

Mémoire

Auteur : Verstraete, Brieuc

Promoteur(s) : Ozer, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23960>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des sciences

Évaluation du risque côtier à l'aide de l'indice CRI (Coastal Risk Index) :

Étude de cas de la commune de Kafountine, sud-ouest du Sénégal

Mémoire présenté par : **Brieuc VERSTRAETE**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,
orientation Global Change,
à finalité approfondie**

Année académique :
Date de défense :

**2024-2025
Septembre 2025**

Président de jury :
Promoteur :
Jury de lecture :

**Pr. Xavier FETTWEIS
Pr. Pierre OZER
Pr. Aurélia HUBERT
Pr. Bernard TYCHON**

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : VERSTRAETE Brieuc (brieuc.vst@gmail.com).

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur, Monsieur Pierre Ozer, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Ses remarques et encouragements m'ont beaucoup soutenu et guidé jusqu'à la fin de mon parcours universitaire. Je souhaite également souligner que sa grande humanité m'a profondément marqué durant ces cinq années.

Je remercie Madame Aurélia Hubert, ainsi que Monsieur Bernard Tychon d'avoir accepté d'être lectrice et lecteur de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur Mamadou Thior, de l'Université de Ziguinchor, pour ses conseils et son expertise du terrain, précieux pour la réalisation de ce travail.

Je souhaite remercier mes compagnons de route pour qui cette aventure se termine également. Les nombreuses journées de terrain et les voyages passés à leurs côtés resteront des souvenirs gravés dans ma mémoire.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mes proches, qui m'ont toujours soutenu dans tout ce que j'ai entrepris. Mes pensées vont tout particulièrement à Claire, Marc, Renaud, et Lise.

Enfin, je remercie Adèle, passée par cette épreuve avant moi, pour sa présence quotidienne et son soutien sans faille.

RÉSUMÉ

Les littoraux mondiaux sont de plus en plus exposés aux risques, en raison de l'intensification des phénomènes climatiques et des pressions anthropiques. La commune de Kafountine (Sénégal) illustre particulièrement ces dynamiques, avec une érosion côtière significative menaçant notamment son quai de pêche, moteur de l'économie locale.

Cette étude propose le premier Coastal Risk Index (CRI) pour ce territoire, basé sur des indices d'aléa et de vulnérabilité, calculé à partir de la base de données mondiale Global Coastal Characteristics (GCC) et enrichi par des données libres complémentaires. Treize facteurs, regroupés en trois catégories — forçages côtiers, caractéristiques physiques et socio-économiques — ont été générés.

Des analyses statistiques (ACP, corrélation de Spearman, clustering K-means) ont permis de caractériser différents profils de risque côtier. La cartographie du CRI montre que plus de 85 % de la zone présente un risque faible à modéré, tandis que le quai de pêche constitue un hotspot avec une valeur de 4,3 sur 5. La vulnérabilité explique davantage la variation spatiale du risque que l'aléa, et l'ACP révèle que la proximité des infrastructures, l'usage économique du sol et l'altitude, liés au développement économique, sont les facteurs les plus déterminants.

Enfin, quatre profils de risque ont été identifiés et spatialisés : villages insulaires, zones naturelles, quai de pêche et infrastructures touristiques, fournissant une base pour guider les stratégies locales d'adaptation côtière.

Mots clés : indice de risque côtier (CRI), analyse en composantes principales (ACP), corrélation de Spearman, clustering K-means, SIG, érosion côtière, changement climatique, Kafountine, Sénégal

ABSTRACT

Coastal areas worldwide are increasingly exposed to risks due to the intensification of climatic events and growing anthropogenic pressures. The commune of Kafountine (Senegal) exemplifies these dynamics, with significant coastal erosion threatening its fishing quay, a key driver of the local economy.

This study proposes the first Coastal Risk Index (CRI) for this area, based on hazard and vulnerability indices, computed using the global Global Coastal Characteristics (GCC) database and supplemented with freely available datasets. Thirteen factors, grouped into three categories — coastal forcings, physical characteristics, and socio-economic attributes — were generated.

Statistical analyses (PCA, Spearman correlation, K-means clustering) were conducted to characterize different coastal risk profiles. CRI mapping shows that over 85 % of the area is classified as low to moderate risk, while the fishing quay constitutes a hotspot with a score of 4.3 out of 5. Vulnerability accounts for the spatial variation of risk more than hazard, and PCA indicates that infrastructure proximity, land-use intensity, and elevation, all linked to economic development, are the most influential factors.

Finally, four risk profiles were identified and mapped: insular villages, natural areas, the fishing quay, and tourism infrastructure, providing a foundation to guide local coastal adaptation strategies.

Keywords: Coastal Risk Index (CRI), Principal Component Analysis (PCA), Spearman correlation, K-means clustering, GIS, coastal erosion, climate change, Kafountine, Senegal

TABLE DES MATIÈRES

I. INTRODUCTION	1
II. ÉTAT DE L'ART	2
II.1. Cadre théorique du risque naturel	2
II.1.1. Aléa	3
II.1.2. Exposition	3
II.1.3. Vulnérabilité	4
II.1.4. Risque	4
II.2. Le risque côtier	5
II.2.1. Périmètre et enjeu démographique des zones côtières	6
II.2.2. L'élévation du niveau de la mer	7
II.2.3. Les aléas côtiers et leurs impacts	9
II.3. L'évaluation du risque côtier	9
II.3.1. Les différentes méthodes d'évaluation	10
II.3.1.1. Méthodes basées sur des indices	10
II.3.1.2. Systèmes d'aide à la décision	11
II.3.1.3. Modèles computationnels dynamiques	11
II.3.2. Historique et diversification des indices côtiers	11
II.3.3. Approche multi-indices standardisée	12
III. ÉTAT DES LIEUX	15
III.1. La zone d'étude	15
III.2. Dynamiques d'érosion côtière à Kafountine	18
IV. HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS	21
V. MATÉRIELS ET MÉTHODES	22
V.1. Structure du CRI de Kafountine	22
V.2. Les sources de données	24
V.2.1. Global Coastal Characteristics	24
V.2.2. Copernicus Marine Service	29
V.2.3. Google Earth Pro	29
V.2.4. OpenStreetMap	29
V.3. L'échelle d'analyse	30
V.4. Le choix des facteurs	32

V.4.1. Les forçages côtiers (X)	32
V.4.1.1. Tendance de l'élévation du niveau marin (X_1)	32
V.4.1.2. Amplitude des marées (X_2)	35
V.4.1.3. Hauteur des vagues (X_3)	35
V.4.1.4. Niveau marin extrême (X_4)	36
V.4.2. Les caractéristiques physiques du littoral (Y)	37
V.4.2.1. Géomorphologie (Y_1)	37
V.4.2.2. Élévation (Y_2)	37
V.4.2.3. Pente (Y_3)	38
V.4.2.4. Largeur de plage (Y_4)	39
V.4.2.5. Éléments de protection naturels (Y_5)	39
V.4.3. Les caractéristiques socio-économiques du littoral (Z)	40
V.4.3.1. Population (Z_1)	40
V.4.3.2. Bâtiments (Z_2)	41
V.4.3.3. Réseau routier (Z_3)	42
V.4.3.4. Utilisation économique du sol (Z_4)	43
V.5. La catégorisation des facteurs	44
V.5.1. Les forçages côtiers (X)	44
V.5.2. Les caractéristiques physiques du littoral (Y)	46
V.5.3. Les caractéristiques socio-économiques du littoral (Z)	48
V.6. Calcul des indices	49
V.6.1. Agrégation des facteurs	49
V.6.2. Calcul des indices intermédiaires et du CRI	51
V.7. Analyse exploratoire des relations entre facteurs	51
V.7.1. Corrélation de Spearman	52
V.7.2. Analyse en Composantes Principales	52
V.7.2. Analyse de Clustering K-means	53
V.8. Cartographie des résultats	53
VI. RÉSULTATS	55
VI.1. Analyse des facteurs	55
VI.1.1. Les forçages côtiers (X)	55
VI.1.2. Les caractéristiques physiques du littoral (X)	58
VI.1.3. Les caractéristiques socio-économiques du littoral (Z)	62
VI.2. Analyse des indices intermédiaires	66
VI.2.1. Indices de premier niveau	66
VI.2.1.1. Coastal Forcing Index (CFI)	66
VI.2.1.2. Physical Susceptibility Index (PSI)	67

VI.2.1.3. Socioeconomic Susceptibility Index (SSI)	68
VI.2.2. Indices de second niveau	69
VI.2.2.1. Coastal Hazard Index (CHI)	69
VI.2.2.2. Coastal Vulnerability Index (CVI)	70
VI.3. Analyse du Coastal Risk Index (CRI)	73
VI.4. Analyse exploratoire des relations entre facteurs	75
VI.4.1. Corrélogramme (Spearman)	75
VI.4.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)	76
VI.4.3. Analyse de clustering K-means	81
VII. DISCUSSION	84
VII.1. Érosion côtière : indicateur ou manifestation de l'aléa ?	84
VII.2. Interprétation des résultats	84
VII.2.1. Une distribution hétérogène du risque	85
VII.1.2. Un risque structuré par ses composantes	85
VII.1.3. Des profils de risque distincts	86
VII.1.3.1. Les villages insulaires	86
VII.1.3.2. Les zones naturelles	86
VII.1.3.3. Le quai de pêche de Kafountine	86
VII.1.3.4. Les infrastructures touristiques	87
VII.1.4. Des dynamiques de risque contrastées selon les spécificités des territoires	87
VII.2. Limites de l'étude et perspectives	88
VII.2.1. Limites de l'étude	88
VII.2.2. Perspectives	89
VIII. CONCLUSION	90
BIBLIOGRAPHIE	92
ANNEXES	103

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Interaction entre aléa, exposition et vulnérabilité dans la formation du risque climatique (IPCC, 2014).	5
Figure 2. Croissance cumulative de la population continentale ultra-côtière (10 km) sur la période 2000-2018 (Cosby et al., 2024).	7
Figure 3. Projection du niveau moyen mondial de la mer selon différents scénarios SSP (IPCC, 2022).	8
Figure 4. Approche multi-indices du risque côtier standardisée (Rocha <i>et al.</i> , 2023).	13
Figure 5. Localisation de la commune de Kafountine (Barry, 2019).	15
Figure 6. Carte de l'occupation du sol de la commune de Kafountine (ESA WorldCover 2021).	17
Figure 7. Évolution du trait de côte de l'estuaire de la Gambie au Rio Cacheu sur les éditions de 1874 et 1929 de la carte n°3385 du SHOM (Faye, 2010).	18
Figure 8. Résumé de l'emprise des différentes études menées sur la cinématique du trait de côte de la commune de Kafountine.	19
Figure 9. Les houles du nord et du sud en Casamance (Thior, 2019).	20
Figure 10. Schéma conceptuel du Coastal Risk Index (CRI) de Kafountine : catégories de facteurs et indices associés.	22
Figure 11. Couverture mondiale du système de transects (en haut). Zoom sur la Barbade (en bas à gauche). Zoom sur le Ghana (en bas au centre). Zoom sur la côte ouest de l'Espagne (en bas à droite) (Données cartographiques © Google Maps 2018) (Athanasίου et al., 2024a).	25
Figure 12. Données rasters utilisés pour l'extraction des informations par transect. Les transects (lignes jaunes) correspondent aux profils extraits, tandis que les zones tampons (surfaces jaunes) délimitent les zones d'analyse statistique zonale (Données cartographiques © Google Maps 2018) (Athanasίου <i>et al.</i> , 2024a).	26
Figure 13. Schéma des trois méthodes utilisées pour échantillonner les données vectorielles le long des transects, illustré sur un littoral type comportant quatre transects : (a) vérification de la proximité à partir d'une zone tampon autour du centroïde du transect ; (b) vérification d'intersection avec des entités linéaires ; (c) interpolation par distance inverse à partir des deux points les plus proches (Athanasίου <i>et al.</i> , 2024a).	27
Figure 14. Représentation schématique des caractéristiques géophysiques extraites pour chaque profil altimétrique (Athanasίου et al., 2024a).	28
Figure 15. Aperçu des groupes d'indicateurs de la GCC extraits par transect à l'échelle mondiale, couvrant des aspects géophysiques, hydrométéorologiques et socio-économiques (Athanasίου et al., 2024a).	29
Figure 16. Localisation et numérotation des points issus de la base GCC sélectionnés pour l'analyse.	31
Figure 17. Procédure d'extraction des tendances d'élévation du niveau marin (1999–2024) à partir des données du Copernicus Marine Service.	34
Figure 18. Distances les plus courtes calculées avec les données OSM : centroïdes (bleu), bâtiments (rouge), routes (orange), liaisons centroïdes–bâtiments (vert) et centroïdes–routes (jaune)	42
Figure 19. Échelle de couleurs discrétisée utilisée pour la cartographie des facteurs.	54
Figure 20. Échelle de couleurs continue utilisée pour la cartographie des indices.	54
Figure 21. Carte des facteurs de forçages côtiers (X).	57
Figure 22. Carte des facteurs de caractéristiques physiques du littoral (Y).	61

Figure 23. Carte des facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral (Z).	65
Figure 24. Histogramme du Coastal Forcing Index (CFI).	67
Figure 25. Histogramme du Physical Susceptibility Index (PSI).	68
Figure 26. Histogramme du Socioeconomic Susceptibility Index (SSI).	69
Figure 27. Histogramme du Coastal Hazard Index (CHI).	70
Figure 28. Histogramme du Coastal Vulnerability Index (CVI).	71
Figure 29. Carte des indices intermédiaires (niveaux 1 et 2) : Coastal Forcing Index (CFI), Physical Susceptibility Index (PSI), Socioeconomic Susceptibility Index (SSI), Coastal Hazard Index (CHI) et Coastal Vulnerability Index (CVI).	72
Figure 30. Histogramme du Coastal Risk Index (CRI).	73
Figure 31. Carte du risque côtier dans la commune de Kafountine, selon le Coastal Risk Index (CRI).	74
Figure 32. Corrélogramme de la corrélation de Spearman des facteurs du Coastal Risk Index (CRI) retenus pour l'analyse exploratoire.	75
Figure 33. Scree Plot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) montrant la variance expliquée par chaque composante principale.	77
Figure 34. Contribution à la Dimension 1 des facteurs du Coastal Risk Index (CRI). La ligne en pointillé rouge indique la contribution moyenne attendue.	78
Figure 35. Contribution à la Dimension 2 des facteurs du Coastal Risk Index (CRI). La ligne en pointillé rouge indique la contribution moyenne attendue.	78
Figure 36. Biplot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des 53 points GCC.	79
Figure 37. Clusters de profils de risque côtier identifiés sur le Biplot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).	81
Figure 38. Localisation des clusters identifiés par l'Analyse en Composantes Principales (ACP).	83
Figure 39. Résumé de l'évolution le long du littoral des facteurs et indices constitutifs du Coastal Risk Index (CRI), en lien avec les clusters identifiés par l'Analyse en Composantes Principales (ACP).	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Catégorisation des forçages côtiers (X). _____	46
Tableau 2. Catégorisation des caractéristiques physiques du littoral (Y). _____	47
Tableau 3. Catégorisation des caractéristiques socio-économiques du littoral (Z). _____	49
Tableau 4. Fréquence des classes des facteurs de forçages côtiers (X). _____	56
Tableau 5. Fréquence des classes des facteurs de caractéristiques physiques du littoral (Y). _____	60
Tableau 6. Fréquence des classes des facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral (Z). _____	64

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Synthèse de l'ensemble des jeux de données utilisés pour la génération de la base de données Global Coastal Characteristics (Athanasίου et al., 2024a)	103
Annexe 2. Organigramme du processus de dérivation des indicateurs de la base de données GCC (Athanasίου et al., 2024a).	104
Annexe 3. Synthèse des paramètres géophysiques intégrés dans la base Global Coastal Characteristics (Athanasίου et al., 2024a).	105
Annexe 4. Synthèse des paramètres hydrodynamiques intégrés dans la base Global Coastal Characteristics (Athanasίου et al., 2024a).	106
Annexe 5. Synthèse des paramètres socio-économiques intégrés dans la base Global Coastal Characteristics (Athanasίου et al., 2024a).	107
Annexe 6. Vue transversale des principales caractéristiques d'un système plage-dune typique (Anfuso et al., 2021).	108
Annexe 7. Tableau récapitulatif des classifications retenues pour l'ensemble des facteurs étudiés.	109
Annexe 8. Qualité de représentation (\cos^2) des facteurs du Coastal Risk Index (CRI) retenus pour l'analyse sur la Dimension 1.	110
Annexe 9. Qualité de représentation (\cos^2) des facteurs du Coastal Risk Index (CRI) retenus pour l'analyse sur la Dimension 2.	110

ACRONYMES

ACP – Analyse en Composantes Principales

CCA – Climate Change Adaptation

CHI – Coastal Hazard Index

CMEMS – Copernicus Marine Environment Monitoring Service

CRI – Coastal Risk Index

CVI – Coastal Vulnerability Index

DSAS – Digital Shoreline Analysis System

DSS – Decision Support System

DRM – Disaster Risk Management

DRR – Disaster Risk Reduction

GIA – Glacial Isostatic Adjustment

FDR – False Discovery Rate

GCC – Global Coastal Characteristics

GIEC (IPCC) – Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat
(Intergovernmental Panel on Climate Change)

LECZ – Low Elevation Coastal Zone

MHHW – Mean Higher High Water

MLLW – Mean Lower Low Water

MNT – Modèle numérique de terrain

MSL – Mean Sea Level

OSM – OpenStreetMap

PSI – Physical Susceptibility Index

RCP – Representative Concentration Pathways

SIG – Système d'Information Géographique

SLR – Sea Level Rise

SSI – Socioeconomic Susceptibility Index

SSP – Shared Socioeconomic Pathways

SWH – Significant Wave Height

TWL – Total Water Level

I. INTRODUCTION

Le changement climatique se manifeste de façon croissante par des phénomènes extrêmes, plus fréquents et destructeurs, qui mettent en péril les sociétés humaines et les écosystèmes. Il agit également au travers de processus plus lents, qui transforment en profondeur les territoires. Parmi ceux-ci, l'élévation du niveau de la mer constitue l'un des marqueurs les plus tangibles, dont les effets se font déjà sentir dans de nombreuses régions côtières (IPCC, 2022).

La commune de Kafountine, située en Basse-Casamance dans le sud-ouest du Sénégal, illustre bien cette dynamique. Elle connaît aujourd'hui une érosion côtière inquiétante qui menace à la fois ses plages, ses infrastructures touristiques et son quai de pêche, véritable moteur de l'économie régionale (Bocoum *et al.*, 2024). Ce cas local s'inscrit dans une tendance plus large touchant de nombreux littoraux d'Afrique de l'Ouest, où la pression conjointe du changement climatique et des activités humaines accentue la vulnérabilité des territoires.

Face à ces pressions multiples, l'évaluation du risque côtier devient un enjeu central. Depuis toujours, les sociétés humaines ont dû s'adapter aux aléas naturels et aux menaces qu'ils représentent. La gestion du risque a accompagné leur développement à travers un long processus d'expérimentations, d'ajustements et d'apprentissages collectifs. Dans le contexte actuel de changement climatique, cette logique reste d'autant plus pertinente : chaque transformation environnementale peut être comprise et anticipée à travers le prisme du risque, afin de guider les choix d'aménagement et d'adaptation (Accastello *et al.*, 2021). De plus, "comprendre comment le risque se forme localement permet d'envisager des moyens de le réduire, mais saisir comment différents facteurs interagissent pour produire des risques inégalement répartis aide à tirer des enseignements applicables ailleurs" (Oulahen *et al.*, 2019).

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective. Il propose une évaluation du risque côtier dans la commune de Kafountine en mobilisant le *Coastal Risk Index* (CRI), une méthode largement développée dans la littérature scientifique ces 30 dernières années (Rocha *et al.*, 2023). L'objectif est non seulement de quantifier le risque côtier, mais aussi de mieux comprendre les mécanismes qui le façonnent, en s'appuyant sur des méthodes statistiques exploratoires.

II. ÉTAT DE L'ART

Cette seconde section, consacrée à l'état de l'art, propose une synthèse de la littérature scientifique en lien avec l'objet d'étude. Dans un premier temps, elle définira les concepts fondamentaux qui constituent le cadre théorique du risque, de manière à établir les bases conceptuelles indispensables aux développements qui suivront. Dans un second temps, l'analyse se concentrera sur les spécificités du risque côtier et sur les mécanismes qui en sont à l'origine. Enfin, la revue de la littérature examinera les principales approches d'évaluation de ce risque, en accordant une attention particulière aux méthodes fondées sur des indices, outil central mobilisé dans le cadre de ce travail.

II.1. Cadre théorique du risque naturel

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux qui structurent l'analyse du risque naturel, en précisant les notions d'aléa, d'exposition, de vulnérabilité et de risque, telles que définies dans la littérature scientifique.

Le concept de risque connaît des définitions variables selon les disciplines (Accastello *et al.*, 2021). Dans le domaine des catastrophes naturelles, deux approches complémentaires se sont historiquement développées : la réduction des risques de catastrophe (*Disaster Risk Reduction – DRR*), qui se concentre sur la prévention et la gestion des risques immédiats, et l'adaptation au changement climatique (*Climate Change Adaptation – CCA*), orientée vers les risques futurs et incertains (Accastello *et al.*, 2021). Aujourd'hui, la convergence de ces approches est jugée indispensable face à l'intensification des aléas climatiques, ouvrant la voie à des stratégies intégrées de gestion durable des risques (Accastello *et al.*, 2021).

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) définit le risque comme le potentiel de conséquences négatives pour les systèmes humains ou écologiques, résultant de l'interaction dynamique entre des aléas climatiques, l'exposition et la vulnérabilité, dans un contexte d'incertitude (IPCC, 2022). Cette approche multidimensionnelle formalise les composantes essentielles du risque naturel. Par ailleurs, le Cadre de Sendai pour la Réduction des Risques de Catastrophe 2015–2030, adopté par les Nations Unies, s'appuie sur ces trois

composantes fondamentales (aléa, exposition, vulnérabilité) pour guider les politiques internationales de gestion des risques (Accastello *et al.*, 2021).

II.1.1. Aléa

L'aléa désigne la probabilité d'occurrence d'un phénomène susceptible de provoquer des dommages et est caractérisé par sa localisation, son intensité et sa fréquence (Ozer, 2012 ; UNDRR, 2017a). Selon la Stratégie Internationale des Nations Unies pour la prévention des catastrophes, les aléas peuvent être d'origine naturelle, anthropique ou socio-naturelle, résultant d'interactions entre processus naturels et activités humaines. Ils peuvent également se présenter de manière simple, séquentielle ou combinée. Cette diversité complexe d'aléas contribue à la variabilité des risques associés (UNDRR, 2017a).

En ce sens, dans son dernier rapport le GIEC définit l'aléa comme « l'occurrence potentielle d'un événement ou d'une tendance physique d'origine naturelle ou humaine susceptible de provoquer des pertes humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, ainsi que des dommages et des pertes aux biens, aux infrastructures, aux moyens de subsistance, à la fourniture de services, aux écosystèmes et aux ressources environnementales » (IPCC, 2022).

II.1.2. Exposition

L'exposition fait référence à la présence de personnes, d'infrastructures, d'habitations, de capacités de production et d'autres biens matériels situés dans des zones vulnérables aux aléas (Cardona *et al.*, 2012 ; UNDRR, 2017b). Ces éléments exposés peuvent être partiellement ou totalement affectés en cas de survenue d'un aléa (Ozer, 2012). Il est important de souligner que, sans présence d'éléments exposés dans une zone à risque, la probabilité de dommages ou de pertes est inexistante, même si un aléa survient (Cardona *et al.*, 2012).

Dans cette perspective, le GIEC définit l'exposition comme « la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, de services et de ressources environnementaux, d'infrastructures ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans des lieux et des contextes susceptibles d'être affectés négativement » (IPCC, 2022).

II.1.3. Vulnérabilité

La vulnérabilité désigne l'ensemble des conditions, déterminées par des facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui augmentent la susceptibilité d'un individu, d'une communauté, d'actifs ou de systèmes à subir les impacts d'un aléa (Cardona *et al.*, 2012 ; UNDRR, 2017b). Elle englobe ainsi non seulement la sensibilité aux dommages, mais aussi la capacité à faire face et à s'adapter (Cardona *et al.*, 2012). La vulnérabilité est dès lors un concept multidimensionnel qui dépasse la seule résistance physique pour inclure des processus sociaux, économiques et territoriaux complexes, et est fortement liée aux inégalités structurelles (Cardona *et al.*, 2012).

Selon le GIEC, la vulnérabilité correspond à « la propension ou la prédisposition à être affecté négativement », intégrant à la fois la sensibilité aux impacts et le manque de capacité à y faire face ou à s'adapter (IPCC, 2022). Cette définition souligne la nature systémique et contextuelle de la vulnérabilité, qui varie selon les aléas et les caractéristiques des populations ou territoires concernés.

II.1.4. Risque

Le risque désigne la probabilité de conséquences négatives résultant de l'interaction entre un aléa, l'exposition des éléments concernés et leur vulnérabilité (Ozer, 2012). Cette triple interaction est illustrée dans la figure 1 issue du cinquième rapport du GIEC, qui montre comment ces composantes naturelles et anthropiques s'articulent pour produire des risques climatiques (IPCC, 2014).

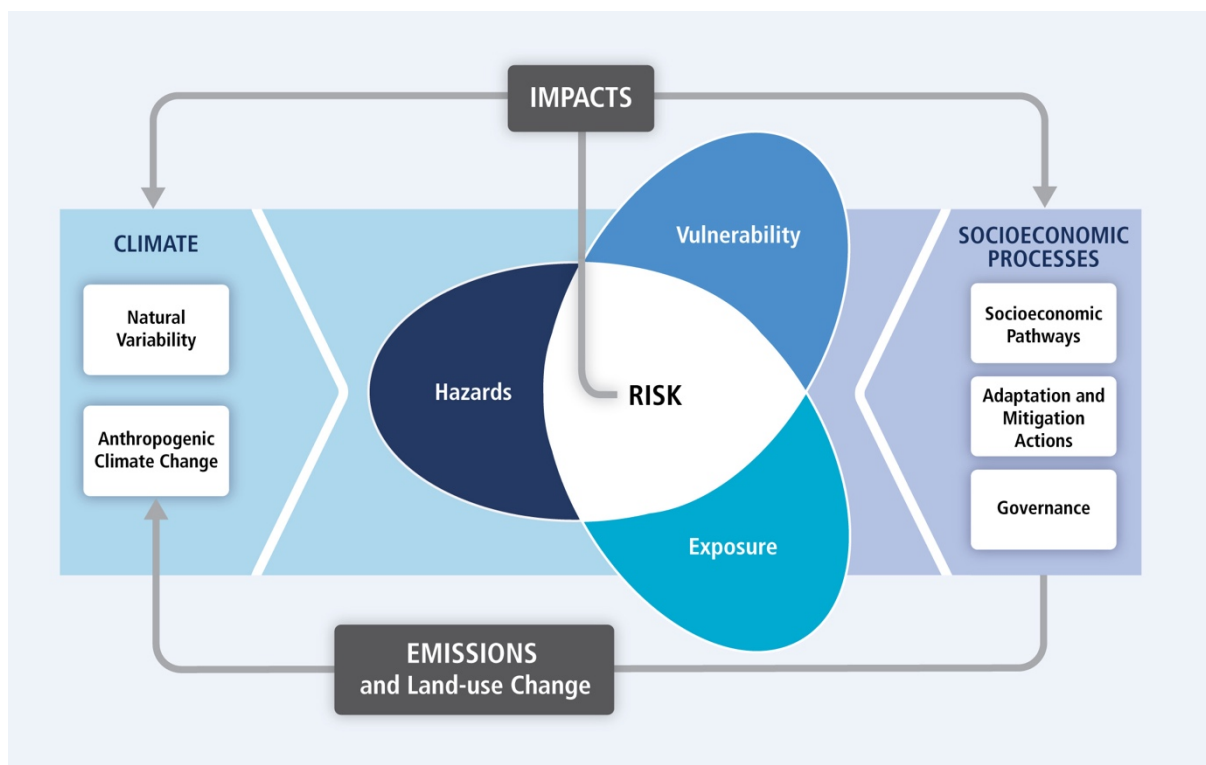


Figure 1. Interaction entre aléa, exposition et vulnérabilité dans la formation du risque climatique (IPCC, 2014).

Phénomène évolutif, le risque se matérialise en catastrophe lorsqu'il n'est pas géré (Cardona *et al.*, 2012). Largement construit socialement, il est façonné par des choix politiques, économiques et culturels, et aggravé par des dynamiques telles que l'urbanisation rapide, la dégradation environnementale ou les inégalités socio-économiques, amplifiées par le changement climatique (Cardona *et al.*, 2012).

Enfin, il est important de comprendre que tous les éléments exposés ne sont pas également vulnérables (Accastello *et al.*, 2021). Ainsi, un même niveau de risque peut résulter de combinaisons variées entre intensité de l'aléa et vulnérabilité (Ozer, 2012).

II.2. Le risque côtier

Sur la base du cadre conceptuel présenté ci-dessus, ce chapitre examine le risque côtier en détaillant le périmètre et les enjeux démographiques des zones côtières, l'élévation du niveau de la mer et ses implications, ainsi que les principaux aléas côtiers et leurs impacts.

II.2.1. Périmètre et enjeu démographique des zones côtières

Le GIEC définit la zone côtière comme un espace d'interface entre la terre et la mer, englobant à la fois les terres proches du rivage et les eaux peu profondes influencées par les processus terrestres (IPCC, 2022). Les zones côtières à faible élévation, ou *Low Elevation Coastal Zones* (LECZ), sont définies comme les zones situées à moins de 10 m au-dessus du niveau de la mer et hydrologiquement connectées à la mer (IPCC, 2022).

Selon Bevacqua *et al.* (2018), les littoraux sont particulièrement attractifs pour les populations humaines en raison de leurs atouts économiques, écologiques et paysagers, concentrant ainsi une forte densité d'activités et d'enjeux. La concentration des populations à proximité du littoral est en effet particulièrement élevée à l'échelle mondiale. À partir de données récentes issues de méthodes d'estimation dasymétriques, Cosby *et al.* (2024) estiment qu'environ un milliard de personnes vivaient à moins de 10 km de la côte à la fin de la dernière décennie. Les tendances démographiques littorales varient toutefois selon les régions : l'Amérique du Sud et l'Asie affichent des croissances soutenues, tandis que l'Europe présente des évolutions plus modérées. Cette attractivité se traduit par une urbanisation croissante, parfois rapide et non régulée, qui accentue l'exposition aux aléas marins tout en fragilisant les écosystèmes protecteurs (Bevacqua *et al.*, 2018). Dans ce contexte, l'Afrique se distingue nettement par la rapidité de ses dynamiques littorales : entre 2000 et 2018, elle a enregistré la plus forte croissance des populations résidant dans la zone ultra-côtière, avec une hausse de 66,6 %, soit près de 60 millions d'habitants supplémentaires à moins de 10 km de la côte, traduisant un accroissement significatif des enjeux humains liés aux espaces littoraux sur le continent (Cosby *et al.*, 2024) (Fig. 2).

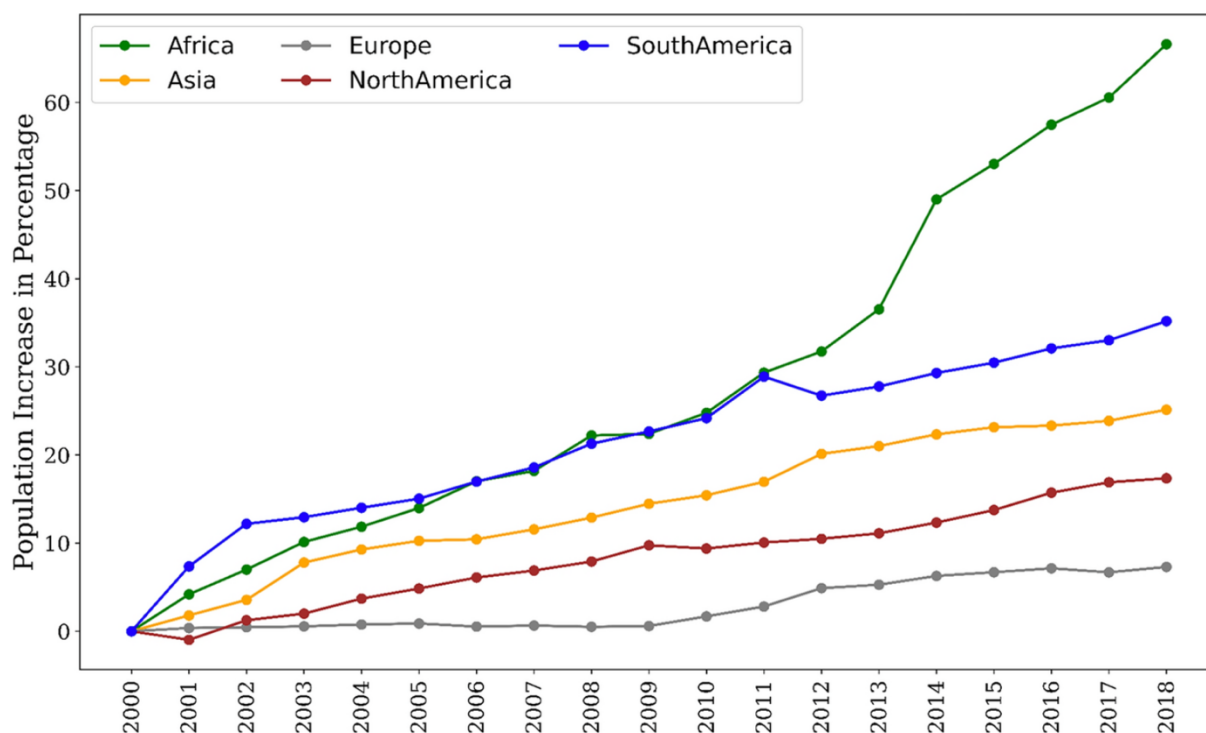


Figure 2. Croissance cumulative de la population continentale ultra-côtière (10 km) sur la période 2000-2018 (Cosby et al., 2024).

II.2.2. L'élévation du niveau de la mer

Parmi les principaux facteurs de pression influençant le risque côtier, l'élévation du niveau de la mer (*Sea Level Rise – SLR*) occupe une place particulière en raison de son caractère global et de ses impacts à long terme. Elle résulte essentiellement de la dilatation thermique des océans et de la fonte des glaciers et calottes polaires dues au réchauffement climatique (IPCC, 2022 ; Rocha *et al.*, 2023).

Les conséquences de cette élévation incluent l'inondation permanente des zones basses, l'amplification des inondations temporaires, l'érosion accélérée des plages et l'intrusion saline dans les aquifères côtiers (Mahapatra *et al.*, 2013). L'intensité et la répartition de ces impacts présentent toutefois une forte variabilité spatiale, liée à des facteurs locaux tels que les mouvements verticaux du sol, la morphologie du littoral ou le régime des vagues (Gornitz *et al.*, 1991).

La figure 3, issue du dernier rapport du GIEC (IPCC, 2021a), montre l'évolution historique et les projections de l'élévation moyenne mondiale du niveau de la mer (*Global Mean Sea Level – GMSL*) selon différents scénarios socio-économiques partagés (*Shared Socioeconomic*

Pathways – SSP). Il est pratiquement certain que le niveau moyen global continuera d'augmenter au XXI^e siècle. Pour 2100, l'élévation prévue varie selon les scénarios : 0,28–0,55 m pour le scénario à très faibles émissions (SSP1-1.9), 0,32–0,62 m pour le scénario à faibles émissions (SSP1-2.6), 0,44–0,76 m pour le scénario intermédiaire (SSP2-4.5) et 0,63–1,01 m pour le scénario à très fortes émissions (SSP5-8.5). À l'horizon 2150, les projections vont de 0,37 à 1,88 m (confiance moyenne). Des élévations supérieures, jusqu'à 2 m en 2100 et 5 m en 2150 sous le scénario SSP5-8.5, ne peuvent pas être exclues en raison des incertitudes liées aux calottes glaciaires (IPCC, 2021b).

Projected global mean sea level rise under different SSP scenarios

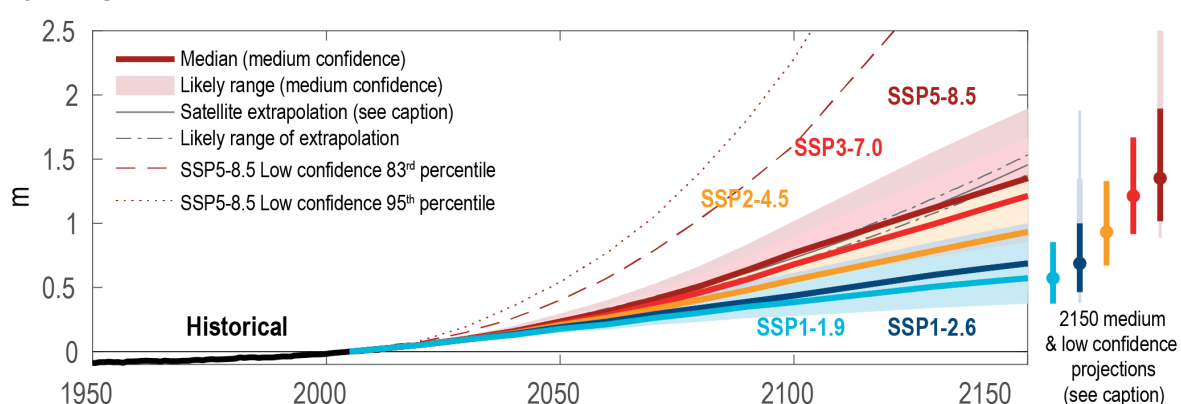


Figure 3. Projection du niveau moyen mondial de la mer selon différents scénarios SSP (IPCC, 2022).

Nicholls et Cazenave (2010) soutiennent que l'ampleur future de l'élévation du niveau de la mer, ses impacts sur les LECZ et la capacité de la société à s'y adapter restent incertains, mais les effets deviennent de plus en plus évidents à mesure que l'élévation induite par le climat augmente.

De plus, les processus liés au changement climatique ne se limitent pas à la seule élévation du niveau de la mer. Ils incluent également une augmentation de la hauteur des vagues extrêmes, ainsi que des changements dans la fréquence et l'intensité des tempêtes. Ces phénomènes, qui interagissent avec la vulnérabilité des côtes amplifient le risque d'érosion et d'inondation sur les littoraux (Asensio-Montesinos *et al.*, 2024).

II.2.3. Les aléas côtiers et leurs impacts

Les risques côtiers désignent les dommages écologiques, sociaux, économiques, fonctionnels et culturels pouvant affecter les zones littorales en raison de leur localisation, et résultent de l'interaction entre plusieurs aléas et la vulnérabilité des populations et infrastructures exposées (Batista, 2018).

Parmi ces aléas, l'érosion constitue un phénomène majeur. Définie comme le recul du trait de côte lié à une perte nette de sédiments ou de substrat, elle se déroule généralement lentement mais peut être fortement accentuée par des événements soudains tels que tempêtes et ondes de submersion (Bevacqua *et al.*, 2018 ; IPCC, 2022).

D'autres aléas, tels que les submersions marines et les tempêtes, interagissent avec la vulnérabilité des systèmes humains et naturels pour produire des risques côtiers. L'intensité et les effets de ces aléas dépendent également de facteurs locaux, comme la morphologie du littoral, les mouvements verticaux du sol et le régime des vagues (Gornitz, 1991).

Ainsi, le risque côtier résulte de l'articulation complexe entre l'exposition des populations et infrastructures, la vulnérabilité des systèmes et la fréquence ou l'intensité des aléas marins et climatiques. L'élévation du niveau de la mer joue ici un rôle central, puisqu'elle amplifie les impacts des autres aléas et accentue la vulnérabilité des LECZ, contribuant à l'intensification du risque global (Mahapatra *et al.*, 2013 ; IPCC, 2022).

II.3. L'évaluation du risque côtier

L'évaluation du risque repose sur la nécessité de tirer des enseignements d'études empiriques afin de renforcer la compréhension des mécanismes qui en sont à l'origine (Oulahen *et al.*, 2019). Traditionnellement, l'évaluation des risques naturels s'appuie sur une approche « hazard-by-hazard », qui analyse les conséquences d'aléas individuels sans fournir une vision intégrée des risques multiples (Gallina *et al.*, 2016). Pour les milieux exposés simultanément à plusieurs impacts climatiques — tels que les zones côtières — les approches dites « multi-risques » permettent de considérer ces aléas conjointement et d'envisager ainsi le risque global (Gallina *et al.*, 2016).

Le chapitre suivant présente d'abord un panorama des principales méthodes d'évaluation du risque côtier, en distinguant les approches basées sur des indices, les systèmes d'aide à la décision et les modèles computationnels dynamiques. Il se concentre ensuite sur l'évolution historique et la diversification des indices côtiers, pour enfin introduire une démarche multi-indices standardisée, qui constitue la méthodologie retenue dans le cadre de cette étude.

II.3.1. Les différentes méthodes d'évaluation

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes ont été développées pour évaluer la vulnérabilité et le risque des zones côtières, en réponse notamment aux impacts du changement climatique et à l'élévation du niveau de la mer (Anfuso *et al.*, 2021 ; Rocha *et al.*, 2023). Ces approches diffèrent par leur complexité, le type de données mobilisées, les échelles spatiales et temporelles d'application, ainsi que par les résultats produits (Rocha *et al.*, 2023 ; Asensio-Montesinos *et al.*, 2024). Néanmoins, quel que soit le choix méthodologique, il est essentiel que les résultats puissent être intégrés dans les processus décisionnels et contribuer à la planification de l'adaptation (Rocha *et al.*, 2023 ; Asensio-Montesinos *et al.*, 2024).

La littérature distingue principalement trois grandes familles de méthodes : les méthodes basées sur des indices, les systèmes d'aide à la décision, et les modèles computationnels dynamiques (Rocha *et al.*, 2023).

II.3.1.1. Méthodes basées sur des indices

La première méthode combine des paramètres qualitatifs et/ou quantitatifs, regroupés généralement en variables physiques, de forçage côtier et socio-économiques, afin de produire un indice ou un indicateur synthétique de vulnérabilité (Rocha *et al.*, 2023 ; Asensio-Montesinos *et al.*, 2024). L'agrégation des variables se fait à l'aide de formules mathématiques et, dans certains cas, d'un système de pondération adapté au contexte étudié. Ces méthodes sont applicables à différentes échelles spatiales et temporelles et ne nécessitent pas de logiciels spécifiques, bien que les systèmes d'information géographique (SIG) soient fréquemment utilisés pour cartographier les résultats (Asensio-Montesinos *et al.*, 2024). Les produits finaux, souvent présentés sous forme de cartes, sont facilement interprétables, y compris par des non-spécialistes (Šimac *et al.*, 2023). Toutefois, un manque de transparence peut exister quant aux modalités de combinaison et de pondération des variables (Šimac *et al.*, 2023).

II.3.1.2. Systèmes d'aide à la décision

Les systèmes d'aide à la décision (*Decision Support System* – DSS) constituent des outils intégrés permettant d'évaluer l'état d'un système sous différents scénarios, en tenant compte des effets potentiels de mesures d'adaptation ou d'atténuation (Rocha *et al.*, 2023 ; Asensio-Montesinos *et al.*, 2024). Ils reposent sur l'intégration de plusieurs modèles environnementaux, d'outils d'analyse et de bases de données (Rocha *et al.*, 2023 ; Anfuso *et al.*, 2021). Les DSS nécessitent une résolution spatiale régionale et utilisent principalement des données climatiques et physiques. Leur mise en œuvre requiert généralement des logiciels spécifiques, tels que DESYCO ou InVEST (Asensio-Montesinos *et al.*, 2024).

II.3.1.3. Modèles computationnels dynamiques

Enfin, il existe également des modèles computationnels dynamiques qui visent à simuler les conditions présentes et futures de processus géophysiques, biologiques ou socio-économiques (Rocha *et al.*, 2023 ; Asensio-Montesinos *et al.*, 2024). Ils peuvent être appliqués à différentes échelles temporelles, tandis que l'échelle spatiale dépend de la configuration du modèle, allant du niveau régional à une couverture globale (Rocha *et al.*, 2023 ; Anfuso *et al.*, 2021). Les modèles computationnels dynamiques sont exigeants en termes de données et d'expertise technique, et reposent sur des logiciels spécialisés tels que DIVA ou SimClim (Asensio-Montesinos *et al.*, 2024). Les résultats sont souvent présentés sous forme de cartes ou de séries temporelles (Asensio-Montesinos *et al.*, 2024 ; Šimac *et al.*, 2023).

II.3.2. Historique et diversification des indices côtiers

Les analyses récentes d'Alcántara-Carrió *et al.* (2024) et d'Asensio-Montesinos *et al.* (2024), soulignent que les méthodes basées sur des indices sont les outils les plus utilisés dans la littérature scientifique pour évaluer le risque côtier.

La première tentative d'évaluation de la vulnérabilité côtière à l'aide d'un indice remonte au début des années 1990 avec le *Coastal Vulnerability Index* (CVI), développé par Gornitz (1991), qui se concentrait sur les caractéristiques physiques des côtes telles que le relief, le type de roche, la morphologie du littoral, l'amplitude des marées et la hauteur des vagues (Rocha *et al.*, 2023). Cette étude, considérée comme une référence dans la littérature, a influencé de nombreuses recherches ultérieures visant à quantifier l'exposition des zones côtières à l'élévation du niveau de la mer et à l'érosion (Šimac *et al.*, 2023).

Au fil des années, des études comme celles de Szlafsztein et Sterr (2007) ou de McLaughlin et Cooper (2010) ont intégré des variables socio-économiques, telles que la population et le revenu, pour mieux refléter la vulnérabilité globale des zones côtières (Šimac *et al.*, 2023). Cette diversification a conduit à une prolifération de méthodes, avec des indices composites, multi-échelles ou modifiés du CVI original, afin de combiner différents paramètres selon les objectifs, les échelles et la disponibilité des données (Rocha *et al.*, 2023). Cependant, cette expansion a également créé une hétérogénéité importante et des incohérences dans la nomenclature et la conception des indices. Le manque d'harmonisation est préoccupant, et malgré des similarités dans le choix des variables, la cohérence entre approches reste faible, surtout pour les indices complexes (Roukounis et Tsihrintzis, 2022 ; Rocha *et al.*, 2023).

Cette diversité d'approches s'explique par la multiplicité des processus côtiers et par la variabilité de leurs caractéristiques dynamiques dans le temps et l'espace, rendant difficile l'établissement d'une classification concise et uniforme (Anfuso *et al.*, 2021). Ainsi, les méthodes développées au cours des trente dernières années illustrent la complexité de l'évaluation de la vulnérabilité côtière et soulignent la nécessité d'une structuration plus claire, ouvrant la voie aux propositions récentes de Rocha *et al.* (2023) détaillées ci-après, visant à harmoniser et standardiser la conception des indices côtiers.

II.3.3. Approche multi-indices standardisée

Rocha *et al.* (2023) proposent un cadre méthodologique unifié fondé sur l'analyse de 37 travaux publiés au cours de la dernière décennie. Cette revue de la littérature synthétise les principales approches existantes et aboutit à un modèle conceptuel visant à standardiser la construction des indices, facilitant ainsi la comparaison des résultats entre études.

Rocha *et al.* (2023) rappellent que, dans sa conception originelle, le *Coastal Vulnerability Index* (CVI) se limite essentiellement à intégrer les forçages côtiers et les caractéristiques physiques du littoral. Dans une logique plus intégrative, un *Coastal Risk Index* (CRI) complet doit combiner non seulement les aspects physiques, mais aussi les dimensions socio-économiques et les dommages potentiels. Les auteurs soulignent que cette distinction est souvent mal appliquée dans la littérature, certaines études qualifiant de CRI des approches qui correspondent

en réalité à un CVI, et, plus rarement, l'inverse, ce qui entretient la confusion et accentue l'hétérogénéité des méthodes.

Pour surmonter ces imprécisions, Rocha *et al.* (2023) proposent que le calcul d'un CRI combine systématiquement quatre composantes : les forçages côtiers, la composante physique, la composante socio-économique et les dommages potentiels. Les forçages côtiers regroupent les pressions naturelles exercées sur le littoral, telles que l'élévation du niveau de la mer, les conditions de houle, les tempêtes, les surcotes et les marées extrêmes. La composante physique décrit les caractéristiques géomorphologiques et structurelles du littoral, notamment la typologie des côtes, la pente, la distance au rivage, la dynamique d'érosion ou d'accrétion, la présence de protections côtières ou encore de systèmes de drainage. La composante socio-économique intègre des variables telles que la densité et la répartition de la population, les infrastructures, les réseaux routiers, l'occupation des sols, les sites écologiquement sensibles ou le patrimoine culturel. Enfin, la catégorie des dommages potentiels prend en compte la valeur économique des biens exposés, le produit intérieur brut local ou régional, ainsi que l'importance stratégique d'activités économiques comme le tourisme (Fig. 4).

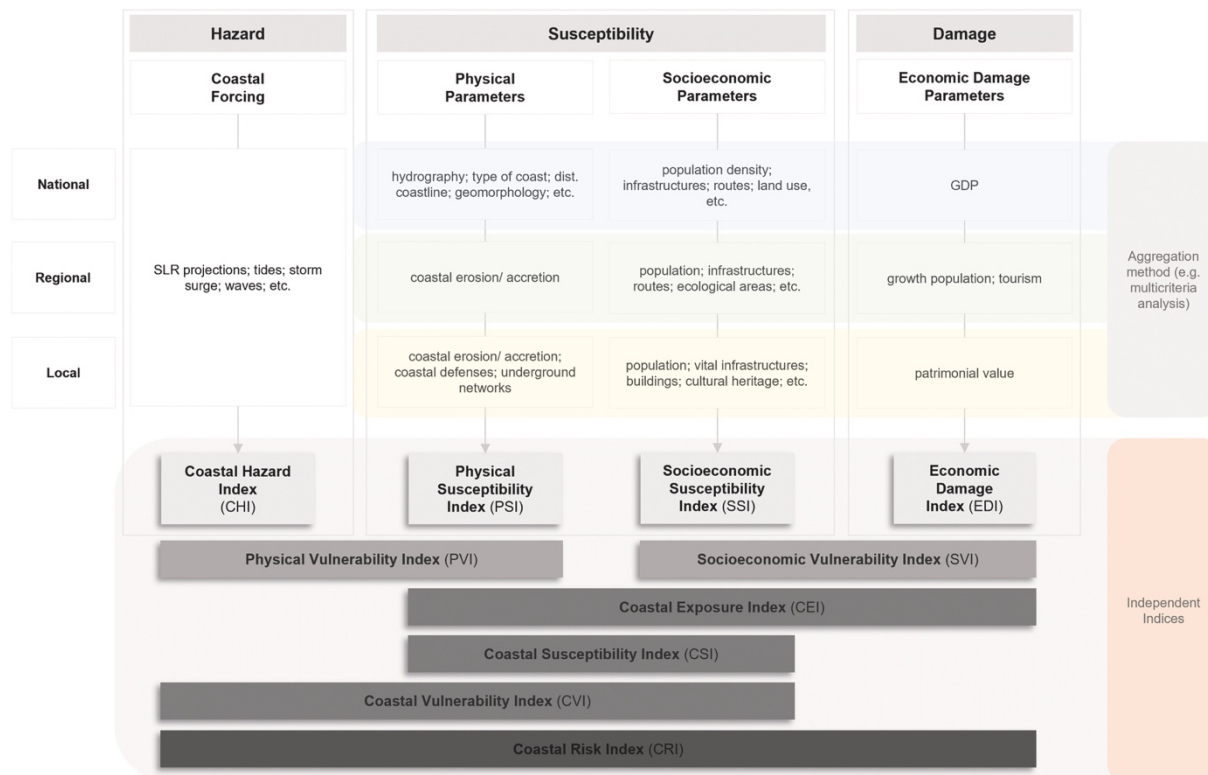


Figure 4. Approche multi-indices du risque côtier standardisée (Rocha *et al.*, 2023).

État de l'art

La mise en œuvre de cette approche repose sur un enchaînement méthodologique en cinq étapes. Elle commence par l'identification des variables pertinentes pour chacune des quatre composantes, en fonction de l'échelle de l'étude, du contexte géographique, des processus côtiers dominants, et des données disponibles. La phase suivante consiste à rassembler et préparer ces éléments, à partir de sources variées telles que la télédétection, les relevés *in situ*, les statistiques officielles ou les bases géospatiales, en veillant à les formater pour assurer leur compatibilité. Les variables sont ensuite normalisées, c'est-à-dire transformées sur une échelle commune (souvent de 0 à 1 ou de 1 à 5) pour permettre leur comparaison, à l'aide de méthodes statistiques ou de seuils prédéfinis. Cette étape est suivie d'une pondération et d'une agrégation, qui consistent à attribuer éventuellement des poids aux variables ou aux composantes selon leur importance relative dans le contexte étudié. Les valeurs ainsi pondérées sont ensuite combinées pour obtenir des indices indépendants propres à chacune des quatre catégories (forçages côtiers, composante physique, composante socio-économique et dommages potentiels). La méthodologie proposée par Rocha *et al.* (2023) prévoit également la possibilité de combiner deux ou trois catégories pour produire d'autres indices intermédiaires correspondant à différents concepts du risque côtier, avant d'aboutir, le cas échéant, à un indice global intégrant les quatre composantes. Ce fonctionnement modulaire permet à une étude qui ne considère pas l'ensemble des catégories — par exemple en omettant les forçages côtiers — de nommer l'indice obtenu de manière cohérente. Les dénominations précises de ces indices sont présentées dans la figure 4. Enfin, la dernière étape consiste à valider les résultats en les confrontant à des données historiques d'impacts ou à des observations de terrain, avant de produire des cartes et autres représentations spatiales permettant d'informer les décideurs et gestionnaires (Rocha *et al.*, 2023).

En structurant le CRI autour de quatre composantes clairement définies et en décrivant un processus méthodologique standardisé, Rocha *et al.* (2023) offrent un cadre de référence solide pour l'analyse du risque côtier. Cette proposition contribue à réduire la confusion terminologique et améliore la comparabilité des études, tout en renforçant la pertinence des analyses de risque côtier à différentes échelles spatiales et temporelles.

III. ÉTAT DES LIEUX

La section suivante a pour but de dresser un bref état des lieux, en décrivant la zone d'étude ainsi que les dynamiques et enjeux détaillés dans la littérature.

III.1. La zone d'étude

La commune de Kafountine se trouve à l'extrême sud-ouest du Sénégal, dans la région naturelle de Basse-Casamance. Elle relève de la région administrative de Ziguinchor, plus précisément de l'arrondissement de Kataba 1, au nord-ouest du département de Bignona (Commune de Kafountine, 2021 ; MPIMP, 2024). Elle est limitée au nord par la commune de Kataba 1, au sud par le fleuve Casamance, à l'est par le marigot de Diouloulou, et à l'ouest par l'Océan Atlantique (Bocoum, 2025). La commune couvre une superficie totale de 908 km², avec une largeur moyenne d'environ 20 km et une longueur d'environ 50 km. Elle s'étend entre les coordonnées approximatives de 12°48'N et 13°03'N de latitude nord, et 16°42'O et 16°50'O de longitude ouest (Fig. 5).

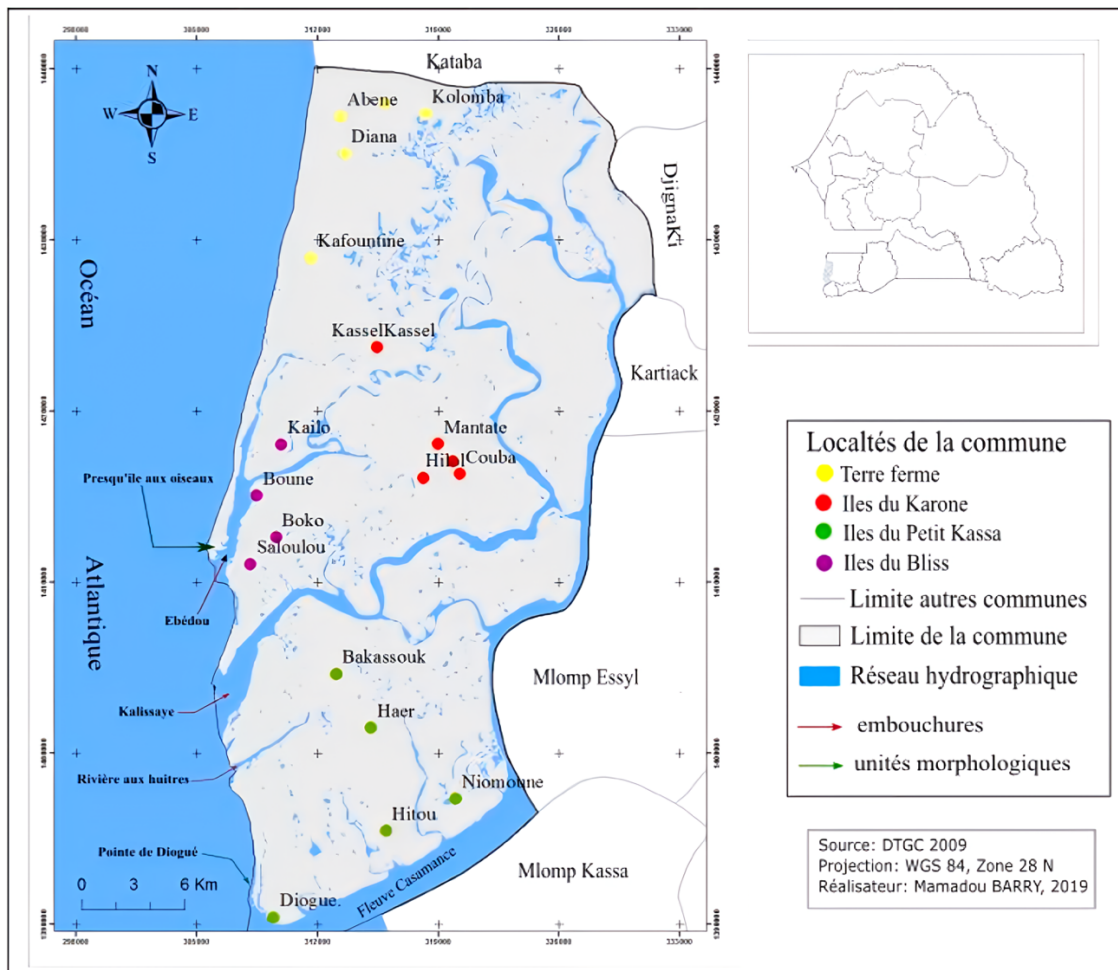


Figure 5. Localisation de la commune de Kafountine (Barry, 2019).

État des lieux

Le territoire communal de Kafountine se structure en deux grandes zones géographiques. La première, insulaire, regroupe quatorze villages répartis sur un ensemble d'îles parmi lesquelles Kailo, Boune, Boko, Saloulou, Kassel, Mantate, Couba, Coumbaloulou, Bakassouk, Hilol, Haere, Diogué, Niomoune et Hitou. Cette portion du territoire représente la majeure partie de la superficie communale, avec 832 km², soit 91,63 % du total. La seconde zone, continentale, comprend les cinq villages de Kafountine, Diannah, Albadar, Abéné et Colomba. Elle couvre une superficie de 76 km², ce qui correspond à 8,37 % du territoire (Fig. 5) (PDC Kafountine, 2021 ; MPIMP, 2024 ; Bocoum, 2024).

Le village de Kafountine, situé dans la partie continentale, au nord-ouest de la commune et en bordure de l'océan Atlantique, en constitue le chef-lieu.

La figure 6 représente l'occupation du sol dans la commune de Kafountine. La commune est recouverte à 44 % de mangroves, situées dans la partie sud, en basse altitude. Les zones humides représentent respectivement 25 et 23 % de la commune. Les plages de sable sont représentées par la catégorie "surfaces stériles" et représentent un peu moins de 5 % de la commune. Enfin, notons que les surfaces bâties ne représentent que 0,53 % de la commune et sont très majoritairement concentrées au nord. Cette dualité dans le territoire est bien visible dans la carte à la figure 6.

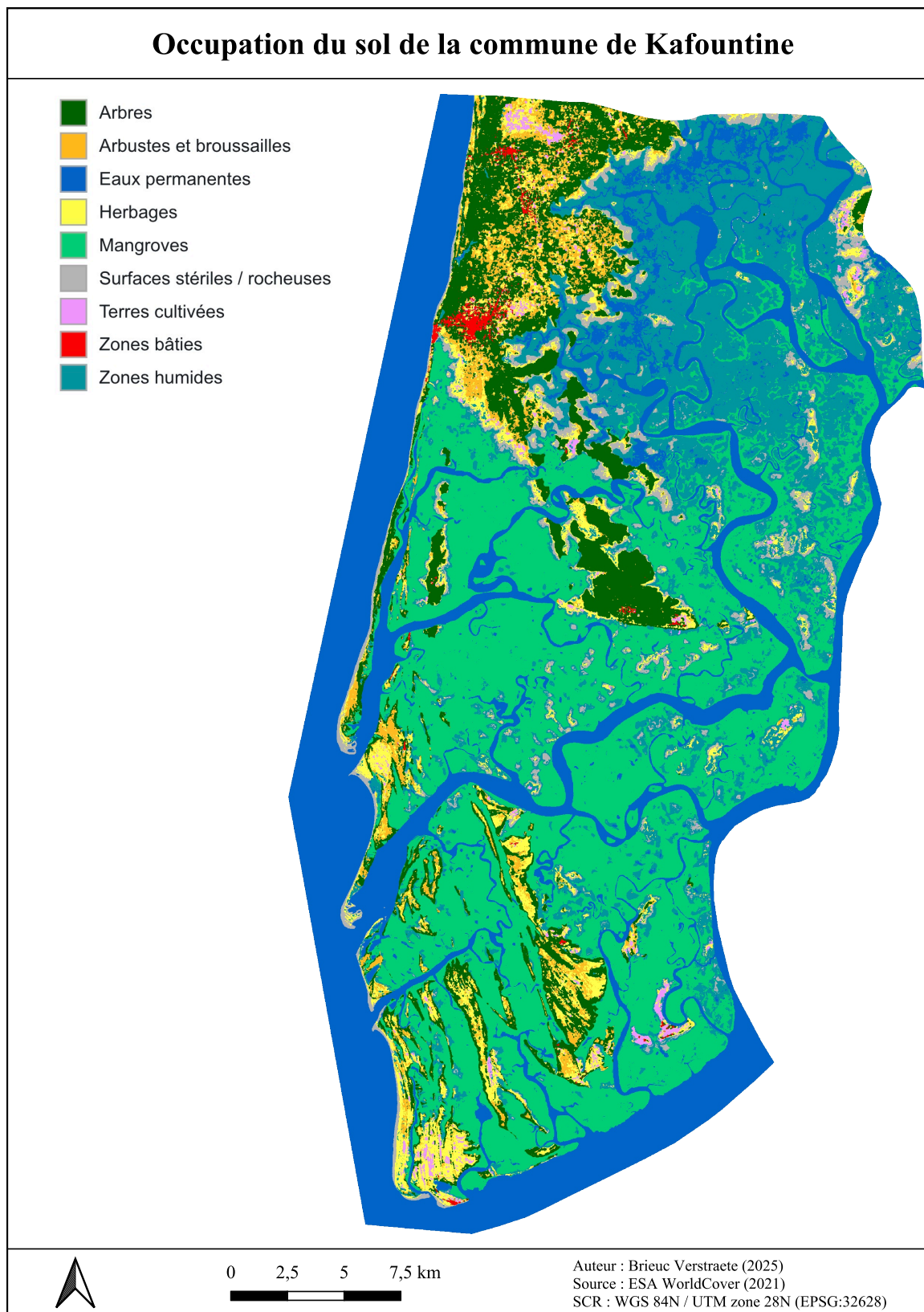


Figure 6. Carte de l'occupation du sol de la commune de Kafountine (ESA WorldCover 2021).

III.2. Dynamiques d'érosion côtière à Kafountine

La thèse de doctorat menée par Faye (2010) a démontré que l'érosion côtière n'est pas nouvelle sur le littoral de la commune. En effet, la carte à la figure 7 qui compare les traits de côte de deux cartographies anciennes de 1829 et 1927 montre un retrait marqué du trait de côte de la commune, il y a déjà 1 siècle.

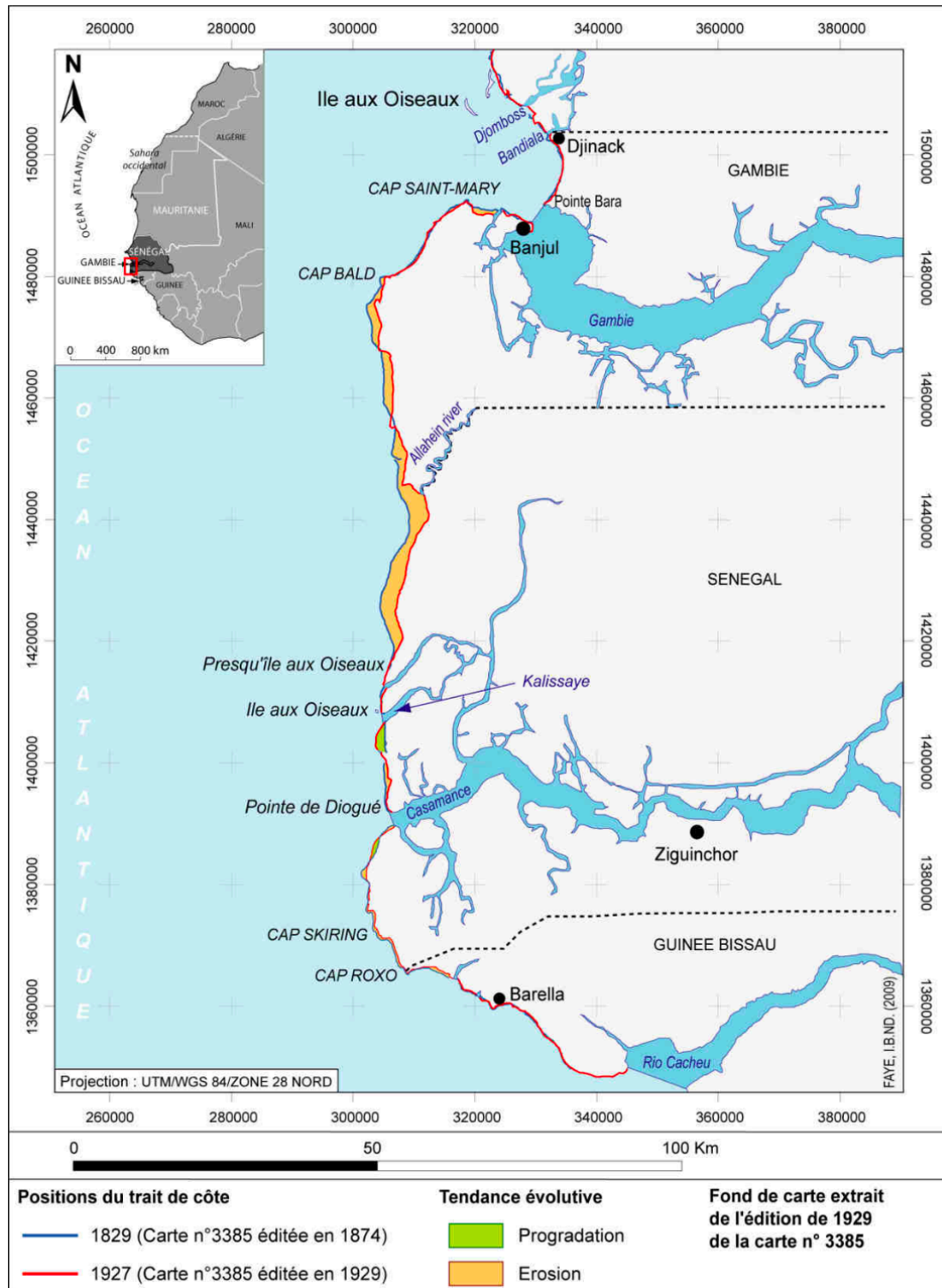


Figure 7. Évolution du trait de côte de l'estuaire de la Gambie au Rio Cacheu sur les éditions de 1874 et 1929 de la carte n°3385 du SHOM (Faye, 2010).

Hypothèses et objectifs

De nombreuses recherches sur la cinématique du trait de côte ont déjà été menées dans la zone d'étude. Elles sont représentées sur la figure suivante en fonction de l'étendue spatiale étudiée.

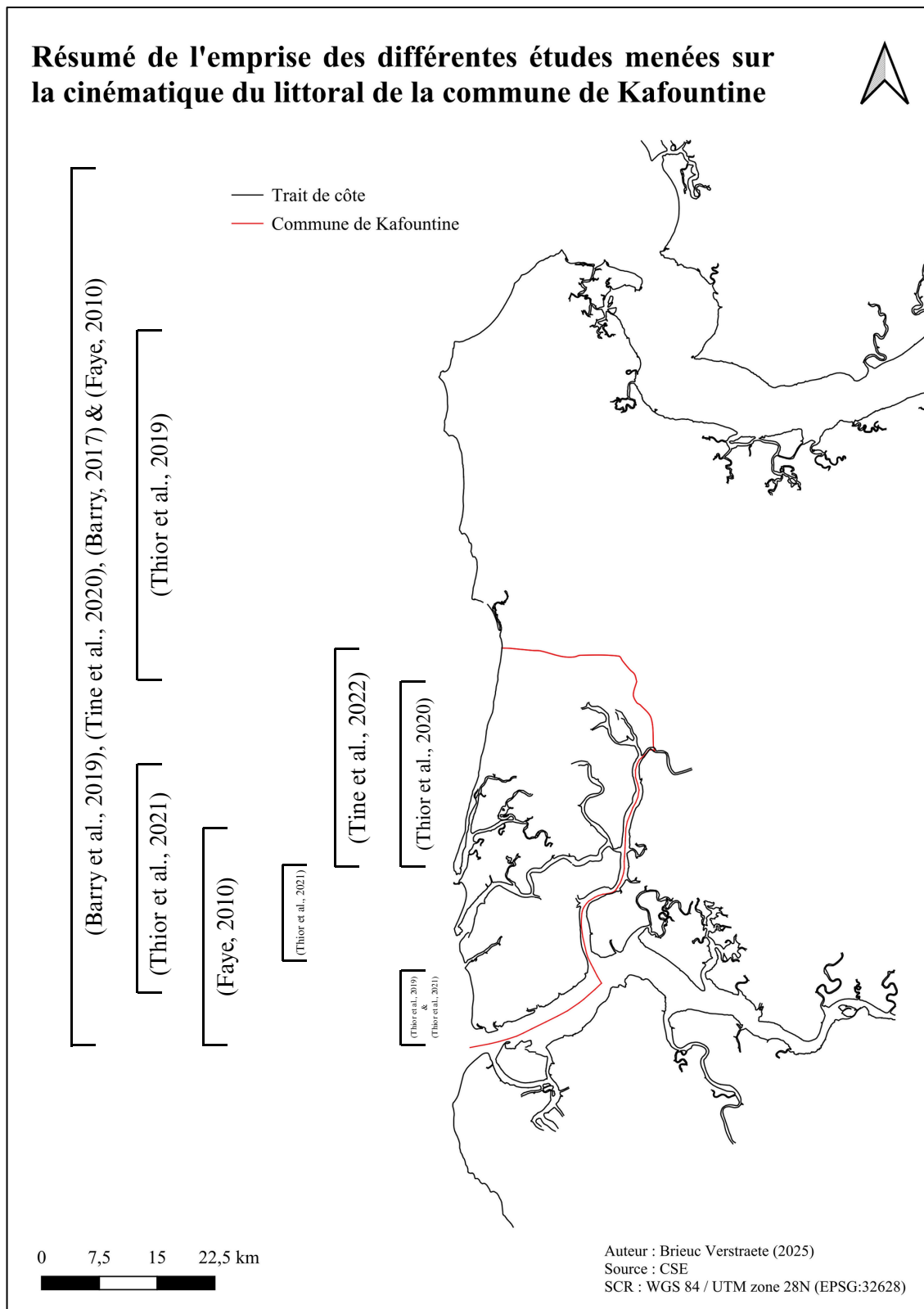


Figure 8. Résumé de l'emprise des différentes études menées sur la cinématique du trait de côte de la commune de Kafountine.

État des lieux

Enfin, notons l'influence de la dérive littorale nord-sud qui façonne les pointes sableuses sur la côte (Thior, 2019) (Fig. 9).

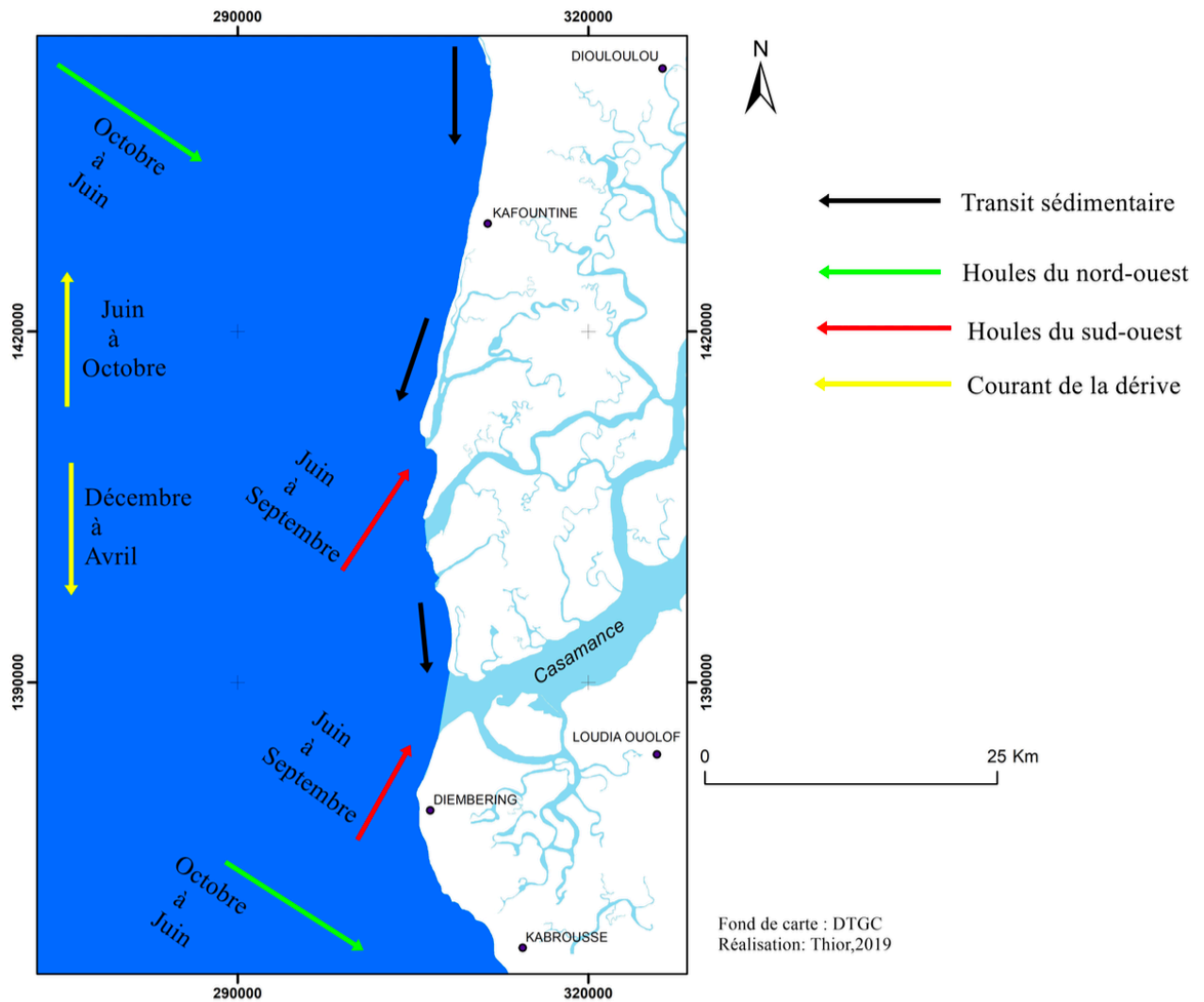


Figure 9. Les houles du nord et du sud en Casamance (Thior, 2019).

IV. HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS

Des travaux fondés sur des indices de vulnérabilité ou de risque côtier ont déjà été menés au Sénégal (Bakhoun *et al.*, 2018 ; Sakho *et al.*, 2022 ; Kane, 2023 ; Mendoza *et al.*, 2023 ; Cissé *et al.*, 2024 ; Faye *et al.*, 2024 ; Pouye *et al.*, 2024) et dans certains pays limitrophes, comme en Gambie (Gomez *et al.*, 2025) ou en Guinée-Bissau (Lopes *et al.*, 2022). Toutefois, aucune étude n’a, à notre connaissance, développé un tel indice spécifiquement pour la commune de Kafountine, malgré l’importance de ses enjeux littoraux. Le premier objectif est donc d’élaborer un indice de risque côtier adapté à ce territoire, en s’appuyant sur le cadre théorique et méthodologique présenté en Section II, afin de fournir un outil de diagnostic tenant compte des caractéristiques locales. Nous supposons que le quai de pêche de Kafountine, soumis à de multiples pressions, se distinguera par un niveau de risque plus élevé.

Ce travail vise également à explorer le potentiel d’une nouvelle base de données, la *Global Coastal Characteristics* (GCC), qui rassemble 80 indicateurs géophysiques, hydrométéorologiques et socio-économiques le long des côtes mondiales libres de glace (Athanasίου *et al.*, 2024a). Jusqu’à présent, son utilisation dans l’élaboration d’indices de risque côtier demeure marginale : Vanhanen (2024) et Espinoza Villacís *et al.* (2025) l’ont mobilisée uniquement pour estimer la pente, tandis que Jouanno *et al.* (2025) s’en sont servis pour caractériser la présence de population et de mangroves. La présente étude propose une exploitation plus étendue, intégrant un nombre significatif de ces indicateurs au sein d’un *Coastal Risk Index* (CRI) spécifiquement adapté à la zone d’étude — une première application, à notre connaissance, à cette échelle et avec un tel degré d’intégration.

Enfin, nous faisons l’hypothèse que les spécificités du territoire présentées en Section III conduisent à une distribution spatiale hétérogène du risque. Nous prévoyons qu’une analyse exploratoire des facteurs du CRI permettra de mettre en évidence des profils de risque distincts, reflétant ces réalités concrètes. Ces profils devraient ainsi contribuer à une meilleure caractérisation des zones à risque en fonction de leurs spécificités physiques et socio-économiques.

V. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Cette section détaille la structure du *Coastal Risk Index* (CRI), les sources de données, l'échelle d'analyse, les facteurs sélectionnés, ainsi que la méthode de calcul des indices qui structurent le CRI de Kafountine. La description des analyses statistiques mises en œuvre, ainsi que des outils de visualisation et de synthèse utilisés, vient compléter cette description.

V.1. Structure du CRI de Kafountine

Dans ce premier chapitre, nous proposons une adaptation de l'approche multi-indices standardisée proposée par Rocha *et al.* (2023), détaillée dans l'état de l'art, pour construire le CRI de Kafountine.

Nous avons choisi de regrouper les catégories 3 et 4 proposées par Rocha *et al.* (2023) – respectivement les paramètres socio-économiques et les paramètres de dommages économiques – en une seule catégorie intitulée « caractéristiques socio-économiques » (Fig. 10). Comme le soulignent Anfuso *et al.* (2021), « les indices de vulnérabilité côtière sont parfois difficiles à calculer en raison de l'absence de données de base sur le secteur côtier à analyser, en particulier dans les pays en développement ». Cette contrainte explique notre choix : dans un contexte comme celui d'une commune rurale du Sénégal, la quantification des dommages économiques demeure particulièrement limitée (Fig. 10).

<i>Facteurs</i>	<i>Forçages côtiers (X)</i>	<i>Caractéristiques physiques (Y)</i>	<i>Caractéristiques socio-économiques (Z)</i>
Indices intermédiaires (niveau 1)	Coastal Forcing Index (CFI)	Physical Susceptibility Index (PSI)	Socioeconomic Susceptibility Index (SSI)
Indices intermédiaires (niveau 2)	Coastal Hazard Index (CHI)		
		Coastal Vulnerability Index (CVI)	
Indice global	Coastal Risk Index (CRI)		

Figure 10. Schéma conceptuel du Coastal Risk Index (CRI) de Kafountine : catégories de facteurs et indices associés.

Matériels et méthodes

La première composante de notre CRI correspond dès lors aux forçages côtiers, qui rassemblent les paramètres physiques liés aux dynamiques marines et atmosphériques susceptibles de générer un aléa. La seconde composante regroupe les caractéristiques physiques du littoral, qui traduisent la susceptibilité du milieu aux impacts des forçages. La troisième composante, qui correspond aux aspects socio-économiques du littoral, représente la vulnérabilité des populations et des infrastructures exposées. Nous avons choisi d'adopter une nomenclature pour faciliter l'identification des trois composantes et de leurs indices respectifs. Les trois composantes se voient respectivement attribuer les lettres *X*, *Y*, et *Z* (Fig. 10).

Cette simplification engendre une diminution du nombre d'indices intermédiaires, que nous avons également décidé de renommer pour d'avantage de cohérence avec les concepts théoriques du risque présentés dans l'état de l'art (Section II). Les dénominations ont toutefois été maintenues en anglais, en vue d'une meilleure harmonisation au regard de la littérature. Concrètement, il est proposé de nommer l'indice relatif aux forçages côtiers "*Coastal Forcing Index* (CFI)", l'indice relatif aux caractéristiques physiques "*Physical Susceptibility Index* (PSI)", et l'indice relatif aux caractéristiques socio-économiques "*Socioeconomic Susceptibility Index* (SSI)". Le terme "*Susceptibility*" a été retenu car il renvoie, dans les études de gestion du risque, à la prédisposition physique, sociale et environnementale à subir des dommages (Cardona *et al.*, 2012). Enfin, ces indices calculés directement à partir des facteurs sont considérés comme des "indices intermédiaires de niveau 1" (Fig. 10).

L'agrégation de ces trois premiers indices permet d'obtenir deux "indices intermédiaires de niveau 2". Le "*Coastal Hazard Index* (CHI)" est défini comme la résultante du CFI et du PSI combinés, et caractérise l'aléa. Le "*Coastal Vulnerability Index* (CVI)" est défini comme la combinaison du PSI et du SSI, et caractérise la vulnérabilité (Fig. 10). Notons que la troisième composante du risque, l'exposition, n'est pas associée à un indice spécifique. Elle est toutefois intégrée de manière implicite dans notre analyse, puisque l'évaluation repose sur des données géolocalisées traitées dans des outils SIG.

Enfin, le "*Coastal Risk Index* (CRI)" résulte de la combinaison des trois indices intermédiaires de niveau 1, évitant ainsi la double pondération que la combinaison du CHI et du CVI aurait générée (Fig. 10). Cette restructuration permet dès lors une compréhension plus fine et modulaire du risque, en distinguant clairement ses composantes.

V.2. Les sources de données

La principale source de données utilisée pour la construction du CRI de Kafountine est la base Global Coastal Characteristics (GCC), qui constitue une compilation géoréférencée de nombreuses données côtières issues de bases en libre accès (Athanasiou *et al.*, 2024a). Pour compléter ou affiner certaines informations manquantes ou imprécises dans la GCC, trois autres sources de données accessibles librement ont également été mobilisées : Copernicus Marine Service (CMEMS), Google Earth Pro et OpenStreetMap (OSM). Ainsi, quatre jeux de données géoréférencées en libre accès ont été exploités dans le cadre de cette étude, garantissant la cohérence et la reproductibilité de la méthodologie.

V.2.1. Global Coastal Characteristics

La base de données Global Coastal Characteristics (GCC) constitue une nouvelle ressource scientifique en libre accès, développée par Athanasiou *et al.* (2024). Elle fournit un ensemble complet de 80 indicateurs géophysiques, hydrodynamiques et socio-économiques relatifs aux zones côtières. Les indicateurs couvrent des thématiques variées telles que la géomorphologie, l'élévation, l'occupation du sol, la végétation, la présence de plages sableuses, ainsi que des paramètres hydrométéorologiques comme le niveau marin, la houle, les précipitations ou la température. Cette richesse d'information fait de la GCC un outil particulièrement utile pour l'évaluation des risques côtiers et la planification territoriale. Elle est accessible librement via la plateforme Zenodo, garantissant la transparence et la reproductibilité des analyses (Athanasiou *et al.*, 2024b).

Pour offrir cette diversité d'informations, la GCC intègre 18 bases de données géospatiales en libre accès, disponibles sous format raster ou vecteur, couvrant un large éventail d'informations relatives aux environnements côtiers. Cette diversité inclut notamment des données topographiques (DeltaDTM, GEBCO 2023 Grid), d'occupation du sol (ESA WorldCover), de présence d'eau (JRC Water Occurrence), de typologie côtière (Global Coastal Type Classification) ou encore de milieux humides (Global Occurrence of Saltmarshes and Mangroves). Les conditions océaniques et atmosphériques sont renseignées via des produits de modélisation comme ERA5 ou GTSM v3.0. Des composantes socio-économiques viennent compléter cet ensemble, avec des données sur la population (WorldPop), le produit intérieur brut (World Bank GDP Dataset, Gridded Global GDP), ou les infrastructures critiques (World Port Index, Global Airport Database, gROADS v1, Global Railways). L'annexe 1 détaille

Matériels et méthodes

l'ensemble des sources utilisées par la GCC, en précisant leur type (vecteur ou raster), leur description, leur objectif et la référence associée (Athanasίου *et al.*, 2024a).

La méthodologie de construction de cette base globale repose sur quatre grandes étapes qui seront décrites ci-après. L'ensemble du processus méthodologique de la GCC est synthétisé dans l'organigramme présenté en annexe 2 (Athanasίου *et al.*, 2024a).

La première étape consiste en la génération automatique de transects côtiers. Au total, environ 730 000 profils perpendiculaires ont été générés à l'échelle mondiale à partir du trait de côte fourni par OSM. Ces profils sont espacés régulièrement tous les 1 km. Chaque transect s'étend sur 8 km répartis équitablement entre la mer (4 km) et les terres (4 km) (Fig. 11). Une zone tampon de 500 m est créée de part et d'autre de la portion terrestre afin de faciliter les extractions spatiales.

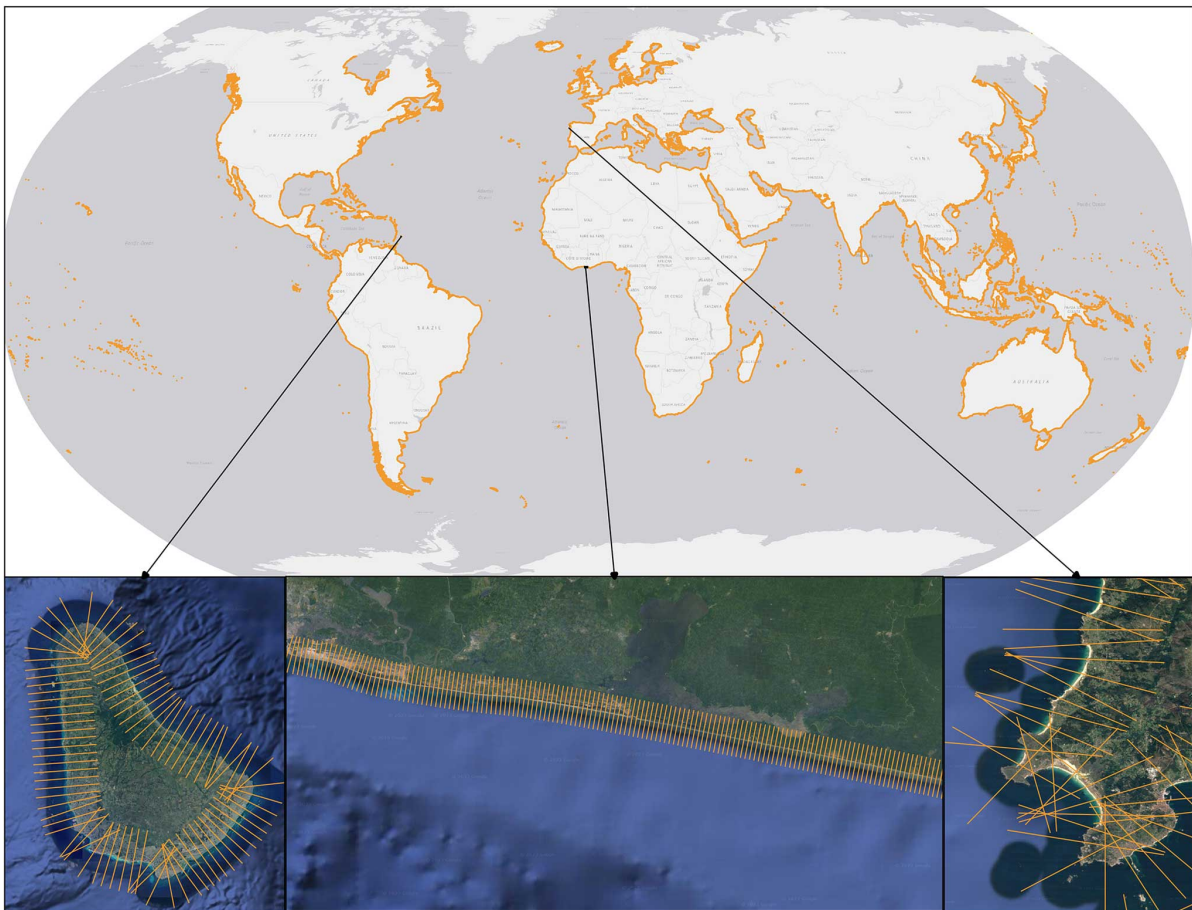


Figure 11. Couverture mondiale du système de transects (en haut). Zoom sur la Barbade (en bas à gauche). Zoom sur le Ghana (en bas au centre). Zoom sur la côte ouest de l'Espagne (en bas à droite) (Données cartographiques © Google Maps 2018) (Athanasίου *et al.*, 2024a).

Matériels et méthodes

La deuxième étape concerne l'extraction des données raster, réalisée soit à l'aide du profil le long de chaque transect, soit par le calcul de statistiques zonales à l'intérieur de la zone tampon terrestre. Ces opérations permettent de résumer des données spatialement continues (telles que l'occupation du sol, l'élévation ou les conditions océaniques) en indicateurs synthétiques rattachés à chaque transect. Cette méthode d'acquisition de données est détaillée à la figure 12 (Athanasίου *et al.*, 2024a).

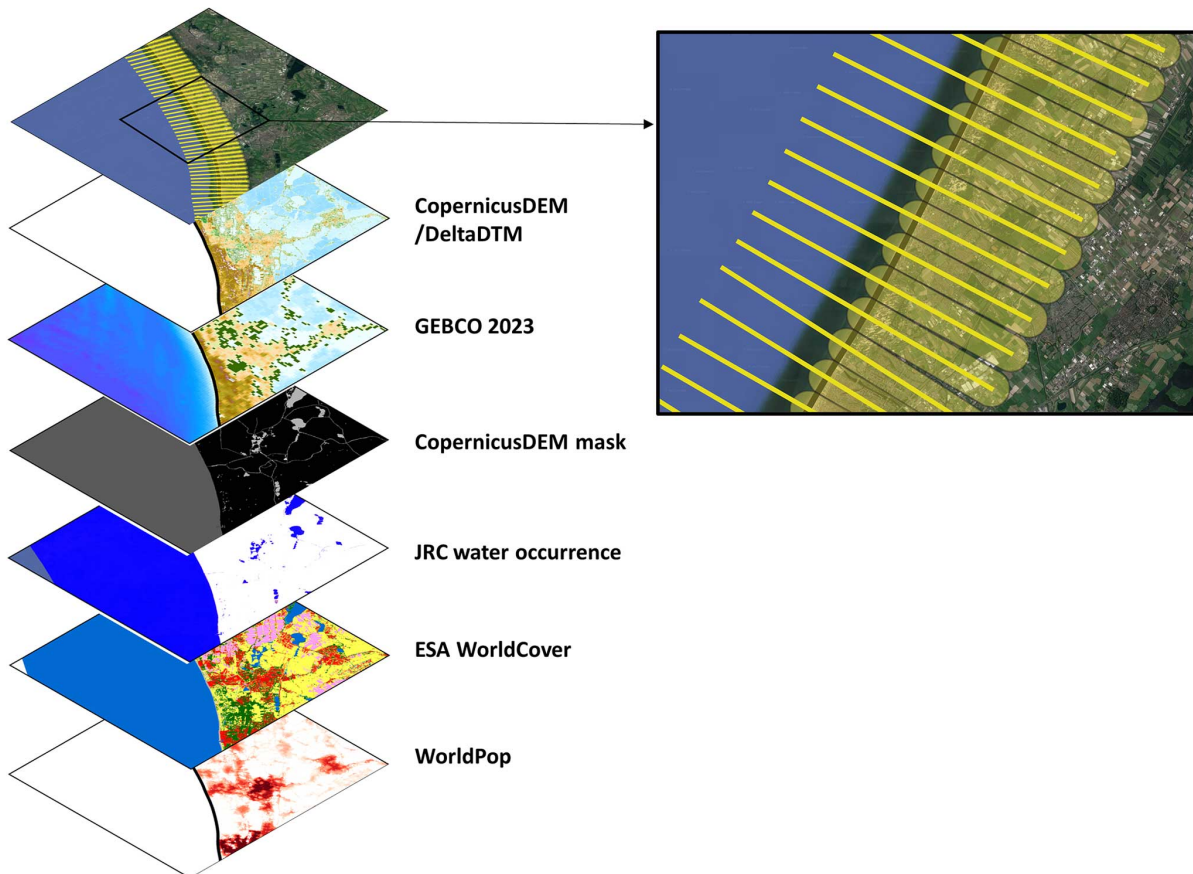


Figure 12. Données rasters utilisés pour l'extraction des informations par transect. Les transects (lignes jaunes) correspondent aux profils extraits, tandis que les zones tampons (surfaces jaunes) délimitent les zones d'analyse statistique zonale (Données cartographiques © Google Maps 2018) (Athanasίου *et al.*, 2024a).

La troisième étape consiste à intégrer les données vectorielles en appliquant des méthodes adaptées au type de géométrie de chaque base de données. Pour les entités ponctuelles, comme les ports, une recherche de proximité est effectuée à l'aide d'un *buffer* autour du centroïde du transect. Pour les entités linéaires, telles que les routes, un test d'intersection est réalisé. Certaines données sont aussi intégrées par interpolation pondérée par la distance. Ces méthodes sont illustrées à la figure 13 (Athanasίου *et al.*, 2024a).

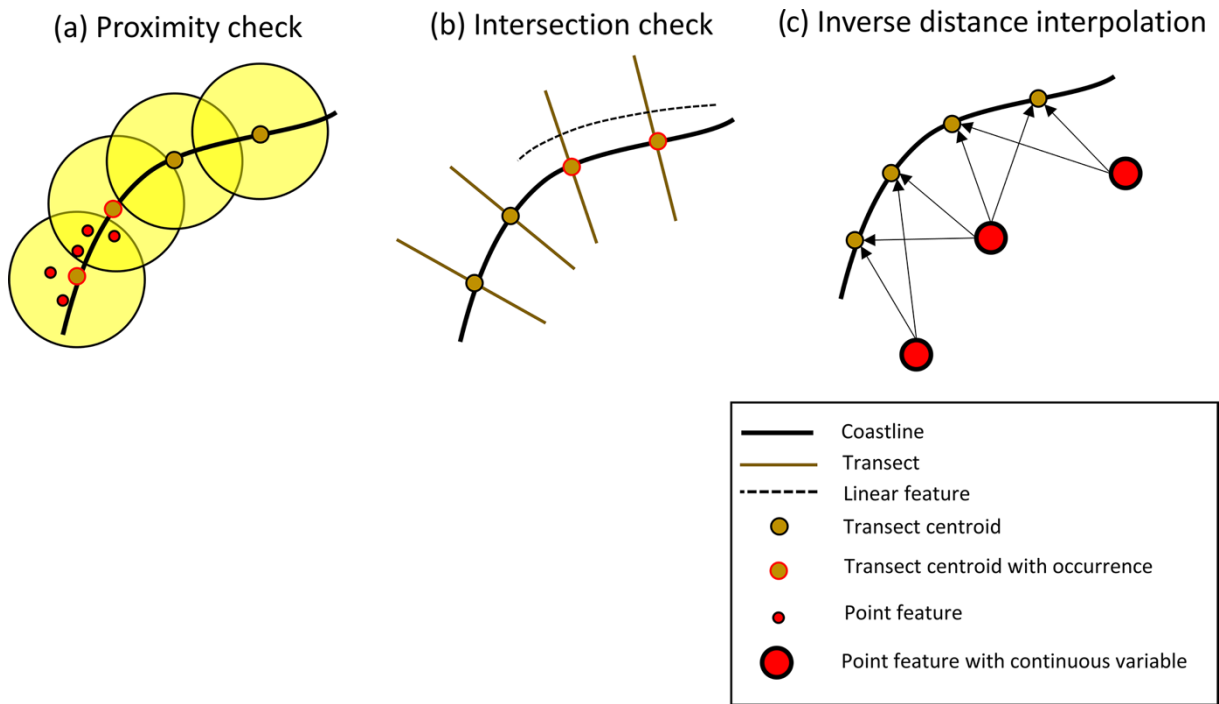


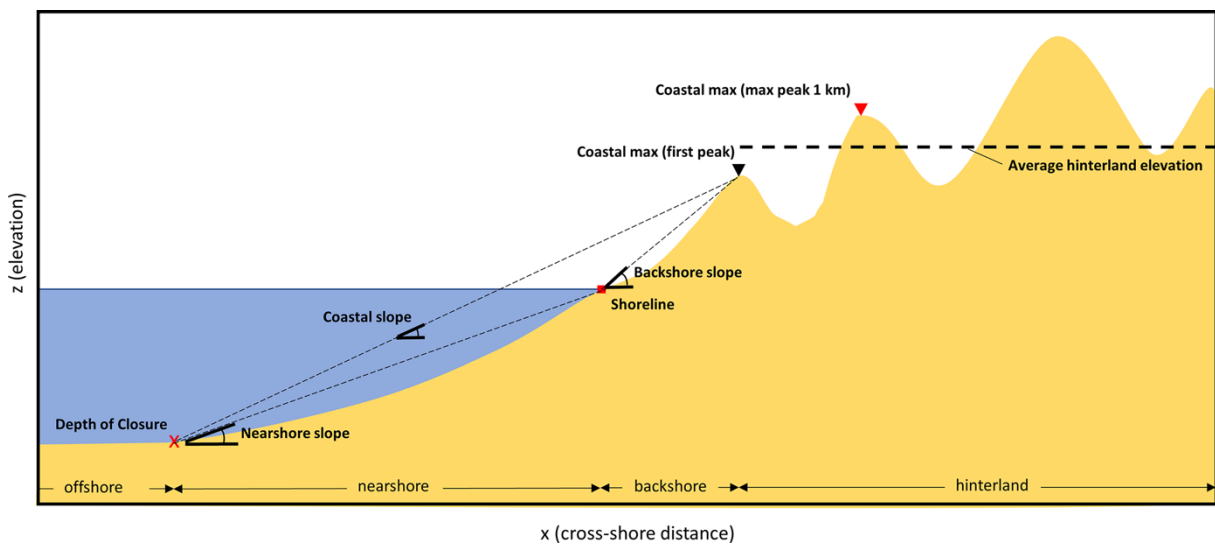
Figure 13. Schéma des trois méthodes utilisées pour échantillonner les données vectorielles le long des transects, illustré sur un littoral type comportant quatre transects : (a) vérification de la proximité à partir d'une zone tampon autour du centroïde du transect ; (b) vérification d'intersection avec des entités linéaires ; (c) interpolation par distance inverse à partir des deux points les plus proches (Athanasίου *et al.*, 2024a).

La dernière étape de la construction de la GCC consiste à générer des profils topographiques le long de chaque transect afin d'en extraire des indicateurs géophysiques essentiels à la caractérisation du littoral. Pour créer ces profils d'élévation continus, qui incluent parties submergée et subaérienne, une fusion des données topographiques (Copernicus DEM et DeltaDTM) et bathymétriques (GEBCO) a été réalisée. Le processus a utilisé le raster de couverture terrestre de l'ESA pour définir précisément la ligne de rivage. Celle-ci a été identifiée comme le point le plus en mer où le profil d'élévation croise la valeur de 0 mètre, dans une fenêtre de 1 km autour du centre du transect (Athanasίου *et al.*, 2024a).

Ensuite, des points de référence clés ont été identifiés pour délimiter les zones du profil. Le *Depth of Closure*, qui représente la profondeur au-delà de laquelle les changements du fond marin sont négligeables, a été estimée par interpolation de données issues de l'étude d'Athanasίου *et al.* (2019). Vers l'intérieur des terres, deux maxima côtiers ont été localisés pour servir de proxy au niveau de protection local contre les inondations : le premier pic d'élévation rencontré (*Coastal max (first peak)*) et le pic d'élévation maximal dans une fenêtre de 1 km à l'intérieur des terres (*Coastal max (max peak 1 km)*) (Athanasίου *et al.*, 2024a).

Matériels et méthodes

Des zones et des indicateurs ont été définis à partir de ces données de référence et les pentes ont été calculées pour chaque zone spécifique. La "*Nearshore slope*" est la pente entre le *Depth of Closure* et le rivage. La "*Backshore slope*" est la pente entre le rivage et le premier pic d'élévation. Enfin, la "*Coastal slope*" est la pente de la côte définie pour l'ensemble de l'espace compris entre le *Depth of Closure* et le *Coastal max (first peak)*. L'arrière-pays (*Hinterland*), défini comme l'intérieur des terres à partir du premier pic d'élévation, a également servi à extraire des indicateurs, notamment son élévation moyenne et sa variance (Fig. 14) (Athanasίου *et al.*, 2024a).



Pour chaque transect, deux profils d'élévation ont été générés à partir du Copernicus DEM et du DeltaDTM, avec extraction des indicateurs correspondants et assignation de signaux d'avertissement en cas d'anomalies. Pour les analyses réalisées dans ce travail, nous avons retenu uniquement les données du DeltaDTM, corrigées des effets liés à la végétation et l'urbanisation, garantissant ainsi une meilleure fiabilité des données (Athanasίου *et al.*, 2024a).

Les 80 indicateurs générés grâce à ces 4 étapes ont été regroupés en trois grandes catégories : les indicateurs géophysiques (présence de sable ou de végétation, caractéristiques de forme du profil, couverture terrestre), les indicateurs hydrométéorologiques et météorologiques (niveau marin, conditions de houle au large) et les indicateurs socio-économiques (population, PIB, présence d'infrastructures essentielles) (Fig. 15) (Athanasίου *et al.*, 2024a).

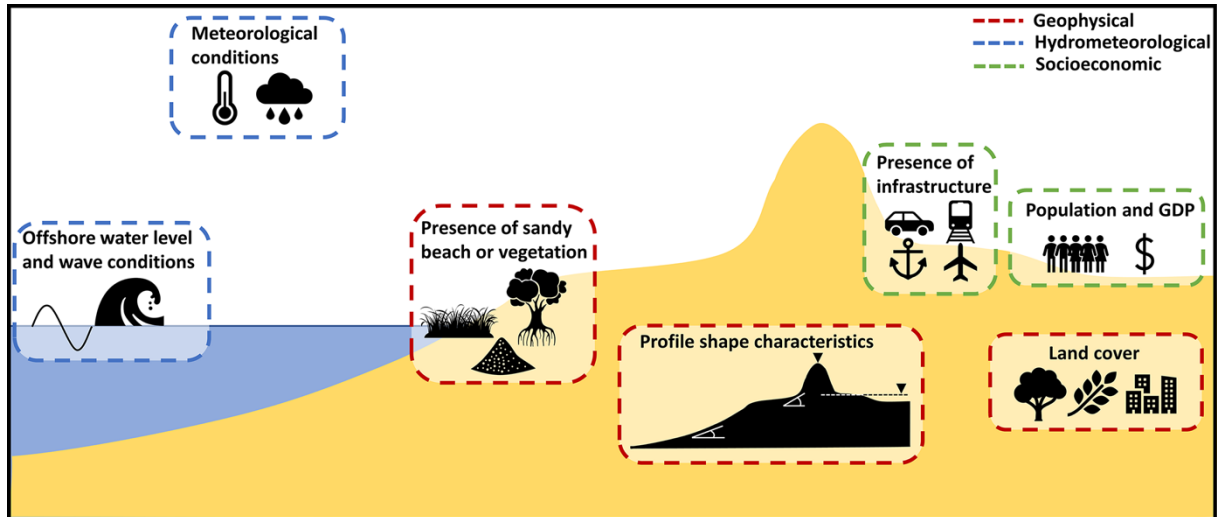


Figure 15. Aperçu des groupes d'indicateurs de la GCC extraits par transect à l'échelle mondiale, couvrant des aspects géophysiques, hydrométéorologiques et socio-économiques (Athanasίου et al., 2024a).

V.2.2. Copernicus Marine Service

Le Copernicus Marine Service est un programme européen fournissant des données océaniques en accès libre, produites par des centres d'expertise scientifique opérant sous l'égide du programme Copernicus. Il propose des informations d'observation et de modélisation sur l'état des océans, incluant des variables physiques (niveau marin, température, salinité, courants) et biogéochimiques. Ces données couvrent aussi bien l'océan global que les bassins régionaux, avec une résolution spatiale et temporelle adaptée aux analyses environnementales et climatiques (Copernicus Marine Service, 2025).

V.2.3. Google Earth Pro

Google Earth Pro est un logiciel de cartographie 3D développé par Google, permettant d'explorer l'imagerie satellite haute résolution et les données topographiques de la surface terrestre. Gratuit et largement utilisé dans les travaux de visualisation et de validation de terrain, il permet également d'extraire des coordonnées, de mesurer des distances, et de consulter l'évolution temporelle de certaines zones grâce à des archives d'images historiques (Google, 2025).

V.2.4. OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM) est une base de données géographiques collaborative et en libre accès, construite à partir de contributions volontaires. Elle contient des informations détaillées sur les réseaux de transport, les bâtiments, les infrastructures, les zones d'occupation du sol ou encore

les éléments naturels. Grâce à sa résolution et à sa mise à jour régulière, OSM constitue une source précieuse pour les analyses territoriales à différentes échelles, en particulier dans des contextes où les données officielles sont rares ou incomplètes (OpenStreetMap contributors, 2025a).

V.3. L'échelle d'analyse

Le cadre spatial de cette étude correspond au littoral de la commune de Kafountine, qui s'étend sur environ cinquante kilomètres. La résolution spatiale adoptée découle directement de celle de notre source principale, la base GCC, qui fournit des points d'observation espacés d'environ 1 km. L'analyse se concentre exclusivement sur la côte. Elle n'intègre pas la dynamique de l'estuaire de la Casamance, situé au sud de la commune, car la GCC ne couvre pas ce type d'environnement. Cette résolution spatiale, cohérente avec l'étendue géographique étudiée, garantit une représentation adéquate des variations locales tout en restant compatible avec les capacités de traitement des données et la finesse des analyses statistiques envisagées.

Dans un premier temps, les points géoréférencés issus de la GCC ont été importés dans le logiciel SIG QGIS (QGIS Development Team, 2025), puis filtrés pour ne conserver que ceux situés précisément le long du littoral de la commune. Cette étape a permis de retenir 53 points. Afin de faciliter leur identification et leur utilisation, ces points ont été numérotés de 1 à 53 selon un ordre géographique croissant, du nord vers le sud. La position des points par rapport au trait de côte varie. Cela s'explique par le fait que la position initiale des points, qui sert de centroïde pour les transects, est basée sur le trait de côte généralisé d'OSM (Fig. 16).

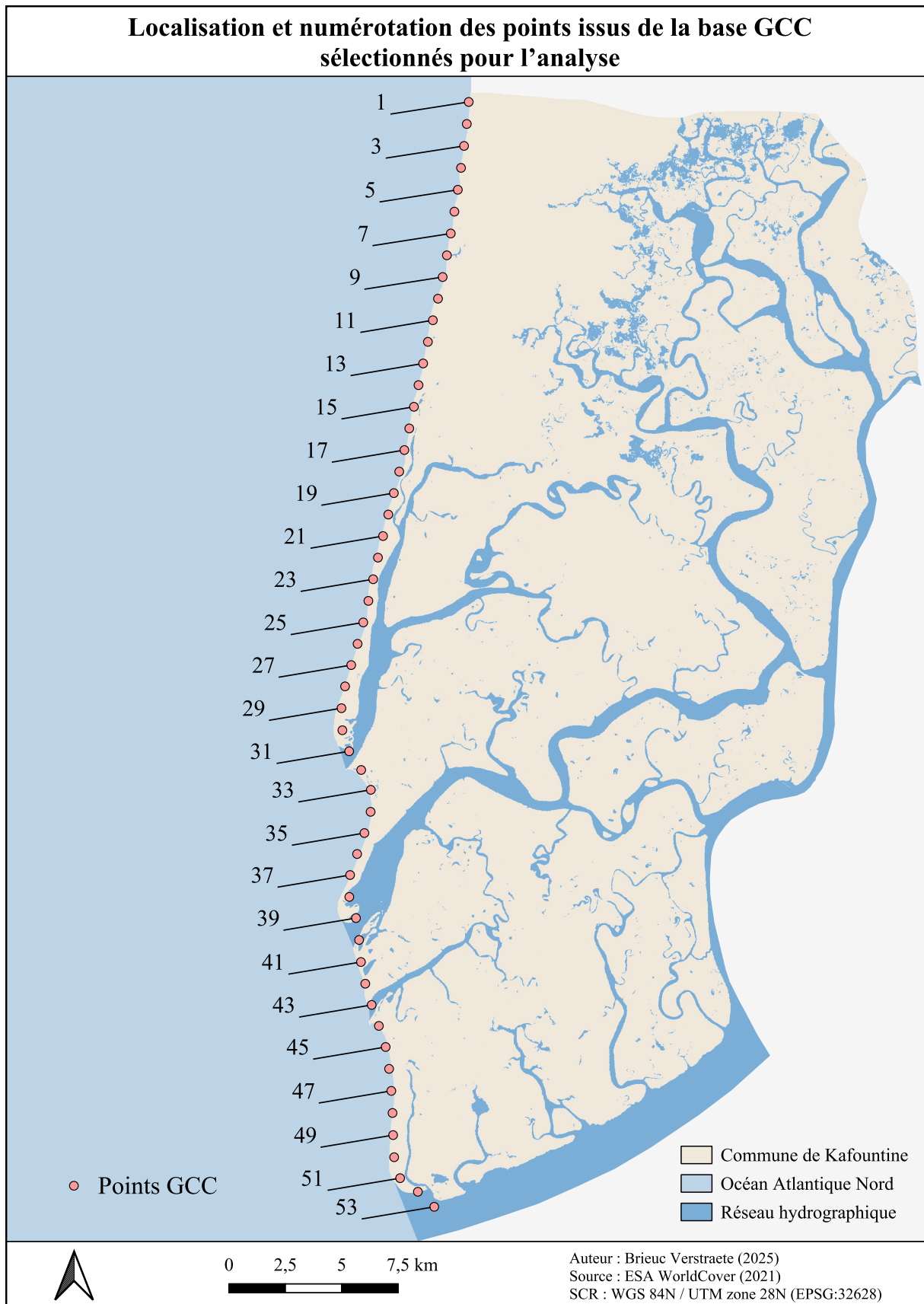


Figure 16. Localisation et numérotation des points issus de la base GCC sélectionnés pour l'analyse.

V.4. Le choix des facteurs

Le choix des facteurs constitue une étape méthodologique centrale dans la construction d'un indice. Les variables de notre étude ont été sélectionnées en accord avec les principes établis dans la littérature, notamment par Rocha *et al.* (2023), qui insistent sur la nécessité que les paramètres soient mesurables, accessibles, transférables et faciles à appliquer. Le choix des variables dépend avant tout de leur disponibilité : bien que l'architecture générale de l'indice soit applicable à différents contextes, la sélection des paramètres doit s'adapter à l'échelle de l'étude et aux données accessibles (Šimac *et al.*, 2023). Pour guider cette sélection, nous nous sommes appuyés sur plusieurs revues de la littérature (Anfuso *et al.*, 2021; Mahapatra *et al.*, 2013; Rocha *et al.*, 2023; Roukounis et Tsihrintzis, 2022).

Un examen approfondi des 80 indicateurs de la base GCC a permis d'identifier ceux pouvant être intégrés à notre analyse. L'ensemble des indicateurs de la GCC sont présentés en annexes 3, 4 et 5 (Athanasίου *et al.*, 2024a). Dans les cas précis où les dimensions étaient insuffisamment représentées ou la résolution des données inadaptée, les trois sources complémentaires décrites précédemment ont été mobilisées.

Au total, 13 facteurs ont été retenus. Leurs rôles respectifs dans la construction de l'indice, ainsi que la nature des données mobilisées, sont détaillés dans le présent chapitre. L'annexe 6 présente une coupe transversale d'un système plage-dune typique. Elle permet au lecteur de visualiser clairement les facteurs que nous avons retenus pour les forçages côtiers (X) et les caractéristiques physiques du littoral (Y), tout en illustrant d'autres éléments géophysiques du littoral, non inclus dans notre analyse.

V.4.1. Les forçages côtiers (X)

Les forçages côtiers que nous avons retenus pour cette étude sont la tendance d'élévation du niveau marin (X_1), l'amplitude des marées (X_2), la hauteur des vagues (X_3) et les niveaux marins extrêmes (X_4).

V.4.1.1. Tendance de l'élévation du niveau marin (X_1)

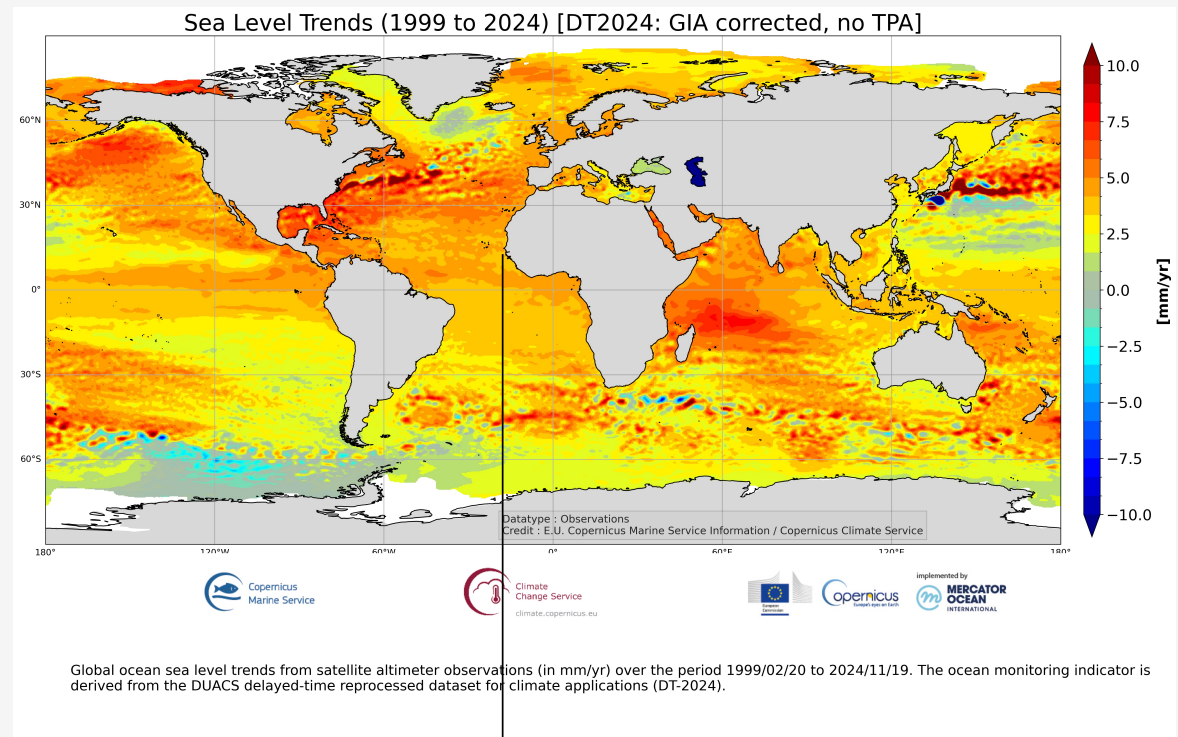
Pour rappel, l'élévation du niveau marin est considérée comme un des principaux moteurs du risque côtier à long terme, constituant une menace sérieuse pour les communautés côtières. Son

Matériels et méthodes

impact est d'autant plus préoccupant qu'il devrait s'intensifier dans les futurs scénarios de changement climatique (Mahapatra *et al.*, 2013 ; Hoque *et al.*, 2019).

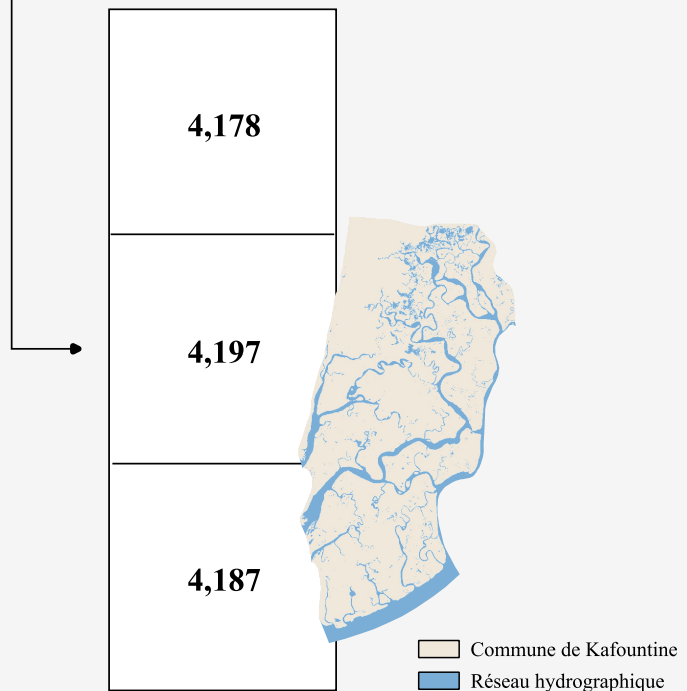
En l'absence de marégraphe local, nous avons eu recours aux données d'altimétrie satellitaire issues du Copernicus Marine Service pour estimer la tendance d'élévation du niveau marin. Ce produit fournit des tendances d'élévation sur des séries temporelles corrigées du *Glacial Isostatic Adjustment* (GIA) (Copernicus Climate Change Service & Copernicus Marine Service, 2025). La résolution spatiale des données est de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, ce qui équivaut à environ 27,8 km x 27,8 km en projection UTM Zone 28N (système WGS84). En raison de cette résolution, seuls trois pixels étaient en contact avec le littoral de Kafountine. Une valeur moyenne a été calculée à partir de ces trois pixels, en admettant que la tendance d'élévation du niveau marin est uniforme à l'échelle de la commune. La procédure d'extraction est détaillée dans la figure 17.

Procédure d'extraction des tendances d'élévation du niveau marin (1999–2024) à partir des données du Copernicus Marine Service



Zoom sur la zone d'étude

Tendance du niveau marin
(mm/an)



0 10 20 30 km

Auteur : Briec Verstraete (2025)
Source : Copernicus Marine Service (2025) & ESA WorldCover (2021)
SCR : WGS 84N / UTM zone 28N (EPSG:32628)

Figure 17. Procédure d'extraction des tendances d'élévation du niveau marin (1999–2024) à partir des données du Copernicus Marine Service.

V.4.1.2. Amplitude des marées (X_2)

Les marées sont des variations périodiques du niveau de la mer, résultant de l'effet combiné des forces gravitationnelles de la Lune et du Soleil, ainsi que de la rotation de la Terre (Parthasarathy et Natesan, 2015 ; Basheer Ahammed *et al.*, 2016). Le marnage, ou amplitude de marée, correspond à la différence verticale entre une marée haute et la marée basse qui la suit. L'amplitude moyenne est, quant à elle, calculée comme l'écart entre les niveaux moyens de marée haute et de marée basse (Annexe 6) (Mondal *et al.*, 2022).

Les marées, et en particulier les courants de marée influencent de manière déterminante les processus côtiers et la géomorphologie (Parthasarathy et Natesan, 2015). Au Sénégal, elles contribuent à la formation de bancs de sable situés généralement devant les rives convexes (Sakho *et al.*, 2022). Le marnage est par ailleurs fortement corrélé aux aléas d'inondation — qu'ils soient temporaires, récurrents, permanents ou épisodiques — ainsi qu'aux phénomènes d'érosion (Gornitz *et al.*, 1991 ; Thieler et Hammar-Klose, 2000 ; Gomez *et al.*, 2025).

Bien que la GCC ne fournisse pas directement un indicateur du marnage, elle propose les valeurs moyennes de la marée haute (*Mean Higher High Water* – MHHW) et de la marée basse (*Mean Lower Low Water* – MLLW), extraites de GTSMv3.0 pour la période 1985–2014, et exprimées en mètres au-dessus du niveau moyen de la mer (*Mean Sea Level* – MSL). Le marnage a donc été calculé à partir de ces deux indicateurs selon l'équation 1 :

$$X_2 = \text{MHHW} - \text{MLLW} \quad (1)$$

V.4.1.3. Hauteur des vagues (X_3)

La hauteur significative des vagues (*Significant Wave Height* – SWH) correspond à la hauteur moyenne, du creux à la crête, du tiers supérieur des vagues dans une zone donnée. Cette mesure est largement utilisée en océanographie physique pour représenter le régime des vagues et leur énergie dans les environnements côtiers (Annexe 6) (Parthasarathy et Natesan, 2015 ; Basheer Ahammed *et al.*, 2016 ; Cissé *et al.*, 2024).

Cette grandeur est un indicateur clé de l'énergie des processus côtiers, essentielle pour évaluer le potentiel d'érosion marine (Cissé *et al.*, 2024 ; Gomez *et al.*, 2025). En effet, l'énergie des vagues, proportionnelle au carré de leur hauteur, détermine la capacité des vagues à mobiliser

Matériels et méthodes

et transporter les matériaux de plage et côtiers, influençant ainsi le bilan sédimentaire (Parthasarathy et Natesan, 2015 ; Sakho *et al.*, 2022). Une hauteur significative élevée traduit des vagues plus puissantes susceptibles d'exercer une force importante sur le littoral, augmentant le potentiel d'érosion, tandis qu'une hauteur plus faible a un impact moindre (Cissé *et al.*, 2024).

Les données relatives aux vagues proviennent de la GCC, qui s'appuie sur ERA5, la cinquième génération de réanalyse du climat mondial produite par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, pour la période 1979–2019. L'indicateur retenu pour caractériser la hauteur des vagues est le 50e percentile de la hauteur significative combinée des vagues de vent et de houle (nommé "SWH_p50" dans la GCC), exprimé en mètres, représentant les conditions moyennes des vagues sur la période étudiée. Ce choix du 50e percentile, plutôt que du 95e percentile également fourni par la GCC, s'explique par sa meilleure représentativité du régime moyen des vagues, tandis que le 95e percentile correspond davantage aux conditions extrêmes. En raison de la résolution spatiale limitée d'ERA5, d'environ 30 km, ces données correspondent principalement aux conditions en zone offshore proches de la zone d'étude.

V.4.1.4. Niveau marin extrême (X_4)

Le niveau marin extrême correspond aux hauteurs d'eau exceptionnelles atteintes lors d'événements rares, résultant de la combinaison du niveau moyen de la mer (MSL), des marées astronomiques, des surcotes et de l'action des vagues (Annexe 6). Ces événements peuvent fortement impacter les communautés côtières en augmentant le risque d'inondation et/ou d'érosion des plages (Wahl *et al.*, 2018). Pour caractériser les niveaux marins extrêmes, nous nous sommes appuyés sur l'indicateur nommé "*Total Water Level (TWL)*" de la base de données GCC. Cet indicateur, extrait du modèle GTSMv3.0, est calculé à partir du MSL, de la marée, et des ondes de tempête. La GCC fournit les données pour des périodes de retour de 1, 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans. Elles ont été calculées par ajustement à une distribution de GPD (*Generalized Pareto Distribution*) sur la période de 1985 à 2014.

Pour notre étude, nous avons retenu une période de retour de 10 ans. Ce choix constitue un compromis entre la pertinence d'un événement extrême et une fréquence réaliste à l'échelle de la planification locale. Une période de 10 ans est suffisamment significative pour représenter un aléa sérieux, tout en restant tangible pour les gestionnaires locaux. De plus, elle permet une

meilleure comparaison avec les caractéristiques topographiques du littoral, qui évoluent rapidement et pourraient être sensiblement différentes si l'on considérait une période de retour de 25 ans.

V.4.2. Les caractéristiques physiques du littoral (Y)

Les caractéristiques physiques du littoral que nous avons retenues sont la géomorphologie (Y_1), l'élévation (Y_2), la pente (Y_3), la largeur de la plage (Y_4), et les éléments de protection naturels (Y_5).

V.4.2.1. Géomorphologie (Y_1)

La géomorphologie côtière étudie le développement historique des paysages et les processus physiques agissant à la surface terrestre (Hoque *et al.*, 2019 ; Mondal *et al.*, 2022). Elle permet de caractériser la nature et la résistance des roches et sédiments face aux actions marines (Rocha *et al.*, 2023), en exprimant l'érodibilité relative des différentes formes littorales (Thieler et Hammar-Klose, 2000 ; Nourdi *et al.*, 2025). La configuration morphologique conditionne la réponse du littoral aux aléas climatiques (Miah *et al.*, 2020). Les côtes rocheuses offrent une forte résistance, tandis que plages sableuses, lagunes, marais salants et vasières sont plus exposées (Thieler et Hammar-Klose, 1999 ; Miah *et al.*, 2020 ; Lopes *et al.*, 2022). Certaines unités comme les mangroves, dunes ou estuaires sont particulièrement sensibles à la montée du niveau marin et à l'érosion (Annexe 6) (Parthasarathy et Natesan, 2015).

Le facteur géomorphologie (Y_1) a été évalué à partir de l'indicateur nommé "*Global coastal type classification*" dans la GCC. Cet indicateur identifie la nature dominante du littoral (sableux, vaseux, rocheux, végétalisé ou autre) dans la zone tampon du transect, grâce à une classification automatisée construite à partir d'images satellites et de données géophysiques.

V.4.2.2. Élévation (Y_2)

L'élévation désigne la hauteur d'un lieu par rapport au niveau moyen de la mer et constitue un paramètre fondamental dans l'évaluation de la vulnérabilité côtière (Mondal *et al.*, 2022). Elle reflète la configuration topographique et le relief, influençant la sensibilité d'un littoral aux processus d'érosion et d'inondation induits ou amplifiés par des facteurs climatiques et non climatiques (Satta *et al.*, 2015). La topographie est dès lors un critère clé pour déterminer l'exposition potentielle d'une zone aux impacts de l'élévation du niveau marin. Les régions

basses sont plus sensibles aux submersions, aux ondes de tempête et aux reculs rapides du trait de côte (El-Shahat *et al.*, 2021 ; Cissé *et al.*, 2024 ; Pouye *et al.*, 2024), tandis que les zones plus élevées présentent une meilleure résistance et appartiennent généralement aux zones de faible vulnérabilité (Lopes *et al.*, 2022). Cette différence s'explique par la capacité accrue des zones hautes à résister à l'inondation et à l'érosion, mais aussi à offrir un potentiel d'adaptation, par exemple en permettant la migration des zones humides (Parthasarathy et Natesan, 2015). En ce sens, le relief côtier joue un rôle déterminant dans la prédiction des territoires menacés par les aléas multiples liés au changement climatique (Lopes *et al.*, 2022).

Nous avons retenu l'indicateur nommé "*Mean hinterland elevation*" dans la GCC pour évaluer l'élévation. Cet indicateur correspondant à l'altitude moyenne du transect à l'intérieur des terres, à partir du premier pic côtier (Fig. 14).

V.4.2.3. Pente (Y_3)

La pente de la côte désigne l'inclinaison du relief en bordure de mer, généralement exprimée en pourcentage (Miah *et al.*, 2020). Selon plusieurs études, les zones à faible pente sont particulièrement vulnérables aux inondations et à la submersion marine, car elles favorisent la pénétration des eaux lors des marées hautes ou des tempêtes (Hoque *et al.*, 2018 ; Cissé *et al.*, 2024 ; Mondal *et al.*, 2022). Cette caractéristique accentue le risque de recul rapide du trait de côte, ce qui accroît la vulnérabilité des zones côtières (Faye *et al.*, 2024 ; Sakho *et al.*, 2022). À l'inverse, les secteurs à pente plus forte présentent une plus grande résistance à l'érosion et limitent l'étendue des submersions (Gomez *et al.*, 2025). La pente côtière est ainsi utilisée pour estimer le risque relatif de recul du littoral, la stabilité des berges, ainsi que la résistance des côtes aux forçages côtiers (Annexe 6) (Satta *et al.*, 2015 ; Ružić *et al.*, 2019 ; El-Shahat *et al.*, 2021).

Les données relatives à la pente proviennent de la base GCC, qui propose trois indicateurs de pente (détaillés au point V.2.1.). Parmi ces trois indicateurs, nous avons choisi de retenir le "*Backshore slope*", car c'est celui qui se rapproche le plus de la définition de la pente côtière utilisée dans la littérature scientifique. Dans la GCC, la pente est calculée en divisant la différence d'altitude entre le premier pic côtier – *Coastal max (first peak)* – et le trait de côte par la distance horizontale qui les sépare (Fig. 14). Le résultat est exprimé sous forme décimale. Nous l'avons multiplié par 100 pour obtenir des pourcentages.

V.4.2.4. Largeur de plage (Y₄)

La largeur de la plage se définit comme la dimension horizontale mesurée perpendiculairement au trait de côte, située à l'intérieur des terres par rapport à la ligne de la haute mer (Parthasarathy et Natesan, 2015). La largeur de la plage constitue un facteur clé dans la dissipation de l'énergie des vagues, conditionnant ainsi le degré de protection offert au littoral (Ružić *et al.*, 2019). En jouant un rôle de tampon, elle réduit l'impact des événements météorologiques extrêmes et de la montée relative du niveau de la mer : plus la plage est large, plus sa capacité de protection est importante (Annexe 6) (Parthasarathy et Natesan, 2015).

Bien que la base de données GCC ne fournisse pas directement un indicateur de la largeur de la plage, nous avons pu l'estimer en utilisant deux autres indicateurs présents dans la base de données. La largeur a été calculée comme la distance entre la ligne de rivage, nommée "*Cross-shore location of shoreline*" et "*Cross-shore location of coastal max (first peak)*", la position du premier pic côtier. Ces deux indicateurs fournissent la distance en mètres de chaque point par rapport au centre du transect (Fig. 14).

La largeur de la plage a été calculée selon l'équation 2 :

$$Y_4 = \text{Cross-shore location of coastal max (first peak)} - \text{Cross-shore location of shoreline} \quad (2)$$

V.4.2.5. Éléments de protection naturels (Y₅)

Les habitats naturels constituent un élément clé de la protection côtière en atténuant les effets des aléas susceptibles d'endommager les zones littorales. Les mangroves, les récifs coralliens ou encore les forêts côtières réduisent significativement la hauteur des vagues en eaux peu profondes, tout en favorisant l'accumulation des dépôts proches du rivage et la dissipation de l'énergie des vagues (Lopes *et al.*, 2022). La végétation, en particulier, contribue à la formation et à la consolidation des dunes, renforçant ainsi leur stabilité et limitant la susceptibilité à l'érosion du littoral (Annexe 6) (Alessandrini *et al.*, 2024).

Pour l'analyse, nous avons retenu l'indicateur de la GCC qui mesure la couverture du sol au niveau du premier pic côtier à partir de la base ESA WorldCover_v100. Cet indicateur est nommé "*Land cover class of coastal max (first peak)*". Ce choix se justifie par la capacité de cet indicateur à informer sur la nature du matériau formant le premier élément de protection

topographique du littoral, et donc sur son aptitude à jouer un rôle de barrière face aux forçages côtiers.

V.4.3. Les caractéristiques socio-économiques du littoral (Z)

Les caractéristiques socio-économiques du littoral que nous avons retenues sont la population (Z_1), les bâtiments (Z_2), le réseau routier (Z_3) et l'utilisation économique du sol (Z_4).

V.4.3.1. Population (Z_1)

La densité de population, exprimée en nombre d'habitants par kilomètre carré, est un indicateur socio-économique essentiel pour évaluer la vulnérabilité côtière, car elle reflète la concentration humaine et infrastructurelle dans une zone donnée (Satta *et al.*, 2015 ; Miah *et al.*, 2020 ; El-Shahat *et al.*, 2021). Une densité élevée accroît l'exposition aux risques liés à la montée du niveau de la mer, à l'érosion et aux tempêtes (Nourdi *et al.*, 2025), tout en compliquant la gestion des interventions d'urgence (Cissé *et al.*, 2025). Par conséquent, les zones densément peuplées présentent un potentiel de pertes plus important, ce qui augmente leur vulnérabilité globale face aux aléas côtiers (Faye *et al.*, 2024).

La GCC propose deux mesures distinctes liées à la population, issues du jeu de données WorldPop. Le premier indicateur correspond au nombre total de personnes situées dans la zone tampon de 500 mètres autour de la partie terrestre du transect. Le second renseigne le nombre de personnes se trouvant dans cette même zone tampon mais également situées en dessous de certaines altitudes (1 m, 5 m, et 10 m). Compte tenu des dimensions de la zone tampon (4 km de long sur 1 km de large), ces données sont calculées pour une surface d'environ 4 km².

Nous avons choisi d'utiliser le second indicateur, nommé "*Number of people below elvation x*", car il associe la population à la hauteur par rapport au niveau de la mer, information essentielle pour évaluer le risque côtier. Parmi les différentes altitudes proposées, nous avons retenu celle correspondant à 1 mètre, qui paraît la plus pertinente pour identifier la population à risque immédiat. Enfin, nous avons divisé les valeurs par 4 afin d'exprimer la densité de population en nombre d'habitants par km².

V.4.3.2. Bâtiments (Z₂)

Les bâtiments constituent un indicateur clé pour évaluer la vulnérabilité côtière (Nourdi *et al.*, 2025). En effet, si les bâtiments se trouvent directement exposés à l'action de la mer, les impacts peuvent être importants. Par ailleurs, la distance entre les zones habitées et le littoral renseigne aussi sur le niveau d'exposition des populations à l'érosion côtière (Pouye *et al.*, 2024).

La base de données GCC fournit des indicateurs d'occupation du sol, notamment la proportion d'occurrence des principales classes de couverture terrestre (zones bâties, zones cultivées, zones humides, végétation, etc.), dérivée du land cover ESA Worldcover_v100. Ces données sont calculées à partir de zones tampons autour de la partie terrestre des transects. La configuration de ces zones, qui privilégie la profondeur en terres plutôt que la longueur le long du littoral, permet de refléter globalement les dynamiques d'urbanisation communale, avec un pic marqué autour du village de Kafountine. Cependant, cette résolution est trop grossière pour notre analyse : certaines zones bâties sont trop éloignées du littoral et ne reflètent pas l'exposition directe aux aléas côtiers. Pour pallier ce problème, nous avons utilisé les données OSM (extraites via QGIS, juillet 2025) et calculé, pour chaque centroïde de la GCC (défini à partir du trait de côte OSM, cf. V.2.1), la distance minimale au bâtiment le plus proche. La figure 18 illustre cette méthode.

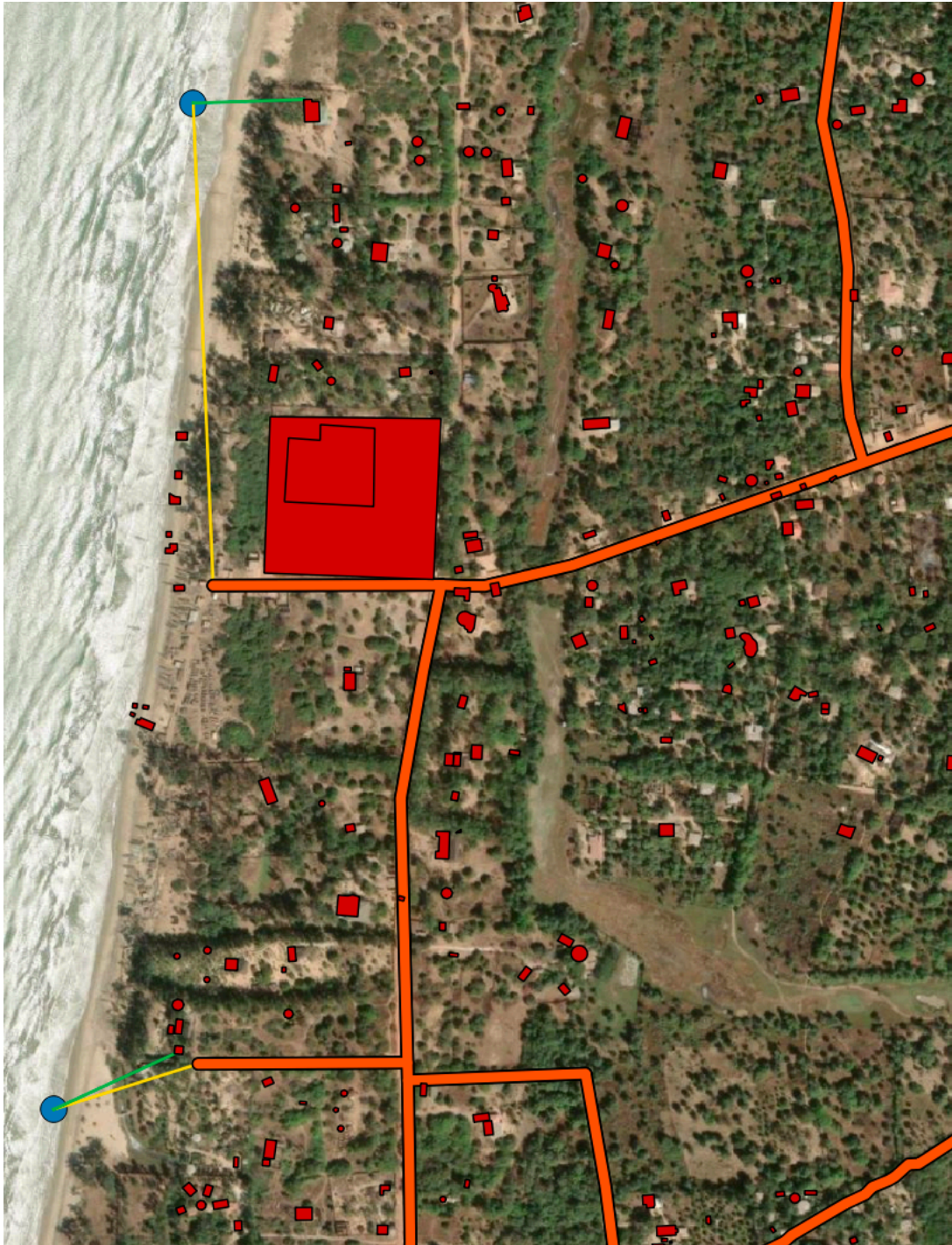


Figure 18. Distances les plus courtes calculées avec les données OSM : centroïdes (bleu), bâtiments (rouge), routes (orange), liaisons centroïdes–bâtiments (vert) et centroïdes–routes (jaune)

V.4.3.3. Réseau routier (Z_3)

Le réseau routier constitue un axe essentiel de communication et de transport pour les populations et les biens. Sa vulnérabilité aux aléas côtiers, notamment aux inondations, est accentuée par la montée du niveau marin et l'intensification des tempêtes, entraînant des interruptions fréquentes et des coûts de réparation élevés (Satta *et al.*, 2015 ; Rocha *et al.*, 2023).

Matériels et méthodes

L'importance de ce facteur varie selon l'échelle d'analyse : les études nationales se concentrent sur les infrastructures majeures, tandis que les analyses locales intègrent aussi des voies secondaires (Šimac *et al.*, 2023).

Dans la GCC, l'indicateur d'occurrence des routes, basé sur gROADSv1, signale la présence (1) ou l'absence (0) d'intersection avec les transects. Nous avons toutefois constaté via Google Earth Pro que certaines voies indiquées n'existent pas réellement, notamment dans les zones de mangrove au sud.

Pour pallier ces imprécisions, nous avons utilisé les données OSM (extraites via QGIS, juillet 2025), suivant la même approche que pour le facteur bâtiment (Z_2). La distance minimale entre chaque centroïde et la route OSM la plus proche a été calculée, en excluant les chemins secondaires ("*footways*", "*paths*") pour se concentrer sur des voies à plus haute valeur économique. Cette méthode, déjà utilisée dans la littérature (Mahapatra *et al.*, 2015), permet une représentation plus réaliste de l'exposition des infrastructures routières côtières. La figure 18 illustre cette méthode.

V.4.3.4. Utilisation économique du sol (Z_4)

L'utilisation des sols reflète à la fois les caractéristiques sociodémographiques d'un territoire et la répartition de ses ressources naturelles (Miah *et al.*, 2020). Une occupation intensive des sols accroît la sensibilité des zones aux changements environnementaux, en particulier lorsqu'elles présentent une importance économique, culturelle ou environnementale justifiant leur protection (Nourdi *et al.*, 2025). Ce facteur permet de hiérarchiser les zones côtières selon leur valeur économique, les catégories étant généralement basées sur une estimation monétaire (Furlan *et al.*, 2021 ; Faye *et al.*, 2024).

Pour caractériser l'utilisation des sols à valeur économique, nous nous sommes appuyés sur l'indicateur "*Main land cover class excluding open water*" de la GCC, calculé à partir des données ESA Worldcover_v100. Cet indicateur correspond à la classe de couverture terrestre dominante, à l'exclusion des zones d'eau libre, dans un rayon de 500 m autour de la partie terrestre de chaque transect. Il s'agit toutefois d'une donnée de *land cover* et non de *land use* : elle décrit la nature physique de la surface (cultures, forêts, zones bâties, etc.) mais pas son

usage. Certaines zones, comme les ports de pêche ou les infrastructures touristiques, présentent une forte valeur ajoutée non détectable par la simple classe dominante d'occupation du sol.

Afin de mieux refléter la réalité socio-économique locale, nous avons procédé à une reclassification manuelle. Cette opération a été basée sur une vérification systématique de chaque donnée, à partir de la littérature et d'observations sur Google Earth Pro. Nous avons ainsi identifié les centroïdes proches des quais de pêche (Abéné, Kafountine, Diogué) et ceux situés à moins de 500 m d'infrastructures touristiques. Cette approche, combinant classification automatique et correction manuelle, permet de passer du *land cover* au *land use*, intégrant ainsi une dimension économique dans l'évaluation de la vulnérabilité.

V.5. La catégorisation des facteurs

Après avoir sélectionné les 13 facteurs, la phase suivante consiste à les catégoriser afin de permettre leur intégration dans un indice composite. Chaque facteur se voit attribuer un rang traduisant sa contribution relative au risque, une procédure fréquemment utilisée dans ce type d'étude (Hamid *et al.*, 2019). Nous avons retenu une classification en cinq classes, numérotées et libellées comme suit : Très faible (1), Faible (2), Modéré (3), Élevé (4) et Très élevé (5).

Il est important de souligner la dimension intersubjective de toute opération de classement : le choix des seuils et des bornes dépend en partie du jugement du chercheur et des caractéristiques spécifiques de la zone d'étude, ce qui requiert transparence et justification (Roukounis et Tsihrintzis, 2022). Un tableau récapitulatif des classifications retenues pour l'ensemble des facteurs étudiés est disponible en annexe 7.

V.5.1. Les forçages côtiers (X)

Pour les trois premiers facteurs de forçages côtiers, à savoir **la tendance d'élévation du niveau marin (X_1)**, **l'amplitude des marées (X_2)** et **la hauteur des vagues (X_3)**, nous avons pris comme référence principale Sakho *et al.* (2022), dont l'étude, centrée sur la dynamique côtière du delta du Saloum, propose des bornes et des classes spécifiquement adaptées aux côtes sableuses de cette région, située à environ 100 km au nord de notre zone d'étude. Les catégorisations retenues sont également cohérentes avec d'autres travaux employant une méthodologie similaire menés au Sénégal, notamment à Dakar (Pouye *et al.*, 2024) et à Saint-

Louis (Mendoza *et al.*, 2023). Elles présentent en outre des similarités marquées avec des études à plus large échelle, portant sur l’Afrique de l’Ouest (Dada *et al.*, 2024) ou l’Afrique centrale (Tableau 1) (Nourdi *et al.*, 2025).

L'interprétation de **l'amplitude des marées (X_2)** dans l'évaluation du risque côtier fait l'objet d'un débat dans la littérature. Certains auteurs considèrent qu'un marnage fort est associé à un risque élevé, car il peut intensifier l'érosion par des courants plus puissants (Gornitz *et al.*, 1991 ; Pouye *et al.*, 2024). D'autres études défendent l'idée inverse, selon laquelle les faibles amplitudes de marées sont associées à un risque élevé. Ce postulat est justifié par le fait que les zones à faible marnage restent presque constamment près du niveau de la marée haute. Ainsi, lors d'un événement tempétueux, elles sont plus susceptibles d'être submergées, car l'impact de la tempête se concentre sur une zone verticale plus restreinte (Thieler et Hammar-Klose, 2000 ; Hoque *et al.*, 2019). Nous adoptons cette seconde approche dans notre étude. Nous considérons qu'en présentant un marnage faible, ces zones concentrent les impacts des tempêtes sur une bande verticale plus étroite. Cette perspective est en accord avec plusieurs études sur la vulnérabilité côtière (Thieler et Hammar-Klose, 2000 ; Mondal *et al.*, 2022).

Pour la classification du **niveau marin extrême (X_4)**, nous avons opté pour une échelle ternaire attribuant les valeurs suivantes : Très faible (1), Modéré (3) et Élevé (5). Cette catégorisation repose sur la comparaison entre le niveau marin extrême avec une période de retour de 10 ans (*TWL (10 years RP)*) et le *Coastal max (first peak)* (c.f. VI.3.1.4.). Cette méthode de classification s’inspire de travaux similaires menés par Uddin *et al.* (2016), Ng *et al.* (2019), Miah *et al.* (2020) et Mendoza *et al.* (2023) (Tableau 1).

- Lorsque le *TWL (10 years RP)* est inférieur au *Coastal max (first peak)*, la valeur Très faible (1) indique une protection effective assurée par le relief.
- Si la valeur du *TWL (10 years RP)* se situe entre le *Coastal max (first peak)* et le *Coastal max (max peak 1 km)*, la valeur Modéré (3) traduit une submersion mais limitée par une barrière naturelle plus élevée.
- Enfin, lorsque le *TWL (10 years RP)* dépasse le *Coastal max (max peak 1 km)*, la valeur Très élevé (5) reflète l’absence de protection topographique et un danger important, conformément aux observations selon lesquelles les systèmes dunaires protègent les écosystèmes et les activités humaines contre les forçages côtiers (Anfuso *et al.*, 2021).

Matériels et méthodes

Il convient de noter que pour les centroïdes 39 et 40, aucune donnée n'est disponible pour le *Coastal max (max peak 1 km)*. Par conséquent, nous avons considéré une valeur nulle (0 m) pour ces deux points.

Tableau 1. Catégorisation des forçages côtiers (X).

Catégorie	Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Forçages côtiers	X_1	Tendance d'élévation du niveau marin (mm/an)	< 1,8	1,8 – 2,5	2,5 – 3	3 – 3,4	> 3,4
	X_2	Amplitude des marées (m)	> 6	6 – 4	4 – 2	2 – 1	< 1
	X_3	Hauteur des vagues (m)	< 0,55	0,55 – 0,85	0,85 – 1,05	1,05 – 1,25	> 1,25
	X_4	Niveau marin extrême (m)	< a	/	a – b	/	> b

a = Coastal max (first peak); b = Coastal max (max peak 1 km).

V.5.2. Les caractéristiques physiques du littoral (Y)

Pour la **géomorphologie (Y_1)**, notre classification s'appuie principalement sur Sakho *et al.* (2022), qui reprennent la méthode largement reconnue et fondatrice issue de Thieler et Hammar-Klose (2000). Cette dernière est couramment utilisée dans la littérature sur les zones côtières d'Afrique de l'Ouest, notamment dans l'étude de Bakhoun *et al.* (2018) à Dakar, ainsi que dans celles de Dada *et al.* (2024), Nourdi *et al.* (2025) et Pouye *et al.* (2024) (Tableau 2).

Pour l'**élévation (Y_2)**, nous avons retenu une classification inspirée de Mendoza *et al.* (2023), en ajustant légèrement les seuils à partir des résultats de la méthode de répartition de Jenks appliquée à notre zone d'étude. Cette méthode, couramment employée pour déterminer des seuils de catégorisation dans la construction d'indices, vise à minimiser la variance intra-classes tout en maximisant la variance inter-classes, garantissant ainsi une répartition statistiquement pertinente des données. Les valeurs obtenues ont ensuite été arrondies ou fixées à une décimale en 0,5 afin d'en faciliter l'interprétation et l'application. Ces adaptations demeurent néanmoins très proches des seuils proposés initialement par Mendoza *et al.* (2023) (Tableau 2).

Concernant la **pente (Y_3)**, les bornes des classes ont été inspirées de plusieurs études récentes menées dans des zones comparables à la commune de Kafountine, notamment Dada *et al.*

Matériels et méthodes

(2024), Mendoza *et al.* (2023) et Sakho *et al.* (2022). Là encore, une adaptation locale a été réalisée à partir des résultats de la méthode de Jenks, afin d’assurer la pertinence des seuils pour notre zone d’étude tout en conservant des valeurs simples et interprétables (Tableau 2).

Contrairement à d’autres facteurs, **la largeur de la plage (Y_4)** ne dispose pas de références établies dans des contextes géographiquement proches. Nous avons donc élaboré une classification ad hoc, fondée sur l’analyse statistique des données (méthode de Jenks) et inspirée des ordres de grandeur rapportés dans d’autres contextes, notamment l’étude de Parthasarathy et Natesan (2015) sur les côtes sableuses en Inde. Cette approche pragmatique permet de proposer des classes cohérentes et adaptées, en dépit de l’absence de standards régionaux clairement définis (Tableau 2).

Enfin, la classification des **éléments de protection naturels (Y_5)** repose sur une adaptation de la typologie développée par Pouye *et al.* (2024), qui considère un facteur similaire. Nous l’avons ajustée pour intégrer les rôles protecteurs propres aux types de couverture terrestre observés dans notre zone d’étude (Tableau 2).

Tableau 2. Catégorisation des caractéristiques physiques du littoral (Y).

Catégorie	Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
<i>Caractéristiques physiques</i>	Y_1	Géomorphologie	Côtes rocheuses et escarpées, fjords	Falaises moyennes, côtes découpées	Basses falaises, dérive glaciaire, plaines alluviales	Plages de galets, estuaire, lagune	Barrières littorales, plages de sable, marais salants, vasières, deltas, mangroves, récifs coralliens
	Y_2	Élévation (m)	> 7,5	7,5 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1	< 1
	Y_3	Pente (%)	> 6	6 – 4	4 – 2	2 – 1	< 1
	Y_4	Largeur de la plage (m)	> 500	500 – 200	200 – 100	100 – 50	< 50
	Y_5	Éléments de protection naturels	Mangroves	Arbres	Arbustes	Cultures, bâti	Végétation stérile/éparse, eau libre

V.5.3. Les caractéristiques socio-économiques du littoral (Z_1)

La classification retenue pour la **densité de population (Z_1)** s'inspire des travaux de Dada *et al.* (2024), qui ont développé un indice socio-économique à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest. L'ordre de grandeur des valeurs observées dans notre zone d'étude est comparable à celui rapporté par ces auteurs lorsque la densité est calculée à partir de l'indicateur "*Number of people*", représentant le nombre total de personnes dans le buffer. Toutefois, notre analyse repose sur l'indicateur "*Number of people below 1 m*", qui ne permettait pas de reprendre directement leurs seuils. Les classes ont donc été définies à l'aide de la méthode de Jenks, puis légèrement ajustées afin de faciliter la lisibilité et l'interprétation, tout en préservant la cohérence statistique initiale (Tableau 3).

La classification retenue pour la **distance aux bâtiments (Z_2)** est basée sur les travaux de Pouye *et al.* (2024), qui ont proposé des seuils pour la distance des infrastructures bâties par rapport au rivage dans la région de Dakar. Nous avons repris cette approche en l'adaptant au contexte de Kafountine, à partir d'une analyse des données locales, classées selon la méthode de Jenks (Tableau 3).

Pour la **distance au réseau routier (Z_3)**, nous nous sommes inspirés de la classification proposée par Nourdi *et al.* (2025) dans le cadre d'une étude sur les côtes d'Afrique centrale. Afin de maintenir une cohérence interne dans notre analyse, nous avons retenu les mêmes classes que celles définies pour Z_2 (Tableau 3).

Enfin, la classification de l'**utilisation économique du sol (Z_4)** s'inspire de méthodologies développées dans des contextes proches (Cissé *et al.* (2024) ; Nourdi *et al.* (2025)). Nous avons adapté les seuils aux spécificités de notre zone d'étude, en tenant compte des activités économiques locales. Nous avons retenu cinq niveaux : Très faible (1) pour les zones arborées faiblement exploitées, Faible (2) pour les mangroves qui fournissent des ressources halieutiques, Modéré (3) pour les zones agricoles qui nécessitent des investissements matériels et produisent des récoltes saisonnières, Élevé (4) pour les quais de pêche, et Très élevé (5) pour les infrastructures touristiques qui présentent une valeur économique régionale importante. Les quais de pêche et les installations touristiques représentent en effet des pôles économiques majeurs, dont la dégradation pourrait entraîner d'importantes pertes financières (Tableau 3).

Tableau 3. Catégorisation des caractéristiques socio-économiques du littoral (Z).

Catégorie	Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Caractéristiques socio-économiques	Z ₁	Densité de population (hab/km ²)	0	0 – 10	10 – 50	50 – 100	> 100
	Z ₂	Distance aux bâtiments (m)	> 1000	1000 – 500	500 – 200	200 – 100	< 100
	Z ₃	Distance au réseau routier (m)	> 1000	1000 – 500	500 – 200	200 – 100	< 100
	Z ₄	Utilisation économique du sol	Arbres	Mangroves	Cultures	Pêche	Tourisme

V.6. Calcul des indices

Cette étape permet de transformer les données catégorisées en indices intermédiaires, puis de les combiner pour obtenir le *Coastal Risk Index* (CRI). Les différents calculs présentés dans le chapitre suivant ont été réalisés sur QGIS version 3.40 Bratislava (QGIS Development Team, 2025).

V.6.1. Agrégation des facteurs

Gornitz (1991), les précurseurs de la méthode, ont proposé d’agréger les facteurs par la racine carrée de leur moyenne. Cette approche a également été utilisée par l’étude influente de Thieler et Hammar-Klose (2000) et reste largement répandue dans la littérature. Toutefois, une grande diversité de méthodes d’agrégation existe. L’attribution de poids aux paramètres constitue également une approche courante, que ce soit via la méthode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) ou par une pondération arbitraire, afin de refléter que tous les facteurs ne contribuent pas de manière équivalente à la vulnérabilité et/ou au risque (Rocha *et al.*, 2023). En l’absence de connaissances approfondies sur notre zone d’étude, nous avons choisi de ne pas pondérer les facteurs par mesure de prudence.

Alcántara-Carrió *et al.* (2024) soulignent que la présence d’une faible valeur pour un facteur ne signifie pas que la valeur globale de l’indice doit être nulle, car d’autres facteurs peuvent être élevés. Selon ces auteurs, les formules multiplicatives sont déconseillées, car la présence de facteurs faibles tend à neutraliser l’influence des facteurs élevés, conduisant à une sous-

Matériels et méthodes

estimation de l'indice global. En revanche, la moyenne arithmétique constitue une méthode plus robuste, facile à employer et à comprendre. Nous avons donc retenu cette approche.

Le *Coastal Forcing Index* (CFI) est l'indice qui regroupe l'ensemble des forçages côtiers. Il est défini comme la moyenne arithmétique des forçages côtiers (Équation 3) :

$$CFI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

où X_i représente les forçages côtiers individuels,
et n le nombre total de forçages considérés.

Le *Physical Susceptibility Index* (PSI) est l'indice qui regroupe les facteurs physiques du littoral. Il est défini comme la moyenne arithmétique des facteurs physiques du littoral (Équation 4) :

$$PSI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (4)$$

où Y_i représente les facteurs physiques individuels,
et n le nombre total de facteurs considérés.

Le *Socioeconomic Susceptibility Index* (SSI) est l'indice qui regroupe les facteurs socio-économiques du littoral. Il est défini comme la moyenne arithmétique des facteurs socio-économiques du littoral (Équation 5) :

$$SSI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (5)$$

où Z_i représente les facteurs socio – économiques individuels,
et n le nombre total de facteurs considérés.

Chaque indice reflète ainsi la contribution équilibrée de ses facteurs constitutifs, évitant qu'un facteur isolé à faible valeur n'influence de manière disproportionnée le résultat global. Bien que les valeurs des facteurs soient, par construction, des entiers correspondant aux cinq classes définies précédemment, l'agrégation produit des indices intermédiaires avec des valeurs décimales comprises entre 1 et 5.

V.6.2. Calcul des indices intermédiaires et du CRI

Pour rester cohérent avec les fondements théoriques du risque, nous avons choisi d'agréger les indices intermédiaires de niveau 1 par la moyenne géométrique, tout en ayant utilisé la moyenne arithmétique pour agréger les facteurs constitutifs. Cette approche a deux avantages : la moyenne arithmétique limite l'influence excessive d'un facteur isolé lors du calcul des indices de base. La moyenne géométrique appliquée aux indices intermédiaires permet, quant à elle, de prendre en compte la sensibilité aux valeurs extrêmes, ce qui est cohérent avec la théorie du risque selon laquelle le risque global résulte du produit de ses composantes. L'objectif est d'obtenir des indices simples, robustes et faciles à interpréter.

Le *Coastal Hazard Index* (CHI) est défini comme la racine carrée du produit du *Coastal Forcing Index* (CFI) et du *Physical Susceptibility Index* (PSI) (Équation 6) :

$$CHI = \sqrt{CFI \cdot PSI} \quad (6)$$

Le *Coastal Vulnerability Index* (CVI) correspond à la racine carrée du produit du *Physical Susceptibility Index* (PSI) et du *Socioeconomic Susceptibility Index* (SSI) (Équation 7) :

$$CVI = \sqrt{PSI \cdot SSI} \quad (7)$$

Le *Coastal Risk Index* (CRI) est quant à lui calculé comme la racine cubique du produit du *Coastal Forcing Index* (CFI), du *Physical Susceptibility Index* (PSI) et du *Socioeconomic Susceptibility Index* (SSI) (Équation 8) :

$$CRI = \sqrt[3]{CFI \cdot PSI \cdot SSI} \quad (8)$$

V.7. Analyse exploratoire des relations entre facteurs

L'analyse exploratoire vise à examiner les relations entre facteurs et à identifier d'éventuelles structures latentes dans le jeu de données. Avant ces analyses, les facteurs présentant une variance nulle (c'est-à-dire une valeur constante pour tous les points de mesure), à savoir X_1 , X_2 , X_3 et Y_1 , ont été exclus car ils n'apportent aucune information exploitable. L'ensemble des analyses statistiques et des visualisations a été réalisé dans l'environnement R, en s'appuyant

notamment sur le package *ggplot2*. Étant donné la nature et la distribution des données, une approche non-paramétrique a été privilégiée pour garantir la robustesse des résultats. Les résultats sont présentés sous différentes formes graphiques adaptées à chaque type de données et générées sur RStudio (Posit Team, 2025).

V.7.1. Corrélation de Spearman

Pour évaluer l'intensité et la direction des relations entre toutes les variables du jeu de données, une matrice de corrélation a été calculée. Conformément à des approches similaires dans des études de vulnérabilité côtière (Nourdi *et al.*, 2025), la corrélation de Spearman a été retenue en raison de son caractère non-paramétrique, la rendant particulièrement adaptée à des données dont la distribution n'est pas nécessairement normale. Cet indicateur mesure une relation monotone, c'est-à-dire la tendance des variables à évoluer dans le même sens, sans exiger une relation linéaire stricte.

Le coefficient de corrélation, variant de -1 à 1, a été calculé sur les rangs des observations. Les p-valeurs associées ont été ajustées à l'aide de la méthode du *False Discovery Rate* (FDR) afin de contrôler le risque de trouver des corrélations significatives par pur hasard en raison des tests multiples.

V.7.2. Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique parfois utilisée dans les études d'indices côtiers (Boumpoulis *et al.*, 2025). L'ACP permet de synthétiser l'information contenue dans un grand nombre de variables en un nombre réduit de nouvelles variables, appelées composantes principales. Cette méthode de réduction de la dimensionnalité a été appliquée après la standardisation des variables initiales (moyenne de 0 et écart-type de 1) pour garantir qu'elles contribuent de manière égale à l'analyse, indépendamment de leur variance. L'ACP a produit des dimensions orthogonales classées par ordre décroissant de variance expliquée. Le nombre optimal de dimensions à retenir a été déterminé à l'aide d'un *Scree Plot*, en s'appuyant sur le critère du "coude".

Pour l'interprétation, un *biplot* a été généré, qui permet de visualiser simultanément la position des individus et l'influence des variables sur les deux premières dimensions retenues. Cette visualisation a été complétée par des graphiques en bâtonnets de la qualité de représentation (\cos^2), qui quantifient la contribution de chaque facteur à la formation des dimensions.

V.7.2. Analyse de Clustering K-means

Enfin, un *clustering K-means* a été appliqué aux coordonnées issues de l'ACP, les clusters étant visualisés par des ellipses sur le biplot (Uddin *et al.*, 2019).

V.8. Cartographie des résultats

Les systèmes d'information géographique (SIG), permettent de visualiser spatialement les phénomènes étudiés. Dans cette étude, les différentes cartes des facteurs, indices et clusters ont été réalisées sur QGIS version 3.40 Bratislava (QGIS Development Team, 2025).

Tous les niveaux d'agrégation ont été cartographiés : facteurs initiaux, indices intermédiaires et indice global. Cette approche permet la mise en évidence des écarts entre les indices, ce qui permet de mieux comprendre les dynamiques locales. Par exemple, un facteur élevé n'entraîne pas forcément un risque global important (Rocha *et al.*, 2023).

Afin d'améliorer la lisibilité cartographique des résultats, la position des centroïdes de la GCC a été légèrement ajustée par rapport à leur localisation réelle (Fig. 16). Ces points ont été décalés vers l'ouest d'environ 1 300 mètres, de manière à suivre la côte plutôt qu'à la chevaucher. Lorsque plusieurs facteurs ou indices sont représentés simultanément sur un même document, chaque série de points est successivement décalée par incréments d'environ 1 600 mètres par rapport à la ligne de points la plus à l'est — c'est-à-dire la plus proche du trait de côte, qui a elle-même été décalée vers l'ouest d'environ 1 300 mètres — afin d'éviter le chevauchement des entités. Il convient également de préciser que, dans ces cas, les séries de points correspondant aux différents facteurs ou indices sont disposées selon l'ordre chronologique de leur apparition dans le document : ainsi, la série X_1 se situe la plus à gauche, immédiatement suivie à droite par X_2 , et ainsi de suite. Enfin, les coordonnées sont exprimées dans le système de coordonnées de référence (SCR) UTM Zone 28N (WGS84), adapté à la zone d'étude.

La symbologie utilisée pour la cartographie des facteurs dépend de la méthode de classification retenue. Elle oscille donc entre les valeurs 1 et 5, conformément aux classes définies, et se présente sous la forme d'une échelle de couleurs discrétisée, reprenant les mêmes couleurs que celles déjà utilisées dans les tableaux de classification (Tableaux 1, 2 et 3). Cette palette respecte les règles de la symbologie cartographique, le vert foncé symbolisant les valeurs très faibles,

tandis que le rouge traduit les valeurs très élevées (Fig. 19). Enfin, le diamètre des points a été augmenté pour faciliter la lecture, et un contour noir ajouté, renforçant ainsi le contraste colorimétrique.

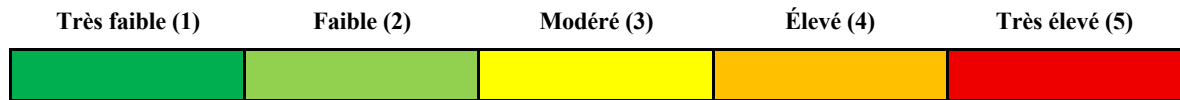


Figure 19. Échelle de couleurs discrétisée utilisée pour la cartographie des facteurs.

La symbologie utilisée pour la cartographie des indices dépend des méthodes d'agrégation choisies. Puisque les indices peuvent prendre des valeurs décimales, l'échelle de couleurs est ici continue, oscillant entre 1 et 5. Les mêmes couleurs que celles utilisées pour l'échelle des facteurs sont appliquées aux valeurs entières (1, 2, 3, 4 et 5), tandis que les valeurs décimales intermédiaires sont représentées par des dégradés de couleurs (Fig. 20).

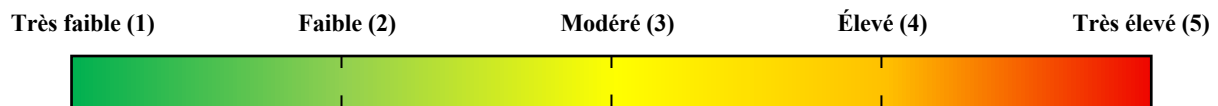


Figure 20. Échelle de couleurs continue utilisée pour la cartographie des indices.

Enfin, les clusters identifiés par l'analyse statistique ont également été représentés selon le même formatage que les points des facteurs et indices, à l'exception de l'utilisation de couleurs distinctes afin de les différencier clairement.

VI. RÉSULTATS

Cette section expose les résultats obtenus pour l'ensemble des analyses menées, à savoir : les facteurs reclassifiés, le calcul des indices intermédiaires et du *Coastal Risk Index* (CRI), ainsi que les analyses multivariées, comprenant le corrélogramme de Spearman, l'ACP et l'identification des clusters.

VI.1. Analyse des facteurs

Ce chapitre présente les résultats de la classification en cinq classes — de Très faible (1) à Très élevé (5) — des différents paramètres étudiés : les forçages côtiers (X), les caractéristiques physiques du littoral (Y) et les caractéristiques socio-économiques du littoral (Z).

VI.1.1. Les forçages côtiers (X)

La tendance d'élévation du niveau marin (X_1) indique une hausse moyenne de 4,19 mm/an au large de la zone d'étude. Cette valeur est classée dans la catégorie Très élevé (5) (Fig. 21) (Tableau 4). Il est à noter que la prise en compte d'une éventuelle subsidence de 0,5 mm/an, telle que suggérée par Faure *et al.* (1974) n'aurait pas modifié cette catégorisation ; toutefois, si cette subsidence est effectivement active, elle contribuerait à accentuer le phénomène d'élévation relative du niveau marin. Ce premier résultat met en évidence que l'élévation du niveau marin constitue un danger majeur pour la commune de Kafountine, située dans une LECZ (Tableau 4).

L'amplitude moyenne des marées (X_2) a été classée dans la catégorie Élevé (4). Le régime des marées à Kafountine est de type semi-diurne, avec des amplitudes faibles. Les valeurs calculées à partir des données de la GCC pour la zone de Kafountine oscillent entre 1,23 et 1,25 m, avec une tendance à l'augmentation progressive du nord vers le sud (Fig. 21) (Tableau 4). Ce résultat est cohérent avec l'étude de Diara (1999) qui indique un marnage de 0,9 m en mortes-eaux et de 1,4 m en vives-eaux à Diogué, situé au sud de la commune. De plus, des données accessibles en ligne (Marépêche, 2025) confirment des amplitudes similaires pour Kafountine, ce qui renforce la pertinence de la classification retenue (Tableau 4). Ces faibles amplitudes sont caractéristiques des côtes microtidales (inférieures à 2 m) (Bakhoun *et al.*, 2018), et correspondent au régime semi-diurne observé sur l'ensemble du littoral sénégalais, où l'amplitude moyenne est d'environ 1,70 m (Sakho *et al.*, 2022).

Résultats

La **hauteur des vagues (X_3)** a été classée dans la catégorie Modéré (3). Les valeurs, calculées à partir des données de la GCC, oscillent entre 0,96 et 0,99 m, avec une tendance à l'augmentation progressive du nord vers le sud (Fig. 21) (Tableau 4). Des données en ligne confirment cet ordre de grandeur (Maréepêche, 2025). Nos résultats sont toutefois légèrement supérieurs à ceux de Samou *et al.* (2023), qui ont analysé la variabilité des vagues le long des côtes du Sénégal. Leur modélisation, qui permet d'estimer des hauteurs de vagues significatives (H_s) plus près des côtes au cours des quatre dernières décennies, donne des valeurs plus faibles, autour de 0,6 m.

Le **niveau marin extrême (X_4)** se distingue des autres forçages côtiers par une classification répartie sur plusieurs catégories. Les valeurs de *TWL (10 years RP)* sont de 1,21 à 1,25 m au-dessus du MSL. La majorité des valeurs (69,81 %) correspondent à la classe Très faible (1), tandis que 11,32 % sont classées comme Modéré (3) et 18,87 % comme Très élevé (5). Aucune valeur n'a été assignée aux classes Faible (2) et Élevé (4) puisque nous avons choisi d'utiliser une échelle de classification ternaire pour ce facteur (Tableau 4). La cartographie du facteur montre que les flèches sableuses ont tendance à présenter des valeurs Élevé (5), tandis que les embouchures situées plus au sud présentent majoritairement des valeurs Modéré (3). Une zone identifiée comme Très élevé (5) est également présente au sud du quai de pêche de Kafountine (Fig. 21).

Tableau 4. Fréquence des classes des facteurs de forçages côtiers (X).

Catégorie	Code	Facteur	Fréquence (%)				
			Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Forçages côtiers	X_1	Tendance d'élévation du niveau marin (mm/an)	0	0	0	0	100
	X_2	Amplitude des marées (m)	0	0	0	100	0
	X_3	Hauteur des vagues (m)	0	0	100	0	0
	X_4	Niveau marin extrême (m)	69,81	0	11,32	0	18,87

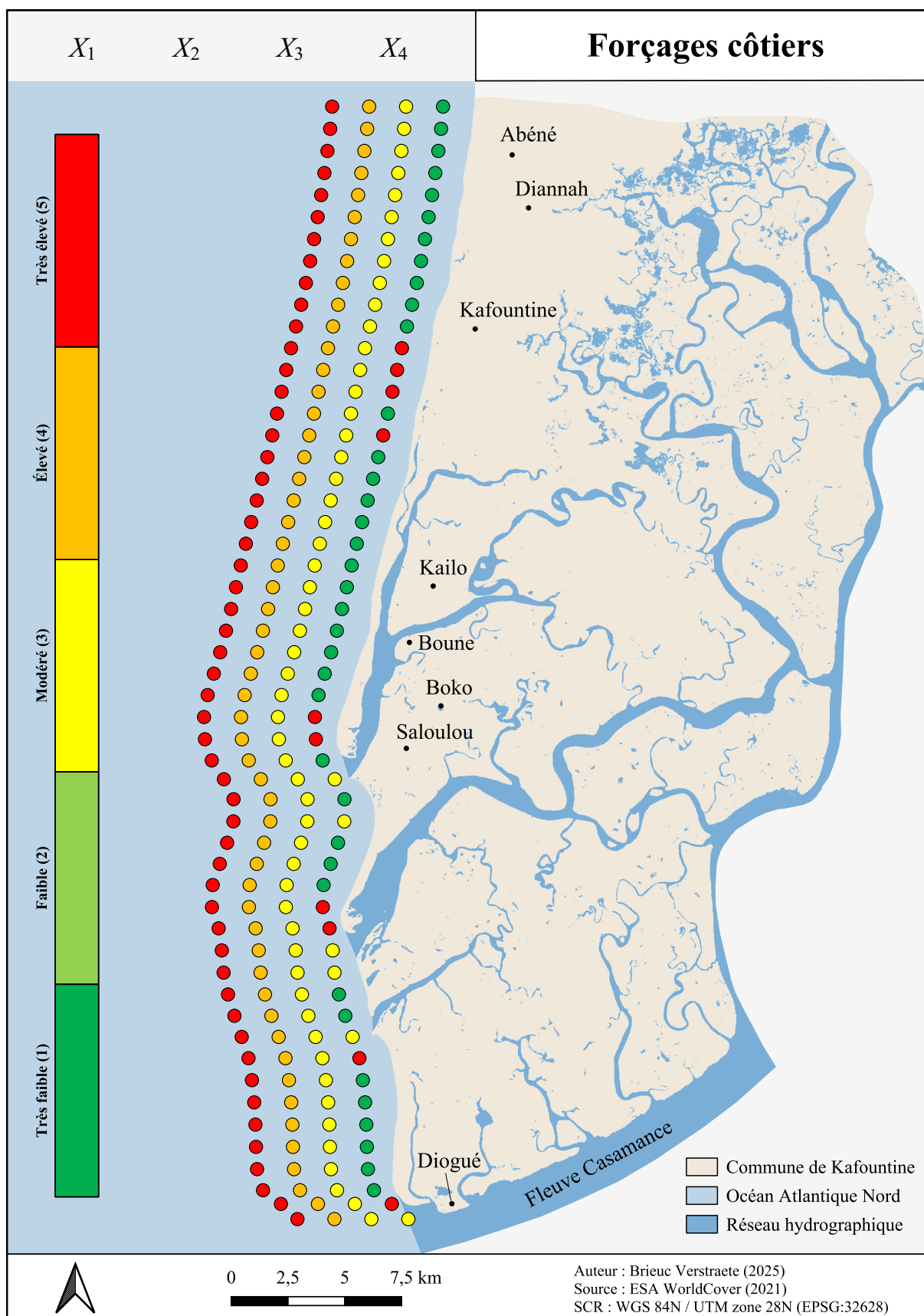


Figure 21. Carte des facteurs de forçages côtiers (X).

VI.1.2. Les caractéristiques physiques du littoral (X)

La géomorphologie (X_1) a été classée dans la catégorie Très élevé (5) pour l'ensemble des points de la GCC, ce qui indique une homogénéité dans la classification de ce facteur (Fig. 22) (Tableau 5). Bien que cette classification soit uniforme, l'analyse des données a permis d'identifier trois types de côtes sur le littoral de Kafountine. Les côtes sablonneuses sont très majoritaires. Les côtes boueuses se concentrent principalement dans les 10 km les plus au sud de la zone d'étude, bien que quelques segments sableux y soient également présents. Les côtes végétalisées, quant à elles, sont beaucoup plus rares et ne correspondent qu'à trois points, localisés dans le deuxième tiers du littoral. Ces données sont confirmées par le *land cover* de la zone (Fig. 6). Bien que cette diversité morphologique traduise une certaine hétérogénéité, cette uniformité de classification reflète une susceptibilité importante commune à tous ces types de côtes (Tableau 5).

L'élévation (Y_2) présente une variabilité importante sur le littoral de Kafountine. Plus de la moitié de la côte (54,72 %) est classée dans la catégorie Très élevé (5), qui correspond à une élévation inférieure à 1 m. Un peu plus d'un quart du littoral (26,41 % des points) est classé dans la catégorie Élevé (4), caractérisée par une élévation comprise entre 1 et 2,5 m. Les classes Faible (2) et Très faible (1), correspondant respectivement à des altitudes comprises entre 7,5 et 5 m, et supérieures à 7,5 m, représentent chacune 7,55 % des points échantillonnés. Enfin, seuls deux points de la GCC (3,77 %) sont classés comme Modéré (3), avec une élévation entre 5 et 2,5 m (Tableau 5). La cartographie révèle que les valeurs Très faible (1) et Faible (2) sont localisées entre Abéné au nord et Kafountine au sud. Les classes Élevé (4) et Très élevé (5) sont situées dans les 80 % du littoral restant. Enfin, notons également que l'élévation (Y_2) au nord d'Abéné est classée comme Modéré (3) (Fig. 22).

La pente de la plage (Y_3) présente une répartition variée. Un tiers du littoral (33,96 %) appartient à la catégorie Très élevé (5), indiquant la présence de plages très peu inclinées, inférieures à 1 %. La catégorie Élevé (4), avec des pentes comprises entre 1 % et 2 %, concerne 18,87 % du secteur analysé, tandis que 26,41 % de la côte se situe dans la classe Modéré (3), correspondant à des pentes entre 2 % et 4 %. Les catégories Faible (2) et Très faible (1), avec des pentes comprises respectivement entre 4 % et 6 %, et supérieures à 6 %, représentent ensemble un cinquième (20,76 %) de la zone d'étude (Tableau 5). La distribution spatiale est hétérogène. On peut toutefois remarquer que les valeurs entre le nord de la zone d'étude et

Résultats

Kafountine sont plus faibles, avec majoritairement des valeurs Très faible (1) à Modéré (3). De plus, une zone de valeurs Très faible (1) se distingue au nord du village de Kailo, et les pointes sableuses correspondent à des valeurs Très élevé (5) (Fig. 23). Cette distribution traduit une diversité des profils de plage, avec une prédominance de pentes faibles

La largeur de la plage (Y₄) présente une répartition variée le long du littoral. Selon les données de la GCC, 30,19 % des points correspondent à la catégorie Très élevé (5), indiquant des plages particulièrement étroites de moins de 50 m. La catégorie Élevé (4), représentant des plages de 50 à 100 m de large, regroupe 26,41 % du territoire. Les classes Modéré (3) (100 à 200 m), Faible (2) (200 à 500 m) et Très faible (1) (> 500 m) concernent respectivement 16,98 %, 18,87 % et 7,55 % du territoire (Tableau 5). La portion de la côte s'étalant du nord de la commune au village de Kailo présentent des valeurs presque majoritairement Élevé (4) à Très élevé (5). Le sud de cette section est plus hétérogène. Les pointes sableuses des valeurs Très faible (1) ou Faible (2), et le sud de la commune se distingue quant à lui par des valeurs Faible (2) aux alentours de la Pointe de Diogué (Fig. 22). Cette distribution traduit une forte variabilité de la largeur des plages, avec des sections étroites, plus vulnérables, coexistant avec des plages plus larges offrant une meilleure protection naturelle contre les forçages côtiers.

Les éléments de protection naturels (Y₅) présentent des une majorité de valeurs élevées. Près de la moitié des données (49,06 %) correspondent à la catégorie Très élevé (5), caractérisée par une végétation stérile, éparse, ou par la présence d'eau libre. La catégorie Élevé (4), regroupant les zones avec cultures et bâti, concerne quant à elle un quart de la zone d'étude (24,53 %). Les classes Faible (2) et Très faible (1), associées respectivement à la présence d'arbres et de mangroves, représentent ensemble 24,52 % des points, tandis que la catégorie Modéré (3), relative aux arbustes, reste minoritaire (1,89 %) (Tableau 5). La répartition spatiale des éléments de protection naturels est hétérogène. Le secteur entre le nord de la commune et le nord du village de Kafountine présente toutefois majoritairement des valeurs Faible (2) et Modéré (3). On remarque aussi la présence d'une zone Très élevé (5) au niveau de Kailo, et d'une zone Élevé (4) à Très élevé (5) entre la Rivière aux Huitres et la Pointe de Diogué, au sud de la commune (Fig. 22). Cette répartition met en évidence une grande variabilité dans la capacité de protection naturelle le long du littoral de Kafountine, avec des secteurs faiblement protégés alternant avec des zones bénéficiant d'une couverture végétale plus dense et efficace.

Résultats

Tableau 5. Fréquence des classes des facteurs de caractéristiques physiques du littoral (*Y*).

Catégorie	Code	Facteur	Fréquence (%)				
			Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
<i>Caractéristiques physiques</i>	<i>Y</i> ₁	Géomorphologie	0	0	0	0	100
	<i>Y</i> ₂	Élévation	7,55	7,55	3,77	26,41	54,72
	<i>Y</i> ₃	Pente de la plage	15,09	5,67	26,41	18,87	33,96
	<i>Y</i> ₄	Largeur de la plage	7,55	18,87	16,98	26,41	30,19
	<i>Y</i> ₅	Éléments de protection naturels	9,43	15,09	1,89	24,53	49,06

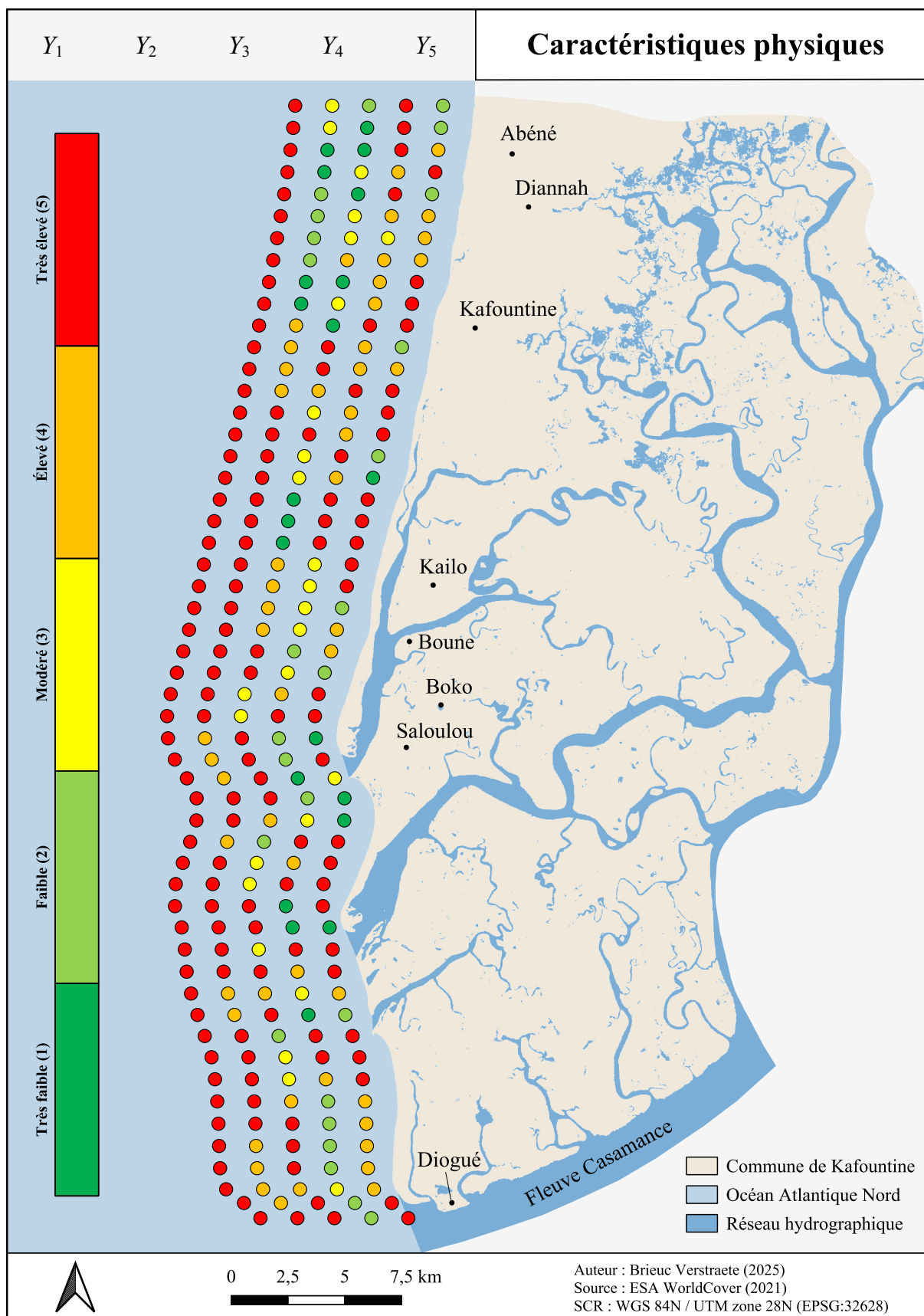


Figure 22. Carte des facteurs de caractéristiques physiques du littoral (Y).

VI.1.3. Les caractéristiques socio-économiques du littoral (Z)

La densité de population sous 1 m (Z_1) est peu élevée sur la zone d'étude. En effet, 43,39 % des points sont classés dans la catégorie Très faible (1), correspondant à une densité nulle, tandis que 30,19 % appartiennent à la catégorie Faible (2), avec une densité comprise entre 0 et 10 habitants par km². Les classes Modéré (3) (10 à 50 hab/km²), Élevé (4) (50 à 100 hab/km²) et Très élevé (5) (> 100 hab/km²) regroupent respectivement 18,87 %, 5,66 % et 1,89 % des points (Tableau 6). La section au nord du village de Kafountine présente des valeurs Très faible (1) à Faible (2). Une section d'environ six kilomètres est ensuite classée comme Modéré (3) à Élevé (4), avec l'unique point classé comme Très élevé (5) en son centre, au sud du village de Kafountine. La portion de littoral restante présente deux zones Très faible (1) d'environ 6 km chacune : au nord du village de Kailo et au niveau de Kalissaye. Des valeurs Modéré (3) se dégagent au niveau des villages de Boune, et Boko, et les abords de la Pointe de Diogué se distinguent aussi par cette catégorisation (Fig. 23).

La distance aux bâtiments (Z_2) montre que la majorité des constructions OSM se trouvent à plus de 1 km des points de la GCC. Près de la moitié de la zone d'étude (49,05 %) appartient à la catégorie Très faible (1), correspondant à une distance supérieure à 1 km. Les catégories Faible (2) (500 à 1000 m) et Modéré (3) (200 à 500 m) couvrent respectivement 18,87 % et 11,32 % du littoral. La classe Élevé (4) (100 à 200 m) représente 18,87 %, tandis que la catégorie Très élevé (5) (< 100 m) concerne seulement 1,89 %. Cette répartition indique que pour la plupart des secteurs, les bâtiments restent relativement éloignés du littoral, avec toutefois quelques zones où la vulnérabilité liée à la proximité des infrastructures peut être plus importante (Tableau 6). La répartition spatiale de ce facteur est clivée, distinguant clairement deux zones : la section nord, qui s'étend jusqu'au sud du village de Kafountine, et le reste du littoral, jusqu'à la Pointe de Diogué. La première partie présente des valeurs globalement Modéré (3) et Élevé (4), et inclut l'unique point classé Très élevé (5), situé au niveau du village de Kafountine. La section sud est quant à elle caractérisée par des valeurs majoritairement Très faible (1) ou Faible (2). On observe toutefois une petite zone avec des valeurs Modéré (3) à Élevé (4) au niveau de Kailo et Boune (Fig. 23).

La distance au réseau routier (Z_3) sur le littoral de Kafountine montre que la majorité des points de la GCC (67,93 %) sont situés à plus de 1 km des routes OSM, ce qui les classe dans la catégorie Très faible (1). Les catégories Faible (2) (1000 à 500 m) et Modéré (3) (500

Résultats

à 200 m) représentent respectivement 5,66 % et 11,32 % de la commune. Les classes Élevé (4) (200 à 100 m) et Très élevé (5) (< 100 m) concernent respectivement 11,32 % et 3,77 % du territoire (Tableau 6). La répartition spatiale de ce facteur présente le même clivage que celle du facteur Z_3 , distinguant clairement les deux mêmes zones : la section nord, qui s'étend jusqu'au sud du village de Kafountine, et le reste de la côte. La première partie présente des valeurs Modéré (3) et Élevé (4), avec également deux points classés Très élevé (5), respectivement situés à hauteur et au sud du village de Kafountine. La section sud est quant à elle caractérisée par des valeurs essentiellement Très faible (1) (Fig. 23). Cette distribution indique que la plupart des routes sont relativement éloignées du littoral, tandis que certains secteurs montrent une susceptibilité plus importante pour ce facteur.

L'utilisation économique du sol (Z_4) sur le littoral de Kafountine présente une répartition majoritaire vers la classe Faible (2), qui couvre 64,15 % du territoire et correspond principalement aux zones de mangroves. Les autres classes sont moins représentées : 18,87 % de la zone est classée Très élevé (5), associée aux zones touristiques, 9,43 % dans la catégorie Élevée (4), liée à la pêche, et 7,55 % en catégorie Modérée (3), correspondant aux zones agricoles ou de cultures. Aucune zone n'est classée dans la catégorie Très faible (1), correspondant aux zones arborées (Tableau 6). La répartition spatiale de ce facteur présente le même clivage que celui des facteurs Z_3 et Z_4 , distinguant clairement deux zones : la section nord, s'étendant jusqu'au sud du village de Kafountine, et le reste du littoral. La première partie est caractérisée par des valeurs majoritairement Très élevé (5), à l'exception de quelques valeurs Élevé (4) situées juste au sud d'Abéné et de Kafountine. La section sud, quant à elle, présente des valeurs globalement Faible (2), à l'exception des 5 km les plus au sud, qui incluent des valeurs Modéré (3), tandis que la Pointe de Diogué est classée comme Élevé (4) (Fig. 23).

Résultats

Tableau 6. Fréquence des classes des facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral (Z).

Catégorie	Code	Facteur	Fréquence (%)				
			Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
<i>Caractéristiques socio-économiques</i>	Z ₁	Densité de population	43,39	30,19	18,87	5,66	1,89
	Z ₂	Distance aux bâtiments	49,05	18,87	11,32	18,87	1,89
	Z ₃	Distance au réseau routier (m)	67,93	5,66	11,32	11,32	3,77
	Z ₄	Utilisation économique du sol	0	64,15	7,55	9,43	18,87

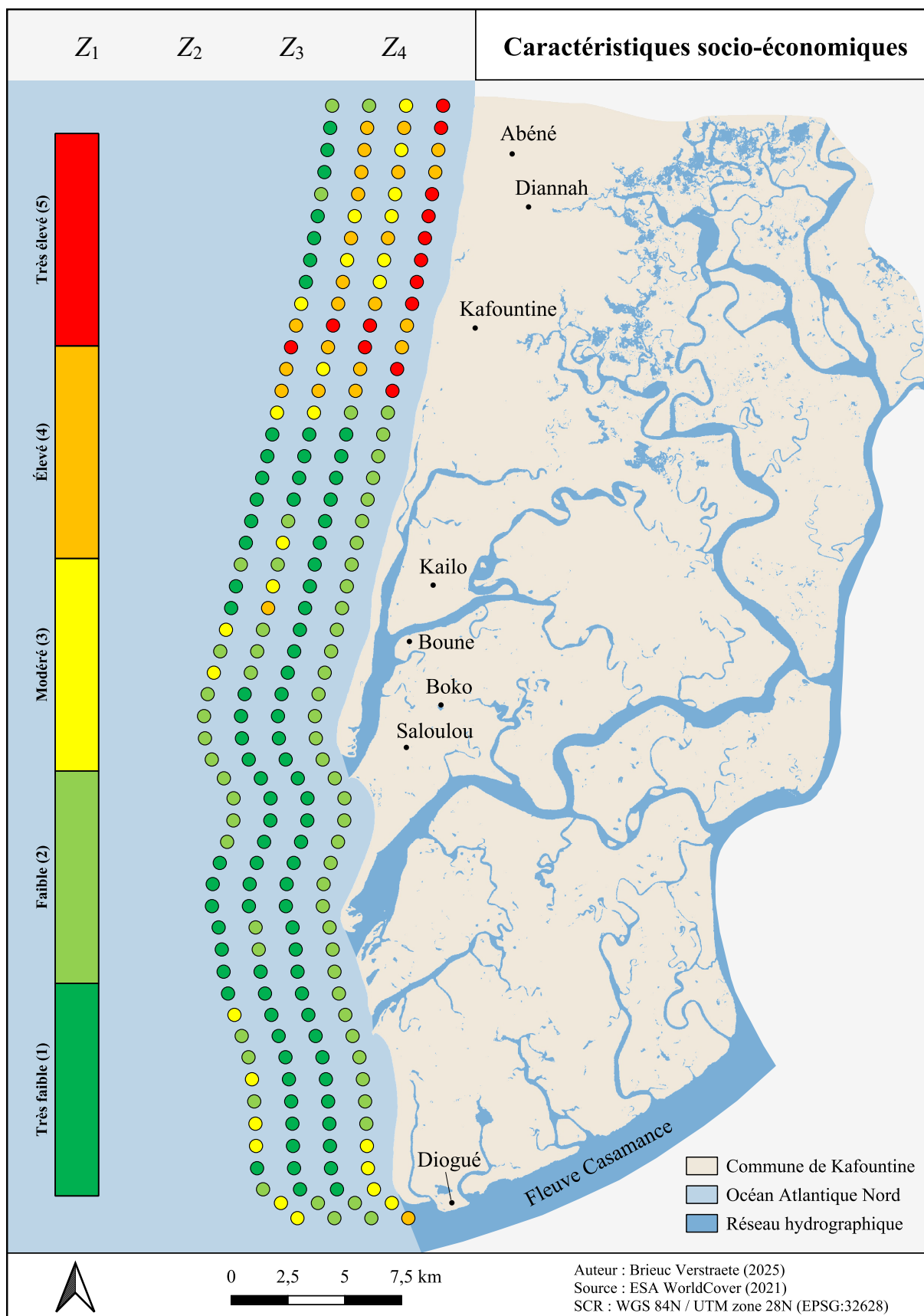


Figure 23. Carte des facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral (Z).

VI.2. Analyse des indices intermédiaires

Les indices intermédiaires présentés ici sous forme d'histogrammes synthétisent et regroupent les différentes composantes du risque côtier. La cartographie des cinq indices — *Coastal Forcing Index* (CFI), *Physical Susceptibility Index* (PSI), *Socioeconomic Susceptibility Index* (SSI), *Coastal Hazard Index* (CHI) et *Coastal Vulnerability Index* (CVI) — est présentée à la figure 29, en fin de chapitre.

VI.2.1. Indices de premier niveau

Les indices de premier niveau constituent les bases du calcul des indicateurs d'aléa, de vulnérabilité et de risque (Fig. 10). Chacun d'eux évalue une des composantes spécifiques au système côtier.

VI.2.1.1. Coastal Forcing Index (CFI)

Le *Coastal Forcing Index* (CFI) affiche une distribution assez simple, comme le montre l'histogramme de la figure 25. Cette simplicité s'explique par le fait que le CFI correspond à la moyenne arithmétique des quatre forçages côtiers, dont trois ont été classés dans une seule catégorie. Les valeurs du CFI sont modérées à élevées : 69,81 % des valeurs du CFI sont égales à 3,25, 11,32 % des valeurs à 3,75, et 18,87 % à 4,25 (Fig. 24). Ces résultats indiquent que les forçages côtiers se situent globalement dans la moitié supérieure sur une échelle allant de 1 à 5, traduisant une pression notable sur l'ensemble du littoral, principalement due aux trois premiers facteurs, et en particulier à l'élévation du niveau de la mer (SLR). Le sud du village de Kafountine, ainsi que les systèmes embouchure/pointe sableuse, se distinguent par des valeurs plus élevées (Fig. 29).

Résultats

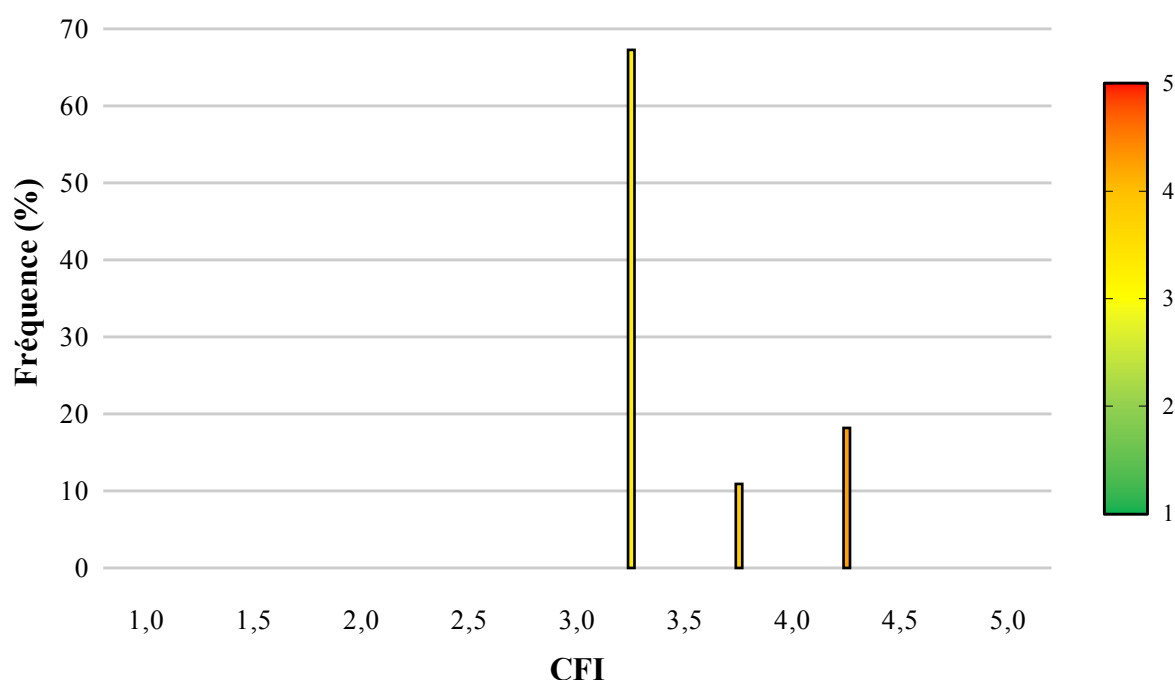


Figure 24. Histogramme du Coastal Forcing Index (CFI).

VI.2.1.2. Physical Susceptibility Index (PSI)

Le **Physical Susceptibility Index (PSI)** présente une distribution réduite entre les valeurs 3 et 4,8, avec une fréquence maximale autour de 4,2 (18,87 %) et 4,0 (16,98 %). Les valeurs les plus faibles (3,0 et 3,2) sont relativement rares, représentant moins de 7,5 % des points, tandis que les valeurs élevées (4,4 à 4,8) concernent près de 30 % des observations (Fig. 25). Le nord du village de Kafountine se distingue par des valeurs plus faibles que le reste du littoral étudié. Les valeurs les plus élevées sont situées au sud du quai de pêche de Kafountine et à hauteur des embouchures (Fig. 29). Cette distribution témoigne d'une susceptibilité physique importante sur le littoral étudié avec des secteurs qui se distinguent en accord avec la variabilité morphologique et topographique analysée précédemment.

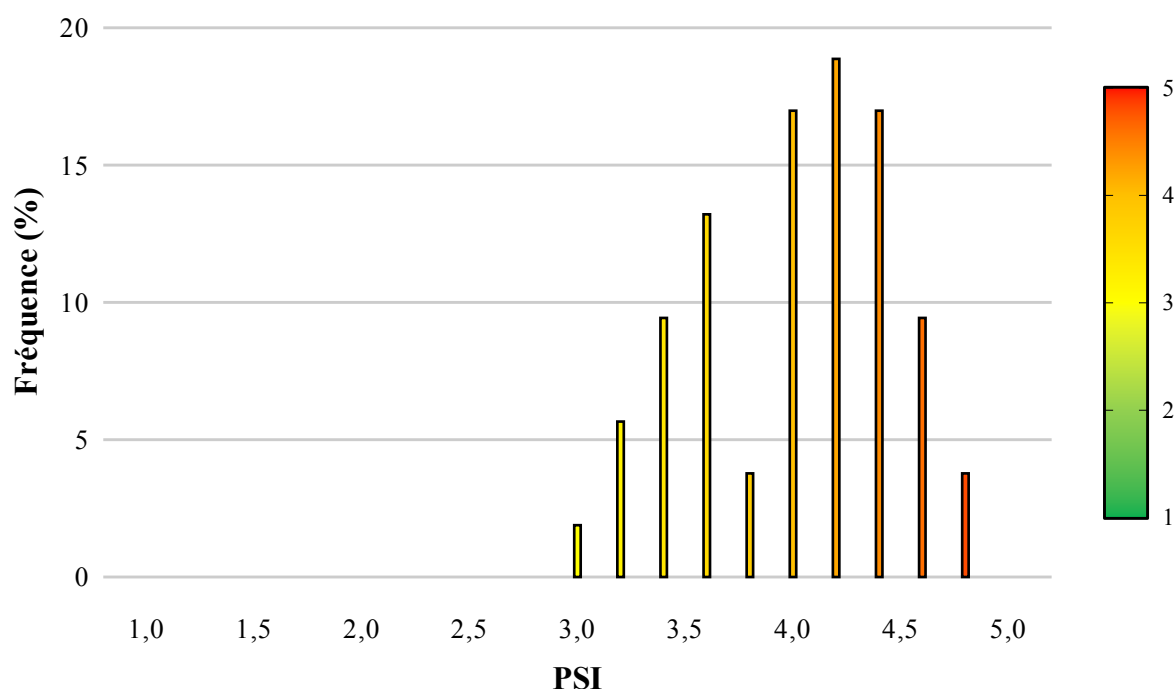


Figure 25. Histogramme du Physical Susceptibility Index (PSI).

VI.2.1.3. Socioeconomic Susceptibility Index (SSI)

Le *Socioeconomic Susceptibility Index (SSI)* présente une distribution très large, qui s'étend de 1,25 à 4,5, selon son histogramme. La majorité des valeurs se situent dans la partie basse de l'échelle, avec une concentration notable autour de 1,25 à 1,75, regroupant environ 57 % des secteurs étudiés. Ces valeurs plus faibles sont localisées sur les deux derniers tiers de la zone d'étude en partant du nord. Un quart de la côte présente des indices intermédiaires entre 2,5 et 3,5, représentant environ 26 % des observations qui sont localisées entre le nord de la commune et le village de Kafountine. Notons que la Pointe de Diogué présente aussi une valeur de 2,75. Enfin, un nombre plus restreint de points (environ 17 %) atteint des valeurs élevées comprises entre 4 et 4,5 est observable à hauteur du village de Kafountine, indiquant que la vulnérabilité socio-économique de cette zone est plus prononcée (Fig. 26 et Fig. 29). Cette répartition illustre une hétérogénéité dans la vulnérabilité socio-économique à l'échelle locale, avec une majorité de secteurs relativement peu exposés, mais aussi des zones plus sensibles qui nécessitent une attention particulière.

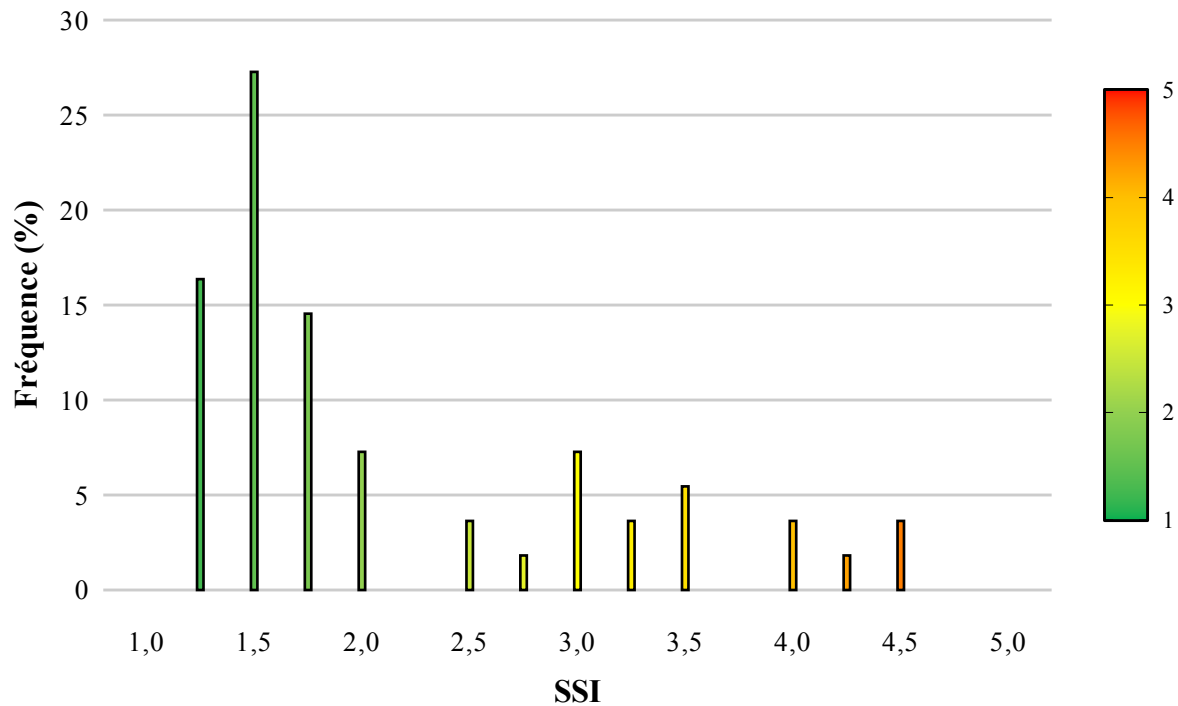


Figure 26. Histogramme du Socioeconomic Susceptibility Index (SSI).

VI.2.2. Indices de second niveau

Les indices de second niveau combinent les premiers indices créés pour offrir une vision intégrée de l'aléa et de la vulnérabilité côtière.

VI.2.2.1. Coastal Hazard Index (CHI)

Le **Coastal Hazard Index (CHI)** présente des valeurs comprises entre 3,12 et 4,52, comme illustré par l'histogramme à la figure 28. La majorité des secteurs (44 %) affichent des indices compris entre 3,5 et 4, traduisant un danger côtier modéré à élevé. Une proportion de 34 % présente des valeurs plus faibles, comprises entre 3,12 et 3,5, correspondant à un danger modéré. Enfin, 22 % des secteurs atteignent des valeurs supérieures à 4, indiquant un danger côtier élevé, avec quelques zones particulièrement marquées présentant des valeurs d'indice proches de 4,5. Le nord de la commune présente globalement les valeurs les plus faibles, tandis que le sud du village de Kafountine est marqué par des valeurs élevées, voire très élevées. Le restant de la commune est assez homogène, avec toutefois des pics de valeur aux abords des embouchures (Fig. 29). Cette distribution montre que le danger côtier est globalement modéré à élevé sur la zone étudiée, tout en soulignant la présence de secteurs plus exposés.

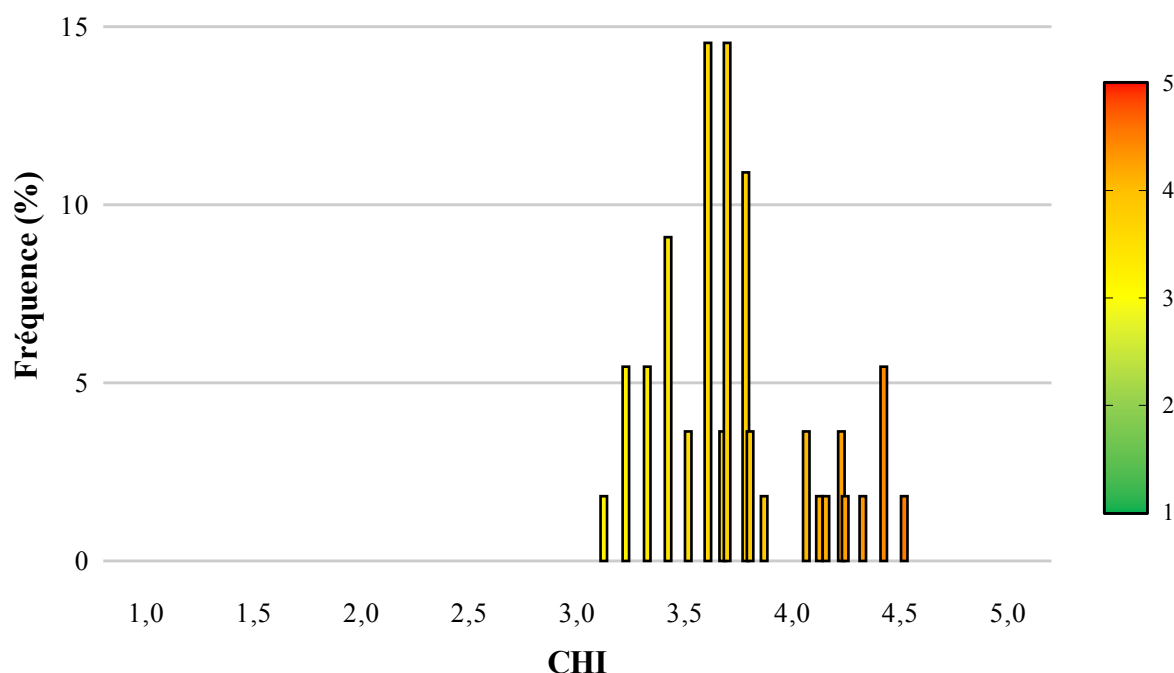


Figure 27. Histogramme du Coastal Hazard Index (CHI).

VI.2.2.2. Coastal Vulnerability Index (CVI)

Le *Coastal Vulnerability Index (CVI)* présente des valeurs comprises entre 2,12 et 4,42, comme illustré par l'histogramme à la figure 29. La majorité des secteurs (56,6 %) présente des indices compris entre 2,1 et 2,8, indiquant une vulnérabilité faible à modérée. Une proportion de 32,1 % affiche des valeurs entre 2,8 et 3,5, traduisant une vulnérabilité modérée. Enfin, 11,3 % du territoire atteint des valeurs supérieures à 3,5, correspondant à une vulnérabilité élevée, avec quatre points dont les indices se situent entre 4,20 et 4,42. Ces points sont situés au niveau du village de Kafountine et au sud de son quai de pêche. Le nord de ce secteur présente des valeurs modérées tandis que les valeurs au sud sont plus faibles. Enfin, des valeurs modérées sont également visibles à hauteur du village de Diogué (Fig. 29). Le CVI montre que la vulnérabilité côtière est globalement faible à modérée sur la zone étudiée, tout en signalant la présence de quelques secteurs plus vulnérables. Cette répartition témoigne d'une variabilité notable entre le nord et le sud de la zone d'étude.

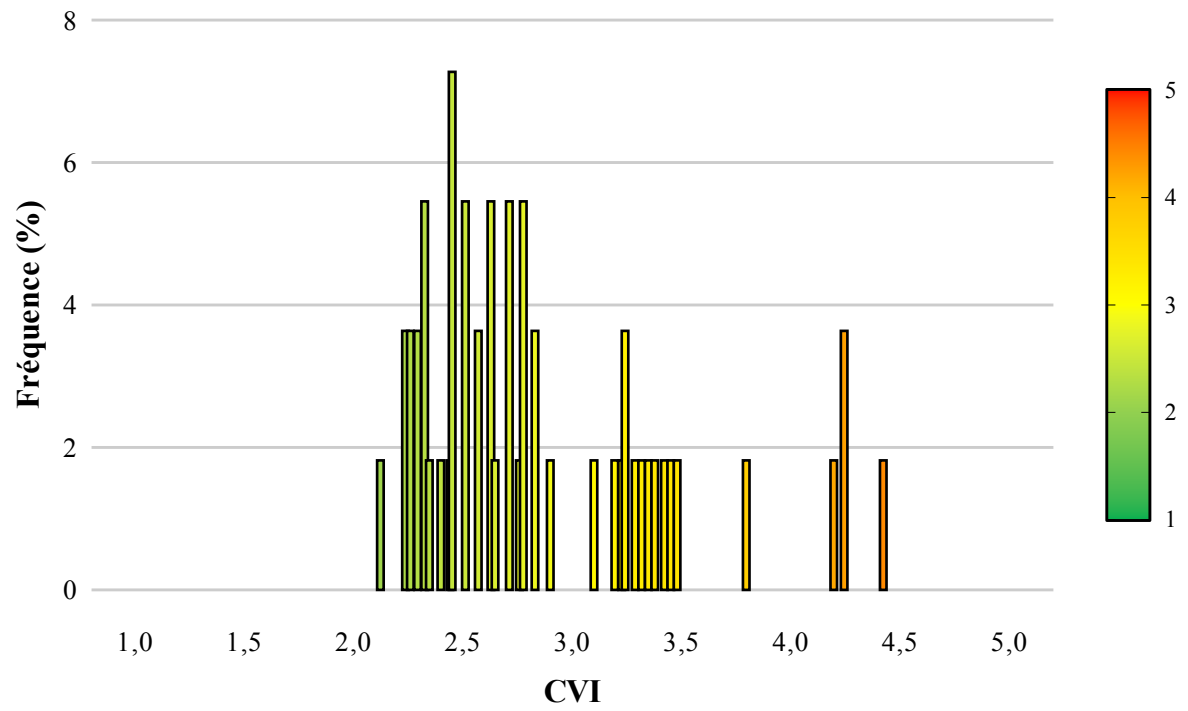


Figure 28. Histogramme du Coastal Vulnerability Index (CVI).

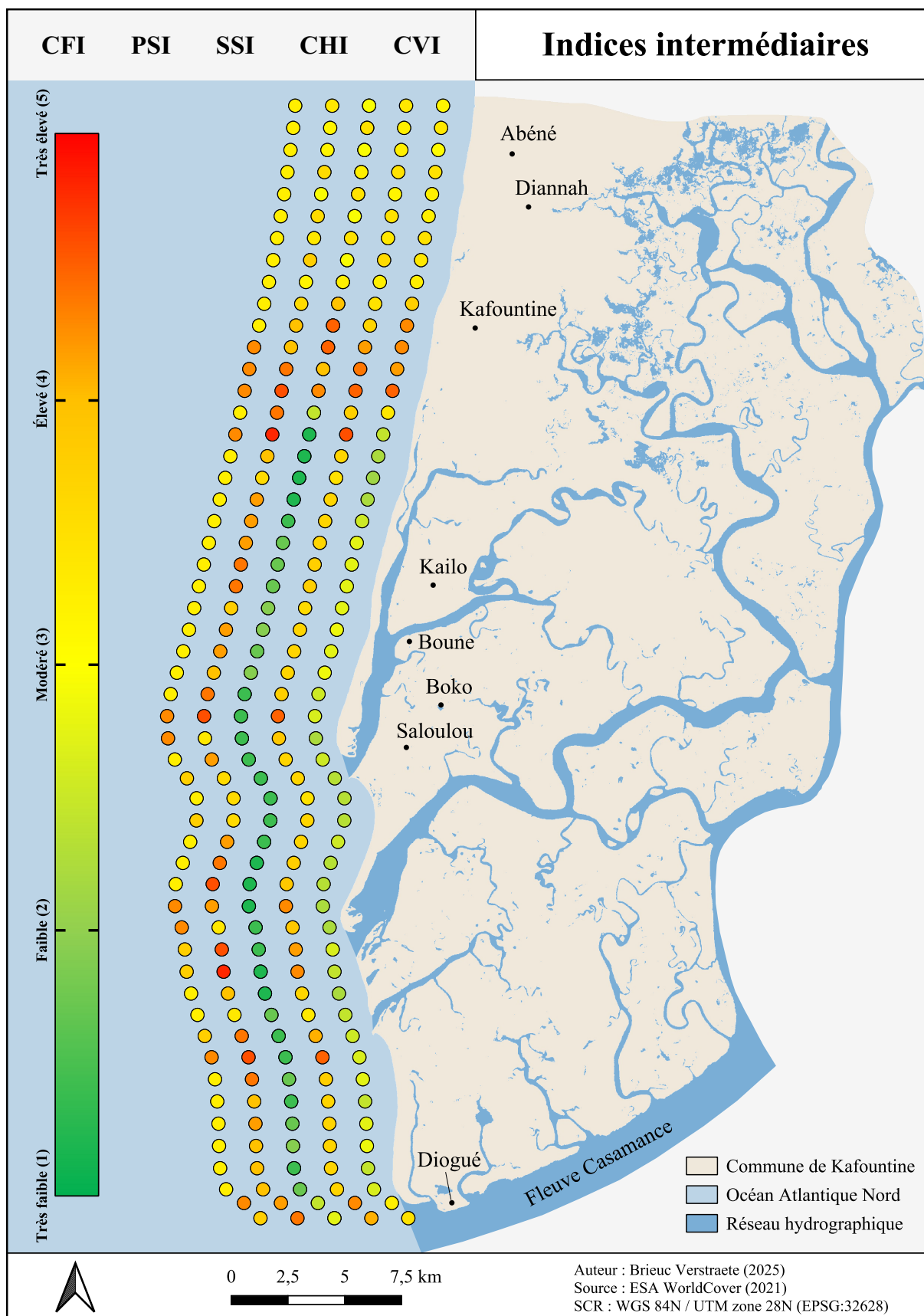


Figure 29. Carte des indices intermédiaires (niveaux 1 et 2) : Coastal Forcing Index (CFI), Physical Susceptibility Index (PSI), Socioeconomic Susceptibility Index (SSI), Coastal Hazard Index (CHI) et Coastal Vulnerability Index (CVI).

VI.3. Analyse du Coastal Risk Index (CRI)

Le *Coastal Risk Index* (CRI) présente des valeurs comprises entre 2,45 et 4,36, comme illustré par l'histogramme à la figure 30. Ce dernier montre que 64,15 % des valeurs se situent dans la première partie du spectre de l'indice, traduisant un risque faible à modéré, et que 86,79 % de la distribution reste sous 3,5, indiquant un risque côtier modéré pour la grande majorité de la zone d'étude. Quelques zones présentent toutefois des indices plus élevés, en particulier trois points au niveau du sud du quai de pêche de Kafountine, où les valeurs se situent entre 4,21 et 4,36, ce qui correspond à un risque élevé voire très élevé. Un risque élevé est également présent à hauteur du quai de pêche, tandis que le nord de la commune présente un risque modéré. Plus au sud, les valeurs sont plus faibles, hormis au niveau de Diogué où le risque est élevé (Fig. 29). La répartition spatiale du CRI est donc hétérogène, avec quelques zones de forte concentration du risque.

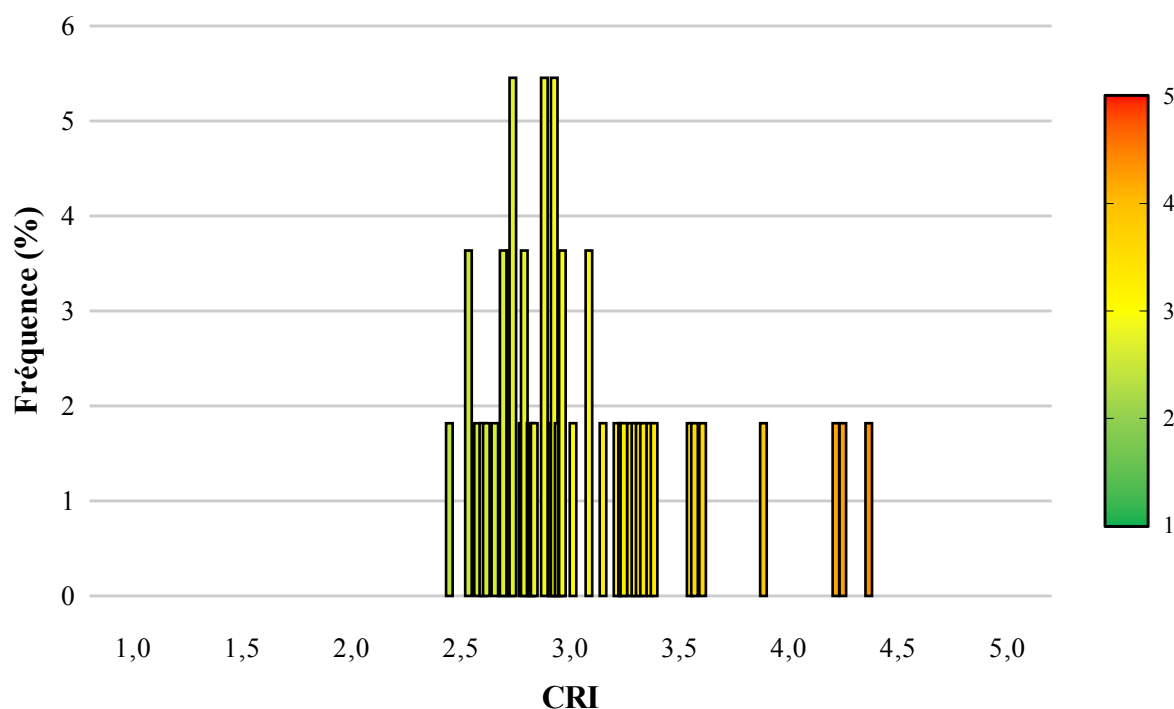


Figure 30. Histogramme du Coastal Risk Index (CRI).

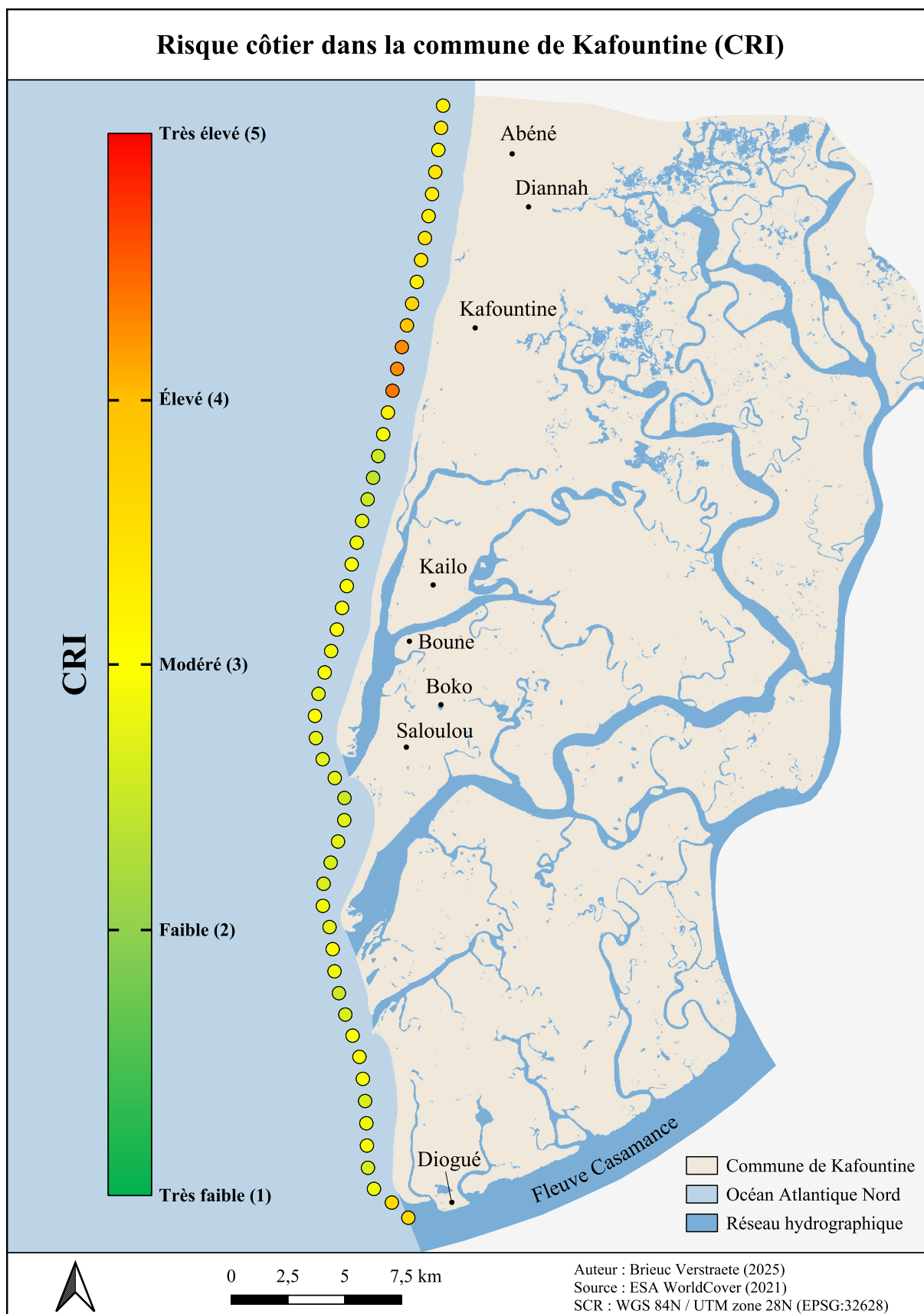


Figure 31. Carte du risque côtier dans la commune de Kafountine, selon le Coastal Risk Index (CRI).

VI.4. Analyse exploratoire des relations entre facteurs

Ce chapitre présente une analyse exploratoire des facteurs du *Coastal Risk Index*, afin de mettre en évidence leurs relations et tendances principales.

VI.4.1. Corrélogramme (Spearman)

Le **corrélogramme des corrélations de Spearman** est présenté à la figure 32. Une p-valeur ajustée inférieure à 0,05 est signalée par un astérisque, indiquant une relation statistiquement significative avec un intervalle de confiance de 95 % (Fig. 32). L'interprétation des résultats statistiques présentés dans ce chapitre repose sur les valeurs numériques (de 1 à 5) attribuées aux facteurs, et non sur leur grandeur physique directe. Ainsi, pour certains facteurs (comme le niveau marin extrême), la catégorie Élevé (5) correspond à des valeurs élevées du facteur, tandis que pour d'autres (comme l'élévation ou la pente), elle correspond à des valeurs faibles. Cette dualité peut rendre certaines corrélations contre-intuitives ; il est donc essentiel de se référer au tableau de classification pour une interprétation cohérente de ces résultats (Annexe 7).

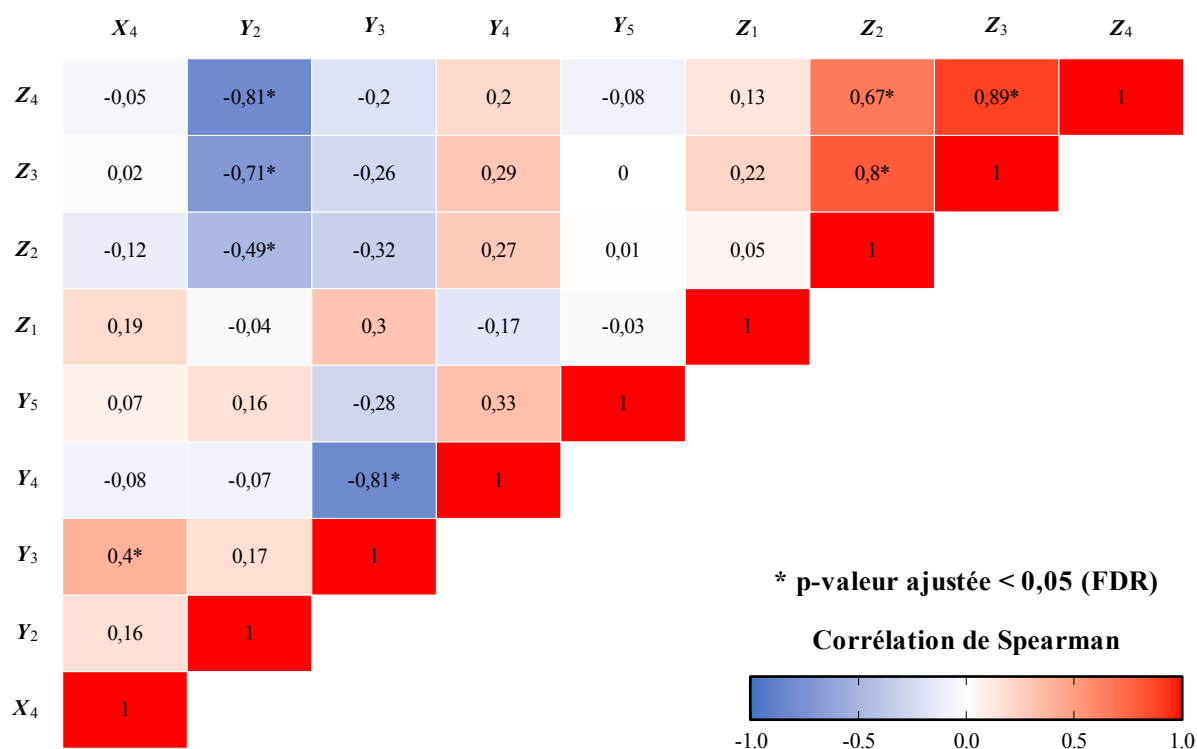


Figure 32. Corrélogramme de la corrélation de Spearman des facteurs du Coastal Risk Index (CRI) retenus pour l'analyse exploratoire.

L'analyse des corrélations entre les facteurs de forçage côtiers et les caractéristiques physiques montre une corrélation positive modérée de 0,4 entre la classification du niveau marin extrême

Résultats

(X_4) et celle de la pente (Y_3), suggérant que les zones les plus sujettes aux événements extrêmes ont un relief plus plat. La pente (Y_3) est également caractérisée par une très forte corrélation négative de - 0,81 avec la classification de la largeur de la plage (Y_4) : plus la pente est faible, plus la plage est large, les plages étendues étant typiquement associées à des reliefs doux.

L'analyse des relations entre les caractéristiques physiques et socio-économiques révèle que l'élévation (Y_2) est fortement liée aux caractéristiques socio-économiques (Z). Une corrélation négative de - 0,81 est observée entre la classification de l'élévation (Y_2) et celle de l'utilisation économique du sol (Z_4), ce qui signifie que plus l'élévation est importante, plus l'utilisation du sol est orientée vers le tourisme. Ce phénomène est renforcé par une corrélation négative de - 0,71 entre la classification de l'élévation (Y_2) et celle de la distance au réseau routier (Z_3), ainsi qu'une corrélation négative de - 0,49 avec la classification de la distance aux bâtiments (Z_2). Ces relations indiquent que les zones de plus haute altitude sont généralement plus densément construites et mieux desservies par le réseau routier.

Enfin, les facteurs socio-économiques montrent des corrélations très fortes entre leurs classifications, révélant une structuration cohérente du territoire. Une corrélation positive de 0,67 entre la classification de la distance aux bâtiments (Z_2) et celle de l'utilisation économique du sol (Z_4) montre que plus la distance aux bâtiments est courte, plus l'utilisation du sol correspond à des activités à fort enjeu économique, comme le tourisme. De même, la corrélation de 0,8 entre la classification de la distance aux bâtiments (Z_2) et celle de la distance au réseau routier (Z_3) indique que les zones densément bâties sont mieux desservies par le réseau routier. Enfin, une très forte corrélation positive de 0,89 entre la classification de la distance au réseau routier (Z_3) et celle de l'utilisation économique du sol (Z_4) confirme que le développement touristique est associé à un accès routier facile.

VI.4.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a généré un *Scree Plot* pour déterminer le nombre de dimensions optimal à retenir (Fig. 33). Les deux premières dimensions ont été retenues conformément au critère du coude, qui identifie le point où la diminution de la variance expliquée devient moins prononcée. Sur le graphique, cela correspond au point après la Dimension 2, où la pente de la courbe commence à s'aplatir.

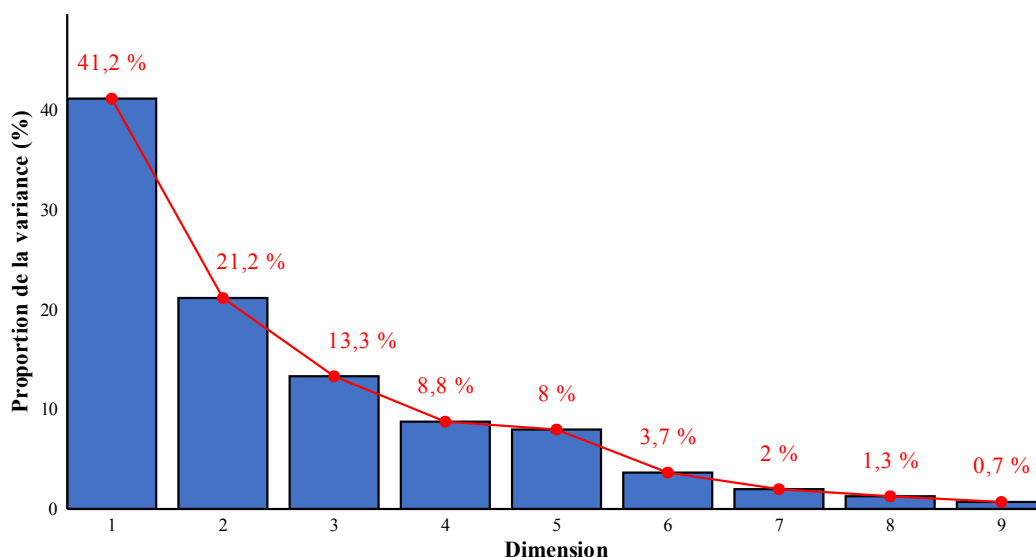


Figure 33. Scree Plot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) montrant la variance expliquée par chaque composante principale.

Les deux premières dimensions expliquent respectivement 41,2 % et 21,2 % de la variance totale, soit un total cumulé de 62,4 % (Fig. 33). Ce résultat justifie leur sélection, car elles concentrent une part importante de l'information contenue dans le jeu de données tout en simplifiant l'analyse.

La première dimension de l'ACP (41,2 % de la variance expliquée) est principalement structurée par l'élévation (Y_2), la distance aux bâtiments (Z_2), la distance au réseau routier (Z_3), l'utilisation économique du sol (Z_4). Leurs contributions à la variance de cette dimension, respectivement de 17,7 %, 20,3 %, 22,0 % et 21,4 %, sont toutes supérieures à la contribution moyenne attendue de 11,1 % (Fig. 34). De plus, leur qualité de représentation sur ce plan factoriel est satisfaisante à élevée, comme en témoignent leurs valeurs de \cos^2 : Y_2 (0,66), Z_2 (0,75), Z_3 (0,82), et Z_4 (0,79) (Annexe 8). Cette dimension peut dès lors être interprétée comme un axe de développement et d'accessibilité socio-économique, étroitement lié à l'altitude.

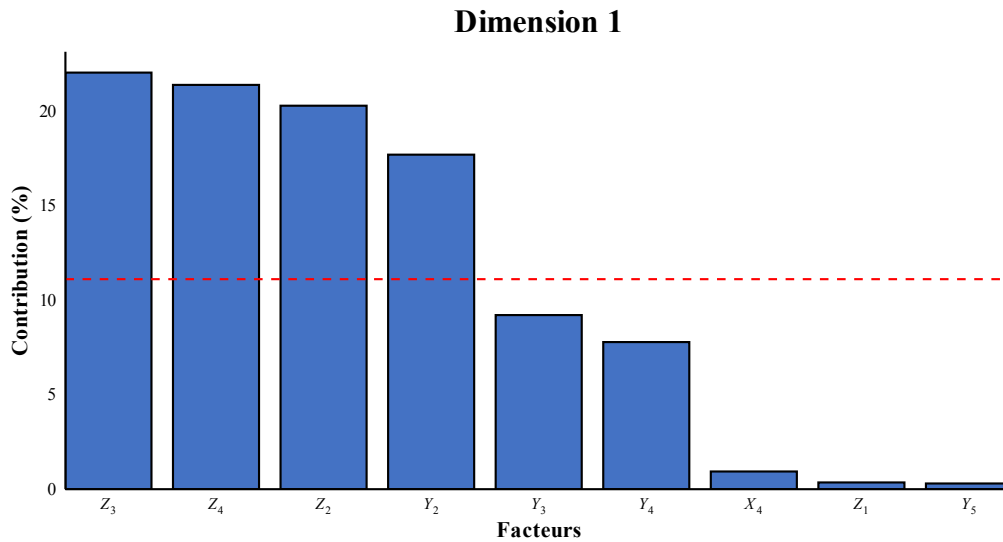


Figure 34. Contribution à la Dimension 1 des facteurs du Coastal Risk Index (CRI). La ligne en pointillé rouge indique la contribution moyenne attendue.

La deuxième dimension de l'ACP (21,2 % de la variance expliquée) est principalement influencée par le niveau marin extrême (X_4), la pente de la plage (Y_3), la largeur de la plage (Y_4) et la densité de population sous 1 m (Z_1). Leurs contributions à cette dimension, respectivement de 15,4 %, 26,0 %, 16,2 % et 23,6 %, dépassent toutes la contribution moyenne attendue de 11,1 % (Fig. 35). Cependant, il est important de noter que la qualité de représentation (\cos^2) de ces facteurs sur le plan factoriel de la Dimension 2 est modérée à faible : X_4 (0,29), Y_3 (0,50), Y_4 (0,31), et Z_1 (0,45) (Annexe 9). Malgré ces limitations, et compte tenu de la contribution significative de ces variables, la Dimension 2 peut être interprétée comme un axe géomorphologique et d'exposition humaine face aux forçages naturels.

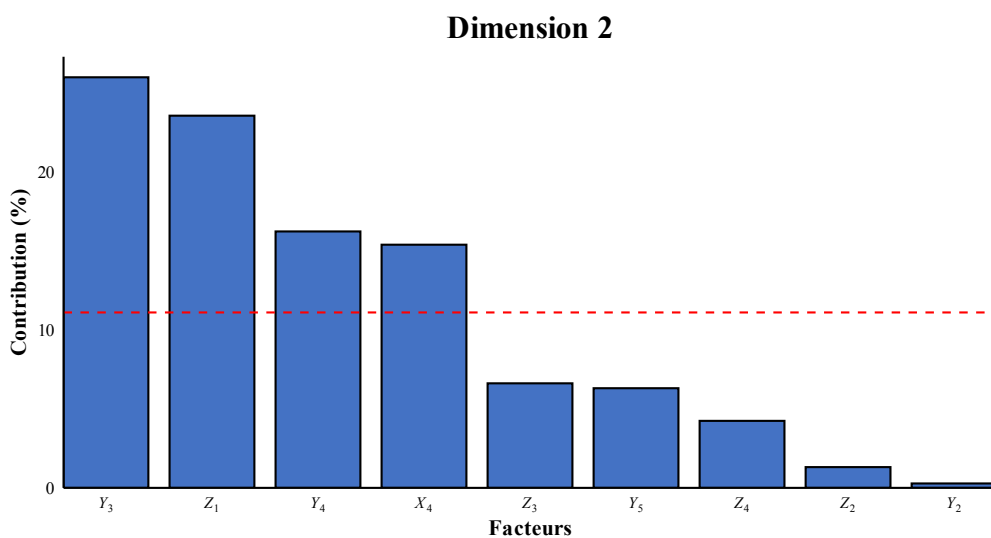


Figure 35. Contribution à la Dimension 2 des facteurs du Coastal Risk Index (CRI). La ligne en pointillé rouge indique la contribution moyenne attendue.

Résultats

Le **biplot** est une représentation graphique qui condense les résultats de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) en un seul diagramme. Il permet de visualiser simultanément les relations entre les facteurs retenus pour l'analyse exploratoire et la distribution des observations (les points GCC) sur un plan factoriel. Ce plan, qui est une projection de l'ensemble des observations sur les deux premières dimensions principales de l'ACP, concentre 62,4 % de la variance totale, conformément aux résultats du *Scree plot* (Fig. 33). Le *biplot* est illustré à la figure 36.

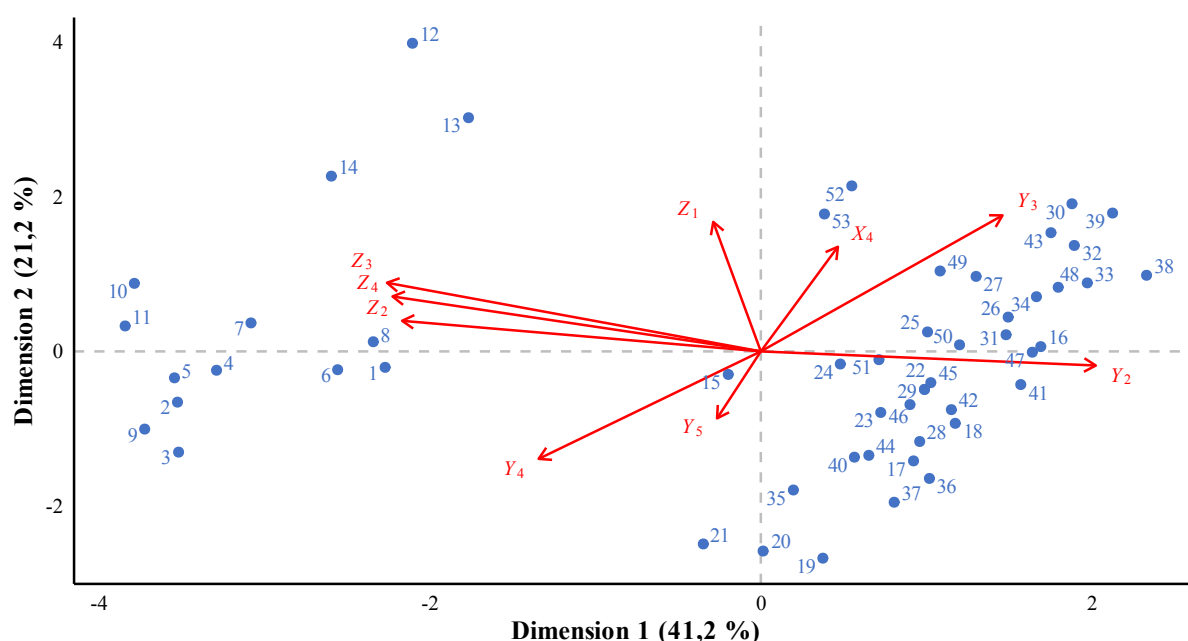


Figure 36. Biplot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des 53 points GCC.

Pour interpréter ce *biplot*, on se réfère à la fois aux vecteurs qui représentent les facteurs et à la position des points qui représentent les individus. Les vecteurs, matérialisés par des flèches, communiquent des informations sur les facteurs. La longueur d'une flèche indique la qualité de représentation du facteur sur le plan factoriel (son \cos^2). Ainsi, plus une flèche est longue, plus le facteur est fidèlement représenté par les deux premières dimensions, ce qui signifie que la majeure partie de sa variance est expliquée par ces deux axes. De plus, l'angle entre les flèches exprime la corrélation entre les facteurs : les vecteurs pointant dans la même direction suggèrent une forte corrélation positive, les vecteurs à angle droit (90°) indiquent une absence de corrélation, et les vecteurs pointant dans des directions opposées expriment une forte corrélation négative. Quant à la position des points, qui représentent les individus, elle renseigne sur leurs caractéristiques. La position d'un individu par rapport aux axes reflète son score sur les deux dimensions : plus il est éloigné de l'origine, plus son score sur cette dimension est élevé. Ainsi,

Résultats

un point situé sur le côté droit du graphique a un score élevé sur la Dimension 1, tandis qu'un point situé en haut du graphique a un score élevé sur la Dimension 2. De plus, un point situé près d'un vecteur est fortement caractérisé par le facteur correspondant. La position d'un individu par rapport aux autres points renseigne sur leur proximité, ainsi les points proches les uns des autres ont un profil de risque côtier similaire.

L'analyse visuelle du *biplot* illustre la distinction notable entre la qualité de représentation des facteurs de la première et de la seconde dimension (Fig. 36). En effet, les facteurs de la Dimension 1 (Y_2 , Z_2 , Z_3 , Z_4) sont très bien alignés avec l'axe horizontal. Cette configuration confirme leur excellente qualité de représentation et leur forte contribution à cet axe, illustrant la clarté de cette dimension. De plus, le vecteur Y_2 pointe dans la direction opposée aux vecteurs Z_2 , Z_3 , et Z_4 , ce qui est cohérent avec les corrélations négatives mises en évidence dans le corrélogramme (Fig. 32).

En revanche, les facteurs de la Dimension 2 (X_4 , Y_3 , Y_4 , Z_1) sont nettement moins alignés avec l'axe vertical, ce qui confirme leurs faibles valeurs de \cos^2 (Annexe 9), et suggère que ces facteurs ne sont que partiellement représentés sur le plan factoriel du *biplot*. Ce dernier n'offre dès lors qu'une vision limitée de la complexité de cette dimension. Malgré cette limitation, le *biplot* reste un outil utile pour confirmer visuellement certaines relations. L'opposition entre les flèches du niveau marin extrême (X_4) et des éléments de protection naturelle (Y_5) est cohérente avec le corrélogramme (Fig. 32), tout comme l'opposition entre la pente de la plage (Y_3) et sa largeur (Y_4).

La position des 53 points GCC sur le *biplot* reflète leur profil de risque défini par les deux dimensions principales. Une première concentration de points est observable sur le côté gauche du graphique, loin de l'origine et plutôt regroupés sur l'axe horizontal, avec toutefois 3 points (12, 13, et 14) plus hauts. D'après leur position, ces points sont des zones caractérisées par une forte élévation (Y_2) et un fort développement socio-économique (Z_2 , Z_3 , et Z_4). La partie droite regroupe la majorité des points et on remarque une dispersion marquée, tant sur l'axe vertical que l'axe horizontal. D'après leur position, ces points correspondent à des zones de faible élévation (Y_2) et moins développées socio-économiquement (Z_2 , Z_3 , et Z_4). La dispersion liée à l'axe vertical suggère des profils de risque spécifiques aux caractéristiques géophysiques (X_4 , Y_3 , Y_4 , et Y_5) et à la densité de population (Z_1). Cette répartition met en évidence la diversité

des profils de vulnérabilité le long du littoral de Kafountine, et invite dès lors à l'analyse de clustering qui suit.

VI.4.3. Analyse de clustering K-means

L'analyse de *clustering K-means*, appliquée aux coordonnées des individus sur les deux premières dimensions de l'ACP, a permis d'identifier quatre groupes d'individus distincts, chacun représentant un profil de risque spécifique. Le choix de quatre clusters a été motivé par la nécessité de trouver un équilibre optimal entre une représentation trop simplifiée et une fragmentation excessive. La position des ellipses et la distribution des points révèlent la structure des groupes. Les ellipses qui se chevauchent suggèrent un continuum de caractéristiques plutôt qu'une séparation nette (Fig. 37).

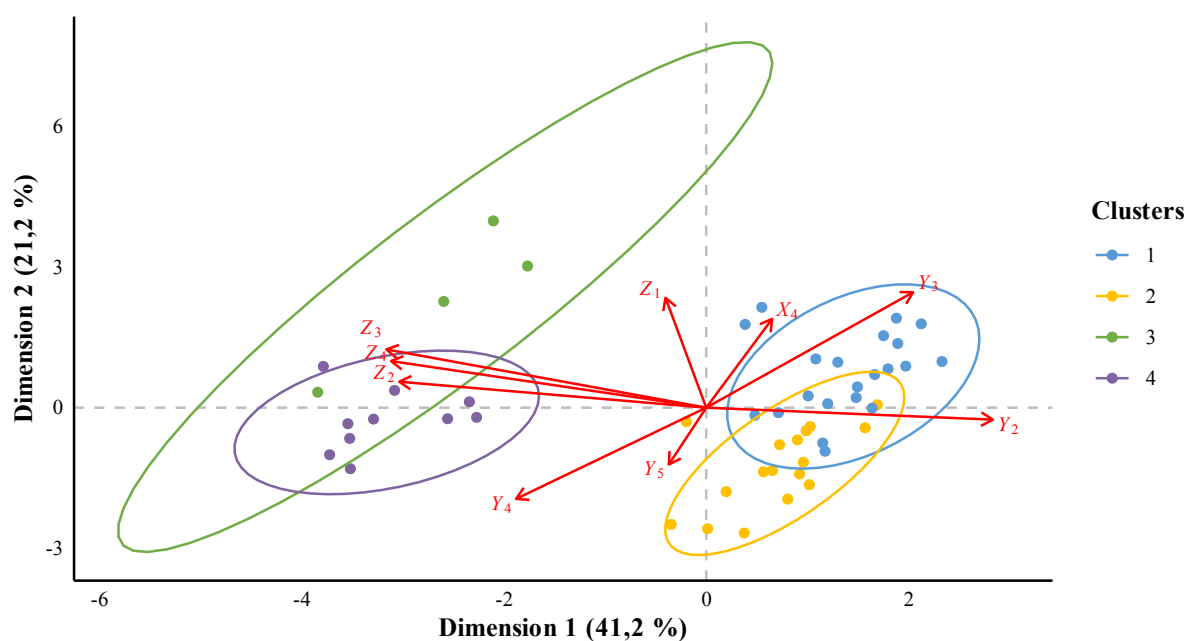


Figure 37. Clusters de profils de risque côtier identifiés sur le Biplot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

Le premier cluster, représenté en bleu, contient le plus d'individus de l'échantillon. Il est situé dans la partie droite du *biplot* et son ellipse est relativement compacte. Ses individus présentent des valeurs positives sur la Dimension 1, ce qui les associe à une faible élévation (Y_2). Leurs positions relatives aux vecteurs montre qu'ils sont caractérisés par une susceptibilité aux niveaux marins extrêmes (X_1), des pentes faibles (Y_3), et des plages larges (Y_4). On observe deux points hors de l'ellipse, ce qui suggère une légère hétérogénéité dans le cluster (Fig. 37). Les points qui appartiennent au premier cluster sont globalement localisés dans la partie sud de la

Résultats

commune, au niveau de Boune, Boko, et Saloulou. Les points sont aussi situés à hauteur de la Pointe de Kalissaye, au nord de la rivière aux Huitres, et au sud de la commune sur les quelques derniers kilomètres avant de Pointe de Diogué (Fig. 38).

Le second cluster, représenté en jaune, se situe principalement dans le quadrant inférieur droit du *biplot*. Son ellipse est plus allongée que celle du premier cluster. Les points du cluster 2 sont associés à des valeurs positives sur la Dimension 1 et négatives sur la Dimension 2. Ils se caractérisent par une faible élévation (Y_2), une faible protection des éléments naturels (Y_5), et une faible densité de population (Z_1). On observe un point hors de l'ellipse, ce qui suggère une très légère hétérogénéité dans le cluster (Fig. 37). Les points du deuxième cluster sont situés à hauteur de la partie nord du cordon sableux au nord de Kailo. Les secteurs au nord de la Presqu'île aux Oiseaux et de la Pointe Kalissaye, et au sud de l'embouchure Kalissaye et de la Rivière aux Huitres appartiennent aussi à ce cluster (Fig. 38).

Le troisième cluster, représenté en vert, se situe dans la partie supérieure gauche du *biplot*. Il est caractérisé par une ellipse très allongée, traduisant une grande variabilité des points qui sont associés à une élévation forte (Y_2), et un développement socio-économique important caractérisé par : une forte densité de population sous 1m d'altitude (Z_1), une faible distance aux bâtiments (Z_2) et au réseau routier (Z_3), et un usage du sol à forte valeur économique (Fig. 37). Les 4 points de ce cluster sont situés au niveau du quai de pêche du village de Kafountine, et des trois kilomètres au sud de ce dernier (Fig. 38).

Enfin, **le quatrième cluster** est représenté en violet et se situe dans la partie gauche du *biplot*. Les valeurs de ce cluster sont fortement négatives pour la Dimension 1 et sont centrées sur l'axe de Dimension 2. Son ellipse est nettement plus compacte que la précédente. Les individus du cluster 4 sont caractérisés par une faible largeur de plage (Y_4), une proximité aux bâtiments (Z_2) et aux routes (Z_3), et une utilisation du sol à forte valeur économique (Z_4). On observe un point hors de l'ellipse, ce qui suggère une légère hétérogénéité au sein du cluster (Fig. 37). Ce dernier s'étend du nord d'Abéné au nord de Kafountine (Fig. 38).

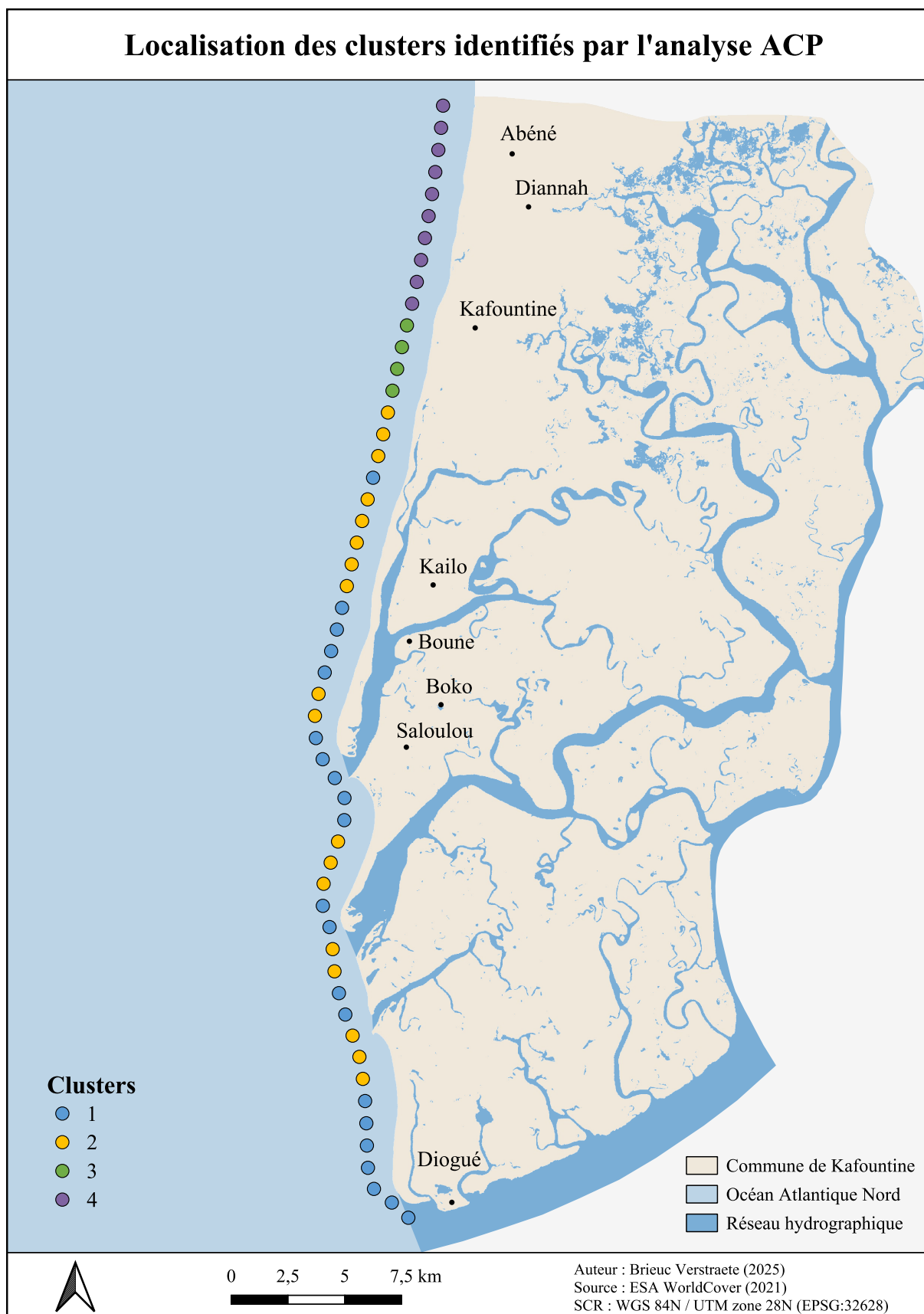


Figure 38. Localisation des clusters identifiés par l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

VII. DISCUSSION

La section suivante a pour objectif d'interpréter les résultats présentés précédemment, de les mettre en perspective par rapport à la littérature scientifique existante et d'analyser les spécificités de la zone d'étude qui en découlent. Elle détaillera également les limites de la méthodologie créée et les perspectives qui découlent de ce travail.

VII.1. Érosion côtière : indicateur ou manifestation de l'aléa ?

La majorité des études consacrées à la vulnérabilité côtière intègrent les taux d'érosion ou d'accrétion du trait de côte comme indicateur central des caractéristiques physiques du littoral. En effet, dans la revue de la littérature de Roukounis et Tsihrintzis (2022), l'ensemble des 21 études géophysiques analysées (basées uniquement sur les forçages côtiers et les caractéristiques physiques) prend en compte ce facteur. Des constats similaires sont établis par Anfuso *et al.* (2021) ainsi que par Rocha *et al.* (2023), ce dernier montrant que deux tiers des publications étudiées l'utilisent. L'intégration de cette variable est justifiée dans la littérature par sa capacité à fournir une indication des tendances futures du trait de côte. López Royo *et al.* (2016) soutiennent que les taux d'érosion et d'accrétion reflètent l'historique de la variation du rivage, et peuvent ainsi servir de base à des projections futures. Cependant, comme le rappellent Hoque *et al.* (2019), le trait de côte est un système hautement dynamique, régi par de multiples processus côtiers tels que les flux sédimentaires, les caractéristiques des vagues, la morphologie de la plage et la circulation littorale. Nous estimons dès lors que l'érosion est une manifestation observable de l'aléa, résultant de l'interaction entre les forçages côtiers et les propriétés physiques du littoral, plutôt qu'un simple facteur. Ainsi, il nous semble qu'intégrer l'érosion comme variable explicative dans le CRI revient à confondre cause et effet, introduisant un biais de circularité, c'est pourquoi nous n'avons pas considéré ce facteur dans notre CRI. Nous pensons que ce facteur ne devrait pas être considéré dans un CRI cohérent.

VII.2. Interprétation des résultats

L'analyse des résultats permet de dégager des conclusions sur le risque côtier de la commune, tout en validant les hypothèses initiales de l'étude.

VII.2.1. Une distribution hétérogène du risque

L'évaluation du risque côtier sur la zone d'étude a révélé une distribution spatiale hétérogène, caractérisée par des vulnérabilités physiques et socio-économiques distinctes. Bien que 86,79 % du littoral présente un risque faible à modéré, des zones de risque élevé, ou *hotspots*, sont clairement identifiables. Le quai de pêche de Kafountine, avec des valeurs de CRI supérieures à 4, se démarque particulièrement (Fig. 31). Les infrastructures touristiques du nord de la commune et le quai de pêche de Diogué sont également identifiés comme des *hotspots*, avec des valeurs de CRI avoisinant les 3,5 (Fig. 31). Ces observations valident dès lors l'hypothèse selon laquelle le risque côtier n'est pas uniforme sur la zone d'étude, et que le quai de pêche est un lieu particulièrement à risque.

VII.1.2. Un risque structuré par ses composantes

L'analyse des différents indices intermédiaires du CRI permet de mieux comprendre les dynamiques qui en sont à l'origine. En effet, la combinaison des indices de premier niveau (CFI, PSI, SSI) et de second niveau (CHI, CVI) met en évidence les mécanismes sous-jacents qui contribuent au risque global.

Le *Coastal Forcing Index* (CFI) indique une pression notable sur l'ensemble du littoral de Kafountine. Le *Physical Susceptibility Index* (PSI), quant à lui, met en évidence une forte susceptibilité physique sur la quasi-totalité de la côte, avec des pics de valeurs aux abords des embouchures et du quai de pêche de Kafountine (Fig. 29). La combinaison de ces deux indices dans le *Coastal Hazard Index* (CHI) révèle que le danger est globalement modéré à élevé sur la zone, avec toutefois une susceptibilité moindre au nord (Fig. 29).

Parallèlement, le *Socioeconomic Susceptibility Index* (SSI) présente une distribution beaucoup plus hétérogène. La majorité de la zone sud est peu vulnérable, tandis que les sections au nord, plus développées, présentent une susceptibilité modérée à élevée, avec des pics très prononcés au niveau du chef-lieu de la commune (Fig. 29). Cette grande variabilité du SSI, couplée à la forte susceptibilité physique (PSI), explique la distribution du *Coastal Vulnerability Index* (CVI), qui reste globalement faible à modérée, mais avec des zones de forte vulnérabilité clairement identifiées au nord de la côte ainsi qu'à la Pointe de Diogué (Fig. 29)

Discussion

Finalement, les valeurs élevées du CRI au niveau des "hotspots" (quai de pêche, Diogué) sont le résultat d'une convergence d'aléas et de vulnérabilités importantes (Fig. 31). Le risque dans le reste de la zone d'étude est davantage lié aux caractéristiques géophysiques de l'océan et de la côte, alors qu'au nord, il est plus directement induit par les activités humaines.

VII.1.3. Des profils de risque distincts

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de réduire la complexité des 13 facteurs en deux dimensions principales, expliquant 62,4 % de la variance totale. La première dimension est principalement structurée par l'élévation et les facteurs socio-économiques. La deuxième dimension est plutôt influencée par des facteurs géomorphologiques et d'exposition humaine aux forçages naturels. Le *clustering K-means*, réalisé sur ces deux dimensions, a mis en évidence quatre profils de risque distincts qui reflètent la diversité des caractéristiques de la zone d'étude. Notre interprétation est la suivante :

VII.1.3.1. Les villages insulaires

Le cluster 1, qui représente la majorité de la zone d'étude, correspond aux villages insulaires du sud de la commune, comme Boune, Boko et Saloulou. Ce profil est caractérisé par une faible élévation, des pentes faibles et des plages larges. Bien que les populations y soient moins denses que dans les zones urbanisées, la combinaison d'une faible élévation et d'une susceptibilité aux niveaux marins extrêmes confère à ces villages un risque notable. La forte prévalence de ce profil souligne l'enjeu majeur de la vulnérabilité des populations locales.

VII.1.3.2. Les zones naturelles

Le cluster 2 regroupe les zones naturelles du littoral. Ces zones, localisées sur la partie nord du cordon sableux et au niveau des embouchures, se caractérisent par une faible élévation et une faible densité de population. Elles sont également définies par une faible protection naturelle, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux forçages côtiers, notamment l'élévation du niveau marin et les niveaux extrêmes. Ce profil illustre parfaitement le risque élevé qui pèse sur les zones côtières non aménagées et de faible altitude.

VII.1.3.3. Le quai de pêche de Kafountine

Le cluster 3 représente le quai de pêche de Kafountine. Ce profil se distingue par une forte élévation, mais aussi par un développement socio-économique intense : forte densité de

Discussion

population, faible distance aux bâtiments et aux routes, et une utilisation du sol à forte valeur économique. Cette vulnérabilité socio-économique accrue illustre la concentration de pressions anthropiques très importante sur la zone.

VII.1.3.4. Les infrastructures touristiques

Enfin, le cluster 4 correspond aux infrastructures touristiques localisées dans la partie nord de la commune, entre Abéné et Kafountine. Ce profil est principalement caractérisé par une faible largeur de plage et une forte proximité aux bâtiments et aux routes. La forte valeur économique de l'utilisation du sol y est également un facteur déterminant. Le risque de ce cluster est induit par la forte concentration d'infrastructures et la faible protection physique des plages.

VII.1.4. Des dynamiques de risque contrastées selon les spécificités des territoires

La mise en relation des facteurs et des indices du Coastal Risk Index (CRI) avec les quatre clusters établis permet d'explorer les caractéristiques de chaque profil de risque. La figure 39, qui présente l'évolution des valeurs des facteurs et des indices le long du littoral en regard des clusters, offre une synthèse visuelle de nos analyses. Elle met en lumière les différents mécanismes de production du risque côtier sur la zone d'étude en fonction des spécificités de chaque territoire.

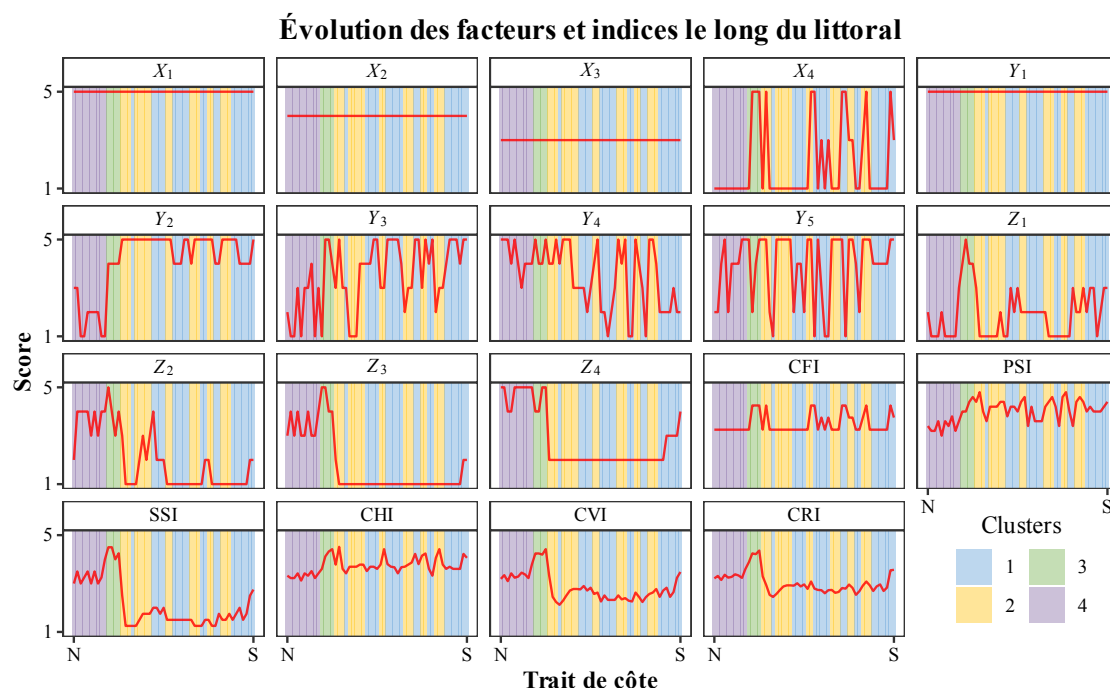


Figure 39. Résumé de l'évolution le long du littoral des facteurs et indices constitutifs du Coastal Risk Index (CRI), en lien avec les clusters identifiés par l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

Les clusters identifiés présentent des valeurs de CRI distinctes, reflétant l'hétérogénéité des facteurs à l'origine du risque. La zone la plus à risque est clairement le quai de pêche de Kafountine (cluster 3), qui se distingue par un pic marqué du CRI. À l'inverse, les villages insulaires (cluster 1) et les zones naturelles (cluster 2) présentent un CRI plus faible. Les infrastructures touristiques (cluster 4), quant à elles, se situent à un niveau de risque intermédiaire, entre celui du cluster 3 et des clusters 1 et 2.

Les résultats de cette étude confirment plusieurs observations de la littérature scientifique. L'élévation du niveau marin, classée comme un danger majeur (Très élevé, 5), corrobore les projections du GIEC (IPCC, 2022) et souligne son rôle central dans l'amplification des risques. La faible élévation de plus de la moitié de la côte rend la zone particulièrement vulnérable, une conclusion partagée par d'autres études menées dans des zones côtières de faible élévation (LECZ) (Uddin *et al.*, 2019 ; Mahapatra *et al.*, 2013).

VII.2. Limites de l'étude et perspectives

VII.2.1. Limites de l'étude

La limite majeure de cette étude provient des disparités de résolution et de temporalité dans la GCC, ce qui confère au CRI un rôle d'outil global de compréhension plutôt que de précision locale.

L'accès limité aux données socio-économiques constitue une difficulté récurrente dans les travaux sur le risque côtier, et la base GCC n'y échappe pas. Or, ces variables jouent un rôle essentiel dans l'évaluation du risque, puisqu'elles permettent d'appréhender l'exposition et la vulnérabilité des populations ainsi que des infrastructures. Toutefois, leur disponibilité et leur standardisation posent un défi méthodologique majeur, en particulier pour des analyses à l'échelle locale comme celle menée ici.

Dans la GCC, cette limite apparaît clairement : sur les 80 indicateurs recensés, seuls 9 relèvent de la catégorie socio-économique (Annexe 5). Plusieurs d'entre eux se sont révélés inadaptés à notre cas d'étude, soit parce qu'ils reposent sur une échelle trop générale — comme les indicateurs de PIB disponibles uniquement au niveau national — soit parce qu'ils concernent des infrastructures absentes ou non pertinentes pour Kafountine (réseau ferroviaire, aéroports, etc.). En définitive, seuls les indicateurs liés à la population étaient réellement exploitables pour notre CRI.

VII.2.2. Perspectives

L'exploration de la GCC nous a amené à identifier des indicateurs qui pourraient être retenus dans d'autres études plus ciblées. En particulier, l'indicateur de population sous différentes altitudes nous semblent particulièrement intéressants pour évaluer la vulnérabilité des LECZ à plus grande échelle.

Dans le cadre de ce travail, nous proposons de réserver l'utilisation des données d'érosion à une étape de validation, en confrontant l'indice d'aléa obtenu aux résultats des études de cinématique du trait de côte recensées dans l'état des lieux (Fig. 8). Une telle analyse dépasse toutefois le périmètre de cette recherche et constitue une piste que nous suggérons aux travaux futurs. Elle pourrait permettre de renforcer la robustesse des facteurs mobilisés et d'envisager leur pondération, afin de modéliser l'aléa côtier de manière plus fine. De plus, des phases de test d'installation d'épis végétaux sont en cours sur la commune. La prise en compte de ces épis végétaux pourrait venir enrichir cette approche (Chevalier *et al.*, 2024)

VIII. CONCLUSION

Ce mémoire avait pour ambition de développer un premier indice de risque côtier spécifiquement appliqué à la commune de Kafountine, en s'appuyant sur l'approche du *Coastal Risk Index* (CRI). L'hypothèse initiale, selon laquelle le quai de pêche se distinguerait comme un point particulièrement exposé, est confirmée par les résultats : les valeurs les plus élevées du CRI (4,21–4,36) s'y concentrent, traduisant une convergence d'aléas marins et de vulnérabilités socio-économiques. À l'inverse, la majorité du territoire présente un risque faible à modéré, avec plus de 85 % des valeurs inférieures à 3,5. L'analyse met également en évidence la présence d'autres hotspots, notamment à Diogué, et souligne l'hétérogénéité spatiale du risque au sein de la commune.

Au-delà de cette répartition globale, l'étude a permis d'identifier quatre profils de risque distincts, illustrant la diversité des dynamiques littorales. Les villages insulaires du sud, caractérisés par une faible élévation et une exposition accrue aux niveaux marins extrêmes, rappellent la vulnérabilité structurelle des communautés vivant en zone basse. Les zones naturelles, peu peuplées mais faiblement protégées, mettent en évidence le rôle central des écosystèmes dans l'atténuation des forçages côtiers. Le quai de pêche se distingue par une vulnérabilité socio-économique aiguë liée à la concentration des activités humaines, tandis que les infrastructures touristiques du nord reflètent les pressions induites par un usage intensif du sol dans un contexte de faible protection physique. Cette typologie confirme l'existence de dynamiques de risque contrastées selon les spécificités des territoires et fournit une base précieuse pour cibler les stratégies d'adaptation.

L'un des apports majeurs de cette recherche réside dans son approche méthodologique. Pour la première fois, la base de données *Global Coastal Characteristics* (GCC) a été exploitée de manière extensive, mobilisant un ensemble significatif d'indicateurs géophysiques, hydrométéorologiques et socio-économiques. Cette intégration multifactorielle, couplée à des méthodes statistiques exploratoires (ACP, corrélations de Spearman, clustering), a permis d'enrichir la compréhension du risque à Kafountine tout en offrant un cadre transparent et reproductible. Ce travail constitue ainsi une contribution à la littérature scientifique sur les indices côtiers, en proposant une démarche adaptable à d'autres contextes littoraux.

Conclusion

Toutefois, plusieurs limites doivent être rappelées. La première concerne la GCC elle-même, dont la résolution spatiale et temporelle reste hétérogène. Si elle fournit un socle global pertinent, elle ne permet pas d'atteindre un niveau de précision suffisant pour des diagnostics locaux détaillés. Par ailleurs, les indicateurs socio-économiques demeurent trop peu nombreux et souvent inadaptés au contexte de Kafountine, ce qui réduit la finesse de l'évaluation de la vulnérabilité. Ces contraintes renforcent l'idée que le CRI doit être considéré avant tout comme un outil de compréhension globale et comparative, plutôt que comme un instrument de gestion opérationnelle à fine échelle.

Sur le plan pratique, les résultats soulignent l'urgence d'agir face à la concentration des pressions humaines au niveau du quai de pêche et, dans une moindre mesure, au nord de celui-ci, où se cumulent infrastructures touristiques et activités économiques. La réduction de ces pressions apparaît comme une condition indispensable pour limiter la vulnérabilité future. Au-delà du cas de Kafountine, cette recherche ouvre également des perspectives pour la comparaison d'indices intermédiaires avec d'autres études menées en Afrique de l'Ouest, afin de mieux comprendre les dynamiques régionales de risque. L'amélioration de la GCC, l'intégration de données locales complémentaires et l'expérimentation d'approches hybrides combinant indices et modèles dynamiques constituent autant de pistes pour affiner l'évaluation du risque côtier.

En définitive, ce travail montre que la prise en compte conjointe des aléas et des vulnérabilités, dans une perspective intégrée, permet de mieux saisir les mécanismes de formation du risque côtier. Au-delà du seul cas de Kafountine, il contribue à enrichir la réflexion sur la gestion des territoires littoraux dans un contexte de changement climatique, et rappelle la nécessité d'articuler recherche scientifique, suivi des dynamiques locales et stratégies d'adaptation pour renforcer la résilience des communautés côtières.

BIBLIOGRAPHIE

Accastello, C., Cocuccioni, S., & Teich, M. (2021). The concept of risk and natural hazards. *Protective Forests as Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR)*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99503>

Ahammed, B. K. K., Mahendra, R. S., & Pandey, A. C. (2016). Coastal vulnerability assessment for eastern coast of India, Andhra Pradesh by using geo-spatial technique. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 4(3), 1000146. <http://dx.doi.org/10.4172/2327-4581.1000146>

Alcántara-Carrió, J., García Echavarría, L. M., & Jaramillo-Vélez, A. (2024). Is the coastal vulnerability index a suitable index? Review and proposal of alternative indices for coastal vulnerability to sea level rise. *Geo-Marine Letters*, 44, 8. <https://doi.org/10.1007/s00367-024-00770-9>

Alessandrini, V., Bertoni, D., Rangel-Buitrago, N., & Ciccarelli, D. (2024). Implementing a vegetation-based risk index to support management actions in Mediterranean coastal dunes. *Ocean and Coastal Management*, 252, 107105. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.107105>

Anfuso, G., Postacchini, M., Di Luccio, D., & Benassai, G. (2021). Coastal sensitivity/vulnerability characterization and adaptation strategies: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 72. <https://doi.org/10.3390/jmse9010072>

Asensio-Montesinos, F., Molina, R., Anfuso, G., Manno, G., & Lo Re, C. (2024). Natural and human impacts on coastal areas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 2017. <https://doi.org/10.3390/jmse12112017>

Athanasiou, P., van Dongeren, A., Giardino, A., Vousedoukas, M., Gaytan-Aguilar, S., & Ranasinghe, R. (2019). Global distribution of nearshore slopes with implications for coastal retreat. *Earth System Science Data*, 11, 1515–1529. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1515-2019>

Bibliographie

Athanasiou, P., van Dongeren, A., Pronk, M., Giardino, A., Vousdoukas, M., & Ranasinghe, R. (2024a). Global Coastal Characteristics: A global dataset of geophysical, hydrodynamic, and socioeconomic coastal indicators. *Earth System Science Data*, 16(7), 3433–3452. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3433-2024>

Athanasiou, P., van Dongeren, A., Pronk, M., Giardino, A., Vousdoukas, M., & Ranasinghe, R. (2024b). Global database of Coastal Characteristics (GCC) (v1.1) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11072020>

Andrieu, J., & Mering, C. (2008). Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine : exemple des Rivières du Sud du delta du Saloum au Rio Geba. *Télédétection*, 8(2), 93–118. <https://shs.hal.science/halshs-00388170v1>. Consulté le 5 janvier 2025.

Bakhoun, P. W., Niang, I., Sambou, B., & Diaw, A. T. (2018). Vulnérabilité physique de la région de Dakar face à l'élévation du niveau de la mer dans le contexte du changement climatique. *EWASH & TI Journal*, 2(3), 11–26. <http://revues.imist.ma/?journal=ewash-ti>. Consulté le 15 août 2025.

Barry, M., Dièye, E. H. B., Sané, T., Sy, O., & Solly, B. (2019). Dynamique du trait de côte de la commune de Kafountine (Basse Casamance, Sénégal). *Rivières du Sud. Université Assane Seck de Ziguinchor*. <http://rivieresdusud.uas.sn/xmlui/handle/123456789/820>. Consulté le 5 janvier 2025.

Batista, C. M. (2018). Coastal Risk. In C. W. Finkl & C. Makowski (Eds.), *Encyclopedia of Coastal Science (Encyclopedia of Earth Sciences Series)*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_408-1

Bevacqua, A., Yu, D., & Zhang, Y. (2018). Coastal vulnerability: Evolving concepts in understanding vulnerable people and places. *Environmental Science and Policy*, 82, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.006>

Bocoum, S. (2023). Tourisme littoral et érosion côtière en Basse Casamance (Sénégal). Poster présenté lors des Doctoriales des Sciences Sociales de l'Eau (DSSE), mai 2023, Rennes,

Bibliographie

France. <https://pasteur.hal.science/AO-GEOGRAPHIE/hal-04467108v1>. Consulté le 5 janvier 2025.

Bocoum, S., Bartout, P., Faye, C., & Touchart, L. (2024). Le littoral de la commune de Kafountine, espace de cohabitation difficile pour le tourisme balnéaire : étude de l'axe Abéné-Kafountine. *Sciences Eaux & Territoires*, 44, article 8124. <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2024.44.8124>. Consulté le 5 janvier 2025.

Boumpoulis, V., Depountis, N., Dimas, A., & Papatheodorou, G. (2025). Presentation and analysis of the Geotechnical Coastal Vulnerability Index and validation of its application to coastal erosion problems. *Scientific Reports*, 15, 1424. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-89758-7>

Cardona, O. D., van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., Pulwarty, R. S., Schipper, E. L. F., & Sinh, B. T. (2012). Determinants of risk: Exposure and vulnerability. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D.

Chevalier, P., Descroix, L., & Ruë, O. (n.d.). *Épis perméables, travail des habitants et recherche action : Lutter contre l'érosion côtière tout en faisant progresser les connaissances scientifiques*. Récupéré le 18 août 2025, de <https://gizc.org>

Cissé, C. O. T., Marić, I., Domazetović, F., Glavačević, K., & Almar, R. (2024). Derivation of coastal erosion susceptibility and socio-economic vulnerability models for sustainable coastal management in Senegal. *Sustainability*, 16, 7422. <https://doi.org/10.3390/su16177422>

Commune de Kafountine. (2021). *Plan de développement communal (PDC) 2021-2025 : Rapport final*.

Copernicus Climate Change Service & Copernicus Marine Service. (2025). Global Ocean Mean Sea Level trend map from Observations Reprocessing (OMI_CLIMATE_SL_GLOBAL_regional_trends) [Données]. Copernicus. <https://doi.org/10.48670/moi-00238>

Bibliographie

Copernicus Marine Service. (2025). *Ocean Monitoring and Forecasting*.

<https://marine.copernicus.eu>. Consulté le 7 août 2025.

Cosby, A. G., Lebakula, V., Smith, C. N., Wanik, D. W., Bergene, K., Rose, A. N., Swanson, D., & Bloom, D. E. (2024). Accelerating growth of human coastal populations at the global and continent levels: 2000–2018. *Scientific Reports*, 14, 22489.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-73287-x>

Dada, O. A., Almar, R., & Morand, P. (2024). Coastal vulnerability assessment of the West African coast to flooding and erosion. *Scientific Reports*, 14, 890.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-48612-5>

El-Shahat, S., El-Zafarany, A. M., Abou El Seoud, T., & Ghoniem, S. A. (2021).

Vulnerability assessment of African coasts to sea level rise using GIS and remote sensing. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 2827–2845.

<https://doi.org/10.1007/s10668-020-00639-8>

European Space Agency (ESA). (2021). *WorldCover 10 m 2021 v200*. European Space Agency. <https://worldcover2021.esa.int>

Espinoza Villacís, E., Rivas-Oviedo, J., Martillo-Bustamante, C., Muthre, M., Saltos-Andrade, I., Andrade-García, G., Cedeño-Oviedo, J., Cervantes-Bernabé, E., & Chunga-Morán, K. (2025). *Coastal physical vulnerability to sea level rise in the active Ecuadorian margin for integrated coastal zone management: Case study Santa Elena Bay* [Preprint].

Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5784157/v1>

Faye, Y., Ba, K., Sedrati, M., Diouf, I., & Diouf, M. B. (2024). Coastal risk assessment and management-related issues of sand spits on the southern coast of Senegal. In M. R. Phillips, S. Al-Naemi, & C. M. Duarte (Eds.), *Coastlines under global change: Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2024, Doha, Qatar* (Journal of Coastal Research, Special Issue No. 113, pp. 1093–1098). Coastal Education and Research Foundation.

<https://doi.org/10.2112/JCR-SI113-213.1>

Furlan, E., Dalla Pozza, P., Michetti, M., Torresan, S., Critto, A., & Marcomini, A. (2021). Development of a multi-dimensional coastal vulnerability index: Assessing vulnerability to

Bibliographie

inundation scenarios in the Italian coast. *Science of the Total Environment*, 772, 144650.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144650>

Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T., & Marcomini, A. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 168, 123-132.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>

Gomez, M. L. A., Gnandi, K., Ngouanet, C., Pouye, I., & Ntajal, J. (2025). Physical vulnerability of The Gambia's coastline in the context of climate change. *World*, 6(1), 17.

<https://doi.org/10.3390/world6010017>

Google. (2025). *Google Earth Pro*. <https://www.google.com/earth/versions/#earth-pro>.

Consulté le 7 août 2025.

Gornitz, V. (1991). Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(4), 379–398. [https://doi.org/10.1016/0031-](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O)

[0182\(91\)90173-O](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O)

Hamid, A. I. A., Din, A. H. M., Yusof, N., Abdullah, N. M., Omar, A. H., & Khanan, M. F. A. (2019). Coastal vulnerability index development: A review. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W16* (pp. 1–6). 6th International Conference on Geomatics and Geospatial Technology (GGT 2019), Kuala Lumpur, Malaysia.

Hoque, M. A.-A., Ahmed, N., Pradhan, B., & Roy, S. (2019). Assessment of coastal vulnerability to multi-hazardous events using geospatial techniques along the eastern coast of Bangladesh. *Ocean and Coastal Management*, 181, 104898.

<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104898>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, et al.

Bibliographie

(eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Figure TS-1.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGII_AR5_FigTS-1.jpg. Consulté le 13 août 2025.

IPCC. (2021a). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis (Sixth Assessment Report of the IPCC, Working Group I)* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. Figure 9.27.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/figures/IPCC_AR6_WGI_Figure_9_27.png. Consulté le 13 août 2025.

IPCC. (2021b). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

IPCC. (2022). Annex II: Glossary [Möller, V., van Diemen, R., Matthews, J.B.R., Méndez, C., Semenov, S., Fuglestedt, J.S., & Reisinger, A. (Eds.)]. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2897–2930). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.029>

Jouanno, J., Almar, R., Muller-Karger, F., Morvan, G., van Tussenbroek, B., Benshila, R., Marchesiello, P., & Appeaning Addo, K. (2025). Socio-ecological vulnerability assessment to Sargassum arrivals. *Scientific Reports*, 15, 9998. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94475-3>

Kane, C. (2023). Prevalence of the vulnerability to coastal erosion: Case study of Saint-Louis city. *The Egyptian Journal of Environmental Change*, 15(1), 27–38. <https://doi.org/10.21608/ejec.2023.286640>

Lopes, N. D. R., Sá, R. M., Li, T., & Matomela, N. (2022). Coastal vulnerability assessment based on multi-hazards and bio-geophysical parameters: Case study – northwestern coastline

Bibliographie

of Guinea-Bissau. *Natural Hazards*, 114(2), 989–1013. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05420-w>

López Royo, M., Ranasinghe, R., & Jiménez, J. A. (2016). A rapid, low-cost approach to coastal vulnerability assessment at a national level. *Journal of Coastal Research*, 32(4), 932–945. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00217.1>

Mahapatra, M., Ramakrishnan, R., & Rajawat, A. S. (2013). Sea level rise and coastal vulnerability assessment: A review. *International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences*, 3(3), 67–80.
https://www.researchgate.net/publication/303843080_Sea_level_rise_and_coastal_vulnerability_assessment_a_review. Consulté le 13 août 2025.

MareesPêche.com. (2025). Horaires des marées pour la pêche à Kafountine, Sénégal. <https://mareespeche.com/sn/ziguinchor/kafountine>. Consulté le 11 août 2025.

Mclaughlin, S., & Cooper, J. A. G. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, 9(3), 233–248.
<https://doi.org/10.3763/ehaz.2010.0052>

Mendoza, E. T., Salameh, E., Sakho, I., Turki, I., Almar, R., Ojeda, E., Deloffre, J., Frappart, F., & Laignel, B. (2023). Coastal flood vulnerability assessment, a satellite remote sensing and modeling approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29, 100923. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100923>

Miah, J., Hossain, K. T., Hossain, M. A., & Najia, S. I. (2020). Assessing coastal vulnerability of Chittagong District, Bangladesh using geospatial techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 24, 66. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00784-2>

Ministère des Pêches, des Infrastructures Maritimes et Portuaires (MPIMP), Projet de Gestion des Ressources Naturelles au Sénégal (SENRM), & Unité de Gestion du Projet (UGP-SENRM-MPIMP). (2024, septembre). *Projet de construction d'une unité de fumage moderne et d'une maison des pêcheurs à Kafountine dans la région Ziguinchor : Plan de réinstallation*

Bibliographie

intégrant un plan de restauration des moyens de subsistance – Rapport final.

Mondal, B., Roy, A., & Saha, A. K. (2022). Vulnerability assessment of mangrove areas in coastal West Bengal, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100680>

Ng, K., Borges, P., Phillips, M. R., Medeiros, A., & Calado, H. (2019). An integrated coastal vulnerability approach to small islands: The Azores case. *Science of the Total Environment*, 690, 1218–1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.013>

Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517–1520. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>

Nourdi, N. F., Achab, M., Stieglitz, T., Rudant, J. P., Loudi, Y., Chouto, S., Minette, T. E., & Onguéné, R. (2025). *Coastal vulnerability assessment in Central Africa: Integration of Earth observation technologies and multi-criteria analysis.*

OpenStreetMap contributors. (2025a). Base de données OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org>. Consulté le 7 août 2025.

OpenStreetMap contributors. (2025b). *OpenStreetMap data extracted via QGIS (version 3.40 Bratislava)*. Available at: <https://www.openstreetmap.org>

Oulahen, G., McBean, G., Shrubsole, D., & Chang, S. E. (2019). Production of risk: Multiple interacting exposures and unequal vulnerability in coastal communities. *Regional Environmental Change*, 19(3), 867-877. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1440-5>

Ozer, P. (2012). Les risques naturels. In C. Fallon, S. Brunet, P. Ozer, N. Schiffino, & A. Thiry (Dirs.), *Articuler risques, planification d'urgence et gestion de crise* (chap. 5, pp. 96–117). De Boeck Supérieur. <https://doi.org/10.3917/dbu.brune.2012.01>

Parthasarathy, A., & Natesan, U. (2015). Coastal vulnerability assessment: A case study on erosion and coastal change along Tuticorin, Gulf of Mannar. *Natural Hazards*, 75, 1713–

Bibliographie

1729. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1394-y>

Posit Team. (2025). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Posit Software, PBC, Boston, MA. <http://www.posit.co/>. Consulté le 16 août 2025.

Pouye, I., Adjoussi, D. P., Ndione, J. A., & Sall, A. (2024). Evaluation of the economic impact of coastal erosion in Dakar region. *Journal of Coastal Research*, 40(1), 193–209. Coastal Education and Research Foundation. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-23-00018.1>

QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (Version 3.34) [Logiciel SIG]. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>. Consulté le 7 août 2025.

Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Santos, F. D., Gomes, A., Hilden, M., Laihonon, P., Marinova, N., & Santini, M. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. European Environment Agency, Bologna, Italy. ETC CCA Technical Paper No. 1/2011.

Rocha, C., Antunes, C., & Catita, C. (2023). Coastal indices to assess sea-level rise impacts: A brief review of the last decade. *Ocean and Coastal Management*, 237, 106536. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106536>

Roukounis, C. N., & Tsihrintzis, V. A. (2022). Indices of coastal vulnerability to climate change: A review. *Environmental Processes*, 9, 29. <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00577-9>

Sakho, I., Sadio, M., Camara, I., Noblet, M., Seck, A., Saengsupavanich, C., Ndour, A., & Diouf, M. B. (2022). Sea level rise and future shoreline changes along the sandy coast of Saloum Delta, Senegal. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1547. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10741-y>

Bibliographie

- Samou, M. S., Bertin, X., Sakho, I., Lazar, A., Sadio, M., & Diouf, M. B. (2023). Wave climate variability along the coastlines of Senegal over the last four decades. *Atmosphere*, 14, 1142. <https://doi.org/10.3390/atmos14071142>
- Satta, A., Venturini, S., Puddu, M., Firth, J., & Lafitte, A. (2015). *Application of a multi-scale coastal risk index at regional and local scale in the Mediterranean* (Technical Report). PLAN BLEU.
- Šimac, Z., Lončar, N., & Faivre, S. (2023). Overview of coastal vulnerability indices with reference to physical characteristics of the Croatian coast of Istria. *Hydrology*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.3390/hydrology10010014>
- Soumaré, S., Fall, A., Andrieu, J., Marega, O., & Dieme, B. E. A. (2020). Dynamique spatio-temporelle de la mangrove de Kafountine dans l'estuaire de la Basse-Casamance des années 1972 à nos jours : Approche par télédétection. *IOSR Journal of Engineering*, 10(9), 1–14. https://www.iosrjen.org/Papers/vol10_issue9/Ser-1/A1009010114.pdf. Consulté le 5 janvier 2025.
- Szlafsztein, C., & Sterr, H. (2007). A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *Journal of Coastal Conservation*, 11, 53–66. <https://doi.org/10.1007/s11852-007-0003-6>
- Thieler, E. R., & Hammar-Klose, E. S. (2000). *National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: Preliminary results for the U.S. Pacific Coast* (USGS Open-File Report No. 00-xxx). U.S. Geological Survey.
- Thior, M., Sané, T., & Dièye, E. H. B. (2019). Érosion côtière et impacts socioéconomiques dans la commune de Diembéring en basse Casamance (Sénégal). *Bulletin de l'IFAN Ch. A. Diop, Série B*, 59(1-2), 83-99.
- Uddin, M. N., Islam, A. K. M. S., Bala, S. K., Islam, G. M. T., Adhikary, S., Saha, D., ... & Akter, R. (2019). Mapping of climate vulnerability of the coastal region of Bangladesh using principal component analysis. *Applied Geography*, 102, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.12.011>

Bibliographie

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017a). The Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction: "Exposure".

<https://www.undrr.org/terminology/exposure>. Consulté le 12 août 2025.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017b). The Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction: "Hazard".

<https://www.undrr.org/terminology/hazard>. Consulté le 12 août 2025.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017c). The Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction: "Vulnerability".

<https://www.undrr.org/terminology/vulnerability>. Consulté le 12 août 2025.

Vanhanen, V. (2024). *Projection and adaptation to future coastal erosion in Vietnam* (Master's thesis, Aalto University, School of Engineering). Aalto University.

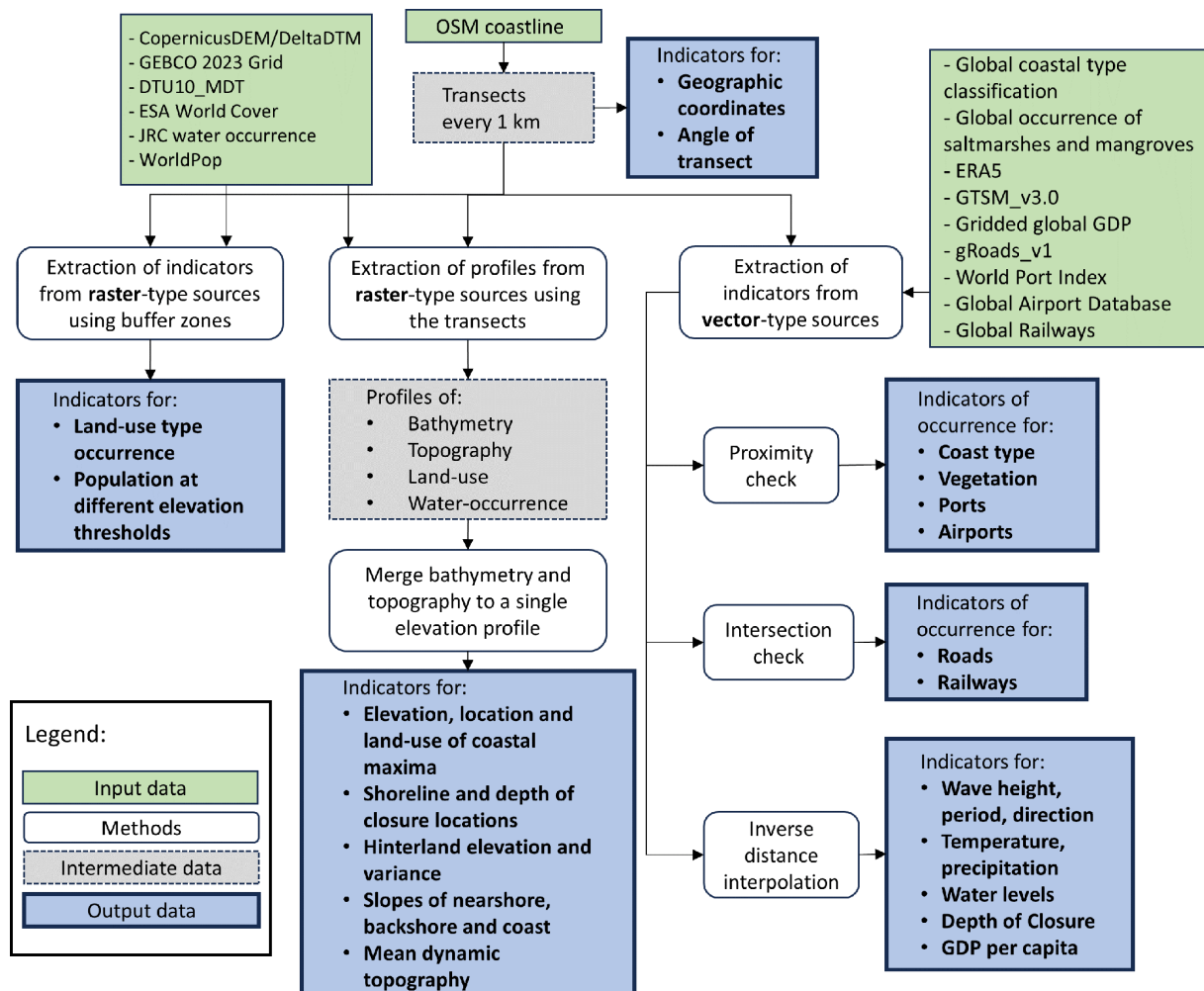
Wahl, T., Brown, S., Haigh, I. D., & Nilsen, J. E. Ø. (2018). Coastal Sea Levels, Impacts, and Adaptation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(1), 19.

<https://doi.org/10.3390/jmse6010019>

ANNEXES

Dataset name	Type	Description	Purpose	Reference
OSM coastline (zoom level 8) 2016	Vector (lines)	Generalized coastline from OpenStreetMap	Describe the global location of the shoreline and create the transects	OpenStreetMap contributors (2016)
Copernicus (GLO-30)	DEM Raster	Global topographic raster dataset at a ~ 30 m resolution	Extract the subaerial part (topography) of the elevation profiles and the profile of the water mask used in GLO-30	European Space Agency and Airbus (2022)
DeltaDTM	Raster	Global coastal topographic raster dataset at a ~ 30 m resolution	Extract the subaerial part (topography) of the elevation profiles	Pronk et al. (2024), unclipped version with values above 10 m MSL
GEBCO 2023 Grid	Raster	Global bathymetric raster dataset at a ~ 500 m resolution	Extract the submerged part (bathymetry) of the elevation profiles	GEBCO Bathymetric Compilation Group (2023)
DTU10MDT	Raster	Global mean dynamic topography	Transform topographic elevation from the EGM2008 geoid reference to mean sea level (MSL) vertical reference	Knudsen and Anderson (2013)
ESA WorldCover (v100)	Raster	Global land cover class raster at a ~ 10 m resolution with classes trees, shrubland, grassland, cropland, built-up, barren/sparse vegetation, snow and ice, open water, herbaceous wetland, mangroves, and moss and lichen	Classify coastal protection and extract the main land cover class for each transect	Zanaga et al. (2021)
JRC water occurrence	Raster	Global raster of water occurrence at a ~ 30 m resolution	Get the profile of water occurrence and extract transition zone width	Pekel et al. (2016)
Global coastal type classification	Vector (point)	Point data along the global coastline with coastal classes: sandy, muddy, rocky, vegetated, or other type	Identify the occurrence of a specific type of coast at a transect	Hulskamp et al. (2023)
Global occurrence of saltmarshes and mangroves	Vector (point)	Geolocation of coastal segments with mangroves or saltmarshes	Identify the occurrence of vegetation at a transect	van Zelst et al. (2021)
ERA5	Raster (but points extracted for analysis)	Atmospheric, land, and oceanic climate variable reanalysis	Extract the offshore significant wave height, peak period, mean wave direction, local temperature, and precipitation indicators at each transect	Hersbach et al. (2020)
GTSM_v3.0	Vector (point)	Storm surge, and tide reanalysis using the global hydrodynamic Delft3D model	Extract tide, surge and total water level indicators at each transect	Muis et al. (2023)
WorldPop	Raster	Global population count per pixel at a ~ 100 m resolution (Constrained individual countries 2020 UN adjusted)	Calculate the population indicators at each transect	Bondarenko et al. (2020)
World Bank GDP dataset	Tabular	GDP and GDP per capita for all countries	Characterize the GDP per capita per transect	World Bank (2022)
Gridded global GDP	Raster (but points extracted for analysis)	GDP and GDP per capita for all countries	Characterize the GDP per capita per transect	Kummu et al. (2018)
gROADS_v1	Vector (lines)	Global roads inventory network	Identify presence of roads at a transect	Meijer et al. (2018)
World Port Index	Vector (points)	Geolocation of major ports	Identify presence of a port in the proximity of a transect	National Geospatial-Intelligence Agency (2019)
Global Airport Database	Vector (points)	Geolocation of major airports	Identify presence of a port in the proximity of a transect	The Global Airport Database (2021)
Global Railways	Vector (lines)	Global railway lines vector from the World Food Programme	Identify presence of railways per transect	World Food Programme (2022)

Annexe 1. Synthèse de l'ensemble des jeux de données utilisés pour la génération de la base de données Global Coastal Characteristics (Athanasίου et al., 2024a)



Annexe 2. Organigramme du processus de dérivation des indicateurs de la base de données GCC (Athanasίου et al., 2024a).

Annexes

Parameter	Label	Units	Description
Transect ID	id	–	ID of the transect in the form of BOX_{(box corners)}_{(transect number in box)}
Longitude	lon	degrees	Longitude of the centroid of the transect
Latitude	lat	degrees	Latitude of the centroid of the transect
Transect angle	angle	°N	Angle of transect (from land to sea direction)
Coastal max (first peak)	z_peak_first_[x]	m above MSL	First elevation peak found landward of the shoreline using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Coastal max (max peak 1 km)	z_peak_max_1km_[x]	m above MSL	Maximum elevation peak found between the shoreline and 1 km landward of the shoreline using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Cross-shore location of coastal max (first peak)	x_peak_first_[x]	m	Cross-shore location of coastal max (first peak), with the transect's centroid as reference using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Cross-shore location of coastal max (max peak 1 km)	x_peak_max_1km_[x]	m	Cross-shore location of coastal max (max peak 1 km), with the transect's centroid as reference using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Land cover class of coastal max (first peak)	lu_peak_first_[x]	–	Land cover class of coastal max (first peak) as extracted from ESA Worldcover_v100 (https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936 , Zanaga et al., 2021) using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Land cover class of coastal max (max peak 1 km)	lu_peak_max_1km_[x]	–	Land cover class of coastal max (max peak 1 km) as extracted from ESA Worldcover_v100 (https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936 , Zanaga et al., 2021) using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Mean hinterland elevation	he	m above MSL	Mean elevation of the hinterland, landward of coastal max (first peak) and excluding water areas using deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024)
Variance of hinterland elevation	ev	m ²	Variance of the elevation of the hinterland, landward of coastal max (first peak) and excluding water areas using deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024)
Depth of closure	doc	m	Depth of closure found using Athanasiou et al.(2019) (https://doi.org/10.5194/essd-11-1515-2019); if distance of offshore location was larger than 150 km, a value of –10 m was assumed
Parameter	Label	Units	Description
Depth of closure used	doc_used	m	Depth of closure used for slopes calculations in case the actual doc value was not available in the extracted profile
Cross-shore location of depth of closure	x_doc	m	Cross-shore location of depth of closure which was used in the profile, with the transect's centroid as reference
Cross-shore location of shoreline	x_shoreline	m	Cross-shore location of shoreline, with the transect's centroid as reference
Nearshore slope	ns	–	Nearshore slope calculated between the depth of closure and shoreline points
Backshore slope	bs_[x]	–	Backshore slope calculated between the shoreline and coastal max (first peak) points using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Coastal slope	cs_[x]	–	Coastal slope calculated between the depth of closure and coastal max (first peak) points using <i>x</i> : deltadm (https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9 , Pronk et al., 2024) or copdem (https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65 , European Space Agency and Airbus, 2022)
Error or warning flag	extraction_flag	–	0: no errors/warnings 1: shoreline not found 2: depth of closure not available; default –10 m used 3: depth of closure is deeper than the deepest profile point (which is used for the calculation) 4: coastal max (first peak) could not be found 5: nearshore slope is steeper than 1 : 5, and the transect is indicated as sandy (multiple flags for the same transects are possible)
Width of transition zone	tr_zone_width	m	Width of transition zone defined as the two points around the shoreline with 5 % and 95 % water occurrence, as extracted from Pekel et al. (2016) (https://doi.org/10.1038/nature20584)
Land cover class occurrence, <i>x</i>	lu_[x]	%	Occurrence of land cover built-up from the classes trees, shrubland, grassland, cropland, built-up, barren/sparse vegetation, snow and ice, open water, herbaceous wetland, mangroves, and moss and lichen from the ESA Worldcover_v100 (https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936 , Zanaga et al., 2021); this is calculated in a 500 m buffer zone around the landward part of the transect
Main land cover class	class_most	–	Most encountered land cover class from ESA Worldcover_v100 (https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936 , Zanaga et al., 2021); this is calculated in a 500 m buffer zone around the landward part of the transect
Main land cover class excluding open water	class_most_land	–	Most encountered land cover class from ESA Worldcover_v100 (https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936 , Zanaga et al., 2021) excluding the open-water class; this is calculated in a 500 m buffer zone around the landward part of the transect
Coastal type	coast_type_flag	–	Occurrence of sandy, muddy, rocky, vegetated, or other type of coast in the proximity of the transect based on Hulskamp et al. (2023) (https://doi.org/10.1038/s41467-023-43819-6)
Vegetation type	veg_type	–	Occurrence of mangrove or saltmarsh vegetation in the proximity of the transect based on van Zelst et al. (2022) (https://doi.org/10.1038/s41467-021-26887-4)
Mean dynamic topography	mdt	m	Difference between MSL and the geoid extracted at the centroid of the transect with bilinear interpolation from DTU10MDT (Knudsen and Anderson 2013)

Annexe 3. Synthèse des paramètres géophysiques intégrés dans la base Global Coastal Characteristics (Athanasiou et al., 2024a).

Annexes

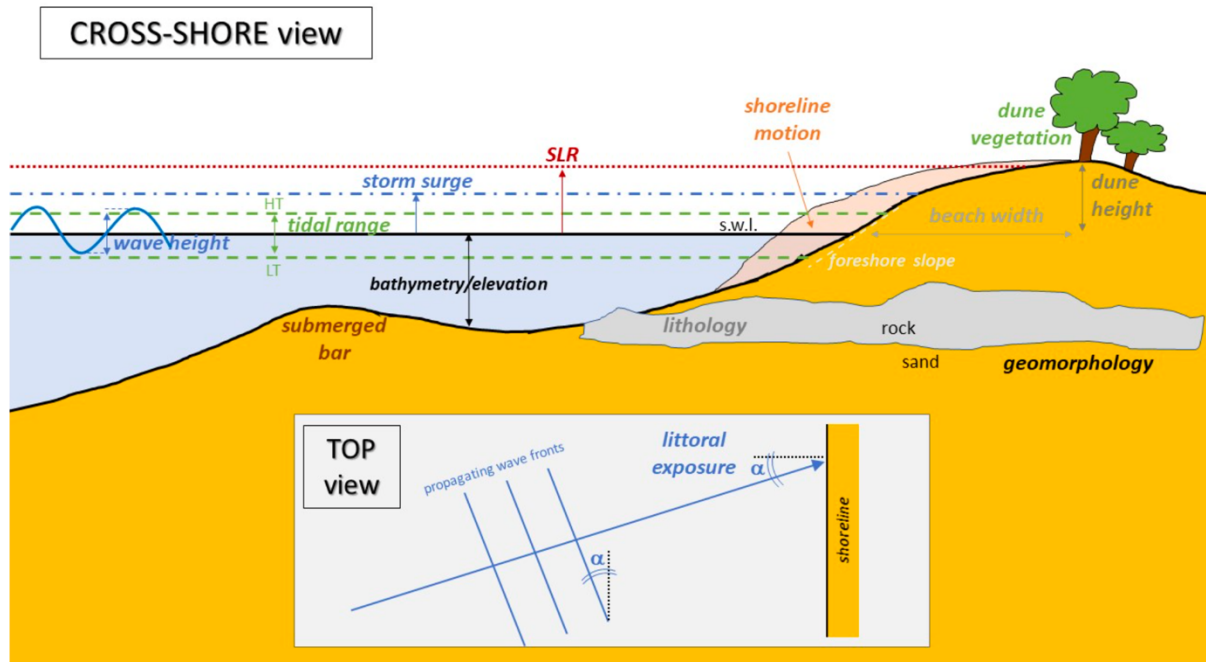
Parameter	Label	Units	Description
Hs 50th percentile	swh_p50	m	50th percentile of significant height of combined wind waves and swell (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Hs 95th percentile	swh_p95	m	95th percentile of significant height of combined wind waves and swell (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Tp 50th percentile	pp1d_p50	s	50th percentile of peak wave period (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Tp 95th percentile	pp1d_p95	s	95th percentile of peak wave period (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Average MWD of Hs \geq Hs_p95	mwd_p95	° N	Average mean wave direction (MWD) relative to true north, when Hs \geq Hs_p95 (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Mean daily temperature 50th percentile	t2m_p50	°C	50th percentile of mean daily temperature (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Mean daily temperature 95th percentile	t2m_p95	°C	95th percentile of mean daily temperature (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Total daily precipitation 50th percentile	tp_p50	mm	50th percentile of total daily precipitation (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Total daily precipitation 95th percentile	tp_p95	mm	95th percentile of total daily precipitation (1979–2019) extracted from ERA5 (https://doi.org/10.1002/qj.3803 , Hersbach et al., 2020)
Mean higher high water	mhhw	m above MSL	Mean higher high water (MHHW) (1985–2014) extracted from GTSMv3.0 (https://doi.org/10.1029/2023EF003479 , Muis et al., 2023)
Mean lower low water	mlhw	m above MSL	Mean lower low water (MLLW) (1985–2014) extracted from GTSMv3.0 (https://doi.org/10.1029/2023EF003479 , Muis et al., 2023)
SSL 50th percentile	ssl_p50	m	50th percentile of storm surge level (SSL) (1985–2014) extracted from GTSMv3.0 (https://doi.org/10.1029/2023EF003479 , Muis et al., 2023)
SSL 95th percentile	ssl_p95	m	95th percentile of storm surge level (SSL) (1985–2014) extracted from GTSMv3.0 (https://doi.org/10.1029/2023EF003479 , Muis et al., 2023)
SSL (x years RP)	ssl_rp{x}_mean	m	Storm surge level (SSL), with a return period of x of 1, 2, 5, 10, 25, 50, and 100 years from a GPD fit (1985–2014), extracted from GTSMv3.0 (https://doi.org/10.1029/2023EF003479 , Muis et al., 2023)
TWL (x years RP)	twl_rp{x}_mean	m above MSL	Total water level (TWL) with a return period of x of 1, 2, 5, 10, 25, 50, and 100 years from a GPD fit (1985–2014), extracted from GTSMv3.0 (https://doi.org/10.1029/2023EF003479 , Muis et al., 2023)

Annexe 4. Synthèse des paramètres hydrodynamiques intégrés dans la base Global Coastal Characteristics (Athanasίου et al., 2024a).

Annexes

Parameter	Label	Units	Description
Country name	country	–	Country standard name that the transects belongs to derived from WorldPop (https://doi.org/10.5258/SOTON/WP00685 , Bondarenko et al., 2020) dataset
Number of people	pop_all	People	Total number of people located in a 500 m buffer area; this is calculated in a 500 m buffer zone around the landward part of the transect using the WorldPop (https://doi.org/10.5258/SOTON/WP00685 , Bondarenko et al., 2020) dataset
Number of people below elevation x	pop_{x}_m	People	Total number of people located in a 500 m buffer area and below elevation x : 1, 5, and 10 m; this is calculated in a 500 m buffer zone around the landward part of the transect using the WorldPop (https://doi.org/10.5258/SOTON/WP00685 , Bondarenko et al., 2020) dataset
Road occurrence	roads	–	Intersection of transect with roads (1) or not (0) using the gROADSv1 (https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabd42 , Meijer et al., 2018) dataset
Railway occurrence	railways	–	Intersection of transect with railways (1) or not (0) using the WFP Global Railways dataset (https://geonode.wfp.org/layers/geonode:wld_trs_railways_wfp , World Food Programme, 2022).
Port occurrence	ports	–	Port occurrence (1) or not (0) in a radius of 1 km around the transect using the World Port Index (National Geospatial-Intelligence Agency, 2019) dataset.
Airport occurrence	airports	–	Airport occurrence (1) or not (0) in a radius of 1 km around the transect using the Global Airport Database (https://www.partow.net/miscellaneous/airportdatabase/ , Partow, 2021).
GDP per capita based on PPP in 2015	gdp_ppp_usd2017_2015	USD (2017)	Gross domestic product (GDP) per capita based on purchasing power parity (PPP) in 2015 in USD value of 2017 extracted from the World Bank (https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.PP.KD , last access: 20 January 2022) database based on the transect's country.
Gridded GDP per capita based on PPP in 2015	gdp_ppp_grid_2015	USD (2011)	Gridded gross domestic product (GDP) per capita based on purchasing power parity (PPP) in 2015 in USD value of 2011 extracted from Kumm et al. (2015) (https://doi.org/10.1038/sdata.2018.4).

Annexe 5. Synthèse des paramètres socio-économiques intégrés dans la base Global Coastal Characteristics (Athanasίου et al., 2024a).



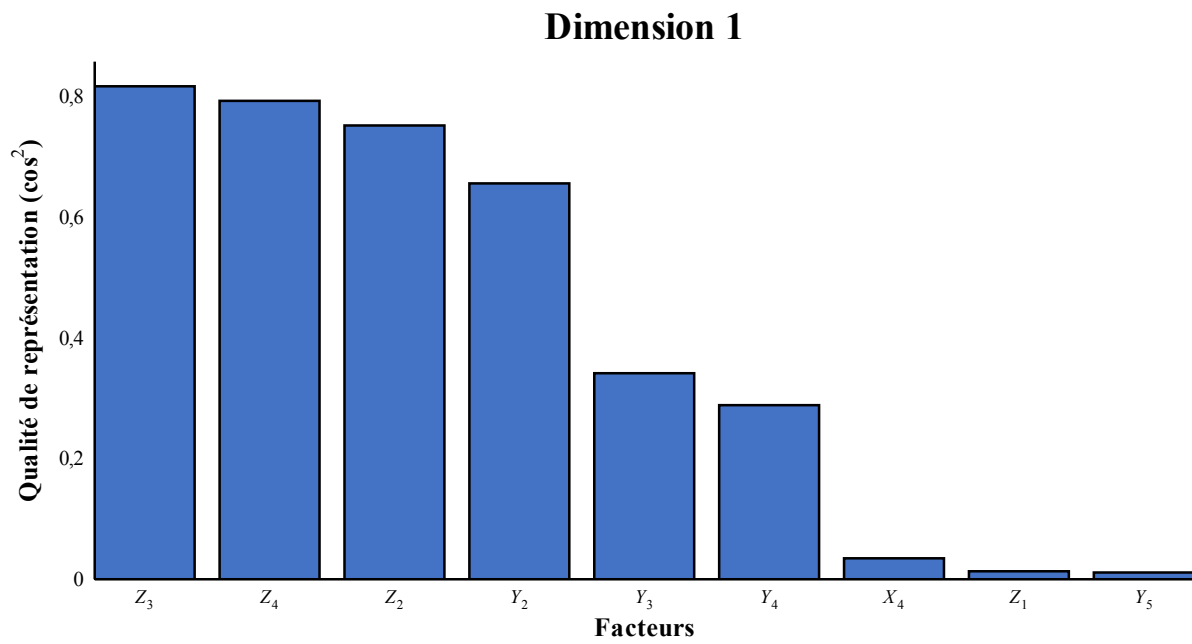
Annexe 6. Vue transversale des principales caractéristiques d'un système plage-dune typique (Anfuso et al., 2021).

Annexes

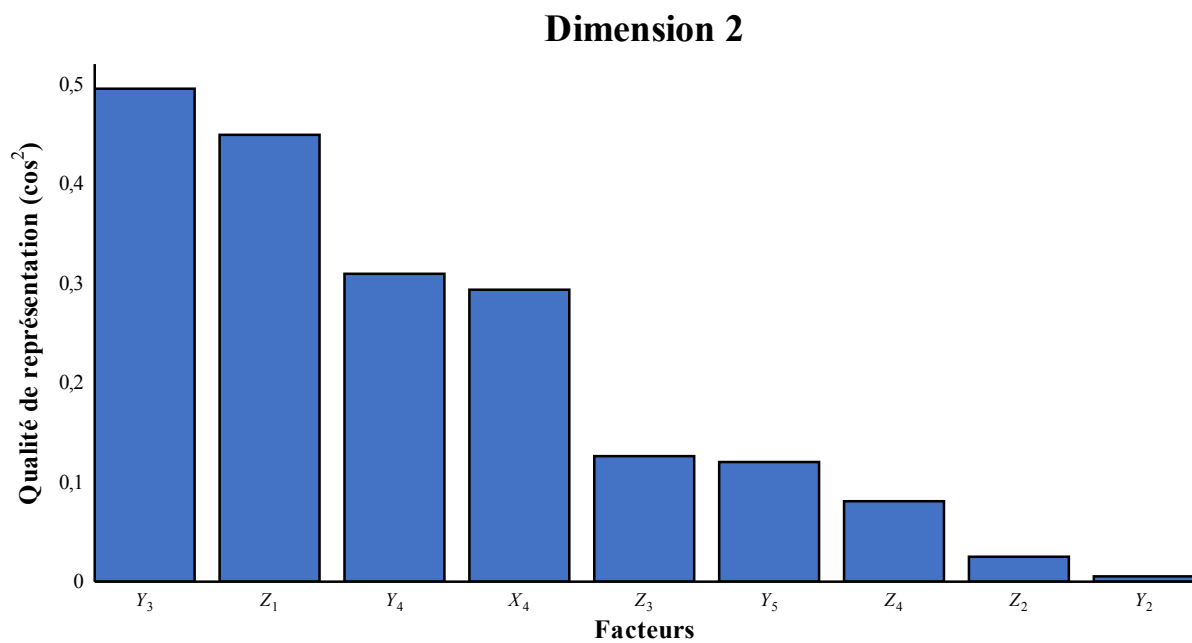
Catégorie	Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Forçages côtiers	X_1	Tendance d'élévation du niveau marin (mm/an)	< 1,8	1,8 – 2,5	2,5 – 3	3 – 3,4	> 3,4
	X_2	Amplitude des marées (m)	> 6	6 – 4	4 – 2	2 – 1	< 1
	X_3	Hauteur des vagues (m)	< 0,55	0,55 – 0,85	0,85 – 1,05	1,05 – 1,25	> 1,25
	X_4	Niveau marin extrême (m)	< a	/	a – b	/	> b
Caractéristiques physiques	Y_1	Géomorphologie	Côtes rocheuses et escarpées, fjords	Falaises moyennes, côtes découpées	Basses falaises, dérive glaciaire, plaines alluviales	Plages de galets, estuaire, lagune	Barrières littorales, plages de sable, marais salants, vasières, deltas, mangroves, récifs coralliens
	Y_2	Élévation (m)	> 7,5	7,5 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1	< 1
	Y_3	Pente (%)	> 6	6 – 4	4 – 2	2 – 1	< 1
	Y_4	Largeur de la plage (m)	> 500	500 – 200	200 – 100	100 – 50	< 50
	Y_5	Éléments de protection naturels	Mangrove	Arbres	Arbustes	Cultures, bâti	Végétation stérile/éparse, eau libre
Caractéristiques socio-économiques	Z_1	Densité de population (hab/km ²)	0	0 – 10	10 – 50	50 – 100	> 100
	Z_2	Distance aux bâtiments (m)	> 1000	1000 – 500	500 – 200	200 – 100	< 100
	Z_3	Distance au réseau routier (m)	> 1000	1000 – 500	500 – 200	200 – 100	< 100
	Z_4	Utilisation économique du sol	Arbres	Mangroves	Cultures	Pêche	Tourisme

a = Coastal max (first peak); b = Coastal max (max peak 1 km).

Annexe 7. Tableau récapitulatif des classifications retenues pour l'ensemble des facteurs étudiés.



Annexe 8. Qualité de représentation (\cos^2) des facteurs du Coastal Risk Index (CRI) retenus pour l'analyse sur la Dimension 1.



Annexe 9. Qualité de représentation (\cos^2) des facteurs du Coastal Risk Index (CRI) retenus pour l'analyse sur la Dimension 2.