

Analyse prospective de la sensibilité et de la vulnérabilité du littoral de Kribi à l'élévation du niveau de la mer selon les scénarios climatiques : intégration des solutions fondées sur la nature pour la réduction des risques côtiers

Auteur : Dong A Tiati, Laurentin Evariste

Promoteur(s) : Hubert, Aurelia

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes à l'ère de l'Anthropocène

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26805>

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.

ULiège – Faculté des Sciences – Département des Sciences et Gestion de l’Environnement

Université de Namur – Faculté des sciences

Analyse prospective de la sensibilité et de la vulnérabilité du littoral de Kribi à l'élévation du niveau de la mer selon les scénarios climatiques : intégration des solutions fondées sur la nature pour la réduction des risques côtiers



DONG A TIATI Laurentin Evariste

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN GESTION DES RISQUES ET DES CATASTROPHES A
L'ERE DE L'ANTHROPOCENE**

Année académique 2025–2026

Rédigé sous la direction de **Aurélia HUBERT Ferrari**

COMITE DE LECTURE :

Jury 1: **Florence de Longueville**

Jury 2 : **Pierre Ozer**

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 et de l'Université de Namur.

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

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Evariste DONG (evaristedong@gmail.com).

Dédicace

À ma grand-mère ONYONG Elisabeth, dont le départ au début de ce travail a renforcé ma détermination à le mener à terme.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'égard de l'ARES, de l'Université de Liège et de Namur pour l'opportunité qui m'a été donnée d'accéder à ce Master de spécialisation d'une part et d'autre part, profiter aussi pour exprimer ma reconnaissance aux équipes de l'Université de Liège notamment le Département Environnement de Arlon avec le M. OZER, M. KOUFANOUE, et de l'Université de Namur avec Mme Florence de Longueville entre autres pour l'opportunité offerte et la qualité de la formation dispensée dans le cadre du Ms GRCA.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Madame Aurélia HUBERT Ferrari, promotrice de ce mémoire, pour la qualité de son encadrement scientifique, la rigueur de ses orientations et la disponibilité dont elle fit preuve tout au long de ce travail.

Je remercie les autorités de la Mairie de Kribi et à M. EDANG ESSINDI Daniel en particulier, pour leur accueil lors des entretiens institutionnels, ainsi que l'ensemble des acteurs rencontrés, dont les informations ont consolidé ce travail dans les réalités de terrain.

Je remercie mes aînés Philippes MBEVO et Hervé YAKAN qui m'ont accompagné jusqu'au bout, tout au long de ce processus.

Je remercie en fin les membres de ma famille et mes ami(e)s pour leur soutien inconditionnel.

Table des matières

Dédicace.....	iii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	ix
Sigles et acronymes.....	xi
Résumé.....	xiii
Abstract	xiv
I. Introduction.....	1
I.1 Contexte.....	1
I.2 Problématique	1
I.3 Objectifs.....	2
I.4 Structure du mémoire	2
II. État de l'art.....	3
II.1 Cadre conceptuel du risque côtier	3
II.2 L'élévation du niveau de la mer.....	3
II.3 Les approches d'évaluation du risque côtier.....	3
II.4 Les approches prospectives d'évaluation du risque côtier	4
II.5 La base Global Coastal Characteristics (GCC)	4
II.6 Les solutions fondées sur la nature.....	5
III. Matériels et méthodes	5
III.1 Zone d'étude	5
III.3 Matériel de travail et Méthodologie.....	7
III.3.1 Construction des facteurs	7
III.3.2 Sources des données.....	8
III.3.3 Classification des facteurs.....	9
III.3.4 Calcul des indices.....	10

III.3.5 Validation des facteurs et contribution des acteurs locaux	11
III.3.6 Dimension prospective.....	12
III.3.6.1 Cadre conceptuel et approche retenue	12
III.3.6.2 Facteurs projetés, règles et sources	12
III.3.6.3 Formules de recalcul	12
III.3.6.4 Choix des horizons et scénarios prospectifs	13
III.3.7 Scénarios SfN (Solutions fondées sur la Nature).....	13
III.3.7.1 Cadre conceptuel et horizon retenu.....	13
III.3.7.2 Périmètre d'application et exclusions.....	13
III.3.7.3 Règles de modification.....	14
III.3.7.4 Formules de calcul et articulation avec la prospective climatique.....	14
III.3.8 Outils et analyse des données.....	14
III.3.9 Analyse exploratoire des relations entre facteurs	15
III.3.9.1 Corrélation de Spearman.....	15
III.3.9.2 Analyse en composantes principales (ACP)	15
III.3.9.3 Classification K-means	16
III.3.10 Cartographie des résultats	16
IV. Résultats.....	17
IV.1 Les facteurs de forçage côtier	17
IV.2 Les caractéristiques physiques du littoral	19
IV.3 Les caractéristiques socio-économiques	20
IV.4 Les indices intermédiaires	22
IV.5 L'indice de risque côtier.....	22
IV.5.1 Distribution générale.....	22
IV.5.2 Gradient géographique nord-sud	23
IV.5.3 Hotspots de risque.....	23
IV.6 Analyse exploratoire des relations entre facteurs	25
IV.6.1 Corrélations de Spearman.....	25

IV.6.2 Analyse en composantes principales (ACP).....	25
IV.6.3 Classification K-means et profils de risque	26
IV.7 Résultats prospectifs	28
IV.7.1 Distribution et migration des classes	29
IV.7.2 Évolution spatiale et hotspots	29
IV.8 Résultats des scénarios de Solutions fondées sur la Nature.....	30
IV.8.1 Le rôle actuel des écosystèmes littoraux.....	30
IV.8.2 Articulation avec les scénarios climatiques	32
IV.8.3 Hiérarchisation des zones prioritaires d'intervention.....	32
V. Discussion	34
V.1 Un risque structuré par la vulnérabilité socio-économique.....	34
V.2 Convergence avec la perception des acteurs institutionnels	34
V.3 La quasi-disparition des mangroves : un résultat autant qu'une limite	36
V.4 Une aggravation prospective portée par la vulnérabilité.....	38
V.5 Les solutions fondées sur la nature comme levier d'adaptation	38
V.6 Apports méthodologiques par rapport au protocole de Kafountine	40
V.7 Portée opérationnelle et outil d'aide à la décision	40
V.8 Limites méthodologiques	41
VI. Conclusion et recommandations.....	42
Bibliographie.....	44
Utilisation de l'intelligence artificielle	47
ANNEXES	I
Annexe A — Guides d'entretien institutionnels (Q1 à Q8)	I
Annexe B — Données brutes et classifiées des 59 transects	IX
Annexe C — Récapitulatif des seuils de classification retenus	XII
Annexe E — Fiche pratique à destination des décideurs.....	XIII
Annexe D — Localisation et numérotation des points issus de la base GCC sélectionnés pour l'analyse	XV

Liste des figures

Figure 1 : Occupation du sol et localisation de la zone d'étude - littoral de Kribi (Kribi 1 et 2°, Cameroun Source : ESA World Cover_10m_2021	6
Figure 2 : Échelle de couleurs discrétisée utilisée pour la cartographie des treize facteurs du CRI de Kribi. Source : Verstraete (2025).	16
Figure 3 : Échelle de couleurs continue utilisée pour la cartographie des six indices du CRI de Kribi. Source : Verstraete (2025).	16
Figure 4 : Carte des facteurs de forçages côtiers (X)	18
Figure 5 : Carte des facteurs de caractéristiques physiques du littoral (Y)	20
Figure 6 : Carte des facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral (Z).	21
Figure 7 : 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).	22
Figure 8 : Carte du risque côtier dans la ville de Kribi, selon le Coastal Risk Index (CRI).	24
Figure 9 : Corrélogramme de la corrélation de Spearman entre les neuf facteurs classifiés du CRI de Kribi. Les coefficients positifs apparaissent en bleu, les coefficients négatifs en rouge, l'intensité de la teinte traduisant la force de la relation. Réalisé sous R (package corrplot).	25
Figure 10 : Biplot de l'analyse en composantes principales conduite sur les neuf facteurs classifiés. Les 59 transects sont projetés dans le plan formé par les deux premières dimensions, les vecteurs représentant les variables et leur contribution respective. Réalisé sous R (package FactoMineR). ..	26
Figure 11 : Détermination du nombre optimal de clusters par la méthode du coude.	26
Figure 12 : Classification K-means en quatre groupes projetés dans le plan factoriel de l'analyse en composantes principales.	27
Figure 13 : Localisation des clusters identifiés par l'Analyse en Composantes Principales (ACP) .	28
Figure 14 : Évolution de l'indice de risque côtier (CRI) du littoral de Kribi aux horizons 2030, 2050 et 2100.	30
Figure 15 : Effet des scénarios de dégradation et de restauration des écosystèmes littoraux sur l'indice de risque côtier (CRI) du littoral de Kribi.	33
Figure 16 : Localisation et numérotation des points issus de la base GCC sélectionnés pour l'analys	XV

Liste des tableaux

Tableau 1 : Construction des treize facteurs du CRI de Kribi des 3 catégories (forçages côtiers X ; caractéristiques physiques Y ; caractéristiques socio-économiques Z) : sources mobilisées et traitements appliqués. Source : auteur, d'après Athanasiou et al. (2024b) pour les champs GCC et Verstraete (2025) pour les conventions de calcul	7
Tableau 2 : Inventaire des données mobilisées pour le CRI de Kribi pour contraindre les différents facteurs du CRI. Terminologie des facteurs suivant Verstraete (2025).	9
Tableau 3 : Catégorisation des forçages côtiers (X) pour le calcul de l'indice CFI ou Coastal Forcing Index. Inspiré de Verstraete (2025). Sources : CMEMS (X1) ; GCC/GTSMv3.0 (X2, X4) ; GCC/ERA5 (X3).	9
Tableau 4: Catégorisation des caractéristiques physiques du littoral (Y) pour le calcul de l'indice PSI ou Physical Susceptibility Index. Sources : GCC/DeltaDTM (Y2, Y3, Y4) ; GCC/ESA WorldCover (Y5a) ; Hulskamp et al. (2023) pour Y1.	10
Tableau 5 : Catégorisation des caractéristiques socio-économiques du littoral (Z) pour le calcul de d'indice SSI ou Socioeconomic Susceptibility Index.	10
Tableau 6 : Règles de projection des cinq facteurs modifiés et sources mobilisées.	12
Tableau 7 : Règles de modification des trois facteurs de susceptibilité physique dans les scénarios SfN, évalués à l'horizon 2050. Source : auteur, d'après Temmerman et al. (2013), Menéndez et al. (2020), Mbevo Fendoung (2019), Fongnzossié Fedoung et al. (2018).	14
Tableau 8 : Pouvoir discriminant des treize facteurs du CRI de Kribi et justification des exclusions. Les facteurs sont ordonnés par variance croissante des classes attribuées. Source : calculs auteur sur les 59 transects	15
Tableau 9 : Fréquence des classes des quatre facteurs de forçage côtier. 59 transects, littoral de Kribi, 2024.	17
Tableau 10 : Fréquence des classes des cinq facteurs de caractéristiques physiques du littoral. 59 transects, littoral de Kribi, 2024.	19
Tableau 11 : Fréquence des classes des quatre facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral. 59 transects, littoral de Kribi, 2024.	20
Tableau 12 : Distribution des 59 transects du littoral de Kribi par classe de CRI sur l'échelle 1–5.	23
Tableau 13 : CRI moyen et extrêmes par secteur géographique. Littoral de Kribi, 2024.	23
Tableau 14 : Les cinq transects à risque côtier le plus élevé. Littoral de Kribi, 2024.	23
Tableau 15 : Les cinq transects à risque côtier le plus faible. Littoral de Kribi, 2024.	24
Tableau 16 : Valeurs propres et variance expliquée par les cinq premières dimensions de l'ACP (N = 59 transects, 10 facteurs standardisés).	25

Tableau 17 : Scores moyens des facteurs et des indices par cluster K-means (N = 59, k = 4, inertie expliquée = 71,4 %).	28
Tableau 18 : Statistiques comparatives des sous-indices et du CRI pour les trois horizons prospectifs. Δ CRI exprimé par rapport au CRI de référence (2,963). Source : calculs auteur sur données GCC, QGIS 3.x.	29
Tableau 19 : Évolution prospective du CRI par secteur, du nombre de transects en classe Élevé ou plus, des hotspots et des quatre profils de risque. Source : calculs QGIS 3.x	29
Tableau 20 : Statistiques comparatives du CRI et du PSI pour les configurations S0, S1 et S2. Source : calculs sous QGIS 3.x	31
Tableau 21 : CRI moyen par secteur géographique pour les scénarios S0, S1 et S2. Sectorisation identique à celle du Tableau 16. Source : calculs QGIS 3.x	31
Tableau 22 : Comparaison des six configurations climat $\times$ SfN à l'horizon 2050. Source : calculs auteur, QGIS 3.x	32
Tableau 23 : Hiérarchisation des vingt-quatre transects prioritaires d'intervention, classés par écart décroissant entre les scénarios de dégradation et de restauration. Source : calculs QGIS 3.x	33
Tableau 24 : Superficies des zones de mangrove du littoral camerounais. Les trois poches de la zone Kribi-Campo ne représentent ensemble que 0,6 % du couvert national. Source : MINEP (2010)....	37
Tableau 25 : Coordonnées et valeurs brutes des facteurs par transect.	IX
Tableau 26 : Classes de 1 à 5 attribuées à chaque facteur et valeurs décimales des sous-indices et de l'indice global.	X
Tableau 27 : Seuils de classification des treize facteurs du CRI de Kribi.	XII
Tableau 29 : Catégories d'action recommandées à la Mairie de Kribi. Les trois catégories couvrent la totalité des 59 tronçons du littoral.	XIV

Sigles et acronymes

ACP	Analyse en Composantes Principales
AR6	Sixth Assessment Report (IPCC)
BUCREP	Bureau Central des Recensements et des Études de Population (Cameroun)
CFI	Coastal Forcing Index
CHI	Coastal Hazard Index
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service
CRI	Coastal Risk Index
CUK	Communauté Urbaine de Kribi
CVI	Coastal Vulnerability Index
DMN	Direction de la Météorologie Nationale (Cameroun)
ERA5	Réanalyse atmosphérique de 5e génération (ECMWF)
GCC	Global Coastal Characteristics
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GTSM	Global Tide and Surge Model
INS	Institut National de la Statistique (Cameroun)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LECZ	Low Elevation Coastal Zone
MDim-CVI	Multi-Dimensional Coastal Vulnerability Index
MEAO	Mission d'Étude pour l'Aménagement de l'Océan
MHHW	Mean Higher High Water
MINEP	Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (dénomination antérieure à 2011)
MINEPDED	Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable
MINFOF	Ministère des Forêts et de la Faune
MINHDU	Ministère de l'Habitat et du Développement Urbain
MINT	Ministère des Transports
MLLW	Mean Lower Low Water
MSL	Mean Sea Level
OSM	OpenStreetMap
PDU	Plan Directeur d'Urbanisme

POS	Plan d'Occupation des Sols
PSI	Physical Susceptibility Index
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat (Cameroun)
RN7	Route Nationale 7 (Cameroun)
RP10	Période de retour de 10 ans (Return Period)
SfN	Solutions fondées sur la Nature
SIG	Système d'Information Géographique
SLA	Sea Level Anomaly
SLR	Sea Level Rise
SNH	Société Nationale des Hydrocarbures
SSI	Socioeconomic Susceptibility Index
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
TFE	Travail de Fin d'Études
TWL	Total Water Level
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature

Résumé

Le littoral de Kribi, situé dans la région du Sud du Cameroun, concentra sur 75 km de côte des enjeux économiques, écologiques et humains majeurs, dans un contexte d'élévation accélérée du niveau de la mer. La présence du port en eau profonde, du terminal à Gas de la Société National des Hydrocarbures (SNH) et de complexes touristiques de bord de mer confère à ce littoral une spécificité qui le distingue nettement des cas étudiés dans la littérature africaine existante.

Face aux limites des approches bathtub, dont la précision verticale de 16 m pour le SRTM et de 2 à 4 m pour le FABDEM demeure incompatible avec une analyse locale robuste, cette étude mobilisa un indice composite de risque côtier (Coastal Risk Index, CRI) construit à partir de treize facteurs organisés en trois catégories, à savoir les forçages côtiers (CFI), les caractéristiques physiques (PSI) et les caractéristiques socio-économiques (SSI). Les données furent extraites de la base Global Coastal Characteristics (GCC, Athanasiou et al., 2024) et complétées par des données CMEMS, OpenStreetMap et une correction manuelle appuyée sur les entretiens avec la Mairie de Kribi. Le traitement fut réalisé sous QGIS 3.x sur 59 transects.

Les résultats révélèrent un CRI moyen de 2,96 sur une échelle de 1 à 5, avec un maximum de 3,70 au transect 20 (lat. 2,969° N) et un minimum de 2,11 au transect 57. Un gradient nord-sud marqué fut observé, le secteur nord atteignant un CRI moyen de 3,222 contre 2,625 pour le secteur sud. La vulnérabilité socio-économique constitua par ailleurs la composante la plus discriminante, avec une corrélation de 0,855 au CRI. La quasi-disparition des mangroves, dont la superficie résiduelle n'excéda pas 2 ha, priva le littoral de sa protection naturelle, accentuant la susceptibilité physique des secteurs concernés.

La dimension prospective, construite selon l'approche de Furlan et al. (2021), consista à recalculer l'indice pour trois horizons temporels, soit 2030, 2050 et 2100, en faisant évoluer cinq facteurs disposant de projections vérifiables (X1, X4, Y4, Z1 et Z4). Le CRI moyen progressa de 2,963 à 3,231 en 2030 (+9,0 %), 3,443 en 2050 (+16,2 %) et 3,564 en 2100 (+20,3 %). La proportion de transects atteignant au moins la classe Élevé passa de 17 % à 63 % sur la période, et 46 transects sur 59 changèrent de classe entre l'état de référence et l'horizon 2100, sans qu'aucun ne connaisse d'amélioration.

Les solutions fondées sur la nature furent évaluées à l'horizon 2050 à travers deux trajectoires contrastées, à savoir la dégradation (S1) et la restauration (S2), agissant sur les trois facteurs de susceptibilité physique modifiables (Y1, Y4 et Y5a). La dégradation porta le CRI moyen à 3,244 (+9,5 %) tandis que la restauration l'abaissa à 2,751 (−7,1 %), soit une amplitude de 0,492 point entre les deux trajectoires. Couplée aux forçages climatiques de 2050, la restauration ramena le CRI de 3,443 à 3,156, compensant ainsi près de 60 % de l'aggravation climatique sans toutefois l'annuler. Vingt-quatre transects, concentrés dans les secteurs nord et central, furent identifiés puis hiérarchisés comme zones prioritaires d'intervention. Un calcul contrefactuel établit enfin que le couvert végétal résiduel assure déjà plus de la moitié du bénéfice qu'apporterait une restauration complète du littoral, ce qui place la conservation avant la restauration dans l'ordre des priorités.

Mots-clés : Coastal Risk Index (CRI), élévation du niveau de la mer, scénarios prospectifs SSP, solutions fondées sur la nature, littoral de Kribi

Abstract

The coastline of Kribi, located in the South Region of Cameroon, concentrated major economic, ecological and human stakes along 75 km of shoreline, in a context of accelerating sea-level rise. The presence of a deep-water port, the Chad-Cameroon pipeline petroleum terminal and beachfront tourist complexes gave this coastline a specificity clearly distinguishing it from cases studied in existing African literature.

Given the limitations of bathtub approaches, whose vertical precision of 16 m for SRTM and 2 to 4 m for FABDEM remains incompatible with robust local analysis, this study mobilised a composite coastal risk index (CRI) built from thirteen factors organised into three categories, namely coastal forcing (CFI), physical susceptibility (PSI) and socioeconomic susceptibility (SSI). Data were extracted from the Global Coastal Characteristics database (GCC, Athanasiou et al., 2024) and supplemented by CMEMS data, OpenStreetMap layers and manual corrections supported by interviews with the Municipality of Kribi. Processing was performed in QGIS 3.x on 59 transects.

Results revealed a mean CRI of 2.96 on a 1-to-5 scale, with a maximum of 3.70 at transect 20 and a minimum of 2.11 at transect 57. A marked north-south gradient was observed, the northern sector reaching a mean CRI of 3.222 against 2.625 for the southern sector. Socio-economic susceptibility further proved the most discriminating component, with a correlation of 0.855 to the CRI. The near-disappearance of mangroves, with residual coverage not exceeding 2 hectares, deprived the shoreline of natural protection, increasing the physical susceptibility of affected sectors.

The prospective dimension, built on the approach of Furlan et al. (2021), recalculated the index for three time horizons, namely 2030, 2050 and 2100, by projecting five factors supported by verifiable data sources (X1, X4, Y4, Z1 and Z4). Mean CRI rose from 2.963 to 3.231 in 2030 (+9.0 %), 3.443 in 2050 (+16.2 %) and 3.564 in 2100 (+20.3 %), while the share of transects reaching at least the High risk class increased from 17 % to 63 %.

Nature-based solutions were assessed for 2050 through two contrasting trajectories, namely degradation (S1) and restoration (S2), acting on the three modifiable physical susceptibility factors (Y1, Y4 and Y5a). Degradation raised mean CRI to 3.244 (+9.5 %) whereas restoration lowered it to 2.751 (−7.1 %), an amplitude of 0.492 points. Combined with 2050 climate forcing, restoration brought CRI from 3.443 down to 3.156, offsetting close to 60 % of the projected climate-driven aggravation without fully cancelling it. Twenty-four transects in the northern and central sectors were identified and ranked as priority intervention areas. A counterfactual computation further established that the residual vegetation cover already secures more than half of the benefit a full restoration would deliver, placing conservation ahead of restoration in the order of priorities.

Keywords: Coastal Risk Index (CRI), sea-level rise, SSP prospective scenarios, nature-based solutions, Kribi coastline

I. Introduction

I.1 Contexte

L'élévation du niveau de la mer constitue l'un des marqueurs les plus tangibles du changement climatique, dont les effets se font déjà sentir dans de nombreuses régions côtières (IPCC, 2022). Le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) confirme une hausse de 0,20 m entre 1901 et 2018, avec un taux d'accélération notable depuis les années 1990, de l'ordre de 3,7 mm/an sur la période 2006–2018 (IPCC, 2021). Pour 2100, les projections varient de 0,28 à 0,55 m sous SSP1-1.9 à 0,63–1,01 m sous SSP5-8.5 (IPCC, 2021). Ces dynamiques amplifient les risques d'érosion côtière, de submersion marine et d'intrusion saline, avec des effets particulièrement sévères sur les littoraux africains où la croissance démographique côtière est la plus rapide au monde ; soit 60,5 % d'augmentation de population à moins de 10 km des côtes entre 2000 et 2018 (Cosby et al., 2024).

La ville de Kribi, située au littoral camerounais, partage cette dynamique, que connaît les zones côtières africaines. Elle cumule en effet trois caractéristiques qui en font un cas révélateur des difficultés de gestion côtière en Afrique centrale. Dans un premier temps, elle a concentré en moins de vingt ans des infrastructures d'importance nationale sur une bande étroite, à savoir le terminal du pipeline Tchad-Cameroun mis en service en 2003 et le port en eau profonde de Lolabé, dont Mbevo Fendoung et al. (2022) ont établi qu'ils ont modifié les dynamiques sédimentaires et accéléré l'érosion observée depuis 2013. Elle a ensuite connu une croissance démographique parmi les plus rapides du pays, avec un taux annuel de 5,7 % entre 1987 et 2005 contre 2,8 % au niveau national (BUCREP, 2010), des tendances que Cosby et al. (2024) situent dans une accélération plus large des populations côtières mondiales sur la période 2000-2018. Elle a enfin perdu la quasi-totalité de son couvert de mangroves, l'inventaire national n'ayant recensé que trois poches résiduelles sur la zone Kribi-Campo et attribuant leur disparition au dégagement d'espaces pour l'habitation (MINEP, 2010), constat confirmé par l'évaluation nationale la plus récente (MINEPDED, 2017).

De cette configuration découle la question à laquelle ce travail entend répondre, à savoir où se situent les portions les plus exposées d'un littoral aux forçages marins peu variables, et dans quelle mesure la restauration des écosystèmes littoraux peut contribuer à réduire ce risque. Les approches par simple seuil altimétrique n'y suffisent pas, la précision verticale des modèles disponibles restant incompatible avec un arrière-pays s'élevant parfois à moins de dix mètres (Hawker et al., 2022 ; Poulter et Halpin, 2008). Il convient par ailleurs d'articuler ce diagnostic à des trajectoires futures, l'IPCC AR6 anticipant une élévation du niveau marin comprise entre 0,44 et 0,77 mètre à l'horizon 2100 selon la trajectoire retenue (Fox-Kemper et al., 2021).

I.2 Problématique

Le littoral de Kribi pose une difficulté que les outils usuels ne résolvent pas isolément. D'un côté, la vulnérabilité socio-économique domine l'aléa physique avec les enjeux qui se sont concentrés en moins de vingt ans sous l'effet du terminal à gas et du port en eau profonde, modifiant la dynamique sédimentaire (Mbevo Fendoung et al., 2022). De l'autre, le littoral a perdu la quasi-totalité de son couvert de mangroves, l'inventaire national n'en ayant recensé que trois poches résiduelles sur la zone

Kribi-Campo (MINEPDED, 2017), sans qu'il soit établi si ce qui en subsiste protège encore quelque chose.

Cette configuration appelle un outil capable à la fois de situer spatialement le risque, ce que les seuils altimétriques ne permettent pas à cette échelle (Hawker et al., 2022), et de mesurer ce que les solutions fondées sur la nature peuvent y changer. De là découle la question centrale de ce travail, à savoir déterminer où se situent les secteurs les plus sensibles du littoral de Kribi, dans quelle mesure la restauration des écosystèmes peut y réduire le risque, et comment cette évaluation évolue aux horizons 2030, 2050 et 2100 retenus par le GIEC (Fox-Kemper et al., 2021).

I.3 Objectifs

Ce travail se donne pour objet d'évaluer de manière prospective la sensibilité et la vulnérabilité du littoral de Kribi à l'élévation du niveau de la mer à l'aide d'un indice composite de risque côtier (CRI), et analyser le rôle potentiel des solutions fondées sur la nature dans la réduction des risques côtiers.

Pour répondre à cet objectif central, plusieurs objectifs spécifiques en découlent. Le premier est d'estimer l'évolution future de la pression liée à l'élévation du niveau de la mer selon différents scénarios climatiques. Pour cela, il faut identifier et cartographier les secteurs du littoral de Kribi les plus exposés, les plus sensibles et les plus vulnérables. Il sera question de caractériser les principaux facteurs physiques, environnementaux et socio-économiques qui structurent le risque côtier à Kribi. L'objectif principal découlera de la construction d'un indice composite de risque côtier inspiré de l'approche développée par Verstraete (2025) et adapté au contexte kribien. Par rapport à ce travail, il sera question d'intégrer explicitement les solutions fondées sur la nature dans l'analyse en évaluant leur rôle actuel et potentiel dans l'atténuation des risques. Une comparaison de la distribution spatiale du risque sera faite selon plusieurs horizons temporels afin de proposer une lecture prospective de la vulnérabilité littorale. Ceci permettra d'identifier les zones prioritaires d'intervention et de proposer des pistes d'adaptation durable fondées sur les caractéristiques des différents secteurs littoraux.

Nos **hypothèses** de recherche sont les suivantes : (H1) Le risque côtier est distribué de façon hétérogène, avec une concentration dans les secteurs concentrant des infrastructures économiques majeures ; (H2) La quasi-disparition des mangroves accentue la susceptibilité physique du littoral ; (H3) La vulnérabilité socio-économique constitue la composante la plus discriminante du *Coastal Risk Index (CRI)* à Kribi.

I.4 Structure du mémoire

Le présent mémoire est structuré en six principales sections. La section II est l'état de l'art, et couvre le cadre conceptuel du risque côtier, l'élévation du niveau marin, les approches d'évaluation en tenant compte de leurs déclinaisons prospectives, la base de données GCC et les solutions fondées sur la nature. La section III présente les matériels et méthodes soit la construction et classification des treize facteurs utilisés pour construire l'indice composite de risque côtier, le calcul des indices intermédiaires, la dimension prospective aux horizons 2030, 2050 et 2100 (III.3.5), les scénarios de solutions fondées sur la nature (III.3.6) et enfin les analyses exploratoires. La section IV expose les résultats, depuis l'analyse facteur par facteur (IV.1 à IV.3) jusqu'aux configurations prospectives (IV.7) et aux scénarios SfN (IV.8). La section V, quant à elle, discute ces résultats au regard de la littérature et des orientations du protocole, et la section VI enfin, conclut par des recommandations opérationnelles destinées à la Mairie de Kribi.

II. État de l'art

La lecture de ce travail nécessite la compréhension de plusieurs concepts de base qui portent sur le risque côtier notamment son évaluation et leur prospective, l'élévation même du niveau de la mer, les solutions fondées sur la nature ainsi que les bases de la *Global Coastal Characteristics* (GCC) développé par Athanasiou et al. (2024).

II.1 Cadre conceptuel du risque côtier

Le GIEC définit le risque comme le potentiel de conséquences négatives résultant de l'interaction dynamique entre des aléas climatiques, l'exposition et la vulnérabilité (IPCC, 2022). L'aléa quant à lui, désigne la probabilité d'occurrence d'un phénomène susceptible de provoquer des dommages (UNDRR, 2017). L'exposition fait référence à la présence de personnes et d'infrastructures dans des zones vulnérables (Cardona et al., 2012). La vulnérabilité désigne l'ensemble des conditions physiques, sociales, économiques, environnementales, qui augmentent la susceptibilité d'un système à subir les impacts d'un aléa (Cardona et al., 2012). Ce cadre tripartite guide la construction d'un indice composite de risque côtier ou Coastal Risk Index (CRI). Ce cadre s'inscrit dans le « Cadre de Sendai » adopté en 2015 par les États membres des Nations unies pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030 et constituant l'instrument international de référence en la matière. Il fixe comme la première priorité d'action, la compréhension des risques, ce qui inscrit directement les démarches d'évaluation indicielle telles que celle conduite ici dans un cadre normatif reconnu (UNDRR, 2017).

II.2 L'élévation du niveau de la mer

L'élévation du niveau de la mer résulte principalement de la dilatation thermique des océans et de la fonte des glaciers et calottes polaires (IPCC, 2022 ; Rocha et al., 2023). Ses conséquences 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., 2015). Les projections de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dans sa *Sixth Assessment Report* (AR6) à l'horizon 2100 varient de 0,28–0,55 m (SSP1-1.9) à 0,63–1,01 m (SSP5-8.5), ces élévations s'intensifiant considérablement à l'horizon 2150 (IPCC, 2021). Pour le Golfe de Guinée, les données altimétriques satellitaires de la *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) sur 1993–2024 indiquent une tendance locale d'environ 3,28 mm/an, valeur retenue comme un des facteurs l'indice composite de risque (facteur X1 dans Verstraete (2025), voir section III). Nicholls et Cazenave (2010) soulignent que les effets de l'élévation du niveau de la mer deviennent de plus en plus évidents à mesure que l'élévation induite par le climat augmente.

II.3 Les approches d'évaluation du risque côtier

L'approche dans ce mémoire pour évaluer le risque côtier utilise des indices composites, ce qui permette de saisir la complexité du risque côtier en intégrant des variables de forçage, de susceptibilité physique et de vulnérabilité socio-économique (Rocha et al., 2023). Depuis le *Coastal Vulnerability Index* (CVI) de Gornitz (1991) qui repose sur la construction d'une base de données regroupant plusieurs variables associées aux risques de submersion et d'érosion, afin d'identifier les portions de côte présentant les niveaux de vulnérabilité les plus élevés, ces méthodes utilisant les indices composites ont évolué vers des cadres standardisés multi-indices. Rocha et al. (2023) proposent un cadre unifié distinguant *Coastal Forcing Index* (CFI), *Physical Susceptibility Index* (PSI),

Socioeconomic Susceptibility Index (SSI), combinés en indices intermédiaires comme le *Coastal Hazard Index (CHI)*, le *Coastal Vulnerability Index (CVI)* et un indice global, le *Coastal Risk Index (CRI)*. Verstraete (2025) a adapté ce cadre au littoral de Kafountine au Sénégal, en s'appuyant sur la base GCC d'Athanasίου et al. (2024), et démontre la capacité de cette méthode à identifier des hotspots spatialisés et des profils de risque distincts par clustering K-means.

II.4 Les approches prospectives d'évaluation du risque côtier

Si les indices composites furent initialement conçus pour caractériser un état de référence, leur transposition à des horizons futurs constitue depuis une quinzaine d'années un champ méthodologique actif. Trois familles d'approches se dégagent de la littérature, qui se distinguent par la manière dont les projections climatiques sont propagées dans l'indice.

La première consiste à recalculer directement l'indice en classes discrètes pour plusieurs valeurs d'élévation du niveau marin. López Royo et al. (2016) l'appliquent à un littoral mixte rocheux-sableux espagnol en substituant successivement les valeurs du *Sea Level Rise (SLR)* projetées dans le facteur correspondant. Cette approche a le mérite de la simplicité, mais elle perd son pouvoir discriminant lorsque les amplitudes de SLR projetées demeurent inférieures à la largeur des classes retenues, ce qui est une situation fréquente pour les horizons rapprochés.

La deuxième, développée par Furlan et al. (2021) pour le littoral italien, procède par le recalcul intégral de l'indice pour un état de référence et un état futur. Le *Multi-Dimensional Coastal Vulnerability Index* (Multi-Dimensional Coastal Vulnerability Index, ou MDim-CVI) qu'ils proposent agrège des indicateurs physiques, environnementaux et socio-économiques, et évalue la vulnérabilité des provinces côtières italiennes aux scénarios de niveaux marins extrêmes à l'horizon 2050 sous RCP8.5. Les auteurs substituent les valeurs actuelles des facteurs susceptibles d'être projetés par leurs valeurs prospectives, en conservant à l'identique les formules d'agrégation et les seuils de classification, puis comparent cartographiquement les deux configurations. Cette conservation des formules et des seuils garantit la comparabilité directe entre l'état de référence et l'état futur ce qui constitue une propriété déterminante pour une lecture spatialisée de l'évolution du risque.

La troisième famille mobilise des projections probabilistes propagées par simulation de Monte Carlo, permettant d'associer à chaque valeur d'indice un intervalle de confiance. Elle exige des distributions de probabilité documentées pour chaque facteur projeté constituant une condition rarement satisfaite dans les contextes africains où les séries longues font défaut.

Sur la base de la disponibilité des données et pour une meilleure contextualisation en ce qui concerne la zone d'étude ; l'approche de Furlan et al. (2021) s'est avérée être la plus appropriée pour le présent travail, avec sa compatibilité avec la structure à trois sous-indices hérités de Rocha et al. (2023) et de Verstraete (2025). De plus, pour le Golfe de Guinée, Dada et al. (2024) confirment que les projections médianes de l'IPCC AR6 (Fox-Kemper et al., 2021) sont applicables aux côtes d'Afrique de l'Ouest et centrale sans correction régionale significative autorisant leur mobilisation directe pour le littoral camerounais.

II.5 La base Global Coastal Characteristics (GCC)

La base de données GCC (Athanasίου et al., 2024) fournit plus de 80 indicateurs géophysiques, hydrodynamiques et socio-économiques sur des transects côtiers espacés d'environ 1 km à l'échelle mondiale. Elle est construite à partir de produits satellitaires et de réanalyses standardisés tels que *Global Tide and Surge Model (GTSMv3.0)*, ERA5, *European Space Agency (ESA) WorldCover*,

WorldPop. Cette base est librement accessible via Zenodo (DOI : 10.5281/zenodo.8200199). Verstraete (2025) a démontré son utilité pour une analyse côtière à l'échelle communale en Afrique de l'Ouest.

II.6 Les solutions fondées sur la nature

Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) sont définies par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN, 2020) comme des actions visant à protéger, restaurer ou gérer durablement les écosystèmes naturels pour relever des défis sociétaux. En contexte côtier, les mangroves réduisent l'énergie des vagues, stabilisent les sédiments et constituent une barrière contre l'érosion et la submersion (Alongi, 2015 ; Temmerman et al., 2013). Sur le littoral de Kribi, les mangroves étaient historiquement présentes dans les zones estuariennes. Il ressort des observations de terrain et des entretiens que leur superficie résiduelle n'excède pas 2 ha en 2024 dans la zone d'étude, soit une régression liée aux pressions anthropiques documentée par Mbevo Fendoung (2019) et Mbevo Fendoung et al. (2024).

Ce constat soulève une question centrale pour ce travail notamment de savoir dans quelle mesure la restauration de ces écosystèmes pourrait-elle contribuer à réduire le risque côtier dans les secteurs les plus exposés ? Cette question structure le volet consacré aux solutions fondées sur la nature (SfN) de l'analyse de scénarios prospectifs et les recommandations opérationnelles.

III. Matériels et méthodes

III.1 Zone d'étude

La zone d'étude correspond au littoral de Kribi, ville balnéaire de la région du Sud du Cameroun (lat. 2,35°–3,05° N ; lon. 9,82°–9,98° E), subdivisée en deux communes d'arrondissements soient Kribi 1er et Kribi 2ème, dans la région du Sud du Cameroun (lat. 2,35°–3,05° N ; lon. 9,82°–9,98° E) comme le présente la figure ci-dessous. La ville est située à environ 150 km au sud de Douala et s'étend sur 75 km de linéaire côtier. La côte est caractérisée par une grande diversité de configurations, à savoir des plages sableuses, des zones rocheuses, les embouchures du Lobé et de la Kienké, zones estuariennes et secteurs portuaires et industriels. Le port en eau profonde (inauguré en 2018), le terminal à Gas de la SNH et la Route Nationale 7 (Edéa-Kribi) constituent des enjeux économiques sans commune mesure avec les littoraux africains habituellement étudiés comme illustré dans la figure ci-dessous.

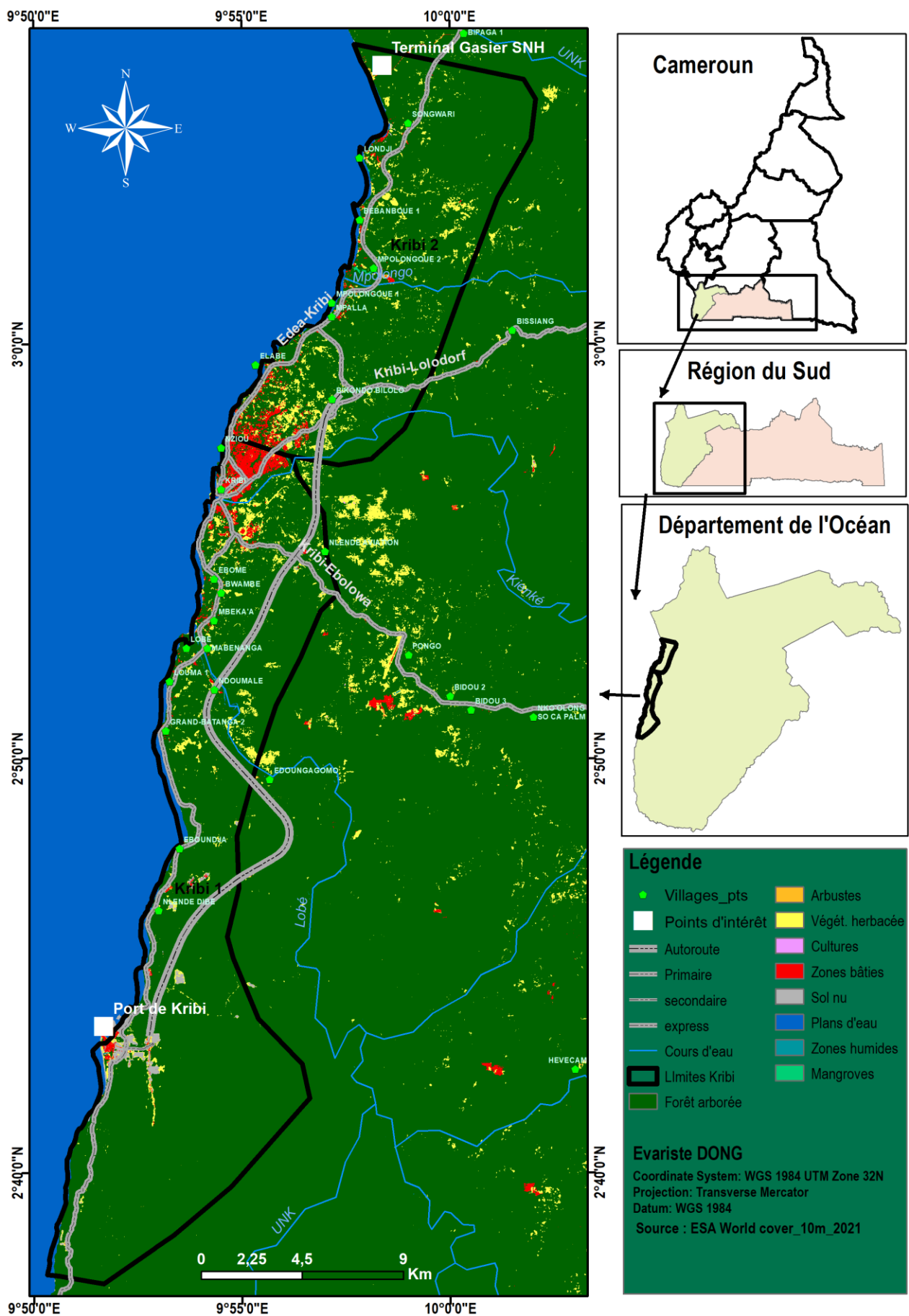


Figure 1 : Occupation du sol et localisation de la zone d'étude - littoral de Kribi (Kribi 1 et 2°, Cameroun Source : ESA World Cover_10m_2021

III.3 Matériel de travail et Méthodologie

III.3.1 Construction des facteurs

Pour la construction de notre indice, nous allons considérer 3 grande catégories de facteurs sur les 4 développées par Rocha et al. (2023), à savoir les forçages côtiers X ; les caractéristiques physiques Y ; les caractéristiques socio-économiques Z, le long du littoral Kribien (Verstraete, 2025). Certains sont extrait depuis le GCC développé par Athanasiou et al. (2024). Au terme de cette construction, le CRI de Kribi repose sur treize facteurs répartis en trois catégories, conformément à la structure proposée par Verstraete (2025). Sur cette base, l'on peut compter, quatre facteurs de forçage côtier (X1 tendance d'élévation du niveau marin, X2 marnage, X3 hauteur significative des vagues, X4 niveau marin extrême) ; cinq facteurs de susceptibilité physique (Y1 géomorphologie côtière, Y2 élévation de l'arrière-pays, Y3 pente de l'arrière-côte, Y4 largeur de plage, Y5a type de protection naturelle) et quatre facteurs de susceptibilité socio-économique (Z1 densité de population exposée sous 1 m d'altitude, Z2 distance aux bâtiments, Z3 distance au réseau routier, Z4 utilisation économique du sol). Neuf de ces facteurs proviennent directement de la base GCC, les quatre autres résultant d'un traitement propre à ce travail.

Il convient de préciser le rapport exact entre les deux cadres méthodologiques mobilisés. Rocha et al. (2023) ont proposé une architecture à quatre catégories, à savoir le Coastal Hazard Index pour les forçages côtiers, le Physical Susceptibility Index pour la susceptibilité physique, le Socioeconomic Susceptibility Index pour la susceptibilité socio-économique et l'Economic Damage Index pour les dommages économiques potentiels, ce dernier étant renseigné par des valeurs monétaires telles que la valeur du bâti, la valeur patrimoniale ou les revenus touristiques. Verstraete (2025) n'a pas repris cette architecture telle quelle. Il a conduit un développement méthodologique propre, dont trois inflexions doivent être signalées. Il a d'abord créé le terme de Coastal Forcing Index pour désigner les seuls forçages, là où Rocha et al. (2023) plaçaient ceux-ci sous le Coastal Hazard Index. Il a ensuite redéfini le Coastal Hazard Index comme combinaison des forçages et de la susceptibilité physique, et le Coastal Vulnerability Index comme combinaison des susceptibilités physique et socio-économique. Il a enfin supprimé l'Economic Damage Index en tant qu'indice indépendant, la dimension économique se trouvant approchée par la proximité des bâtiments, la proximité du réseau routier, la densité de population et l'usage économique du sol, puis a calculé directement le Coastal Risk Index à partir des trois indices restants. Le présent travail s'inscrit dans cette architecture à trois catégories, soit les forçages côtiers notés X, les caractéristiques physiques notées Y et les caractéristiques socio-économiques notées Z. Une différence doit toutefois être relevée quant au traitement des facteurs. Verstraete (2025) a écarté de ses analyses statistiques quatre facteurs présentant une variance nulle sur son linéaire, à savoir la tendance du niveau marin, l'amplitude des marées, la hauteur des vagues et la géomorphologie. Le contrôle conduit sur les 59 transects de Kribi a montré que ce constat ne se vérifie que partiellement. La tendance du niveau marin et l'amplitude des marées y présentent effectivement une variance nulle, chacune n'occupant qu'une seule classe sur l'ensemble du linéaire. La géomorphologie, en revanche, se répartit sur quatre classes et discrimine nettement, de sorte qu'elle a été conservée dans les analyses. Le cas de la hauteur des vagues appelle un traitement distinct, exposé en section III.3.8.

L'exploitation du GCC le long du littoral kribien, a permis d'extraire 59 points de la base établis sur un linéaire côtiers de prêt de 75 km, numérotés de 1 à 59 du Nord vers le Sud (champ point_id), et enrichis des facteurs complémentaires.

Tableau 1 : Construction des treize facteurs du CRI de Kribi des 3 catégories (forçages côtiers X ; caractéristiques physiques Y ; caractéristiques socio-économiques Z) : sources mobilisées et

traitements appliqués. Source : auteur, d'après Athanasiou et al. (2024b) pour les champs GCC et Verstraete (2025) pour les conventions de calcul

Code	Facteur	Source / champ mobilisé	Traitement et observations
X1	Tendance d'élévation du niveau marin	SLA CMEMS — 384 valeurs mensuelles (1993–2024), 4 pixels couvrant Kribi	Régression linéaire. Valeur constante de 3,28 mm/an attribuée à l'ensemble des transects, la résolution de 0,125° ne permettant aucune différenciation locale
X2	Marnage	Champs GCC (MHHW, MLLW)	Calculé comme MHHW – MLLW
X3	Hauteur significative des vagues	Champ sw_h_p50 (GCC), réanalyses ERA5 (1979–2019)	Trois valeurs distinctes seulement sur les 75 km de linéaire : la résolution de 0,125° dépasse largement l'échelle du littoral étudié
X4	Niveau marin extrême	Modèle GTSMv3.0 via GCC	Niveau total de l'eau pour une période de retour de dix ans (TWL RP10), en mètres au-dessus du niveau moyen de la mer
Y1	Géomorphologie côtière	Classification des environnements sédimentaires côtiers (Hulskamp et al., 2023) intégrée à la GCC	Cinq modalités présentes sur le littoral de Kribi : Rocky, Vegetated, Sandy, Muddy et Other
Y2	Élévation de l'arrière-pays	Champ he (DeltaDTM)	Altitude du premier pic côtier terrestre. Classification inversée : une élévation forte correspond à un risque faible
Y3	Pente de l'arrière-côte	$bs_deltadtm \times 100$ (%)	DeltaDTM préféré au CopDEM (MAE 0,45 m contre 0,72 m). Valeur atypique de 155,62 % conservée : escarpement rocheux confirmé par l'extraction_flag
Y4	Largeur de plage	Champs GCC	$x_peak_first_deltadtm - x_shoreline$ (m)
Y5a	Protection naturelle	Champ lu_peak_first_deltadtm (GCC)	L'échantillonnage ESA WorldCover au centroïde GCC produisait 51 % de valeurs « eau » (centroïdes en zone intertidale). Le champ GCC, qui renseigne l'occupation du sol au premier pic côtier terrestre, fut préféré
Z1	Densité de population exposée	$pop_1_m / 4$ (hab/km ²)	Zone tampon de 4 km ² (Verstraete, 2025, p. 40). Valeur maximale à Kribi : 81 hab/km ² ; seuils adaptés en conséquence
Z2	Distance aux bâtiments	Couche OSM bâtiments	Outil Distance au plus proche centre (QGIS) après filtrage sur l'emprise des communes par Sélectionner par localisation. Champ hubdist récupéré directement
Z3	Distance au réseau routier	Couche OSM routes	Même procédure que Z2
Z4	Utilisation économique du sol	Champ lu_peak_max_1km_deltadtm (initialisation)	Classification manuelle point par point via Google Earth Pro et informations de la Mairie de Kribi

III.3.2 Sources des données

Les données mobilisées sont issues de cinq sources principales, toutes libres d'accès.

- **Base GCC** (Athanasiou et al., 2024b) : source centrale, fournissant 9 des 13 facteurs. Téléchargée via Zenodo (DOI : 10.5281/zenodo.8200199) sous forme de trois fichiers CSV (geophysical, hydrometeorological, socioeconomic).
- **CMEMS** (produit SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047, 1993–2024) : anomalies mensuelles du niveau de la mer pour X1. Résolution 0,125°.
- **ESA WorldCover 2021** (v200, 10 m) : occupation du sol pour Y5a et initialisation de Z4.
- **OpenStreetMap via Geofabrik Cameroun** : couches bâtiments et routes pour Z2 et Z3.

- **Entretiens institutionnels** : fournissant des informations qualitatives pour la correction manuelle de Z4 et la validation des résultats.
- **Google Earth** : images satellitaires
- **Diva GIS** : plateforme web permettant d’acquérir les données géographiques des pays sur la plan administratif, infrastructure, géophysique etc.

Tableau 2 : Inventaire des données mobilisées pour le CRI de Kribi pour contraindre les différents facteurs du CRI. Terminologie des facteurs suivant Verstraete (2025).

Source	Facteurs	Résolution	Période
GCC / Athanasiou et al. (2024b)	X2, X3, X4, Y1, Y2, Y3, Y4, Y5a, Z1	~1 km (transects)	1979–2019 selon produit
CMEMS SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047	X1	0,125°	1993–2024
ESA WorldCover 2021	Y5a (complément), Z4 (base)	10 m	2021
OpenStreetMap / Geofabrik	Z2, Z3	Variable	2024
Entretiens Mairie de Kribi	Z4 (correction manuelle)	Qualitatif	2024

III.3.3 Classification des facteurs

Chaque facteur fut reclassé sur une échelle de 1 (Très faible) à 5 (Très élevé) par la méthode de ruptures naturelles de Jenks, appliquée dans QGIS (Symbologie → Gradué → Jenks → 5 classes). Les seuils furent ajustés au regard de la distribution réelle des données de Kribi, en cohérence avec la littérature régionale (Verstraete, 2025 ; Sakho et al., 2022 ; Dada et al., 2024).

Tableau 3 : Catégorisation des forçages côtiers (X) pour le calcul de l’indice CFI ou Coastal Forcing Index. Inspiré de Verstraete (2025). Sources : CMEMS (X1) ; GCC/GTSMv3.0 (X2, X4) ; GCC/ERA5 (X3).

Catégorie	Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Forçages côtiers (CFI)	X ₁	Tendance d’élévation du niveau marin (mm/an)	< 1,8	1,8 – 2,5	2,5 – 3,0 *	3,0 – 3,4	> 3,4
	X ₂	Amplitude des marées — marnage (m)	> 6	6 – 4 *	4 – 2	2 – 1	< 1
	X ₃	Hauteur significative des vagues (m)	< 0,55	0,55 – 0,85 *	0,85 – 1,05 *	1,05 – 1,25	> 1,25
	X ₄	Niveau marin extrême TWL RP10 (m/MSL)	1,150 – 1,165	1,165 – 1,189	1,189 – 1,215	1,215 – 1,239	1,239 – 1,264

* Classe unique assignée en raison de la faible variance spatiale sur le littoral de Kribi.

Tableau 4: Catégorisation des caractéristiques physiques du littoral (Y) pour le calcul de l'indice PSI ou Physical Susceptibility Index. Sources : GCC/DeltaDTM (Y2, Y3, Y4) ; GCC/ESA WorldCover (Y5a) ; Hulskamp et al. (2023) pour Y1.

Catégorie	Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Caract. physiques (PSI)	Y ₁	Géomorphologie côtière	Rocky	Vegetated	Sandy / Other	—	Muddy
	Y ₂	Élévation de l'arrière-pays (m/MSL) †	> 54,68	37,74 – 54,68	24,42 – 37,74	14,34 – 24,42	< 14,34
	Y ₃	Pente de l'arrière-côte (%) †	> 100,55	56,40 – 100,55	27,32 – 56,40	11,63 – 27,32	< 11,63
	Y ₄	Largeur de plage (m)	> 174,0	124,5 – 174,0	87,5 – 124,5	49,8 – 87,5	< 49,8
	Y _{5a}	Type de protection naturelle	Mangroves	Trees	Grassland	Built-up	Barren / Open water

† Classification inversée : valeur élevée = risque faible (côte haute, pente forte, plage large).

Tableau 5 : Catégorisation des caractéristiques socio-économiques du littoral (Z) pour le calcul de d'indice SSI ou Socioeconomic Susceptibility Index.

Catégorie	Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Caract. socio-écon. (SSI)	Z ₁	Densité de population exposée sous 1 m (hab/km ²)	0	0 – 10	10 – 30	30 – 60	> 60
	Z ₂	Distance aux bâtiments (m)	> 730,8	438,4 – 730,8	229,7 – 438,4	100,7 – 229,7	< 100,7
	Z ₃	Distance au réseau routier (m)	> 574,5	315,6 – 574,5	194,5 – 315,6	83,5 – 194,5	< 83,5
	Z ₄	Utilisation économique du sol	Végétation naturelle	Écosystèmes côtiers	Activités primaires	Infrastructures économiques	Infrastructures stratégiques

III.3.4 Calcul des indices

Les six indices ont été calculés dans la calculatrice de champs QGIS selon les formules suivantes et conformément à Rocha et al. (2023) et Verstraete (2025). Le calcul de la moyenne arithmétique a permis d'agréger les facteurs constitutifs des indices de niveau 1 (X pour Coastal Forcing Index où CFI, Y pour le PSI ou Physical Susceptibility Index, Z pour le SSI ou Socioeconomic Susceptibility Index) permettant de limiter l'influence excessive d'un facteur isolé. La moyenne géométrique a été appliquée aux indices de niveau 2 (Coastal Hazard Index (CHI) et Coastal Vulnerability Index (CVI)) et à l'indice global (Coastal Risk Index (CRI)) en cohérence avec la théorie du risque selon laquelle le risque résulte du produit de ses composantes (Alcántara-Carrió et al., 2024).

$$CFI = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4) / 4 \quad (\text{Éq. 1})$$

$$PSI = (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_{5a}) / 5 \quad (\text{Éq. 2})$$

$$SSI = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) / 4 \quad (\text{Éq. 3})$$

$$CHI = \sqrt{(CFI \times PSI)} \quad (\text{Éq. 4})$$

$$CVI = \sqrt{(PSI \times SSI)} \quad (\text{Éq. 5})$$

$$CRI = \sqrt[3]{(CFI \times PSI \times SSI)} \quad (\text{Éq. 6})$$

Conformément à la méthodologie de Verstraete (2025), aucune pondération différenciée n'a été appliquée entre les facteurs, par mesure de prudence en l'absence de données de validation terrain permettant un calibrage objectif.

Cette convention s'applique à l'ensemble du travail, en cohérence avec la démarche de Verstraete (2025). Les treize facteurs X (Table 3), Y (Table 4), Z (Table 5) sont exprimés en valeurs entières de 1 à 5, issues de la classification par ruptures naturelles de Jenks décrite en III.3.2. Les six indices qui en dérivent soient CFI, PSI, SSI, CHI, CVI et CRI sont en revanche des valeurs décimales, puisqu'ils résultent de moyennes arithmétiques et géométriques de ces classes. Cette distinction vaut pour la configuration de référence comme pour les configurations prospectives et les scénarios de solutions fondées sur la nature : dans tous les cas, seuls les facteurs sont reclassifiés, les indices conservant leur précision décimale.

III.3.5 Validation des facteurs et contribution des acteurs locaux

Dans le cadre d'une collecte des données de terrain, des entretiens et des observations visuelles ont été mobilisés pour compléter ou valider certaines informations ; une démarche de validation a été conduite en parallèle du traitement SIG. Elle porta sur deux volets.

Le premier volet concerna la correction manuelle du facteur Z4 (Utilisation économique du sol). Chaque transect a donc été réexaminé point par point sous Google Earth Pro, puis la classe attribuée a été soumise aux services techniques de la Mairie de Kribi lors des entretiens institutionnels.

Le second volet a porté sur la validation qualitative des résultats. Les secteurs identifiés comme les plus à risque par le calcul ont été confrontés à la perception des gestionnaires locaux, afin d'apprécier la convergence entre le diagnostic quantitatif et l'expérience de terrain.

Les entretiens ont été conduits de façon semi-directive auprès des acteurs institutionnels de Kribi et analysés par approche thématique (Braun et Clarke, 2006). Les guides d'entretien figurent en Annexe A.

La campagne d'entretien a été conduite auprès de cinq institutions du département de l'Océan, à savoir le Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable (MINEPDED), où deux responsables ont été rencontrés, le MINFOF (Ministère des Forêts et de la Faune), le Ministère des Transports (MINT) à travers son service de météorologie, le Ministère de l'Habitat et du Développement Urbain (MINH DU) et la Communauté Urbaine de Kribi (CUK). Six entretiens semi-directifs ont ainsi été menés sur la base des guides Q1 à Q6 reproduits en Annexe A, chacun ouvert par un rappel de l'objet de la recherche et par le recueil du consentement de l'interlocuteur.

Les échanges ont été consignés sur les fiches de synthèse figurant, puis dépouillés par approche thématique selon les quatre axes du guide, soit la perception des secteurs sensibles, les données et documents disponibles, les enjeux jugés prioritaires et les attentes formulées à l'égard du travail. Les guides Q7 et Q8, destinés aux organisations non gouvernementales et aux chercheurs universitaires, n'ont pas reçu de réponse dans les délais du stage, de même que le questionnaire adressé au Port Autonome de Kribi. Cette limite est reprise au chapitre V.

Il convient de préciser le périmètre de la démarche de terrain. Le séjour conduit à Kribi a été consacré aux acteurs institutionnels, ce choix découlant de l'échelle d'analyse retenue, à savoir celle des cinquante-neuf transects du littoral et non celle du quartier ou du campement. Les populations

riveraines n'ont dès lors pas été consultées. Cette orientation constitue une limite pour la compréhension des pratiques sur le terrain, mais elle se trouve en partie compensée par les inventaires nationaux, lesquels documentent les causes de la disparition des mangroves à l'échelle de la zone Kribi-Campo.

III.3.6 Dimension prospective

III.3.6.1 Cadre conceptuel et approche retenue

Conformément à la section II développé plus haut, l'approche prospective développée par Furlan et al. (2021), a été retenue dans le cadre de ce travail. Elle substitue aux valeurs actuelles des facteurs projetables en leurs valeurs prospectives tout en conservant à l'identique les formules d'agrégation et les seuils de classification.

Trois horizons ont été retenus soient 2030, 2050 et 2100, en cohérence avec les échéances de planification climatique internationale (IPCC, 2021 ; UNDRR, 2017) et les pratiques de la littérature ouest-africaine (Dada et al., 2024), croisés avec trois trajectoires d'émissions : SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5.

III.3.6.2 Facteurs projetés, règles et sources

Sur la base de sources quantitatives vérifiables comme le présente le tableau ci-après, cinq facteurs sur treize ont été modifiés tout en maintenant les autres constant.

Tableau 6 : Règles de projection des cinq facteurs modifiés et sources mobilisées.

Facteur	Règle prospective appliquée	Source
X1	Taux moyen d'élévation = SLR (mm) / (horizon – 1995), soit 2,57 à 2,86 mm/an à 2030 (classe 3) et 3,45 à 7,33 mm/an à 2050 et 2100 (classe 5). Valeur uniforme sur les 59 transects, la résolution CMEMS ne permettant aucune différenciation locale	Fox-Kemper et al. (2021)
X4	TWL_futur = TWL_actuel + SLR médian, puis classification selon les cinq seuils Jenks de référence	Fox-Kemper et al. (2021) ; Vousdoukas et al. (2018)
Y4	Largeur × facteur de réduction : ×1,00 à 2030 (effet érosif négligeable sur six ans), ×0,60 à 2050, ×0,50 à 2100 pour SSP1-2.6 et SSP2-4.5, ×0,30 pour SSP5-8.5	Vousdoukas et al. (2020) ; validation locale par Mbevo Fendoung (2019),
Z1	Densité × facteur multiplicateur : ×1,12 à 2030, ×1,63 à 2050, ×3,00 à 2100, dérivés du taux de croissance de 1,9 %/an du Département de l'Océan (2005–2018)	INS Cameroun (2021) ; UN DESA (2022) pour l'hypothèse de ralentissement
Z4	Glissement de +1 classe pour les transects en classes 2, 3 et 4, à l'horizon 2100 uniquement : au taux d'expansion de 0,84 %/an sur 100 ha par transect, le seuil de dominance de 50 ha n'est franchi qu'au terme de soixante ans	Mbevo Fendoung (2019); Fongnzossie Fedoung et al. (2018)

III.3.6.3 Formules de recalcul

Pour chaque configuration, les sous-indices et l'indice global furent recalculés selon les formules de la configuration de référence, en substituant aux facteurs concernés leurs valeurs prospectives :

$$CFI_{prosp} = (X1_{prosp} + X2 + X3 + X4_{prosp}) / 4 \quad (\text{Éq. 13})$$

$$PSI_{prosp} = (Y1 + Y2 + Y3 + Y4_{prosp} + Y5a) / 5 \quad (\text{Éq. 14})$$

$$SSI_{prosp} = (Z1_{prosp} + Z2 + Z3 + Z4_{prosp}) / 4 \quad (\text{Éq. 15})$$

$$CRI_{prosp} = \sqrt[3]{(CFI_{prosp} \times PSI_{prosp} \times SSI_{prosp})} \quad (\text{Éq. 16})$$

III.3.6.4 Choix des horizons et scénarios prospectifs

Comme l'a illustré le tableau ci-dessus, tous les facteurs ne peuvent être discriminés selon les neuf scénarios prospectifs RCP de l'IPCC. **Deux conséquences en découlent.** Les configurations retenues ont été ramenées à trois années dont 2030, 2050 et 2100 ; chacune représentant l'ensemble des trajectoires à l'horizon considéré. Cela illustre une limite structurelle des indices composites ordinaux, déjà relevée par López Royo et al. (2016) pour qui dès lors que les facteurs sont ramenés à un petit nombre de classes discrètes, seules les variations franchissant un seuil produisent un effet mesurable. Cette limite est discutée au chapitre V.

III.3.7 Scénarios SfN (Solutions fondées sur la Nature)

III.3.7.1 Cadre conceptuel et horizon retenu

Les Solutions fondées sur la Nature désignent, au sens de l'UICN (2020), des actions visant à protéger, restaurer ou gérer durablement les écosystèmes naturels pour relever des défis sociétaux. En contexte côtier, elles recouvrent les interventions sur les mangroves, les forêts littorales et la végétation pionnière destinées à renforcer leur capacité protectrice face à l'élévation du niveau de la mer et à l'érosion.

Il ressort de la littérature que les mangroves réduisent les dommages annuels liés aux inondations côtières à hauteur de 65 milliards USD à l'échelle mondiale et préviennent l'inondation de quinze millions de personnes chaque année (Menéndez et al., 2020). Leur efficacité repose directement sur la largeur, la structure et la densité du couvert. Temmerman et al. (2013) établissent par ailleurs que la protection assurée par ces écosystèmes peut se substituer avantageusement aux infrastructures grises dans de nombreux contextes tropicaux, à condition que l'intégrité du couvert soit maintenue.

La dimension SfN dans ce cadre de ce travail, a été structurée autour de deux trajectoires contrastées soit la dégradation (S1) et la restauration (S2) évaluées à l'horizon 2050, la configuration actuelle tenant lieu de scénario de maintien (S0). Le choix de cet horizon procède de deux considérations. La première étant que les écosystèmes restaurés ne produisent leurs effets protecteurs complets qu'au terme d'un certain nombre d'années, ce qui peut plus ou moins exclure l'horizon 2030. L'horizon 2050 constitue ainsi la fenêtre où les SfN sont matures tout en demeurant efficaces.

III.3.7.2 Périmètre d'application et exclusions

Les scénarios SfN n'agissent que sur les facteurs de susceptibilité physique tels que Y1 (géomorphologie), Y4 (largeur de la zone tampon) et Y5a (protection naturelle). Les facteurs de forçage et de vulnérabilité socio-économique sont de ce fait maintenus constants, pour deux raisons distinctes.

Les forçages ne sont pas affectés car le SLR, le marnage et les vagues relèvent de processus océaniques et atmosphériques indépendants de la végétation littorale ; pour autant que l'on sache, il n'existe pas un effet des mangroves sur le niveau marin régional ou sur les niveaux extrêmes de TWL aux horizons considérés.

Les facteurs socio-économiques quant à eux, peuvent l'être sont indirectement, mais de façon non mesurable par l'indice. Si la restauration réduit l'exposition effective des populations aux inondations (Menéndez et al., 2020), les facteurs Z du CRI mesurent des caractéristiques structurelles non un niveau d'exposition réel. Cette limite est discutée au chapitre V.

III.3.7.3 Règles de modification

Les deux scénarios sont définis selon une logique de contraste maximal, de manière à encadrer la plage des futurs possibles. S1 traduit la poursuite et l'accélération de la dégradation observée sur le littoral de Kribi, tandis que S2 traduit une restauration volontariste des écosystèmes littoraux.

Tableau 7 : Règles de modification des trois facteurs de susceptibilité physique dans les scénarios SfN, évalués à l'horizon 2050. Source : auteur, d'après Temmerman et al. (2013), Menéndez et al. (2020), Mbevo Fendoung (2019), Fongnzossi Fedoung et al. (2018).

Facteur	S1 — Dégradation	S2 — Restauration	Transects modifiés
Y1	Tous les substrats régressent vers l'état vaseux non protégé (classe 4)	Les substrats Other, Sandy et Muddy sont colonisés par une végétation reconstituée (classe 2)	39 en S1 ; 30 en S2
Y4	La zone tampon devient quasi inexistante (classe 5)	Les largeurs réduites des classes 3, 4 et 5 retrouvent une valeur protectrice (classe 2)	36 en S1 ; 45 en S2
Y5a	La protection naturelle est réduite à néant (classe 5)	Les classes dégradées 3, 4 et 5 retrouvent un couvert arboré dense (classe 2)	44 en S1 ; 23 en S2

III.3.7.4 Formules de calcul et articulation avec la prospective climatique

Le PSI a été recalculé pour chaque scénario en substituant aux valeurs de référence de Y1, Y4 et Y5a leurs valeurs SfN, Y2 et Y3 demeurant constants. Le CRI en découle par la formule de la configuration de référence :

$$\begin{aligned} PSI_{S1} &= (Y1_{S1} + Y2 + Y3 + Y4_{S1} + Y5a_{S1}) / 5 \\ PSI_{S2} &= (Y1_{S2} + Y2 + Y3 + Y4_{S2} + Y5a_{S2}) / 5 \end{aligned} \quad (\text{Éq. 17})$$

$$\begin{aligned} CRI_{S1} &= \sqrt[3]{CFI_{ref} \times PSI_{S1} \times SSI_{ref}} \\ CRI_{S2} &= \sqrt[3]{CFI_{ref} \times PSI_{S2} \times SSI_{ref}} \end{aligned} \quad (\text{Éq. 18})$$

Afin d'explorer la capacité des SfN à atténuer localement la hausse du risque, les deux scénarios ont également été combinés aux sous-indices prospectifs de l'horizon 2050 établis dans la section III.3.5:

$$\begin{aligned} CRI_{S1_2050} &= \sqrt[3]{CFI_{2050} \times PSI_{S1} \times SSI_{2050}} \\ CRI_{S2_2050} &= \sqrt[3]{CFI_{2050} \times PSI_{S2} \times SSI_{2050}} \end{aligned} \quad (\text{Éq. 19})$$

III.3.8 Outils et analyse des données

Sélection des facteurs soumis aux analyses exploratoires. Les analyses statistiques exploratoires n'ont pas porté sur les treize facteurs de l'indice mais sur dix d'entre eux, trois ayant été écartés pour des motifs qu'il convient d'explicitier. La tendance de l'élévation du niveau marin et l'amplitude des marées présentent une variance strictement nulle sur les 59 transects, chacune n'occupant qu'une seule classe sur les cinq possibles. Leur maintien n'aurait apporté aucune information discriminante et aurait faussé la standardisation préalable à l'analyse en composantes principales. Ce constat rejoint celui établi par Verstraete (2025) sur le littoral de Kafountine, où ces mêmes facteurs avaient été retirés pour la même raison. Le troisième facteur écarté, à savoir la hauteur significative des vagues, appelle une justification différente puisque sa variance n'est pas nulle. Elle demeure toutefois d'un ordre de grandeur inférieur à celle de tous les facteurs retenus, et surtout ce facteur ne se répartit que sur deux classes lorsque chacun des dix facteurs conservés en occupe au moins quatre. Sa classe majoritaire regroupe par ailleurs 74,6 % des transects, concentration la plus élevée de l'ensemble. Ces trois caractéristiques cumulées, à savoir une variance faible, un nombre de classes réduit de moitié et une forte concentration, ont conduit à l'écarter des analyses exploratoires tout en le conservant dans le calcul de l'indice de forçage côtier, où il contribue à la moyenne au même titre que les autres.

Tableau 8 : Pouvoir discriminant des treize facteurs du CRI de Kribi et justification des exclusions. Les facteurs sont ordonnés par variance croissante des classes attribuées. Source : calculs auteur sur les 59 transects

Facteur	Variance	Classes occupées	Classe majoritaire	Statut
X1 — Tendance du niveau marin	0,000	1 sur 5	100,0 %	Écarté, variance nulle
X2 — Amplitude des marées	0,000	1 sur 5	100,0 %	Écarté, variance nulle
X3 — Hauteur des vagues	0,193	2 sur 5	74,6 %	Écarté, pouvoir discriminant insuffisant
Y3 — Pente de l'arrière-côte	0,702	5 sur 5	67,8 %	Retenu
Z3 — Distance au réseau routier	0,854	4 sur 5	35,6 %	Retenu
Y1 — Géomorphologie	0,864	4 sur 5	45,8 %	Retenu
Les sept autres facteurs	1,165 à 2,072	4 ou 5 sur 5	27,1 à 59,3 %	Retenus

Il ressort de ce classement que la coupure entre les facteurs écartés et les facteurs retenus ne procède pas d'un seuil arbitraire. La hauteur des vagues se distingue du facteur retenu le plus faible, à savoir la pente de l'arrière-côte, par une variance plus de trois fois inférieure et par un nombre de classes occupées réduit de plus de moitié. Force est de constater qu'aucun autre facteur ne présente cette configuration, ce qui confère à la sélection retenue une cohérence interne vérifiable.

Plusieurs outils ont été mobilisés dans le cadre de ce travail ; le traitement SIG d'une part a été réalisé sous QGIS 3.x et ArcGIS ; tandis que d'autre part, les analyses statistiques (les statistiques descriptives, matrice de corrélation, corrélogramme de Spearman) ont été conduites avec l'aide du logiciel R. Les entretiens institutionnels ont quant à eux été conduits de façon semi-directive et analysés par approche thématique (Braun et Clarke, 2006).

III.3.9 Analyse exploratoire des relations entre facteurs

Afin d'explorer les relations structurelles entre les facteurs constitutifs du CRI et d'identifier des profils spatiaux de risque, une analyse exploratoire en trois étapes successives a été conduite à travers notamment la corrélation de Spearman, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la classification par K-means. Ces analyses furent réalisées dans l'environnement statistique R (version 4.5.2). Trois facteurs furent exclus de l'analyse exploratoire en raison de leur variance spatiale insuffisante soient le X1 (valeur constante sur l'ensemble des transects), le X2 (classe unique sur tout le littoral) et le X3 (seulement deux classes effectives dues à la résolution grossière du produit ERA5). Toutefois, les neuf autres facteurs retenus X4, Y1, Y2, Y3, Y4, Y5a, Z1, Z2, Z3 et Z4, ont été traités conformément à la démarche adoptée par Verstraete (2025) pour Kafountine.

III.3.9.1 Corrélation de Spearman

La corrélation de Spearman a été retenue pour l'analyse des relations entre facteurs. Ce choix se justifie par la nature ordinale des variables analysées notamment des scores de 1 à 5 issus de la classification Jenks pour lesquelles la corrélation de Pearson, qui suppose la normalité et la continuité des distributions, n'est pas appropriée. La corrélation de Spearman, qui opère sur les rangs des observations, est en outre robuste face aux valeurs extrêmes et aux distributions asymétriques (Verstraete, 2025).

III.3.9.2 Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP a été appliquée aux neuf facteurs retenus, préalablement standardisés (moyenne = 0, écart-type = 1). Cette standardisation est indispensable lorsque les variables présentent des amplitudes de variation différentes ce qui est le cas des facteurs classifiés du CRI dont les distributions Jenks ne

sont pas identiques d'un facteur à l'autre afin d'éviter que les facteurs à forte variance ne dominent artificiellement l'analyse.

III.3.9.3 Classification K-means

La classification non supervisée par K-means a été appliquée aux coordonnées des 59 transects dans le plan des deux premières dimensions de l'ACP, conformément à la démarche de Verstraete (2025) pour Kafountine. Cette approche en deux temps soit la réduction de dimension par ACP, puis la classification dans le plan factoriel permet de s'affranchir du bruit lié aux dimensions de faible variance et d'obtenir des groupes plus stables que sur les données brutes.

III.3.10 Cartographie des résultats

La cartographie a porté sur les trois niveaux d'agrégation, à savoir les facteurs initiaux, les indices intermédiaires et l'indice global, ce qui permet de mettre en évidence les écarts entre niveaux et d'éclairer les dynamiques locales, un facteur élevé n'entraînant pas nécessairement un risque global important (Rocha et al., 2023).

Tous les niveaux d'agrégation ont été cartographiés ; des facteurs initiaux, aux indices intermédiaires et indice global. Cette approche permet la mise en évidence des écarts entre niveaux, ce qui éclaire les dynamiques locales qui malgré le fait qu'elles constituent un facteur élevé, n'entraîne pas nécessairement un risque global important (Rocha et al., 2023). Afin d'améliorer la lisibilité cartographique, la position des centroïdes de la base GCC a été légèrement ajustée par rapport à leur localisation réelle. Ces points furent décalés vers l'ouest d'environ 1 km, de manière à suivre le trait de côte plutôt qu'à le chevaucher car les centroïdes GCC se situent généralement en zone intertidale. Lorsque plusieurs facteurs ou indices sont représentés simultanément sur un même document, chaque série de points est successivement décalée par incréments à la ligne la plus à l'est soit la plus proche du trait de côte. Cette ajustement, repris de Verstraete (2025), permet de représenter les treize facteurs ou les six indices sur une planche unique sans chevauchement des entités.

Les coordonnées sont exprimées dans le système de référence WGS 84 / UTM Zone 32N (EPSG :32632), adapté à la longitude du littoral camerounais.

La symbologie retenue pour la cartographie des facteurs découle directement de la méthode de classification décrite en III.3.2. Les valeurs oscillant entre 1 et 5 conformément aux classes définies, l'échelle de couleurs est discrétisée en cinq niveaux et reprend les couleurs déjà employées dans les tableaux de classification (Tableaux 1, 2 et 3). Cette palette respecte les conventions de la symbologie cartographique du risque : le vert foncé traduit les valeurs très faibles, le rouge les valeurs très élevées comme le présente la figure ci-dessous.

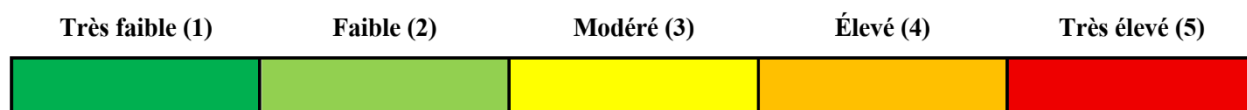


Figure 2 : Échelle de couleurs discrétisée utilisée pour la cartographie des treize facteurs du CRI de Kribi. Source : Verstraete (2025).

La symbologie des indices découle des méthodes d'agrégation retenues. Conformément à la convention posée en III.3.3, les indices prennent des valeurs décimales puisqu'ils résultent de moyennes arithmétiques et géométriques de classes entières. L'échelle de couleurs est donc continue, bornée entre 1 et 5 conservant les mêmes couleurs que celles de l'échelle des facteurs appliquées aux valeurs entières, tandis que les valeurs décimales intermédiaires sont représentées par interpolation entre les deux couleurs qui les encadrent comme l'illustre la figure ci-après.

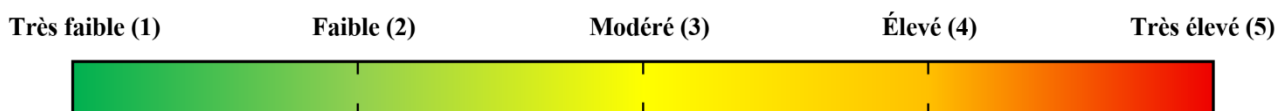


Figure 3 : Échelle de couleurs continue utilisée pour la cartographie des six indices du CRI de Kribi. Source : Verstraete (2025).

Les clusters issus de la classification K-means ont quant à eux été représentés selon le même formatage que les points de facteurs et d'indices avec des symboles proportionnels, contour noir, diamètre augmenté à l'exception de la palette des couleurs qui sont distinctes et non ordonnées ayant été retenues afin de marquer qu'il s'agit d'une typologie et non d'une gradation de risque.

IV. Résultats

Le présent chapitre expose les résultats du calcul de l'indice de risque côtier sur les 59 transects du littoral de Kribi présenté et numéroté en figure 16. Pour se faire, il procède du particulier au général avec une analyse des treize facteurs regroupés par catégorie (IV.1 à IV.3) ; une agrégation en indices intermédiaires puis en indice global (IV.4 et IV.5) ; par la suite avec une exploration statistique des relations entre facteurs (IV.6) ; et enfin avec des configurations prospectives (IV.7) et des scénarios de solutions fondées sur la nature (IV.8). Conformément à l'approche présentée en section III.3.3 du présent document, les facteurs sont exprimés en classes entières de 1 à 5 et les indices en valeurs décimales sur cette même échelle. Toute interprétation causale est réservée au chapitre V.

Pour une meilleure compréhension des éléments traités dans ce chapitre, il convient de préciser la portée statistique de ces résultats. L'ensemble des valeurs présentées porte sur la totalité de la population étudiée, c'est-à-dire les 59 transects du littoral des deux communes de Kribi et non sur un échantillon. Les valeurs brutes et classifiées de chacun de ces transects sont reportées en Annexe B. Les statistiques descriptives ne sont donc assorties d'aucun intervalle de confiance, et les comparaisons entre secteurs ou entre configurations ne relèvent pas de l'inférence mais du constat. Cette précision importe pour la lecture des écarts qui peuvent décrire une différence réelle et intégralement observée, non une estimation.

IV.1 Les facteurs de forçage côtier

Les quatre facteurs de forçage partagent leur très faible variance spatiale. La tendance d'élévation du niveau marin (X1), extraite par régression linéaire sur les 384 valeurs mensuelles de SLA CMEMS entre 1993 et 2024, s'établit à 3,28 mm/an et a été attribuée uniformément aux 59 transects avec une résolution de 0,125°, soit environ quatorze kilomètres, ne permettant aucune différenciation sur 75 km de linéaire. Le marnage (X2), calculé comme la différence entre le *Mean Higher High Water* (MHHW) et le *Mean Lower Low Water* (MLLW), relève de la classe Faible pour la totalité des transects, avec une amplitude moyenne de 1,52 m caractéristique d'un régime microtidal. La hauteur significative des vagues (X3) ne restitue que trois valeurs distinctes, 53 transects (89,8 %) relevant de la classe Modéré.

Seul le niveau marin extrême (X4) introduit une différenciation réelle. Extrait du modèle GTSMv3.0 pour une période de retour de dix ans, il varie de 1,150 à 1,264 m au-dessus du niveau moyen et se répartit sur les cinq classes. Il en ressort que les valeurs les plus élevées se concentrent dans le secteur nord, là où la morphologie côtière amplifie les effets des niveaux marins extrêmes.

Tableau 9 : Fréquence des classes des quatre facteurs de forçage côtier. 59 transects, littoral de Kribi, 2024.

Facteur	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
X1 — Tendance SLR	—	—	59 (100 %)	—	—
X2 — Marnage	—	59 (100 %)	—	—	—
X3 — Hauteur des vagues	—	6 (10,2 %)	53 (89,8 %)	—	—
X4 — Niveau marin extrême	8 (13,6 %)	20 (33,9 %)	12 (20,3 %)	13 (22,0 %)	6 (10,2 %)

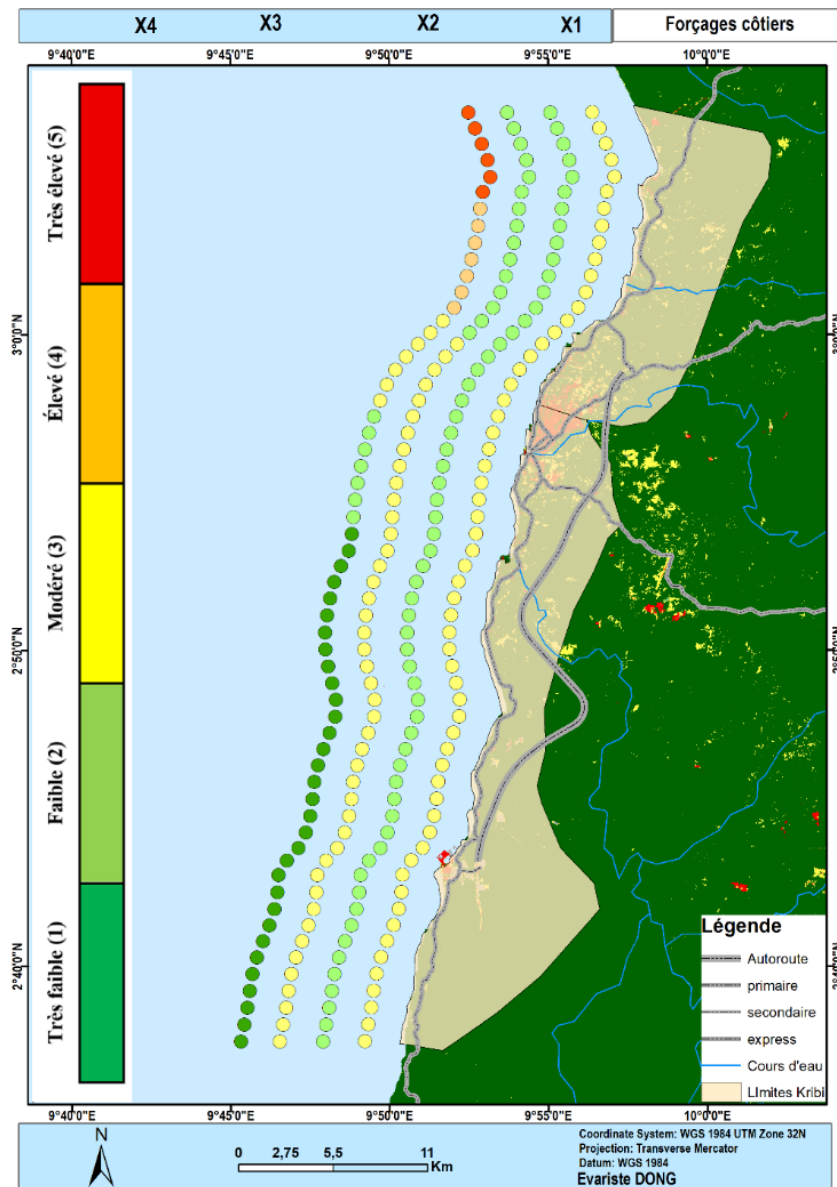


Figure 4 : Carte des facteurs de forçages côtiers (X). Source : GCC

Il convient de préciser la portée de cette homogénéité. Le facteur X1 a été calculé par régression linéaire sur les quatre pixels CMEMS couvrant l'emprise de Kribi, dont les pentes individuelles s'échelonnent de 3,19 à 3,37 mm/an soit un écart de 0,18 mm/an très inférieur à la largeur des classes de la classification. L'attribution d'une valeur unique aux 59 transects ne procède donc pas d'une simplification arbitraire mais d'un constat métrologique relevant que la variabilité intra-zone du produit altimétrique est inférieure à sa résolution utile.

Le même raisonnement vaut pour le marnage. Les valeurs de MHHW et MLLW extraites de la GCC produisent une amplitude comprise entre 1,49 et 1,55 m, soit une variation de six centimètres sur l'ensemble du linéaire. Ce régime microtidal, caractéristique du Golfe de Guinée, place tous les transects dans la classe Faible et retire de fait au facteur X2 tout pouvoir discriminant. La hauteur significative des vagues suit une logique voisine soit les six transects relevant de la classe Faible correspondent aux points les plus méridionaux, partiellement abrités par la configuration de la côte, les 53 autres relevant uniformément de la classe Modéré.

Le CFI qui en résulte s'établit à 2,466 en moyenne, avec un écart-type de 0,27 et une plage réduite de 2,25 à 3,00. Dix-huit transects (30,5 %) dépassent 2,50, tous situés dans le secteur nord où la valeur atteint 2,80 en moyenne contre 2,25 dans les secteurs central et sud. Force est de constater que cette quasi-homogénéité limite structurellement la contribution du forçage à la discrimination spatiale du risque.

IV.2 Les caractéristiques physiques du littoral

La géomorphologie (Y1) révèle un littoral dominé par les côtes végétalisées, qui représentent 27 transects (45,8 %) et traduisent la présence de forêts littorales et d'écosystèmes côtiers résiduels documentés par Mbevo Fendoung (2019). Les côtes vaseuses, 18 transects (30,5 %), se concentrent dans le secteur nord aux environs des points 17 à 25 et correspondent aux zones d'embouchure de la Lobé et de la Kienké, particulièrement sensibles à l'érosion. Deux transects seulement présentent un substrat rocheux, soit les transects 23 et 41, qui ont été exclus des scénarios de solutions fondées sur la nature. Leur position sur le linéaire est reportée sur la Figure 16.

Tableau 10 : Fréquence des classes des cinq facteurs de caractéristiques physiques du littoral. 59 transects, littoral de Kribi, 2024.

Facteur	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Y1 — Géomorphologie	2 (3,4 %)	27 (45,8 %)	12 (20,3 %)	18 (30,5 %)	—
Y2 — Élévation arrière-pays	9 (15,3 %)	14 (23,7 %)	16 (27,1 %)	13 (22,0 %)	7 (11,9 %)
Y3 — Pente arrière-côte	1 (1,7 %)	3 (5,1 %)	8 (13,6 %)	11 (18,6 %)	36 (61,0 %)
Y4 — Largeur de plage	7 (11,9 %)	5 (8,5 %)	12 (20,3 %)	14 (23,7 %)	21 (35,6 %)
Y5a — Protection naturelle	1 (1,7 %)	35 (59,3 %)	5 (8,5 %)	5 (8,5 %)	13 (22,0 %)

L'élévation de l'arrière-pays (Y2), extraite du DeltaDTM, varie de 7,11 à 68,45 m. La pente de l'arrière-côte (Y3), calculée sur le même produit, relève de la classe Très élevé pour la majorité des transects, configuration qui traduit un arrière-pays plat favorable à la propagation de l'inondation. La largeur de plage (Y4), obtenue par différence entre le premier pic côtier et le trait de côte, se répartit largement vers les classes hautes : 21 transects (35,6 %) présentent une largeur inférieure à 49,8 m et relèvent de la classe Très élevé.

Le facteur de protection naturelle (Y5a) livre l'un des résultats les plus significatifs de ce travail. Le couvert arboré domine avec 35 transects (59,3 %), mais un seul transect relève de la classe Mangroves. La superficie résiduelle de mangroves, inférieure à 2 Ha sur l'ensemble du littoral, ne présente plus la variance spatiale minimale requise pour discriminer les transects, constat qui conduisit à la suppression du facteur Y5b du protocole initial.

Toujours en ce qui concerne l'élévation de l'arrière-pays, il est important de noter que la classification de ce facteur étant inversée, une élévation forte correspondant à un risque faible. Les valeurs les plus basses, comprises entre 7,11 et 12,40 m, se concentrent dans le secteur nord aux abords des embouchures, ce qui explique la corrélation de 0,765 relevée entre X4 et Y2 indiquant que les transects exposés aux niveaux marins extrêmes les plus élevés sont aussi ceux dont l'arrière-pays offre le moins de dénivelé protecteur. Cette conjonction constitue l'un des mécanismes physiques structurants du risque à Kribi.

La pente de l'arrière-côte présente une valeur atypique de 155,62 % au transect 41 et elle correspond à un escarpement rocheux confirmé par l'indicateur d'extraction de la base GCC. Les autres valeurs s'échelonnent de 0,8 à 12,3 %, configuration d'arrière-pays plat qui place la majorité des transects en classe Très élevé et favorise la propagation de l'inondation vers l'intérieur.

La largeur de plage, obtenue par différence entre la position du premier pic côtier et celle du trait de côte, varie de 18,4 à 312,7 m. Sa distribution est déséquilibrée vers les classes hautes : 35 transects (59,3 %) présentent une largeur inférieure à 87,5 m et relèvent des classes Modéré à Très élevé. Force est de constater que la capacité tampon naturelle du littoral de Kribi est déjà réduite en configuration actuelle, ce qui va conditionner l'ampleur de l'aggravation prospective analysée en IV.7.

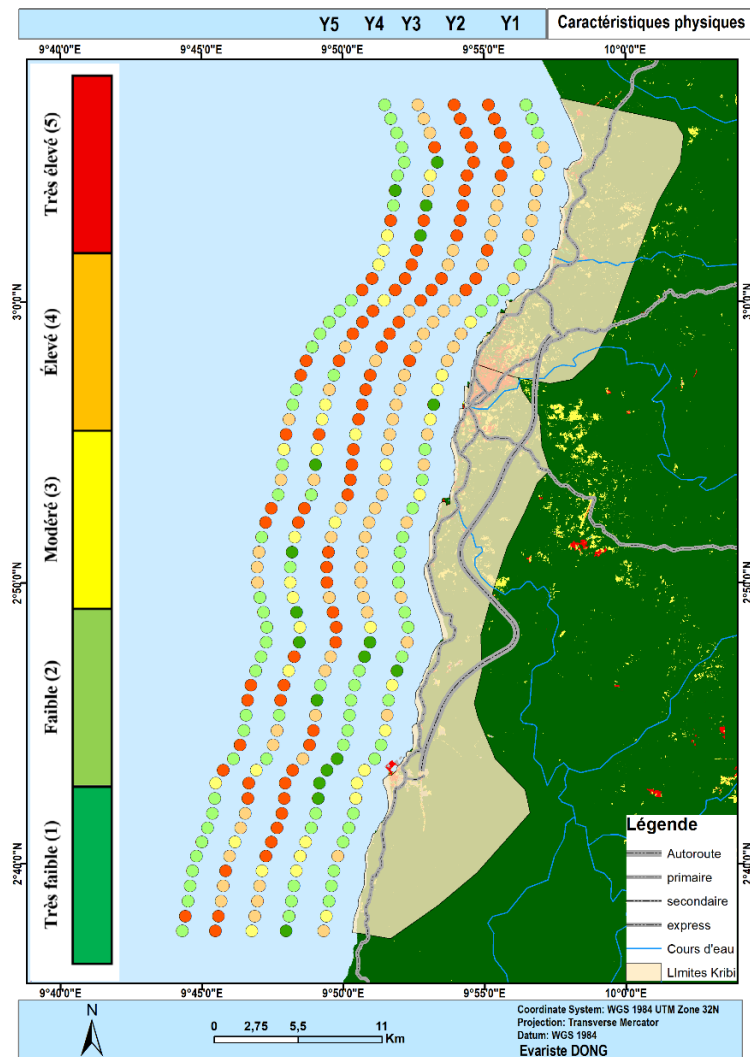


Figure 5 : Carte des facteurs de caractéristiques physiques du littoral (Y). Source : GCC

Le PSI moyen s'établit à 3,434, soit la valeur la plus élevée des trois sous-indices de niveau 1. Il présente également la plus forte variance, de 2,20 à 4,60, ce qui en fait un contributeur déterminant à la discrimination spatiale du risque.

IV.3 Les caractéristiques socio-économiques

La densité de population exposée sous un mètre d'altitude (Z1) présente une distribution fortement asymétrique. Trente transects sur 59 (50,8 %) enregistrent une densité nulle, ce qui traduit la réalité physique des secteurs naturels non habités, à savoir les plages, les zones intertidales et les forêts littorales. La valeur maximale atteint 80,5 hab/km², en deçà du seuil de classe 5 retenu par Verstraete (2025), ce qui conduisit à adapter les seuils de classification à 0, 10, 30 et 60 hab/km².

Tableau 11 : Fréquence des classes des quatre facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral. 59 transects, littoral de Kribi, 2024.

Facteur	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Z1 — Densité de population	30 (50,8 %)	13 (22,0 %)	9 (15,3 %)	5 (8,5 %)	2 (3,4 %)
Z2 — Distance aux bâtiments	11 (18,6 %)	12 (20,3 %)	14 (23,7 %)	12 (20,3 %)	10 (16,9 %)
Z3 — Distance aux routes	13 (22,0 %)	11 (18,6 %)	13 (22,0 %)	12 (20,3 %)	10 (16,9 %)
Z4 — Utilisation du sol	8 (13,6 %)	12 (20,3 %)	8 (13,6 %)	15 (25,4 %)	16 (27,1 %)

Les distances aux bâtiments (Z2) et au réseau routier (Z3), calculées sur les couches OpenStreetMap, varient respectivement de 5,3 à 968,2 m et de 8,1 à 745,0 m. Elles traduisent une occupation du front de mer très inégale, concentrée dans la zone urbaine de Kribi et aux abords du port.

Le facteur d'utilisation économique du sol (Z4), construit par classification manuelle enrichie des informations recueillies auprès de la Mairie de Kribi, révèle une distribution marquée vers les classes hautes. Les infrastructures stratégiques regroupent 16 transects (27,1 %), à savoir les complexes hôteliers, la Route Nationale 7, les ponts sur les embouchures du Lobé et de la Kienké ainsi que les villas de standing du front de mer. Les infrastructures économiques en regroupent 15 (25,4 %), soit le port en eau profonde, le terminal à gas de la SNH, les quais de pêche structurés et les zones industrielles. Au total, 52,5 % des transects présentent une valeur économique élevée à très élevée.

La distribution de la densité de population appelle une précision de lecture. Les trente transects à densité nulle ne signifient pas l'absence de tout enjeu humain mais encore, ils traduisent l'absence de population résidant sous un mètre d'altitude dans la zone tampon de quatre kilomètres carrés. Plusieurs de ces transects présentent par ailleurs des valeurs élevées au titre de Z2, Z3 ou Z4, la fréquentation touristique et les infrastructures n'étant pas capturées par un indicateur de résidence permanente.

Les distances au bâti et au réseau routier confirment ce diagnostic. Vingt-deux transects (37,3 %) présentent un bâtiment à moins de cent mètres du trait de côte, et dix-sept une route à moins de quatre-vingts mètres. La Route Nationale 7, qui longe le front de mer sur une partie du linéaire central, constitue à elle seule un enjeu d'infrastructure majeur avec sa position exposée, la rendant vulnérable à l'érosion comme à la submersion.

Le SSI moyen s'établit à 3,169, avec une plage de 1,75 à 5,00, soit la plus étendue des trois sous-indices. Cette amplitude préfigure le rôle discriminant que l'analyse exploratoire confirmera.

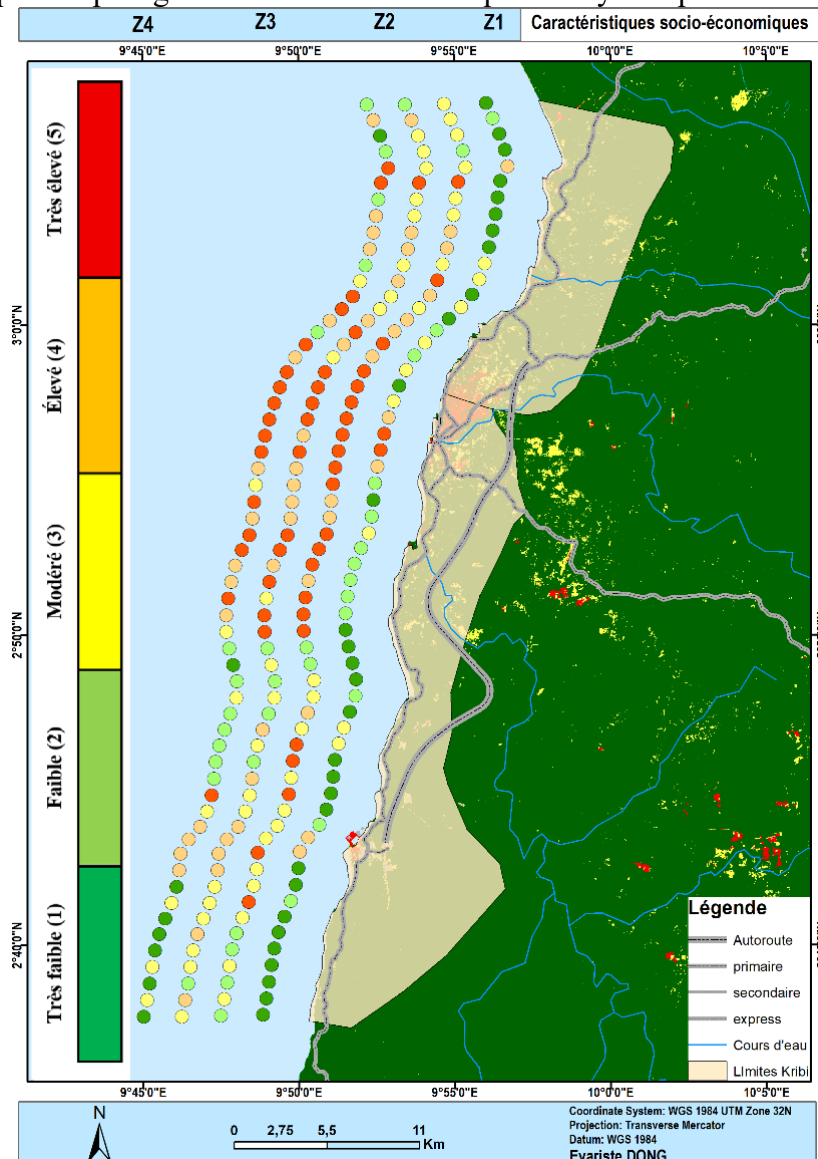


Figure 6 : Carte des facteurs de caractéristiques socio-économiques du littoral (Z). Source : GCC

IV.4 Les indices intermédiaires

Le Coastal Hazard Index, moyenne géométrique du CFI et du PSI, s'établit à 2,903 en moyenne (écart-type 0,33), avec une plage de 2,22 à 3,63. Le Coastal Vulnerability Index, moyenne géométrique du PSI et du SSI, atteint 3,267 (écart-type 0,62) sur une plage de 2,05 à 4,36. L'écart entre les deux indices, soit 0,364 point, indique que la vulnérabilité l'emporte sur l'aléa dans la structuration du risque à Kribi, résultat que l'analyse exploratoire a confirmé.

La comparaison des deux indices intermédiaires éclaire la structure du risque. Le CHI, qui agrège forçage et susceptibilité physique, présente une distribution resserrée autour de sa moyenne, cohérente avec la faible variance du CFI. Le CVI, qui agrège susceptibilité physique et vulnérabilité socio-économique, se déploie sur une plage nettement plus large et atteint 4,36 au transect 24. Il ressort de cet écart que la dimension déterminante du risque à Kribi n'est pas l'aléa mais l'exposition des enjeux, constat que l'analyse exploratoire présentée en IV.6 viendra confirmer statistiquement.

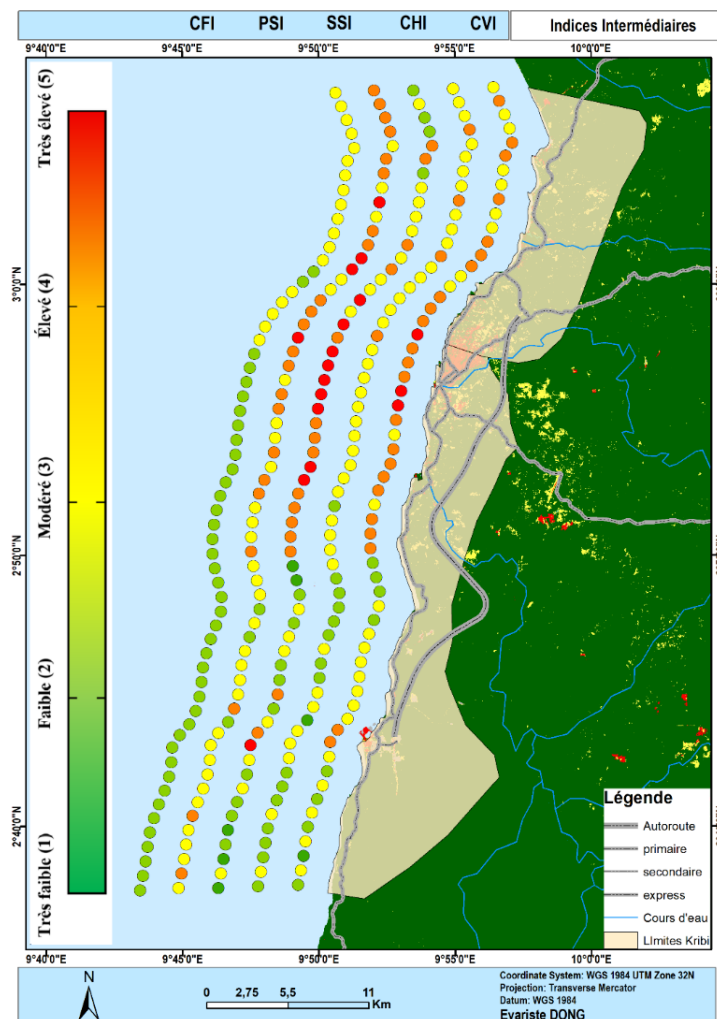


Figure 7 : Carte des indices intermédiaires (niveaux 1 et 2) : Coastal Forcing Index (CFI), Physical Susceptibility Index (PSI), Socioeconomic Susceptibility Index (SSI), Coastal Hazard Index (CHI) et Coastal Vulnerability Index (CVI). Source : GCC

IV.5 L'indice de risque côtier

IV.5.1 Distribution générale

Le CRI, moyenne géométrique cubique des trois indices de niveau 1, présente des valeurs comprises entre 2,114 et 3,699 sur l'ensemble du littoral, avec une moyenne de 2,963 (écart-type 0,419) et une médiane de 2,972. Sur l'échelle 1 à 5, la distribution se concentre dans les classes centrales et de ce fait, aucun transect n'atteint la classe Très élevé, aucun ne relève de la classe Très faible.

Tableau 12 : Distribution des 59 transects du littoral de Kribi par classe de CRI sur l'échelle 1–5.

Classe CRI	Intervalle (échelle 1–5)	Transects	Proportion
1 — Très faible	1,00 – 1,80	0	0,0 %
2 — Faible	1,80 – 2,60	16	27,1 %
3 — Modéré	2,60 – 3,40	33	55,9 %
4 — Élevé	3,40 – 4,20	10	16,9 %
5 — Très élevé	4,20 – 5,00	0	0,0 %

IV.5.2 Gradient géographique nord-sud

L'analyse par secteur révèle un gradient nord-sud marqué, qui constitue l'un des résultats spatiaux les plus structurants de cette étude.

Tableau 13 : CRI moyen et extrêmes par secteur géographique. Littoral de Kribi, 2024.

Secteur	Transects	CFI	PSI	SSI	CRI moyen	CRI min	CRI max
Nord (pts 1–20)	20	2,800	3,810	3,212	3,222	2,785	3,699
Central (pts 21–40)	20	2,337	3,390	3,587	3,025	2,226	3,622
Sud (pts 41–59)	19	2,250	3,084	2,684	2,625	2,114	3,192

Le secteur nord affiche le CRI moyen le plus élevé (3,222), devant le secteur central (3,025) et le secteur sud (2,625). Il ressort toutefois que les deux premiers secteurs doivent leur position à des mécanismes distincts : le nord cumule le forçage le plus fort (CFI 2,800) et la susceptibilité physique la plus élevée (PSI 3,810), tandis que le central présente le SSI le plus élevé du littoral (3,587) pour un forçage nettement plus faible (2,337).

La comparaison des trois sous-indices par secteur éclaire les mécanismes à l'œuvre. Le secteur nord doit sa position au cumul du forçage le plus fort et de la susceptibilité physique la plus élevée à cet effet, son CFI de 2,800 dépasse de 0,463 point celui du secteur central, et son PSI de 3,810 le dépasse de 0,420 point. Le secteur central compense un forçage nettement plus faible par le SSI le plus élevé du littoral, 3,587 contre 3,212 au nord. Le secteur sud cumule au contraire les valeurs les plus basses sur les trois dimensions.

Cette configuration explique que les valeurs extrêmes ne coïncident pas avec les moyennes sectorielles. Le CRI maximal du secteur central atteint 3,622 au transect 24, valeur très proche du maximum du secteur nord (3,699 au transect 20), alors que la moyenne du secteur central lui est inférieure de 0,197 point. Il ressort de ce constat que la dispersion intra-sectorielle est forte, et que la lecture du CRI par secteur ne saurait se substituer à l'analyse transect par transect pour l'identification des priorités.

IV.5.3 Hotspots de risque

Les cinq hotspots se situent tous entre 2,925° et 2,992° N, sur une bande continue de sept kilomètres à la charnière des secteurs nord et central comme le présente le tableau ci-dessous. Tous relèvent de la classe Élevé et présentent une utilisation économique du sol des classes 4 ou 5. Force est de constater que quatre d'entre eux se caractérisent par un PSI supérieur à 3,80 combiné à un SSI supérieur à 4,00, soit la conjonction d'une susceptibilité physique forte et d'enjeux humains concentrés.

Tableau 14 : Les cinq transects à risque côtier le plus élevé. Littoral de Kribi, 2024.

Point	Latitude	CFI	PSI	SSI	CRI	Géomorphologie	Utilisation du sol
20	2,969° N	2,75	4,60	4,00	3,699	Muddy	Infrastructures stratégiques
24	2,934° N	2,50	3,80	5,00	3,622	Sandy	Infrastructures stratégiques
19	2,977° N	2,75	3,80	4,50	3,609	Muddy	Infrastructures stratégiques
25	2,925° N	2,50	4,20	4,25	3,547	Muddy	Infrastructures économiques
17	2,992° N	2,75	3,80	4,25	3,541	Sandy	Infrastructures stratégiques

Le tableau ci-dessous, qui présente les transects les moins exposés complète ce diagnostic. Les cinq valeurs de CRI les plus faibles, comprises entre 2,114 et 2,226, se situent toutes dans les secteurs

central et sud, sur des transects caractérisés par une géomorphologie végétalisée, une absence de population résidente sous un mètre et une utilisation du sol relevant des classes Végétation naturelle ou Écosystèmes côtiers. Ces secteurs constituent la référence basse du littoral et fournissent, par contraste, la mesure de ce que représente l'anthropisation du front de mer dans la construction du risque.

Tableau 15 : Les cinq transects à risque côtier le plus faible. Littoral de Kribi, 2024.

Point	Secteur	CFI	PSI	SSI	CRI	Géomorphologie	Utilisation du sol
44	Sud	2,25	2,60	1,75	2,114	Vegetated	Végétation naturelle
37	Central	2,25	2,80	1,75	2,226	Vegetated	Végétation naturelle
46	Sud	2,25	2,80	1,75	2,226	Vegetated	Écosystèmes côtiers
52	Sud	2,25	2,80	1,75	2,226	Vegetated	Écosystèmes côtiers
55	Sud	2,25	2,80	1,75	2,226	Vegetated	Végétation naturelle

Le contraste entre ces précédents tableaux est instructif. Les valeurs de CFI y sont quasi identiques, de 2,50 à 2,75 pour les hotspots contre 2,25 pour les transects les moins exposés, quand les valeurs de SSI passent de 4,00-5,00 à 1,75. L'écart de CRI entre les deux extrêmes du littoral, soit 1,585 point, se joue donc presque intégralement sur la dimension socio-économique.

La figure ci-dessous vient étayer ces observations en montrant le profil longitudinal du CRI le long du littoral de Kribi.

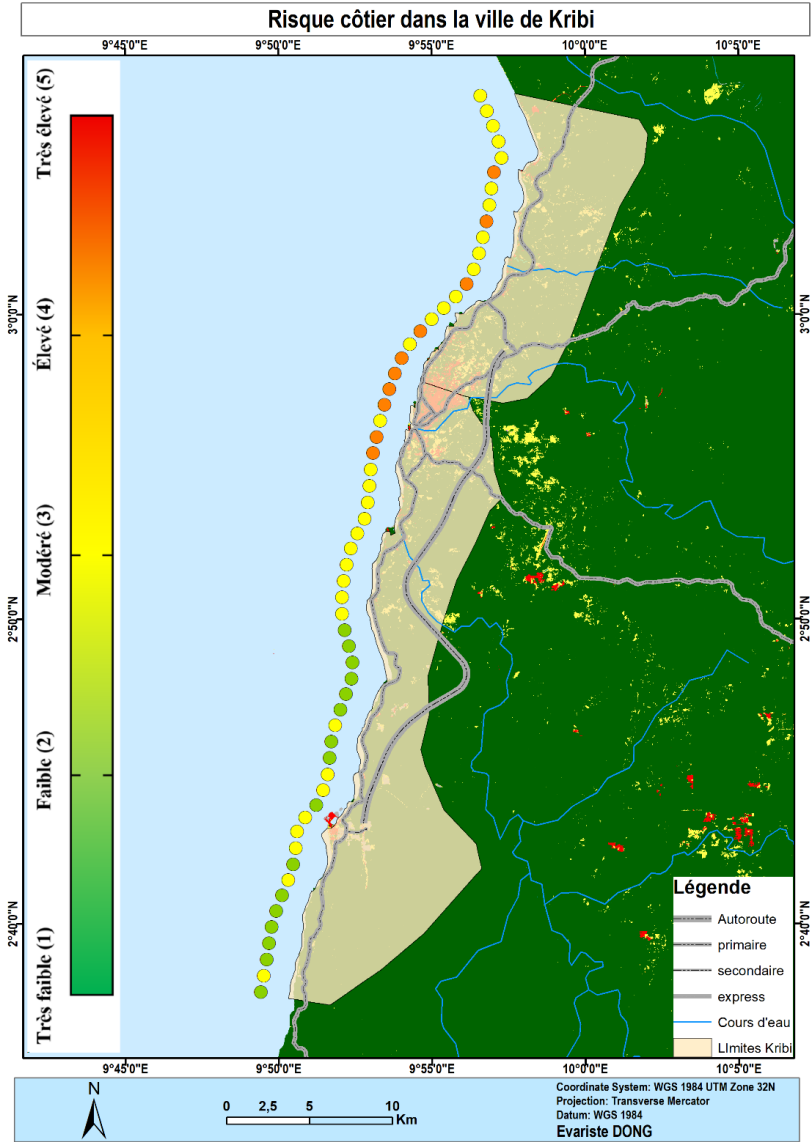


Figure 8 : Carte du risque côtier dans la ville de Kribi, selon le Coastal Risk Index (CRI). Source : GCC

IV.6 Analyse exploratoire des relations entre facteurs

IV.6.1 Corrélations de Spearman

La matrice de corrélation calculée sur les neuf facteurs classifiés fait apparaître huit paires dont le coefficient dépasse 0,40 en valeur absolue. La corrélation la plus forte associe X4 et Y2 ($r_s = 0,765$) et traduit la co-localisation des niveaux marins extrêmes et d'un arrière-pays bas dans le secteur nord. Les quatre facteurs socio-économiques forment un bloc fortement structuré, avec des coefficients de 0,465 à 0,628.

La grande majorité des corrélations entre facteurs physiques et socio-économiques demeurent faibles ($r_s < 0,35$) comme l'illustre la figure ci-dessous. Cette indépendance relative entre les deux dimensions justifie a posteriori le choix d'une structure à trois sous-indices distincts plutôt qu'une agrégation directe des treize facteurs.

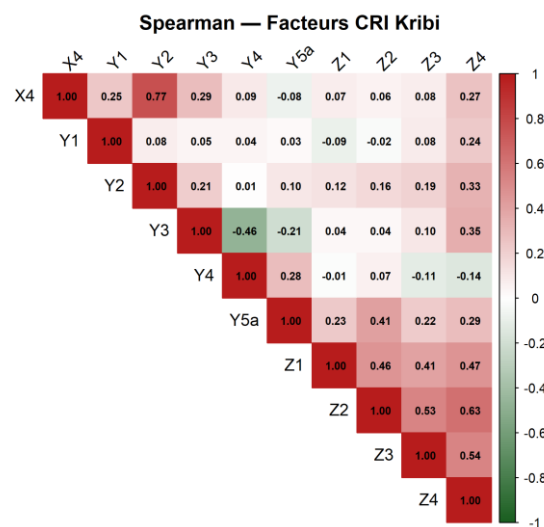


Figure 9 : Corrélogramme de la corrélation de Spearman entre les neuf facteurs classifiés du CRI de Kribi. Les coefficients positifs apparaissent en bleu, les coefficients négatifs en rouge, l'intensité de la teinte traduisant la force de la relation. Réalisé sous R (package corrplot).

IV.6.2 Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP réalisée sur les neuf facteurs standardisés produit quatre composantes de valeur propre supérieure à 1 selon la règle de Kaiser, expliquant au total 73,4 % de la variance. Deux critères convergents conduisent toutefois à ne retenir que les deux premières dimensions pour l'interprétation. Au regard des valeurs propres reportées au Tableau ci-dessous, la décroissance marque une rupture nette entre la deuxième composante (1,94) et la troisième (1,44), soit une chute de 0,50 point là où l'écart entre la troisième et la quatrième n'est que de 0,44 puis de 0,32 entre les suivantes. Cette rupture correspond au critère du coude appliqué par Verstraete (2025) sur son scree plot. À cet effet, les deux premières dimensions cumulent 48,5 % de la variance et suffisent à restituer la structure du jeu de données ; étant entendu que les dimensions suivantes n'ajoutant que des contributions dispersées sans interprétation thématique claire.

Tableau 16 : Valeurs propres et variance expliquée par les cinq premières dimensions de l'ACP (N = 59 transects, 10 facteurs standardisés).

Dimension	Valeur propre	Variance (%)	Variance cumulée (%)	Interprétation
Dim 1	2,83	28,8	28,8	Axe socio-économique
Dim 2	1,94	19,7	48,5	Axe physique
Dim 3	1,44	14,6	63,1	—
Dim 4	1,00	10,2	73,4	—
Dim 5	0,68	6,9	80,2	—

La première dimension oppose les transects fortement anthropisés du centre et du nord aux secteurs naturels méridionaux. Les contributions y sont dominées par Z4 (26,7 %), Z2 (19,7 %), Z3 (16,4 %) et Z1 (15,3 %), les cinq facteurs physiques ne totalisant que 21,9 %. Cet axe peut donc être qualifié d'axe socio-économique : il ordonne le littoral selon l'intensité de l'occupation humaine du front de mer, depuis les villages de pêcheurs du sud jusqu'au complexe portuaire et pétrolier.

La deuxième dimension, indépendante de la première par construction, oppose les transects à forçage marin élevé et arrière-pays bas à ceux qui présentent la configuration inverse. X4 et Y2 y contribuent respectivement pour 22,9 % et 21,4 %, suivis de Y3 (18,7 %) et Y4 (14,2 %). Cet axe physique isole le mécanisme d'exposition à la submersion, distinct de la question des enjeux. Force est de constater que la structure factorielle reproduit exactement la partition en blocs suggérée par les corrélations de Spearman, ce qui renforce la robustesse du diagnostic.

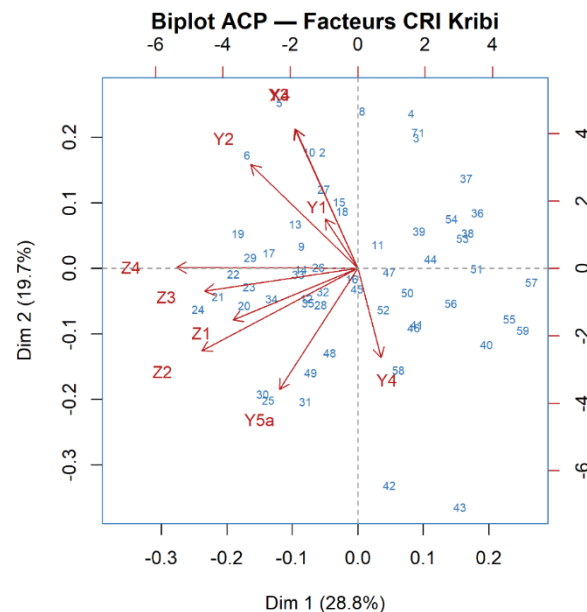


Figure 10 : Biplot de l'analyse en composantes principales conduite sur les neuf facteurs classifiés. Les 59 transects sont projetés dans le plan formé par les deux premières dimensions, les vecteurs représentant les variables et leur contribution respective. Réalisé sous R (package FactoMineR).

IV.6.3 Classification K-means et profils de risque

La méthode du coude confirme un nombre optimal de quatre clusters, en cohérence avec le choix retenu par Verstraete (2025) pour Kafountine.

Méthode du coude — K-means CRI Kribi

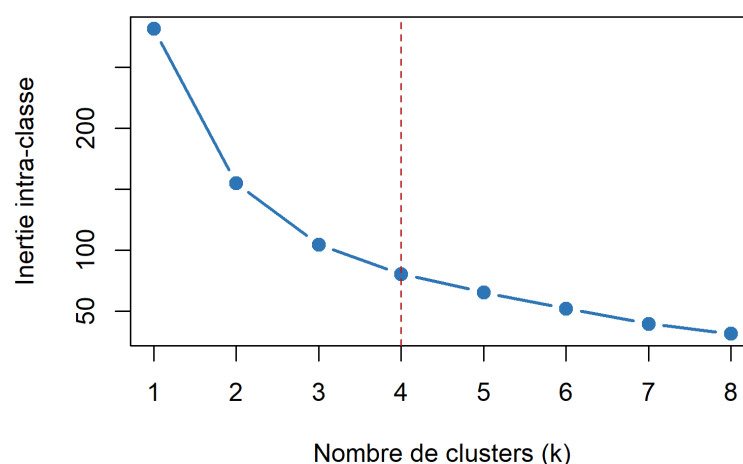


Figure 11 : Détermination du nombre optimal de clusters par la méthode du coude.

La rupture de pente observée à $k = 4$ fixe le nombre de groupes retenus pour la classification. Réalisé sous R (package factoextra).

Le K-means appliqué aux coordonnées factorielles explique 71,4 % de l'inertie totale et répartit les transects en groupes de 12, 19, 25 et 3 individus comme l'illustrent les figures ci-dessous.

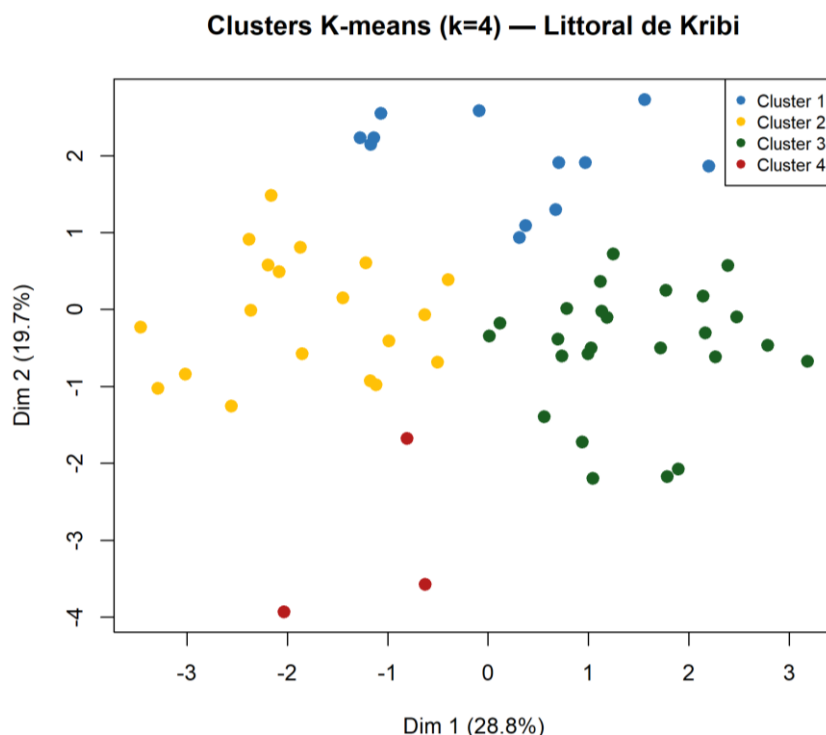


Figure 12 : Classification K-means en quatre groupes projetés dans le plan factoriel de l'analyse en composantes principales.

L'observation permet de relever que chaque couleur correspond à un profil de risque, les ellipses délimitant la dispersion des transects au sein de chaque groupe. Réalisé sous R (packages FactoMineR et factoextra).

Comme l'illustre le tableau ci-dessous ; le Cluster 1 regroupe douze transects du secteur nord caractérisés par le forçage le plus élevé du littoral ($X4 = 4,17$ contre 1,00 à 2,00 pour les autres profils) et un arrière-pays bas ($Y2 = 4,42$). Sa protection naturelle demeure toutefois bonne ($Y5a = 2,00$) et ses enjeux socio-économiques restent modérés ($SSI = 2,94$), ce qui contient son CRI à 3,06. Ce profil correspond aux secteurs où le risque procède principalement de la physique côtière.

Le Cluster 2 rassemble dix-neuf transects méridionaux qui constituent le profil le moins exposé du littoral, avec un CRI de 2,49. Tous les indicateurs y sont favorables soient le forçage minimal ($CFI = 2,28$), la susceptibilité physique la plus basse ($PSI = 2,99$) et les enjeux quasi absents ($SSI = 2,33$, $Z4 = 2,05$). Ces secteurs correspondent aux zones de végétation naturelle et d'écosystèmes côtiers du sud de la commune.

Le Cluster 3, le plus nombreux avec vingt-cinq transects, présente le CRI le plus élevé (3,30). Sa spécificité tient à la conjonction d'un SSI de 3,96, soit le plus fort des quatre profils, et d'une protection naturelle dégradée ($Y5a = 3,60$). Il regroupe les secteurs anthropisés du centre et du nord, où se concentrent le port, les infrastructures pétrolières, la zone urbaine et les complexes hôteliers. C'est dans ce profil que se situent quatre des cinq hotspots identifiés en IV.5.3.

Le Cluster 4, restreint à trois transects, constitue un profil singulier. Son forçage est minimal ($CFI = 2,25$) et ses enjeux faibles ($Z4 = 2,33$), mais sa susceptibilité physique demeure significative ($PSI = 3,40$) en raison de deux caractéristiques extrêmes soient une largeur de plage réduite ($Y4 = 5,00$) et une absence totale de protection naturelle ($Y5a = 5,00$). Ce profil, dont le CRI atteint 2,78, présente le plus fort potentiel d'amélioration par restauration écologique, potentiel que les scénarios SfN permettront de quantifier.

Tableau 17 : Scores moyens des facteurs et des indices par cluster K-means (N = 59, k = 4, inertie expliquée = 71,4 %).

Indicateur	Cluster 1 (n=12)	Cluster 2 (n=19)	Cluster 3 (n=25)	Cluster 4 (n=3)
X4 — Niveau extrême	4,17	1,16	2,00	1,00
Y4 — Largeur de plage	3,00	3,53	3,84	5,00
Y5a — Protection naturelle	2,00	2,21	3,60	5,00
Z4 — Usage du sol	3,50	2,05	4,32	2,33
CFI moyen	2,83	2,28	2,46	2,25
PSI moyen	3,53	2,99	3,73	3,40
SSI moyen	2,94	2,33	3,96	2,83
CRI moyen	3,06	2,49	3,30	2,78

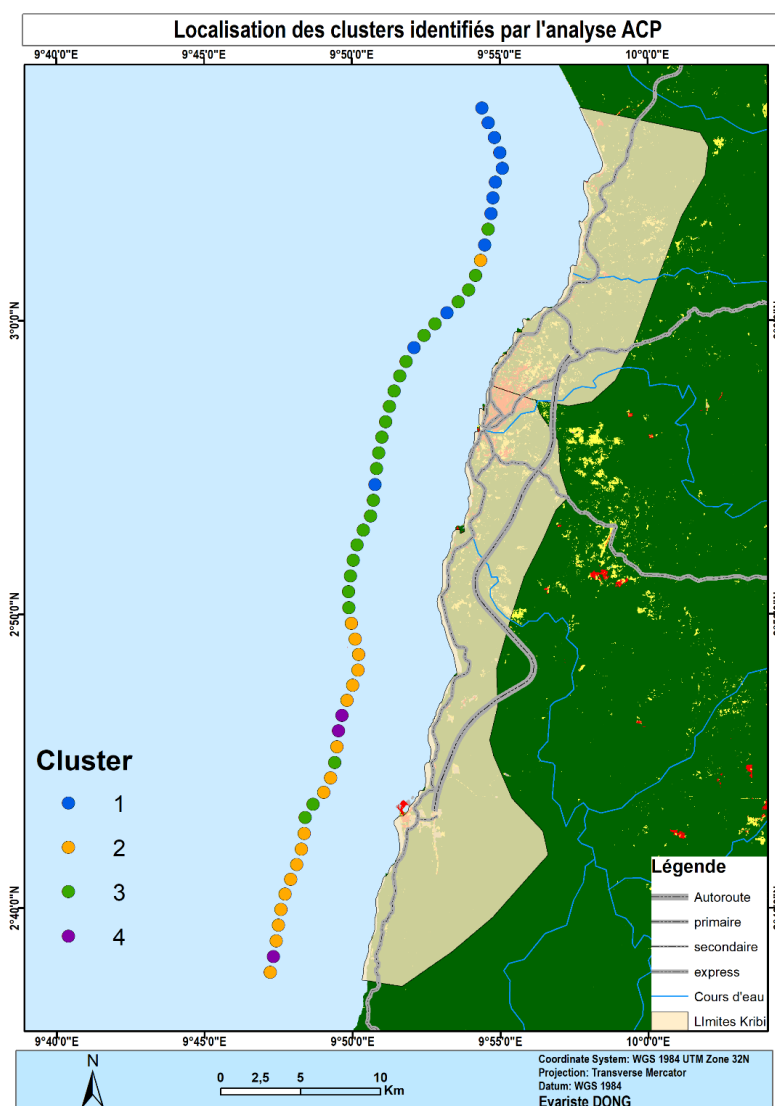


Figure 13 : Localisation des clusters identifiés par l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

IV.7 Résultats prospectifs

Conformément à l'approche de Furlan et al. (2021) décrite en section III.3.5, le CRI a été recalculé pour trois horizons temporels en substituant aux valeurs de référence des cinq facteurs projetés leurs valeurs prospectives. Les neuf configurations théoriques se réduisant à trois configurations effectives présentées par horizon dans le tableau ci-dessous.

Tableau 18 : Statistiques comparatives des sous-indices et du CRI pour les trois horizons prospectifs. Δ CRI exprimé par rapport au CRI de référence (2,963). Source : calculs auteur sur données GCC, QGIS 3.x..

Indicateur	S0 (référence)	2030	2050	2100
CFI moyen	2,466	3,186	3,686	3,686
PSI moyen	3,434	3,434	3,563	3,678
SSI moyen	3,170	3,186	3,208	3,445
CRI moyen	2,963	3,231	3,443	3,564
Δ CRI (absolu)	—	+0,268	+0,480	+0,601
Δ CRI (%)	—	+9,0 %	+16,2 %	+20,3 %
CRI médian	2,972	3,274	3,476	3,630
CRI minimum	2,114	2,390	2,507	2,565
CRI maximum	3,699	3,953	4,217	4,286

A l'analyse, le CRI moyen progresse de façon continue et monotone soit 3,231 en 2030 (+9,0 %), 3,443 en 2050 (+16,2 %) et 3,564 en 2100 (+20,3 %). Le rythme n'en est toutefois pas uniforme, dans la mesure où plus des trois quarts de la progression totale s'accomplissent avant 2050, la période 2050–2100 n'ajoutant que 0,121 point.

Le CFI porte l'essentiel de la progression initiale, gagnant 0,720 point entre la référence et 2030, mais il sature ensuite les facteurs X1 et X4 qui atteignent leur classe maximale dès 2050 et n'évoluent plus. Passé cette échéance, l'aggravation provient exclusivement du PSI, par réduction de la largeur tampon, ainsi que du SSI, dont la progression marquée entre 2050 et 2100 (+0,237) résulte de la conjonction de l'accroissement démographique et de l'occupation du sol Z4.

IV.7.1 Distribution et migration des classes

L'analyse chronologique révèle que l'essentiel de la transformation du littoral se joue avant 2050. Cette concentration temporelle a une portée opérationnelle directe à savoir que les mesures d'adaptation conçues pour un horizon 2100 arriveraient trop tard pour prévenir la majeure partie des basculements, qui seront déjà intervenus. Force est de constater que la fenêtre d'action utile se situe dans les vingt-cinq prochaines années.

La dispersion évolue peu, l'écart entre CRI minimal et maximal passant de 1,585 point en configuration de référence à 1,721 en 2100. Les transects les moins exposés progressent donc presque autant que les plus exposés, ce que confirme le resserrement du rapport entre profils de risque : le littoral s'homogénéise vers le haut.

IV.7.2 Évolution spatiale et hotspots

La hiérarchie **Nord > Central > Sud** observée en configuration de référence se recompose dès 2030 avec le secteur Central qui dépasse le Nord (3,378 contre 3,334), inversion qui tient à la conjonction de l'accroissement démographique et de la réduction de la largeur tampon dans la zone urbaine comme l'illustre la figure ci-dessous. L'écart se creuse jusqu'en 2100, où le Central atteint 3,763 contre 3,658 pour le Nord. Le secteur Sud conserve les valeurs les plus faibles mais enregistre la progression relative la plus forte (+24,0 %), six de ses transects atteignant la classe Élevé en 2100 alors qu'aucun n'y figure aujourd'hui.

Comme l'illustre également le tableau ci-dessus ; les cinq hotspots continuent de s'aggraver avec leur CRI moyen passe de 3,604 à 4,179, et trois d'entre eux franchissent le seuil de la classe Très élevé, le transect 24 dès 2050 puis les transects 19 et 25 en 2100. Le transect 24 atteint la valeur maximale du jeu de données, 4,286. Force est de constater que les secteurs déjà les plus exposés sont les premiers à atteindre le niveau supérieur de l'échelle, que nul transect n'occupait en configuration de référence.

Tableau 19 : Évolution prospective du CRI par secteur, du nombre de transects en classe Élevé ou plus, des hotspots et des quatre profils de risque. Source : calculs QGIS 3.x

Classe CRI	Niveau	S0	2030	2050	2100
1 — Très faible	1,0 – 1,8	0	0	0	0
2 — Faible	1,8 – 2,6	16	4	1	1
3 — Modéré	2,6 – 3,4	33	31	25	21
4 — Élevé	3,4 – 4,2	10	24	32	33
5 — Très élevé	4,2 – 5,0	0	0	1	4

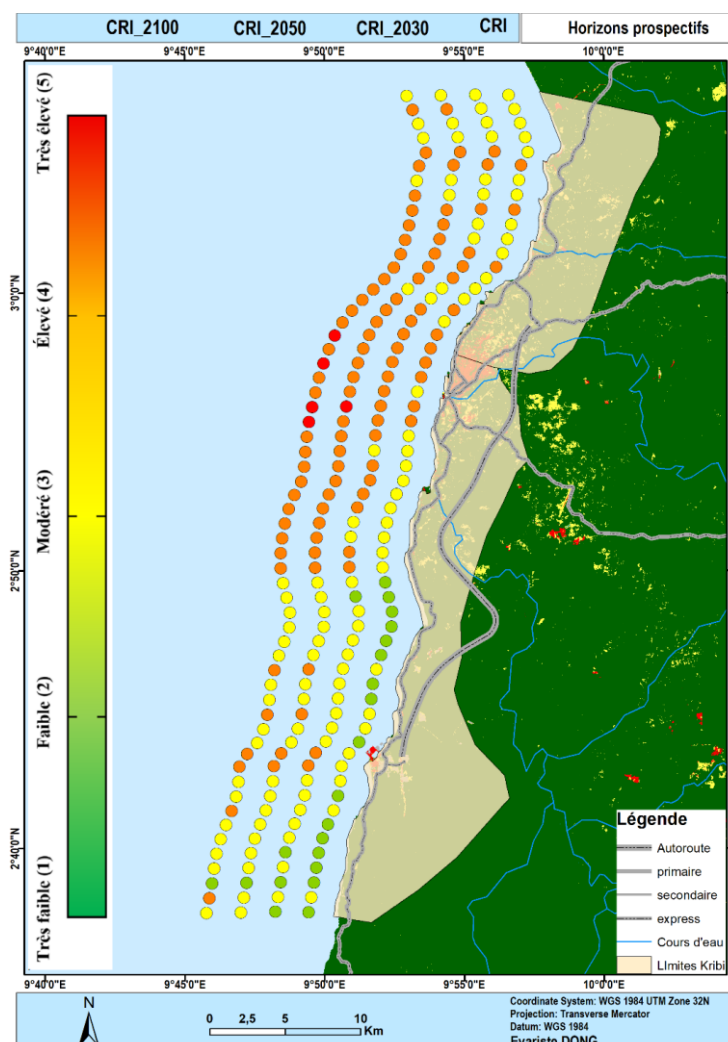


Figure 14 : Évolution de l'indice de risque côtier (CRI) du littoral de Kribi aux horizons 2030, 2050 et 2100

IV.8 Résultats des scénarios de Solutions fondées sur la Nature

Les scénarios SfN ont été calculés selon les règles définies en section III.3.7, soit en modifiant simultanément Y1, Y4 et Y5a pour les 57 transects modifiables, identifiables sur la Figure 16, tandis que les transects 23 et 41, de substrat rocheux, conservent leurs valeurs de référence.

IV.8.1 Le rôle actuel des écosystèmes littoraux

Avant d'évaluer le potentiel des solutions fondées sur la nature, il convient d'établir ce que le couvert végétal existant apporte déjà. Une configuration contrefactuelle a donc été construite, dans laquelle la protection naturelle des 44 transects aujourd'hui protégés, c'est-à-dire ceux dont le facteur Y5a relève des classes 1 à 4, est ramenée à la classe 5, les autres facteurs demeurants inchangés.

Il ressort de ce calcul que le couvert existant maintient le PSI moyen à 3,434 au lieu de 3,837, soit un écart de 0,403 point, et le CRI moyen à 2,963 au lieu de 3,074, soit un écart de 0,111 point (3,8 %).

Quatre transects supplémentaires basculeraient en classe Élevé en l'absence de ce couvert, portant leur nombre de 10 à 14. Force est de constater que la végétation littorale résiduelle de Kribi, bien qu'amputée de ses mangroves, exerce déjà une fonction protectrice mesurable, équivalente à plus de la moitié du bénéfice qu'apporterait une restauration complète comme l'illustre le tableau ci-dessous.

Tableau 20 : Statistiques comparatives du CRI et du PSI pour les configurations S0, S1 et S2. Source : calculs sous QGIS 3.x

Indicateur	S0 (maintien)	S1 — Dégradation	S2 — Restauration
CRI moyen	2,963	3,244	2,751
CRI médian	2,972	3,311	2,831
CRI minimum	2,114	2,420	1,990
CRI maximum	3,699	3,915	3,374
ΔCRI vs S0 (absolu)	—	+0,281	-0,212
ΔCRI vs S0 (%)	—	+9,5 %	-7,1 %
PSI moyen	3,434	4,512	2,746
Transects en classe Élevé	10	24	0

Toujours au regard de ce tableau, les deux scénarios produisent des effets de sens opposé et d'amplitudes proches avec la dégradation qui aggrave le CRI moyen de 0,281 point (+9,5 %), la restauration qui l'abaisse de 0,212 point (-7,1 %). L'amplitude totale entre les deux trajectoires atteint 0,492 point, soit 16,6 % du CRI de référence.

Le PSI, seul sous-indice affecté, varie de 4,512 sous dégradation à 2,746 sous restauration, soit une amplitude de 1,766 point, soit plus de la moitié de l'échelle. L'asymétrie entre l'effet de la dégradation (+1,078) et celui de la restauration (-0,688) s'explique par la distribution actuelle de Y5a avec les 35 transects déjà en classe 2 ne peuvent être améliorés au-delà, alors que la dégradation impose une remontée systématique vers la classe 5. Ces 35 transects dont le couvert relève déjà de la classe 2 constituent en effet un plafond que la restauration ne peut franchir.

Cette configuration a une portée opérationnelle directe. Elle signifie que la moitié du bénéfice théorique des solutions fondées sur la nature à Kribi est déjà acquise, et que la politique publique doit d'abord viser à ne pas la perdre. Le calcul contrefactuel présenté en IV.8.1 en fournit la mesure selon laquelle la disparition du couvert existant coûterait 0,111 point de CRI, quand la restauration complète des secteurs dégradés n'en rapporterait que 0,212.

Sous dégradation, la classe Élevé regroupe 24 transects (41 %) contre 10 en configuration de référence, et 26 transects changent de classe vers le haut, tous d'un seul rang comme l'indique le tableau ci-dessous. Sous restauration, la classe Élevé disparaît entièrement, la distribution se reportant sur les classes Faible (21 transects) et Modéré (38 transects). L'écart entre les deux trajectoires est net soit 41 % du linéaire en classe Élevé sous dégradation, aucun sous restauration.

Tableau 21 : CRI moyen par secteur géographique pour les scénarios S0, S1 et S2. Sectorisation identique à celle du Tableau 16. Source : calculs QGIS 3.x

Classe CRI	Niveau	S0	S1	S2	ΔS1-S0	ΔS2-S0
1 — Très faible	1,0 – 1,8	0	0	0	0	0
2 — Faible	1,8 – 2,6	16	4	21	-12	+5
3 — Modéré	2,6 – 3,4	33	31	38	-2	+5
4 — Élevé	3,4 – 4,2	10	24	0	+14	-10
5 — Très élevé	4,2 – 5,0	0	0	0	0	0

L'effet de la dégradation est proportionnellement le plus marqué dans le secteur Central (+10,1 %), devant le Sud (+9,9 %) et le Nord (+8,6 %), hiérarchie qui tient à la distribution du couvert, plusieurs transects du Nord présentant déjà un couvert artificialisé qui ne peut se dégrader davantage. L'amplitude entre trajectoires demeure en revanche maximale au Nord (0,514) et minimale au Sud (0,471).

IV.8.2 Articulation avec les scénarios climatiques

La restauration combinée au forçage climatique de 2050 produit un CRI moyen de 3,156, contre 3,443 pour le scénario climatique seul. Le bénéfice net s'établit à 0,287 point, soit 9,7 % du CRI de référence. Cette réduction ne suffit pas à ramener l'indice sous son niveau actuel, qui demeure dépassé de 0,193 point (+6,5 %), mais elle compense environ 60 % de l'aggravation climatique attendue.

La comparaison entre S1+2050 et S2+2050 révèle une amplitude de 0,566 point (19,1 % du CRI de référence), qui mesure la plage d'action ouverte aux gestionnaires côtiers. Sous dégradation combinée, 43 transects (73 %) atteignent au moins la classe Élevé, dont sept la classe Très élevé ; sous restauration, ils ne sont plus que 19 (32 %) et aucun n'atteint la classe Très élevé. La restauration prévient ainsi le basculement de quatorze transects par rapport au scénario sans intervention.

Le rapprochement entre les deux dimensions appelle une précision de méthode, dans la mesure où la trajectoire climatique s'impose au territoire tandis que la trajectoire écologique relève de choix de gestion. Leur combinaison produit donc des bornes conditionnelles et non des scénarios équiprobables car si la dégradation se poursuit sous les projections médianes, le CRI atteindra 3,722 ; si la restauration est engagée dans les mêmes conditions, il s'établira à 3,156.

Rapporté aux enjeux du littoral, l'écart de 0,566 point entre ces deux bornes se traduit concrètement. Vingt-quatre transects basculeraient en classe Élevé sous dégradation combinée sans y basculer sous restauration combinée. Ces transects portent, au titre du facteur Z4, seize infrastructures classées stratégiques ou économiques, dont les abords du port en eau profonde, le terminal à gas et plusieurs tronçons de la Route Nationale 7. Il ressort de ce croisement que la question des solutions fondées sur la nature à Kribi n'est pas seulement écologique mais plus encore, elle engage la protection d'actifs économiques d'importance nationale.

Tableau 22 : Comparaison des six configurations climat × SfN à l'horizon 2050. Source : calculs auteur, QGIS 3.x

Configuration	CRI moyen	ΔCRI vs S0	ΔCRI %	Classe Élevé ou +	Lecture
S0 — Référence	2,963	—	—	10/59 (17 %)	Situation actuelle
Climat 2050 seul	3,443	+0,480	+16,2 %	33/59 (56 %)	Aggravation sans intervention
S1 — Dégradation seule	3,244	+0,281	+9,5 %	24/59 (41 %)	Dégradation sans effet climatique
S1 + Climat 2050	3,722	+0,759	+25,6 %	43/59 (73 %)	Pire cas
S2 — Restauration seule	2,751	−0,212	−7,1 %	0/59 (0 %)	Bénéfice sans contrainte climatique
S2 + Climat 2050	3,156	+0,193	+6,5 %	19/59 (32 %)	Meilleur cas réaliste

IV.8.3 Hiérarchisation des zones prioritaires d'intervention

Au regard des résultats déjà obtenu et pour donner des leviers de gestion aux politiques, une hiérarchisation des zones prioritaires en matière de gestion, de protection et de restauration écologique s'avère nécessaire. Le critère retenu croise deux conditions à savoir, les transects atteignant la classe Élevé sous dégradation, c'est-à-dire ceux dont la perte du couvert porterait le risque à son niveau le plus fort, et redescendant sous ce seuil sous restauration, donc susceptibles d'être ramenés à un niveau modéré. Vingt-quatre transects satisfont ces deux conditions. Le classement observé dans le tableau ci-dessous s'opère par écart décroissant entre les deux scénarios, cet écart mesurant directement le bénéfice attendu d'une intervention.

Ces vingt-quatre transects se répartissent en 13 dans le secteur Nord, 10 dans le secteur Central et 1 dans le secteur Sud. Dix-huit d'entre eux relèvent du Cluster 3, soit les secteurs anthropisés du centre-nord, et six du Cluster 1. L'écart moyen s'établit à 0,543 point, avec un maximum de 0,600 au transect 5 et un minimum de 0,487 au transect 14.

Il ressort de cette hiérarchisation du tableau ci-dessous, que les dix premiers rangs concentrent quatre des cinq hotspots identifiés en section IV.5.3, à savoir les transects 25, 24, 19 et 17. La priorité opérationnelle coïncide donc largement avec le diagnostic de risque actuel, ce qui simplifie la lecture

pour les gestionnaires afin de leur permettre d'intervenir sur les secteurs déjà les plus exposés produit aussi le bénéfice le plus élevé.

Tableau 23 : Hiérarchisation des vingt-quatre transects prioritaires d'intervention, classés par écart décroissant entre les scénarios de dégradation et de restauration. Source : calculs QGIS 3.x

Rang	Transect	Secteur	Profil	CRI actuel	S1	S2	Écart S1–S2
1	5	Nord	Cluster 1	3,369	3,832	3,232	0,600
2	27	Central	Cluster 1	2,972	3,427	2,834	0,594
3	49	Sud	Cluster 3	3,192	3,425	2,842	0,583
4	25	Central	Cluster 3	3,547	3,602	3,023	0,579
5	10	Nord	Cluster 1	3,121	3,501	2,925	0,576
6	24	Central	Cluster 3	3,622	3,915	3,347	0,568
7	19	Nord	Cluster 3	3,609	3,902	3,336	0,566
8	33	Central	Cluster 3	3,000	3,434	2,869	0,565
9	22	Central	Cluster 3	3,497	3,849	3,290	0,558
10	17	Nord	Cluster 3	3,541	3,828	3,273	0,555
11 à 24	12, 21, 20, 6, 30, 29, 16, 34, 18, 9, 2, 26, 13, 14	Nord et Central	Clusters 1 et 3	3,099 – 3,699	3,451 – 3,780	2,925 – 3,232	0,487 – 0,552

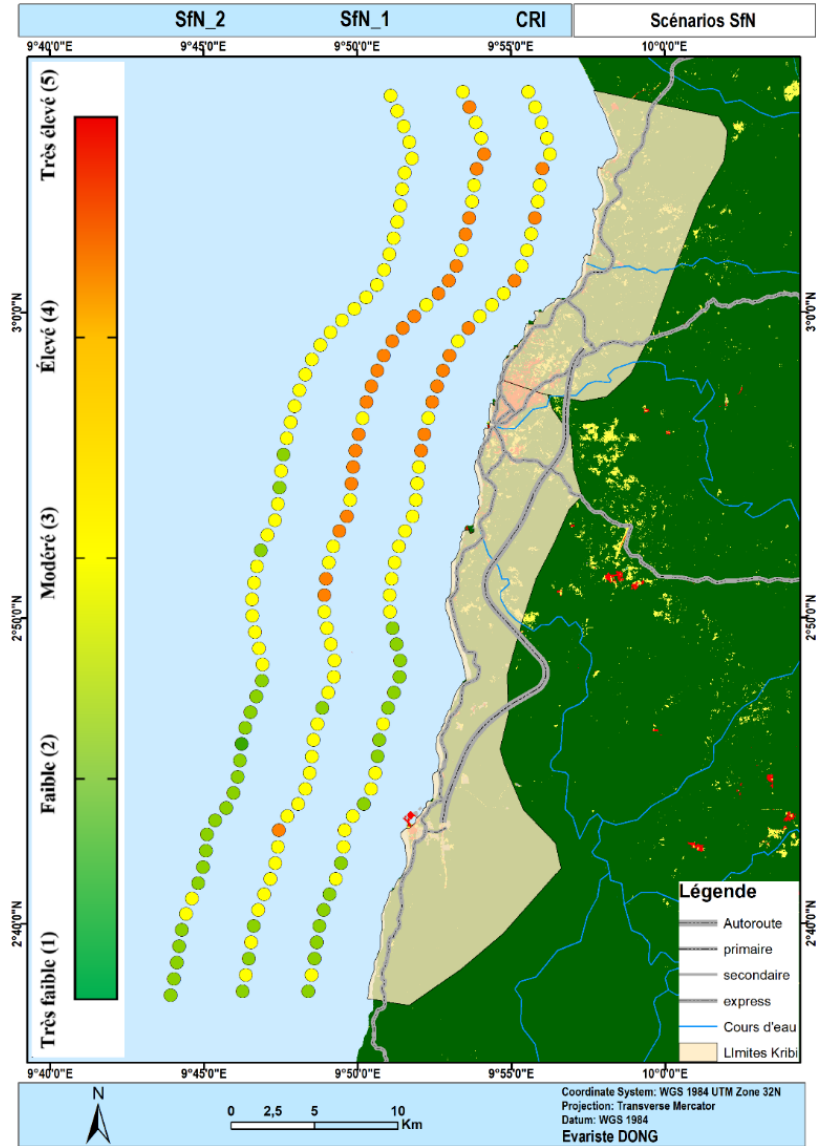


Figure 15 : Effet des scénarios de dégradation et de restauration des écosystèmes littoraux sur l'indice de risque côtier (CRI) du littoral de Kribi

V. Discussion

V.1 Un risque structuré par la vulnérabilité socio-économique

L'évaluation conduite sur les 59 transects a révélé une distribution du risque, dont la répartition spatiale est présentée en Figure 16 et dont la structure repose davantage sur les enjeux humains et économiques exposés que sur l'intensité des forçages marins. La corrélation entre le SSI et le CRI a atteint 0,855 ; quand la variance spatiale du CFI est restée marginale avec un écart-type de 0,27 sur une plage allant de 2,25 à 3,00. L'hypothèse H3 se trouve ainsi confirmée.

Ce constat mérite d'être mis en regard du cas de Kafountine. Verstraete (2025) y observait un littoral dont la majeure partie présentait un risque faible à modéré, avec des hotspots circonscrits au quai de pêche. À Kribi, les valeurs maximales se concentrent sur une bande continue de sept kilomètres et 52,5 % des transects présentent une valeur économique élevée à très élevée. La différence tient à la nature des enjeux, dans la mesure où Kafountine concentre son activité sur un point unique quand Kribi aligne sur son front de mer un port en eau profonde, un terminal à gas, une route nationale et une succession de complexes hôteliers. Ce résultat rejoint les constats dressés pour les côtes d'Afrique de l'Ouest et centrale par Dada et al. (2024), où les facteurs socio-économiques pèsent davantage sur la vulnérabilité que les variables géophysiques.

L'analyse exploratoire confirme que cette structure n'est pas fortuite. L'ACP a dégagé un premier axe expliquant 28,8 % de la variance, dominé à 78,1 % par les quatre facteurs socio-économiques ; quand la classification K-means quant à elle, a isolé un profil distinct, le Cluster 3, fort de 25 transects et d'un CRI moyen de 3,30, regroupant précisément les secteurs à forte empreinte infrastructurelle. Une conséquence méthodologique en découle, dans la mesure où sur un littoral aux forçages quasi homogènes, la faible corrélation inter-blocs justifie a posteriori le choix d'une architecture à trois sous-indices distincts plutôt qu'une agrégation directe des treize facteurs.

Une nuance mérite toutefois d'être apportée à ce diagnostic. La prééminence du SSI ne signifie pas que la dimension physique soit négligeable, mais que sa variance spatiale demeure faible à l'échelle considérée. Le PSI moyen de 3,434 dépasse en effet celui du SSI (3,170) et du CFI (2,466), ce qui en fait la composante dont le niveau absolu est le plus élevé. Simplement, elle discrimine moins, son écart-type s'établissant à 0,54 contre 0,91 pour le SSI. Autrement dit, le littoral de Kribi est physiquement susceptible dans son ensemble, mais c'est la répartition des enjeux humains qui détermine où ce risque se matérialise en enjeu de gestion. Cette distinction, que l'agrégation en un indice unique aurait masquée, constitue l'un des apports de l'architecture à trois sous-indices.

V.2 Convergence avec la perception des acteurs institutionnels

La confrontation des résultats avec les entretiens ou observations de terrain constitue un enjeu particulier pour un indice composite, dont la validité opérationnelle dépend de sa capacité à restituer une réalité perçue par ceux qui gèrent le territoire.

Trois enseignements de l'analyse quantitative appellent particulièrement une confrontation au terrain. Le premier concerne la concentration des secteurs de risque maximal sur une bande continue de sept kilomètres entre les transects 17 et 25, dont la localisation est reportée sur la Figure 16, laquelle s'étend de 2,9253° à 2,9920° de latitude Nord et de 9,9027° à 9,9283° de longitude Est. Cette délimitation, issue du calcul, demande à être confrontée à l'expérience des services techniques, qui disposent d'une connaissance fine des secteurs où les dommages se manifestent effectivement.

Le deuxième porte sur le facteur Z4, dont la classification manuelle repose sur une interprétation d'images satellitaires enrichie d'informations recueillies auprès de la Mairie. Une validation systématique transect par transect permettrait de consolider ce facteur, dont l'analyse en composantes principales a montré qu'il constitue le premier contributeur à la structuration du risque.

Le troisième concerne l'état du couvert végétal. Le calcul établit que 35 transects présentent un couvert arboré relevant de la classe 2, mais la base GCC ne renseigne ni la densité, ni l'espèce, ni l'état sanitaire de ce couvert. Les acteurs de terrain sont seuls en mesure d'indiquer si ces secteurs

correspondent à une végétation fonctionnelle ou à un couvert résiduel en cours de dégradation, distinction qui conditionne directement la validité du scénario de restauration.

La convergence sur les secteurs sensibles. Interrogée sur les portions du littoral qui lui paraissent les plus vulnérables, la Communauté urbaine de Kribi (CUK) a cité spontanément trois ensembles, soit le front de mer urbain de Mboamanga (transect 25) à Ngoye, l'axe nord vers Mpalla (transect 13) et l'axe sud industrialo-portuaire d'Ebomé (transect 26) à Lolabé (transect 52), dont la localisation figure sur la carte du risque côtier présentée à la Figure 8. Le Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable (MINEPDED) a pour sa part désigné la bande comprise entre l'embouchure de la Lobé et le littoral urbain, en mentionnant plus précisément les abords du lycée bilingue, où l'embarquement et le débarquement des pirogues dégradent la côte, ainsi que le secteur hôtelier du front de mer, situé entre les transects 17 et 25 immédiatement au sud du centre de Kribi, affecté par l'extraction de sable. Force est de constater que ces désignations recoupent la bande continue de sept kilomètres identifiée par le calcul entre les transects 17 et 25, laquelle correspond précisément au front de mer urbain. La convergence entre le diagnostic quantitatif et la perception des gestionnaires est donc établie sur le point le plus structurant des résultats.

L'ampleur du recul demeure non quantifiée localement. Si les deux administrations ont confirmé le caractère chronique de l'érosion, aucune n'a été en mesure d'en fournir une mesure. Le MINEPDED a indiqué qu'il reste difficile de quantifier les pertes en termes de recul du trait de côte, faute de dispositif de suivi. La Communauté urbaine de Kribi a rapporté en revanche des manifestations concrètes, à savoir la disparition du parc à pirogues du marché aux poissons situé au niveau du transect 21, autrefois installé sur une large plage, qui a contraint les pêcheurs à se replier sur le trottoir de l'axe routier principal. Ce constat conforte la limite exposée en V.8 quant à l'absence de données locales de calibration.

Un événement de submersion documenté. La mi-août 2023 a donné lieu à un épisode de submersion marine dont la CUK a rappelé la gravité et que la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) a documenté dans ses bulletins. Des avertissements ont été émis du 12 au 15 août 2023, annonçant des vagues supérieures à deux mètres et déconseillant les activités maritimes, la hauteur observée s'étant établie entre 1,3 et 2,5 mètres en coïncidence avec des marées hautes. Le bilan a fait état de quatre décès, tous des pêcheurs, ainsi que de dommages localisés que la presse nationale a documentés dès le 16 août 2023, à savoir la destruction de la façade d'un restaurant à Wamié (transect 22), celle de la terrasse et du bar d'un hôtel à Bwambè (transect 29), des pirogues endommagées aux chutes de la Lobé, un campement de pêcheurs entièrement rasé à Nzou (transect 19), ainsi que des arbres déracinés et des murs d'habitations effondrés à Ebomé (transect 26). Un second article paru le 21 août a signalé d'autres secteurs touchés ou fortement exposés, notamment Londji (transect 6), l'embouchure de la Lokoundjé, les abords de Mpalla (transect 13), la zone de Lolabé (transect 52), le secteur du lycée bilingue de Kribi, le marché aux poissons attenante et la Route nationale 7 (Cameroon Tribune, 2023a ; 2023b). Cet épisode illustre concrètement le mécanisme que le facteur X4 traduit à travers le niveau marin extrême, et confirme que les transects portant les infrastructures touristiques du front de mer constituent bien les secteurs les plus exposés.

L'état du couvert végétal. Le troisième enseignement appelait une appréciation des acteurs sur la fonctionnalité du couvert arboré. Le MINEPDED a confirmé que la mangrove de Mpolongwé (3,0345° N, 9,9602° E, à hauteur du transect 12), reboisée dans le cadre d'un projet financé par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, ne couvre que deux hectares. La trajectoire de ce site mérite d'être restituée dans son enchaînement, la restauration ayant d'abord réussi sur le plan technique entre 2014 et 2017 avec un taux de survie de 88 %, avant que l'insuffisance des mécanismes de protection et l'absence d'alternatives socio-économiques durables n'entraînent une reprise des pressions anthropiques, laquelle a conduit à la destruction partielle puis importante de la plantation (FAO, 2018). Trois autres sites ont été signalés, à savoir Mpalla, Mahalè et Eboundja, ce dernier faisant l'objet de travaux de recherche de l'Institut de recherche agricole pour le développement. Le MINFOF a précisé qu'aucune donnée d'étendue actuelle n'est disponible. Les deux ministères ont convergé sur les causes de dégradation des mangroves, soit la pression foncière, la croissance démographique, le prélèvement de bois pour le fumage du poisson et la fabrication des

pirogues, auxquels s'ajoute l'extraction de sable. Ces éléments valident le constat de quasi-disparition établi en IV.2 et discuté en V.3.

Le facteur Z4 et les données disponibles. La CUK a confirmé disposer du Plan Directeur d'Urbanisme et du Plan d'Occupation des Sols en format numérique, ainsi que de données d'occupation du sol intégrées à ses diagnostics d'urbanisme. Le cadastre relève en revanche du ministère compétent et n'est pas disponible sous forme numérique intégrale, ce qui explique que la classification de Z4 ait dû reposer sur une interprétation d'images enrichie des informations communales plutôt que sur une source cadastrale. Le MINHDU a par ailleurs identifié les zones d'extension urbaine projetées, notamment Bikondo, Lendi et Dombé, information qui documente qualitativement l'hypothèse de croissance démographique retenue pour le facteur Z1 prospectif.

Un contraste entre les deux communes d'arrondissement. L'entretien conduit auprès de la commune de Kribi 2e a livré un constat différent de celui de Kribi 1er, dans la mesure où cette commune, de création récente, a déclaré ne disposer d'aucune donnée topographique, cadastrale ou d'occupation du sol sous format numérique. Elle procède en revanche à des descentes de terrain dans les secteurs affectés et transmet ses constats aux administrations compétentes. Deux structures ressources ont été signalées à ce titre, à savoir la Mission d'étude pour l'aménagement de l'Océan et la délégation départementale du ministère chargé de l'habitat et du développement urbain.

Cinq sites de mangrove nommés à l'échelle communale. La commune de Kribi 2e a identifié cinq mangroves sur son ressort, situées aux quartiers Mpalla, Nziou, Londji 2, Nzami et Elabé, toutes se déversant directement en mer. Cette information précise utilement les sources nationales, lesquelles ne cartographient que les poches situées aux embouchures. Elle indique que des formations résiduelles subsistent à l'échelle du quartier sans atteindre le seuil de détection des inventaires nationaux, ce qui est cohérent avec la superficie de deux hectares relevée à Mpolongwé.

Une attribution causale au port en eau profonde. Interrogée sur les événements passés, la commune de Kribi 2e a rapporté que plusieurs épisodes d'érosion et d'inondation côtière ont été observés sur les plages des deux arrondissements lors de la construction des première et deuxième phases du port autonome, avec des conséquences qu'elle décrit comme encore visibles à ce jour. Elle a par ailleurs estimé que l'implantation du port a créé un déséquilibre dans les mangroves. Cette appréciation rejoint celle formulée par la Communauté urbaine et conforte l'hypothèse d'une modification des dynamiques sédimentaires, sans qu'aucune mesure ne permette toutefois de l'établir quantitativement.

Les secteurs cités. Aux trois ensembles déjà mentionnés s'ajoutent, pour Kribi 2e, le débarcadère du lycée au quartier Nzami, où la dégradation conjointe de la route, de la plage et de la zone de pêche a été signalée, l'érosion y ayant emporté une partie de l'estran sur lequel s'appuyait l'accostage des pirogues, de même que dans les quartiers Ngoye-Wamié, Ngoye-Présidence et Nziou (transect 19)

Une limite du dispositif. Trois des huit guides n'ont pas reçu de réponse, à savoir ceux destinés au Port Autonome de Kribi, aux organisations non gouvernementales et aux chercheurs universitaires. Le MINT a par ailleurs indiqué ne disposer d'aucun élément sur les cinq questions relatives aux données marégraphiques, aux séries climatiques longues et au référentiel vertical local. Ce résultat négatif confirme directement la limite exposée en V.8 et justifie le recours exclusif aux produits satellitaires pour les facteurs de forçage.

V.3 La quasi-disparition des mangroves : un résultat autant qu'une limite

Les mangroves du littoral de Kribi au regard des sources nationales

Trois documents officiels permettent de situer précisément l'état des mangroves de la zone d'étude et de lever l'imprécision qui pouvait subsister sur l'identification des sites concernés.

L'inventaire national conduit pour le compte du ministère chargé de l'environnement découpe le littoral camerounais en quatre zones de mangrove et attribue à chacune une superficie mesurée par couplage d'images satellitaires, de relevés au GPS et de vérifications de terrain (MINEP, 2010). La zone méridionale, dite de Kribi-Campo, s'étend du fleuve Nyong au fleuve Ntem et ne comporte que trois poches, situées aux embouchures du Nyong, de la Lokoundjé et à Campo.

Tableau 24 : Superficies des zones de mangrove du littoral camerounais. Les trois poches de la zone Kribi-Campo ne représentent ensemble que 0,6 % du couvert national. Source : MINEP (2010)

Zone de mangrove	Superficie (km ²)	Part du total national
Rio del Rey	1 694,59	61,6 %
Tiko	387,15	14,1 %
Douala	651,02	23,7 %
Embouchure du Nyong	5,17	0,2 %
Embouchure de la Lokoundjé	5,32	0,2 %
Campo	5,92	0,2 %
Total national	2 749,18	100 %

L'évaluation nationale la plus récente confirme cette marginalité et l'actualise. Sur 395 183 hectares de mangroves et de forêts côtières associées recensés au Cameroun, l'estuaire du Ntem, qui englobe l'ensemble de la zone Kribi-Campo, n'en représente que 11 083 hectares, soit 2,8 %. En mangrove pure, la part tombe à 2 354 hectares, soit 1,1 % du total national. Le document précise que cette zone se subdivise en trois sous-blocs, dont un sous-bloc de Kribi caractérisé par des poches résiduelles, et énonce qu'en dehors des embouchures de la Lokoundjé et du Ntem, les mangroves n'existent que par endroits et demeurent isolées en petites poches (MINEPDED, 2020).

La cause de cette disparition est établie par le rapport d'inventaire, qui indique que les mangroves de la zone ont été détruites par les populations pour dégager des espaces destinés essentiellement à l'habitation (MINEP, 2010). Ce constat éclaire les réponses recueillies lors des entretiens, où le prélèvement de bois pour le fumage du poisson et la fabrication des pirogues a été cité en premier lieu, alors que la pression foncière constitue le facteur déterminant à l'échelle de la zone.

Force est de constater que ces trois sources convergent avec le résultat obtenu par le traitement des données GCC, à savoir qu'un seul transect sur les cinquante-neuf relève de la classe Mangroves au titre du facteur Y5a. L'hypothèse H2 se trouve ainsi confirmée par une voie indépendante de celle du calcul.

[À FOURNIR PAR L'AUTEUR] *La carte de distribution des zones de mangrove figurant dans la Stratégie nationale de gestion durable des mangroves est à extraire et à insérer au chapitre II, avec appel dans le texte.*

La suppression du facteur Y5b a constitué un ajustement méthodologique, mais elle a documenté surtout un état de fait. Avec une superficie résiduelle n'excédant pas deux hectares sur 75 km de linéaire, les mangroves de Kribi ne présentent plus la variance spatiale minimale requise pour discriminer les transects, un seul relevant de la classe Mangroves au titre du facteur Y5a. L'hypothèse H2 se trouve confirmée, non par la mesure d'un effet mais par le constat de sa disparition. La comparaison avec Kafountine éclaire cette situation, puisque Verstraete (2025) y disposait d'un linéaire suffisant pour classer les transects selon la largeur de leur bande protectrice. L'impossibilité de reproduire ce traitement ne constitue pas une faiblesse du protocole mais un indicateur de l'état de dégradation du littoral kribien, cohérent avec le taux de recul de 0,84 %/an documenté par Mbevo Fendoung (2019) et les observations de Fongnzossi Fedoung et al. (2018).

Les entretiens institutionnels ont confirmé ce diagnostic. Il ressort de ces réponses que l'impossibilité de renseigner le facteur Y5b ne procède pas d'une lacune documentaire mais bien de l'état du milieu. Le calcul contrefactuel présenté en IV.8.1 permet toutefois de nuancer ce diagnostic. Le couvert végétal résiduel, arboré à défaut d'être constitué de mangroves, maintient le CRI moyen à 2,963 au lieu de 3,074 et évite à quatre transects de basculer en classe Élevé, celle-ci passant de 10 à 14. Il ressort de ce résultat que le premier enjeu de la politique d'adaptation n'est pas la restauration mais bien la conservation, dans la mesure où les 35 transects dont le couvert relève déjà de la classe 2 constituent un socle protecteur dont la dégradation coûterait davantage que ce que la restauration des secteurs dégradés pourrait rapporter. Cette asymétrie, visible dans les chiffres du PSI qui progresse de 1,078 point sous dégradation contre une baisse de 0,688 point sous restauration, oriente directement la hiérarchie des priorités opérationnelles.

V.4 Une aggravation prospective portée par la vulnérabilité

Le recalcul de l'indice aux trois horizons selon l'approche de Furlan et al. (2021) a fait apparaître une progression continue de l'indice de risque côtier (CRI) moyen, de 2,963 à 3,231, puis de 3,443 et 3,564. Cette trajectoire appelle trois observations.

La première concerne la répartition de l'effort entre sous-indices. L'indice de forçage côtier (CFI) porte l'essentiel de la progression initiale mais sature dès 2050. Passé cette échéance, l'aggravation provient exclusivement de l'indice de susceptibilité physique (PSI) et de l'indice de susceptibilité socio-économique (SSI). Autrement dit, la dynamique de long terme du risque côtier à Kribi dépend moins des trajectoires d'émissions que de la manière dont le territoire se transforme, soit l'érosion de la zone tampon d'une part, la croissance démographique et l'intensification des usages d'autre part.

La deuxième observation porte sur l'absence de discrimination entre trajectoires SSP, dont le constat mérite d'être lu comme un résultat plutôt que comme une limite. L'objectif initial visait à estimer l'évolution de la pression selon différents scénarios climatiques, or ce que le travail établit, c'est que l'indice n'est pas sensible aux trajectoires d'émissions à cette échelle, les écarts de SLR entre SSP demeurant inférieurs à la largeur des classes pour les facteurs X1 et X4. La conséquence opérationnelle n'en est pas négligeable, dans la mesure où pour la planification côtière à Kribi, l'incertitude sur la trajectoire d'émissions ne constitue pas un obstacle à la décision, puisque les trois trajectoires appellent les mêmes mesures aux mêmes échéances.

La troisième observation concerne la géographie de l'aggravation. Les cinq hotspots continuent de s'aggraver en valeur absolue, leur CRI moyen passant de 3,604 à 4,179, et trois d'entre eux franchissent le seuil de la classe Très élevé que nul transect n'occupait en configuration de référence. Toutefois, l'évolution la plus notable se joue ailleurs, puisque le nombre de transects en classe Élevé passe de 4 à 15 dans le secteur Central, et que le secteur Sud, indemne aujourd'hui, en compte six en 2100. Force est de constater que le risque s'intensifie là où il est déjà maximal et s'étend simultanément vers des secteurs préservés, ce que confirme le resserrement du rapport entre profils extrêmes, de 1,32 à 1,28.

V.5 Les solutions fondées sur la nature comme levier d'adaptation

Le présent mémoire, a permis de mettre en évidence le rôle actuel et potentiel des solutions fondées sur la nature dans la réduction des risques côtiers. Les résultats permettent d'y répondre en termes quantifiés sur les deux volets. Le rôle actuel s'établit à 0,111 point de l'indice de risque côtier révisé, soit 3,8 %, quand le rôle potentiel, mesuré par l'amplitude entre les deux trajectoires extrêmes, atteint 0,492 point, soit 16,6 % du CRI de référence. Lorsqu'on rapporte ces résultats au bénéfice qu'apporterait une restauration complète, le couvert existant en assure donc déjà plus de la moitié.

Les entretiens ont permis d'apprécier la faisabilité opérationnelle de ces mesures. Le MINEPDED a fait état de plusieurs dispositifs déjà engagés, à savoir la surveillance du site reboisé de Mpolongwé, des campagnes annuelles de reboisement conduites à l'occasion de la Journée mondiale de l'environnement, la distribution de foyers améliorés destinés à réduire le prélèvement de bois de mangrove, et l'adhésion du Cameroun à un programme du Programme des Nations unies pour le développement portant sur la restauration de terres dégradées. La CUK a par ailleurs signalé que la commune de Kribi 1er s'est dotée d'un plan d'action climat fixant des objectifs de reboisement des mangroves et de restauration des plages à l'horizon 2030. Ces initiatives demeurent toutefois dispersées entre administrations sectorielles, le MINEPDED ayant reconnu qu'il n'existe pas de programme coordonné de conservation sur ce littoral.

Deux éléments complètent ce tableau et répondent à la question de savoir si des projets de protection sont effectivement engagés sur ce littoral. La Stratégie nationale de gestion durable des mangroves atteste d'abord que le ministère chargé de l'environnement conduit des actions de sensibilisation et de régénération dans la zone de Kribi depuis 2009, et que son projet de reboisement de la côte Kribi-Campo a obtenu des résultats à Londji et à Campo. Le retour d'expérience de Campo Beach y est documenté, avec plus de trois mille plants mis en terre, pour moitié issus de pépinières et pour moitié

de propagules directes, et un taux de réussite supérieur à soixante pour cent malgré l'envahissement d'une partie du reboisement par la mer (MINEPDED, 2020).

La Communauté urbaine de Kribi a ensuite indiqué avoir été saisie par le ministère chargé de l'environnement en vue d'identifier un site destiné au reboisement de cinquante hectares de mangroves. Ce projet, en cours de planification à la date de l'enquête, représente vingt-cinq fois la superficie résiduelle du site de Mpolongwé. Il ressort de cette saisine que la hiérarchisation des transects prioritaires présentée au chapitre IV répond directement à la question posée aux communes, à savoir la localisation des sites de plantation.

Rapportée à la progression climatique elle-même, soit 0,480 point entre la configuration actuelle et l'horizon 2050, cette amplitude signifie que la marge d'action ouverte par la gestion des écosystèmes littoraux est du même ordre de grandeur que l'effet du changement climatique à moyen terme. La configuration combinée précise cette trajectoire, puisque sous restauration et forçage de 2050, le CRI moyen s'établit à 3,156 contre 3,443 sans intervention. La restauration compense environ 60 % de l'aggravation attendue, sans toutefois ramener l'indice sous son niveau actuel qu'il dépasse encore de 0,193 point. Ce résultat doit être énoncé sans complaisance, car les solutions fondées sur la nature atténuent le risque sans pour autant l'annuler.

L'écart résiduel appelle des mesures complémentaires. La méta-analyse de Huynh et al. (2024), conduite sur 304 études, établit que les dispositifs hybrides associant ouvrages d'ingénierie et couvert végétal procurent la plus forte réduction de l'aléa, pour un rapport bénéfice-coût de 7,18 sur vingt ans contre 6,14 pour les ouvrages employés seuls. Les épis transversaux appellent toutefois deux réserves documentées. Jayson-Quashigah et al. (2025) relèvent le transfert de l'érosion en aval des ouvrages sur les projets de Keta et d'Ada au Ghana, tout en montrant que l'implantation de mangroves à leurs abords atténue précisément cet effet. Hagedoorn et al. (2021) établissent par ailleurs, sur le delta de la Volta, un rendement des épis inférieur à celui du rechargement sédimentaire pour des charges d'entretien supérieures. Au regard du caractère chronique de l'érosion documenté à Kribi par Mbevo Fendoung et al. (2022), l'ingénierie lourde ne se justifie que sur les dix transects portant les infrastructures stratégiques, les douze transects des secteurs susceptibles d'être ramenés sous le seuil critique par la restauration, relevant de la seule restauration végétale. Force est de constater que cette différenciation limite l'investissement en génie civil à moins d'un cinquième du linéaire. Les auteurs de la méta-analyse mettent toutefois en garde contre la transposition de ces dispositifs aux contextes du Sud, où ils demeurent insuffisamment testés.

La hiérarchisation présentée en section IV.8 traduit ce constat en priorités. Les vingt-quatre transects retenus se concentrent dans les secteurs Nord et Central, dix-huit d'entre eux relevant du Cluster 3 (figure 13), soit les secteurs anthropisés où une susceptibilité physique modifiable coïncide avec une vulnérabilité socio-économique élevée. Le Cluster 4, fort de trois transects de plages larges dépourvues de protection naturelle, constitue par ailleurs un cas particulier, dans la mesure où sa susceptibilité demeure significative malgré des forçages minimaux et une valeur économique faible, précisément en raison de l'absence de couvert. Il ressort de cette différenciation par profil que les mesures ne peuvent être uniformes, avec une conservation prioritaire dans le Cluster 1, une restauration ciblée dans le Cluster 3, un boisement pionnier dans le Cluster 4 et une veille dans le Cluster 2 dont la progression relative demeure pourtant la deuxième plus forte.

Il convient enfin de rappeler que les scénarios retenus représentent des états extrêmes, à savoir la dégradation totale et la restauration maximale, qui encadrent la plage des futurs possibles sans en constituer des projections. Ils indiquent un ordre de grandeur et une hiérarchie, non une trajectoire attendue.

Un dernier élément mérite d'être inséré au débat à savoir l'analyse conduite en section IV.8 qui établit que les dix premiers rangs de la hiérarchisation concentrent quatre des cinq hotspots identifiés en configuration de référence (figure 8). Cette coïncidence entre diagnostic actuel et priorité d'intervention ne va pas de soi, car elle aurait pu être démentie si les secteurs les plus exposés avaient été précisément ceux dont le couvert est déjà irrémédiablement perdu. Tel n'est pas le cas, dans la mesure où les transects 25, 24, 19 et 17 présentent tous une marge d'amélioration significative, comprise entre 0,555 et 0,579 point. Il ressort de ce constat que la restauration écologique n'arrive

pas trop tard sur les secteurs les plus critiques du littoral de Kribi, résultat qui constitue sans doute le message le plus directement actionnable de ce travail.

V.6 Apports méthodologiques par rapport au protocole de Kafountine

Ce travail a apporté plusieurs contributions au cadre dont il s'inspire. La première concerne l'intégration d'une dimension portuaire et pétrolière dans le facteur Z4, sachant l'étude réalisée au Sénégal était appliquée à un littoral dont les usages relèvent de la pêche artisanale et du tourisme ne prévoyant pas de distinguer les infrastructures stratégiques d'importance nationale. La deuxième est d'ordre technique, dans la mesure où l'échantillonnage de l'occupation du sol au centroïde des transects a produit 51 % de valeurs « eau », difficulté résolue par le recours au champ renseignant l'occupation au premier pic côtier terrestre, solution reproductible sur tout littoral à topographie intertidale complexe. La troisième relève de la prospective elle-même, puisque Verstraete (2025) n'intégrait pas de scénarios futurs quand le présent travail articule une prospective climatique à trois horizons avec deux scénarios écologiques contrastés et propose une lecture combinée des deux dimensions.

Une quatrième contribution mérite d'être signalée, de nature négative mais non moins utile. En établissant que les trois trajectoires d'émissions produisent des configurations de risque identiques aux horizons 2030 et 2050, ce travail documente une limite de sensibilité du cadre CVI qui n'apparaît pas dans la littérature appliquée, laquelle rapporte généralement des résultats par scénario sans vérifier qu'ils diffèrent effectivement. La transposition du protocole de Kafountine à un contexte où les forçages sont quasi homogènes révèle ainsi une propriété du cadre méthodologique lui-même, à savoir que sa capacité de discrimination dépend moins de la précision des projections mobilisées que de la largeur des classes retenues pour les traduire.

V.7 Portée opérationnelle et outil d'aide à la décision

Sur le plan opérationnel, le protocole attend la production d'un outil d'aide à la décision utile à la planification côtière. Trois livrables y concourent. La couche SIG des 59 transects, portant les treize facteurs, les six indices ainsi que les configurations prospectives et SfN, constitue le support technique directement mobilisable par les services de la Mairie. La hiérarchisation du Tableau 22 fournit une liste ordonnée de secteurs d'intervention, assortie du bénéfice attendu pour chacun. La fiche pratique destinée à la Mairie de Kribi, jointe en Annexe D, restitue enfin ces résultats sous une forme accessible aux décideurs non spécialistes. Force est de constater que l'utilité de cet ensemble dépendra de son appropriation, car un indice composite ne vaut que par les décisions qu'il éclaire.

Cette attente a été confirmée sur le terrain. Interrogée sur le type de résultat qui lui serait le plus utile, la CUK a répondu que la hiérarchisation des secteurs prioritaires constitue le livrable le plus immédiatement mobilisable, dans la mesure où elle traduit les données techniques en plan d'action budgétaire et permet aux élus de savoir où intervenir en premier avec des moyens limités. Elle a précisé que la combinaison de cette hiérarchisation avec une carte des zones sensibles offre à la fois la cible géographique et l'ordre des travaux. Le Tableau 20 et l'Annexe D répondent donc à une demande formulée par le commanditaire local, et non à une hypothèse d'utilité.

Le croisement des configurations de référence, prospective et SfN permet de dégager une clé de lecture opérationnelle en trois catégories. Dix transects relèvent déjà de la classe Élevé en configuration actuelle et appellent des mesures de protection immédiates, qui ne relèvent pas nécessairement des solutions fondées sur la nature, car sur des secteurs portant des infrastructures stratégiques, la combinaison d'un couvert restauré et d'ouvrages de protection sera souvent nécessaire. Douze transects basculent en classe Élevé sous l'effet climatique de 2050 mais reviennent sous ce seuil dans la configuration de restauration, ce qui en fait le cœur de cible des solutions fondées sur la nature. Les trente-sept transects restants demeurent sous le seuil critique dans toutes les configurations et relèvent d'une logique de préservation, à coût très faible mais dont le calcul contrefactuel montre qu'elle n'est pas sans effet.

Cette différenciation par catégorie répond à une exigence formulée dans les objectifs de ce travail, à savoir, et est croisée au chapitre VI avec la typologie en quatre profils issus de la classification K-means, de manière à produire des recommandations spécifiques plutôt qu'un jeu de mesures uniformes.

V.8 Limites méthodologiques

Plusieurs limites doivent être documentées. La première tient à la résolution des produits mobilisés pour les forçages, les grilles CMEMS et ERA5 à 0,125° soit environ quatorze kilomètres ne permettant aucune différenciation locale sur 75 km de linéaire, d'où la quasi-uniformité de X1, X2 et X3 et le pouvoir discriminant réduit du CFI. L'absence de données marégraphiques locales, avec l'entretien avec les services de la Météorologie du Ministère des Transports du département de l'Océan n'ayant pas permis d'acquérir ces informations, ainsi que celui avec le service en charge au port de Kribi n'ayant pas abouti ; cela a imposé de s'en remettre exclusivement aux données satellitaires.

La deuxième limite concerne l'absence de pondération différenciée entre facteurs. Le choix d'une agrégation par moyenne non pondérée suit la pratique de Verstraete (2025), mais il suppose que les treize facteurs contribuent également au risque, hypothèse que l'ACP contredit partiellement puisque les quatre facteurs socio-économiques assurent 78,1 % de la contribution au premier axe. Une pondération dérivée de ces contributions constituerait une piste d'amélioration, à condition d'être appliquée de façon homogène à la configuration de référence et aux configurations prospectives.

La troisième limite porte sur la sélection des facteurs projetés, soit cinq sur treize, faute de sources vérifiables pour les autres. Il en résulte un biais structurel, la susceptibilité physique n'évoluant que par le seul facteur Y4. De la même façon, les scénarios SfN ne modifient que trois facteurs et ne prennent pas en compte l'effet documenté des mangroves sur l'exposition effective des populations (Menéndez et al., 2020), les facteurs Z mesurant des caractéristiques structurelles et non des niveaux d'exposition réels.

La quatrième limite tient à la reclassification des facteurs en amont du calcul. Ramener chaque facteur à une classe entière fait perdre l'information là où deux transects proches d'un même seuil se voient attribuer des classes différentes, tandis qu'un écart important à l'intérieur d'une même classe demeure invisible. Cette limite, inhérente aux indices composites ordinaux, se retrouve chez Gornitz (1991) comme chez Verstraete (2025), et affecte particulièrement les configurations prospectives. La cinquième limite est celle du caractère extrême des scénarios écologiques, dont les états intermédiaires exigeraient une caractérisation fine de chaque transect que les données disponibles ne permettent pas.

Une limite plus spécifique tient à l'inadéquation entre l'amplitude des classes de référence et celle des projections mobilisées, une difficulté qui affecte particulièrement les facteurs X1 et X4. Les seuils de classification du niveau marin extrême ont été établis par la méthode de Jenks sur l'amplitude observée du TWL actuel, laquelle ne s'étend que de 1,150 à 1,264 m, de sorte que chaque classe couvre environ 2 centimètres quand les valeurs de SLR ajoutées s'échelonnent de 9 à 77 centimètres. Il en résulte une saturation immédiate et totale du facteur, les 59 transects franchissant dès 2030 et sous la trajectoire la plus favorable le seuil supérieur de 1,239 m pour ne plus en redescendre. L'indice cesse dès lors d'enregistrer toute évolution alors que le niveau marin extrême continue de progresser jusqu'à 2,034 m sous SSP5-8.5 en 2100, soit un écart de 0,68 m invisible dans le résultat. Le facteur X1 subit le même sort, l'amplitude de 3,14 mm/an séparant les taux projetés à cet horizon étant entièrement absorbée par la classe 5. Force est de constater que cette limite touche à la nature même de ce que l'indice restitue, puisqu'une élévation de 0,7 m ne modifie pas seulement le degré d'exposition d'un transect mais l'étendue des surfaces atteintes en cas de submersion. Les résultats prospectifs doivent donc être lus comme indiquant l'atteinte d'un seuil critique, non l'ampleur de son dépassement, une classification établie sur l'amplitude conjointe des valeurs actuelles et projetées permettant de lever cette limite au prix d'une perte de comparabilité avec la configuration de référence et avec Verstraete (2025).

Une dernière limite tient au périmètre spatial retenu. L'analyse porte sur 75 km de linéaire correspondant aux deux communes de Kribi, découpage administratif et non morphologique. Or les processus sédimentaires qui gouvernent l'érosion à Kribi, notamment la dérive littorale et les modifications induites par les ouvrages portuaires, s'exercent à une échelle plus large. Les transects situés aux limites nord et sud de l'emprise subissent donc des influences dont les sources ne sont pas capturées par l'analyse. Cette limite, inhérente à tout découpage administratif appliqué à un système physique continu, invite à interpréter avec prudence les valeurs des transects extrêmes du jeu de données.

VI. Conclusion et recommandations

Le présent mémoire dans son développement a permis de démontrer que le littoral de Kribi présente une vulnérabilité côtière hétérogène et significative face à l'élévation du niveau de la mer. Dix transects sur 59, soit 16,9 %, relèvent de la classe Élevé en configuration de référence et trente-trois de la classe Modéré, pour un CRI moyen de 2,963 sur une échelle de 1 à 5 et un maximum de 3,699 au transect 20. Cette exposition, bien réelle, justifie une stratégie d'adaptation prioritaire à l'échelle de la ville.

Les trois hypothèses formulées dans la partie introductive se trouvent de ce fait confirmées, chacune par un résultat distinct. La distribution hétérogène du risque annoncée par la première apparaît dans le gradient nord-sud, le secteur nord atteignant 3,222 contre 2,625 au sud, ainsi que dans la concentration de cinq hotspots entre les transects 17 et 25. La deuxième, relative à la disparition des mangroves, se vérifie non par la mesure d'un effet mais par le constat de son absence au vue de la superficie résiduelle n'excédant pas deux hectares sur 75 km de linéaire et un seul transect relevant encore de la classe Mangroves. La troisième, enfin, se confirme par la corrélation de 0,855 entre le SSI et le CRI et par la contribution de 78,1 % des quatre facteurs socio-économiques au premier axe de l'analyse en composantes principales.

À la question centrale, qui appelait à identifier les secteurs les plus sensibles et à évaluer la contribution des solutions fondées sur la nature ; ce travail apporte une double réponse. Vingt-quatre transects prioritaires ont été identifiés puis hiérarchisés, dont treize dans le secteur Nord et dix dans le secteur Central. Par ailleurs, l'amplitude de 0,492 point séparant les trajectoires de dégradation et de restauration établit que la gestion des écosystèmes littoraux ouvre une marge d'action du même ordre de grandeur que l'effet du changement climatique à l'horizon 2050. Un calcul contrefactuel a montré en outre que le couvert végétal résiduel assure déjà plus de la moitié du bénéfice qu'apporterait une restauration complète, ce qui place la conservation avant la restauration dans l'ordre des priorités. Au regard de ces résultats, les recommandations suivantes sont adressées à la Mairie de Kribi et aux acteurs de la gestion littorale. Elles sont différenciées selon les caractéristiques des secteurs plutôt qu'appliquées uniformément au linéaire.

Sur les dix transects relevant déjà de la classe Élevé, qui concentrent les infrastructures stratégiques du front de mer, il convient de :

- intégrer la contrainte de risque côtier dans les documents d'urbanisme, en particulier le Plan Directeur d'Urbanisme, les Plans d'Occupation des Sols ainsi que les Plans de Secteur, afin de limiter l'extension de l'habitat et des activités économiques sur les transects 17 à 25 ;

Ces mesures s'inscrivent dans un contexte réglementaire lacunaire. Le MINEPDED a en effet indiqué qu'aucun décret d'application ne met en œuvre les dispositions de la loi-cadre de 1996 relatives à la protection du littoral, et qu'il n'existe pas de document national de gestion intégrée des zones côtières, seule une stratégie sectorielle consacrée à la mangrove ayant été adoptée. L'élaboration d'un cadre communal de gestion du trait de côte, adossé aux documents d'urbanisme existants, constituerait dès lors une réponse à portée immédiate en attendant que le niveau national se dote d'instruments contraignants.

- engager un dialogue avec le Port Autonome de Kribi sur les mesures de protection face à l'érosion accélérée par les modifications de la dynamique sédimentaire ;

- mettre en place un dispositif de surveillance incluant des relevés périodiques du trait de côte.

Sur les douze transects susceptibles d'être ramenés sous le seuil critique par la restauration, qui basculent en classe Élevé sous l'effet climatique de 2050 mais reviennent sous ce seuil en cas de restauration, il convient de :

- lancer un programme de restauration des mangroves dans les secteurs estuariens de la Lobé et de la Kienké, en y associant les communautés de pêcheurs et les acteurs de la conservation;
- engager un boisement pionnier sur les trois transects du Cluster 4, dépourvus de tout couvert et relevant à ce titre d'une logique distincte de la restauration proprement dite.

Sur les trente-sept transects restants, qui demeurent sous le seuil critique dans toutes les configurations examinées, il convient de :

- préserver le couvert existant, mesure à coût très faible dont le rendement dépasse celui de toute intervention nouvelle ;
- conduire une évaluation précise de la superficie des mangroves résiduelles par classification d'images Sentinel-2, afin de disposer d'une cartographie de référence pour le suivi.

Force est de constater que la fenêtre d'action utile se situe dans les vingt-cinq prochaines années avec l'essentiel des basculements de classe intervenant avant 2050. Un réexamen du CRI à échéance quinquennale, mobilisant la couche SIG produite par ce travail, permettrait de vérifier si la trajectoire observée s'écarte des projections retenues et d'ajuster les priorités en conséquence.

Plusieurs prolongements méritent enfin d'être envisagés. À court terme, une validation terrain par relevés GPS de la position du trait de côte permettrait de calibrer les données GCC sur les transects présentant des indicateurs d'extraction problématiques. À moyen terme, trois pistes se dégagent soient :

- l'introduction d'une pondération des facteurs dérivée des contributions de l'analyse en composantes principales, appliquée de manière homogène à toutes les configurations afin d'en préserver la comparabilité ;
- l'élargissement du nombre de facteurs projetés dès que des projections régionalisées de hauteur de vagues et d'évolution du trait de côte seront disponibles pour le Golfe de Guinée et ;
- la substitution aux scénarios écologiques extrêmes de trajectoires intermédiaires calibrées sur l'état réel de chaque transect.

À plus long terme, l'extension de la démarche à l'ensemble du littoral camerounais, de Campo à l'estuaire du Wouri, permettrait de replacer le cas de Kribi dans une hiérarchie nationale des priorités d'adaptation et d'apprécier dans quelle mesure les enseignements dégagés ici valent pour d'autres configurations littorales de la région.

Bibliographie

- Alcántara-Carrió J., Albarracín M., Montoya-Montes I., Corbí H. et Goy J.L., 2024. Coastal risk assessment: A review of methods and their application to the Spanish Mediterranean coast. *Ocean & Coastal Management*, 248, 106945. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.106945>
- Alongi D.M., 2015. The impact of climate change on mangrove forests. *Current Climate Change Reports*, 1(1), 30–39. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0002-x>
- Athanasiou P., van Dongeren A., Pronk M., Giardino A., Vousdoukas M. et Ranasinghe R., 2024a. Global Coastal Characteristics (GCC): a global dataset of geophysical, hydrodynamic, and socioeconomic coastal indicators. *Earth System Science Data*, 16, 3433–3452. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3433-2024>
- Athanasiou P., van Dongeren A., Pronk M., Giardino A., Vousdoukas M. et Ranasinghe R., 2024b. Global database of Coastal Characteristics (GCC) [jeu de données]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8200199>
- Braun V. et Clarke V., 2006. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- BUCREP, 2010. Rapport de présentation des résultats définitifs du 3ème Recensement général de la population et de l'habitat du Cameroun. Bureau central des recensements et des études de population, Yaoundé
- Cameroon Tribune, 2023a. Kribi : les dégâts de la furie des vagues. Édition du 16 août 2023, Yaoundé (article de presse).
- Cameroon Tribune, 2023b. Littoral de Kribi : les secteurs affectés par la houle exceptionnelle. Édition du 21 août 2023, Yaoundé (article de presse).
- Cardona O.D., van Aalst M.K., Birkmann J., Fordham M., McGregor G., Perez R., Pulwarty R.S., Schipper E.L.F. et Sinh B.T., 2012. Determinants of risk: exposure and vulnerability. In : Field C.B. et al. (dir.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, Cambridge, 65–108. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005>
- Cosby A.G., Lebakula V., Smith C.N., Wanik D.W., Bergene K., Rose A.N., Swanson D. et 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., Gbenro S., Durojaiye A. et Adebola A., 2024. Coastal vulnerability assessment of West African coasts to sea-level rise. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 421. <https://doi.org/10.3390/jmse12030421>
- FAO, 2018. Restauration des écosystèmes de mangrove au Cameroun : bilan et enseignements. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Fongnzossi Fedoung E., Sonwa D.J., Kemeuze V. et Mengelt C., 2018. Assessing climate change vulnerability and local adaptation strategies in adjacent communities of the Kribi-Campo coastal ecosystems, South Cameroon. *Urban Climate*, 24, 1037–1051. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.007>
- Fox-Kemper B., Hewitt H.T., Xiao C. et al., 2021. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In : Masson-Delmotte V. et al. (dir.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Furlan E., Dalla Pozza P., Michetti M., Torresan S., Critto A. et Marcomini A., 2021. Development of a Multi-Dimensional Coastal Vulnerability Index: Assessing vulnerability to inundation scenarios in the Italian coast. *Science of the Total Environment*, 772, 144650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144650>
- Gornitz V., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(4), 379–398. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90173-O](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O)

- Hagedoorn L.C., Appeaning Addo K., Koetse M.J., Kinney K. et van Beukering P.J.H., 2021. Angry waves that eat the coast: An economic analysis of nature-based and engineering solutions to coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, 214, 105945. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105945>
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C. et Neal J., 2022. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Hulskamp R., Luijendijk A., van Maren B., Moreno-Rodenas A. et Aarninkhof S., 2023. Global distribution and dynamics of muddy coasts. *Nature Communications*, 14, 8259. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43819-6>
- Huynh L.T.M., Su J., Wang Q., Stringer L.C., Switzer A.D. et Gasparatos A., 2024. Meta-analysis indicates better climate adaptation and mitigation performance of hybrid engineering-natural coastal defence measures. *Nature Communications*, 15, 2870. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46970-w>
- Institut National de la Statistique du Cameroun (INS), 2021. Annuaire Statistique de la Région du Sud, édition 2021. INS, Yaoundé. Disponible sur : www.statistics-cameroon.org
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jayson-Quashigah P.-N., Staneva J., Chen W., Djath B., Mahu E. et Appeaning Addo K., 2025. Evaluating mangroves as nature-based solutions for coastal protection under current and future sea level rise scenarios. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1526082. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1526082>
- López Royo M., Roque C. et Bertolín C., 2016. Coastal Vulnerability Index applied to a mixed rocky-sandy shoreline. *Journal of Coastal Research*, 75, 564–568. <https://doi.org/10.2112/SI75-113.1>
- Mahapatra M., Ramakrishnan R. et Rajawat A.S., 2015. Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India. *Natural Hazards*, 76(1), 139–159. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1491-y>
- Mbevo Fendoung P., 2019. Gestion des risques naturels sur le littoral camerounais : cas de l'érosion côtière à Cap Cameroun et à Kribi. Mémoire Ms GRCA, Université de Liège. <http://hdl.handle.net/2268.2/8241>
- Mbevo Fendoung P., Tchindjang M. et Hubert-Ferrari A., 2022. Weakening of Coastlines and Coastal Erosion in the Gulf of Guinea: The Case of the Kribi Coast in Cameroon. *Land*, 11(9), 1557. <https://doi.org/10.3390/land11091557>
- Mbevo Fendoung P., Mvogo Moto F.A. et Makuate M.B., 2024. Impacts of land use change on urban heat islands in Kribi. *European Scientific Journal*, 20(35), 190. <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n35p190>
- Menéndez P., Losada I.J., Torres-Ortega S., Narayan S. et Beck M.W., 2020. The Global Flood Protection Benefits of Mangroves. *Scientific Reports*, 10, 4404. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6>
- MINEP, 2010. Études préliminaires de la deuxième phase du projet de conservation et de gestion participative des écosystèmes de mangrove au Cameroun. Rapport final. Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, Yaoundé. <http://hdl.handle.net/1834/5226>
- MINEPDED, 2017. Les mangroves du Cameroun : état des lieux et gestion. Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable et Réseau des Chercheurs sur les Mangroves, Yaoundé
- MINEPDED, 2018. Stratégie nationale de gestion durable des mangroves et des écosystèmes côtiers au Cameroun. Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement

- Durable, avec l'appui du Fonds pour l'environnement mondial et de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Yaoundé
- Narayan S., Beck M.W., Reguero B.G., Losada I.J., Van Wesenbeeck B., Pontee N., Sanchirico J.N., Ingram J.C., Lange G.M. et Burks-Copes K.A., 2016. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLOS ONE*, 11(5), e0154735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154735>
- NCCOS — National Centers for Coastal Ocean Science, 2023. Research reveals the potential of Nature-Based Solutions for increasing resilience to sea level rise. NOAA. Disponible sur : <https://coastalscience.noaa.gov/news/nbs-increasing-resilience-to-slr/>
- Nicholls R.J. et Cazenave A., 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517–1520. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>
- Poulter B. et Halpin P.N., 2008. Raster modelling of coastal flooding from sea-level rise. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(2), 167–182. <https://doi.org/10.1080/13658810701371858>
- Rocha C., Antunes C. et Catita C., 2023. Coastal indices to assess sea-level rise impacts — A brief review of the last decade. *Ocean & Coastal Management*, 237, 106536. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106536>
- Sakho I., Sadio M., Camara I., Noblet M., Seck A., Saengsupavanich C., Ndour A. et 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>
- Temmerman S., Meire P., Bouma T.J., Herman P.M.J., Ysebaert T. et De Vriend H.J., 2013. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 504(7478), 79–83. <https://doi.org/10.1038/nature12859>
- UICN, 2020. Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature. Cadre accessible pour la vérification, la conception et la mise à l'échelle des SfN. 1re éd. UICN, Gland, Suisse. Disponible sur : <https://portals.iucn.org/library/node/49072> (rapport institutionnel sans DOI)
- UN DESA, 2022. World Population Prospects 2022. United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York. Disponible sur : <https://population.un.org/wpp/>
- UNDRR, 2017. Technical guidance for monitoring and reporting on progress in achieving the global targets of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Nations Unies, Genève
- USGS, 2001. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise. U.S. Geological Survey. Disponible sur : <https://www.usgs.gov>
- Verstraete B., 2025. 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 de Master en sciences géographiques, orientation Global Change, Université de Liège, 125 p. <http://hdl.handle.net/2268.2/23960>
- Vousdoukas M.I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Verlaan M. et Feyen L., 2018. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 6(3), 1–12. <https://doi.org/10.1002/2017EF000714>
- Vousdoukas M.I., Ranasinghe R., Mentaschi L., Plomaritis T.A., Athanasiou P., Luijendijk A. et Feyen L., 2020. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10, 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>
- Vousdoukas M.I., Almeida L.P., Dodet G. et al., 2023. Mitigating coastal flooding through beach management. *Nature Communications*, 14, 3169. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38942-1>

Utilisation de l'intelligence artificielle

Conformément aux directives de l'Université de Liège et aux instructions du guide d'élaboration du TFE Ms GRCA, ce texte précise la nature et les limites de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le cadre de ce travail.

L'outil d'intelligence artificielle Claude (Anthropic, modèle Sonnet) a été mobilisé dans plusieurs dimensions de ce travail. Il a assisté le traitement des données SIG notamment la formulation des expressions CASE WHEN dans la calculatrice de champs QGIS et la vérification des seuils Jenks calculés à partir des données réelles. Il a contribué à la structuration de la démarche méthodologique et à la mise en forme des tableaux de classification. Il a également soutenu la rédaction de certaines sections du mémoire, notamment la formalisation des équations, la construction des tableaux de résultats et la mise en cohérence de la structure avec le guide TFE.

En revanche, l'ensemble des choix méthodologiques notamment la suppression de Y5b, les ajustements des seuils de classification au regard des distributions réelles, la correction manuelle de Z4, la construction des scénarios SfN a résulté de décisions autonomes fondées sur l'analyse critique des données, des entretiens institutionnels et des orientations de la promotrice Aurélia HUBERT Ferrari. Les analyses statistiques, le traitement SIG et la cartographie furent réalisés personnellement dans QGIS, ArcGIS et R.

L'utilisation de l'IA respecta la charte ULiège d'utilisation des intelligences artificielles génératives dans les travaux universitaires (<https://www.student.uliege.be/faq-student-charte-uliege-d-utilisation-des-intelligences-artificielles-generatives>).

ANNEXES

Annexe A — Guides d'entretien institutionnels (Q1 à Q8)

Les huit guides reproduits ci-après furent élaborés dans le cadre du protocole de stage et administrés de façon semi-directive auprès des acteurs institutionnels du littoral de Kribi. Chaque guide s'ouvre sur un rappel de l'objectif poursuivi, suivi d'un recueil du consentement, puis des questions organisées par thème. Les lignes pointillées correspondent aux espaces de prise de notes prévus sur les exemplaires de terrain.

Formule d'ouverture recommandée. « Mon mémoire porte sur la sensibilité et la vulnérabilité du littoral de Kribi à l'élévation du niveau de la mer. L'objectif est d'identifier les secteurs les plus exposés, de mieux comprendre les enjeux humains et environnementaux, et de réfléchir au rôle que pourraient jouer les solutions fondées sur la nature dans la réduction des risques. »

Q1 — Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable (MINEPDED)

Objectif de l'entretien. Recueillir des informations sur les mesures de protection environnementale et côtière existantes, les programmes de conservation des mangroves et les stratégies d'adaptation au changement climatique mises en œuvre ou planifiées sur le littoral de Kribi.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur

1. Quelle est votre fonction au sein du MINEPDED et depuis combien de temps occupez-vous ce poste ?

2. Êtes-vous directement impliqué(e) dans la gestion ou la surveillance du littoral de Kribi ?

B. État des lieux des mesures de protection côtière

3. Quelles sont les mesures de protection environnementale actuellement en place sur le littoral de Kribi (réglementations, zones protégées, programmes de surveillance) ?

4. Des programmes spécifiques de conservation ou de restauration des mangroves ont-ils été mis en œuvre à Kribi ou dans sa région ? Si oui, lesquels et avec quels résultats observés ?

5. Des événements de submersion, d'érosion ou d'inondation côtière ont-ils été documentés officiellement sur le littoral de Kribi au cours des 30 dernières années ? Si oui, pouvez-vous décrire les zones affectées ?

C. Stratégies d'adaptation au changement climatique

6. Existe-t-il une stratégie nationale ou régionale d'adaptation au changement climatique qui s'applique spécifiquement aux zones côtières du Cameroun ? Comment est-elle déclinée localement à Kribi ?

7. Les solutions fondées sur la nature (SfN) — telles que la restauration des mangroves, la protection des dunes ou des zones humides — sont-elles intégrées dans les politiques d'adaptation du MINEPDED ?

D. Projets futurs et données disponibles

8. Quels projets de protection ou de gestion du littoral de Kribi sont actuellement en cours de planification ou de financement au niveau du MINEPDED ?

9. Le MINEPDED dispose-t-il de données environnementales sur le littoral de Kribi (cartographies, rapports de surveillance, études d'impact) accessibles dans le cadre de cette recherche ?

E. Observations complémentaires

10. Y a-t-il d'autres informations, acteurs ou documents que vous recommanderiez de consulter dans le cadre de cette recherche sur les risques côtiers et les SfN à Kribi ?

Q2 — Ministère des Forêts et de la Faune (MINFOF)

Objectif de l'entretien. Documenter l'état de conservation des mangroves et autres écosystèmes côtiers du littoral de Kribi, identifier les zones sous statut de protection et les programmes de reboisement en cours ou planifiés.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur

1. Quelle est votre fonction au MINFOF et quel est votre domaine de compétence géographique ?

B. État des mangroves et écosystèmes côtiers

2. Quelle est l'étendue approximative des mangroves sur le littoral de Kribi et dans ses environs immédiats ? Leur superficie a-t-elle évolué au cours des 30 dernières années ?

3. Certaines zones de mangroves du littoral de Kribi bénéficient-elles d'un statut de protection officiel (forêt classée, réserve, aire protégée) ?

4. Quelles sont les principales pressions observées sur les mangroves du littoral de Kribi (déforestation, urbanisation, exploitation, pollution) ?

C. Programmes de conservation et de reboisement

5. Des programmes de reboisement ou de restauration de mangroves ont-ils été mis en œuvre à Kribi ? Si oui, sur quelle superficie et avec quels résultats ?

6. Le MINFOF collabore-t-il avec des ONG, des bailleurs internationaux ou des communautés locales dans la gestion des mangroves de Kribi ? Si oui, lesquels ?

D. Données disponibles et projets futurs

7. Le MINFOF dispose-t-il de cartographies des mangroves et zones humides du littoral de Kribi ? Ces données sont-elles accessibles dans le cadre de cette recherche ?

8. Quels projets de conservation ou de restauration des écosystèmes côtiers sont planifiés à Kribi ou dans la région du Sud à court ou moyen terme ?

E. Observations complémentaires

9. Y a-t-il d'autres informations ou acteurs clés à consulter concernant la gestion des mangroves et des écosystèmes côtiers de Kribi ?

Q3 — Ministère des Transports — Direction de la Météorologie Nationale

Objectif de l'entretien. Identifier et obtenir les données hydrométéorologiques disponibles sur la zone côtière de Kribi (niveaux marins, courants, surcotes, vents, précipitations) sur les 30 dernières années, en vue de calibrer et valider la modélisation spatiale de l'exposition côtière.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur

1. Quelle est votre fonction au sein de la Direction de la Météorologie Nationale et quel est votre domaine de spécialisation ?

B. Disponibilité des données hydrométéorologiques

2. La Direction de la Météorologie dispose-t-elle de données sur les niveaux marins observés à Kribi ou sur le littoral camerounais méridional ? Si oui, sur quelle période ?

3. Des données sur les surcotes marines (élévation exceptionnelle du niveau de la mer lors d'événements climatiques extrêmes) ont-elles été enregistrées à Kribi ou dans ses environs ?

4. Quelles autres données hydrométéorologiques sont disponibles pour la zone de Kribi sur les 30 dernières années ? (cochez et précisez)

5. Ces données sont-elles stockées sous format numérique (fichiers Excel, CSV, base de données SIG) ou uniquement en format papier ?

6. Quelles sont les conditions d'accès à ces données dans le cadre d'une recherche académique (démarche administrative, délai, coût éventuel) ?

C. Évolution du niveau marin et tendances observées

7. Avez-vous observé ou documenté une tendance à la hausse du niveau marin sur le littoral de Kribi au cours des 30 dernières années ?

8. Des événements climatiques extrêmes ayant affecté le littoral de Kribi (tempêtes, fortes houles, inondations côtières) ont-ils été documentés ? Si oui, lesquels et à quelles dates ?

D. Collaboration et projets futurs

9. La Direction de la Météorologie collabore-t-elle avec des institutions internationales (NOAA, OMM, CMEMS) pour l'acquisition ou le partage de données sur les niveaux marins du Golfe de Guinée ?

10. Y a-t-il des projets en cours ou planifiés pour améliorer la surveillance hydrométéorologique du littoral camerounais, notamment dans la zone de Kribi ?

Q4 — Ministère de l'Habitat et du Développement Urbain (MINHDU)

Objectif de l'entretien. Identifier les projets d'aménagement urbain futurs sur le littoral de Kribi, accéder aux Plans Directeurs d'Urbanisme et aux schémas d'aménagement, afin de croiser les zones d'extension urbaine planifiées avec les zones exposées à la submersion marine.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur

1. Quelle est votre fonction au MINHDU et quel est votre périmètre d'intervention sur la ville de Kribi ?

B. Planification urbaine et occupation du sol

2. Un Plan Directeur d'Urbanisme (PDU) actualisé est-il en vigueur pour la ville de Kribi ? Si oui, quelle est son année d'approbation et quelle est son horizon de planification ?

3. Ce PDU intègre-t-il des dispositions spécifiques relatives aux risques côtiers, à l'élévation du niveau de la mer ou à la protection du trait de côte ?

4. Quelles sont les principales zones d'extension urbaine planifiées à Kribi à l'horizon 2035–2050 ? Ces zones sont-elles localisées en zones basses proches du littoral ?

C. Projets d'aménagement en cours ou planifiés

5. Quels sont les principaux projets d'infrastructure ou d'aménagement urbain actuellement en cours ou planifiés sur le littoral de Kribi (voiries, lotissements, équipements publics) ?

6. Ces projets ont-ils fait l'objet d'une étude d'impact environnemental intégrant une évaluation des risques côtiers ? Si oui, quelles mesures de mitigation ont été prévues ?

7. Des servitudes de protection du littoral (recul par rapport au trait de côte, zones non aedificandi) sont-elles prévues dans les documents d'urbanisme de Kribi ?

D. Données disponibles

8. Le MINHDU dispose-t-il de données cartographiques numériques sur l'occupation du sol actuelle et future de Kribi (shapefiles, orthophotos, plans numérisés) accessibles dans le cadre de cette recherche ?

E. Observations complémentaires

9. Y a-t-il d'autres documents, études ou acteurs que vous recommanderiez de consulter pour comprendre les dynamiques d'urbanisation et les risques côtiers à Kribi ?

Q5 — Port Autonome de Kribi (PAK)

Objectif de l'entretien. Documenter les mesures de gestion des risques côtiers liées aux infrastructures portuaires, identifier les projets d'aménagement du littoral en cours ou planifiés et recueillir des observations sur l'évolution du trait de côte dans la zone portuaire.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur

1. Quelle est votre fonction au sein du Port Autonome de Kribi et quel est votre domaine de responsabilité ?

B. Évolution du trait de côte et risques côtiers

2. Des phénomènes d'érosion côtière, de submersion ou d'envasement ont-ils été observés dans la zone portuaire ou sur le littoral adjacent au cours des 30 dernières années ?

3. Le Port Autonome de Kribi réalise-t-il un suivi régulier de l'évolution du trait de côte (mesures, relevés bathymétriques, photographies aériennes) ? Si oui, ces données sont-elles accessibles ?

4. La construction et l'exploitation du port en eau profonde ont-elles entraîné des modifications observables de la dynamique sédimentaire côtière (accrétion ou érosion) dans les zones adjacentes ?

C. Mesures de protection et projets planifiés

5. Quelles mesures de protection côtière ont été mises en place dans le cadre de la construction ou de l'exploitation du port (digues, enrochements, brise-lames) ? Leur efficacité a-t-elle été évaluée ?

6. Des solutions fondées sur la nature ont-elles été envisagées ou mises en œuvre dans la gestion des risques côtiers liés aux infrastructures portuaires (restauration de mangroves en zones tampons, par exemple) ?

7. Quels projets d'extension ou d'aménagement du port ou du littoral adjacent sont planifiés à court ou moyen terme ? Ces projets intègrent-ils une évaluation des risques liés à l'élévation du niveau de la mer ?

D. Données disponibles

8. Le Port Autonome de Kribi dispose-t-il de données sur les niveaux d'eau, les courants marins ou les conditions météorologiques locales enregistrées dans la zone portuaire ? Ces données sont-elles accessibles ?

E. Observations complémentaires

9. Y a-t-il d'autres informations ou acteurs que vous recommanderiez de consulter concernant les risques côtiers et la gestion du littoral de Kribi ?

Q6 — Autorités municipales — Mairie de Kribi (Communes de Kribi 1er et Kribi 2ème)

Objectif de l'entretien. Recueillir des informations sur les initiatives locales de protection du littoral, les projets d'aménagement communaux, la perception locale des risques côtiers et les zones jugées les plus exposées par les autorités de proximité.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur

1. Quelle est votre fonction au sein de la Mairie et quel est votre périmètre de compétence territoriale ?

B. Perception et connaissance des risques côtiers locaux

2. Quelles zones du littoral de Kribi vous semblent les plus exposées aux risques d'érosion, d'inondation ou de submersion marine ? Ces phénomènes ont-ils été observés au cours des dernières décennies ?

3. Des plaintes ou signalements de riverains concernant des dommages liés à des phénomènes côtiers (montée des eaux, destruction de biens, érosion de plages) ont-ils été enregistrés par la mairie ?

C. Initiatives locales de protection du littoral

4. La mairie a-t-elle mis en œuvre des initiatives spécifiques de protection du littoral (plantations de mangroves, aménagements de berges, campagnes de sensibilisation) ? Si oui, lesquelles et avec quels résultats ?

5. La mairie collabore-t-elle avec des ONG, des associations locales ou des services de l'État dans la gestion des risques côtiers ? Si oui, de quelle nature est cette collaboration ?

D. Projets d'aménagement et planification locale

6. Quels projets d'aménagement communaux sont prévus sur ou à proximité du littoral à court ou moyen terme (construction d'équipements, lotissements, voiries) ?

7. Ces projets intègrent-ils une réflexion sur les risques liés à l'élévation du niveau de la mer ou à l'érosion côtière ? Des zones constructibles sont-elles délimitées en tenant compte de ces risques ?

8. Avez-vous connaissance de projets financés par des bailleurs nationaux ou internationaux (État central, partenaires de développement) portant sur la protection du littoral de Kribi ?

E. Observations complémentaires

9. Y a-t-il des quartiers ou des secteurs spécifiques du littoral de Kribi que vous souhaiteriez signaler comme particulièrement vulnérables et qui devraient être prioritaires dans cette recherche ?

10. Y a-t-il d'autres informations ou acteurs locaux à consulter ?

Q7 — ONG environnementales actives sur le littoral de Kribi

Objectif de l'entretien. Documenter les programmes de conservation et de restauration des mangroves en cours, identifier les zones dégradées connues, recueillir des retours d'expérience sur les SfN déjà testées localement et identifier les contraintes opérationnelles rencontrées.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur et de l'organisation

1. Quelle est votre fonction au sein de votre organisation et quel est le mandat de votre ONG sur le littoral de Kribi ?

2. Depuis combien d'années votre organisation intervient-elle sur le littoral de Kribi ? Sur quelles zones géographiques précises ?

B. État des mangroves et des écosystèmes côtiers

3. D'après votre expérience de terrain, quelles sont les zones de mangroves les plus dégradées sur le littoral de Kribi ? Quelles en sont les causes principales ?

4. Avez-vous observé des changements significatifs dans l'étendue ou l'état de santé des mangroves au cours des 10 à 20 dernières années ?

C. Programmes de SfN et retours d'expérience

5. Votre organisation a-t-elle mis en œuvre des projets de restauration ou de conservation des mangroves à Kribi ? Si oui, pouvez-vous décrire ces projets (superficie, méthodes, résultats, difficultés rencontrées) ?

6. D'autres types de solutions fondées sur la nature ont-ils été testés localement (protection des dunes, réhabilitation de zones humides, herbiers marins) ? Avec quels résultats ?

7. Quelles sont selon vous les principales contraintes à la mise en œuvre de SfN sur le littoral de Kribi (foncier, financement, adhésion des communautés, faiblesse des capacités locales) ?

D. Projets futurs et collaboration

8. Votre organisation planifie-t-elle de nouveaux projets de SfN sur le littoral de Kribi à court ou moyen terme ? Si oui, lesquels ?

9. Collaborez-vous avec des institutions publiques (MINEPDED, MINFOF, mairie) dans la mise en œuvre de ces projets ? Cette collaboration est-elle efficace ?

E. Observations complémentaires

10. Y a-t-il des zones du littoral de Kribi où l'implantation de SfN vous semble particulièrement prioritaire et faisable ? Pourquoi ?

Q8 — Chercheurs et experts universitaires spécialisés en gestion côtière

Objectif de l'entretien. Recueillir une perspective scientifique sur l'état du littoral de Kribi, valider les choix méthodologiques de la recherche, identifier les travaux existants non publiés ou en cours et obtenir des recommandations sur les SfN les plus adaptées au contexte camerounais.

Consentement. L'interlocuteur fut informé de l'objet de la recherche, du caractère académique du travail et de la possibilité d'anonymisation. Accord recueilli le/...../....., signature

A. Présentation de l'interlocuteur

1. Quelle est votre institution d'appartenance, votre spécialité et vos domaines de recherche en lien avec la gestion côtière au Cameroun ?

B. Connaissance scientifique du littoral de Kribi

2. Quels sont, selon vous, les principaux risques côtiers auxquels est exposé le littoral de Kribi à court et long terme ? L'élévation du niveau de la mer est-elle déjà observable localement ?

3. Des travaux de recherche ont-ils déjà été réalisés sur la dynamique côtière, l'érosion ou la submersion du littoral de Kribi (y compris des thèses, mémoires ou rapports non publiés) ? Pouvez-vous en citer les principaux ?

C. Validation méthodologique

4. Cette recherche mobilise une approche bathtub screening à partir du modèle numérique de terrain FABDEM (résolution 30 m). Cette approche vous semble-t-elle adaptée au contexte topographique de Kribi ? Quelles précautions méthodologiques recommanderiez-vous ?

5. Les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 aux horizons 2050 et 2100 vous semblent-ils pertinents pour cette étude ? Y a-t-il des projections régionales plus précises pour le Golfe de Guinée que vous recommanderiez d'utiliser ?

D. Solutions fondées sur la nature

6. Quelles SfN vous semblent les plus adaptées et faisables pour réduire les risques côtiers à Kribi, compte tenu du contexte écologique, social et institutionnel local ?

7. Des expériences de SfN réussies dans des contextes côtiers similaires en Afrique de l'Ouest ou du Centre pourraient-elles servir de références pour le littoral de Kribi ?

E. Recommandations et ressources

8. Y a-t-il des sources de données (bases de données, rapports, partenaires institutionnels) que vous recommanderiez de mobiliser pour compléter cette recherche ?

9. Seriez-vous disponible pour une relecture partielle des résultats de cette recherche avant leur finalisation ?

F. Observations complémentaires

10. Y a-t-il des aspects de la problématique des risques côtiers à Kribi que vous jugez insuffisamment pris en compte dans cette recherche et que vous souhaiteriez signaler ?

Annexe B — Données brutes et classifiées des 59 transects

Le tableau ci-après restitue, pour chacun des 59 transects du littoral de Kribi, les coordonnées géographiques et les valeurs brutes des facteurs telles qu'extraites de la base GCC ou calculées selon les procédures décrites en section III.3.1. Il est suivi du tableau des classes attribuées et des six indices qui en dérivent. Ces données constituent le support de vérification de l'ensemble des résultats présentés au chapitre IV.

C.1 Coordonnées et valeurs brutes des facteurs

Les coordonnées sont exprimées en degrés décimaux, système WGS 84. X2 et X4 en mètres, X3 en mètres, Y2 en mètres, Y3 en pourcentage, Y4 en mètres, Z1 en habitants par kilomètre carré, Z2 et Z3 en mètres. Le facteur X1 vaut uniformément 3,28 mm/an sur les 59 transects et n'est donc pas reporté. La géomorphologie Y1 est abrégée en Vég. pour Vegetated, Vas. Pour Muddy, Sab. Pour Sandy, Roch. Pour Rocky et Autre pour Other. Les facteurs nominaux Y5a et Z4 figurent au Tableau C.2 sous leur seule forme classifiée.

Tableau 25 : Coordonnées et valeurs brutes des facteurs par transect.

Source : base GCC (Athanasiou, van Dongeren, Pronk, Giardino, Vousdoukas et Ranasinghe, 2024b)

Pt	Latitude (°N)	Longitude (°E)	X2	X3	X4	Y1	Y2	Y3	Y4	Z1	Z2	Z3
1	3.1208	9.9610	1.45	0.75	1.263	Vég.	7.1	5.5	73	0.0	3	2
2	3.1125	9.9646	1.45	0.75	1.263	Vég.	7.7	3.7	72	4.2	3	4
3	3.1041	9.9680	1.45	0.75	1.264	Vég.	7.5	4.1	73	0.0	3	3
4	3.0956	9.9710	1.45	0.75	1.264	Vas.	12.3	6.4	47	0.0	2	3
5	3.0867	9.9725	1.45	0.75	1.264	Vas.	14.0	0.5	238	54.5	3	3
6	3.0788	9.9685	1.45	0.75	1.264	Autre	13.0	6.9	98	0.0	5	5
7	3.0699	9.9671	1.44	0.75	1.239	Vas.	15.9	9.7	74	0.0	3	3
8	3.0610	9.9660	1.44	0.75	1.236	Vas.	18.7	3.5	222	0.0	3	3
9	3.0520	9.9644	1.43	0.75	1.232	Vas.	22.8	9.5	48	0.0	4	4
10	3.0432	9.9625	1.43	0.75	1.229	Vas.	18.3	3.8	198	0.0	4	4
11	3.0345	9.9602	1.43	0.75	1.225	Vég.	13.3	16.0	24	19.0	3	3
12	3.0259	9.9574	1.43	0.75	1.222	Vég.	16.9	14.5	49	11.2	5	4
13	3.0178	9.9534	1.43	0.75	1.218	Vas.	10.1	7.3	47	0.0	4	3
14	3.0109	9.9476	1.43	0.75	1.215	Vég.	10.8	4.9	21	26.1	3	3
15	3.0046	9.9411	1.42	0.75	1.212	Vég.	19.5	8.2	124	0.0	4	4
16	2.9985	9.9345	1.42	0.81	1.208	Vég.	15.6	22.1	21	5.6	4	5
17	2.9920	9.9283	1.42	0.81	1.205	Sab.	16.3	6.1	47	29.4	5	4
18	2.9849	9.9227	1.42	0.81	1.201	Vas.	17.4	8.0	49	4.1	4	3
19	2.9771	9.9181	1.42	0.81	1.197	Vas.	16.9	5.1	74	29.8	5	5
20	2.9688	9.9145	1.41	0.81	1.193	Vas.	14.3	19.8	24	0.0	5	5
21	2.9604	9.9114	1.41	0.81	1.189	Sab.	15.6	4.8	146	17.9	5	5
22	2.9517	9.9087	1.41	0.81	1.185	Sab.	15.5	1.8	62	38.1	5	5
23	2.9430	9.9065	1.41	0.81	1.181	Roch.	17.2	5.3	96	72.4	5	4
24	2.9341	9.9045	1.41	0.81	1.177	Sab.	20.3	8.6	124	80.5	5	5
25	2.9253	9.9027	1.40	0.81	1.174	Vas.	21.9	36.7	24	30.9	5	4
26	2.9163	9.9014	1.40	0.81	1.172	Vég.	24.4	8.5	98	9.5	5	4
27	2.9073	9.9005	1.40	0.81	1.172	Vas.	26.9	3.9	248	0.0	4	4
28	2.8983	9.8997	1.40	0.81	1.165	Vég.	22.1	4.3	75	3.6	4	4

Pt	Latitude (°N)	Longitude (°E)	X2	X3	X4	Y1	Y2	Y3	Y4	Z1	Z2	Z3
29	2.8894	9.8980	1.40	0.81	1.164	Sab.	22.9	4.4	155	13.5	5	5
30	2.8814	9.8940	1.40	0.81	1.164	Vég.	17.2	13.7	48	8.9	5	5
31	2.8731	9.8905	1.40	0.81	1.163	Vas.	18.9	56.4	25	5.5	5	4
32	2.8643	9.8882	1.40	0.81	1.162	Vég.	19.6	13.1	98	5.5	4	5
33	2.8554	9.8866	1.40	0.81	1.162	Vég.	20.8	6.0	224	4.6	5	3
34	2.8464	9.8857	1.40	0.81	1.161	Vég.	19.1	7.3	145	4.2	5	5
35	2.8374	9.8857	1.40	0.81	1.160	Vég.	19.5	5.0	93	0.0	5	5
36	2.8285	9.8872	1.40	0.81	1.160	Vas.	20.1	14.0	124	0.0	2	2
37	2.8197	9.8893	1.39	0.81	1.159	Vég.	20.2	6.0	221	0.0	2	3
38	2.8109	9.8913	1.39	0.81	1.159	Vég.	36.0	7.4	123	0.0	3	2
39	2.8019	9.8909	1.39	0.81	1.158	Vas.	56.6	7.3	212	4.1	3	3
40	2.7934	9.8878	1.39	0.81	1.157	Vég.	62.6	23.2	49	0.0	4	2
41	2.7850	9.8847	1.39	0.81	1.157	Roch.	50.4	16.6	124	10.3	3	4
42	2.7764	9.8819	1.39	0.81	1.156	Sab.	50.3	100.5	50	15.8	5	3
43	2.7676	9.8798	1.39	0.81	1.155	Vég.	49.1	155.6	47	0.0	5	2
44	2.7586	9.8789	1.39	0.81	1.155	Vas.	52.8	17.6	174	0.0	3	4
45	2.7496	9.8777	1.39	0.81	1.154	Sab.	43.9	10.1	73	0.0	5	3
46	2.7409	9.8754	1.39	0.81	1.153	Vég.	52.6	11.3	73	0.0	3	3
47	2.7327	9.8716	1.39	0.81	1.153	Vég.	62.6	11.6	170	4.0	3	4
48	2.7260	9.8655	1.39	0.81	1.152	Sab.	68.5	9.7	123	41.1	3	4
49	2.7183	9.8611	1.39	0.81	1.152	Sab.	57.2	9.5	37	30.6	5	4
50	2.7093	9.8604	1.39	0.80	1.152	Sab.	61.5	5.5	17	0.0	3	4
51	2.7004	9.8590	1.39	0.80	1.151	Vég.	44.7	7.9	88	0.0	3	3
52	2.6918	9.8563	1.39	0.80	1.150	Vég.	45.1	8.7	74	4.6	5	3
53	2.6834	9.8529	1.39	0.80	1.150	Vég.	35.4	10.2	97	0.0	3	3
54	2.6749	9.8497	1.39	0.80	1.150	Vas.	31.0	9.6	74	0.0	2	4
55	2.6662	9.8474	1.39	0.80	1.151	Vég.	37.7	33.4	38	0.0	2	3
56	2.6573	9.8459	1.39	0.80	1.152	Vég.	48.5	16.0	62	0.0	3	3
57	2.6484	9.8446	1.39	0.80	1.153	Vég.	54.7	12.5	88	0.0	2	2
58	2.6394	9.8431	1.39	0.80	1.154	Sab.	51.3	27.3	49	0.0	3	4
59	2.6306	9.8413	1.39	0.80	1.155	Vas.	61.0	37.8	50	0.0	2	3

C.2 Classes attribuées et indices calculés

Conformément à la convention posée en section III.3.3, les facteurs sont entiers et les indices décimaux.

Tableau 26 : Classes de 1 à 5 attribuées à chaque facteur et valeurs décimales des sous-indices et de l'indice global.

Source : calculs auteur, QGIS 3.x.

Pt	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5a	Z1	Z2	Z3	Z4	CFI	PSI	SSI	CRI
1	3	2	2	5	2	5	5	4	2	1	3	2	2	3.00	3.60	2.00	2.785
2	3	2	2	5	2	5	5	4	2	2	3	4	4	3.00	3.60	3.25	3.274
3	3	2	2	5	2	5	5	4	2	1	3	3	1	3.00	3.60	2.00	2.785
4	3	2	2	5	4	5	5	5	2	1	2	3	2	3.00	4.20	2.00	2.932
5	3	2	2	5	4	5	5	1	2	4	3	3	5	3.00	3.40	3.75	3.369
6	3	2	2	5	3	5	5	3	2	1	5	5	5	3.00	3.60	4.00	3.509

Pt	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5a	Z1	Z2	Z3	Z4	CFI	PSI	SSI	CRI
7	3	2	2	4	4	4	5	4	1	1	3	3	2	2.75	3.60	2.25	2.814
8	3	2	2	4	4	4	5	1	2	1	3	3	4	2.75	3.20	2.75	2.892
9	3	2	2	4	4	4	5	5	5	1	4	4	4	2.75	4.60	3.25	3.451
10	3	2	2	4	4	4	5	1	3	1	4	4	4	2.75	3.40	3.25	3.121
11	3	2	2	4	2	5	4	5	3	3	3	3	2	2.75	3.80	2.75	3.063
12	3	2	2	4	2	4	4	5	3	3	5	4	3	2.75	3.60	3.75	3.336
13	3	2	2	4	4	5	5	5	5	1	4	3	5	2.75	4.80	3.25	3.501
14	3	2	2	3	2	5	5	5	5	3	3	3	5	2.50	4.40	3.50	3.377
15	3	2	2	3	2	4	5	3	2	1	4	4	4	2.50	3.20	3.25	2.962
16	3	2	3	3	2	4	4	5	2	2	4	5	2	2.75	3.40	3.25	3.121
17	3	2	3	3	3	4	5	5	2	3	5	4	5	2.75	3.80	4.25	3.541
18	3	2	3	3	4	4	5	5	2	2	4	3	4	2.75	4.00	3.25	3.294
19	3	2	3	3	4	4	5	4	2	3	5	5	5	2.75	3.80	4.50	3.609
20	3	2	3	3	4	5	4	5	5	1	5	5	5	2.75	4.60	4.00	3.699
21	3	2	3	2	3	4	5	2	5	3	5	5	5	2.50	3.80	4.50	3.497
22	3	2	3	2	3	4	5	4	2	4	5	5	5	2.50	3.60	4.75	3.497
23	3	2	3	2	1	4	5	3	2	5	5	4	5	2.50	3.00	4.75	3.290
24	3	2	3	2	3	4	5	3	4	5	5	5	5	2.50	3.80	5.00	3.622
25	3	2	3	2	4	4	3	5	5	4	5	4	4	2.50	4.20	4.25	3.547
26	3	2	3	2	2	4	5	3	3	2	5	4	3	2.50	3.40	3.50	3.099
27	3	2	3	2	4	3	5	1	2	1	4	4	5	2.50	3.00	3.50	2.972
28	3	2	3	1	2	4	5	4	4	2	4	4	4	2.25	3.80	3.50	3.105
29	3	2	3	1	3	4	5	2	2	3	5	5	5	2.25	3.20	4.50	3.188
30	3	2	3	1	2	4	4	5	5	2	5	5	5	2.25	4.00	4.25	3.369
31	3	2	3	1	4	4	3	5	5	2	5	4	4	2.25	4.20	3.75	3.285
32	3	2	3	1	2	4	4	3	2	2	4	5	4	2.25	3.00	3.75	2.936
33	3	2	3	1	2	4	5	1	4	2	5	3	5	2.25	3.20	3.75	3.000
34	3	2	3	1	2	4	5	2	4	2	5	5	4	2.25	3.40	4.00	3.128
35	3	2	3	1	2	4	5	3	4	1	5	5	3	2.25	3.60	3.50	3.049
36	3	2	3	1	4	4	4	3	2	1	2	2	2	2.25	3.40	1.75	2.374
37	3	2	3	1	2	4	5	1	2	1	2	3	1	2.25	2.80	1.75	2.226
38	3	2	3	1	2	3	5	3	2	1	3	2	2	2.25	3.00	2.00	2.381
39	3	2	3	1	4	1	5	1	2	2	3	3	3	2.25	2.60	2.75	2.524
40	3	2	3	1	2	1	4	5	2	1	4	2	2	2.25	2.80	2.25	2.420
41	3	2	3	1	1	2	4	3	2	3	3	4	2	2.25	2.40	3.00	2.530
42	3	2	3	1	3	2	2	5	5	3	5	3	2	2.25	3.40	3.25	2.919
43	3	2	3	1	2	2	1	5	5	1	5	2	2	2.25	3.00	2.50	2.565
44	3	2	3	1	4	2	4	2	2	1	3	4	2	2.25	2.80	2.50	2.507
45	3	2	3	1	3	2	5	4	2	1	5	3	5	2.25	3.20	3.50	2.932
46	3	2	3	1	2	2	5	4	5	1	3	3	3	2.25	3.60	2.50	2.726
47	3	2	3	1	2	1	5	2	2	2	3	4	4	2.25	2.20	3.25	2.524
48	3	2	3	1	3	1	5	3	5	4	3	4	4	2.25	3.40	3.75	3.061
49	3	2	3	1	3	1	5	5	3	4	5	4	4	2.25	3.40	4.25	3.192
50	3	2	3	1	3	1	5	5	2	1	3	4	4	2.25	3.20	3.00	2.785
51	3	2	3	1	2	2	5	4	2	1	3	3	1	2.25	3.00	2.00	2.381
52	3	2	3	1	2	2	5	4	2	2	5	3	3	2.25	3.00	3.25	2.799
53	3	2	3	1	2	3	5	3	2	1	3	3	1	2.25	3.00	2.00	2.381

Pt	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5a	Z1	Z2	Z3	Z4	CFI	PSI	SSI	CRI
54	3	2	3	1	4	3	5	4	2	1	2	4	1	2.25	3.60	2.00	2.530
55	3	2	3	1	2	3	3	5	2	1	2	3	1	2.25	3.00	1.75	2.277
56	3	2	3	1	2	2	4	4	2	1	3	3	3	2.25	2.80	2.50	2.507
57	3	2	3	1	2	2	4	4	2	1	2	2	1	2.25	2.80	1.50	2.114
58	3	2	3	1	3	2	4	5	5	1	3	4	3	2.25	3.80	2.75	2.865
59	3	2	3	1	4	1	3	5	2	1	2	3	1	2.25	3.00	1.75	2.277

Annexe C — Récapitulatif des seuils de classification retenus

Ce tableau rassemble en une vue unique les seuils appliqués aux treize facteurs du CRI de Kribi, dispersés dans les Tableaux 3, 4 et 5 du chapitre III. Il permet de reconstituer intégralement la classification à partir des valeurs brutes de l'Annexe C.

Les seuils de X1, X2 et X3 ont été repris de Verstraete (2025) sans ajustement, la faible variance spatiale de ces facteurs sur le littoral de Kribi ne permettant pas de recalculer des ruptures naturelles significatives. Les seuils de X4, Y2, Y3, Y4, Z2 et Z3 résultent d'une classification de Jenks appliquée à la distribution observée sur les 59 transects. Le récapitulatif complet des seuils retenus pour les treize facteurs figure en Annexe C. Les seuils de Z1 furent adaptés à la valeur maximale de 81 hab/km² relevée à Kribi. Y1, Y5a et Z4 sont des facteurs nominaux dont les modalités furent ordonnées selon leur niveau de risque.

Le symbole † signale une classification inversée, une valeur élevée correspondant à un risque faible. Source : auteur, d'après Verstraete (2025) pour la structure et les traitements propres à ce travail pour les seuils.

Tableau 27 : Seuils de classification des treize facteurs du CRI de Kribi.

Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
X1	Tendance d'élévation du niveau marin (mm/an)	< 1,8	1,8 – 2,5	2,5 – 3,0	3,0 – 3,4	> 3,4
X2	Amplitude des marées, marnage (m)	> 6	6 – 4	4 – 2	2 – 1	< 1
X3	Hauteur significative des vagues (m)	< 0,55	0,55 – 0,85	0,85 – 1,05	1,05 – 1,25	> 1,25
X4	Niveau marin extrême TWL RP10 (m/MSL)	1,150 – 1,165	1,165 – 1,189	1,189 – 1,215	1,215 – 1,239	1,239 – 1,264
Y1	Géomorphologie côtière	Rocky	Vegetated	Sandy / Other	—	Muddy
Y2	Élévation de l'arrière-pays (m/MSL) †	> 54,68	37,74 – 54,68	24,42 – 37,74	14,34 – 24,42	< 14,34
Y3	Pente de l'arrière-côte (%) †	> 100,55	56,40 – 100,55	27,32 – 56,40	11,63 – 27,32	< 11,63
Y4	Largeur de plage (m) †	> 174,0	124,5 – 174,0	87,5 – 124,5	49,8 – 87,5	< 49,8
Y5a	Type de protection naturelle	Mangroves	Trees	Grassland	Built-up	Barren / Open water
Z1	Densité de population exposée sous 1 m (hab/km ²)	0	0 – 10	10 – 30	30 – 60	> 60
Z2	Distance aux bâtiments (m) †	> 730,8	438,4 – 730,8	229,7 – 438,4	100,7 – 229,7	< 100,7
Z3	Distance au réseau routier (m) †	> 574,5	315,6 – 574,5	194,5 – 315,6	83,5 – 194,5	< 83,5

Code	Facteur	Très faible (1)	Faible (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Très élevé (5)
Z4	Utilisation économique du sol	Végétation naturelle	Écosystèmes côtiers	Activités primaires	Infrastructures économiques	Infrastructures stratégiques

Annexe D — Fiche pratique à destination des décideurs

Ce document de synthèse fut établi à l'intention des services techniques de la Mairie de Kribi. Il restitue les résultats du mémoire sous une forme accessible aux décideurs non spécialistes et constitue, avec la couche SIG des 59 transects et la hiérarchisation du Tableau 20, le troisième volet de l'outil d'aide à la décision évoqué en section V.7.

Ce que l'étude a mesuré

Le littoral des deux communes de Kribi fut découpé en 59 tronçons d'un kilomètre, couvrant 75 km de côte. Pour chaque tronçon, treize indicateurs furent renseignés, portant sur trois dimensions. Les forçages marins d'abord, soit l'élévation du niveau de la mer, les marées, les vagues et les niveaux marins extrêmes. Les caractéristiques physiques ensuite, à savoir la nature du sol, l'altitude de l'arrière-pays, la pente, la largeur de plage et le couvert végétal protecteur. Les enjeux humains enfin, soit la population exposée, la proximité des bâtiments et des routes, et la valeur économique des installations. Ces indicateurs furent combinés en un indice de risque côtier noté de 1 à 5.

Les cinq résultats à retenir

1. Le risque est concentré, non réparti

Dix tronçons sur 59, soit 17 % du littoral, présentent aujourd'hui un risque élevé. Ils se situent sur une bande continue de sept kilomètres entre les transects 17 et 25, à la charnière des secteurs nord et central. La Figure 16 permet de situer ces transects sur le littoral à cet effet. Les cinq tronçons les plus exposés portent tous des infrastructures stratégiques, à savoir le port, le terminal à gas, la Route Nationale 7 ou des complexes hôteliers.

2. Ce sont les enjeux humains qui font le risque, non les vagues

Les forçages marins varient peu d'un bout à l'autre du littoral. Ce qui distingue un tronçon à risque d'un tronçon sûr, c'est la présence de population, de bâti et d'activités économiques. Cette dimension explique à elle seule près de huit dixièmes de la différence entre les tronçons. La conséquence est directe pour la Mairie, puisque les décisions d'urbanisme pèsent davantage sur le risque futur que le climat lui-même.

3. Les mangroves ont pratiquement disparu, mais le couvert restant protège encore

La superficie résiduelle de mangroves n'excède pas deux hectares sur 75 km de côte. Un seul tronçon en conserve. Le couvert arboré qui subsiste ailleurs joue toutefois un rôle mesurable, puisque sa disparition ferait basculer quatre tronçons supplémentaires en risque élevé. Ce couvert existant assure déjà plus de la moitié du bénéfice qu'apporterait une restauration complète du littoral.

4. L'essentiel de l'aggravation se jouera avant 2050

Le risque moyen progresse de 9 % à l'horizon 2030, de 16 % à 2050 et de 20 % à 2100. Les trois quarts de cette progression interviennent avant 2050. Le nombre de tronçons en risque élevé passerait de 10 aujourd'hui à 33 en 2100, le secteur sud, aujourd'hui préservé, en comptant six à cette échéance. La fenêtre d'action utile se situe donc dans les vingt-cinq prochaines années.

5. La restauration des écosystèmes compense environ 60 % de l'aggravation

Si le couvert végétal était restauré, le risque moyen baisserait de 7 % par rapport à la situation actuelle. Combinée aux effets du climat à l'horizon 2050, cette restauration ramènerait l'indice de 3,44 à 3,16, évitant à quatorze tronçons de basculer en risque élevé. Elle n'annule pas l'aggravation climatique, mais elle en réduit sensiblement l'ampleur.

Ce qu'il est recommandé de faire

Les 59 tronçons se répartissent en trois catégories d'action, exposées en section V.7 du mémoire. Cette répartition couvre l'intégralité du littoral, chaque tronçon relevant d'une seule catégorie.

Tableau 28 : Catégories d'action recommandées à la Mairie de Kribi. Les trois catégories couvrent la totalité des 59 tronçons du littoral..

Catégorie	Tronçons	Situation	Action recommandée	Échéance
Action immédiate	10	Risque déjà élevé aujourd'hui, entre les transects 17 et 25	Intégrer la contrainte de risque côtier au Plan Directeur d'Urbanisme et limiter l'extension du bâti. Engager le dialogue avec le Port Autonome sur les mesures de protection. Mettre en place un suivi du trait de côte.	Immédiate
Restauration ciblée	12	Basculeraient en risque élevé sous l'effet du climat à 2050, mais reviendraient sous ce seuil si le couvert était restauré	Lancer un programme de restauration du couvert végétal, en priorité aux embouchures du Lobé et de la Kienké, en associant les communautés de pêcheurs.	Deux à cinq ans
Préservation	37	Demeurent sous le seuil critique dans toutes les configurations examinées	Préserver le couvert existant, mesure à coût très faible dont le rendement dépasse celui de toute intervention nouvelle. Cartographier les mangroves résiduelles par imagerie satellitaire.	Continue

À l'intérieur des deux premières catégories, le Tableau 20 propose un ordre d'intervention fondé sur le bénéfice attendu de la restauration du couvert végétal, mesuré par l'écart entre les scénarios de dégradation et de restauration. Les vingt-quatre tronçons qui y figurent se répartissent sur les trois catégories ci-dessus, dont les dix de la première. Ce classement ne constitue donc pas une catégorie supplémentaire mais un ordre de priorité à l'intérieur des catégories existantes.

Un dispositif de suivi complète ces trois axes. Un réexamen de l'indice tous les cinq ans, mobilisant la couche SIG produite, permettrait de vérifier si la trajectoire observée s'écarte des projections retenues et d'ajuster les priorités en conséquence.

Ce que l'étude ne dit pas

Trois limites doivent être connues des utilisateurs de ces résultats. Les données de vagues et de niveau marin proviennent de grilles mondiales d'environ quatorze kilomètres de résolution, qui ne permettent aucune différenciation fine à l'échelle d'un tronçon. L'indice mesure l'atteinte d'un seuil de risque mais non l'ampleur du dépassement, de sorte qu'une élévation importante du niveau marin extrême n'apparaît pas au-delà d'un certain point. Enfin, les scénarios de restauration représentent des états extrêmes qui encadrent les futurs possibles sans en constituer des prévisions.

Contact et données disponibles

La couche SIG des 59 transects, portant les treize facteurs, les six indices et les configurations prospectives, est mise à disposition des services techniques de la Mairie. Elle est exploitable sous QGIS, logiciel libre et gratuit. Les tableaux de données brutes figurent en Annexe C du mémoire et la hiérarchisation complète des tronçons prioritaires au Tableau 20.

Annexe E — Localisation et numérotation des points issus de la base GCC sélectionnés pour l'analyse

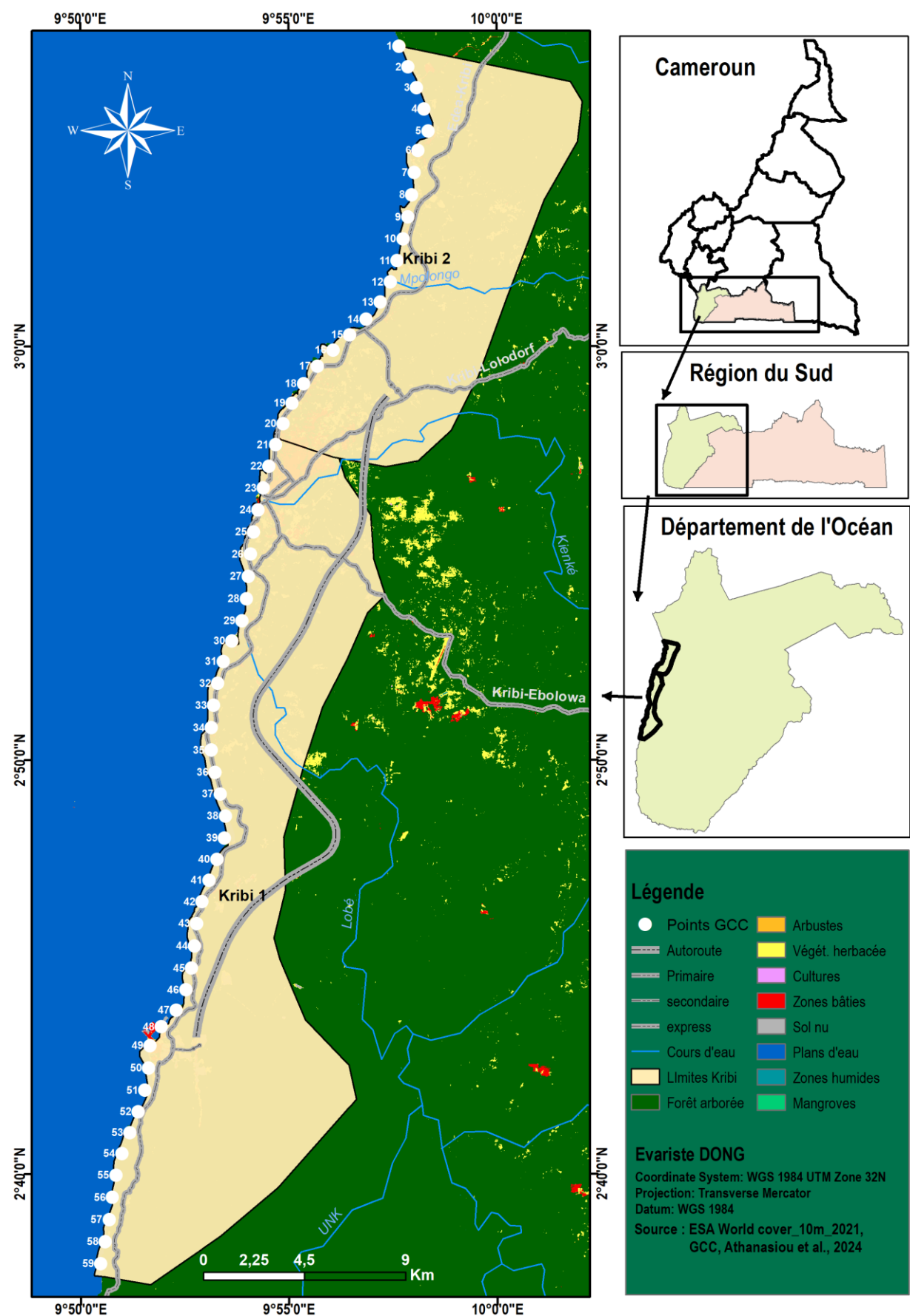


Figure 16 : Localisation et numérotation des points issus de la base GCC sélectionnés pour l'analyse