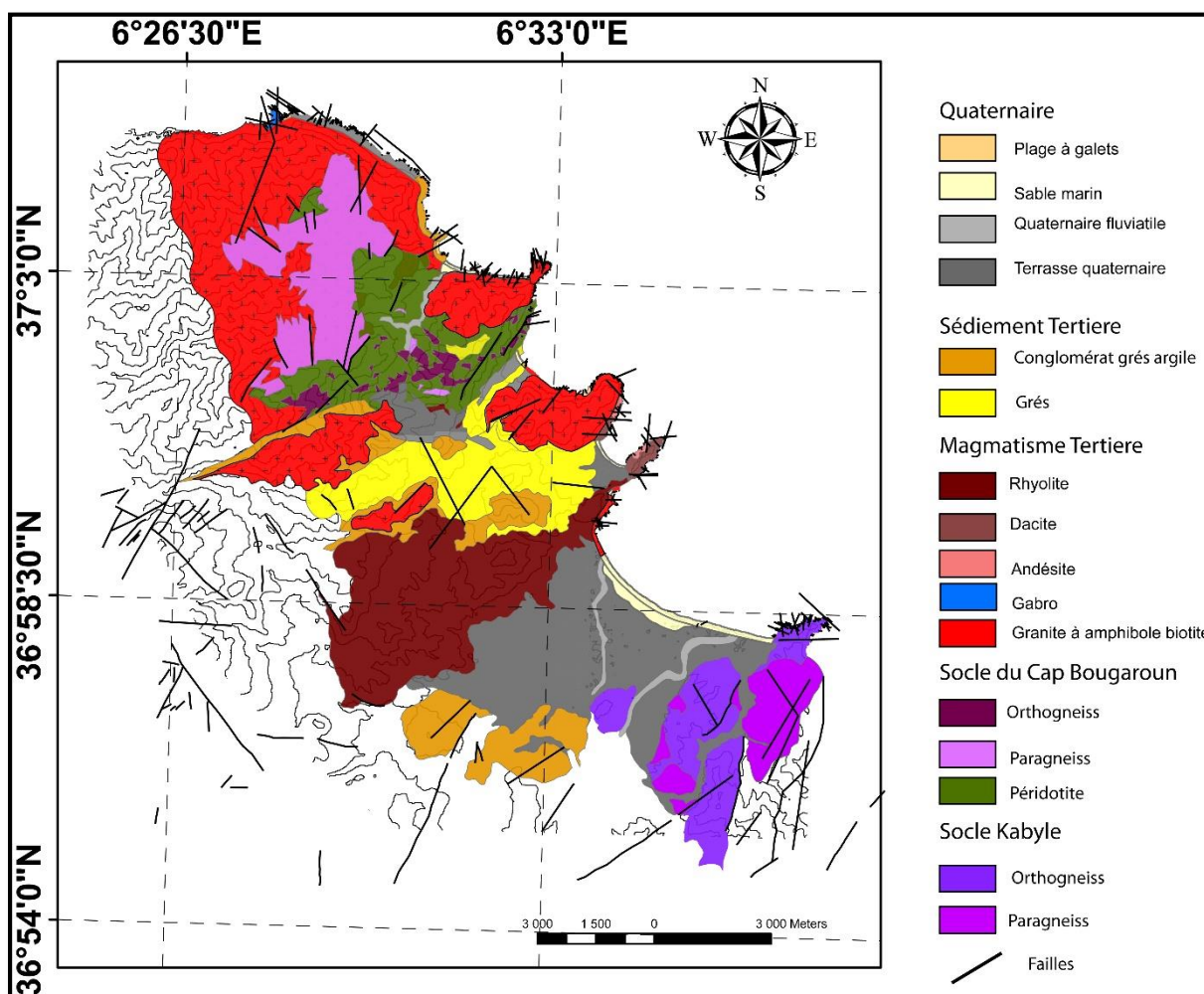
La carte géologique présentée couvre une zone située entre les coordonnées 6°26'30" E à 6°33'0" E en longitude et 36°54'0" N à 37°3'0" N en latitude (Fig IV-1), avec une superficie totale d'environ 160,62 km<sup>2</sup>. Cette région est caractérisée par une grande diversité de roches et de formations géologiques, allant des roches métamorphiques anciennes aux dépôts quaternaires récents.

### IV.2.1 Socle et formations anciennes

Dans la région, deux types de socles affleurent : (1) Le socle kabyle, dominé par des paragneiss et des orthogneiss, occupe principalement le sud-est de la Kabylie. Il est probablement associé à une orogénèse ancienne, reflétant une histoire tectonique complexe. Ce socle constitue le substratum des formations sédimentaires mésozoïques et tertiaires de la Petite Kabylie ((Y Mahdjoub, 1991; Mahdjoub & Merle, 1990; Peucat et al., 1996)). (2) Le socle du Cap Bougaroun, quant à lui, est constitué principalement de roches ultrabasiqes, témoins d'un manteau ayant formé la croûte océanique du bassin marginal algérien, ainsi que de paragneiss et de granites à cordiérite datés du Carbonifère supérieur (Seffari, 2023 ; Seffari et al., 2023). Ces derniers ont été exhumés lors de l'ouverture du bassin arrière-arc, datée de 19 Ma (Seffari, 2023).

### IV.2.2 Activités magmatiques.

Le nord-ouest est marqué par une importante intrusion granitique à amphibole et biotite, interprétée comme le produit d'une fusion crustale associée au détachement du slab (Ouabadi, 1994). À cela s'ajoutent des affleurements plus restreints de gabbro, dacite, andésite et rhyolite, traduisant une variété de contextes magmatiques, allant des environnements océaniques aux arcs volcaniques (Bouillin, 1977; Ouabadi, 1994).

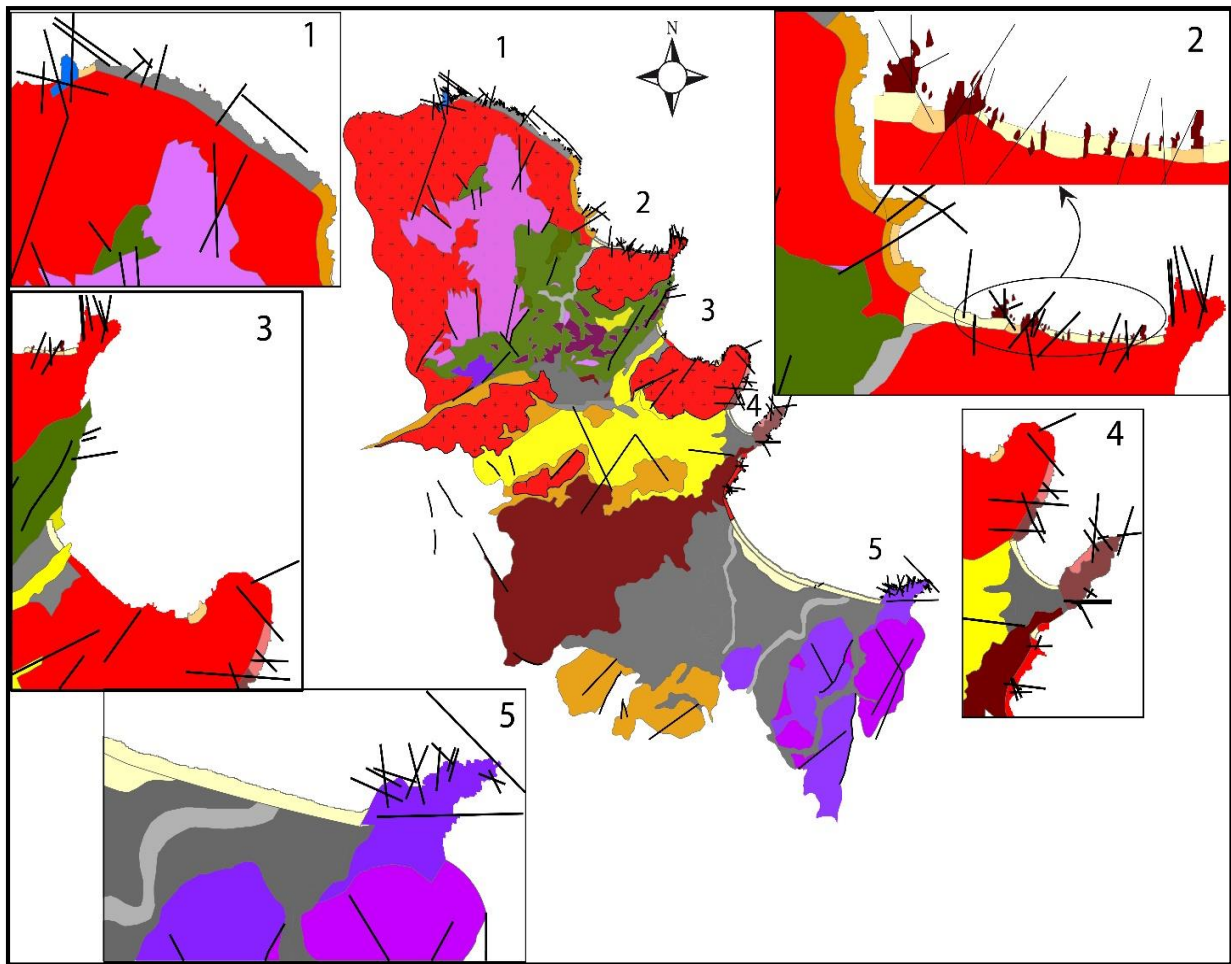


**Figure IV-1:** Carte géologique de la région de Collo montrant les différents faciès lithologiques affleurant et les failles qui les affectent.

### IV.2.3 Dépôts sédimentaires néogène et quaternaire.

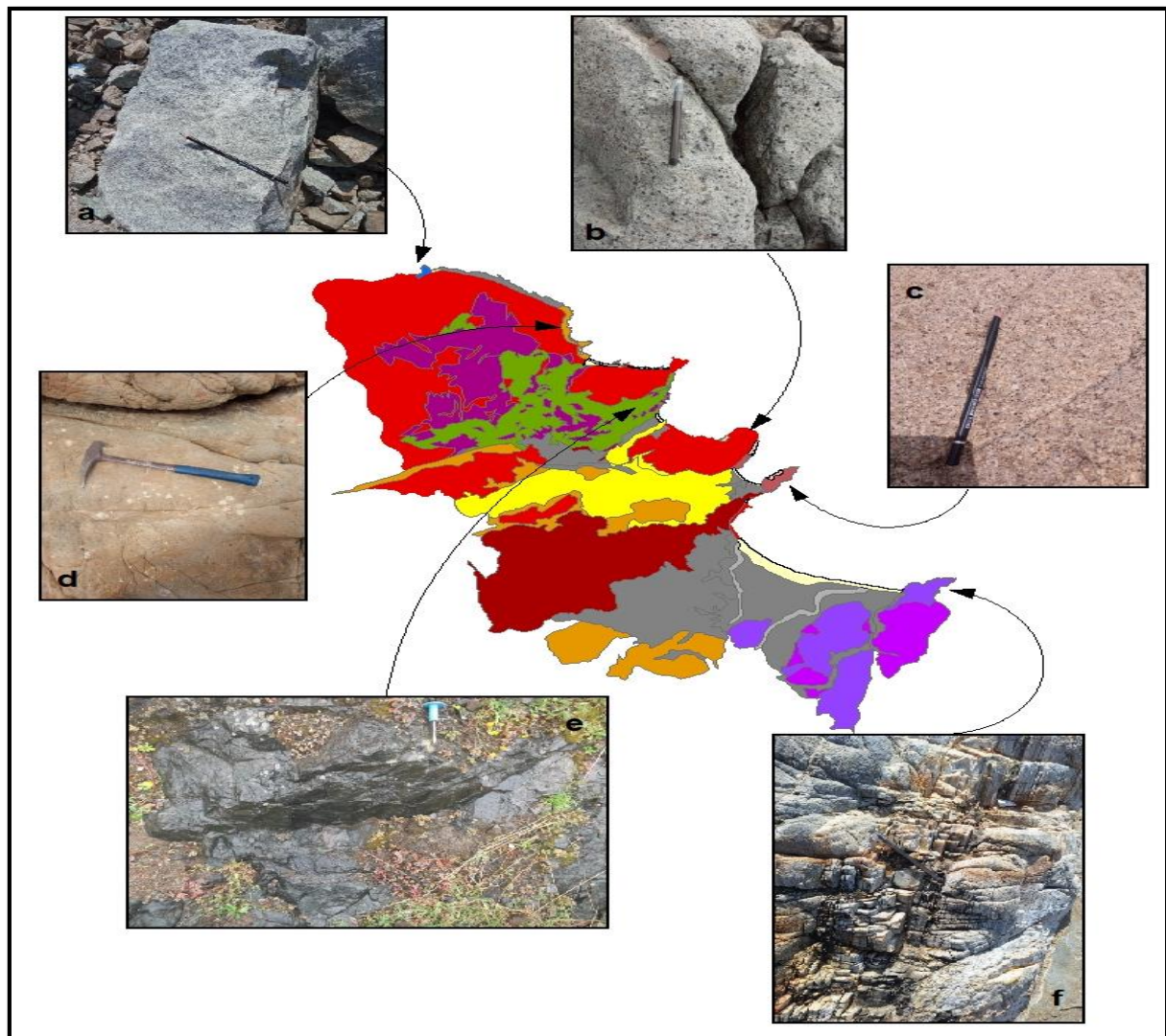
Les dépôts quaternaires récents comprennent des formations côtières comme les plages à galets et les sables marins, ainsi que des dépôts fluviatiles et des terrasses, témoignant d'une dynamique sédimentaire active influencée par les variations du niveau marin et l'érosion des reliefs environnants. Ces formations récentes recouvrent des sédiments tertiaires,

principalement des conglomérats grés-argileux et des grès, interprétés comme des dépôts détritiques grossiers d'environnements alluviaux ou deltaïques.



**Figure IV-2 :** Agrandissement sur les différentes zones côtières de la région de Collo.

(1) Cap Bougaroun ; (2) Tamanart ; (3) Beni Said ; 4 Ain Douala (ex plage des jeunes filles) ;(5) Ben Zouit.



**Figure IV-3:** *Identification des faciès géologiques observés sur terrain.*

(a) Gabbro ; (b) Granite à amphibole biotite ; (c) Dacite ; (d) Grès ; (e) Péridotite ; (f) Orthogneiss

#### IV.2.4 Le réseau de failles.

Les failles, représentées sur la carte par des lignes noires continues marquées de croix, traversent diverses unités géologiques, soulignant leur rôle fondamental dans l'histoire tectonique de la région. Ces structures témoignent de déformations majeures, anciennes ou plus récentes, qui ont façonné l'agencement actuel des terrains.

Certaines failles apparaissent comme des discontinuités majeures ayant contrôlé la subsidence différentielle de certains secteurs, provoquant l'enfoncement progressif de blocs crustaux. D'autres présentent des indices de coulissage latéral, traduisant des mouvements transcurrents qui ont fragmenté les unités rocheuses et induit des décalages horizontaux significatifs.

Par ailleurs, plusieurs de ces structures ont accompagné des épisodes de soulèvement tectonique, contribuant à l'exhumation de terrains profonds, tandis que d'autres zones montrent

des signes d'effondrement tectonique, souvent associés à des contextes extensifs ou post-orogéniques. Ainsi, l'ensemble de ce réseau de failles illustre une évolution géodynamique complexe, marquée par l'alternance de phases compressives et extensives ayant profondément influencé la morphologie, la structure interne et externe de la région étudiée.

### IV.3 Détail de la cartographie structurale et géologique de la zone côtière de Collo

Pour bien voir les structures formant le littoral de la région de Collo un agrandissement été appliqué sur la carte géologique de la région (Fig.IV-2) montre une représentation détaillée, Elle met en évidence les différentes unités géologiques et les systèmes de failles qui contrôlent l'évolution structurale et morphologique du littoral. La carte est divisée en plusieurs secteurs numérotés (1 à 5), chacun correspondant à une zone spécifique du littoral (voir figureIV-2) où des processus d'aggradation sont observés.

- **Cap Bougaroun (Zone 1)**

La zone de Cap Bougaroun présente une diversité lithologique et structurale remarquable. Parmi les principales lithologies, on distingue tout d'abord le granite miocène, une roche magmatique intrusive caractéristique de cette période. Le gabbro, lié à l'ouverture du bassin algérien à 19 Ma (Seffari et al., 2023; Seffari, 2023). Enfin, les terrasses quaternaires, formations sédimentaires superficielles plus récentes, résultent de processus érosifs et sédimentaires liés à l'action marine ou fluviale.

Sur le plan structural, la zone est marquée par la présence de failles orientées NW-SE, qui constituent les principales structures tectoniques. Leur orientation suggère une contrainte régionale orientée, possiblement liée à un régime compressif ou à un cisaillement oblique. Ces failles sont complétées par un réseau de failles secondaires orientées NNE-SSW, formant un système conjugué. Cette configuration révèle une activité tectonique complexe, liée à la collision entre la microplaque AlKaPeCa et le domaine africain (Van Hinsbergen et al., 2004; Douwe J.J. van Hinsbergen et al., 2020; Lacombe et al., 2020; Leprêtre et al., 2018; Michard et al., 2006).

- **Tamanart (Zone 2)**

Du point de vue lithologique, dans la plage de Tamanart on y rencontre des rhyolites, dacites, ainsi que quelque pointement d'andésite formant les roches volcaniques intrusives dans les granites miocènes, ces roches formant des filons orienté relativement N-S. À ces formations volcaniques formant les caps dans la plage du Tamanart (Fig.IV-2) s'ajoutent des grès, roches sédimentaires clastiques d'âge Oligo-miocène essentiellement gréseux, trace des sédimentations au cours de l'ouverture de bassin marginale algérien (Arab et al., 2016). Les sables marins quaternaires, quant à eux, sont des dépôts récents formés par des processus d'aggradation côtière, caractéristiques des phases marines récentes du Quaternaire.

Sur le plan structural, la zone est dominée par des failles orientées NE-SW, qui traduisent une direction principale de déformation tectonique liée à un régime compressif régional. À ce système principal s'ajoutent des failles conjuguées orientées NW-SE. L'ensemble de ces structures reflète une tectonique active ayant modifié l'agencement des formations géologiques de la région de Tamanart au fil du temps et distribution des matériaux volcaniques sur cette plage.

- **Beni Said (Zone 3)**

La zone de Beni Said est dominée par des formations granitiques du Miocène, sédimentaires correspondant à des conglomérats et des grès miocène ainsi que par des roches ultrabasiqes et métamorphiques du socle du Cap Bougaroun. Les failles d'orientation N-S, E-W, NE-SW et NW-SE contrôlent la morphologie côtière. Les plages à galets quaternaires sont localisées dans les zones où les failles favorisent l'accumulation de matériaux grossiers, montrant l'impact direct des structures géologiques sur les processus sédimentaires modernes.

- **Ain Douala (ex Plage des Jeunes Filles) (Zone 4)**

Dans cette zone, le granite miocène occupe principalement la partie ouest de la plage, tandis que des roches volcaniques comme la dacite et l'andésite forment la portion est, notamment au niveau du Cap El Kessira. La plage d'Aïn Douala, quant à elle, est constituée de sables marins quaternaires, dont l'accumulation résulte de l'action des vagues et des courants côtiers.

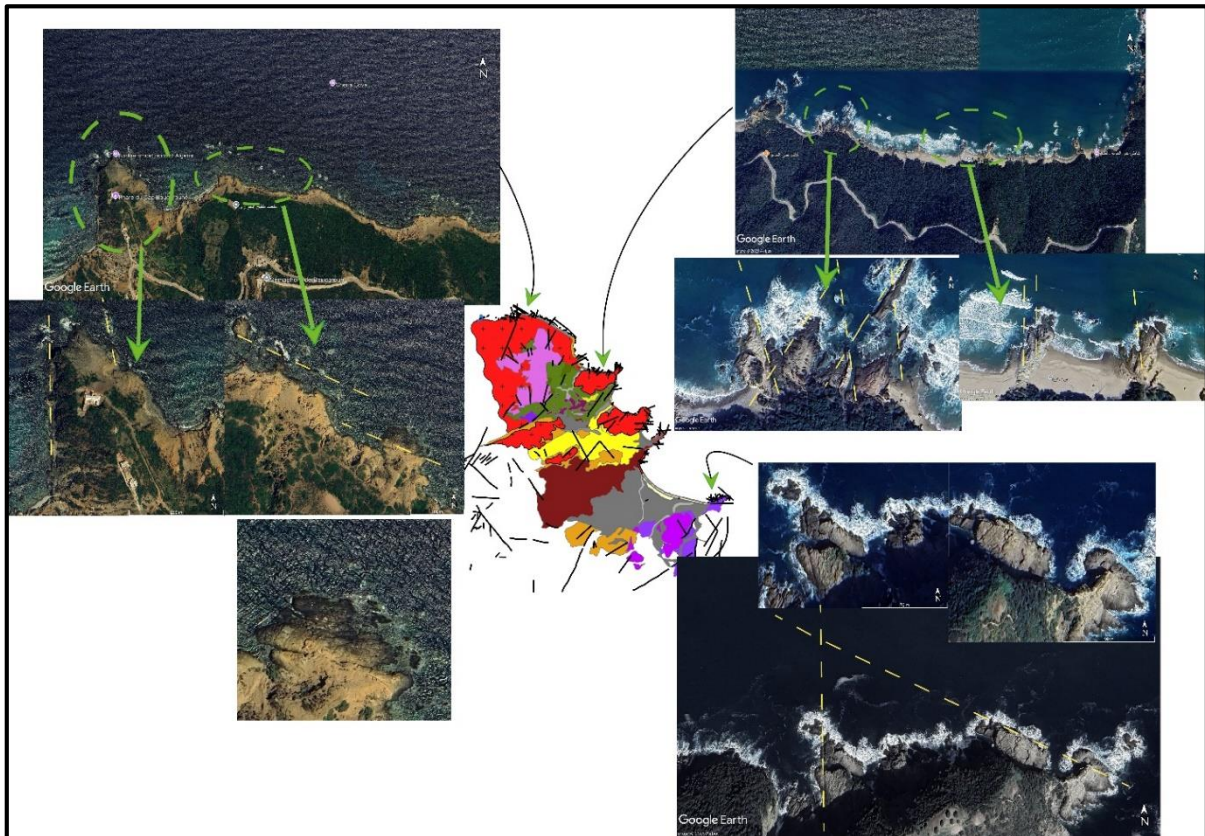
Sur le plan structural, la région est traversée par des failles majeures orientées nord-ouest/sud-est (NW-SE), en lien avec les contraintes tectoniques régionales du nord de l'Algérie. À celles-ci s'ajoutent des failles secondaires orientées nord-nord-est/sud-sud-ouest (NNE-SSW), ainsi que des structures orientées est-ouest (E-W). Cet agencement traduit une tectonique complexe, influencée par la géodynamique de la Méditerranée occidentale.

- **Ben Zouit (Zone 5)**

Dans cette zone, l'affleurement de roches métamorphiques appartenant au socle kabyle, notamment des orthogneiss et des paragneiss localisés dans la partie orientale de la plage, témoigne d'une tectonique ancienne antérieure à celle liée à l'évolution récente de la Méditerranée occidentale. Une large portion de la région est recouverte par des formations quaternaires, incluant des terrasses marines et des dépôts fluvatiles, ainsi que des sables marins qui constituent les plages actuelles. Du point de vue tectonique, la zone est structurée par un réseau de failles principales orientées NE-SW, associées à des régimes compressifs ou de cisaillement. Ce système est complété par des failles secondaires orientées NW-SE, ainsi que par des failles E-W, ces dernières marquant le principal plan de cisaillement entre le bloc des Kabylides et la plaque africaine, tel que suggéré par [Meghraoui, \(1988\)](#). Ce réseau de failles reflète une déformation polyphasée, en lien avec l'évolution géodynamique complexe du domaine méditerranéen.

#### IV.4 Structures tectoniques dans la région côtière de Collo (Nord-Est algérien) : observations par images satellitaires.

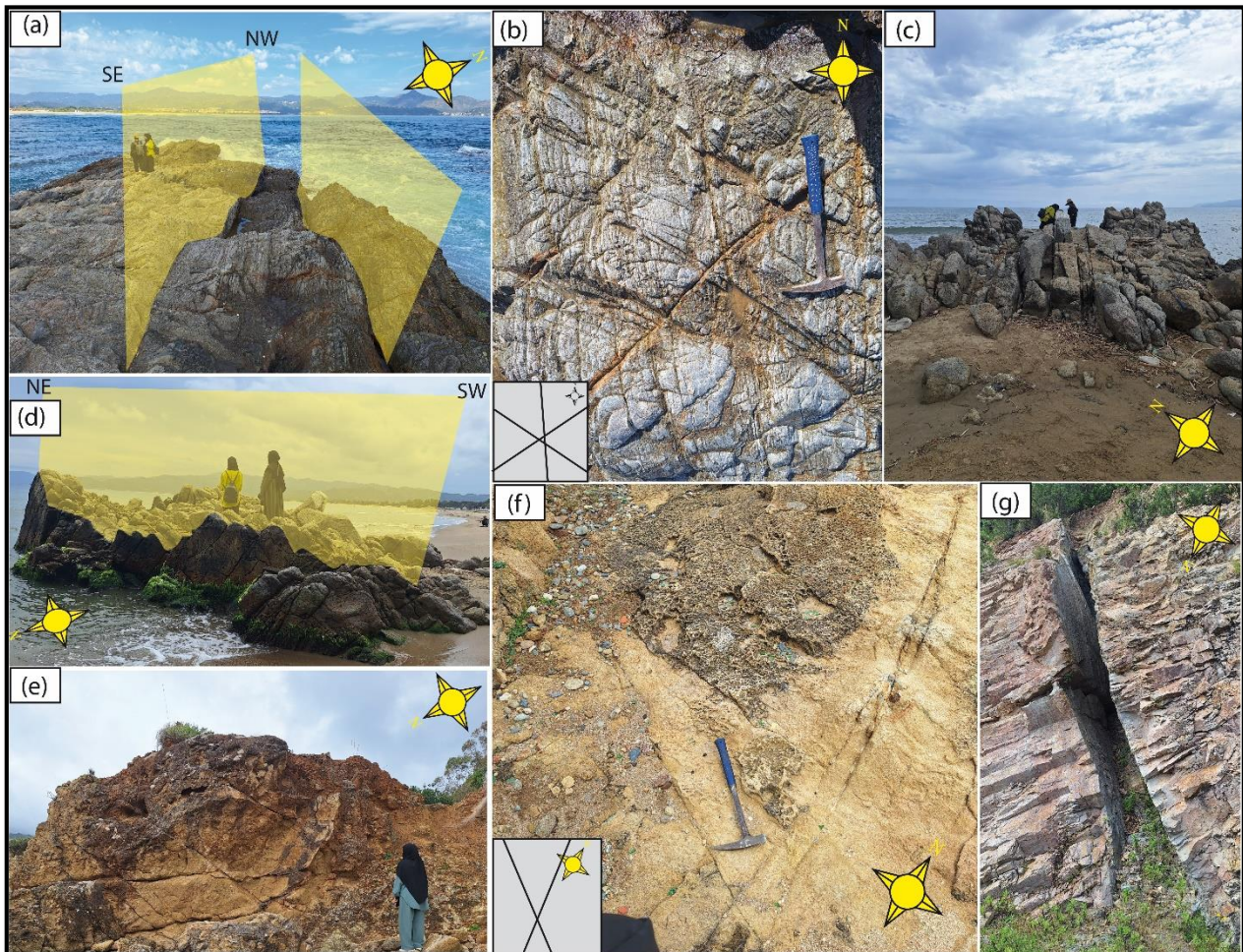
A partir d'images satellites (Google Earth) superposées à une carte géologique simplifiée (Fig.IV-3), la répartition spatiale des structures tectoniques est visible sur le littoral de la zone d'étude. Les photographies mettent en évidence des linéaments rectilignes bien marqués, interprétés comme des failles, qui découpent le paysage côtier. Ces structures tectoniques apparaissent sous forme de lignes jaunes ou vertes discontinues, soulignant leur orientation préférentielle et leur contrôle sur la morphologie littorale. Les failles, de direction dominante NW-SE à NE-SW, sont responsables du découpage en blocs allongés, de l'ouverture de criques et de l'isolement de petits îlots rocheux. La plupart de ces failles contrôlent la structuration des caps rocheux de la région de Collo, influençant leur forme et leur disposition. Le mouvement coulissant de certaines d'entre elles joue un rôle clé dans la morphogenèse côtière, en induisant des décalages latéraux visibles dans le trait de côte et en conditionnant l'évolution géodynamique locale. Les flèches vertes relient la carte centrale aux emplacements précis des affleurements observés sur les photographies, permettant de visualiser l'influence directe de ces structures sur la répartition des unités géologiques. L'ensemble met en évidence un héritage structural important, avec des indices de soulèvement et d'effondrement localisés, traduisant une dynamique tectonique complexe affectant à la fois la disposition des formations rocheuses et la topographie côtière actuelle.



**Figure IV-4:** Image satellitaire (Google Earth) montrant les principaux linéaments (failles).

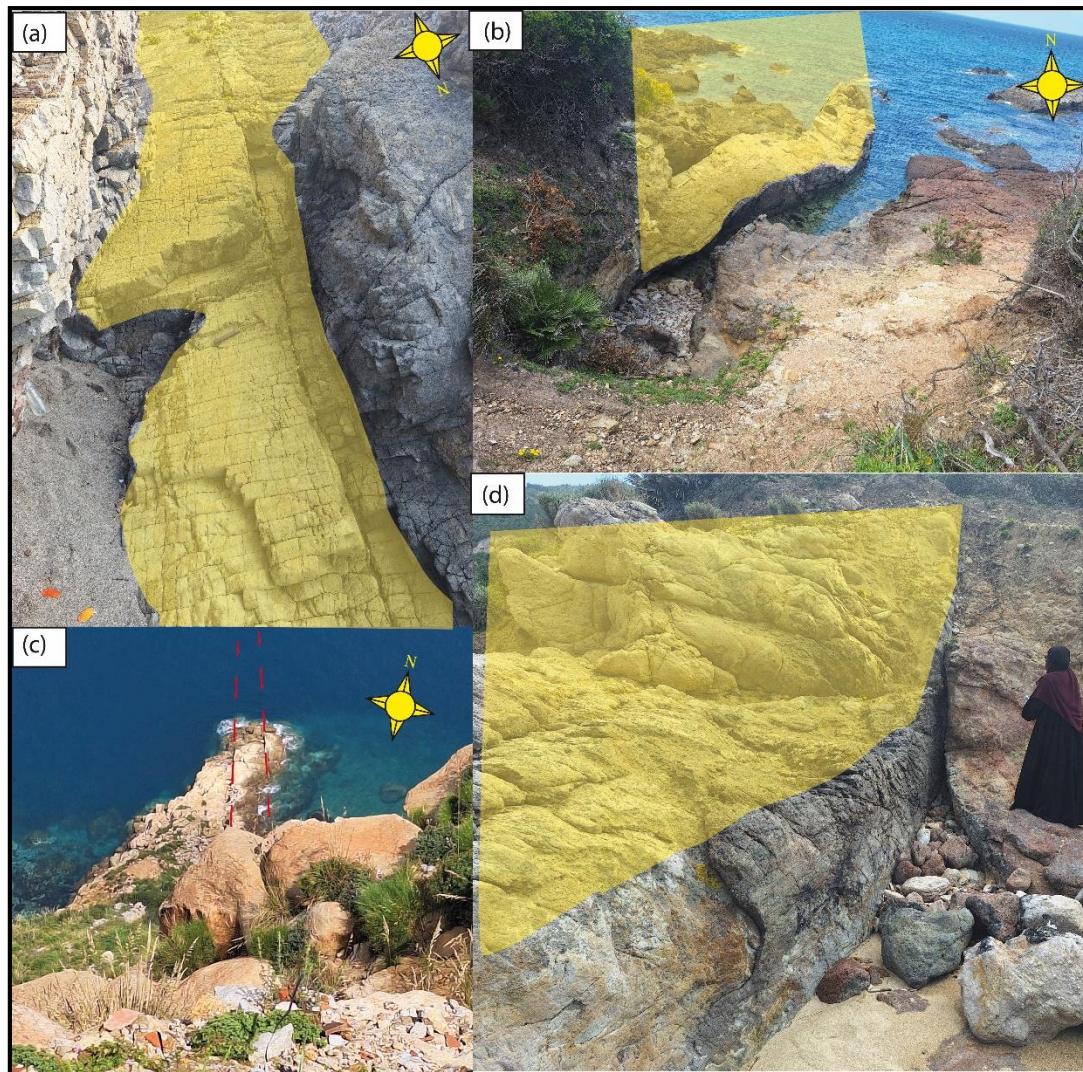
### IV.5 Structures tectoniques dans la région côtière de Collo (Nord-Est algérien) : observations de terrain

La région côtière de Collo révèle, à travers plusieurs photographies de terrain (Fig.4), une diversité remarquable de structures tectoniques traduisant une histoire géodynamique complexe. Ces structures incluent notamment des systèmes de failles, des réseaux de fractures, ainsi que des indices morphologiques associés à des mouvements tectoniques polyphasés.



**Figure IV-5 :** Photographies de terrain illustrant les principaux systèmes de failles observés le long du littoral de la région de Collo.

(a) Failles orientées NE-SW dans la partie Est de la plage de Ben Zouit ; (b) Réseaux de failles conjugués dans la zone Est de Ben Zouit ; (c) Faille d'orientation NE-SW affectant les granites miocènes à l'ouest de la plage de Ben Zouit ; (d) Plan de faille bien exposé dans la partie ouest de la plage de Ben Zouit ; (e) Failles inverses conjuguées dans les grès formant l'Oligo-Miocène kabyle, observées sur la plage de Tamanart ; (f) Système de failles conjuguées N-S et NW-SE dans les roches sédimentaires Oligo-Miocène; (g) Faille normale affectant les granites miocènes dans la région de Tamanart.



**Figure IV-6:** Photographies de terrain illustrant les principaux systèmes de failles observés le long du littoral de la région de Collo.

- (a) Faille d'orientation N-S affectant des rhyolites intrusives dans les granites miocènes, observée sur la plage de Tamanart ; (b) Faille sub-verticale orientée NE-SW dans la région de Tamanart ; (c) Failles d'orientation NNW-SSE observées dans la zone de Cap Bougaroun, affectant la série sédimentaire Oligo-Miocène kabyle ;(d) Faille verticale affectant des roches acides (granitoïdes) sur la plage de Tamanart.

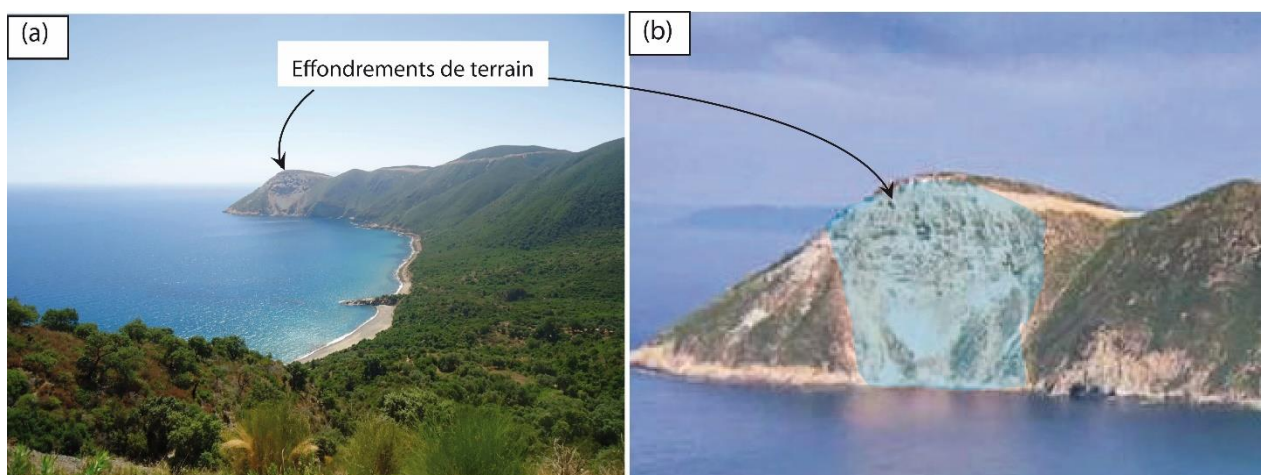
La figure 4a met en évidence une faille sub-verticale, bien marquée et orientée NW-SE, recoupant un affleurement d'orthogneiss situé à l'est de la plage de Ben Zouite. Cette faille présente un rejet décrochant net, révélant un déplacement horizontal significatif entre les deux compartiments rocheux. La figure 4b illustre un réseau dense de failles orientées N-S, NW-SE et NE-SW affectant ces mêmes orthogneiss. Ce réseau complexe reflète un cisaillement résultant probablement de l'accommodation du mouvement convergent entre la microplaque AlKaPeCa et le domaine nord-africain. Les figures 4c et 4d montrent un affleurement côtier fracturé par plusieurs failles orientées NE-SW, responsables de la dislocation de blocs rocheux et traduisant un système de fractures intriqué. La figure 4e présente un affleurement de

formations détritiques d'âge Oligo-Miocène kabyle (grès), affecté par des failles conjuguées inverses orientées ENE, quasiment perpendiculaires au tenseur de contrainte principal actuellement actif dans le nord de l'Algérie.

La figure 4f montre des failles conjuguées subverticales, à pendage élevé, affectant les formations Oligo-Miocène kabyles dans la région de Tamanart. La figure 4g, quant à elle, illustre une faille normale bien développée recoupant les granites miocènes de la région de Collo.

La figure IV-5 montre des affleurements de roches magmatiques felsiques, principalement rhyolitiques, recoupés par des failles postérieures à leur mise en place. La figure 5a montre une rhyolite claire traversée par une fracture N-S bien marquée, correspondant à une faille normale visible sur l'ensemble du plan d'exposition. La figure 5b illustre une autre faille orientée NE-SW affectant un corps rhyolitique, avec un contact net et abrupt qui souligne la fragilisation mécanique des roches post-cristallisation. La figure 5c offre une vue plongeante sur une série de failles (indiquées en pointillés rouges) recoupant une bande felsique exposée sur une avancée rocheuse en mer, confirmant l'existence d'un système de fractures affectant l'ensemble du massif rhyolitique. Enfin, la figure 5d met en évidence une faille sub-verticale affectant un filon de rhyolite, montrant un rejet net et un contact entre les compartiments de cette faille.

Ces observations démontrent que les failles recoupent indifféremment les formations magmatiques (plutoniques et volcaniques), sédimentaires et métamorphiques. Elles traduisent l'existence d'un champ de contraintes actif post-magmatique et soulignent le rôle structurant de ces discontinuités tectoniques dans l'architecture géologique et la morphogenèse actuel du littoral de Collo.



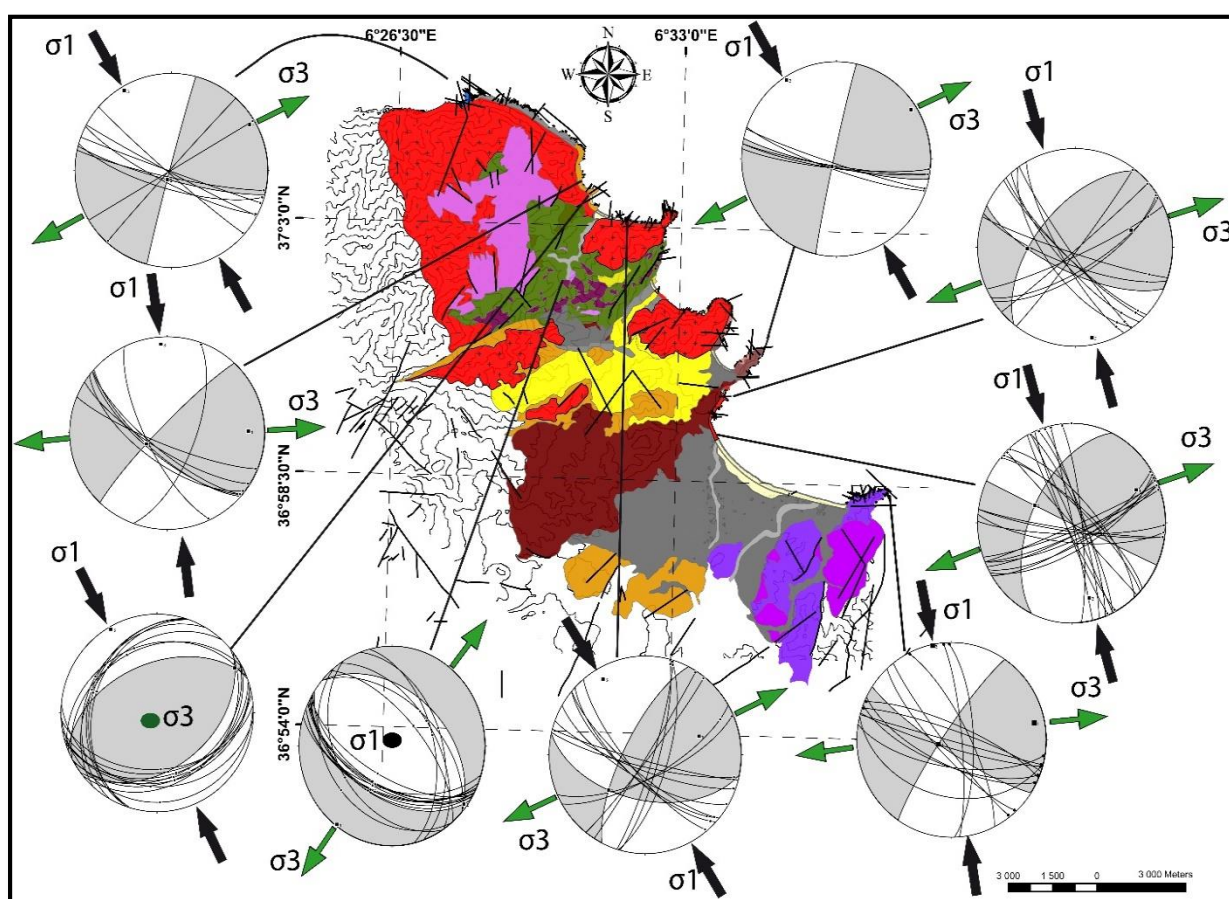
**Figure IV-7:** Photographies de terrain illustrant un effondrement de terrain (glissement de terrain) observé dans la région de Beni Saïd.

Dans la région de Beni Saïd, un glissement de terrain a été identifié sur la partie orientale de la baie (Fig.IV-6). Il se manifeste par l'effondrement des matériaux rocheux de la falaise vers la

mer, entraînant l'accumulation de débris le long du littoral et la formation d'une petite plage récente.

#### IV.6 Analyses structurales des failles mesurées sur terrain.

La figure présente une analyse structurale basée sur des données de mesure de failles collectées sur terrain. Les projections stéréographiques (Canva de Schmidt) sont superposées à une carte géologique de la région, permettant d'illustrer la distribution spatiale et l'orientation des principaux systèmes de failles (Fig.IV-7). Chaque projection stéréographique représente un site spécifique localisé par ses coordonnées géographiques. Les axes principaux des contraintes tectoniques locales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) sont également reportés sur chaque diagramme, avec  $\sigma_1$  correspondant au maximum principal,  $\sigma_3$  au minimum principal et  $\sigma_2$  au moyen axe intermédiaire. Les flèches noires indiquent la direction du vecteur de compression principal ( $\sigma_1$ ), tandis que les flèches vertes montrent la direction du vecteur de tension principal ( $\sigma_3$ ).



**Figure IV-8:** Projections stéréographiques des systèmes de failles mesurés in situ dans la région de Collo.

Trois principaux types de failles ont été identifiés dans la région de Collo, reflétant une histoire tectonique complexe liée à l'évolution géodynamique du domaine méditerranéen.

**1. Les failles en décrochement** (coulissantes), présentent des mouvements horizontaux. Elles sont orientées NW-SE avec un jeu dextre, ainsi que NNW-SSE et NE-SW avec un mouvement

senestre. Quelques failles ENE-WSW à E-W, également à mouvement dextre, ont été observées. Ces structures sont principalement localisées de part et d'autre des plages, jouant un rôle majeur dans la structuration morphologique des caps qui délimitent les plages étudiées (Ben Zouit, Ain Douala, Tamanart et Cap Bougaroun).

**2. Les failles inverses**, à mouvement vertical, provoquent un soulèvement des terrains. Elles affectent notamment les grès Oligo-Miocène dans la partie orientale de la plage de Tamanart (voir figure 4), traduisant une phase de compression intense liée à la collision entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique.

**3. Les failles normales**, quant à elles, sont caractérisées par un mouvement vertical associé à un effondrement (subsidence). Elles affectent le socle métamorphique du Cap Bougaroun ainsi que, localement, les granites miocènes, et témoignent d'un épisode extensif associé à l'ouverture du bassin marginal algérien.

Malgré la diversité des régimes tectoniques observés, l'ensemble de ces failles s'inscrit dans le contexte géodynamique de la collision entre la microplaque AlKaPeCa et le domaine africain (Faccenna et al., 2004; Rosenbaum et al., 2002; Rosenbaum & Lister, 2004; Seffari et al., 2023). Cette évolution implique des phases compressives responsables des failles inverses, des contraintes tangentielles à l'origine des décrochements, et des phases extensives marquant l'ouverture des bassins arrière-arc, typiques des zones de subduction actuelles.

#### **IV.7 Modèle structural (Reidel) appliqué sur les structures de la région de Collo**

Afin de mieux appréhender la relation entre la structure géologique et la morphologie de la région de Collo, en particulier celle du littoral étudié, une analyse intégrée a été menée sur les structures tectoniques et les déplacements le long des failles. Cette étude repose sur une cartographie détaillée des failles, accompagnée de projections stéréographiques, d'une rosace des directions et de l'application du modèle de Reidel (règles de fonctionnement des failles) (Fig.8), permettant ainsi de reconstituer de manière cohérente les contraintes tectoniques (Riedel, 1929), tant anciennes qu'actuelles, dans cette région. L'interprétation des différents éléments présentés dans la figure 8 est ensuite discutée en lien avec la dynamique géologique et son influence sur l'évolution morphologique du littoral de Collo.

La figure représente une synthèse structurale et cinématique intégrée de la région de Collo, combinant **cartographie des failles, analyse directionnelle, projection stéréographique et modélisation cinématique de type Reidel** (Fig.IV-8).

##### **IV.7.1 Analyse détaillée de la carte structurale de la région de Collo**

Sur le schéma structural, l'ensemble des discontinuités tectoniques (failles) a été représenté avec précision à partir d'observations de terrain et de levés structuraux détaillés. Chaque faille est illustrée par un tracé (Fig. IV-8), dont les caractéristiques graphiques (traits pleins, pointillés, barres de rejet, triangles ou crochets) permettent d'en distinguer les types et les dynamiques associées :

**1. Les failles normales**, indicatrices d'un contexte extensif, traduisent une subsidence de la croûte terrestre. Cette subsidence peut résulter d'un amincissement thermique lié à une remontée asthénosphérique ou d'un affaissement gravitaire dû à une surcharge sédimentaire. Ces failles sont caractérisées par un rejet vertical vers le bas du compartiment affecté, témoignant d'un étirement de la croûte continentale.

**2. Les failles inverses ou chevauchements**, révélatrices d'un raccourcissement crustal, sont généralement représentées par un triangle du côté du bloc chevauchant. Dans la région de Collo, ces structures indiquent des soulèvements locaux (uplift), suggérant des épisodes compressifs responsables de la surélévation de certains secteurs.

**3. Les décrochements (dextres ou senestres)** constituent le régime tectonique dominant dans la zone étudiée. Ils traduisent un mouvement horizontal entre deux compartiments de faille, et sont symbolisés sur la carte par des doubles barres obliques ou des stries indiquant la direction du déplacement relatif.

#### IV.7.2 Distribution spatiale et densité des failles

Dans le schéma structural, on observe une concentration notable des structures tectoniques dans deux zones principales :

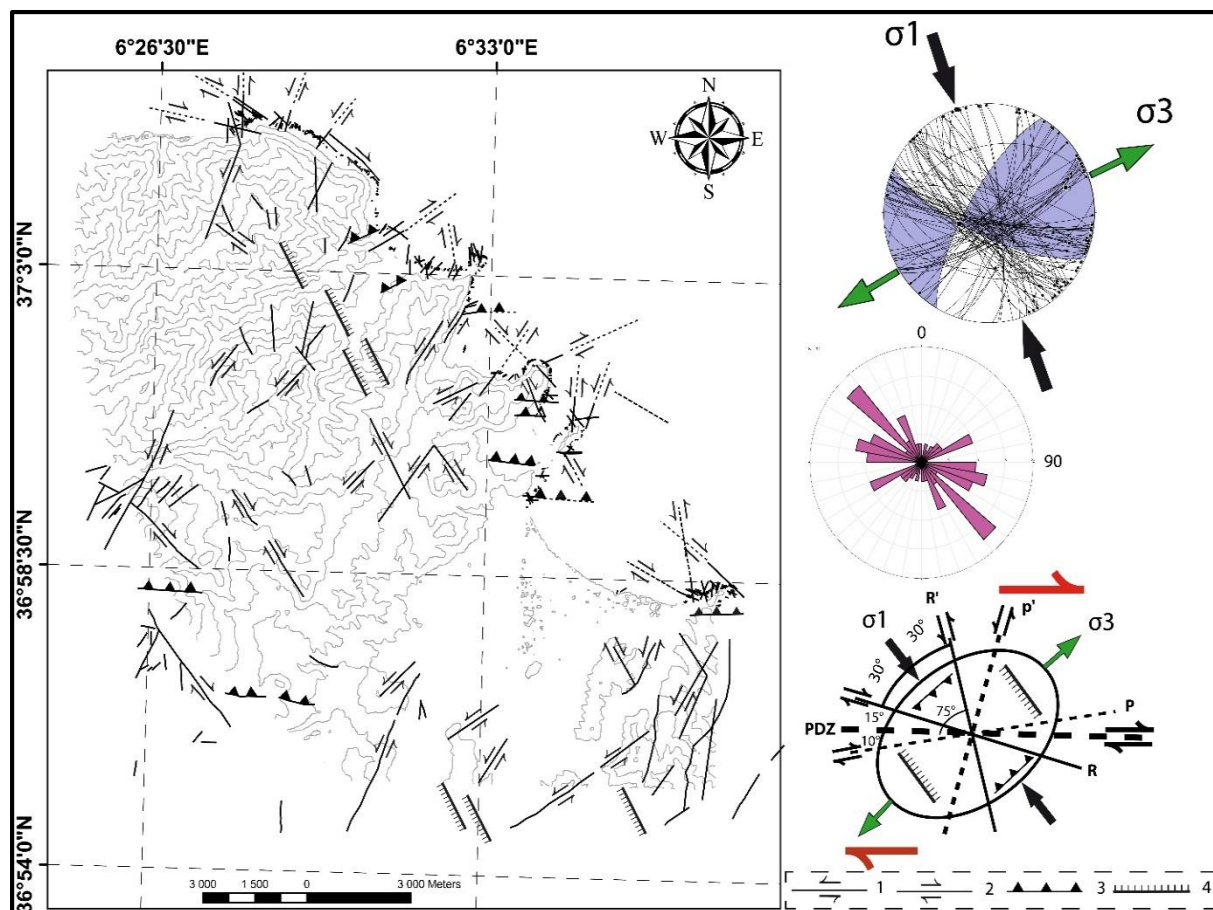
- **La zone côtière de la région de Collo**, où les failles se regroupent en faisceaux parallèles. Elles affectent à la fois les formations sédimentaires, magmatiques et métamorphiques, contribuant à la formation des caps, falaises et plages. Ces structures influencent directement la morphologie du littoral (Fig.IV-8), donnant naissance à des promontoires, des baies et des découpes côtières.
- **L'intérieur de la zone étudiée** se caractérise par une forte densité de fractures affectant les unités métamorphiques et plutoniques (Fig.qIV-8). Cette fracturation est associée à des mouvements de soulèvement et de subsidence qui modèlent le relief, générant montagnes, collines et lignes de crête.

#### IV.7.3 Projection stéréographique : contraintes principales et régime tectonique

La projection de l'ensemble des failles observées dans la région de Collo révèle l'existence de trois directions principales de fractures :

1. Les failles orientées **NW-SE** (environ **N130° à N150°**) sont les plus abondantes. Elles s'associent fréquemment à un régime de **décrochement dextre** et témoignent d'un contexte transpressif.
2. Les failles orientées **NNW-SSE** (environ **N160° à N170°**) correspondent principalement à des failles normales. Elles sont pratiquement parallèles à la contrainte principale et perpendiculaires à la direction d'extension, comme le montre clairement leur position dans le cône de projection stéréographique.

3. Les failles orientées NE-SW (environ  $N30^\circ$  à  $N60^\circ$ ) sont moins fréquentes et plus dispersées. Certaines présentent un rejet inverse et traduisent un décrochement senestre.



**Figure IV-9:** Application du modèle structural de Reidel aux failles identifiées dans la région de Collo.

(1) décrochement senestre ; (2) décrochement dextre ; (3) faille inverse ; (4) faille normale.

4. Les failles **E-O** (autour de  $N90^\circ \pm 10^\circ$ ) sont moins nombreuses mais bien marquées, en particulier dans les parties sud et centrale du massif. Elles pourraient résulter soit d'un régime compressif **N-S**, soit de contraintes locales causées par des mouvements obliques entre blocs.

- **L'analyse des stries et des failles permet d'identifier :**
- **Le vecteur de contrainte principale maximale globale ( $\sigma_1$ )**, orienté globalement vers le Nord-Nord-Ouest (NNW), symbolisé par les flèches noires.
- **Le vecteur de contrainte minimale ( $\sigma_3$ )**, représentant la direction d'extension, dirigé vers le Nord-Est (NE), indiqué par les flèches vertes.

Cette configuration traduit un régime compressif à composante décrochante, caractéristique d'un contexte transpressif. Ce type de régime, dans lequel coexistent compression et

cisaillement, correspond à un mouvement dextre régional, comme déjà décrit par **Maghraoui (1988)**.

#### IV.7.4 Modèle de Riedel : architecture cinématique du cisaillement

Le **modèle de Riedel** (Ahlgren, 2001; Riedel, 1929; Tchalenko, 1968), fournit une interprétation structurale détaillée de la cinématique du système de failles observé dans la région de Collo (Fig. 8). Ce modèle, bien établi en tectonique des zones de cisaillement, repose sur les principes du cisaillement simple et permet de reconnaître l'organisation géométrique des failles secondaires autour d'une zone de cisaillement principale (Principal Displacement Zone, PDZ).

##### -Les éléments structuraux du modèle

Dans un régime de cisaillement dextre, les éléments suivants sont typiquement identifiés :

- **Failles R (Riedel)** : orientées à  $\sim 15^\circ$  de la PDZ, obliques et concordantes avec le sens du cisaillement principal (dextre). Ce sont généralement les premières failles à apparaître, marquant le début de la localisation de la déformation.
- **Failles R' (Riedel inverses)** : également obliques mais à  $\sim 75^\circ$  de la PDZ, discordantes par rapport au cisaillement principal (senestre). Elles apparaissent plus tardivement et reflètent des ajustements secondaires au sein du champ de contrainte.
- **Failles P** : orientées à  $\sim 10^\circ$  de la PDZ dans le même sens que les failles principales, elles traduisent une coalescence des failles R vers un couplage plus concentré de la déformation dans la PDZ. Elles peuvent annoncer la formation d'une faille principale continue.
- **Failles P'** : parfois présentes, elles sont symétriques des failles P mais du côté opposé, traduisant des ajustements locaux dans des contextes de cisaillement moins uniforme en mouvement senestre.
- **Faille inverse** : Orientée perpendiculairement à la contrainte principale  $\sigma_1$ , elle traduit un soulèvement du terrain, en accord avec le modèle de Reidel.
- **Faille normale** : Parallèle à la contrainte principale  $\sigma_1$ , elle reflète une extension à l'échelle de la région de Collo, conforme au modèle de Reidel.

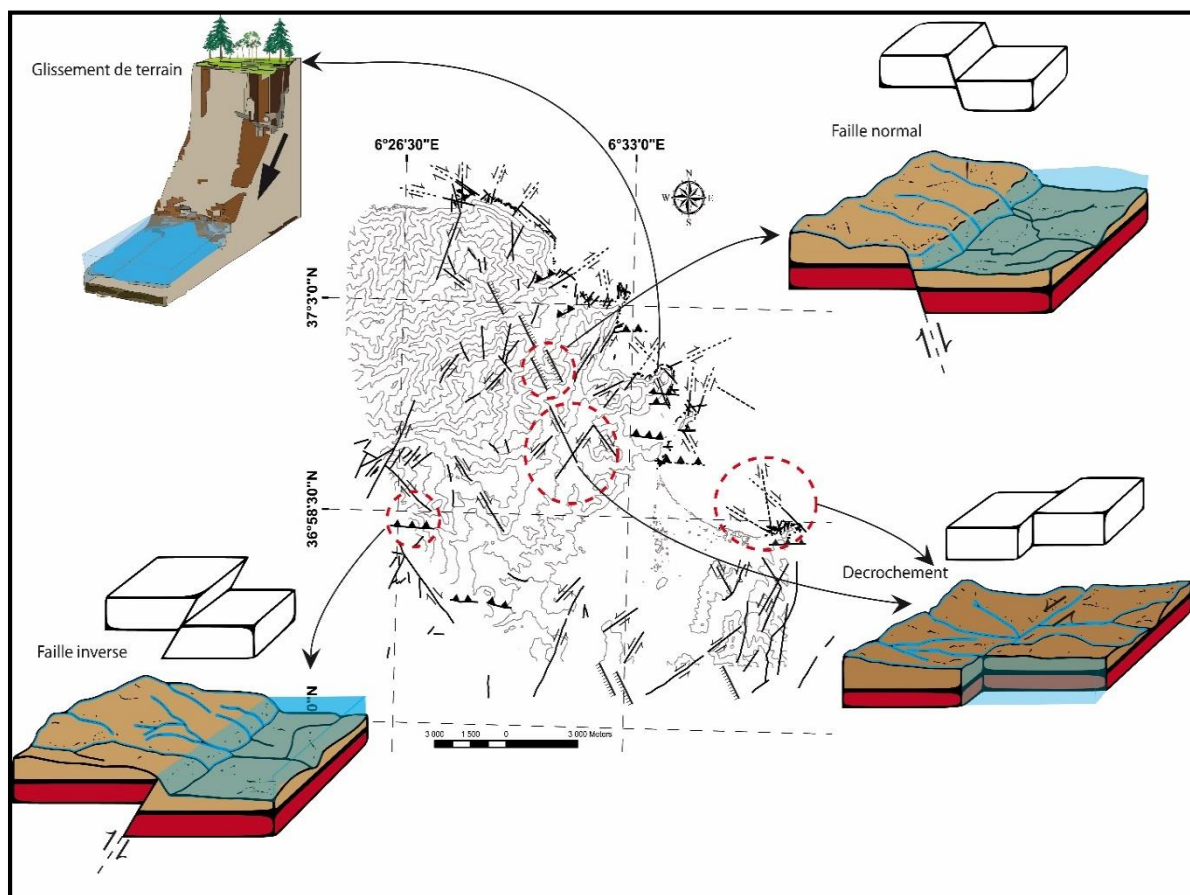
##### -Cinématique et interprétation géodynamique

La configuration observée dans le modèle avec des failles R et P bien représentées indique clairement un cisaillement dextre dominant des failles orientées NW-SE et senestre pour les failles orientées NE-SW et NNE-SSW, ce qui confirme les observations faites dans la projection stéréographique. Cette cinématique est interprétée comme étant la conséquence directe du mouvement relatif entre la plaque africaine et le microcontinent AlKaPeCa, dans lequel s'insère le bloc Kabylide.

Le mouvement antihoraire de la plaque africaine, en réponse à la convergence avec l'Eurasie, a provoqué une convergence oblique et un cisaillement latéral droit le long de la bordure nord-africaine. Ce régime transpressif a favorisé la genèse de ce système de failles caractéristique du cisaillement simple Dextre.

#### IV.8 Impact de la géodynamique méditerranéenne sur la morphogenèse côtière de Collo (Nord-Est algérien)

A la jonction entre la chaîne des Kabylies et le bassin algéro-provençal se situe la région de Collo (Arab et al., 2016; J. Bouillin, 1986; Durand-Delga, 1980; Frizon de Lamotte et al., 2000; Leprêtre et al., 2018; Medaouri et al., 2014; Seffari et al., 2023), constitue un laboratoire naturel exceptionnel pour observer l'interaction entre tectonique active, géodynamique régionale et évolution du littoral. L'analyse structurale combinée à l'observation morphologique met en lumière l'impact majeur de la tectonique des plaques sur la morphogenèse côtière, dans un contexte marqué par la convergence oblique entre la plaque africaine et les blocs dérivés de l'AlKaPeCa (Alboran ; Kabylie ; Calabre ; Péloritaine).



**Figure IV-10:** Différents régimes de déformation identifiés dans la région de Collo : failles normales, inverses, décrochements et glissements de terrain.

### IV.8.1 Structures tectoniques majeures identifiées

L'interprétation de la figure structurale révèle une grande diversité de failles anciennes et actives affectant la région de Collo, réparties en trois grands types : failles normales, failles inverses, et décrochements (Fig.IV- 9). Les orientations prédominantes NE–SW, NW–SE et parfois E–W et N-S reflètent une cinématique complexe dominée par une tectonique transpressive, où les mouvements de compression et de cisaillement coexistent. Les failles inverses soulèvent localement les terrains, formant des structures en relief accentué, tandis que les failles normales peuvent être associées à des affaissements ou à des glissements de terrain. Les décrochements, segmentent et décalent les compartiments rocheux et les drainages, contribuant à une fragmentation du paysage côtier.

### IV.8.2 Héritage de la convergence Afrique–AlKaPeCa

Le style tectonique de la région s'inscrit dans l'histoire géodynamique récente de la Méditerranée occidentale (Seffari, 2023; Seffari et al., 2023). Au cours du Cénozoïque et Quaternaire, la convergence entre la plaque africaine et le micro-bloc de la petite kabylie issus de la fragmentation de l'arc AlKaPeCa a conduit à des épisodes successifs de collision, de subduction et d'ouverture arrière-arc (Arab et al., 2016; Bosch et al., 2014; Bruguier et al., 2017; Fernandez et al., 2016; Ouabadi, 1994; Seffari et al., 2023). L'exhumation des unités kabyles, le retrait de la lithosphère européenne et l'ouverture du bassin algéro-provençal au Miocène sont autant de processus qui ont contribué à la mise en place du contexte actuel.

Aujourd'hui, la région de Collo continue de subir les effets d'un régime tectonique collisionnel actif, où la compression continue induit la réactivation de failles anciennes, certaines d'origine alpin. La cinématique actuelle reste dominée par des contraintes NNW–SSE à NW–SE, responsables des structures transpressives observées.

### IV.8.3 Conclusion : une tectonique qui façonne le trait de côte

Les conséquences morphologiques de cette tectonique sont spectaculaires le long du littoral de Collo. Les caps rocheux, les falaises, les baies étroites, et même certains glissements de terrain (voir Figure. IV-6) observés dans la région témoignent d'une morphogenèse directement contrôlée par les structures actives (Fig.IV-9). Les failles inverses sont responsables du soulèvement de reliefs côtiers (formation de caps), alors que les failles normales expliquent localement des affaissements qui favorisent la formation de criques et de baies (Fig.IV-9). Quant aux décrochements, ils induisent des ruptures linéaires dans le tracé du littoral, créant des côtes en baïonnette, typiques des contextes de cisaillement (Fig.IV-9).

De plus, ces structures influencent le réseau hydrographique, l'érosion différentielle des roches, et la localisation préférentielle des glissements de terrain, accentuant la dynamique évolutive du littoral. Le relief côtier actuel apparaît donc comme une empreinte morphologique des déformations profondes.

A la fin, La région de Collo incarne un exemple remarquable d'interaction entre géodynamique profonde, tectonique active et évolution côtière. Le modèle morphostructural présenté dans cette étude illustre comment la convergence des plaques dans la Méditerranée occidentale continue d'influencer, aujourd'hui encore, la géomorphologie du littoral. Dans ce contexte, toute étude de la stabilité côtière, de l'aménagement du territoire ou des risques naturels doit intégrer cette dimension tectonique essentielle.

*Chapitre V*  
*Analyse des événements extrêmes*

### V.1 Introduction

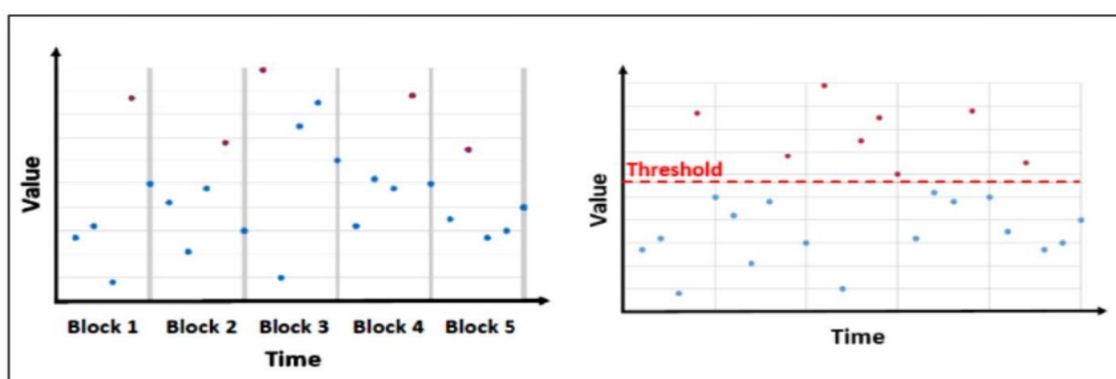
La prévision précise de l'érosion affectant le littoral repose sur une analyse fine des contraintes environnementales extrêmes susceptibles d'agir sur les structures côtières. Les modèles d'évolution du trait de côte s'inscrivent souvent dans une perspective à long terme, visant à anticiper les effets d'événements rares sur des échelles de temps pluri-décennales ou centennales. Dans ce cadre, l'identification et la quantification des forçages extrêmes sont essentielles pour garantir la fiabilité des projections. Les données concernant les houles ont été extraites de la source Copernicus marine service. La théorie des valeurs extrêmes offre un cadre méthodologique robuste pour appréhender ces phénomènes rares, mais déterminants, dans la dynamique érosive des littoraux rocheux. L'usage pertinent de ces outils statistiques permet ainsi d'améliorer l'évaluation des aléas côtiers et de renforcer les stratégies de gestion durable des zones littorales exposées.

### V.2 Analyse des événements extrêmes

Les résultats ont été obtenus dans le cadre de la théorie des valeurs extrêmes.

#### V.2.1 Théorie des valeurs extrêmes

La théorie des valeurs extrêmes (TVE) constitue un cadre statistique fondamental pour l'analyse des événements rares, souvent absents des données ordinaires, mais aux conséquences potentiellement majeures. Elle vise à décrire le comportement asymptotique des maxima (ou minima) d'une série de variables aléatoires, en s'appuyant sur des théorèmes de convergence tels que celui de Fisher-Tippett-Gnedenko. Deux approches principales en découlent : celle des *maxima par blocs*, qui sélectionne la valeur extrême dans chaque sous-ensemble temporel (par exemple, annuelle ou mensuelle), et la méthode des *dépassements de seuil*, ou *Peaks Over Threshold* (POT), qui se concentre sur les observations excédant un niveau critique. Dans les deux cas, des lois spécifiques telles que la distribution GEV (Generalized Extreme Value) ou la loi GPD (Generalized Pareto Distribution) sont utilisées pour ajuster les queues de distribution. Ces outils permettent d'estimer des quantiles rares ou des périodes de retour, indispensables à la prévision de phénomènes extrêmes, notamment dans les contextes de risques naturels ou de dynamique côtière. Malgré les limites liées à l'extrapolation sur de faibles effectifs, la TVE reste aujourd'hui l'une des rares méthodes théoriquement fondées pour quantifier les aléas extrêmes à long terme (Roncalli, 2002).

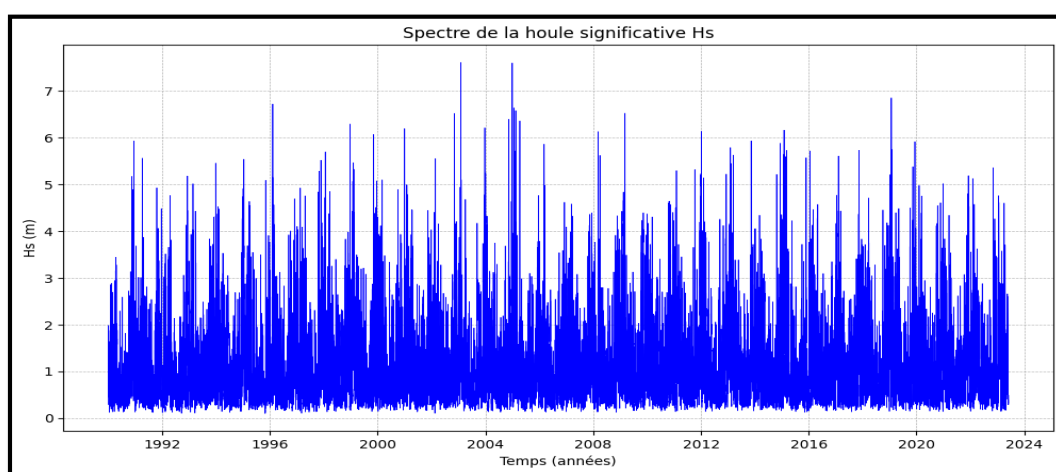


**Figure V-1:** Schéma représentatif des méthodes blocks maxima et POT

L'approche par blocs maximaux présente une limite importante : elle ne retient qu'un seul maximum par bloc temporel, ce qui peut entraîner une perte d'informations significatives. Par exemple, si plusieurs valeurs extrêmes surviennent dans un même intervalle, seule la plus élevée est conservée, les autres étant ignorées. À l'inverse, la méthode POT (Peaks Over Threshold) permet de surmonter cette limitation en tenant compte de toutes les valeurs excédant un seuil défini (Stander, 2015)

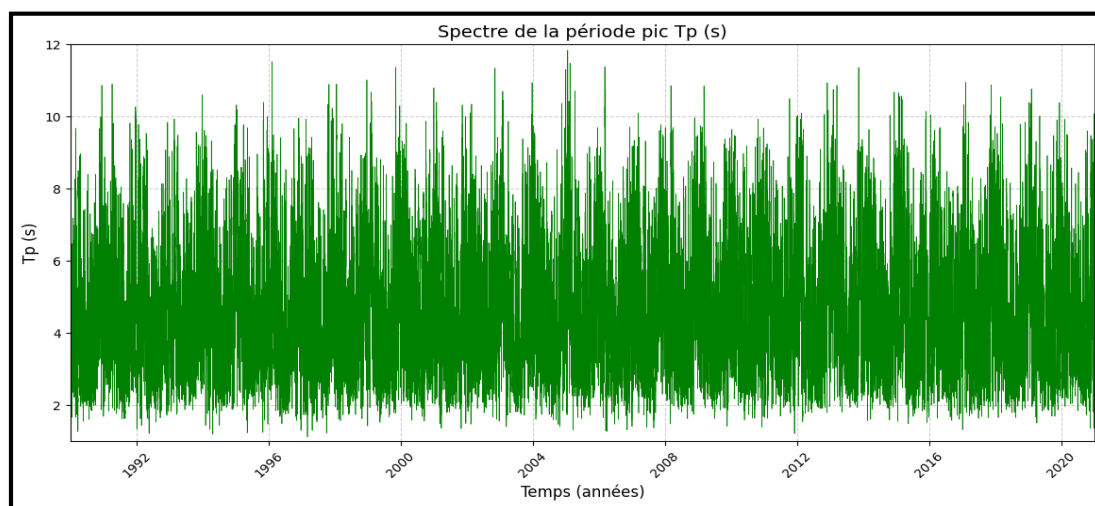
### V.2.2 Hauteur significative

L'analyse de la série d'enregistrement des hauteurs significatives de la houle ( $H_s$ ) sur la période s'étalant de 1990 à 2023 révèle une forte variabilité, avec des valeurs allant de **7.608 m** à **0.099 m**, avec une moyenne de **1.119 m**.



**Figure V-2:** Représentation du spectre des hauteurs de houle enregistrées.

### V.2.3 Période de pic



**Figure V-3 :** Représentation du spectre des périodes de houle enregistrées.

### V.3 Méthode Peaks Over Threshold (POT)

Selon Tilbi et Gherda (2018), la méthode POT repose sur l'approximation de la distribution des excès au-delà d'un certain seuil, en s'appuyant sur la loi de Pareto généralisée. Elle présente un avantage par rapport à la méthode des blocs, car il est généralement plus simple d'obtenir un échantillon d'excès que d'extrêmes (valeurs maximales).

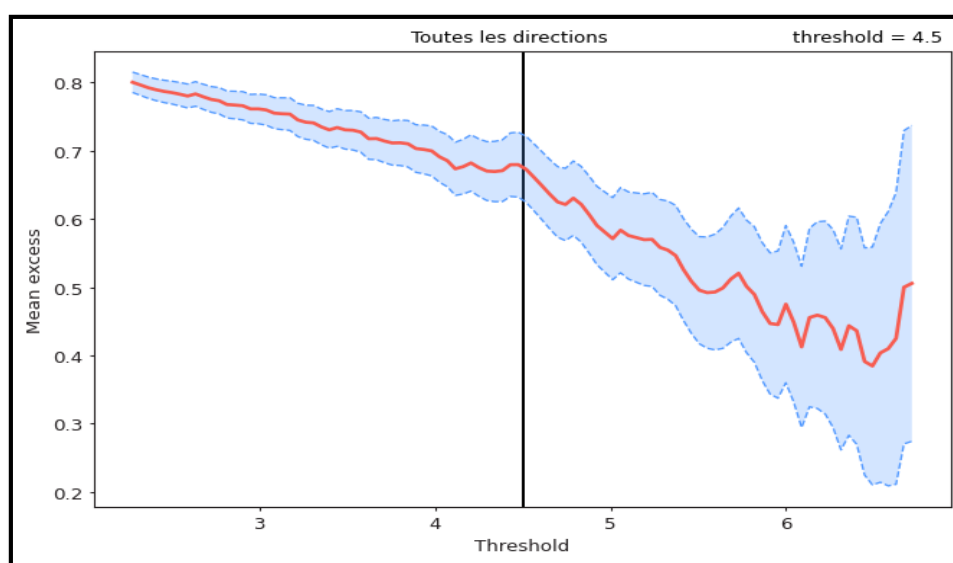
En pratique, au lieu de fixer arbitrairement le seuil  $u$ , on utilise  $X(n-k+1, n)$ , qui correspond à la  $k$ -ième plus grande valeur de l'échantillon. La méthode se déroule en deux étapes principales :

1. Soit  $X_1, \dots, X_n$  un échantillon de données. On choisit un seuil  $u$ , et on note  $N_u$  le nombre de valeurs qui dépassent ce seuil.
2. On considère alors les excès au-dessus du seuil  $u$ , soit  $Y_1, \dots, Y_{N_u}$ , et on étudie leur distribution conditionnelle définie par :

#### Équation V-1

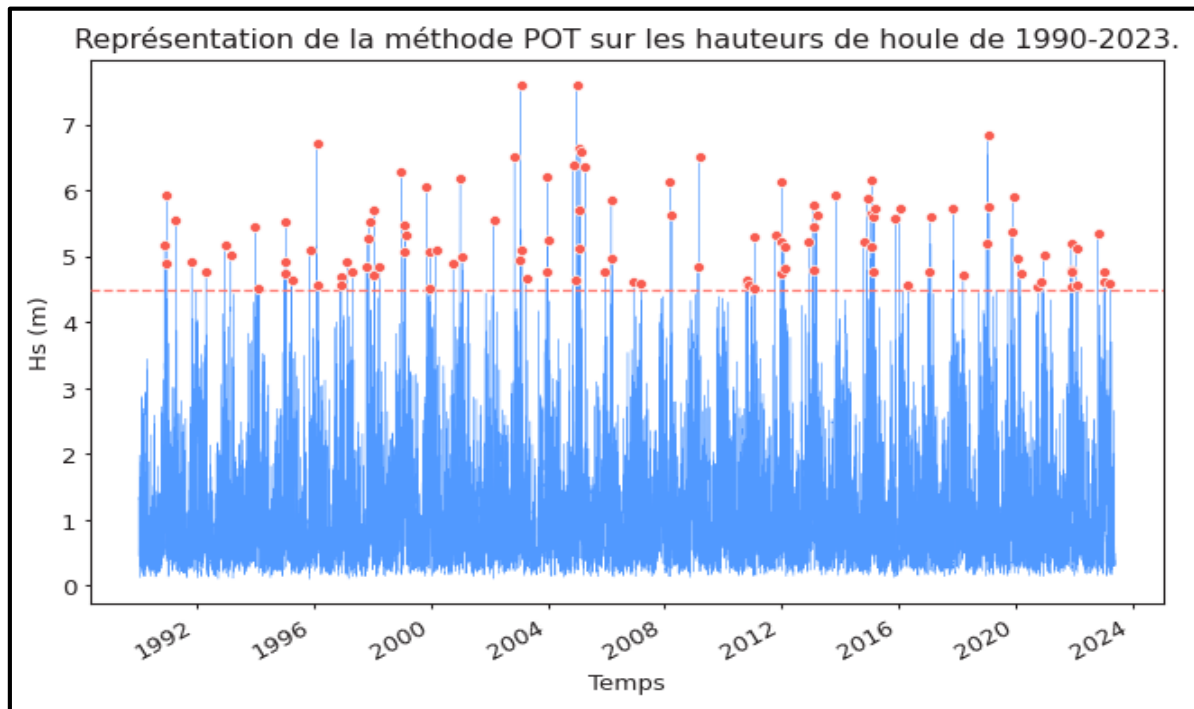
$$F_u(x) = \Pr(X - u \leq x | X > u) = \frac{F(x + u) - F(u)}{1 - F(u)}$$

Avant de choisir le seuil  $u$ , on a d'abord analysé la moyenne résiduelle à l'aide du langage Python, en utilisant la bibliothèque pyextreme. Cette étape permet d'observer comment la moyenne résiduelle évolue en fonction du seuil, afin de sélectionner la valeur la plus appropriée. Le seuil optimal se situe généralement sur la portion linéaire du graphique, avant que la moyenne résiduelle ne commence à fluctuer (Tilbi & Gherda, 2018). Le seuil finalement retenu est 4.5 m, comme illustré dans la Figure V-04.



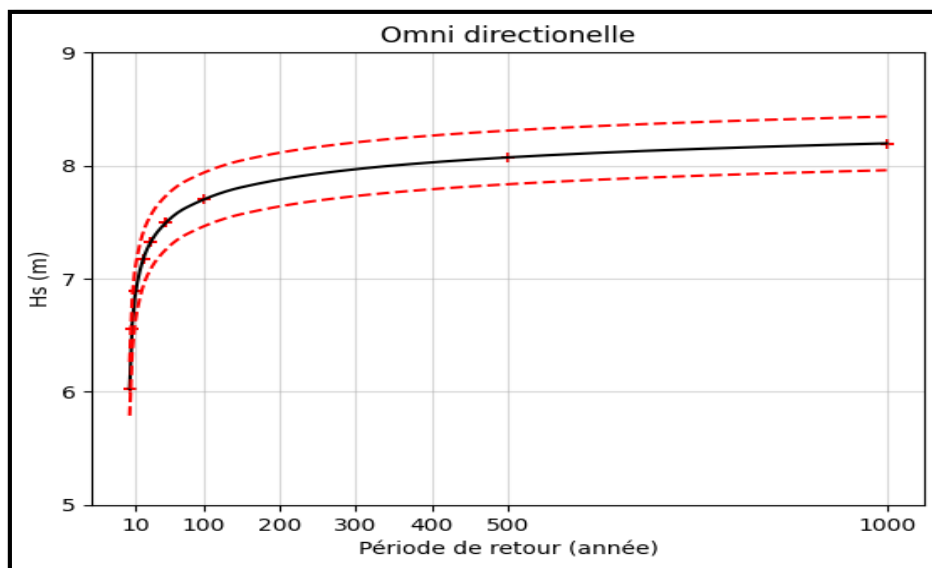
**Figure V-4:** Moyenne des excès de la série des hauteurs Omnidirectionnelle de l'enregistrement.

La sélection des points inclus dans les calculs est représentée graphiquement dans la figure ci-dessous :



**Figure V-5 :** Représentation des événements extrêmes sur les hauteurs de houle de 1990 – 2023.

Après avoir sélectionné les valeurs extrêmes, l'estimation des hauteurs de houle correspondant à différentes périodes de retour a été réalisée à l'aide de la bibliothèque pyextreme en Python, spécifiquement conçue pour l'application de la théorie des valeurs extrêmes. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :



**Figure V-06 :** Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour omnidirectionnel.

Les résultats figurant dans le graphique (Fig V-06) sont accompagnés de lignes rouges indiquant les intervalles de confiance à 95 %, correspondant à une marge d'erreur de  $\pm 5$  %. Les hauteurs de houle estimées pour des périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1000 ans y sont représentées par des croix rouges.

La même approche, fondée sur la théorie des valeurs extrêmes, sera utilisée pour les autres directions. Les résultats correspondants seront présentés dans la section suivante.

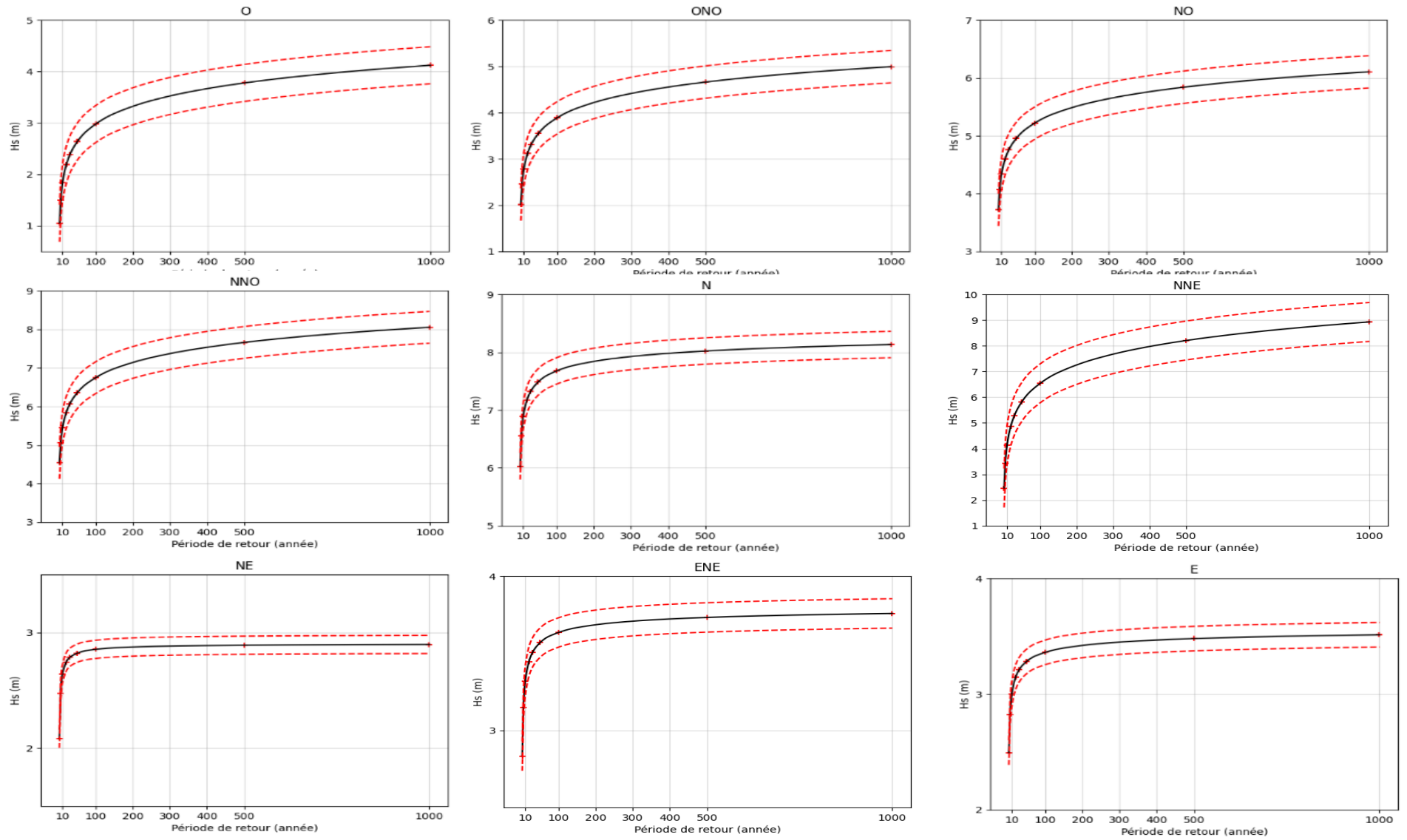


Figure V-6 : Estimation des événements extrêmes via la méthode POT pour chaque direction

Afin de faciliter l'interprétation des résultats obtenus par la méthode POT, un tableau récapitulatif est présenté ci-dessous. Il regroupe les différentes hauteurs de houle extrêmes estimées, en les associant à leurs périodes de retour respectives, lesquelles traduisent la probabilité d'occurrence future de ces événements extrêmes.

**Tableau V-1 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenu par la méthode POT.**

POT										
Période de retour (année)	Hauteur de vague par direction (mètre)									
	O	ONO	NO	NNO	N	NNE	NE	ENE	E	Toutes les directions
2	1.04	2.01	3.71	4.53	6.02	2.46	2.08	2.83	2.49	6.02
5	1.49	2.45	4.06	5.05	6.56	3.41	2.47	3.14	2.81	6.55
10	1.84	2.78	4.33	5.44	6.89	4.14	2.64	3.31	3.00	6.88
20	2.18	3.11	4.60	5.83	7.17	4.86	2.74	3.44	3.14	7.17
30	2.38	3.31	4.75	6.06	7.31	5.28	2.78	3.50	3.21	7.32
50	2.63	3.55	4.95	6.35	7.48	5.81	2.82	3.56	3.28	7.49
100	2.98	3.88	5.21	6.74	7.67	6.53	2.85	3.63	3.35	7.69
500	3.77	4.65	5.83	7.65	8.02	8.20	2.88	3.73	3.47	8.07
1000	4.12	4.99	6.10	8.05	8.13	8.92	2.89	3.75	3.51	8.19
seuil fixé pour chaque direction	1.0	1.9	3.1	3.5	4.5	2.0	1.9	2.2	1.9	4.5

L'analyse du tableau V-1, qui présente les hauteurs de houle extrêmes estimées par la méthode POT, met en évidence la répartition directionnelle de ces événements maritimes. Il apparaît que le secteur Nord-Est est le moins pénalisant, avec des vagues de plus faible intensité. En revanche, les directions **Nord-Nord-Est**, **Nord** et **Nord-Nord-Ouest** se révèlent les plus pénalisantes avec des houles extrêmes de grande amplitude qui peuvent atteindre **8.92**, **8.13** et **8.05m** respectivement. Par ailleurs, l'analyse omnidirectionnelle qui intègre l'ensemble des données sans distinction de direction, aboutit logiquement à des hauteurs très élevées. Cela s'explique par le fait que le modèle prend en compte les maxima issus des séries temporelles, quelle que soit leur direction d'origine.

#### V.4 Conclusion

En conclusion, cette analyse des événements extrêmes en milieu maritime a permis de caractériser les probabilités d'occurrence des phénomènes hydrodynamiques exceptionnels et de modéliser leurs distributions statistiques.

Il ressort que les directions de houle **Nord-Nord-Est**, **Nord** et **Nord-Nord-Ouest** présentent, dans cet ordre, les niveaux de risque les plus élevés en matière de formation de houles extrêmes de forte amplitude.

Toutefois, des efforts supplémentaires demeurent nécessaires pour affiner les méthodes d'estimation et de modélisation, en vue d'améliorer la fiabilité de l'évaluation des risques liés à ces événements dans les environnements côtiers sensibles

***Chapitre VI***  
***Modélisation hydrodynamique***

## VI.1 Introduction

La modélisation numérique des environnements marins est un outil indispensable pour comprendre et anticiper l'évolution du trait de côte. En simulant avec précision les variations du niveau marin, les régimes de courants et l'ensemble des processus hydrodynamiques en zones littorales, ces modèles permettent de reproduire fidèlement les dynamiques côtières à différentes échelles temporelles. Ils offrent une base solide pour évaluer les impacts potentiels des phénomènes marins extrêmes sur le recul du rivage et projeter les évolutions possibles de la ligne de côte. En ce sens, ils constituent un levier stratégique pour appuyer la planification et la gestion durable du littoral, notamment dans les secteurs exposés aux risques d'érosion.

Il existe une grande variété de logiciels de modélisation numérique développés par des institutions académiques et privées pour la simulation des environnements marins ; parmi ces outils, le modèle MIKE 21 a été retenu dans le cadre de cette étude en raison de ses capacités à représenter de manière fiable les processus hydrodynamiques côtiers.

## VI.2 Présentation du modèle

**MIKE 21** est un logiciel avancé de modélisation destiné à la simulation et à l'analyse des écoulements, des courants, des conditions de houle et des processus en milieux marins et côtiers. Grâce à des outils de visualisation performants et à des fonctions efficaces de gestion des données, il permet aux utilisateurs d'interpréter les résultats de simulation de manière optimale.

Largement adopté par les ingénieurs, scientifiques et professionnels de l'environnement, MIKE 21 est utilisé dans des domaines tels que l'ingénierie côtière, la gestion des ressources en eau, l'évaluation des impacts environnementaux et la planification de l'adaptation au changement climatique.

Spécialisé dans la modélisation bidimensionnelle (2D), MIKE 21 permet des simulations précises des écoulements et des mouvements d'eau dans les zones côtières, les estuaires et les rivières. Il permet de prévoir avec exactitude les niveaux d'eau, les courants, les variations de température et les risques d'inondation, tout en offrant une grande capacité à gérer des bathymétries complexes et des forçages externes tels que le vent. (DHI, n.d.)

Toutefois, la mise en œuvre de ces simulations numériques nécessite au préalable la génération d'un maillage adapté du domaine d'étude. À cette fin, l'interface de maillage (Mesh Generator) de la plateforme logicielle Mike-Zéro a été employée.

### VI.2.1 Mesh Generator

Selon **DHI (2012)**, le générateur de maillage MIKE Zéro est un outil développé par DHI permettant de créer et de gérer des maillages numériques pour les simulations hydrodynamiques et de vagues. Il offre aux utilisateurs la possibilité de définir des domaines de modélisation en numérisant ou en important des données de rivage et de frontières, puis de générer des maillages structurés ou non structurés composés d'éléments triangulaires ou quadrangulaires. L'outil prend en charge l'intégration de données bathymétriques par

interpolation de points dispersés (données « scatter ») et permet d'affiner la résolution du maillage dans des zones spécifiques à l'aide de polygones ou de lignes de rupture. Il dispose de fonctionnalités intégrées pour lisser le maillage, analyser la qualité des éléments et ajuster les propriétés du maillage afin d'optimiser la précision des simulations et l'efficacité du calcul. Les fichiers de maillage créés par l'outil sont des fichiers texte contenant les informations sur les nœuds, les éléments, la bathymétrie et les codes de frontière. Le générateur de maillage constitue ainsi un élément central dans la mise en place de modèles numériques fiables dans l'environnement MIKE Zéro.

La création du maillage nécessite de suivre les étapes suivantes :

1. **Créer l'espace de travail** : définir la projection (WGS 84 UTM zone 32N).
2. **Importer les données** : charger les limites du domaine et les données bathymétriques (fichiers XYZ ou C-MAP).
3. **Définir le domaine** : tracer ou importer les contours du modèle (terre et frontières ouvertes) et les fermer correctement.
4. **Générer le maillage** : trianguler le domaine en définissant la résolution souhaitée.
5. **Lisser le maillage** : améliorer la qualité des éléments en réduisant les petits angles.
6. **Analyser le maillage** : vérifier la qualité géométrique et le pas de temps admissible.
7. **Interpoler la bathymétrie** : appliquer les profondeurs sur les nœuds à partir des données.
8. **Exporter et visualiser** : sauvegarder le maillage final et le visualiser pour vérification. DHI (2012).

### VI.2.2 Le module de vague spectrale : Mike 21 SW (Spectral Wave)

Le module MIKE 21 SW – Spectral Waves est un modèle numérique avancé développé par DHI pour simuler la génération, la propagation et la transformation des vagues dues au vent et à la houle, en zones côtières et offshore. Utilisant une formulation spectrale complète ou paramétrique découplée, il prend en compte divers phénomènes physiques comme le déferlement, la friction du fond, l'interaction entre vagues, courants et glace. Grâce à l'utilisation de maillages non structurés et à une grande flexibilité dans la représentation de la bathymétrie, ce module est particulièrement adapté aux études d'ingénierie côtière, à la planification d'infrastructures maritimes et à l'évaluation des conditions de vagues dans des contextes réels et complexes (DHI, 2007).

### VI.2.3 Le module hydrodynamique : Mike 21 HD (Hydrodynamic Module)

Le **module hydrodynamique (HD)** de MIKE 21 est un outil de modélisation numérique avancé développé par DHI pour simuler les variations du niveau d'eau et les écoulements dans des environnements marins, côtiers, estuariens et continentaux. Il repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées de Reynolds en 2D ou 3D, en tenant compte de la bathymétrie, des variations de densité, et d'une variété de forçages externes (vents, marées, précipitations, vagues, etc.). Grâce à son maillage non structuré, il permet une grande flexibilité dans la représentation des géométries complexes. Ce module est utilisé seul ou couplé à d'autres

modules (transport, sédiments, écologie, vagues) pour des applications telles que l'évaluation de l'impact environnemental, la conception d'infrastructures côtières, la modélisation des crues, et la circulation océanographique (DHI, 2007).

### VI.3 Construction du modèle numérique et présentation des résultats

#### VI.3.1 Génération de la Mesh

La génération de la mesh pour la région de Collo s'est appuyée sur des données bathymétriques extraites via le service WCS (Web Coverage Service) d'EMODnet Bathymetry. Une résolution spatiale de 1 km a été choisie pour l'extraction, ce qui est adaptée à une analyse à l'échelle régionale de la zone d'étude. Les données ont été fournies au format GeoTIFF, puis converties en format xyz après projection dans le système de coordonnées UTM zone 32N (EPSG : 32632).

La délimitation de la frontière terre-mer a été définie par la ligne de côte de 2020, extraite sous ArcGIS puis exportée au format CSV. Ce fichier a ensuite été converti en format XYZ afin d'être compatible avec le logiciel.

#### VI.3.2 Mesh et bathymétrie résultante

Le domaine spatial a été discrétisé à l'aide d'un maillage non structuré composé d'éléments triangulaires. Ce maillage comprend environ **10 262 nœuds** et **16 369 éléments**, assurant une représentation fidèle du relief sous-marin.

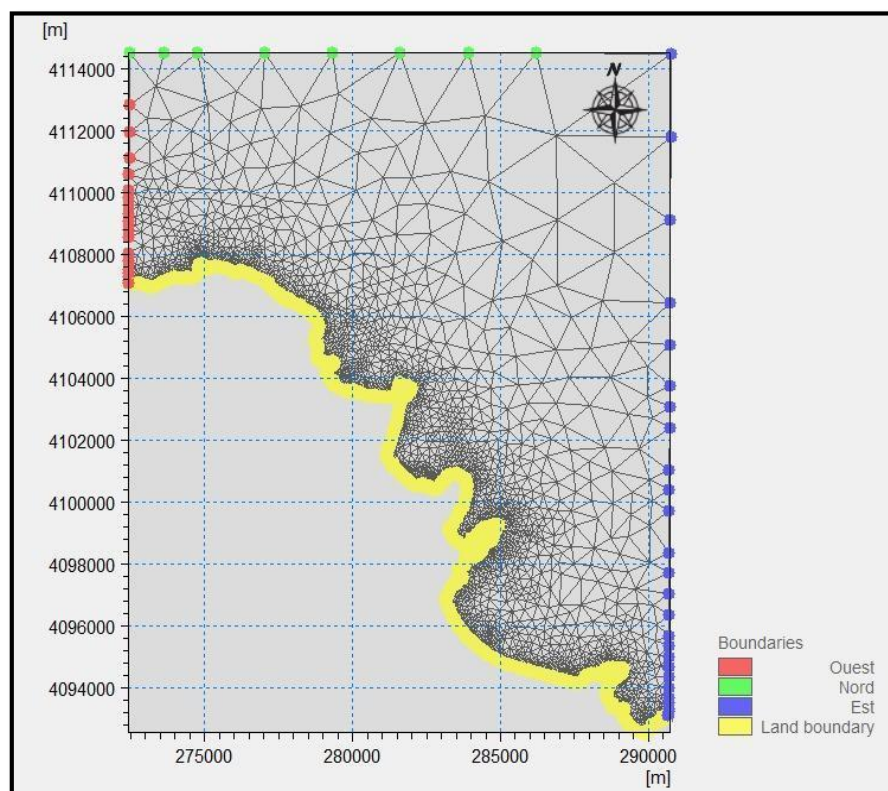
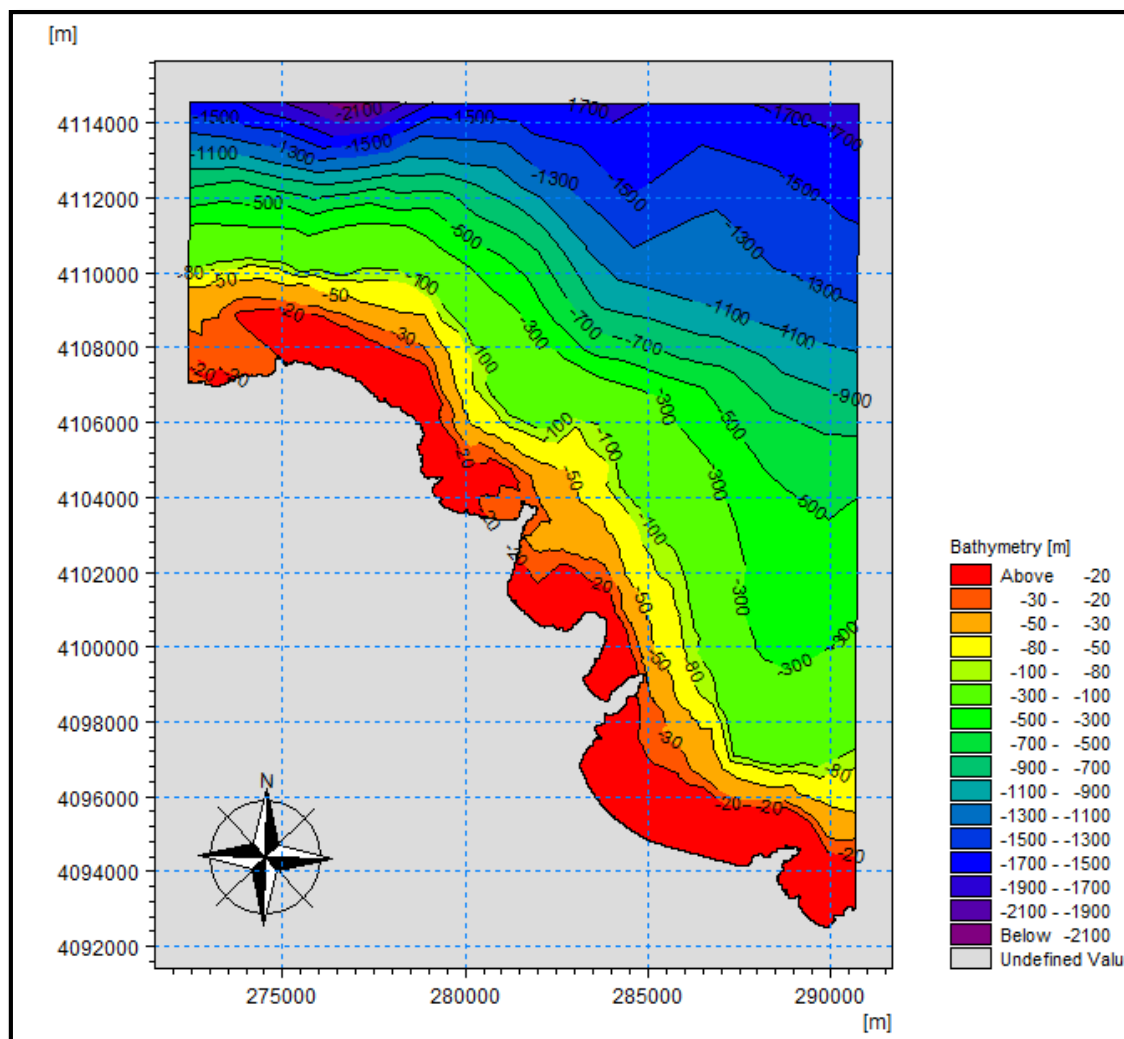


Figure VI-1 : Maillage de la Mesh à l'échelle de la zone d'étude.

Après l'interpolation de la Mesh, on obtient une bathymétrie de la zone, allant jusqu'à la plaine abyssale de la méditerranée.



**Figure VI-2:** Carte bathymétrique de la zone d'étude.

L'analyse de la carte bathymétrique de la zone de Collo met en évidence plusieurs unités morphologiques distinctes, traduisant une grande complexité du relief sous-marin :

### VI.3.2.1 La frange littorale

La zone côtière immédiate se caractérise par une frange littorale étroite, représentée par des teintes rouge à orange vif, correspondant à des profondeurs comprises entre 0 et -50 mètres. Cette bande peu profonde présente un relief irrégulier et accidenté, indiquant une érosion active ou des apports sédimentaires d'origine continentale.

### VI.3.2.2 Le rebord du plateau continental

Au-delà de la frange littorale, on observe une transition nette vers des profondeurs plus importantes, marquée par une pente abrupte entre -50 m et -300 m, représentée par des teintes orange à vert clair. Cette rupture de pente correspond au rebord du plateau continental.

### VI.3.2.3 Les bassins profonds et les dépressions

Plus au large, la carte révèle des zones bathymétriques profondes (inférieures à -300 m), représentées par des teintes vert à violet foncé. Ces zones correspondent à des bassins sous-marins ou dépressions isolées, témoignant d'un modelé disséqué des zones confinées.

### VI.4 Scénarios de simulation

À la suite de l'identification des directions de houle les plus pénalisantes et de la détermination des hauteurs de vagues extrêmes associées à différentes périodes de retour (présentées au chapitre des événements extrêmes), la direction Nord, considérée comme la plus critique, a été retenue pour la simulation. La méthodologie adoptée consiste à associer à cette direction la hauteur significative de houle maximale correspondant aux périodes de retour choisies, à savoir 10 ans, 30 ans et 100 ans.

Période de retour 10					Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Élévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	6.89	11.31	13	359.8	
Période de retour 30					Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Élévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	7.32	10.89	13	359.8	
Période de retour 100					Niveau de la mer
Paramètre de houle	Hs	Tp	U10	U10 direction (°)	NGA = +0.34m Élévation futur = 0 m Totale = 0.34 m
Direction Nord	7.68	10.53	13	359.8	

*Tableau VI-1: Les inputs des simulations pour l'ensemble des périodes de retour (10, 30 et 100 ans) de houle de direction Nord dans la région de Collo.*

VI.5 Résultats des simulations

VI.5.1 Période de retour de 10 ans :

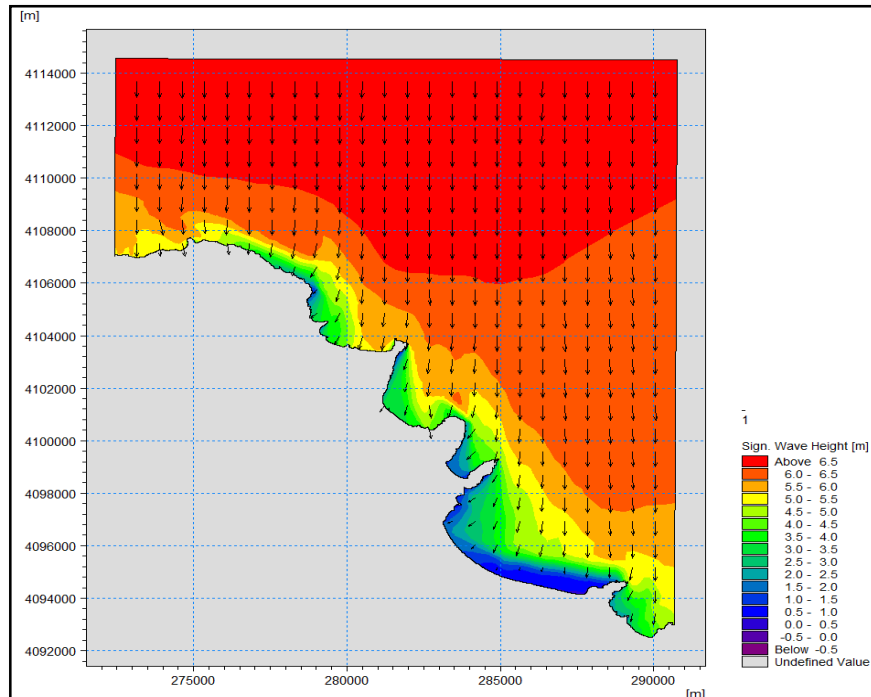


Figure VI-3 : Champs des houles dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 10 ans.

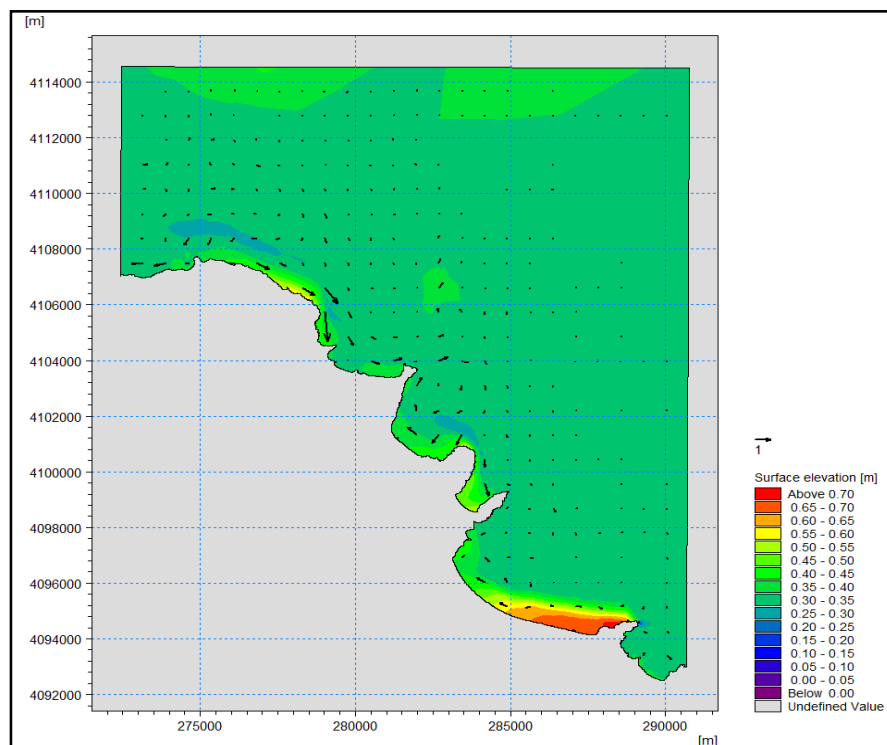


Figure VI-4: Champs des courants dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 10 ans.

VI.5.2 Période de retour de 30 ans :

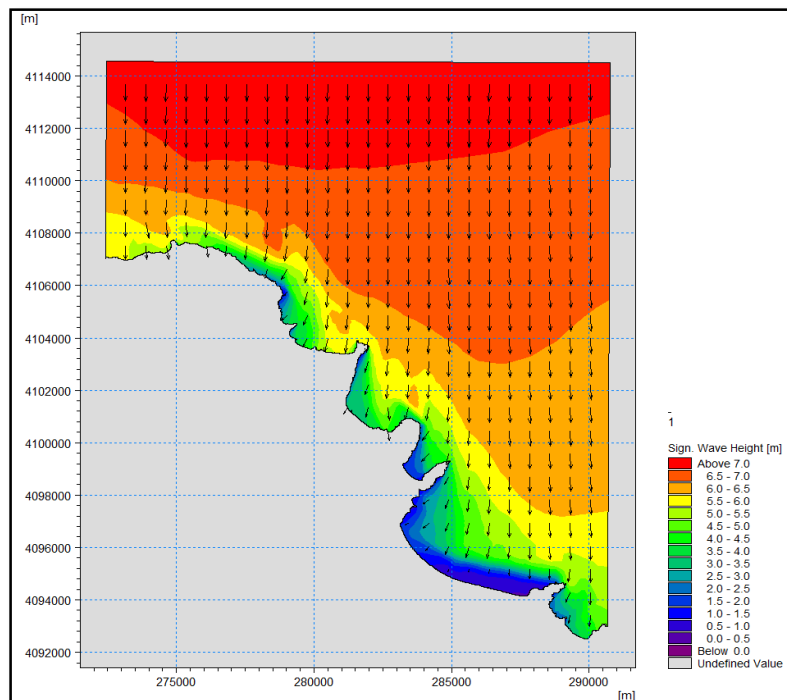


Figure VI-5: Champs des houles dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 30 ans.

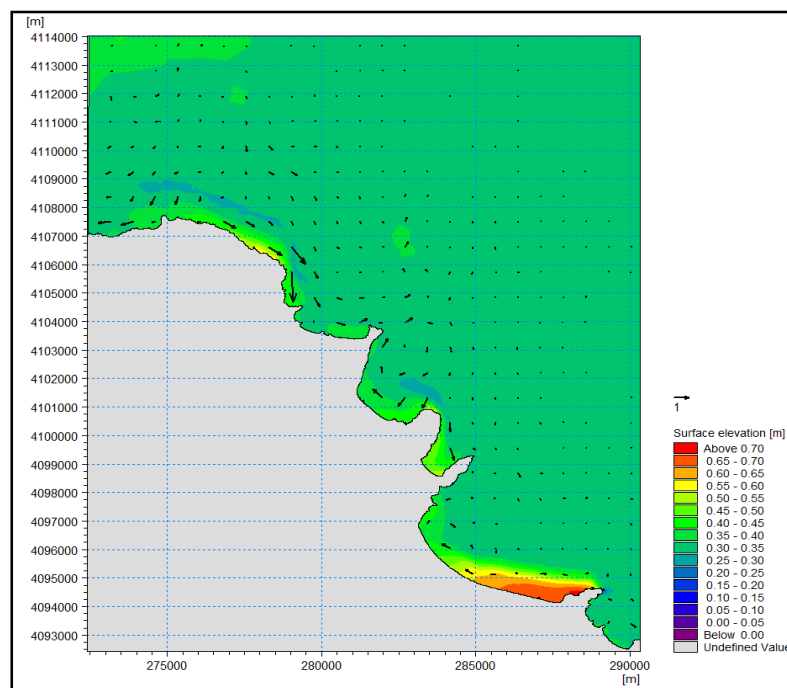


Figure VI-6: Champs des courants dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 30 ans.

VI.5.3 Période de retour de 100 ans :

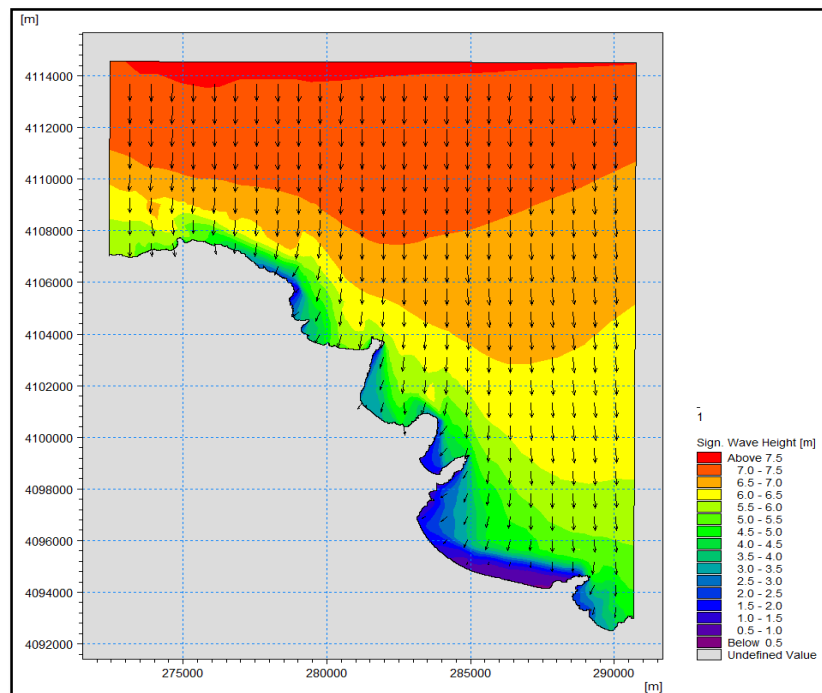


Figure VI-7: Champs des houles dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 100 ans.

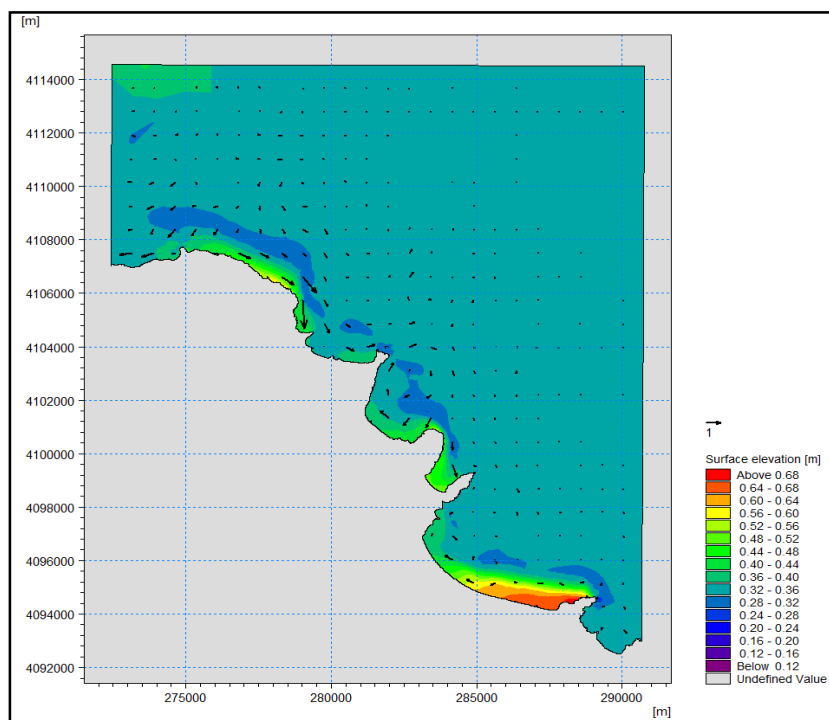


Figure VI-8: Champs des courants dans la région de Collo pour la direction Nord et une période de retour de 100 ans.

### VI.6 Interprétation des résultats

Les résultats des simulations numériques montrent clairement l'évolution de la hauteur significative des vagues et des courants côtiers induits par des événements extrêmes de différentes périodes de retour dans la région de Collo.

Pour une période de retour de 10 ans, la houle atteint une hauteur significative de 3 mètres. Une valeur maximale d'environ 5 mètres est principalement observée au nord-ouest, (côté du Cap Bougaroun et Tamanart. Les vecteurs de courant indiquent une dynamique côtière modérée (Fig VI-04), particulièrement marquée dans la zone nord-ouest (vers cap bougaroun) et sud-est, où les courants présentent une intensité notable. Cette configuration suggère une circulation relativement stable, avec des vitesses de courant moyennes à modérées, reflétant une agitation hydrodynamique normale dans des conditions standards.

Lors d'un événement de période de retour de 30 ans, l'intensité de la houle augmente sensiblement. Les hauteurs significatives peuvent atteindre une valeur d'environ 3,5 mètres, tandis que les hauteurs maximales avoisinent 5,5 mètres, observées au nord-est. Avec le temps, l'augmentation de l'agitation marine induit une accélération progressive des courants côtiers, surtout dans les zones exposées du nord-ouest et sud-est (Fig VI-06). On y observe des vitesses de courant élevées, traduisant une intensification significative de la circulation marine. Cette dynamique est particulièrement marquée dans les zones ouvertes à la houle, révélant une dissipation d'énergie plus importante dans la colonne d'eau.

Enfin, pour une période de retour de 100 ans, on observe les conditions les plus extrêmes. Les hauteurs significatives de houle présentent une valeur intermédiaire d'environ 4,5 mètres, tandis que les valeurs maximales atteignent près de 6 mètres, notamment dans les environs du nord-ouest. Sous l'effet d'une houle exceptionnelle, les courants côtiers deviennent très intenses (Fig VI-08), avec une circulation fortement accélérée au nord-ouest, dans les zones peu profondes et les plus exposées. Ces courants traduisent une dynamique énergétique **puissante**, marquant une mobilisation importante des masses d'eau dans l'environnement côtier.

Globalement, ces résultats mettent en évidence une corrélation directe entre l'intensité de la houle et la vitesse des courants induits, ainsi qu'une vulnérabilité accrue de la zone en raison de l'orientation de la côte et la direction dominante de la houle. Cette tendance à la concentration des énergies marines extrêmes dans cette zone nécessite une attention particulière en matière de gestion du littoral, de protection des infrastructures côtières et de planification urbaine face aux risques hydrodynamiques.

### VI.7 Conclusion

Les simulations numériques réalisées ont mis en évidence des conditions hydrodynamiques particulièrement intenses dans la région de Collo, en particulier lors des événements extrêmes associés à une période de retour centennale. Ces conditions se traduisent par la présence de fortes houles concentrées principalement au nord-ouest de la zone d'étude incluant les secteurs de Cap Bougaroun, Tamanart et celui de Collo, ainsi que de courants côtiers rapides observés surtout dans les parties nord-ouest et sud-est. L'orientation du littoral et la configuration bathymétrique locale favorisent en effet l'amplification des houles incidentes dans ces secteurs.

En effet, les parties sud-est des baies de Tamanart, et de Collo en forme de U, les plus exposées, enregistrent les valeurs maximales des hauteurs de houles de direction nord autour de 6 mètres alors que les parties nord-ouest des mêmes baies semblent être protégées par les caps (voir figure VI-08) qui délimitent ces dernières.

Ces forçages hydrodynamiques extrêmes exercent des pressions importantes sur le littoral, accentuant les phénomènes d'érosion, notamment des formations géologiques constituées de matériaux meubles ou peu consolidés, qui se sont particulièrement vulnérables à l'action combinée des vagues énergétiques et des courants vigoureux. Il apparaît donc essentiel d'intégrer ces conditions extrêmes dans les analyses des risques d'érosion côtière et dans les stratégies de gestion et d'aménagement du littoral de cette zone.

***Chapitre VII***  
***Évolution du trait de côte***

## VII.1 Introduction

L'évolution du trait de côte est un phénomène dynamique influencé par une multitude de facteurs naturels et anthropiques. Cette évolution est intimement liée à la morphologie du littoral, une composante essentielle pour comprendre les changements qui affectent les zones côtières au fil du temps. En effet, la forme et la structure du littoral, qu'elles soient rocheuses ou sableuses, déterminent en grande partie la position et le comportement du trait de côte, notamment en ce qui concerne les processus d'érosion, d'accumulation et les interactions avec les conditions climatiques et maritimes.

L'objectif de ce travail est d'analyser l'évolution spatio-temporelle du trait de côte en s'appuyant sur des données satellitaires et des outils de traitement géospatiaux avancés. À travers une approche méthodologique rigoureuse, il s'agit d'identifier les zones en érosion, en accrétion ou en stabilité, et de mieux comprendre les dynamiques côtières qui façonnent le littoral au fil du temps.

## VII.2 Méthodologie de travail

### VII.2.1 Collecte des données

L'évaluation de la dynamique du trait de côte a été réalisée, sur une période allant de 1990 à 2024.

Les lignes de rivage ont été extraites à partir des données satellitaires multi-sources : images Landsat 5, Landsat 7 et Landsat 8 (1990–2015) et Sentinel-2 (2017–2024) avec des résolutions spatiales de 10, 15 et 30 mètres. (Tableau VII-01)

Les 14 images satellitaires ont été téléchargées à partir de la plateforme Google Earth Engine pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Les produits utilisés sont des images de réflectance de surface (niveau L2), corrigées radiométriquement et géométriquement, et géoréférencées par défaut selon le système de coordonnées WGS 84 (EPSG : 4326). Un filtre a été appliqué pour ne conserver que les images présentant un taux de couverture nuageuse inférieur ou égal à 10 %. Afin d'obtenir une image représentative pour chaque période, une composition basée sur la médiane des images filtrées a été générée.

**Tableau VII-1 : Satellites, capteurs et résolutions spatiales des images téléchargées.**

<b>Date</b>	<b>Satellite</b>	<b>Sensor ID</b>	<b>Résolution spatiale</b>
1990	Landsat 5	TM (Thematic Mapper)	30 m
1995	Landsat 5	TM (Thematic Mapper)	30 m
2000	Landsat 7	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	15 m
2005	Landsat 7	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	15 m
2010	Landsat 7	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	15 m
2015	Landsat 8	OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor)	15 m
2017	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m
2018	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m
2019	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m
2020	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m
2021	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m
2022	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m
2023	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m
2024	Sentinel-2	MSI (MultiSpectral Instrument)	10 m

## VII.2.2 Outils de traitement

### 3.2.1. Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) est une plateforme informatique qui permet aux utilisateurs d'exécuter des analyses géospatiales sur l'infrastructure de Google. Il offre plusieurs modes d'interaction, notamment l'éditeur de code un environnement de développement intégré (IDE)

accessible via le web, permettant d'écrire et d'exécuter des scripts et l'explorateur, une application web légère destinée à explorer le catalogue de données et à effectuer des analyses simples.

Dans le cadre de cette étude, GEE a été utilisé pour le traitement d'images satellitaires issues des missions Landsat 5, 7 et 8, ainsi que Sentinel-2. Les bandes pertinentes ont été extraites et des filtres appliqués afin de ne conserver que les images présentant moins de 10 % de couverture nuageuse. Pour chaque année d'intérêt, une image médiane a été générée à partir des collections sélectionnées, ce qui permet de réduire les biais liés à des scènes individuelles. Ce traitement a été réalisé à l'aide de scripts en JavaScript sur GEE, et les résultats finaux ont été exportés au format GeoTIFF pour une analyse plus poussée.

#### **VII.2.2.1 ArcGis**

ArcGIS, développé par Esri, est une plateforme géospatiale complète et leader du marché dans le domaine des systèmes d'information géographique (SIG). Elle permet d'intégrer, d'analyser, de cartographier et de partager des données dans leur contexte géographique. Les organisations qui l'utilisent tirent un avantage considérable pour comprendre leur environnement et prendre des décisions éclairées. (Esri, n.d).

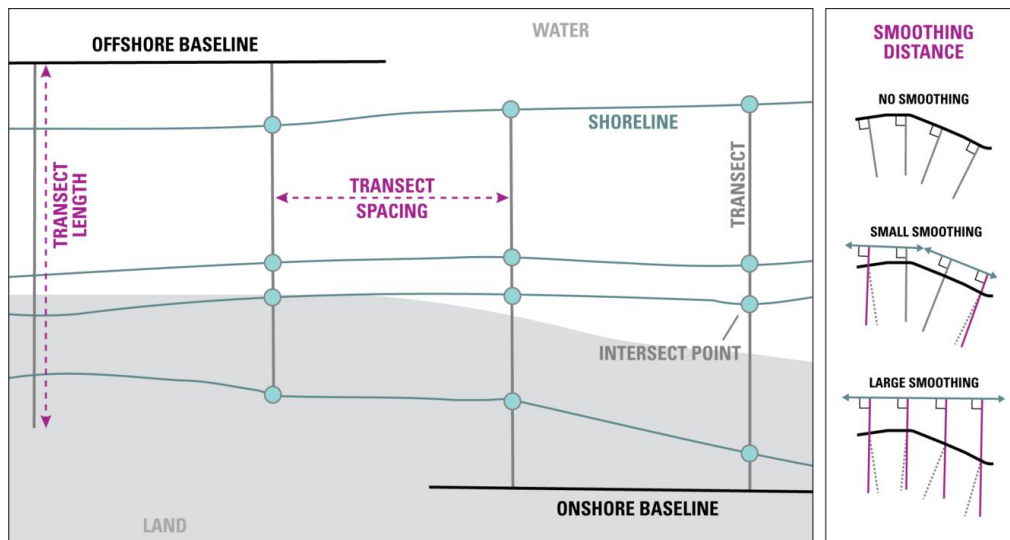
Tous les traitements effectués dans le cadre de cette analyse ont été réalisés avec la version 10.8 d'ArcGIS.

#### **VII.2.2.2 Extension DSAS**

Le Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 est un outil gratuit développé par l'USGS (USGS, n.d). Il fonctionne comme une extension d'ArcGIS et permet de calculer des taux de changement sur une série temporelle de lignes de rivage ou d'autres frontières naturelles.

Pour lancer l'outil, il faut disposer d'un vecteur shoreline contenant l'ensemble des lignes de rivage, avec un champ pour la date et l'incertitude. Il faut également un vecteur baseline avec un champ Id. L'ensemble des données doit être enregistré dans une géodatabase personnelle.

DSAS génère des transects qui sont projetés perpendiculairement à la ligne de base de référence pour intercepter les lignes de rivage à un espacement spécifié par l'utilisateur le long du littoral.



**Figure VII-1:** Schéma de génération des transects pour le suivi du rivage.

Il mesure la distance entre la ligne de base et chaque intersection de ligne de rivage le long d'un transect, et combine les informations de date ainsi que l'incertitude positionnelle pour chaque ligne de rivage, afin de générer les métriques de changement suivantes :

#### Mesures de distance

- **Statiques**

Shoreline Change Envelope (SCE)

Net Shoreline Mouvement (NSM)

- **Statistiques**

End Point Rate (EPR)

Linear Regression Rate (LRR)

Weighted Linear Regression Rate (WLR). (USGS, n.d)

### VII.2.3 Méthodologie d'analyse de l'évolution du trait de côte

L'étude de l'évolution du trait de côte a été réalisée en plusieurs étapes méthodologiques, allant de l'extraction des lignes de côte à la préparation des données spatiales pour l'analyse temporelle.

#### VII.2.3.1 Extraction du trait de côte

Les lignes de côte ont été extraites par digitalisation manuelle à partir d'images satellites. Cette digitalisation a été réalisée minutieusement, afin d'assurer une précision maximale dans la délimitation des lignes de rivage. La position du trait de côte a été définie comme étant la limite

séparant la zone humide (mer) de la zone sèche (plage émergée), en se basant sur les contrastes visuels présents sur les images.

Chaque ligne digitalisée a été enregistrée sous forme de *shapefile*, à laquelle ont été attribués :

- Le système de coordonnées WGS\_1984\_UTM\_Zone\_32N, reposant sur le *Geographic Coordinate System : GCS\_WGS\_1984* et la *Projection : Transverse Mercator*.
- La date correspondant à l'image utilisée.
- Une estimation d'incertitude liée à la qualité de l'image et à la précision de digitalisation.

### VII.2.3.2 Préparation des données

Une géodatabase personnelle a été créée afin de structurer l'ensemble des données et faciliter leur traitement. Dans cette géodatabase projetée, deux classes d'entités principales ont été générées :

- Le vecteur *shoreline* : obtenu par la fusion (*merge*) de l'ensemble des traits de côte digitalisés. Il regroupe toutes les lignes de rivage correspondant aux différentes dates d'observation.
- Le vecteur *baseline* : une ligne de référence tracée en mer (*offshore baseline*), parallèlement au rivage, suivant la tendance générale de la côte. Cette ligne est essentielle pour l'analyse spatiale de l'évolution du trait de côte. Elle comporte un champ d'identification (ID) de type *long integer*.

### VII.2.3.3 Utilisation de la barre d'outils DSAS

L'analyse temporelle de l'évolution du trait de côte a été poursuivie à l'aide de la barre d'outils DSAS.

#### a. Réglage des paramètres de la baseline et des shorelines

Avant toute analyse, les paramètres des vecteurs *baseline* et *shoreline* ont été configurés dans l'interface DSAS :

- La *baseline* a été définie comme ligne de référence à partir de laquelle les transects seront générés.
- Les *shorelines* ont été intégrés comme entités chronologiques, avec leurs attributs de date et d'incertitude correctement renseignés.

#### b. Génération des transects

Des transects ont été générés automatiquement depuis la baseline. Ces lignes, perpendiculaires à la baseline, permettent de mesurer les déplacements du trait de côte dans le temps. Pour assurer leur régularité et leur pertinence spatiale :

- Le smoothing distance a été fixé à 2500 m, assurant des transects parallèles et bien alignés.
  - Le maximum search distance from baseline a été défini à 3000 m, ce qui permet d’englober tous les traits de côte même en cas de forte variation.
  - Le transect spacing a été réglé à 100 m, assurant une densité suffisante pour une analyse détaillée.
- c. Calcul des statistiques de variation du trait de côte**

Une fois les transects générés, les principaux indicateurs statistiques fournis par DSAS ont été calculés pour chaque transect :

- NSM (Net Shoreline Movement) : déplacement net entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent.
- EPR (End Point Rate) : taux de déplacement annuel basé sur deux dates extrêmes.
- LRR (Linear Regression Rate) : taux moyen de déplacement basé sur une régression linéaire de l’ensemble des dates.
- SCE (Shoreline Change Envelope) : distance maximale entre le trait de côte le plus reculé et le plus avancé.
- WLR (Weighted Linear Regression) : méthode similaire au LRR, mais prenant en compte les incertitudes associées à chaque trait de côte.

Afin d’évaluer l’évolution du trait de côte entre 1990 et 2024, les indicateurs LRR, NSM et EPR ont été mobilisés, chacun apportant une lecture complémentaire des dynamiques littorales observées.

Le choix de l’indicateur LRR s’est imposé, étant donné la disponibilité de 14 lignes de côte réparties sur la période 1990–2024. Contrairement à l’indicateur EPR qui ne prend en compte que les deux dates extrêmes, le LRR permet d’exploiter l’ensemble des données disponibles en ajustant une régression linéaire. Cela permet d’obtenir un taux d’évolution plus représentatif des dynamiques à long terme, tout en atténuant les éventuelles fluctuations ponctuelles ou anomalies dans les données. Ce choix renforce donc la robustesse et la fiabilité des résultats.

L’indicateur NSM a également été utilisé afin de quantifier le déplacement absolu du trait de côte entre la première et la dernière date. Bien qu’il ne tienne pas compte des variations intermédiaires, il permet d’illustrer de manière claire l’ampleur du recul ou de l’avancée du littoral sur l’ensemble de la période étudiée.

En complément, l’indicateur EPR a également été calculé, afin de fournir une évaluation simple et rapide du taux moyen de déplacement du trait de côte entre les deux dates extrêmes. Bien que moins précis que le LRR dans l’analyse des tendances évolutives, le EPR constitue un

indicateur utile pour une première approche ou pour valider globalement les tendances observées.

#### VII.2.4 Estimation des incertitudes associées à la délimitation du trait de côte

L'analyse de l'évolution du trait de côte repose sur des données satellitaires, dont la précision est sujette à plusieurs sources d'incertitudes. Afin d'assurer la fiabilité des résultats obtenus et d'en interpréter correctement la portée, il est essentiel d'identifier, de justifier et, lorsque cela est possible, d'estimer quantitativement ces incertitudes.

##### VII.2.4.1 Sources d'incertitudes considérées

- **Résolution spatiale**

La résolution spatiale des images impose une limite à la précision positionnelle du trait de côte, généralement supposée être de  $\pm 0,5$  pixel. (Toutin, 2004).

**Tableau VII-2: Estimation des incertitudes liées à la résolution spatiale.**

Satellite	Résolution spatiale (m)	Nombre d'images	Erreur (0.5 pixel)
Landsat 5	30 m	2	15 m
Landsat 7/8	15 m	4	7.5 m
Sentinel-2	10 m	8	5 m

❖ Formule pour l'erreur moyenne pondérée :

#### Équation VII-1

$$\text{Erreur moyenne pondérée} = \frac{\sum (\text{Erreur} \times \text{Nombre d'images})}{\text{Nombre total d'images}}$$

$$\frac{(15 \times 2) + (7.5 \times 4) + (5 \times 8)}{2 + 4 + 8} = \frac{30 + 30 + 40}{14} = \frac{100}{14} \approx 7.14m$$

L'erreur moyenne pondérée liée à la résolution spatiale est d'environ **7,14 mètres**.

- **Erreurs de traitement (seuillage)**

L'utilisation d'indices comme NDWI ou MNDWI pour extraire la limite eau/terre (Xu, 2006), introduit une incertitude estimée à  $\pm 5-15$  m (Pardo-Pascual & al, 2018), en raison de :

Variabilité du seuil optimal selon les conditions locales (turbidité, écume, réflectance du substrat).

Simplification binaire (terre=0/eau=1) qui ignore les zones transitionnelles.

Artéfacts météorologiques (vagues, ombres nuageuses).

- **Erreurs de géoréférencement**

Dans Google Earth Engine, le géoréférencement des images est prétraité par les fournisseurs de données (ex. USGS/ESA) avant leur intégration dans la plateforme. Les erreurs résiduelles typiques sont de **5-10 m** pour les produits Landsat/Sentinel (niveaux L1TP/L2A), (Survey, 2018).

- **Digitalisation manuelle**

La digitalisation manuelle du trait de côte peut introduire une incertitude supplémentaire en raison des erreurs humaines telles que des décalages ou des interprétations subjectives. Cette erreur est estimée à **2 mètres**.

#### VII.2.4.2 Sources négligées

- **Effets des marées**

Le littoral algérien est microtidal (Zerrouki & Hemdane, 2020), avec des variations faibles du niveau de la mer. Ce facteur a été négligé dans cette étude.

- **Correction atmosphérique**

Les images utilisées ont été pré-traitées automatiquement par Google Earth Engine, incluant les corrections atmosphériques selon des algorithmes standardisés (LEDAPS, LaSRC, Sen2Cor). Bien que ces traitements minimisent les erreurs humaines, une incertitude résiduelle faible (~1 m) liée à des conditions atmosphériques locales peut subsister. Elle est toutefois considérée comme négligeable par rapport aux autres sources d'incertitudes.

- ❖ Le tableau ci-dessous résume les principales sources d'incertitude identifiées dans cette étude, ainsi que leurs valeurs estimées.

**Tableau VII-3: Principales sources d'incertitude et leurs valeurs estimées.**

Source d'incertitude	Valeur estimée
Erreur de résolution spatiale	7.14 m
Erreur de traitement	5 m
Erreur de géoréférencement	5 m
Erreur de digitalisation	2 m

Pour estimer l'incertitude finale globale, on utilise généralement la formule de l'addition quadratique (ou racine carrée de la somme des carrés).

**Équation VII-2**

$$Incertain\te\ totale = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2}$$

- e1= Erreur de résolution spatiale
- e2= Erreur de digitalisation
- e3= Erreur de traitement
- e4= Erreur de géoréférencement

L'incertitude finale estimée est donc d'environ : **±10,25 mètres**

**VII.3 Résultats et discussion**

Neuf classes traduisant les différents degrés d'évolution, qu'il s'agisse de progression ou de Dégradation de la zone étudiée, ont été établies et illustrées dans le tableau ci-dessous :

Classe	Taux de changement du trait de côte			Classification du trait de côte
	LRR (m/an)	EPR (m/an)	NSM (m)	
1	[-12,3 / -3,0]	[-4,0 / -3,0]	[-108,1 / -49]	Érosion très élevée
2	[-3,0 / -2,0]	[-3,0 / -2,0]	[-49,1 / -32,8]	Érosion élevée
3	[-2,0 / -1,0]	[-2,0 / -1,0]	[-32,8 / -16,4]	Érosion modérée
4	[-1,0 / -0,5]	[-1,0 / -0,5]	[-16,4 / -10,0]	Érosion faible
5	[-0,5 / +0,5]	[-0,5 / +0,5]	[-10,0 / +6,8]	Stabilité
6	[+0,5 / +1,0]	[+0,5 / +1,0]	[+ 6,8 / +13,6]	Accrétion faible
7	[+1,0 / +2,0]	[+1,0 / +2,0]	[+13,6 / +20,4]	Accrétion modérée
8	[+2,0 / +3,0]	[+2,0 / +3,0]	[+20,4 / +54,7]	Accrétion élevée
9	[+3,0 / +4,0]	[+3,0 / +4,0]	[> +54,7]	Accrétion très élevée

**Tableau VII-4 : Classification des valeurs de changement du trait de côte à partir des paramètres LRR/EPR/NSM.**

VII.3.1 Evolution du littoral nord-est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora)

Les résultats cartographiques mettent en évidence des dynamiques variées d'érosion, de stabilité et d'accrétion. Ces résultats sont présentés ci-dessous.

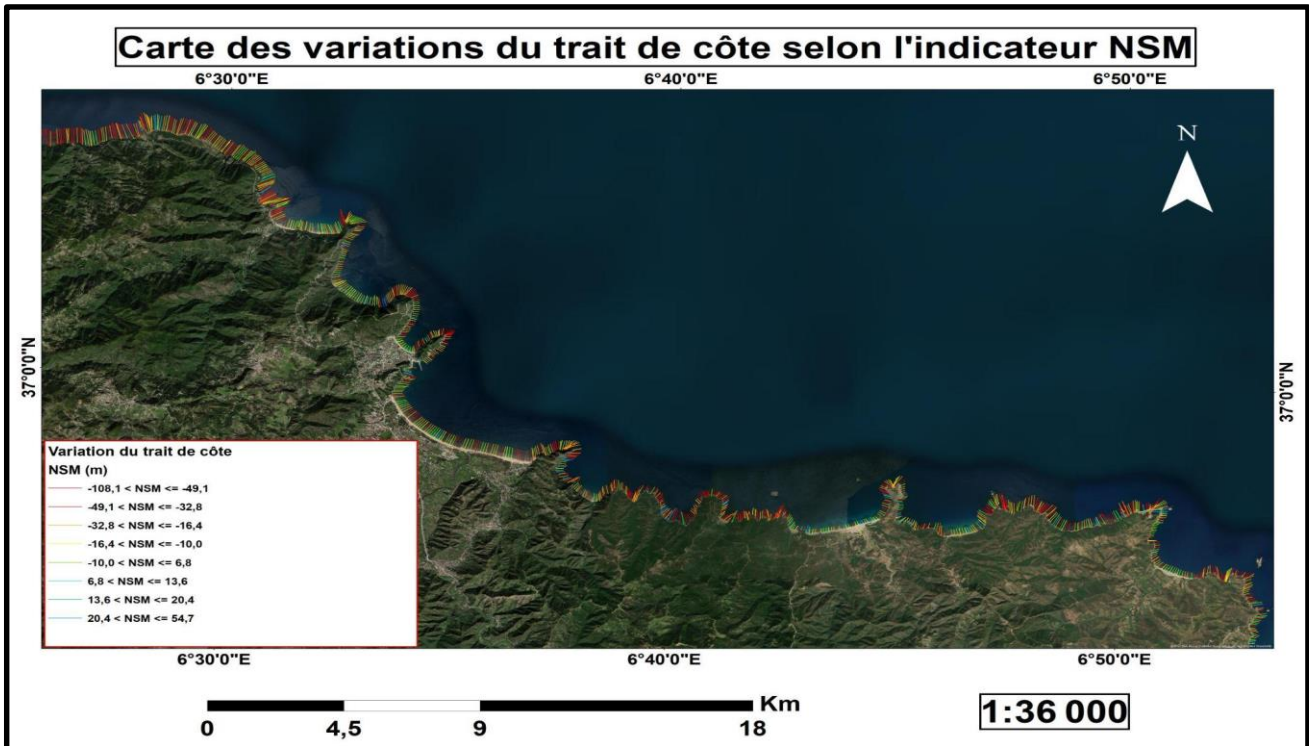


Figure VII-2 : Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM.

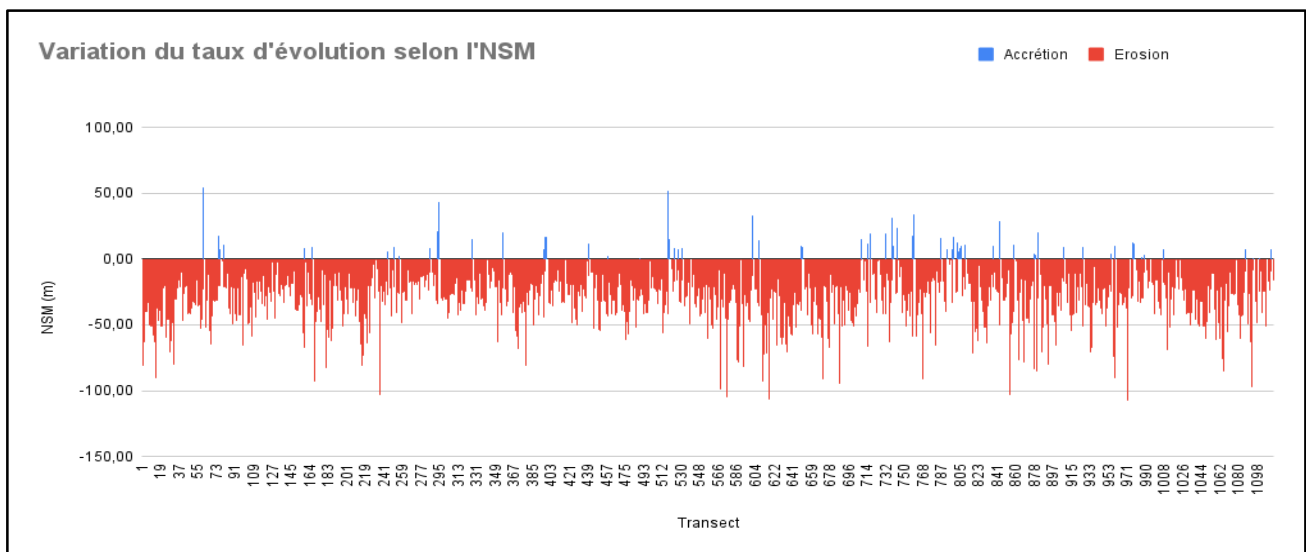
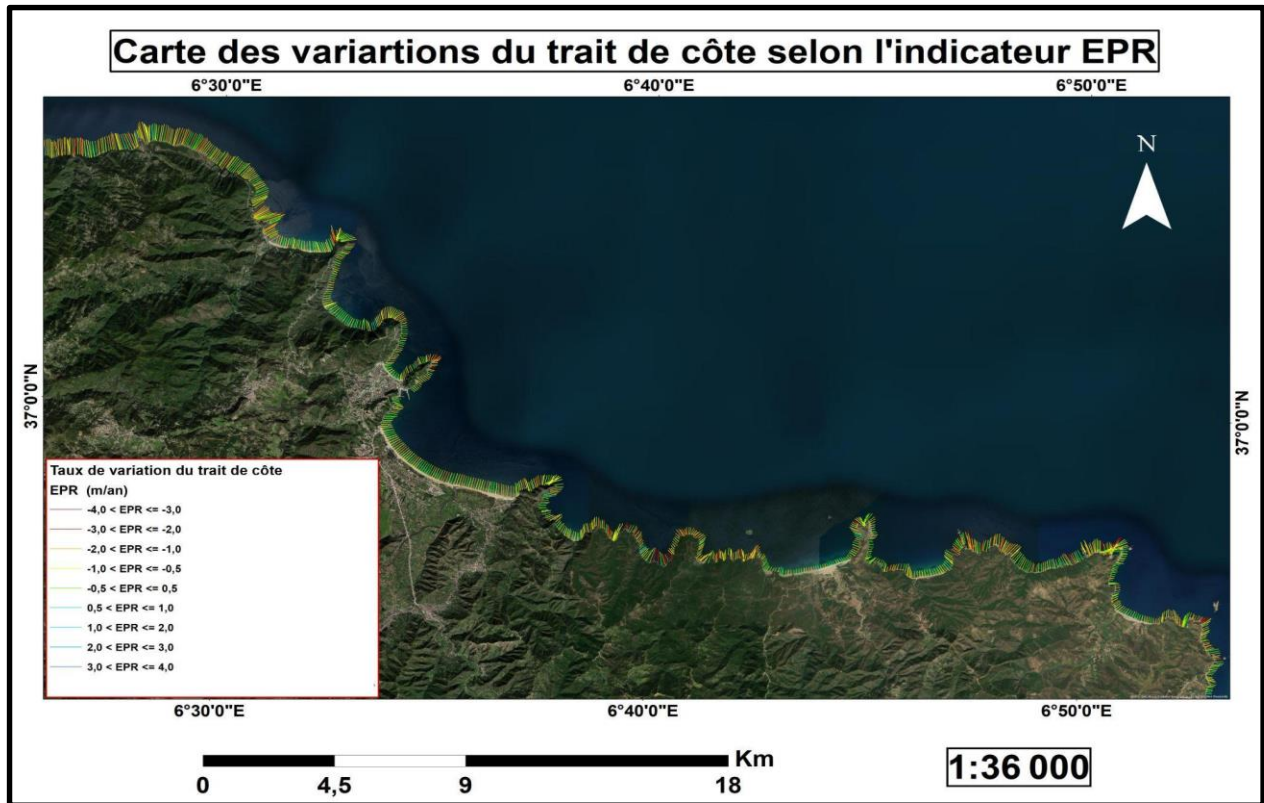
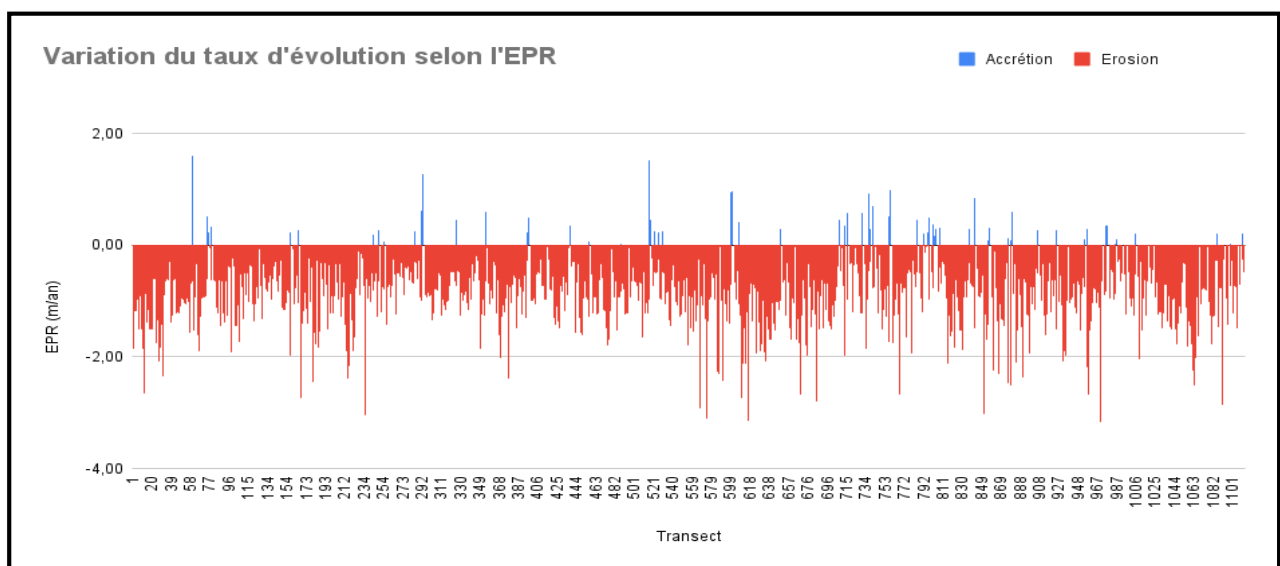


Figure VII-3: Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM.

Le Net Shoreline Movement (NSM) met en évidence un recul net moyen de **-28,28 mètres** sur l'ensemble de la zone d'étude. Les secteurs les plus affectés enregistrent des reculs pouvant atteindre **-108,04 mètres**, traduisant une perte significative de territoire. Les secteurs en accrétion, caractérisés par des gains de terrain pouvant aller jusqu'à **+54,66 mètres**, restent très localisés et minoritaires.

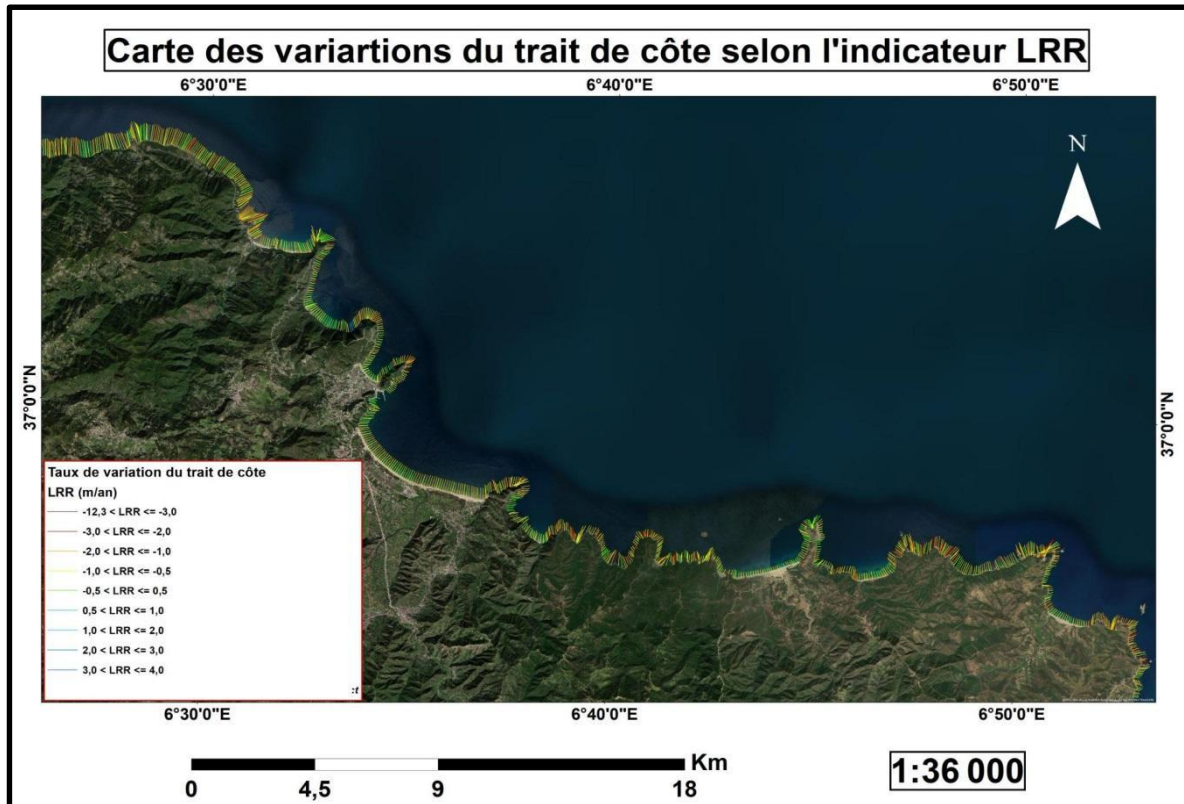


**Figure VII-4:** Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur EPR du littoral nord-est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora.

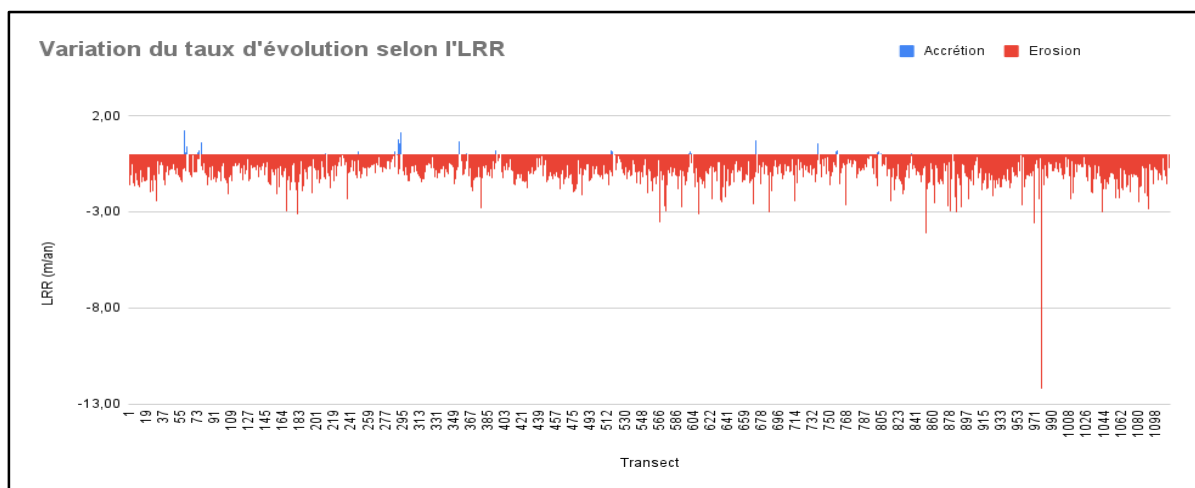


**Figure VII-5:** Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur EPR

L'analyse de l'End Point Rate (EPR) confirme la prédominance de l'érosion sur le littoral. Le taux moyen d'évolution est de **-0,83 m/an**, et **93,34 %** des transects présentent une tendance érosive. Les valeurs extrêmes indiquent des taux d'érosion pouvant atteindre **-3,18 m/an** dans les secteurs les plus vulnérables, alors que les zones en accrétion montrent des vitesses positives atteignant **+1,61 m/an**.



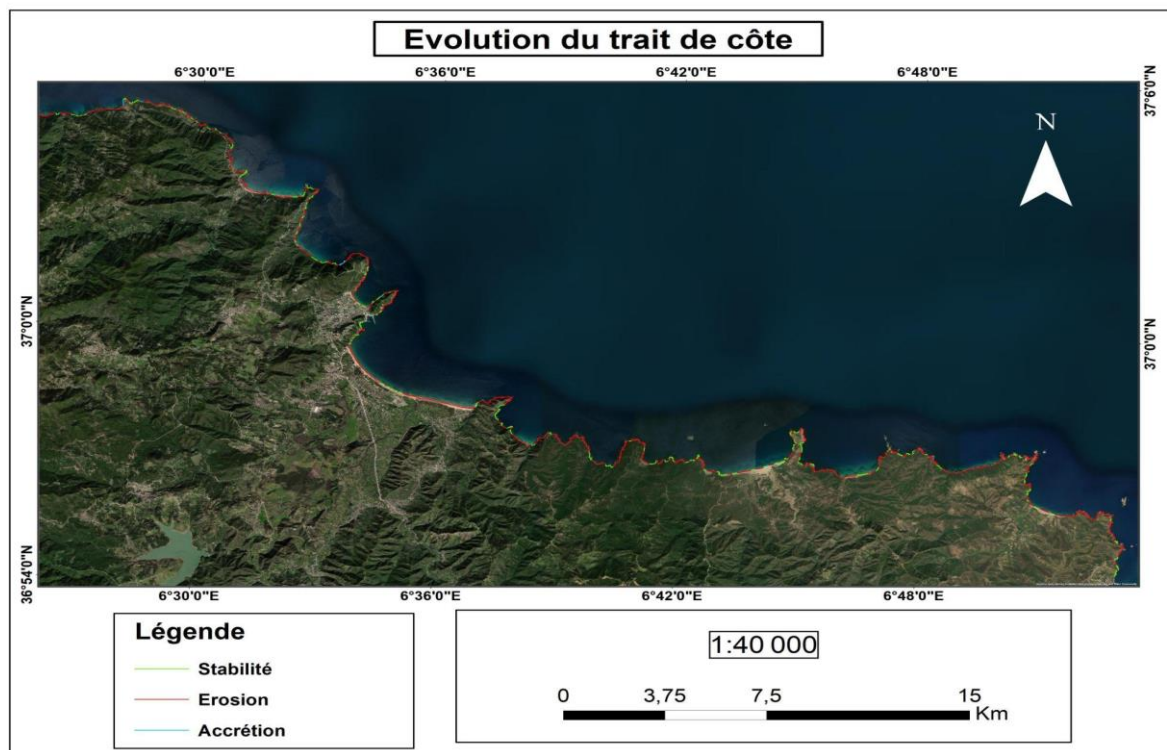
**Figure VII-6:** Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur LRR du littoral nord est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora



**Figure VII-7 :** Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur LRR

Le Linear Regression Rate, basé sur l'ensemble des données disponibles, apporte une vision plus robuste des dynamiques. Le taux moyen est légèrement plus prononcé avec **-0,97 m/an**, confirmant la tendance régressive. Les taux d'érosion maximaux atteignent **-12,21 m/an**, tandis que les rares cas d'accrétion atteignent **+1,23 m/an**. Ces résultats confortent l'idée d'une pression érosive continue sur l'ensemble de la période analysée.

- ❖ La figure suivante présente une vision synthétique de l'évolution du trait de côte, en classant chaque transect selon son état : érosion, stabilité ou accrétion.



**Figure VII-8:** Evolution du trait de côte du littoral-nord est algérien allant de Cap Bougaroun à port de pêche Stora.

Cette approche révèle que **73,4 %** des transects sont en situation d'érosion active, tandis que **25,2 %** sont en stabilité relative, traduisant des déplacements très faibles du trait de côte. Les secteurs en accrétion restent marginaux, représentant seulement **1,5 %** des transects. Cette classification affinée permet de mieux hiérarchiser les enjeux de gestion côtière en distinguant les zones nécessitant une intervention prioritaire de celles bénéficiant d'une dynamique plus équilibrée.

### VII.3.2 Evolution du littoral dans les secteurs de Cap Bougaroun, Tamanart et Collo

Suite à l'étude globale réalisée sur environ 1113 transects, une analyse spécifique des 550 premiers transects permet d'affiner l'interprétation de l'évolution du trait de côte dans la zone d'intérêt, objet de cette étude.

Les résultats obtenus à partir des méthodes NSM et LRR présentent globalement des tendances similaires quant à l'évolution du trait de côte, notamment dans l'identification des zones

d'érosion et d'accrétion. Toutefois, certaines différences de valeurs apparaissent. Le NSM montre des variations plus brusques, tandis que le LRR offre une tendance générale plus modérée.

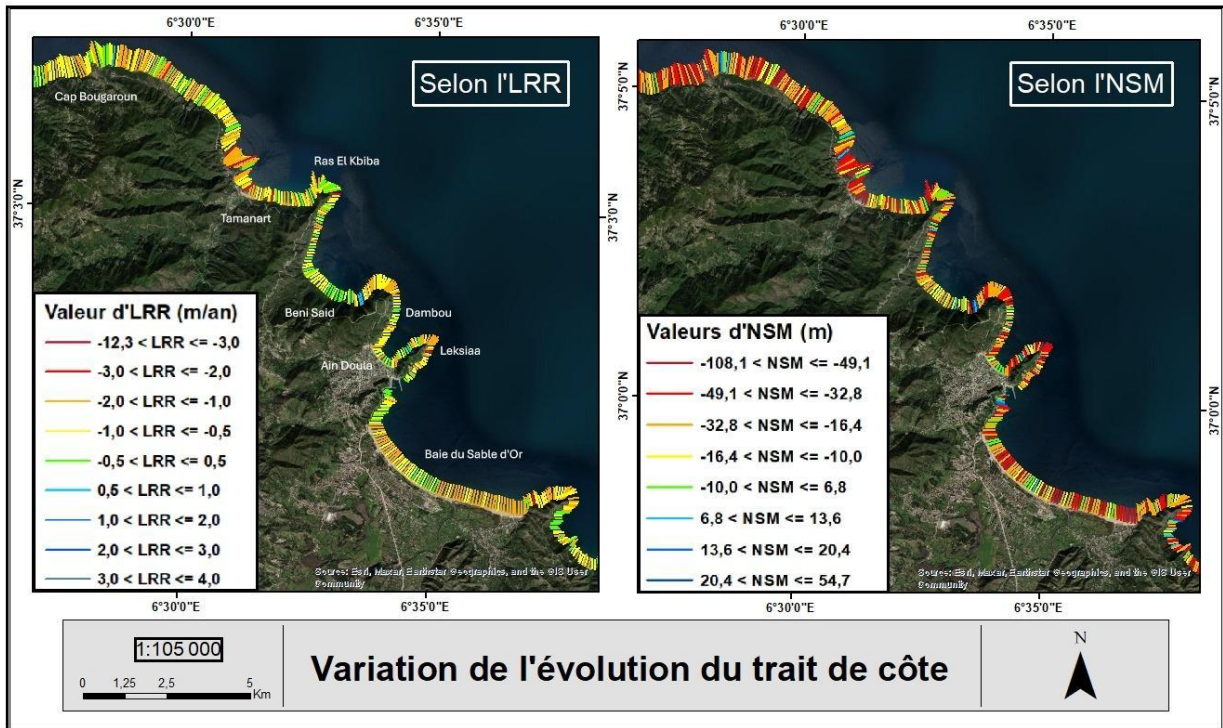


Figure VII-9: Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM/LRR dans Cap Bougaroun, Tamanart et Collo.

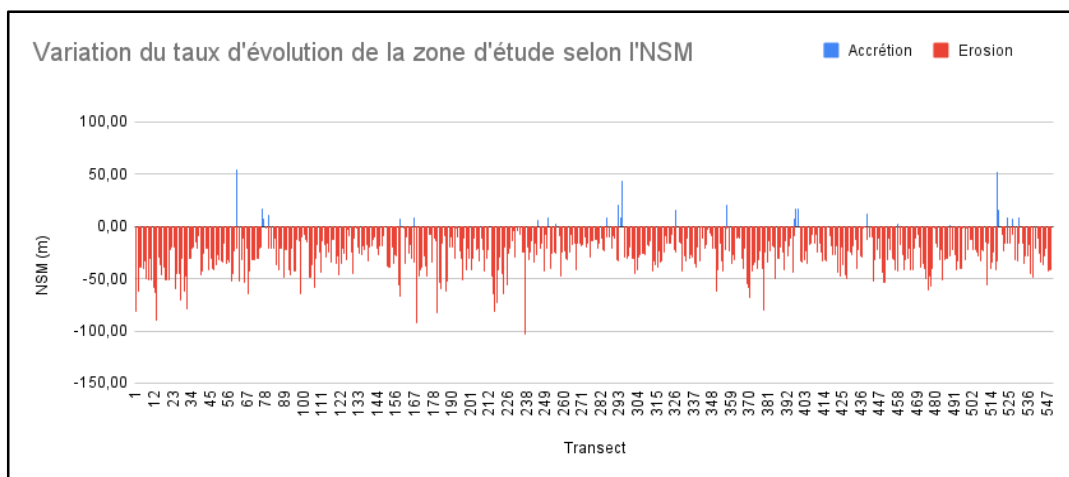
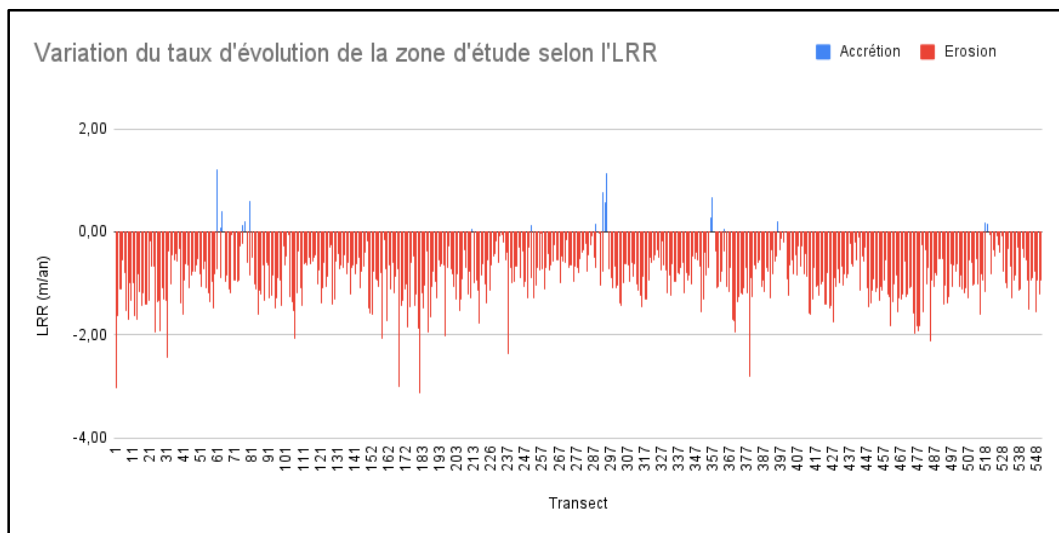


Figure VII-10: Variations de l'évolution du trait de côte de la zone d'étude selon l'indicateur NSM.



**Figure VII-11 :** Variations de l'évolution du trait de côte de la zone d'étude selon l'indicateur LRR.

La côte présente une grande hétérogénéité, alternant entre zones d'érosion et d'accrétion. Toutefois, une tendance générale à l'érosion est visible sur plusieurs segments (Fig. VII-09, VII-10, VII-11). En allant de l'ouest à l'est (Fig. VII-09) :

À Cap Bougaroun (Fig. VII-12a), l'érosion est sévère selon le NSM, avec quelques poches stables ou en accrétion dans les zones abritées, tandis que le LRR indique une faible érosion ponctuée de stabilité, l'accrétion y restant marginale.

À Tamanart (Fig. VII-12b), les valeurs NSM oscillent entre érosion faible et forte, avec quelques zones stables ou en progression, alors que le LRR indique surtout une faible érosion, la forte régression ne touchant que de rares segments. Il est important de noter que la zone sud-est exposée à la direction des houles nord, la plus pénalisante, affiche une faible érosion et stabilité contrairement au côté nord-ouest, à l'abri de la direction de houle nord, qui affiche des taux plus forts d'érosion. Ceci peut être expliqué par la nature lithologique du substrat. En effet, la partie nord-ouest est formée de roches sédimentaires (OMK), correspondant à des grès et conglomérats (Fig IV-03d) alors que la partie sud-est est formée de roches magmatiques plus compétentes (Fig IV-03c). De plus, la direction des courants vers le sud-est (Fig. VI-08) dans la zone de Tamanart favorise l'accumulation de sable du côté sud-est de la plage.



**Figure VII-12:** Photographies de terrain illustrant Cap Bougaroun (a) et Tamanart (b).

Du côté de Ras El Kbiba, le NSM met en évidence une érosion modérée, localement marquée, avec la présence d'une zone d'accrétion, tandis que le LRR montre un équilibre entre stabilité et faible érosion.

Dans la baie de Beni Saïd (Fig.VII-13a) et d'Ain Doula, les deux indicateurs s'accordent sur une côte globalement stable, avec un faible taux d'érosion. Il semble que la nature granitique (Fig IV-03b) des zones les plus exposées au forçage hydrodynamique, parties sud-est des baies, les rend très résistantes. La baie de Beni Saïd, correspondant essentiellement à une côte rocheuse de nature granitique, les deux indicateurs NSM et LRR montrent une zone d'accrétion étroite localisée sur la limite est de la baie. Après vérification sur le terrain il s'avère qu'il s'agit d'une zone d'effondrement associée à un plan de faille qui alimente la côte en blocs de roches, ce qui se traduit sur la figure IV-07 par de l'accumulation et de la stabilité dans cette zone. Cependant, dans la partie nord-ouest au fond de la baie, les zones de stabilité correspondent à de l'accumulation de sable, formant des petites plages. Cette accumulation de sédiment est probablement liée à un transport sédimentaire assuré par les courants de direction nord-ouest (Fig VI-08) dans la baie de Beni Saïd, qui déposent la charge dans la zone nord-ouest de la baie abritée par le cap Ras Kbiba qui joue le rôle d'un obstacle naturel au transport sédimentaire.

À Dambou, l'érosion relevée par NSM varie d'un endroit à l'autre, allant de faible à forte, avec quelques zones stables et une nette accrétion par endroits ; les résultats du LRR confirment une faible érosion généralisée, accompagnée de quelques secteurs stables ou en progression.

À Leksiaa, l'érosion selon le NSM alterne entre intensité forte et modérée, contrebalancée par de la stabilité et de l'accrétion dans les zones protégées, tandis que le LRR suggère une érosion faible avec stabilité dominante.

À la limite nord-ouest de la baie de Sable d'Or, une accrétion marquée est visible près du port selon NSM, au milieu de zones stables ou en érosion de degré variable ; le LRR, lui, indique une stabilité de cette zone protégée des forçages hydrodynamiques notamment par les ouvrages du port.

La baie de Sable d'Or, correspondant à une large côte basse sableuse, est délimitée au sud-est par le cap rocheux de nature gneissique de Ben Zouit. Le NSM révèle une érosion généralisée plus ou moins intense, interrompue par quelques zones abritées en accrétion. Le LRR confirme cette observation, indiquant une tendance générale à une faible érosion et à une stabilité dans les zones protégées des forçages hydrodynamiques, ainsi que dans les zones proches des embouchures des oueds, notamment l'oued Guergoura et l'oued Guebli (Fig.VII-14), qui alimentent la plage en sédiments. A noter que les zones stables se trouvent du côté nord-ouest de la baie ce qui est en adéquation avec la direction des courants littoraux (Fig.VI-08) dans la zone de Ben Zouit vers le nord-ouest.

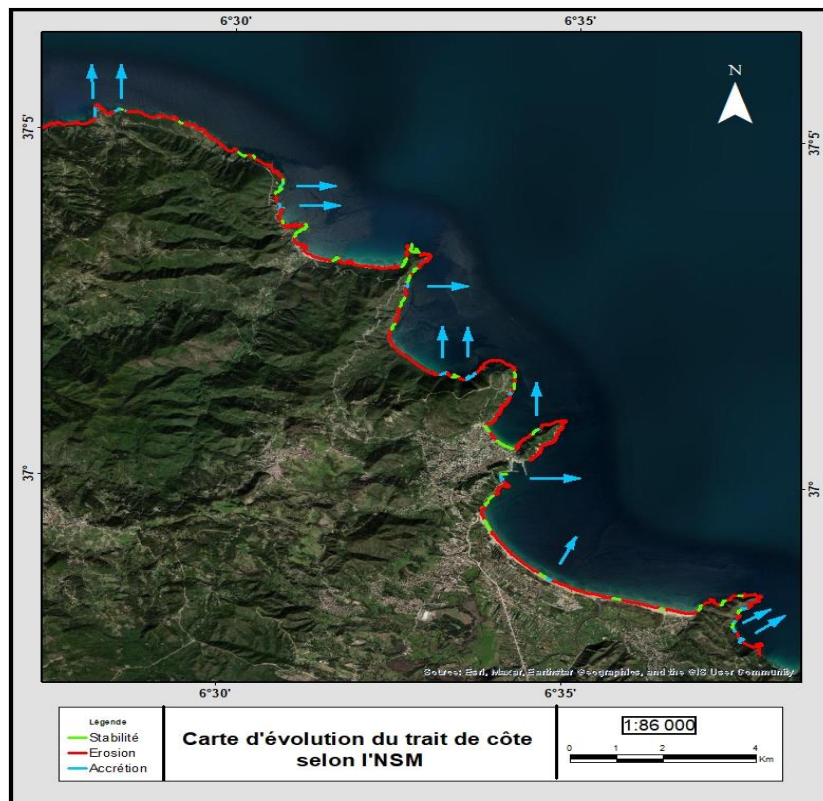


**Figure VII-13:** Photographies de terrain illustrant la baie de Beni Saïd (a) et la baie du Sable d'Or (b).



**Figure VII-14:** Photographies de terrain illustrant les embouchures des oueds de la baie de Sable d'Or : (a) oued Guergoura ; (b) oued Guebli.

Remarque : une forte érosion très localisée est souvent observée au niveau de la terminaison des caps, très remarquable sur la figure VII-09. Ces zones d'érosion sont associées aux plans de failles à l'origine de la présence des caps. En effet, les brèches tectoniques, formées par le mouvement des failles (Fig IV-05g), sont des zones fragiles où les roches ont été broyées et donc faciles à érodées.

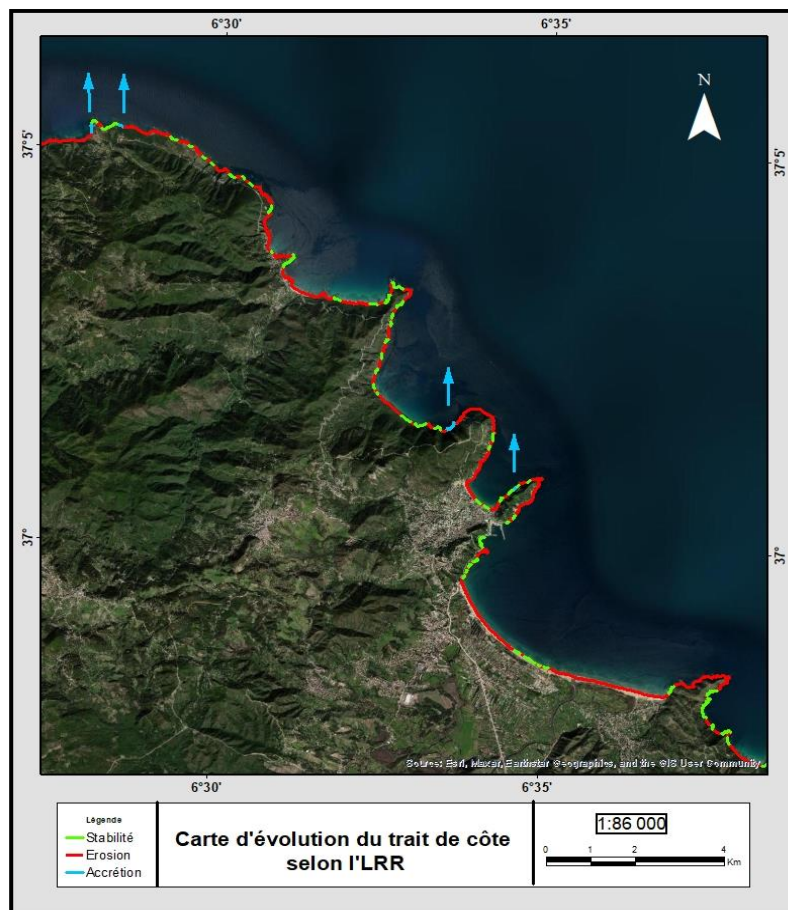


**Figure VII-15:** Évolution du trait de côte de la zone d'étude selon le NSM.

L'évolution du trait de côte de la zone d'étude selon le NSM (Fig VII-15), mise en évidence par l'analyse des 550 transects, révèle une nette prédominance de l'érosion sur l'ensemble du littoral étudié, avec **87,45 %** des transects affectés par ce phénomène. La **stabilité** du trait de côte concerne environ **8,55 %** des transects, tandis que les situations d'**accrétion** restent très limitées, représentant seulement **4,00 %**

**Tableau VII-5: Répartition des états de l'évolution du trait de côte selon NSM.**

Etat	Nombre de transect	Pourcentage (%)
Erosion	481	87,45 %
Stabilité	47	8,55 %
Accrétion	22	4,00 %



**Figure VII-16: Evolution du trait de côte de la zone d'étude selon le LRR.**

- L'évolution du trait de côte de la zone d'étude selon le LRR (Fig VII-16), révèle une dynamique littorale dominée par l'érosion, affectant **81,5 %** des transects. Environ **17,5 %** des transects présentent une dynamique de stabilité relative, tandis que **1,1 %** seulement sont en accrétion.

Tableau VII-6: Répartition des états de l'évolution du trait de côte selon LRR.

Etat	Nombre de transect	Pourcentage (%)
Erosion	448	81.45 %
Stabilité	96	17.45 %
Accrétion	6	1.09 %

Afin de mieux illustrer la dynamique du trait de côte dans la zone d'étude, quatre figures (Fig VII-17, VII-18, VII-19, VII-20) ont été élaborées : elles mettent en évidence les secteurs à tendance accrue d'évolution ainsi que les secteurs les plus critiques en termes d'érosion, selon les indicateurs NSM et LRR.

**VII.3.2.1 Secteurs littoraux à forte dynamique érosive : mise en évidence des valeurs critiques selon les indicateurs NSM et LRR**

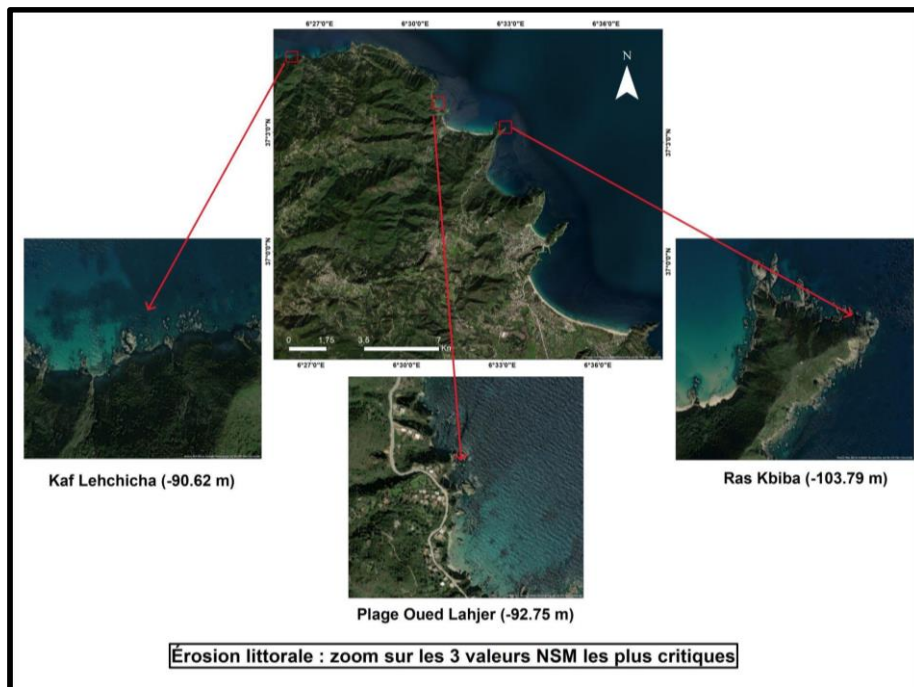
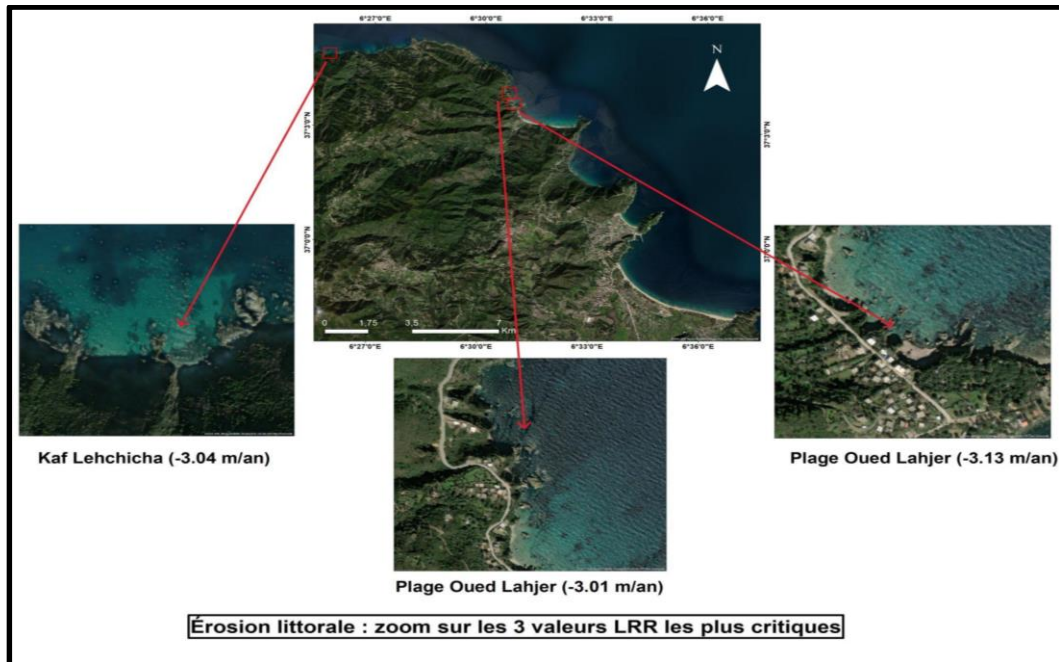


Figure VII-17: Localisation des secteurs littoraux les plus affectés par l'érosion (NSM).



**Figure VII-18:** Localisation des secteurs littoraux les plus affectés par l'érosion (LRR).

L'analyse croisée des deux cartes permet de dégager une tendance claire d'érosion sévère dans certains secteurs du littoral étudié. Les zones qui enregistrent les valeurs maximales d'érosion sont situées au niveau de Kaf Lehchicha, de la plage d'Oued Lahjer et Ras El Kbiba. Elles apparaissent à la fois avec des valeurs de NSM très négatives (dépassant les -100m de recul cumulé) et des taux annuels de régression (LRR) supérieurs à -3m/an. Cette forte érosion est liée à la nature lithologique du littoral, par exemple, la plage de Oued Lahjer est principalement constituée de grès, une roche sédimentaire particulièrement vulnérable à l'érosion ainsi qu'à la présence de failles, comme c'est le cas à Ras El Kbiba.

### VII.3.2.2 Secteurs littoraux en accrétion marquée : identification des tendances d'engraissement selon les indicateurs NSM et LRR

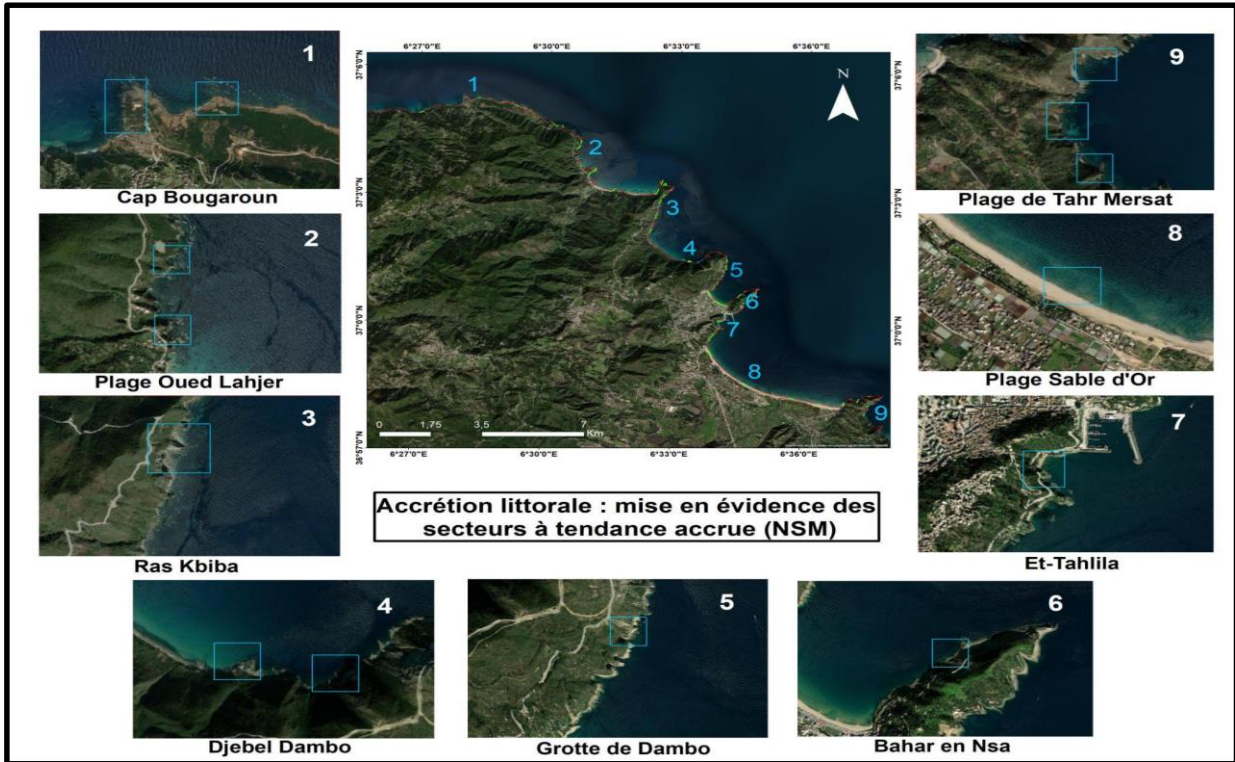


Figure VII-19: Localisation des secteurs à tendance d'accrétion littorale (NSM)

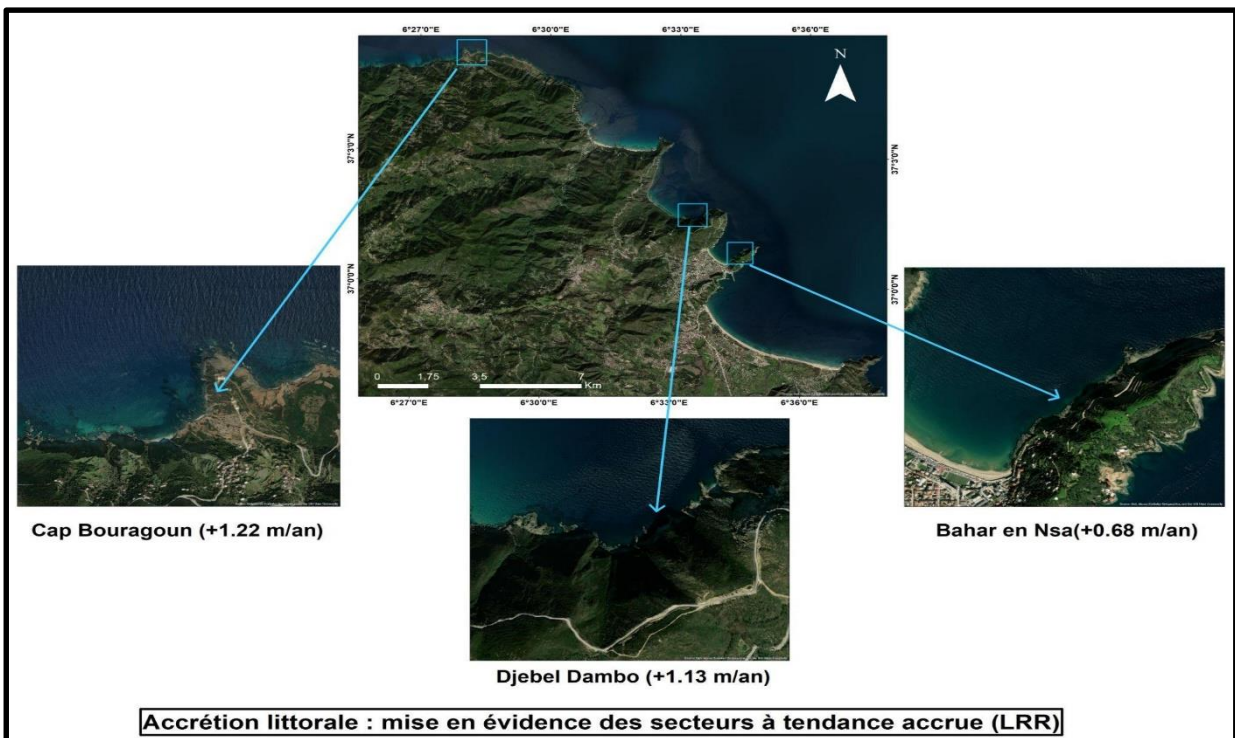


Figure VII-20: Localisation des secteurs à tendance d'accrétion littorale (LRR).

Les secteurs présentant une tendance marquée par l'accrétion dans cette étude sont rares et s'expliquent par des contextes variés, naturels ou anthropiques. Certains sites sont naturellement abrités, ce qui favorise la sédimentation et limite l'action érosive des vagues, comme c'est le cas de Ain Doula et la plage de Tahr Mersat. D'autres secteurs bénéficient d'une protection artificielle, notamment à travers des infrastructures portuaires ou des aménagements côtiers, à l'image d'Et-Tahlila, où les ouvrages jouent un rôle de piégeage des sédiments. L'apport sédimentaire des oueds constitue également un facteur déterminant dans l'accrétion, comme observé au niveau des plages du Sable d'Or, où les dépôts fluviaux alimentent la plage. Enfin, certaines zones connaissent une avancée du trait de côte liée à des effondrements ou glissements de terrain (Fig IV-07), comme dans le cas du Cap Bougaroun, la grotte de Dambo et de Djebel Dambo (Beni Saïd), où les matériaux déplacés viennent reconfigurer localement le littoral.

La valeur maximale enregistrée d'accrétion atteint **54.66 mètres** au niveau du Cap Bougaroun, ce qui témoigne de l'ampleur qui peuvent prendre ces phénomènes d'engraissement du littoral. L'analyse du LRR appuie ces résultats en révélant une vitesse maximale d'accrétion de **+1.22m/an** dans ce même secteur.

#### VII.4 Conclusion

L'analyse de l'évolution du trait de côte met en évidence une dynamique largement dominée par l'érosion, avec un recul moyen de **-1,002 m/an**, représentant **97,17 %** des secteurs étudiés. À l'inverse, seuls **2,82 %** du littoral présentent un phénomène d'accrétion, avec un taux moyen de **+0,3 m/an**. Ces résultats confirment une tendance généralisée au recul du trait de côte, soulignant la vulnérabilité accrue du littoral face aux dynamiques naturelles et aux effets potentiels du changement climatique.

***CHAPITRE VIII***  
***Modélisation prédictive avec***  
***le filtre de Kalman***

### VIII.1 Introduction

Les variations futures du trait de côte ont été estimées sur 10 et 20 ans, par une méthode de prédiction de scénarios via le filtrage de Kalman (Gümüş, 2024; Kalman, 1960), alimenté par les résultats du modèle de régression linéaire LRR. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les implications de l'intervention climatique, tectonique et/ou géologique et humaine sur les systèmes côtiers à long terme, notamment dans les régions particulièrement vulnérables aux risques côtiers.

### VIII.2 Méthodologie

#### VIII.2.1 Définition du filtre de Kalman

Les résultats de l'analyse LRR ont été utilisés pour estimer la prédiction de l'évolution du trait de côte sur 10 et 20 ans, via le filtre de Kalman (Kalman, 1960), qui a été développé par Long and Plant (2012) pour prédire les mouvements futurs du trait de côte, en combinant les variations observées avec les variations dérivées du modèle de régression linéaire de DSAS, avec une incertitude calculée par l'erreur standard de la régression linéaire. La prédiction a été calculée à l'aide de l'équation suivante de Long and Plant (2012) :

#### Équation VIII-1

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

Où  $P$  est l'état prédit,  $I$  est la matrice d'identité,  $K$  est le gain de Kalman,  $H$  pour l'état modélisé correspondant et  $P^-$  pour la covariance de l'erreur de l'état prédit.

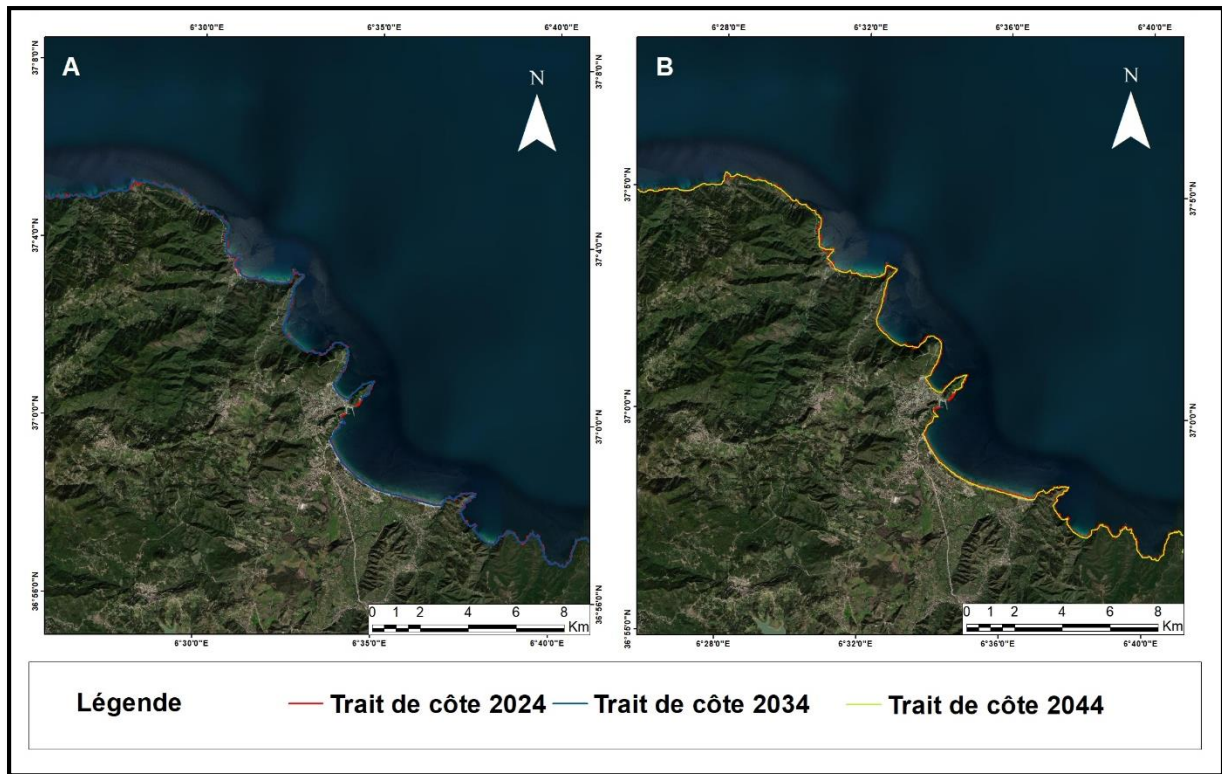
Ces résultats sont estimés avec un intervalle de confiance de régression linéaire (LCI), calculé par la formule suivante : « LCI (%) = 100% - Incertitude (%) » Ou « valeur totale – pente » dans le cas d'une étude statistique.

Dans le cadre de cette étude, les algorithmes de prédiction de l'évolution du trait de côte ont été implémentés en langage Python, à l'aide de l'environnement de développement PyCharm. Les résultats des simulations ont été exportés au format Shapefile (polylignes), représentant les lignes de côte projetées pour les années 2034 et 2044.

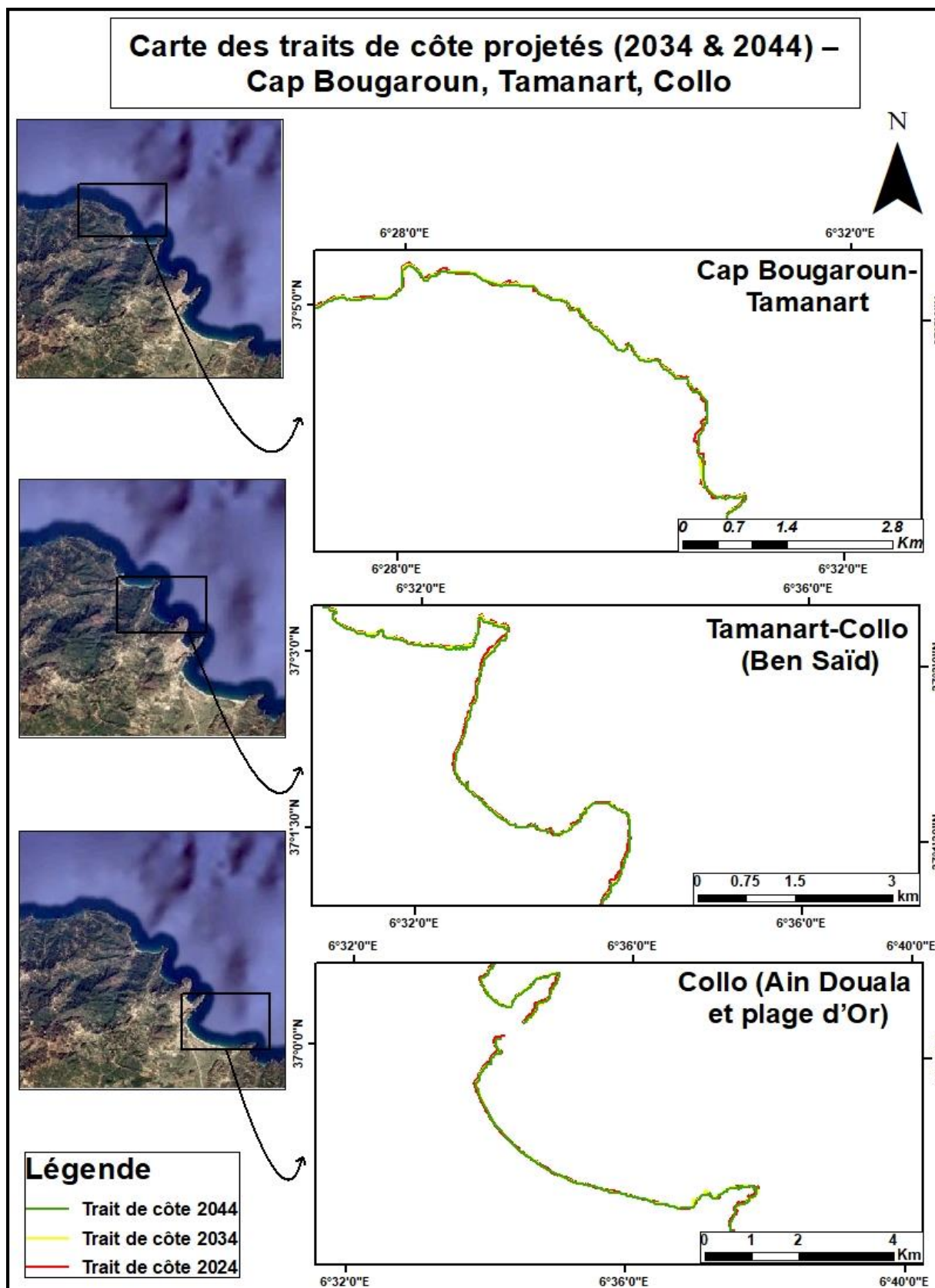
### VIII.3 Résultats des prédictions du trait de côte pour 2034 et 2044 à partir du filtre de Kalman

Les prédictions du trait de côte pour les années 2034 et 2044 ont été réalisées à l'aide du filtre de Kalman. Cette méthode a permis de modéliser l'évolution spatio-temporelle du trait de côte à partir de 14 observations historiques, allant de 1990 à 2024. Ces traits de côte ont servi de base pour détecter la tendance d'évolution linéaire et réduire l'incertitude liée aux variations annuelles, souvent influencées par des facteurs naturels et anthropiques. Grâce à son mécanisme de prédiction et de correction, a permis d'estimer avec robustesse les positions futures du trait de côte dans la région, en s'appuyant sur la dynamique observée des lignes passées.

Les résultats obtenus offrent une projection précise des tendances d'avancement ou de recul du littoral, fournissant ainsi un outil précieux pour la gestion côtière.



**Figure VIII-1:** Projection des traits de côte de 2034 (A) et 2044 (B) obtenu par l'utilisation du filtre de Kalman.



**Figure VIII-2 :** Projection des traits de côte de 2034 et 2044 obtenus par l'utilisation du filtre de Kalman pour les secteurs de Tamanart, Collo et Cap Bougaroun.

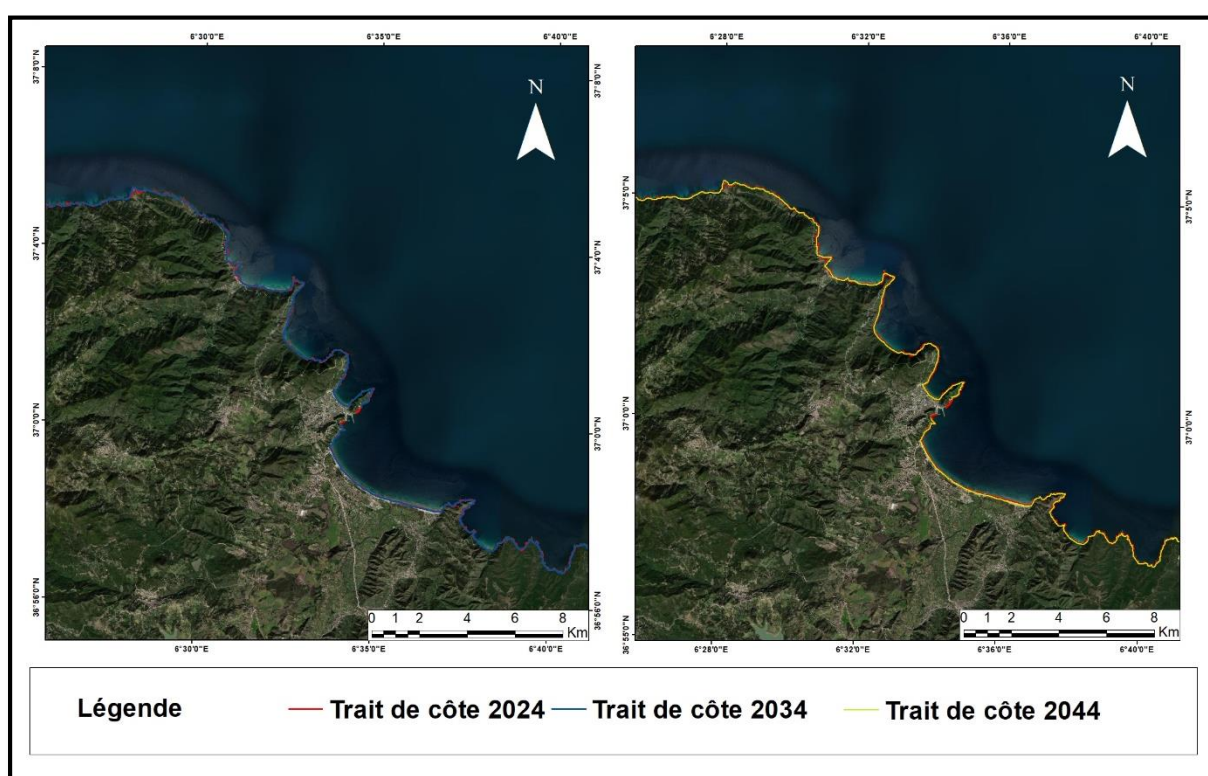
### VIII.4 Résultats des Modélisations du Trait de Côte par Beta Shoreline Forecasting

#### Forecasting

Dans cette étude, nous avons appliqué la méthode Beta Shoreline Forecasting pour analyser et prédire l'évolution du trait de côte à partir d'une série temporelle comprenant 14 traits de côte, allant de 1990 à 2024.

Cette étude vise également à comparer ces résultats avec ceux obtenus par la méthode du filtre de Kalman, afin d'évaluer la performance et la fiabilité de chaque approche dans la prédiction des changements futurs du trait de côte.

Néanmoins, les traits de côte obtenus par cette modélisation pour 2034 et 2044 présentent certaines anomalies. Les traits obtenus manquent de fluidité, se traduisant par une géométrie anguleuse, hachée, et visuellement peu représentative de la réalité naturelle du rivage.



**Figure VIII-3 :** Projection des traits de côte pour 2034 et 2044 obtenus par l'utilisation du modèle Beta Shoreline Forecasting.

### VIII.5 Analyse de l'évolution du trait de côte selon les prédictions à 10 et 20 ans

#### VIII.5.1 Le filtre de Kalman

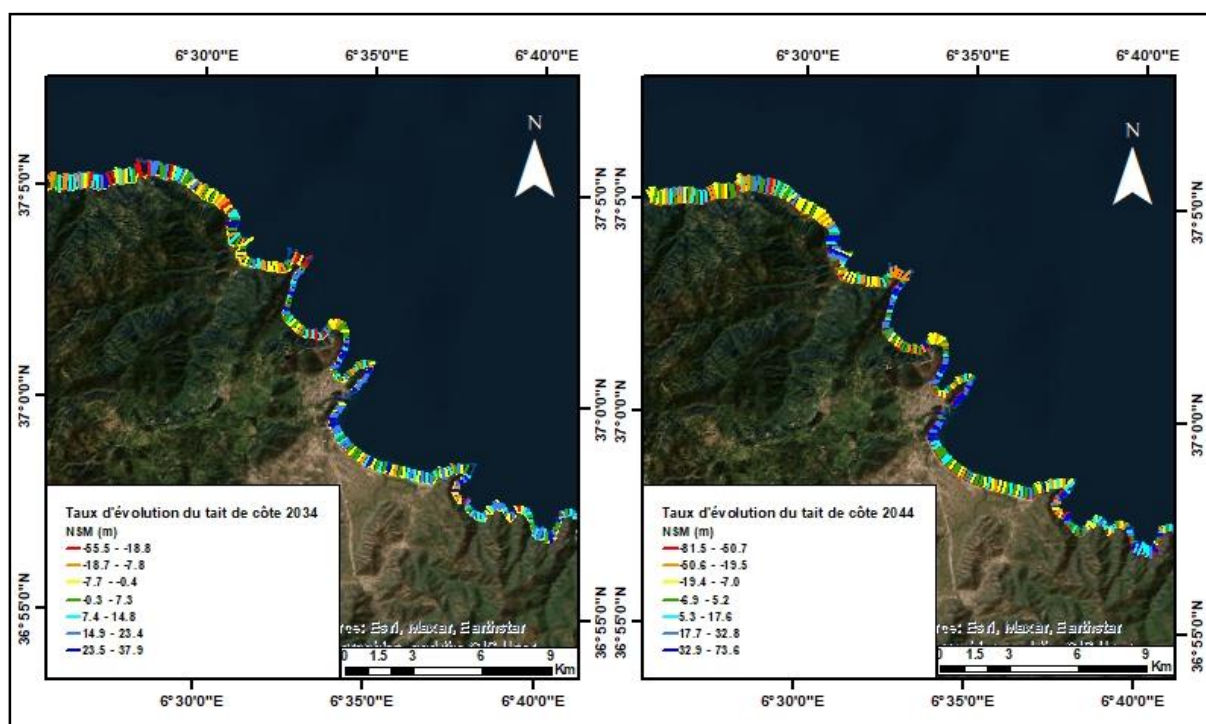
Pour l'année 2034, l'analyse du trait de côte met en évidence une dynamique dominée par l'érosion. Selon l'indicateur NSM, la valeur minimale observée correspond à un recul du trait de côte de **-55,55 mètres**, tandis que la valeur maximale indique une avancée ponctuelle pouvant atteindre **+37,91 mètres**.

En termes de vitesse d'évolution, l'EPR indique un taux d'accrétion moyen de **1,37 m/an** et un taux d'érosion moyen de **-1,04 m/an**, pour un taux global moyen de **0,55 m/an**. Ces résultats

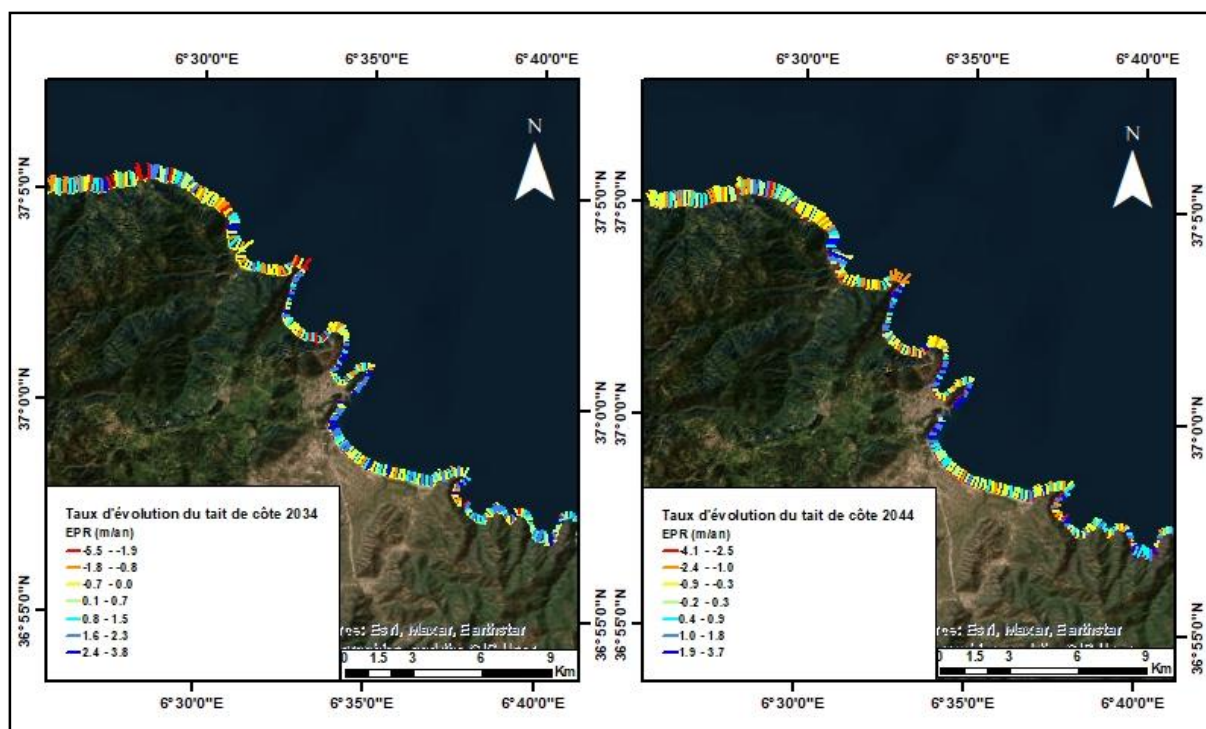
traduisent une tendance générale à l'avancée du trait de côte dans cette zone sur la période 2024–2034, bien que certaines portions localisées subissent encore une érosion significative.

Pour l'année 2044, l'évolution du trait de côte présente une situation plus équilibrée entre accrétion et érosion. Les données NSM indiquent une valeur maximale d'accrétion atteignant **73,61 mètres**, tandis que la valeur minimale correspond à un recul de **-81,51 mètres**.

D'un point de vue dynamique, les taux d'évolution fournis par l'indicateur EPR révèlent un taux d'accrétion moyen de **0,99 m/an**, contre un taux d'érosion moyen de **-0,74 m/an**, pour un taux global moyen faible de **0,14 m/an**. Cette faible valeur moyenne illustre une tendance à la stabilisation du trait de côte sur le long terme (2024–2044), avec une alternance marquée entre zones d'érosion et d'accrétion.



**Figure VIII-4:** Variations de l'évolution des traits de côte pour 2034 et 2044 selon l'indicateur NSM.

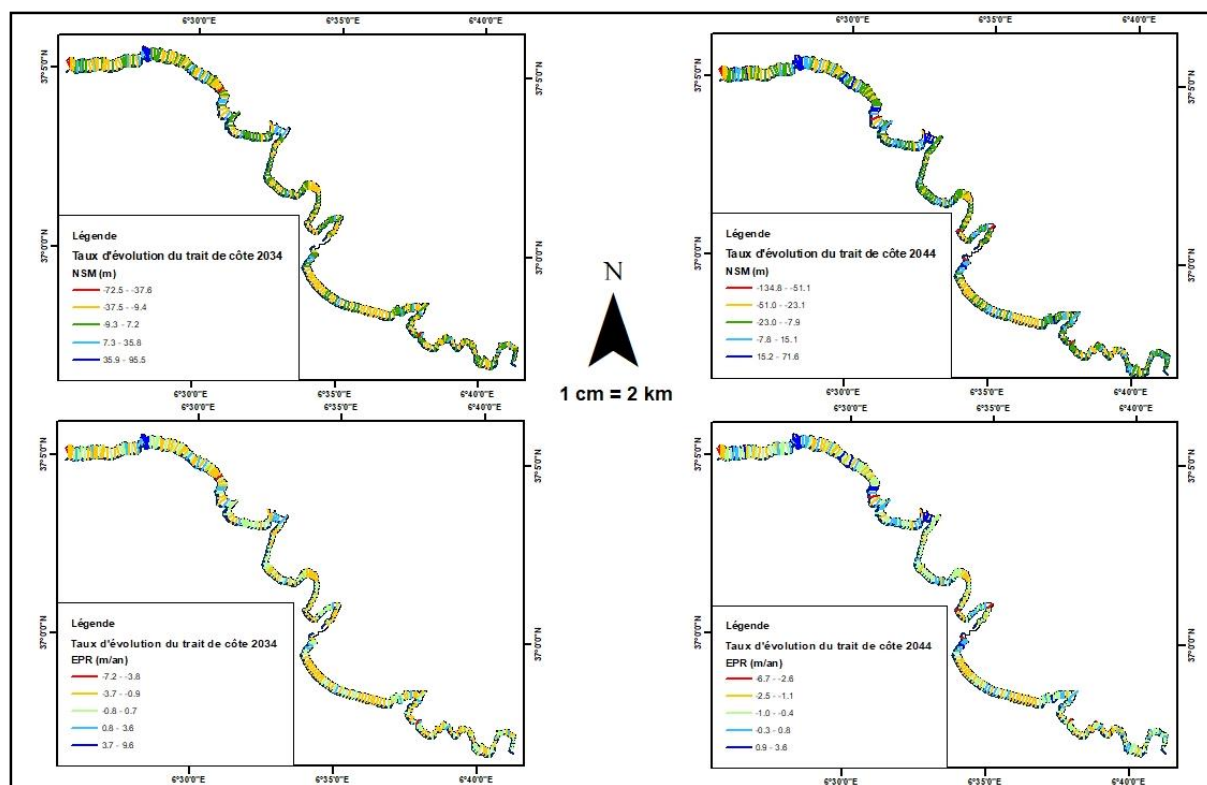


**Figure VIII-5 :** Variations de l'évolution des traits de côte pour 2034 et 2044 selon l'indicateur EPR.

### VIII.5.2 Le modèle Beta Shoreline Forecasting

Pour l'année 2034, l'évolution du trait de côte indique une forte prédominance des phénomènes d'érosion. Selon l'indicateur NSM, la valeur minimale atteint **-72,45 mètres**, traduisant un recul important, tandis que la valeur maximale d'accrétion s'élève à **95,54 mètres**. Du point de vue dynamique, les taux EPR confirment cette tendance : le taux moyen d'érosion est de **-1,25 m/an**, et celui d'accrétion de **1,46 m/an**. Avec un taux global moyen de **-0,57 m/an**, traduisant une nette régression du trait de côte dans ce secteur sur la période 2024–2034.

Pour l'année 2044, l'analyse du trait de côte met également en évidence une dynamique majoritairement érosive. Le déplacement du trait de côte mesuré par NSM varie de **-134,83 mètres** (recul maximum) à **71,63 mètres** (avancée maximale). En termes de vitesse de changement, les taux EPR indiquent un taux moyen d'érosion de **-1,00 m/an** et un taux moyen d'accrétion de **0,92 m/an**. Le taux global moyen, calculé en tenant compte du nombre de transects, est de **-0,73 m/an**, soulignant une accélération du recul du trait de côte par rapport à la période précédente.



**Figure VIII-6:** Variations de l'évolution du trait de côte selon l'indicateur NSM/EPR.

## VIII.6 Conclusion

L'analyse de l'évolution du trait de côte sur les périodes 2024–2034 et 2024–2044 met en évidence une dynamique littorale contrastée, marquée globalement par la prédominance de l'érosion. L'évolution du trait de côte montre une accentuation du recul, particulièrement marquée durant la première décennie (2024–2034), avec un taux moyen d'érosion de **-1,04 m/an** dans les secteurs les plus sensibles. Durant la période suivante une légère atténuation du recul est observée, avec un taux moyen d'érosion de **-0,74 m/an**. Bien que d'après les scénarios attendus par rapport au réchauffement climatique qui prédisent une accentuation du taux d'élévation du niveau de la mer futur, les résultats obtenus montrent une légère baisse du taux de recul du trait de côte. Cette évolution pourrait s'expliquer en partie par la cyclicité du jeu des failles. La diminution des taux de recul observée entre les deux périodes pourrait traduire une phase d'atténuation temporaire des mouvements tectoniques, limitant momentanément l'intensité des processus érosifs et favorisant une relative stabilité de certaines portions du littoral. En effet, le réchauffement climatique n'est pas le seul phénomène à l'origine de l'élévation du niveau de la mer dans la région de l'étude.

Selon les résultats obtenus à partir de l'analyse DSAS, les prédictions réalisées par le filtre de Kalman se révèlent plus précises et mieux adaptées à la dynamique observée que celles fournies par le modèle Beta Shoreline Forecasting, ce qui souligne la robustesse de cette méthode dans le contexte étudié.

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Les travaux entrepris dans le cadre de cette étude ont permis de mettre en évidence les mécanismes d'érosion côtière dans la région de Collo à travers une approche pluridisciplinaire. L'étude a intégré l'interaction de plusieurs facteurs ; l'aspect géomorphologique de la zone d'étude, le réseau hydrographique, la nature géologique du terrain, la déformation par l'activité tectonique, le climat et l'hydrodynamisme marin ; afin d'évaluer la vulnérabilité de la zone côtière de Collo face aux effets du réchauffement climatique

Une cartographie détaillée des formations géologiques a permis d'identifier les faciès lithologiques et d'évaluer leur réponse face aux dynamiques marines. Une analyse structurale basée essentiellement sur les observations et les mesures des marqueurs de la déformation, notamment des failles, effectuées sur le terrain a révélé l'influence marquée de la tectonique sur la morphologie du littoral. L'analyse structurale a mis en lumière le rôle déterminant des failles dans la dynamique côtière. En influençant directement la morphologie du littoral, ces structures tectoniques participent au recul du trait de côte par l'isolement d'îlots, la fragmentation de blocs rocheux ou l'ouverture de criques, mais aussi à certains processus d'accrétion via l'accumulation de matériaux issus de glissements de terrain. L'étude des différents types de failles et de leurs orientations a ainsi permis de mieux comprendre la structuration géomorphologique de la région, offrant un éclairage essentiel sur les mécanismes géologiques à l'origine de l'érosion côtière. Il apparaît clairement, par exemple, que l'affaissement du substrat lié au jeu des failles normales de direction parallèle à la côte accentue l'élévation du niveau de la mer déjà accélérée par le réchauffement climatique.

Ces données ont été complétées par une modélisation numérique des houles et courants, ainsi qu'une analyse diachronique du trait de côte, mettant en lumière son évolution dans le temps. Les résultats de la modélisation numérique de la propagation des vagues et des courants, montrent que les conditions hydrodynamiques, notamment lors d'événements extrêmes associés à une période de retour centennale, exercent une forte pression sur ce secteur. Les simulations révèlent des hauteurs de houle atteignant 6 mètres et des vitesses de courants côtiers proches de 1 m/s. Cette action érosive est conditionnée par la bathymétrie, la topographie des falaises et la dynamique du réseau hydrographique. Ce dernier, à travers des oueds comme Tamanart, Guebli et Oued Bibi, traverse des secteurs à relief jeune, fortement découpé et en pleine transformation morphologique. Ces zones, déjà marquées par une instabilité naturelle des versants, sont d'autant plus vulnérables lorsque la pente sous-marine est marquée et que les falaises sont fortement escarpées. À cela s'ajoute la turbidité élevée observée près des embouchures des oueds, témoignant d'un apport sédimentaire important. Selon les conditions locales, ces sédiments peuvent être soit dispersés, accentuant l'érosion, soit déposés, favorisant la stabilité de certaines zones des plages sableuses. L'étude a mis en évidence des différences de résistance à l'érosion entre les faciès géologiques, permettant d'établir un classement selon leur degré de vulnérabilité. Les formations magmatiques et métamorphiques constituent les substrats les plus cohésifs face aux agents d'érosion côtière, offrant une meilleure résistance aux dynamiques marines. À l'inverse, les formations sédimentaires meubles ou peu consolidées du Quaternaire présentent une faible cohésion et se révèlent particulièrement sensibles à l'érosion.

Enfin, la modélisation de l'évolution future du trait de côte a permis d'identifier les zones les plus exposées aux processus érosifs et évaluer les taux d'érosion. Il ressort de cette étude prédictive, pour les vingt prochaines années, que l'évolution du trait de côte montre, en général, une accentuation du recul. Cependant, le taux d'érosion prédit est plus élevé pour la période allant de 2024 à 2034 comparé au taux obtenu pour la période allant de 2034 à 2044, alors que les scénarios liés au réchauffement climatique prévoient une élévation croissante du niveau marin et une intensification de la vitesse du recul côtier. Ces résultats mettent en évidence une dynamique plus complexe, où le changement climatique n'est pas le seul facteur en jeu. En effet, les mouvements tectoniques, notamment le jeu des failles actives, contribuent également à cette variabilité. Le retrait du littoral semble s'intensifier par moments, puis connaître une accalmie, probablement liée à la cyclicité de l'activité tectonique. Le séisme enregistré en mai 2025 au Cap Bougaroun témoigne de cette activité.

La présente étude fournit une base scientifique solide pour comprendre les mécanismes d'érosion affectant la région de Collo, et peut servir de support pour développer des stratégies de protection, d'adaptation et de valorisation durable du littoral. Cette région, dotée d'un patrimoine naturel encore préservé, présente un fort potentiel pour le développement du tourisme. Conscient de ces atouts, l'État a inscrit la zone de Taleza à Ben Zouit dans les Zones d'Expansion Touristique (ZET) et y a prévu un Plan d'Aménagement Touristique (PAT) respectueux du cadre naturel. Toutefois, la concrétisation de ce plan reste entravée par des contraintes d'occupations existantes et un manque de concertation avec les communautés locales. Cela souligne la nécessité d'inscrire les projets d'aménagement dans une vision plus inclusive, cohérente et résiliente.

Enfin, compte tenu de la complexité tectonique de la région, marquée par une forte fracturation et une dynamique structurale toujours active, il serait judicieux que de futurs travaux approfondissent l'analyse structurale. Ces recherches contribueraient à affiner la compréhension de l'influence des déformations géologiques sur l'évolution du littoral et à enrichir les outils scientifiques mobilisés dans les approches de gestion intégrée.

## Références bibliographiques

**Ahlgren, S. G. (2001).** The nucleation and evolution of Riedel shear zones as deformation bands in porous sandstone. *Journal of Structural Geology*, 23(8), P.P.1203–1214.

**Allen, J. (2000).** Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the Atlantic and southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*.

**Aoudj, C., & Bouaziz, T. (2014).** Fonctionnement et dynamique morpho-sédimentaire du littoral Est de Béjaïa (Mémoire de fin d'études d'ingénieur, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral). Dely Brahim, Algérie : ENSSMAL.

**Arab, M., Rabineau, M., Déverchère, J., Bracene, R., Belhai, D., Roure, F., et al. (2016).** Tectonostratigraphic evolution of the eastern Algerian margin and basin from seismic data and onshore-offshore correlation. *Marine and Petroleum Geology*, 77, P.P.1355–1375. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.08.021>

**Bard, É. (s.d.).** Évolution du niveau de la mer. Récupéré sur Institut océanographique, Fondation Albert Ier, Prince de Monaco. [En ligne]. [Consulté le 08/03/2025]. Disponible sur le web : <https://www.oceano.org>

**BeachSearcher. (n.d.).** Oued Bibi Beach. [En ligne]. [Consulté le 17/03/2025]. Disponible sur le web: <https://beachsearcher.fr/fr/beach/12201143/oued-bibi-beach>

**BENAZZOUC, M. T. (2019).** The contribution of GIS in the quantification of the evolution of Skikda's coastline between 1960 and 2002 and the impact of developments. [En ligne]. [Consulté le 06/05/2025]. Disponible sur le web : <https://www.academia.edu/79121094>

**Bird, E. (2008).** Coastal geomorphology: An introduction (2nd ed.). John Wiley & Sons.

**Boak, H., & Turner, I. (2005).** Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, P.P.688–703.

**Bouchahma, M., & al. (2020).** Impacts des aménagements côtiers sur la dynamique sédimentaire dans la baie de Skikda. *Revue Algérienne des Sciences de la Mer*, P.P. 45-60.

**Bouillin, J.-P. (1977).** Géologie alpine de la Petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie).

**Bouillin, J. (1986).** Le " bassin maghrebin » ; une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique a l'ouest des Alpes. *Bulletin de La Société Géologique de France*, 2(4), P.P. 547–558.

**Bosch, D., Hammor, D., Mechat, M., Fernandez, L., Bruguier, O., Caby, R., & Verdoux, P. (2014).** Geochemical study (major, trace elements and Pb-Sr-Nd isotopes) of mantle material abducted onto the North African margin (Edough Massif, North Eastern Algeria): Tethys fragments or lost remnants of the Liguro-Provençal basin. *Tectonophysics*, 626(1), P.P.53–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.03.031>

**Bruguier, O., Bosch, D., Caby, R., Vitale-Brovarone, A., Fernandez, L., Hammor, D., et al. (2017).** Age of UHP metamorphism in the Western Mediterranean: Insight from rutile and

minute zircon inclusions in a diamond-bearing garnet megacryst (Edough Massif, NE Algeria). *Earth and Planetary Science Letters*, 474, P.P.215–225. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.06.043>

**Carton, X. (2018).** Les marées. *Encyclopédie de l'Environnement*. [En ligne]. [Consulté le 09/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/les-marees/>

**Chevillot-Miot, É. (2017).** Dynamiques littorales et mutations territoriales : les stations touristiques balnéaires du littoral aquitain face aux risques d'érosion [Thèse de doctorat, Université Bordeaux Montaigne]. HAL Archives Ouvertes. [En ligne]. [Consulté le 10/04/2025]. Disponible sur le web : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01664269>

**Daghbadj, A., & Salem Cherif, Y. (2015).** Aménagement et protection du rivage de Jijel (Mémoire de fin d'études d'ingénieur, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral). Dely Ibrahim, Algérie : ENSSMAL.

**DHI. (2007).** MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Module hydrodynamique : Description synthétique [PDF]. DHI Water & Environment. [En ligne]. [Consulté le 15/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.dhigroup.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/marine/HydrodynamicModuleHD.pdf>

**DHI. (2007).** MIKE 21 SW – Spectral Waves FM: Short description [PDF]. DHI Water & Environment. [En ligne]. [Consulté le 15/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.dhigroup.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/marine/SpectralWaveModuleMIKE21SW.pdf>

**DHI. (2012).** MIKE Zero Mesh Generator: Step-by-step training guide [PDF]. DHI. [En ligne]. [Consulté le 15/04/2025]. Disponible sur le web : [http://s3.amazonaws.com/dhiuk\\_blog\\_storage/Guides\\_UK/Mesh\\_Generator\\_Step\\_By\\_Step.pdf](http://s3.amazonaws.com/dhiuk_blog_storage/Guides_UK/Mesh_Generator_Step_By_Step.pdf)

**Douadi, A. (2016).** Étude sédimentologique des dépôts fluviaux d'Oued Guebli dans la région de Tamalous (Skikda) [Mémoire de licence, Université Kasdi Merbah – Ouargla]. DSpace Université d'Ouargla. [En ligne]. [Consulté le 17/03/2025]. Disponible sur le web : <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/12166>

**Durand-Delga, M. (1980).** Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. *Geologie Des Chaînes Alpines Issues de La Tethys*, P.P.67–85.

**Emery, K. O., & Kuhn, G. G. (1982).** Sea cliffs: Their processes, profiles, and classification. *Geological Society of America Bulletin*.

**Esri. (n.d.).** ArcGIS: A complete geospatial platform for professionals and organizations. [en ligne]. [Consulté le 09/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.esri.com/fr-fr/arcgis/geospatial-platform/overview>

**Faccenna, C., Piromallo, C., Crespo-Blanc, A., Jolivet, L., & Rossetti, F. (2004).** Lateral slab deformation and the origin of the western Mediterranean arcs. *Tectonics*, 23(1). <https://doi.org/10.1029/2002TC001488>

**Fernandez, L., Bosch, D., Bruguier, O., Hammor, D., Caby, R., Monié, P., et al. (2016).** Permo Carboniferous and early Miocene geological evolution of the internal zones of the Maghrebides - New insights on the western Mediterranean evolution. *Journal of Geodynamics*, 96, P.P.146–173. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2015.10.001>

**Frizon de Lamotte, D., Saint-Bézar, B., Bracène, R., & Mercier, E. (2000).** The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean. *Tectonics*, 19(4), P.P.740–761. <https://doi.org/10.1029/2000TC900003>

**Géoconfluences. (2024).** Côtes d’ablation et côtes d’accumulation. [en ligne]. [Consulté le 26/03/2025]. Disponible sur le web : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/cotes-d-ablation-et-cotes-d-accumulation>

**Géoconfluences. (s.d.).** Côtes sableuses (géomorphologie). [En ligne]. [Consulté le 26/03/2025]. Disponible sur le web : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/cotes-sableuses-geomorphologie>

**Griche, H., & Grebici, M. L. (2024).** Modélisation et cartographie de la vulnérabilité du littoral centre algérien face aux risques d’inondation et de submersion marine. Dely Brahim, Algérie : École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l’Aménagement du Littoral – ENSSMAL.

**Gümüş, M. G. (2024).** Forecasting future scenarios of coastline changes in Türkiye’s Seyhan Basin: a comparative analysis of statistical methods and Kalman Filtering (2033–2043). *Earth Science Informatics*. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01445-w>

**Héquette, A., & Hemdane, Y. (2002).** Processus d’érosion des falaises de craie de Haute Normandie. *Géomorphologie*, P.P. 279-290.

**Kalman, R. E. (1960).** A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 82(1), P.P.35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>

**Long, J. W., & Plant, N. G. (2012).** Extended Kalman Filter framework for forecasting shoreline evolution. *Geophysical Research Letters*, 39(13).

**Mahdjoub, Y. (1991).** Cinématique des déformations et évolution P-T anté-alpines en Petite Kabylie (Algérie Nord-Orientale) [Thèse de doctorat d’État, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène]. USTHB.

**Mahdjoub, Y., & Merle, O. (1990).** Cinématique des déformations tertiaires dans le massif de Petite Kabylie (Algérie orientale). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 6(4), P.P.629–634.

**Masselink, G., & Gehrels, R. (2014).** Coastal environments and global change. London, John Wiley & Sons.

**Ministère de la Transition écologique. (2025).** Qu'est-ce que le trait de côte ? [En ligne]. [Consulté le 21/03/2025]. Disponible sur le web : <https://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/qu-est-ce-que-le-trait-de-cote-r25>. Html

**Pardo-Pascual, J. E., & al. (2018).** Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines. *Remote Sensing*.

**Rosenbaum, G., & Lister, G. S. (2004).** Neogene and Quaternary rollback evolution of the Tyrrhenian Sea, the Apennines, and the Sicilian Maghrebides. *Tectonics*, 23(1).

**Seffari, A. (2023).** Etude pétrologique et géochimique du complexe ultrabasique du Cap Bougaroun.

**Seffari, A., Abdallah, N., Bruguier, O., Bosch, D., Afalfiz, A., Yelles-Chaouche, A., et al. (2023).** Opening of the Algerian Basin: Petrological, geochemical and geochronological constraints from the Yaddene Complex (Lesser Kabylia, Northeastern Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104783> 197(September 2022), 104783.

**Sunamura, T., & al. (2014).** Geological Society, London, Memoirs (Chapter 12: The rock coast of Japan). Geological Society of London.

**Sunamura, T., Tsujimoto, H., & Aoki, H. (2014).** Rock coast geomorphology: A global synthesis.

**Survey, U. G. (2018).** Landsat 8 data users' handbook. [En ligne]. [Consulté le 14/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>

**Toutin, T. (2004).** Review article: Geometric processing of remote sensing images: Models, algorithms, and methods. *International Journal of Remote Sensing*, P.P.3025–3033.

**USGS. (n.d).** Digital Shoreline Analysis System (DSAS). [en ligne]. [Consulté le 14/04/2025]. Disponible sur le web : <https://www.usgs.gov/centers/whcmssc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas#overview>

**Van Hinsbergen, D J J, Snel, E., Garstman, S. A., Marunțeanu, M., Langereis, C. G., Wortel, M. J. R., & Meulenkamp, J. E. (2004).** Vertical motions in the Aegean volcanic arc: evidence for rapid subsidence preceding volcanic activity on Milos and Aegina. *Marine Geology*, 209(1– 4), P.P.329–345.

**Xu, H. (2006).** Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, P.P.3025–3033.

**Zerrouki, C., & Hemdane, Y. (2020).** Effet des seiches sur le signal de la marée d'un littoral microtidal. Cas du port d'Alger. *Marégraphie – Revue de la mer et du littoral*.

**Zouaouid, M. (2018).** *Contribution à l'étude sédimentologique et minéralogique des alluvions de l'Oued Tamanart nord-est Algérie (Wilaya de Skikda)* [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah –

Ouargla]. DSpace Université d'Ouargla. [En ligne]. [Consulté le 07/04/2025]. Disponible sur le web:<https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/XXXX>

## Annexe

### A. Méthodologie SIG

#### A.1. Méthodologie de la réalisation des cartes des Pentes et Orientation des pentes

- Préparation des données

-Téléchargement des MNT d'une résolution de 15 m à partir de Google Earth Engine.  
- Importation des MNT dans ArcGis (version 10.8).

- Calcul de la pente (Slope)

Pour calculer la pente on utilise : Toolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope.

- Calcul de l'orientation (Aspect)

Pour calculer l'orientation on utilise : Toolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Aspect.

#### A.2. Méthodologie de la réalisation de la carte de susceptibilité aux instabilités

La création de la carte de susceptibilité aux instabilités repose sur une approche multi-critères structurée en trois grandes étapes :

- **Définition des paramètres influents**

Les facteurs clés considérés dans l'analyse sont :

**-Pente**

**-Orientation des pentes**

**-Nature du sol**

**-Végétation** (à travers l'indice NDVI)

- **Acquisition et préparation des données**

Pour chaque paramètre, un raster est généré à l'aide de sources spécifiques :

**-Pente et orientation** : obtenues par traitement d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à résolution spatiale de 15 m, sous **ArcGIS 10.8**.

**-NDVI et type de sol** : téléchargés depuis **Google Earth Engine (GEE)** sous format **GeoTIFF**.

- **Combinaison des rasters à l'aide de pondérations**

Cette étape se compose de trois sous-étapes :

**a. Standardisation des rasters**

Chaque raster est reclassé sur une même échelle allant de **1 (faible influence)** à **5 (forte influence)** afin de les rendre comparables.

### **b. Attribution des poids**

Chaque facteur se voit attribuer un poids relatif en fonction de son importance dans les processus d'instabilité :

**-Pente** : 40 %

**-NDVI** : 30 %

**-Orientation** : 15 %

**-Type de sol** : 15 %

### **c. Combinaison pondérée des rasters**

La carte finale est générée à l'aide de l'outil **Raster Calculator** dans ArcGIS, selon l'équation pondérée suivante :

Carte de susceptibilité = (Pente \* 0.40) + (Orientation \* 0.15) + (NDVI \* 0.30) + (Type de sol \* 0.15)

- **Méthodologie de la réalisation de la carte de vulnérabilité côtière**

La carte de vulnérabilité est élaborée à partir d'une approche multi-critères basée sur l'analyse de trois facteurs géomorphologiques. Le processus se déroule en trois étapes principales :

- **Définition des paramètres influents**

Les paramètres pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité sont exclusivement issus du traitement du Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

- **Pente**

- **Orientation des pentes**

- **Courbure (concave, convexe ou plane)**

- **Acquisition et préparation des données**

Les trois facteurs ont été extraits d'un MNT avec une résolution spatiale de 15 mètres, à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8. Chaque paramètre a été traité pour générer les rasters correspondants (Pente, orientation et courbure)

- **Combinaison des rasters à l'aide de pondérations**

Cette étape comprend les sous-étapes suivantes :

#### **a. Standardisation des rasters**

Les rasters sont reclassés sur une échelle commune de 1 à 5, reflétant l'intensité croissante de la vulnérabilité associée à chaque classe.

#### **b. Attribution des poids**

Les poids attribués à chaque facteur sont déterminés en fonction de leur influence sur la vulnérabilité :

**-Pente : 40 %**

**-Orientation : 30 %**

**-Courbure : 30 %**

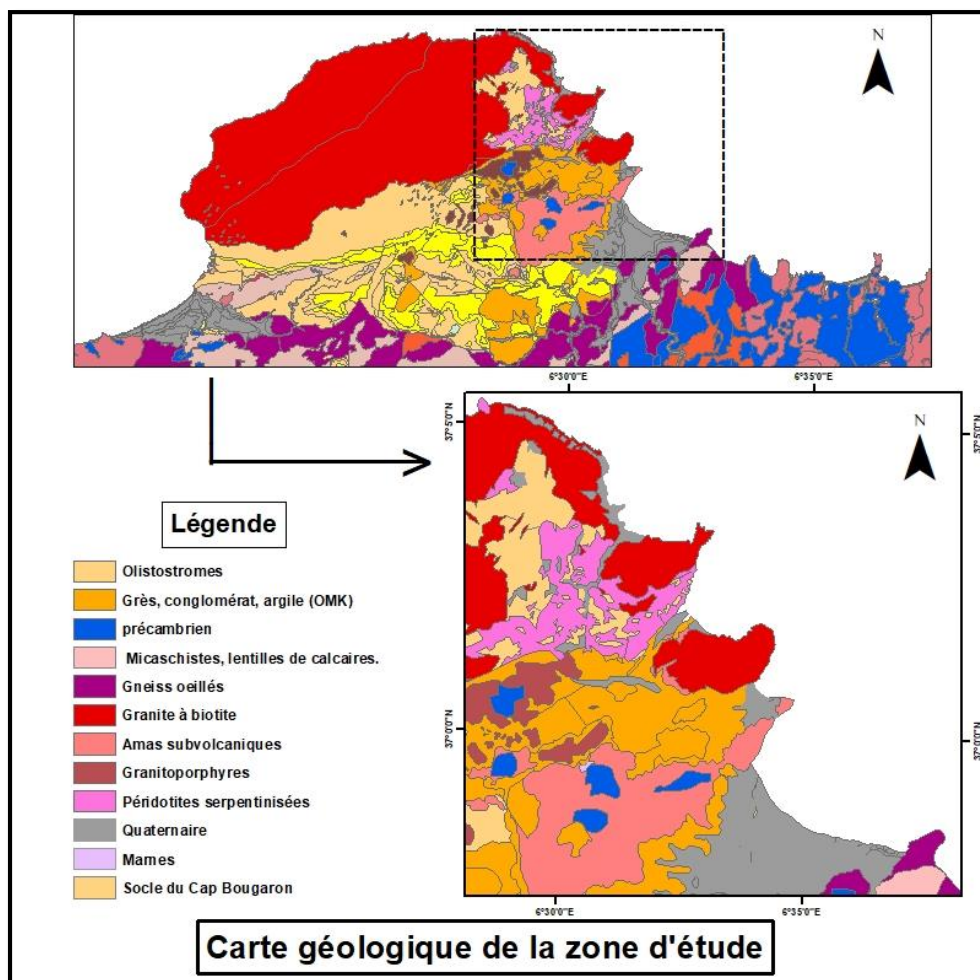
#### **c. Combinaison pondérée des rasters**

La carte finale de vulnérabilité est obtenue à l'aide du Raster Calculator dans ArcGIS, en appliquant l'équation suivante :

$$\text{Carte de vulnérabilité} = (\text{Pente} * 0.40) + (\text{Orientation} * 0.30) + (\text{Courbure} * 0.30)$$

#### **B. Carte géologique détaillée de la zone d'étude**

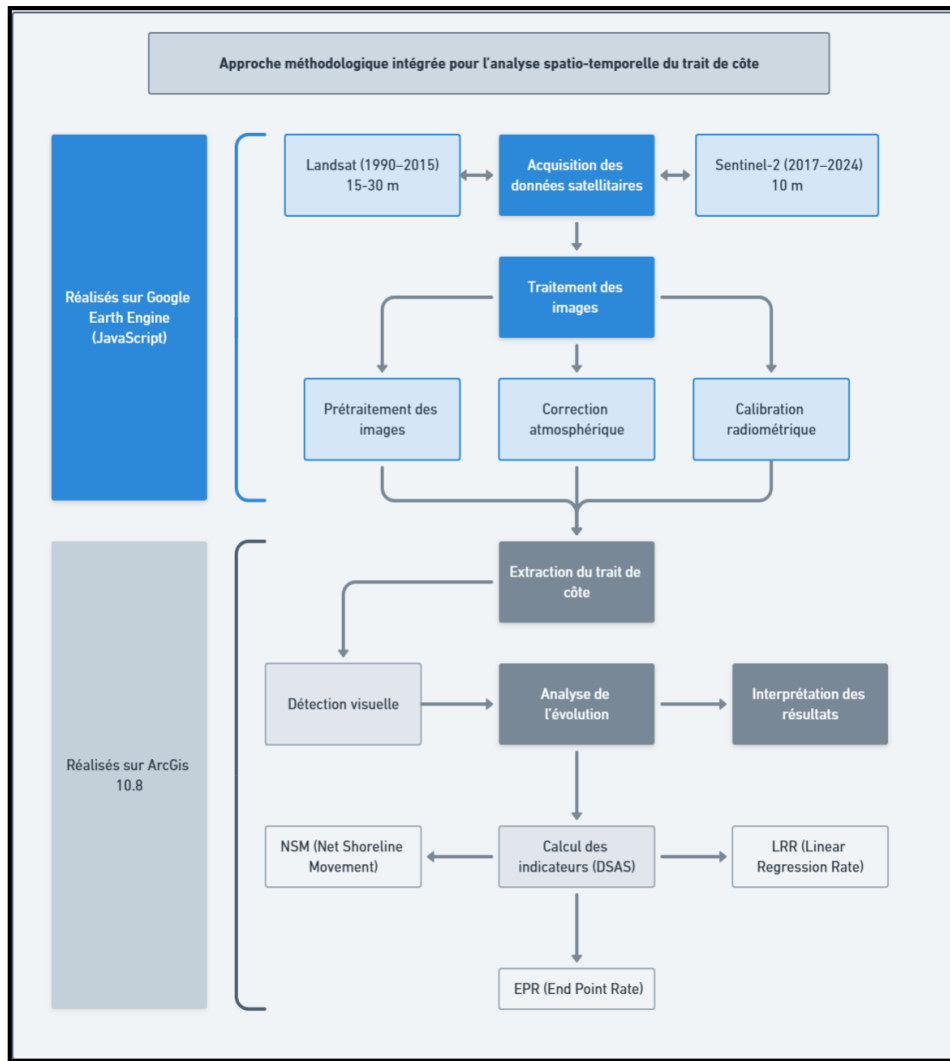
La figure suivante (Fig B-01) a été réalisée à partir de la carte géologique de la zone d'étude, modifiée sur la base des cartes géologiques détaillées d'Oued Zhour, Collo et Skikda (1968–1970, échelle 1/50 000), présentées au chapitre III. Elle constitue un agrandissement permettant une meilleure observation des formations géologiques.



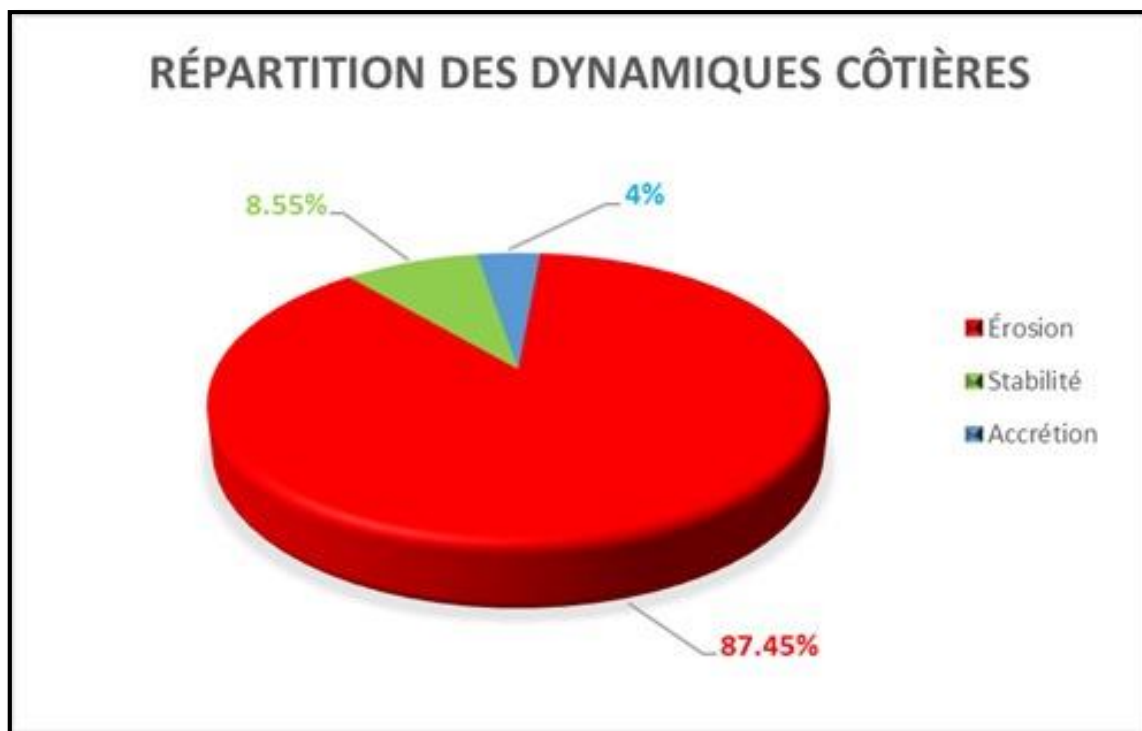
**Figure B-01 :** Carte géologique de la zone d'étude (réalisation sous ArcGIS à partir des cartes géologiques 1/50 000).

### C .Méthodologie et résultats de l'analyse spatio-temporelle du trait de côte

Cette annexe présente les éléments visuels complémentaires à l'analyse du trait de côte développée dans le chapitre VII. Elle comprend d'une part le schéma de l'approche méthodologique adoptée pour le traitement spatio-temporel (Fig C-01), et d'autre part un graphique illustrant les dynamiques côtières (érosion, accrétion et stabilité) quantifiées dans la zone d'étude (Fig C-02).



**Figure C-01 : Approche méthodologique de l'analyse spatio-temporelle du trait de côte.**



**Figure C-02 :** *Analyse quantitative des dynamiques côtières : érosion, accrétion et stabilité.*



