



UNIVERSITÉ PAUL VALÉRY  
MONTPELLIER 3



Année universitaire 2024 – 2025



UFR3 - Sciences humaines et Sciences de l'environnement



### Master 2 Gestion des Littoraux et des Mers (GLM)



Mention : Géographie Aménagement Environnement Développement (GAED)

Mémoire de stage de **DANTIN Audran**

rendu le **25/08/2025**

## SUIVI DES BANCS DE VASE EN GUYANE VIA LA TÉLÉDÉTECTION : APPUI SCIENTIFIQUE AUX STRATÉGIES DE GESTION DU TRAIT DE CÔTE EN GUYANE

Stage effectué au sein du pôle littoral du BRGM Guyane et de l'entreprise i-Sea

BRGM Guyane : Chemin Louis Ribai, Rue Jacques Cartier - BP 10552 Cayenne Cedex 2, 97333,  
Guyane française

i-Sea : 30 Av. de Canteranne, 33600 Pessac

du 28/05/2025 au 26/09/2025

Maître de stage : Guillaume Brunier, géomorphologue, Ingénieur-chercheur, BRGM

Co-encadrant : Olivier Regnier, géomaticien, chargé d'études et de recherche télédétection  
satellitaire et couleur de l'eau i-Sea

Suivi universitaire : Benoit Devillers, maître de conférences, géomorphologue, UM3

Responsables de la formation : Hélène Rey-Valette, Cécile Bazart, Séverin Pistre (UM), Sylvain  
Pioch, Benoit Devillers Fabrice Garcia (UM3)



## **REMERCIEMENTS :**

Je souhaite tout d'abord remercier Benoît Devillers, maître de conférences à l'Université Paul-Valéry et géomorphologue, pour son suivi tout au long de ce stage. Ses conseils avant, ainsi qu'à la fin de mon stage, ont été essentiels à la bonne conduite de ce travail.

J'adresse ensuite mes sincères remerciements à l'équipe d'i-Sea à Bordeaux pour son accueil chaleureux et l'ambiance de travail stimulante dans laquelle j'ai évolué. Je tiens particulièrement à remercier Nicolas Débonnaire, développeur informatique et chargé d'études biodiversité, pour son aide précieuse en informatique, Valentin Pillet, chef de projet Risques Littoraux, pour son accompagnement lors du démarrage du stage, Nicolas Durou, chef de projet en géomatique appliquée à l'environnement, pour son travail sur la chaîne de traitement des années 2016 à 2018, ainsi que Olivier Regniers, chargé d'études et de recherche en télédétection satellitaire et couleur et co-encadrant, pour son accompagnement durant les trois premiers mois de stage ainsi que pour la richesse de ses enseignements. Je remercie également tous les autres collègues et stagiaires d'i-Sea pour les échanges enrichissants et leur soutien quotidien.

Je tiens également à remercier l'équipe du BRGM. Ma gratitude va à Jean-Marc Mompelat, directeur de la Stratégie territoriale et du service public, pour son écoute lors de ma recherche de stage, François Longueville, ingénieur géologue au BRGM Nouvelle-Aquitaine, pour son aide lors de ma prise en main du matériel à distance, à Dalila Benhammouda, assistante de la direction du BRGM Guyane, pour son soutien administratif. Mes remerciements s'adressent également à la direction et à mes collègues du BRGM Guyane, et plus particulièrement à Merlin Renou, VSC au sein du pôle littoral, pour m'avoir transmis une meilleure compréhension du territoire guyanais, et à Guillaume Brunier, mon tuteur de stage, géomorphologue et ingénieur-chercheur, pour son accompagnement constant, ses conseils avisés pour la rédaction de ce mémoire, son partage d'expertise sur les bancs de vase ainsi que pour son accueil en Guyane, région dans laquelle je n'avais jamais été auparavant. Je remercie aussi la DGTM qui, avec le BRGM, pilote l'ODYC, observatoire dans lequel sera disponible mon travail.

Je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance à l'ensemble de l'équipe pédagogique et du secrétariat du Master GLM, pour leur investissement dans cette année universitaire particulièrement diversifiée, ainsi que pour leur soutien dans la recherche de stage. Mes remerciements vont également à mes collègues de Master 1 et Master 2 GLM, avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer notamment dans l'organisation du séminaire des 50 ans du Master GLM.

Enfin, je souhaite adresser mes plus chaleureux remerciements à mes proches, qui m'ont soutenu et motivé tout au long de cette année, ainsi qu'à ceux qui m'ont accueilli à Bordeaux et en Guyane, contribuant ainsi au bon déroulement de ce stage, tant sur le plan personnel que logistique. Leur soutien m'a été indispensable pour mener à bien ce travail.

## **RÉSUMÉ :**

Le littoral de la Guyane française est reconnu comme l'un des environnements côtiers les plus dynamiques et instables à l'échelle mondiale, en raison de l'influence des bancs de vase d'origine amazonienne qui migrent vers l'ouest à des vitesses variant de 1 à 5 km/an. Ces formations sédimentaires influencent directement les phases successives d'accrétion et d'érosion, exerçant ainsi un impact sur les écosystèmes, les infrastructures et les populations côtières. Dans ce contexte, depuis 2020, le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et la société i-Sea élaborent une méthodologie novatrice de suivi automatisé par télédétection satellitaire (Sentinel-2), mise en œuvre ici afin d'analyser la migration des bancs sur la période allant de 2016 à 2022.

Le travail réalisé a impliqué l'acquisition, le prétraitement et la classification supervisée d'images Sentinel-2 au moyen d'un modèle de type Random Forest qui a été entraîné à l'aide de polygones d'apprentissage. Les lignes caractérisant la limite subtidale des bancs ont été extraites, harmonisées et intégrées au sein d'un processus semi-automatisé, avant d'être soumises à une analyse diachronique à l'aide de l'outil SIG DSAS (Digital Shoreline Analysis System).

Ces résultats constituent une première approche diachronique robuste et opérationnelle, malgré des limites liées à la résolution de Sentinel-2, à la nébulosité et à la nécessité de corrections manuelles. Ils démontrent le potentiel des chaînes de traitement automatisées pour intégrer la rythmicité des cycles bancs/inter-bancs dans les stratégies de gestion côtière. La télédétection apparaît ainsi comme un outil d'anticipation essentiel pour orienter les politiques publiques face à l'instabilité chronique du littoral guyanais.

## **ABSTRACT :**

The coastline of French Guiana is recognized as one of the most dynamic and unstable coastal environments worldwide, due to the influence of mudbanks from Amazon River that migrate westward at speeds ranging from 1 to 5 km/year. These sedimentary formations directly shape successive phases of accretion and erosion, thereby impacting ecosystems, infrastructures, and coastal populations. In this context, since 2020, the BRGM (French Geological Survey) and the company i-Sea have been developing an innovative methodology for automated monitoring using satellite remote sensing (Sentinel-2), which has been applied here to analyze mudbank migration over the 2016–2022 period.

This work involved the acquisition, preprocessing, and supervised classification of Sentinel-2 imagery using a Random Forest classifier model trained with training polygons. Lines delineating the subtidal limit of the mudbanks were extracted, harmonized, and integrated into a semi-automated workflow before being subjected to a diachronic analysis using DSAS GIS software (Digital Shoreline Analysis System).

These results constitute a first robust and operational diachronic approach, despite limitations related to Sentinel-2 resolution, cloud cover, and the need for manual corrections. They demonstrate the potential of automated processing chains to integrate the rhythmicity of mudbank/interbank cycles into coastal management strategies. Remote sensing thus emerges as a key anticipation tool to guide public policies in the face of the chronic instability of the French Guiana coastline.

## **MOTS-CLÉS :**

Géomorphologie ; Télédétection ; Aménagement ; Bancs de vase ; Littoral ; Guyane

# Table des matières

|                                                                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introduction .....</b>                                                                                                        | <b>1</b>  |
| <b>1.1. Objectifs et problématique.....</b>                                                                                         | <b>4</b>  |
| <b>1.2. Présentation des établissements du stagiaire.....</b>                                                                       | <b>5</b>  |
| <b>1.3. Guyane : département et région d’outre-mer continentale en Amérique du Sud .....</b>                                        | <b>6</b>  |
| 1.3.1. Climatologie et hydrodynamique.....                                                                                          | 8         |
| 1.3.2. Particularité du littoral vaseux guyanais .....                                                                              | 9         |
| 1.3.3. Système de dispersions des sédiments de l’Amazonie : morphologie et dynamique sédimentaire des bancs de vase amazoniens..... | 12        |
| 1.3.4. Un trait de côte parmi les plus instable au monde .....                                                                      | 15        |
| 1.3.5. Enjeux liés au changement climatique.....                                                                                    | 18        |
| 1.3.6. Une dynamique complexe .....                                                                                                 | 19        |
| <b>1.4. La télédétection au service du suivi littoral .....</b>                                                                     | <b>19</b> |
| 1.4.1. Des capteurs complémentaires pour un suivi multi-sources.....                                                                | 19        |
| 1.4.2. Un usage ciblé pour le suivi des bancs de vase .....                                                                         | 20        |
| <b>2. Matériel et méthode .....</b>                                                                                                 | <b>20</b> |
| <b>2.1. Déroulé du stage.....</b>                                                                                                   | <b>20</b> |
| <b>2.2. Cartographie du prisme d’accrétion des bancs au large par télédétection satellitaire .....</b>                              | <b>21</b> |
| 2.2.1. Limite de dissipation des vagues sur le prisme sédimentaire d’un banc de vase.....                                           | 22        |
| 2.2.2. Sources de données et capteurs utilisés .....                                                                                | 22        |
| 2.2.3. Étendue spatiale et période temporelle .....                                                                                 | 23        |
| 2.2.4. Outils et environnement technique .....                                                                                      | 23        |
| 2.2.5. Critères de choix des images et base de données collectées .....                                                             | 24        |
| 2.2.6. Prétraitements des images.....                                                                                               | 24        |
| 2.2.7. Mise en lumière des caractéristiques texturales des images .....                                                             | 25        |
| <b>2.3. Classification .....</b>                                                                                                    | <b>25</b> |
| 2.3.1. Modèle Random Forest.....                                                                                                    | 25        |
| 2.3.2. Harmonisation et validation.....                                                                                             | 26        |
| <b>2.4. Post-traitement et génération des produits cartographiques .....</b>                                                        | <b>26</b> |
| <b>2.5. Limites et contraintes rencontrées .....</b>                                                                                | <b>31</b> |
| <b>2.6. Analyse diachronique avec le DSAS.....</b>                                                                                  | <b>31</b> |
| 2.6.1. Préparation à l’analyse de la migration des bancs .....                                                                      | 31        |

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.2. Calcul des indicateurs de migration .....                                                                  | 32        |
| <b>3. Résultats .....</b>                                                                                         | <b>34</b> |
| 3.1. Délimitations des bancs de vase de 2016 à 2023 .....                                                         | 34        |
| 3.2. Dynamique des bancs .....                                                                                    | 36        |
| 3.2.1. Dynamique du banc de Kourou .....                                                                          | 36        |
| 3.2.2. Dynamique du banc de Cayenne .....                                                                         | 39        |
| 3.2.3. Dynamique du banc de Régina .....                                                                          | 42        |
| <b>4. Discussion .....</b>                                                                                        | <b>44</b> |
| 4.1. Limites de l'approche cartographique des bancs de vase par télédétection et les incertitudes associées ..... | 44        |
| 4.2. Intégration de la dynamique des bancs dans la gestion à court terme des aléas littoraux .....                | 45        |
| 4.2.1. Littoral Kouroucien .....                                                                                  | 45        |
| 4.2.2. Littoral de Cayenne et Rémire-Montjoly .....                                                               | 45        |
| 4.2.3. Conclusion .....                                                                                           | 46        |
| <b>5. Bilan du stage .....</b>                                                                                    | <b>47</b> |
| 5.1. Chronogramme de vos travaux, missions .....                                                                  | 47        |
| 5.2. Remarques personnelles sur le travail de l'entreprise ; Master 2 GLM – UM et UPVM .....                      | 47        |
| 5.3. Difficultés rencontrées .....                                                                                | 47        |
| 5.4. Bilan du stage, personnel, universitaire et professionnel .....                                              | 47        |
| <b>6. Bibliographie .....</b>                                                                                     | <b>48</b> |
| <b>7. Glossaire .....</b>                                                                                         | <b>51</b> |
| <b>8. Annexes .....</b>                                                                                           | <b>53</b> |

# 1. Introduction

Le littoral de la Guyane française se distingue par une dynamique sédimentaire remarquable, caractérisée par des variations très rapides du trait de côte alternant de phases d'érosion et d'accrétion atteignant des amplitudes de l'ordre de la dizaine à la centaine de mètres par an à l'image de l'évolution récente du trait de côte devant le bourg de Tonate sur la commune de Macouria présenté en Figure 1 (Anthony et al., 2013; Brunier et al., 2024, 2019). Cette singularité est largement conditionnée par la présence de vastes bancs de vase en migration continue le long de la côte. Ces bancs, principalement alimentés par les sédiments fins issus de l'Amazonie (Allison et al., 2000; Augustinus, 2002), jouent un rôle structurant dans la morphologie côtière, l'équilibre des écosystèmes marins, et diverses activités humaines comme la navigation, l'accès aux infrastructures portuaires, la pêche, l'aménagement du territoire, les risques naturels côtiers, la préservation de la biodiversité.

Les bancs de vase amazoniens, en se déplaçant au rythme de plusieurs kilomètres par an, ont construit et influencent constamment la morphodynamique du littoral le plus vaste du plateau des Guyanes, qui s'étend sur près de 1 500 kilomètres, entre l'embouchure de l'Amazonie (au sud-est) et celle de l'Orénoque (au nord-ouest). Les systèmes de plages sableuses, dites de cheniers (Augustinus, 1989; Otvos, 2005), sont rares à l'échelle du plateau des Guyanes et sont principalement localisées sur le littoral de Guyane et sur une portion du littoral du Surinam (Anthony et al., 2013; Augustinus, 1989). Ces côtes sableuses basses, sans systèmes dunaires et largement urbanisées, engendrent une forte vulnérabilité aux aléas de recul du trait de côte. Cela est induit par le passage ou l'absence de bancs de vase lors de cycle pluriannuels ainsi qu'aux submersions marines lors d'épisodes de fortes houles et de grandes marées (Anthony et al., 2010a, 2010b; Anthony and Dolique, 2004; Augusseau et al., 2025; Brunier et al., 2019). Plusieurs cas documentés de recul du trait de côte endommageant des équipements publics (routes, équipements électriques), voire effondrant des habitations jalonnent l'histoire des risques côtiers en Guyane (Figure 2) (Anthony and Dolique, 2004; Longueville, 2017, 2018; Longueville and Bossennec, 2019; Longueville and Bourbon, 2016a; Longueville and Lanson, 2022; Moisan and Prian, 2011).

L'observatoire de la dynamique côtière de Guyane (ODyC) suit les évolutions du littoral et émet des recommandations sous forme de bulletin de vigilance de l'aléa de recul du trait de côte s'inscrivant dans une démarche prospective à court et moyen terme (Nebel and Brunier, 2023). La migration des bancs de vase et l'alternance des phases d'envasement et de dévasement sont les variables clés des approches prospectives de l'ODyC permettant de construire des stratégies locales de gestion intégrée du trait de côte (SLGITC) en Guyane. La stratégie de gestion du littoral de Kourou de 2019 (Grisel and Sigwald, 2019; Longueville et al., 2018) ou les projections du trait de côte sur les communes d'Awala-Yalimapo ou Mana (Longueville et al., 2022a; Longueville and Brivois, 2019) s'appuient sur les chronologies passées et prospective des séquences d'envasement et de dévasement liées à la migration des bancs de vase.

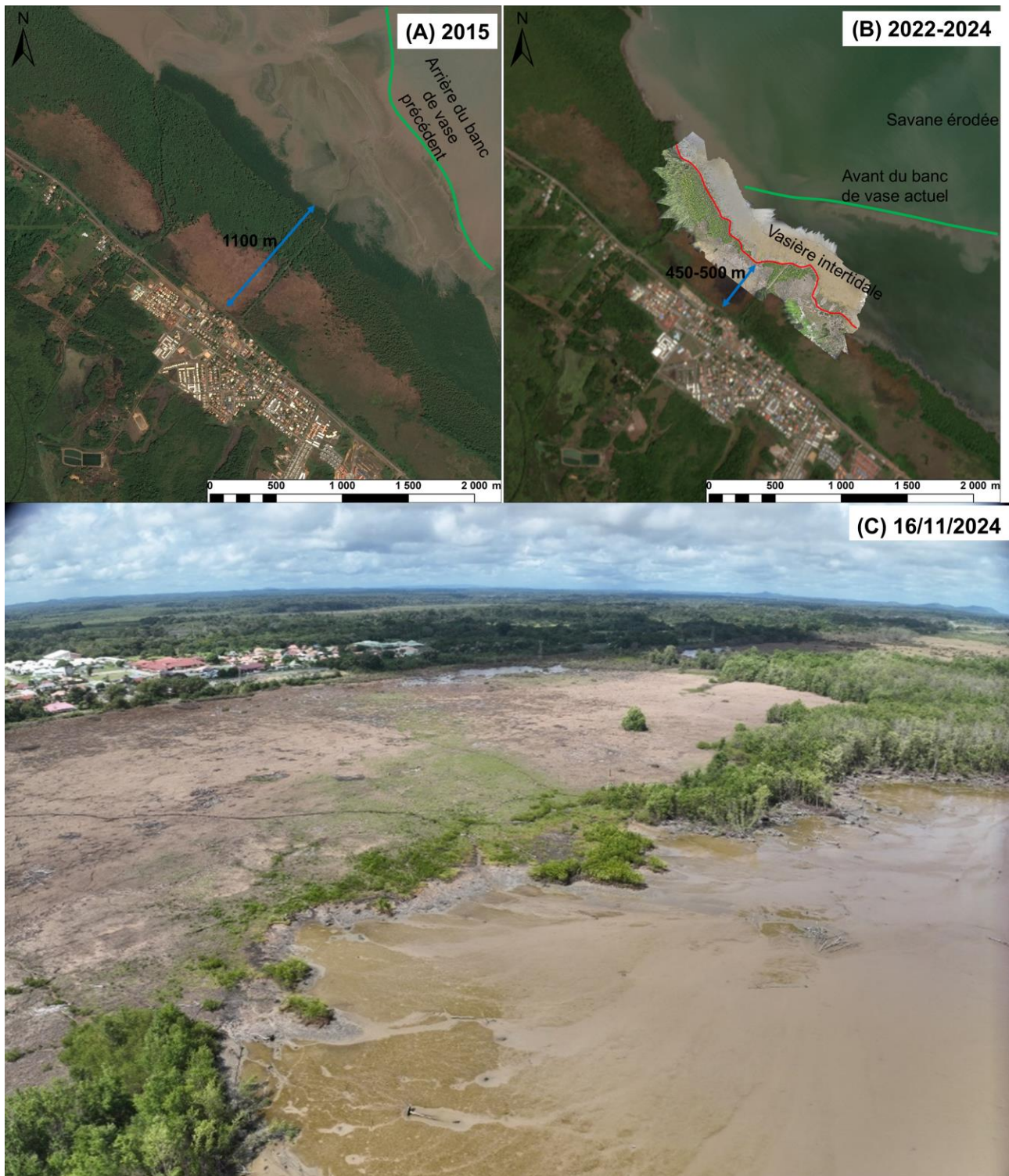


Figure 1 : Évolution du site ODyC du bourg de Tonate entre 2015 et 2024, commune de Macouria ; Evolution of the ODyC site in Tonate town between 2015 and 2024, Macouria municipality

(A) Situation du littoral face au bourg de Tonate en 2015 : l'espace urbanisé, comprenant la route départementale 1 (RD1) est construit sur un terrain sableux (ancienne plage de chenier) légèrement surélevée face aux savanes et forêts de mangrove s'étendant vers le NE ; la mer n'était pas visible depuis le bourg, masquée par environ 500 m de forêt de mangrove ; un banc de vase était positionné devant ce littoral permettant la formation d'une vasière intertidale colonisée partiellement par la mangrove. (B) Situation du littoral de Tonate entre 2022 et 2024 : le banc de vase présent en 2015 s'est déplacé permettant un recul du



trait de côte très rapide à partir de l'année 2019 ; la forêt de mangrove, des palétuviers de l'essence *Avecinia Germinans* d'une dizaine de mètres de hauteur, a été déchaussée et le terrain sédimentaire vaseux a été érodé ; la mer est devenue visible depuis le bourg de Tonate ; un nouveau banc de vase vient de s'établir à partir de 2022. (C) Vue aérienne drone du site de Tonate le 16/11/2024 : le bourg est visible à l'arrière-plan ; les dépôts sédimentaires de vase consolidée constituant les savanes et les forêts de mangrove ont été érodées ; le trait de côte prend un tracé très irrégulier à l'insu d'une phase érosive ; un nouveau banc de vase est venu construire une vasière intertidale encore très fluide (slikke). (Sources : A – OrthoSat IGN, 2015 ; B – CNES Pléiades, 2022 ; C – Orthophoto drone ODyC, BRGM, mars 2024 ; montage : Audran Dantin, août 2025)

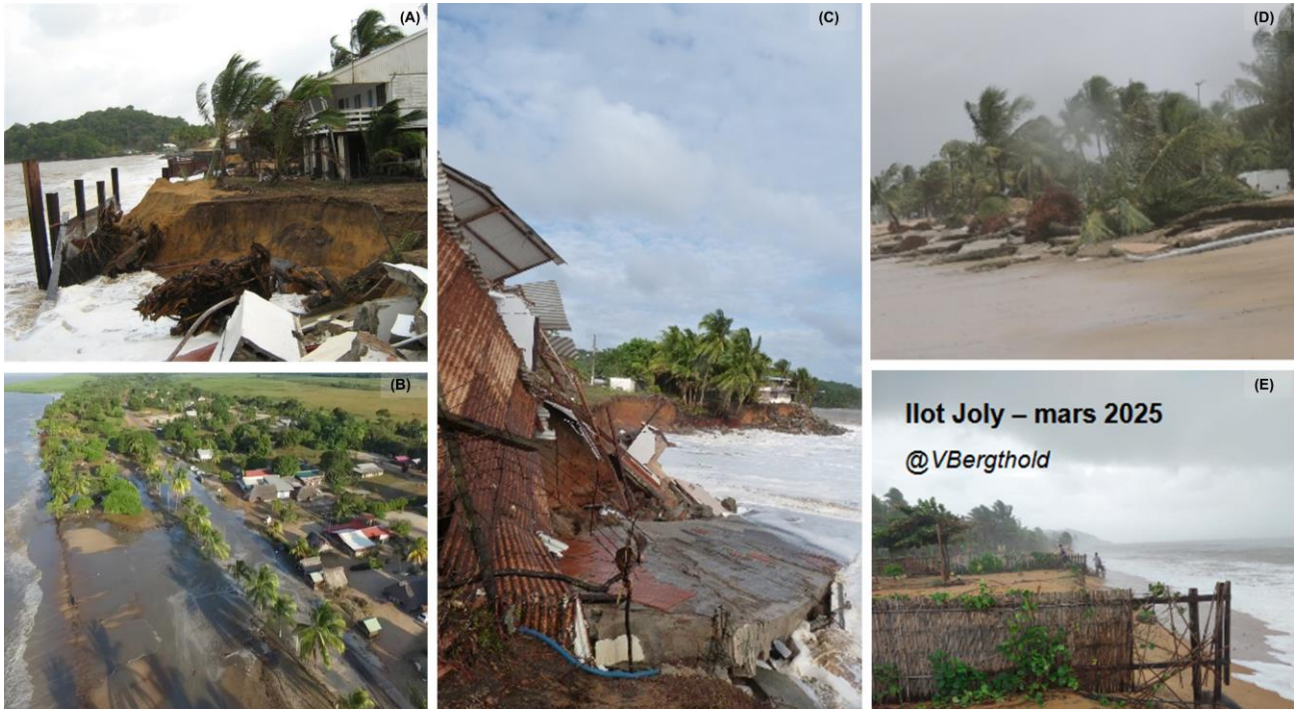


Figure 2 : Photographies illustrant l'impact de l'érosion sur le littoral guyanais ; Photographs showing the impact of erosion on French Guiana littoral

(A) Érosion inter-banc sur la plage des Salines, avenue Sainte Rita, commune de Rémire-Montjoly en novembre 2007. (B) Submersion de la plage de Yalimapo, commune d'Awala-Yalimapo en octobre 2019. (C) Anse Rémire, Rémire-Montjoly, coup de mer en phase d'approche d'un banc en janvier 2013. (D) Érosion majeure de la plage de Kourou en phase d'approche d'un banc de vase, village amérindien, en février 2016. (E) Anse Rémire, Rémire-Montjoly, érosion en phase inter-banc en mars 2025. (sources : A – BRGM, 25 novembre 2007 ; B – mairie d'Awala-Yalimapo, 28 octobre 2019 ; C – BRGM, 14 janvier 2013 ; D – DEAL, 23 février 2016 ; E – BRGM, 14 janvier 2013 ; montage : Audran Dantin, août 2025)

## 1.1. Objectifs et problématique

Dans ce contexte morphodynamique, le suivi de l'évolution côtière est un enjeu majeur pour les acteurs publics et scientifiques. Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), organisme de référence dans le domaine des géosciences, et la Direction Générale des Territoires et de la Mer de Guyane (DGTm), représentant les services de l'état, coordonnent les travaux de l'Observatoire de la Dynamique Côtière (ODyC), créée en 2014 pour répondre aux besoins de connaissances et d'anticipation des épisodes paroxysmaux sur le littoral de Guyane. La clé d'entrée dans la compréhension de la dynamique côtière de Guyane est la position et la vitesse de migration des bancs de vase. Le BRGM, dans le cadre de l'ODyC, s'est associé avec la société i-Sea, experte en télédétection marine et côtière, pour automatiser la surveillance des bancs de vase via l'imagerie satellite, en particulier à partir des capteurs Sentinel-2 du programme européen Copernicus. Les premières sorties consolidées de ce programme de cartographie sont présentées en Figure 3.

Ce projet découle des travaux amorcés lors des Challenges Innovation Copernicus (2020), financés par le Centre national d'études spatiales (CNES). Ces initiatives ont démontré la faisabilité d'un suivi automatisé des bancs de vase à haute fréquence, en combinant images multispectrales et traitements algorithmiques adaptés.

En 2024, l'approche méthodologique du projet a intégré des modèles d'intelligence artificielle, notamment l'algorithme Random Forest, un système d'apprentissage automatique basé sur une série d'arbres de décision. Ce modèle est appliqué à l'analyse texturale des images Sentinel-2. Ces avancées permettent de générer des cartographies mensuelles des bancs, rendant possible un suivi régulier, précis et spatialement étendu du littoral vaseux guyanais. Cette approche méthodologique et les chaînes de traitement associées sont mobilisées dans ce stage afin de dresser la cartographie des bancs et une analyse diachronique de leur migration depuis 2016 et le début des séries d'images Sentinel 2.

Les objectifs poursuivis par cette étude sont :

- Détecter des limites subtidales des bancs de vase, en intégrant les contraintes environnementales (marée, houle, turbidité) ; Caractériser la dynamique morphologique des bancs (migration, déformation, disparition) ;
- Améliorer les outils d'aide à la décision en matière d'aménagement côtier durable en intégrant une estimation temporelle d'approche ou de départ des bancs de vase d'un des sites à enjeux suivi par l'ODyC.

Dans ce contexte, la question suivante guide ce mémoire :

**Le littoral guyanais fait partie des plus instables au monde, au vu des rythmes de migration des bancs de vase qui déterminent des cycles morphodynamiques de plusieurs années. Comment les outils de télédétection automatisés peuvent-ils, à partir d'une meilleure compréhension de cette rythmicité, contribuer à l'élaboration de stratégies de gestion côtière fondées sur l'anticipation ?**

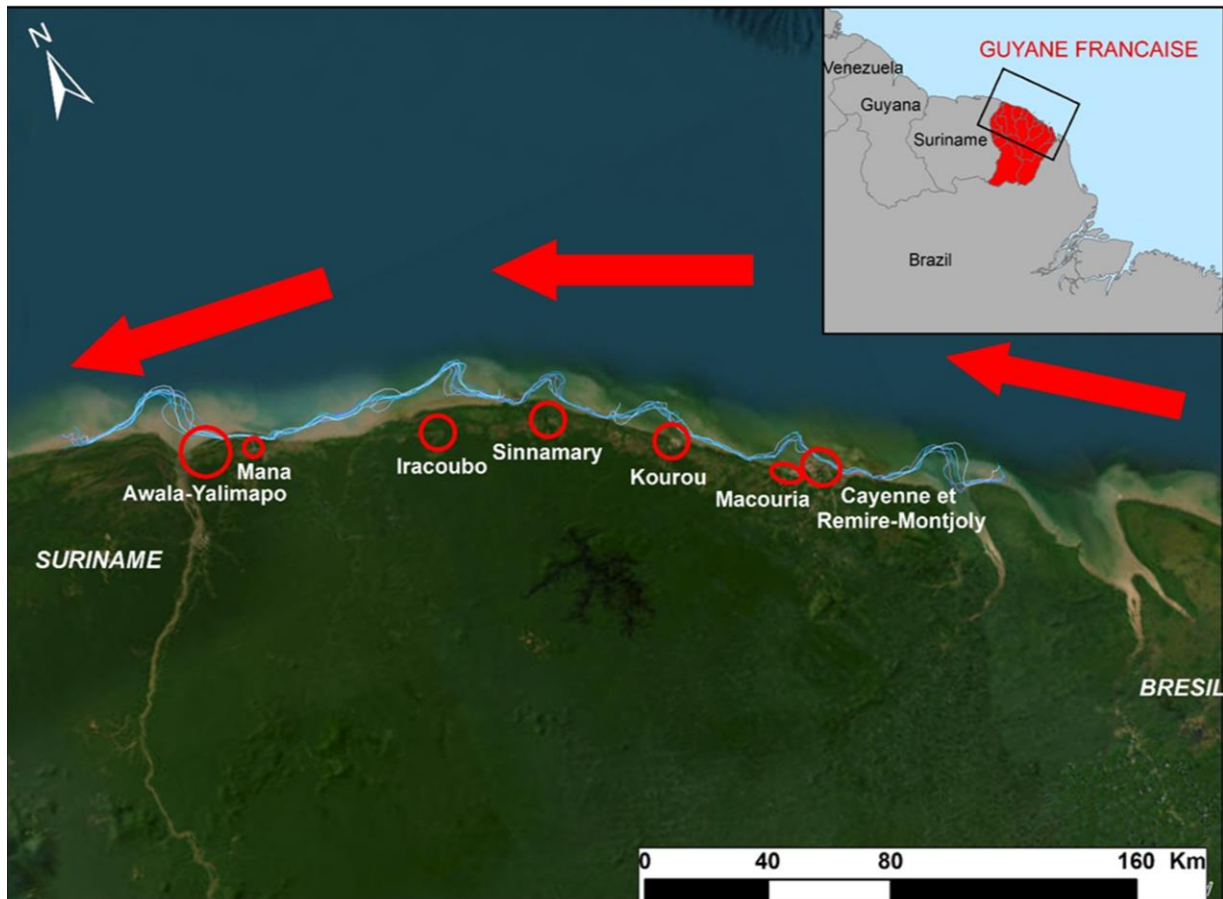


Figure 3 : Cartographie des bancs de vase 2022 à 2023 et sites suivis par l'observatoire ODyC ; Map of mud bank between 2022 and 2023 and study sites of ODyC coastal observatory

Morphologie et localisation des 6 bancs de vase présents le long du littoral de Guyane en 2022 et 2023 par rapport aux sites d'études de l'observatoire souligné par des cercles rouges. Le sens de déplacement des bancs de vase (flèche rouge) suit la direction majoritaire d'un courant de dérive littorale vers l'ouest. (sources : Copernicus, i-Sea, BRGM, ODyC, 2025 ; montage : Audran Dantin, 2025)

## 1.2. Présentation des établissements du stagiaire.

Le BRGM est un Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, ainsi que du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Il est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol dans une perspective de développement durable. Partenaire de nombreux acteurs publics et privés, il met la recherche scientifique, l'expertise et l'innovation au service de tous. Le BRGM affiche un budget de 170 millions d'euros (Larep.fr, 2025).

Le BRGM Guyane est lui situé à Cayenne (97300). Dans le domaine des risques naturels côtiers, il pilote le volet scientifique de l'Observatoire de la Dynamique Côtière (ODyC), qui fournit des données régulières sur l'évolution du littoral et sur les mouvements des bancs de vase.

L'Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane (ODyC) construit et fournit des données d'observation et des diagnostics sur les aléas littoraux en Guyane depuis 2014. Il pilote et diffuse des études à l'échelle régionale comme l'évolution historique du trait de côte ou la cartographie des bancs de vase. Il suit à l'échelle locale 9 sites à enjeux sur les principales localités littorales (Rémire-Montjoly, Cayenne, Macouria, Kourou, Awala-Yalimapo) via des mesures in-situ de topo-bathymétries, hydrodynamiques et sédimentaires. Il appuie les communes dans l'élaboration de leur Stratégie Locale de Gestion Intégrée du Trait de Côte (SLGITC). Il est piloté par la DGTM pour le volet animation, diffusion et relation communes-état ; puis par le BRGM pour le volet observation, analyse et diagnostic des aléas littoraux.

i-Sea est une Société par Actions Simplifiée (2014), PME spécialisée dans l'usage de la donnée satellitaire dans les domaines de l'Eau, de la Biodiversité et du Littoral. Basée à Pessac (33600), la société développe et commercialise des solutions originales de surveillance environnementale à la croisée de l'Observation de la Terre et du Numérique qui appuient les autorités environnementales et les collectivités dans la mise en œuvre des politiques publiques. i-Sea travaille principalement pour le compte des gestionnaires de la Biodiversité, pour les collectivités littorales, les acteurs portuaires et EMR (énergies marines) en France et outre-mer.

Positionnement du stagiaire et organisation du travail :

- Au BRGM Guyane, encadré par Guillaume Brunier, géomorphologue, ingénieur-chercheur spécialisé dans la géomorphologie côtière, au sein du pôle littoral. Un travail effectué en bureau partagé et sur le terrain en présentiel
- Chez i-Sea, intégré à l'équipe qualité eau / milieu marin, sous la supervision directe d'Olivier Regniers, géomaticien, chargé d'études et de recherche télédétection satellitaire et couleur de l'eau. Un travail effectué en open-space, principalement en présentiel.

### **1.3. Guyane : département et région d'outre-mer continentale en Amérique du Sud**

La Guyane française est le plus vaste département et région de France, avec une superficie de 83 846 km<sup>2</sup> (INSEE, 2024) (Figure 4). À titre de comparaison, le Portugal continental couvre 92 212 km<sup>2</sup>, ce qui illustre l'étendue du territoire guyanais. Il est le seul territoire ultramarin continental sur le continent sud-américain.

Il y a 22 communes en Guyane, dont les plus peuplées sont Cayenne (63 793 habs, INSEE 2024) et Saint-Laurent-du-Maroni (50 537 habs, INSEE 2024). La population, estimée à environ 292 400 habitants en 2025 (INSEE), est en forte croissance, bien supérieure à celle de la France hexagonale. Une partie significative de la population est située sur le littoral, dans les communes de Matoury, Rémire-Montjoly, Kourou, Sinnamary, Mana, Iracoubo, Awala-Yalimapo et Régina par exemple, toutes concernées par les dynamiques côtières.

Cette concentration urbaine sur le littoral, combinée à une croissance rapide, pose des défis majeurs en matière d'aménagement du territoire, de gestion des risques naturels et de préservation des écosystèmes. Les zones côtières sont particulièrement vulnérables à l'érosion, à l'envasement et aux inondations, ce qui nécessite une surveillance accrue et des stratégies d'adaptation appropriées.

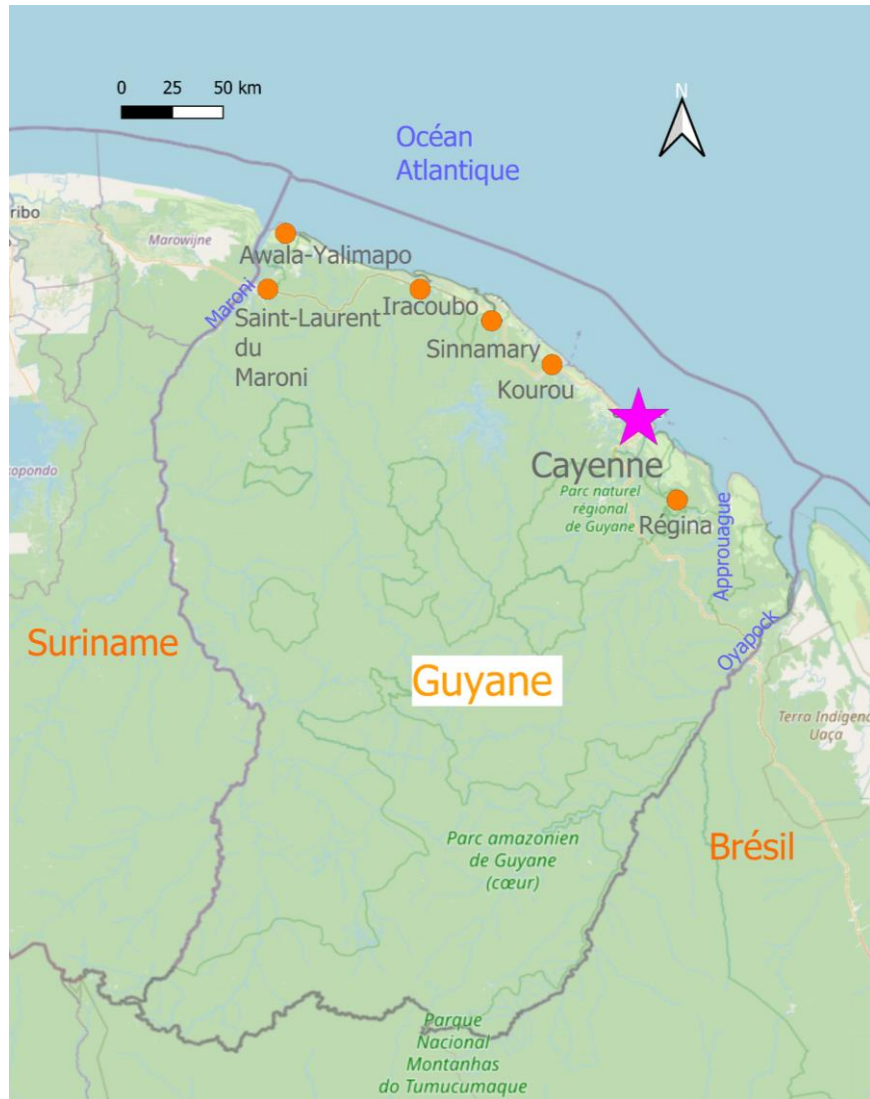


Figure 4 : Carte générale de la Guyane ; General map of French Guiana

Carte de localisation générale de la Guyane française, avec ses principales communes littorales, Saint-Laurent-duMaroni la deuxième commune la plus peuplée (51 732 habs) après Cayenne chef-lieu (64 236 habs), trois principaux fleuves (Maroni, Oyapock, Approuague) et pays voisins (Brésil, Suriname). (sources : OpenStreet Map et QGIS, Audran Dantin 2025)

### 1.3.1. Climatologie et hydrodynamique

Le climat guyanais est de type équatorial humide comprenant plusieurs périodes dites sèches et humides au cours de l'année avec une grande saison des pluies d'avril à juillet et une grande saison sèche d'août à novembre. L'alternance des saisons est liée à la position de la zone intertropicale de convergence (ZIC) (Figure 5A, B et C). Les oscillations australes de la pression atmosphérique, communément appelées El Niño et La Niña (ENSO pour El Niño Southern Oscillation), influencent l'intensité des saisons sèches et humides ainsi que la force du champ d'alizés. Le climat de vent est dominé par les alizés de nord-est (Figure 5B). Ces vents soutenus génèrent un régime de vagues de nord-est et d'est, avec des hauteurs variant de 1 à 2,5 mètres et des périodes comprises entre 7 et 10 secondes ; à cela s'ajoutent des épisodes de houles provenant du nord, de périodes plus longues de 12 à 17 secondes entre octobre et mai (Figure 5D et E). Ces vagues sont issues des dépressions de l'Atlantique Nord. L'incidence par rapport à la côte et la dominance du climat de vagues issues des alizées sont à l'origine d'une dérive littorale majoritairement orientée vers le nord-ouest et l'ouest (Gratiot et al., 2007). Les houles en provenance du nord sont plus énergétiques et sont à l'origine de la plupart des cas d'épisodes de submersions marines sur le littoral de Guyane (Longueville et al., 2018).

La côte guyanaise est soumise à un régime méso-tidal semi-diurne, c'est-à-dire deux marées hautes et deux marées basses par jour avec une amplitude modérée, oscillant entre 2 et 3 mètres (SHOM, 2022). Ces variations de niveau d'eau jouent un rôle fondamental dans la redistribution des sédiments, modulant l'exposition des bancs à la houle et contrôlant les phases d'accrétion ou de régression (Proisy et al., 2009).



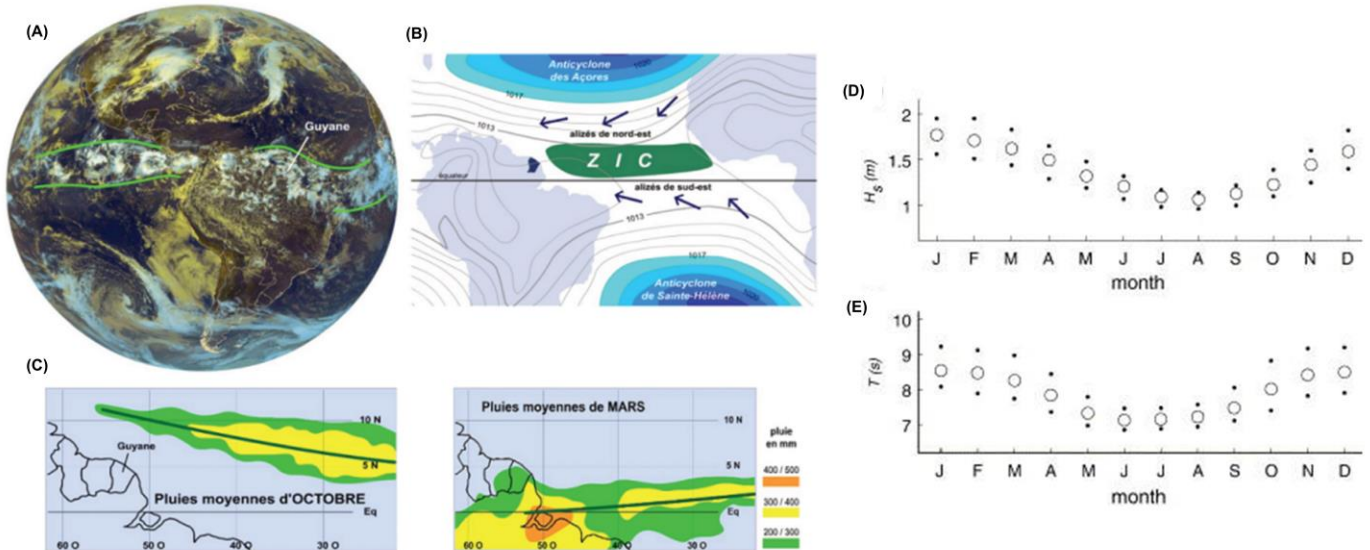


Figure 5 : Contexte climatique et hydrodynamique de la Guyane ; Climatic and hydrodynamique context of French Guiana

Position de la ZIC en Guyane (A) Vue globale de la position de la ZIC, (B) mécanismes climatiques régionaux qui engendrent les alizés, (C) Précipitations selon la position saisonnière de la ZIC ; Moyennes mensuelles des paramètres de houles sur la période 1960 – 2004, à partir de la base de données ré-analysée ECMWF Reanalysis 40 years (ERA 40) au point 5° N, 52° W. Les points correspondent au 1er et 3ème quartile et les cercles aux valeurs moyennes. (D) Hauteurs significatives des vagues ( $H_s$ ) en mètre et (E) période des vagues ( $T$ ) en seconde. (sources : A, B, C – adapté de Météo France et Jolivet et al., 2019 ; D, E – données ERA-40, Gratiot et al., 2007 ; montage : Audran Dantin, 2025)

### 1.3.2. Particularité du littoral vaseux guyanais

La construction du littoral guyanais est intrinsèquement liée au régime de dispersion des sédiments de l'Amazonie lors de l'Holocène et du Pléistocène. La plaine côtière s'est construite sur la base dépôts de vases massifs avec la formation de plages de chenier successives à différentes positions à l'intérieur des terres (Prost, 1989) (Figure 6B). Des travaux récents portant sur la datation de sables anciens ont permis de mieux comprendre la manière dont cette côte, soumise à l'influence de l'Amazonie, s'est construite et modifiée au fil des millénaires. Grâce à l'analyse de 28 échantillons de sables prélevés dans différents cordons littoraux appelés cheniers (formé à l'arrière d'un littoral vaseux sous l'action de la houle), Brunier et al. (2022), ont mis en évidence quatre grandes périodes de formation de ces plages anciennes (Figure 6A) :

- La première, autour de 4 500 ans, concerne des cheniers formés près de l'embouchure du Maroni ;
- La deuxième, plus marquée, date d'environ 1 000 à 1 300 ans et concerne plusieurs secteurs comme Awala, Iracoubo et Mahury ;
- La troisième est plus récente (environ 300 ans) et concerne les zones de Kourou et Sinnamary.

- Les plages de baies de Cayenne et de Rémire-Montjoly se sont formées sur une temporalité plus ancienne, notamment lors du précédent interglaciaire (période chaude, il y a 120 000 à 110 000 ans) et au cours du dernier cycle de glaciation, entre environ 80 000 et 45 000 ans.

Ces périodes témoignent d'une construction progressive mais instable du littoral. Elles traduisent une alternance entre des phases où la côte avançait sous l'effet des dépôts de vase (passage de bancs de vase), et d'autres où elle subissait une érosion ou un recul. Comme le résument les auteurs, « ces regroupements d'âges révèlent une instabilité millénaire du littoral guyanais » (Brunier et al., 2022). Ces résultats montrent également que la majeure partie de la plaine côtière actuelle s'est probablement formée après 1 000 ans, ce qui souligne sa jeunesse et sa vulnérabilité face aux dynamiques en cours.

La présence et la dynamique des cheniers sur les côtes vaseuses de Guyane et du Suriname témoignent d'un équilibre précaire entre approvisionnement en sable et action des vagues. (Anthony et al. 2019) distinguent deux types de cheniers : les type 1, à morphologie stable, favorisés par un bon apport sédimentaire et les type 2, sujets à une migration accélérée vers l'intérieur, dus au manque de sable et à la survenue de submersions. « Cette transition morphodynamique illustre la fragmentation croissante des cheniers, rendant le littoral plus vulnérable à l'érosion » (Anthony et al., 2019). Ces évolutions impactent directement la nidification des tortues marines, qui sont menacées, la protection contre la houle, et la fonction de dissipation énergétique des plages.

L'étude de Brunier et al. (2019) menée sur un polder situé entre les embouchures de l'Organabo et de la Mana met en évidence les taux de recul du trait de côte parmi les plus élevés jamais observés sur des côtes vaseuses hors contexte de tempêtes (jusqu'à -200 m/an). Ce recul s'explique par la suppression des mangroves, qui agissent normalement comme barrière dissipatrice d'énergie. En leur absence, l'érosion intertidale s'intensifie, favorisant la migration de cheniers vers l'intérieur des terres. « L'élimination anthropique des mangroves peut durablement modifier la morphodynamique des rivages vaseux et empêcher leur résilience, même en l'absence de déficit sédimentaire » (Brunier et al., 2019).



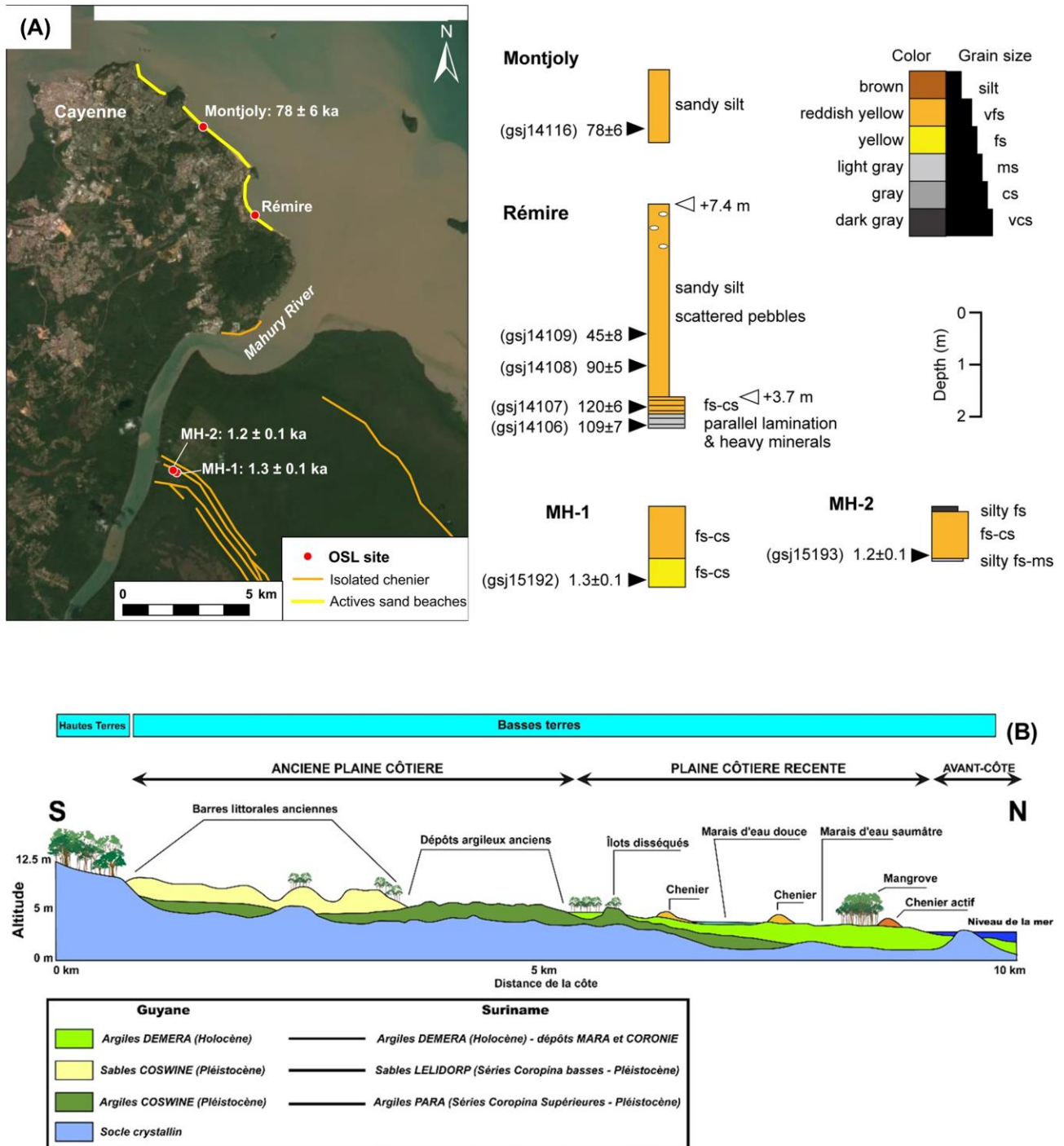


Figure 6 Construction et morphologie de la plaine côtière en Guyane ; Coastal plain building and morphology in French Guiana

(A) Position des plages anciennes, analyse stratigraphique des dépôts et leur âge en kilo-année obtenue par datation de l'enfouissement des grains de quartz via la méthode de luminescence stimulée optiquement (OSL).  
(B) Structure type de la plaine côtière en Guyane montrant les alternances de dépôts sableux sur les dépôts vaseux. (sources : A, B – adapté de Prost, 1989, Brunier et al., 2022 ; montage : Audran Dantin, 2025)

### **1.3.3. Système de dispersions des sédiments de l'Amazonie : morphologie et dynamique sédimentaire des bancs de vase amazoniens**

Le littoral de la Guyane française s'étire sur environ 350 kilomètres, entre les estuaires du Maroni à l'ouest et de l'Oyapock à l'est. Il est dominé à 86 % par des zones vaseuses colonisées par la mangrove, les plages sableuses représentant 13 %, et les côtes rocheuses à peine 1 % (Moisan and De la Torre, 2014).

Les sédiments qui alimentent ce littoral sont majoritairement composés de limons et d'argiles issus de l'érosion andine (Prost, 1989) (Figure 7B). Transportés sur des milliers de kilomètres via le fleuve Amazone, ces matériaux atteignent la mer et forment des bancs de vase de grande ampleur (Figure 7A). Les dimensions moyennes de ces prismes sédimentaires sont d'environ 30 km d'emprise à la côte, de 10 km d'emprise vers le large et de 5 m d'épaisseurs (Abascal Zorrilla et al., 2018; Augustinus, 2004; Froidefond et al., 1988; Gensac et al., 2015). Certaines entités peuvent atteindre 60 km d'emprise à la côte et 15 km d'emprise au large. En mouvement permanent, ils migrent vers l'ouest à une vitesse moyenne estimée entre 1 et 5 km/an (Abascal Zorrilla et al., 2024), contribuant à la mise en place de prismes d'accrétion (c'est-à-dire des accumulations progressives de sédiments le long du trait de côte), souvent colonisés par la mangrove, et laissant en retrait des zones exposées aux vagues et qui sont en fortes érosion (Figure 7C). Ces prismes sédimentaires, composés de vase fluides très denses, jouent un rôle majeur en amortissant les vagues du large permettant la formation de zones calmes d'un point de vue hydrodynamique dans la partie interne du banc (Gensac et al., 2015). L'accumulation de sédiments au sein de ces zones peu agitées permet la construction de vastes vasières intertidales dont la topographie se réhausse, le substrat se consolide et la mangrove s'installe au fil des années de transit du banc.

Les bancs sont constitués de plusieurs compartiments morphologiques (Figure 7C et Figure 8A et B):

- Un prisme d'accrétion subtidal, immergé en permanence cumulant l'essentiel des volumes de sédiment du banc ; ce compartiment amortit les vagues en provenance du large
- Une partie intertidale interne au banc, recouverte et découverte par les marées et colonisée par la mangrove
- L'arrière du banc et la zone inter-banc (entre deux bancs de vase) qui ne sont pas protégés par le prisme d'accrétion

Les processus de mise en mouvement des bancs est alimenté par un mécanisme de recyclage sédimentaire guidé par le régime de vagues (Anthony et al., 2010a; Gensac et al., 2015) :

- La partie arrière du banc et les zones inter-bancs, soumises à la houle, sont démantelées en blocs puis liquéfiées,
- Ces vases fluides forment un panache turbide et s'écoulent vers l'ouest poussées par le champ de vague,
- Elles viennent alimenter le prisme d'accrétion sédimentaire avant, où se forment de nouvelles vasières colonisées par la mangrove.

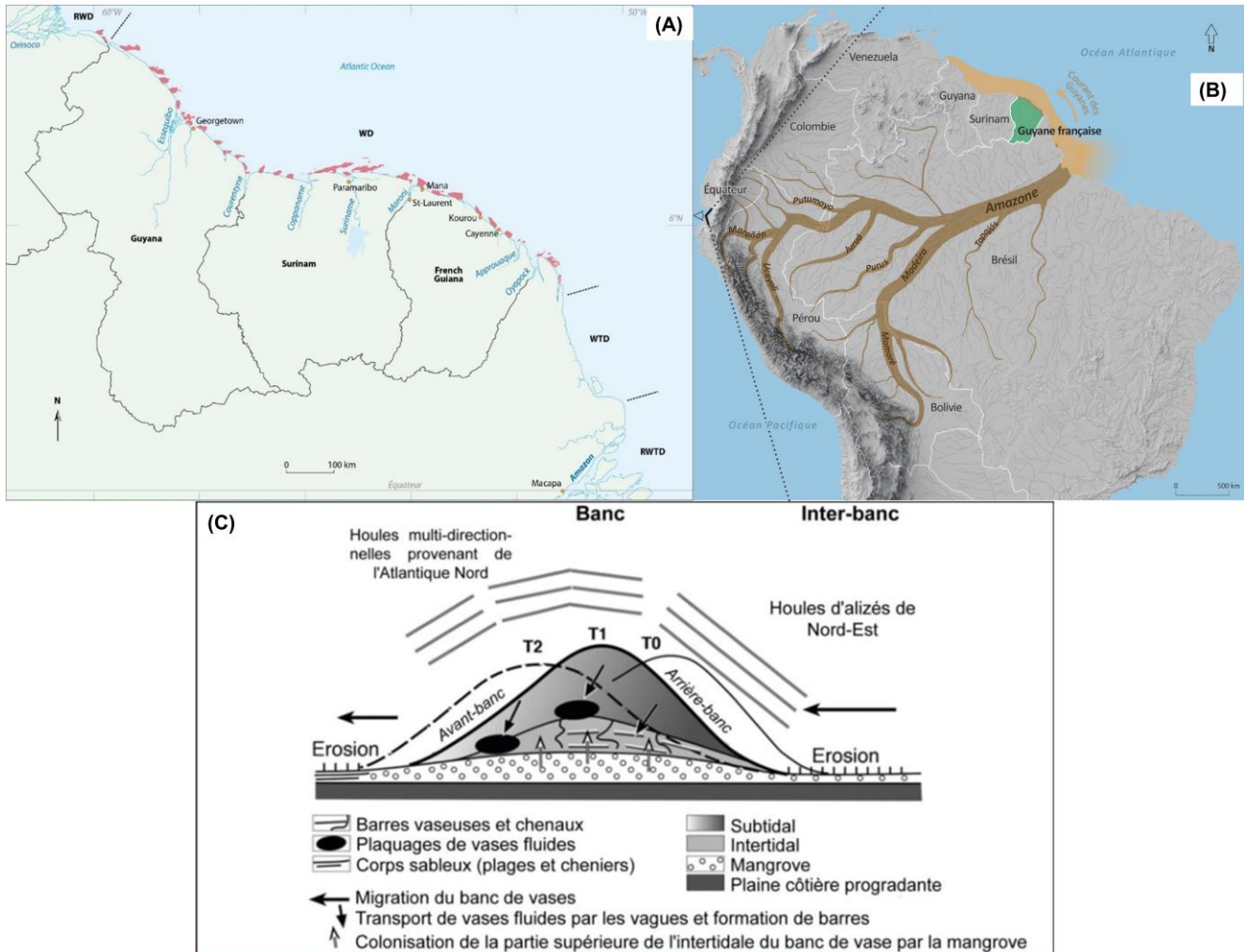


Figure 7 : Localisation, provenance et structure des bancs de vase sur le littoral des Guyanes (le Guyana, le Suriname et la Guyane française) ; Location, origin, and structure of mud bankss along the Guianas coastline: Guyana, Suriname, and French Guiana

(A) Carte localisant les bancs de vase de l'Amazonie au delta de l'Orénoque (du Brésil au Vénézuéla) ; (B) Carte montrant le cheminement des sédiments provenant de l'érosion des Andes et arrivant sur le littoral via l'Amazonie ; (C) schéma de la structure d'un banc de vase combinant les dynamiques de remaniement du banc par les vagues, les processus d'accrétion et d'érosion de la côte, et la colonisation puis destruction de la mangrove. Projection de la migration à travers T0, T1 et T2. (sources : A, B, C – Anthony et al., 2013, montage : Audran Dantin, 2025)



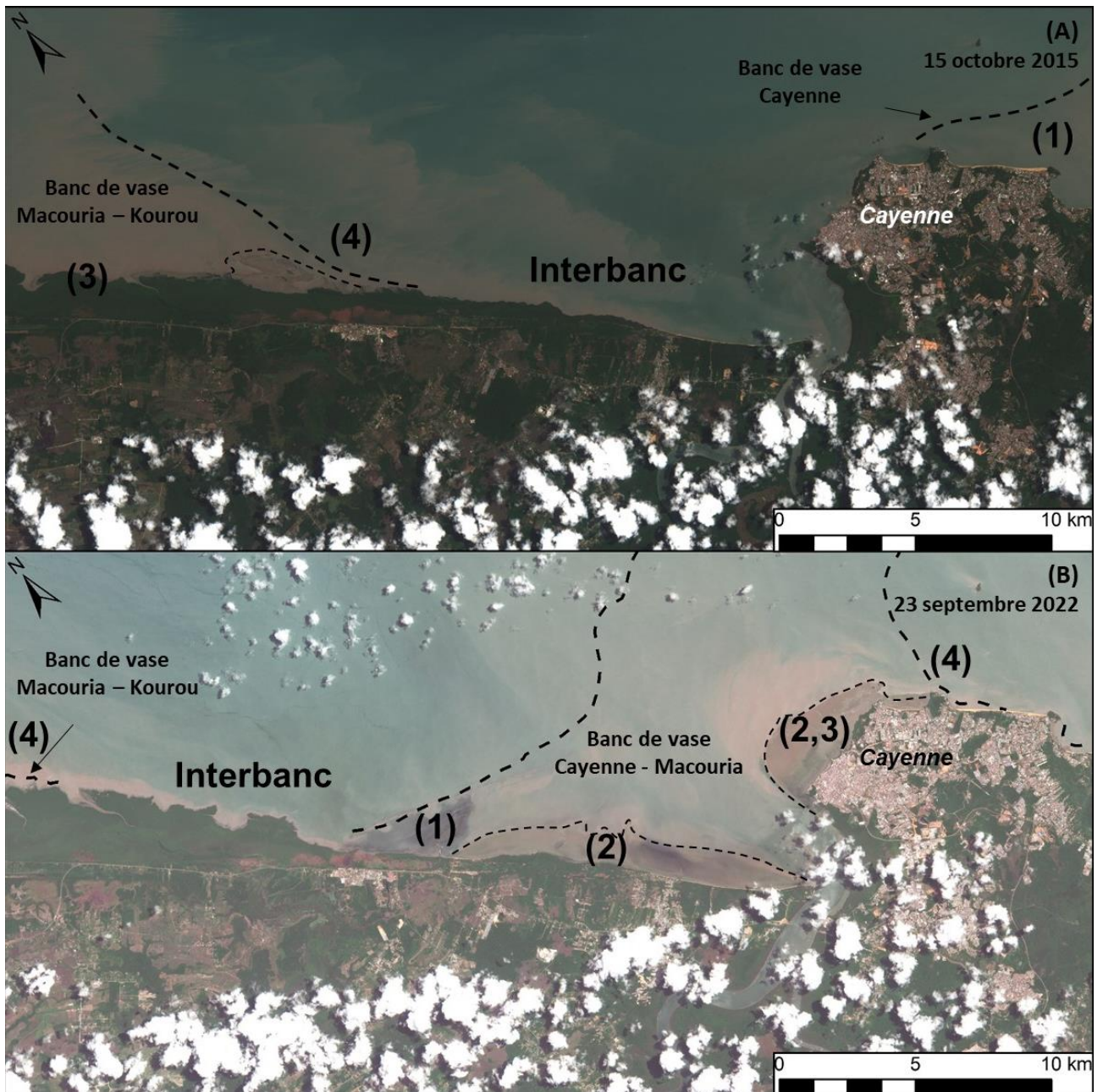


Figure 8 : Morphologie, emprise et migration des bancs de vase observées par imagerie satellite Sentinel 2 entre 2015 et 2022 sur la région de Cayenne à Macouria. Morphology, extent, and migration of mud banks observed through Sentinel 2 satellite imagery over Cayenne and Macouria coastline.

Image Sentinel 2 de 2015 et de 2022 (A et B respectivement) avec en (1) l'avant-banc subtidal, (2) les barres et vasières intertidales, (3) les vasières colonisées par la mangrove et (4) l'arrière-banc en érosion. Ces images illustrent la migration de deux bancs de vase et l'extension des espaces inter-bancs dans la région de Cayenne. (source : A, B – adapté de Brunier, 2023)

### 1.3.4. Un trait de côte parmi les plus instable au monde

Entre 1950 et 2021, le trait de côte guyanais a connu des variations notables :

- Environ 37 % des secteurs sont en accrétion
- 43 % en érosion
- 20 % relativement stables

Des avancées littorales allant jusqu'à 5 km ont été mesurées dans les zones de Sinnamary et Iracoubo, tandis que des reculs de l'ordre de 4 km ont été observés vers Mana. Ces dynamiques sont directement liées au passage des bancs de vase : sept entités majeures ont été identifiées depuis les années 1950 (Brunier et al. 2024). Cette dynamique se traduit par des tendances d'évolutions annuelles du trait de côte, positives comme négatives, d'ordre décimétriques sur 75 ans (Figure 9). A l'échelle de chroniques d'observations sur une décennie, le trait de côte évolue sur un rythme plus proche de la centaine de mètre par an (Anthony et al., 2019; Brunier et al., 2024, 2019; Jolivet et al., 2019). Ces évolutions extrêmes ont principalement lieu le long des côtes à mangrove. Elles ont déjà entraîné la mise à l'arrêt de grandes infrastructures agricoles en polder en Guyane (Brunier et al., 2019) et menacé sévèrement d'autres au Suriname (Anthony, 2015) et au Guyana (Anthony and Gratiot, 2012).

La dynamique des bancs de vase influence aussi majoritairement la dynamique du trait de côte sur les plages de sable et les cheniers sableux de Guyane en forçant le transit sédimentaire à l'inverse de la direction de la dérive littorale à l'approche d'un banc, puis en fixant le littoral lors de la phase d'envasement et enfin en rétablissant un transit de sédiment vers l'ouest lors du dévasement. Ce modèle, dit « de rotation de plage forcé par les bancs de vase », définie par Anthony et Dolique (2004) est tout à fait unique (Figure 10A). Les variations du trait de côte lors des phases de transit du sédiment s'échelonnent à plusieurs dizaines de mètres par an, ce qui est considérable à l'échelle de prismes sédimentaires sableux (Figure 10B).

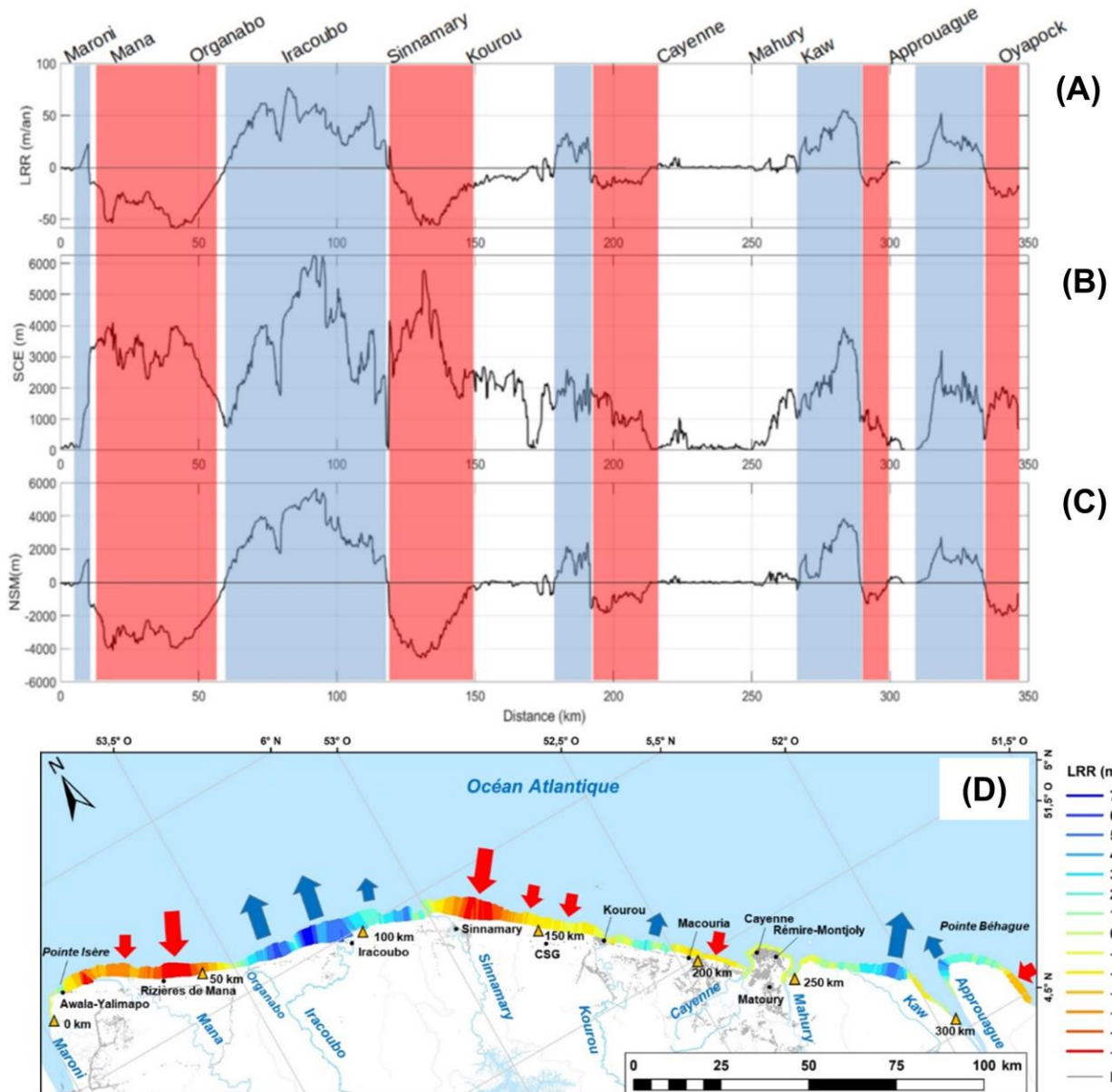


Figure 9 : Mobilité tendancielle du trait de côte de 1950 à 2021 sur l'ensemble de la Guyane de l'ouest à l'est ; Shoreline mobility from 1950 to 2021 along the entire French Guiana coast, from west to east

(A) le taux d'évolution tendanciel en mètre par an (LRR) ; (B) l'enveloppe globale de l'évolution en mètre (SCE) ; (C) l'évolution de la position du trait de côte en mètre. Les bandes bleues représentent les zones en accrétion et les bandes rouges représentent les zones en érosion, les cours d'eaux sont placés en haut de la figure ; (D) Cartographie des tendances globales obtenues avec le taux de régression linéaire (LRR) de 1950 à 2021 sur la totalité du linéaire côtier : les flèches rouges représentent les zones à tendances de reculs importantes et les flèches bleues représentent les zones à tendance d'avancée importantes. Les éléments représentés sont : les principales villes (points noirs), les espaces urbains (gris foncé), les morphologies côtières remarquables (en noir et en italique), les principaux cours d'eau (bleu) et la distance en kilomètre le long du linéaire côtier (triangles orange). (sources : Brunier et al., 2024; A, B, C, D – BD TOPO 2018 IGN, BRGM, ODyC)



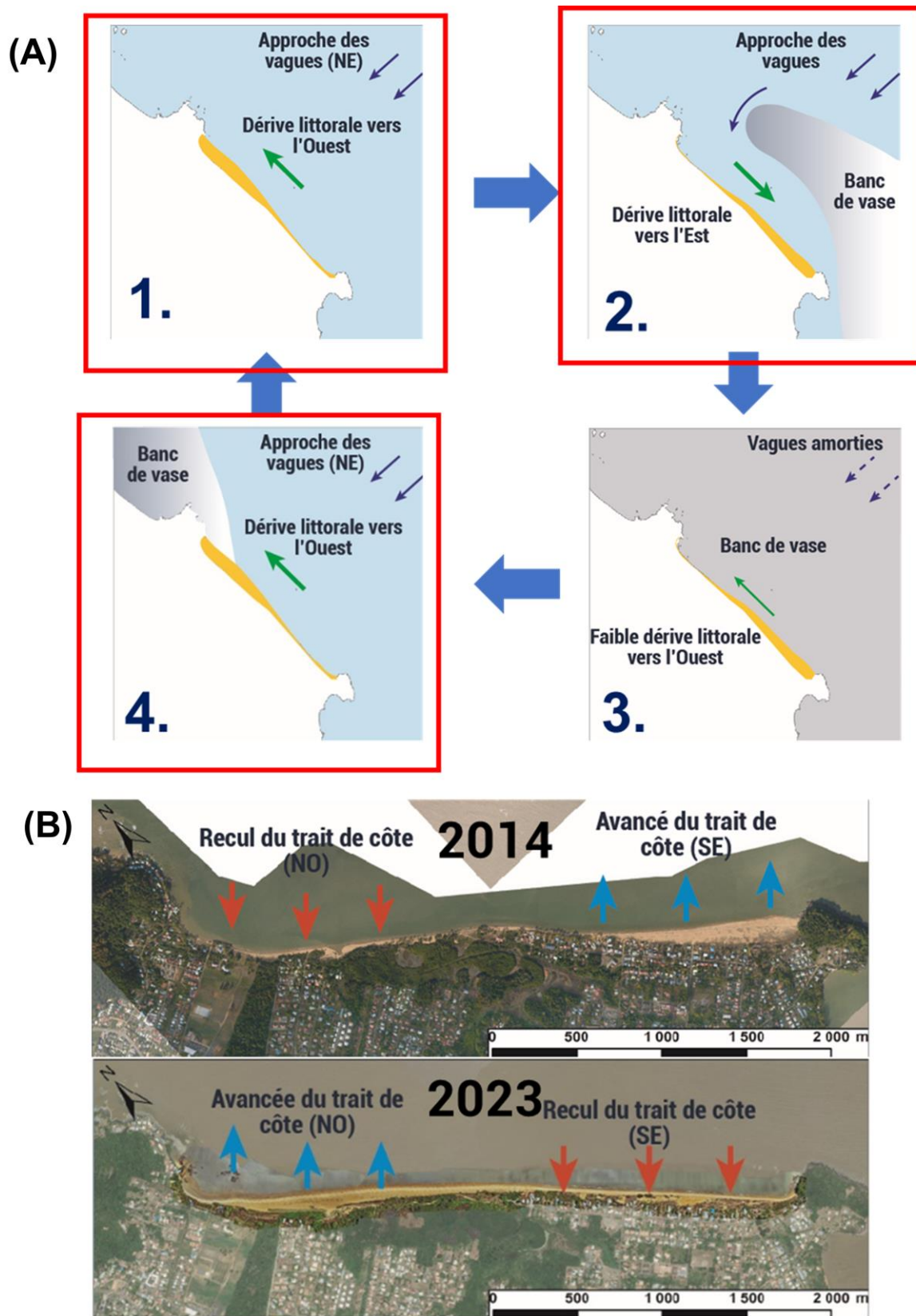


Figure 10 : Dynamique des plages sous l'influence des bancs ; Beach dynamics under the influence of mud banks

(A) Cartes illustrant la dérive littorale sous forme cyclique en Guyane sur la plage de Montjoly ; (B) orthophotos montrant l'inversion entre le recul et de l'avancée du trait de côte de 2014 à 2023. (sources : A, B – adapté d'Anthony et Dolique, 2004 ; données de l'ODyC et de Brunier, 2015, 2024 ; montage : Audran Dantin, 2025)



### 1.3.5. Enjeux liés au changement climatique

Le réchauffement climatique accentue la vulnérabilité des littoraux en général, en particulier la hausse du niveau marin. À l'échelle de la Guyane, des projections locales ont été réalisées à l'aide de modèles climatiques construits sur la base de données du territoire (stations météorologiques historiques et marégraphes) dans le cadre du projet Guyaclimat (Longueville et al., 2022b; Thiéblemont et al., 2023). Outre les évolutions à la hausse des températures, les auteurs de l'étude ont calculé une élévation du niveau marin médian de 25 à 28 cm à l'horizon 2050 pour, respectivement, les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) d'émissions de gaz à effet de serre modérées (Representative Concentration Pathways (RCP 4.5)) à fortes (RCP 8.5) (Figure 11). Les projections à 2100 de ces mêmes scénarios indiquent des valeurs médianes de hausses potentielles du niveau marin de 54 cm (RCP 4.5) jusqu'à 84 cm (RCP 8.5). Combinée au renforcement des alizés, cette montée des eaux pourrait intensifier l'érosion côtière. La dynamique des bancs de vase et de l'extension des mangroves, très dépendante des conditions hydrodynamiques, pourrait en outre être très perturbée. Les épisodes climatiques extrêmes comme El Niño sont également susceptibles de perturber la dynamique des sédiments et l'évolution morphologique des plages sableuses (Brunier et al. 2024). Sur le littoral de Guyane, l'impact du changement climatique sur la dynamique côtière particulièrement intense de ce territoire est encore discuté et est un sujet de recherche fondamentale.

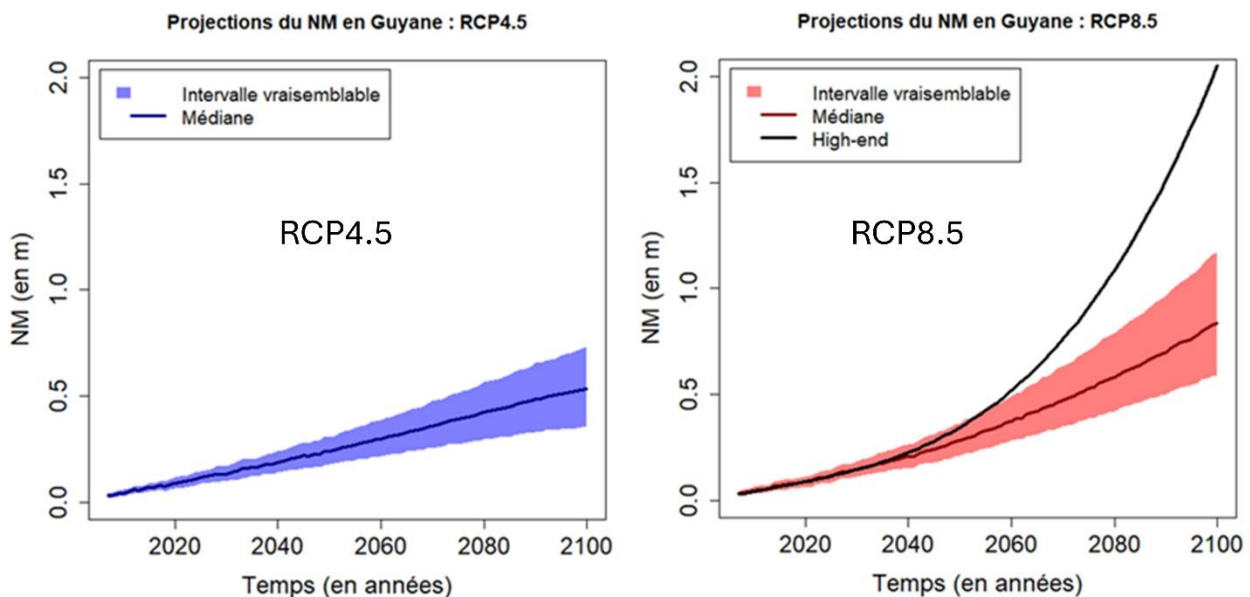


Figure 11 : Projections du niveau marin (NM) en Guyane à l'horizon 2100 issue du programme de recherche Guyaclimat ; Projected sea level rise (SLR) in French Guiana by 2100 from Guyaclimat research program

Graphiques comparant le scénario RCP 4.5, qui affiche une montée des eaux d'environ 0,54 m, au RCP 8.5, qui affiche une montée des eaux d'environ 0,84 m, en moyenne depuis 2000. (Source : programme Guyaclimat, Longueville et al. (2022b))

### 1.3.6. Une dynamique complexe

L'enjeu de politique d'aménagement du littoral en Guyane n'est pas seulement de constater l'érosion ou l'avancée des côtes, mais de comprendre les mécanismes fins qui gouvernent la migration, la déformation et la structuration des bancs de vase. Ces phénomènes résultent de l'interaction de nombreux facteurs : la houle, la marée, les courants, mais aussi la morphologie du fond, la présence de substrats rocheux ou encore les obstacles anthropiques.

C'est pour cette raison que la mise en place d'un suivi par télédétection haute fréquence, associée à des méthodes de traitement d'images automatisées, constitue aujourd'hui un levier essentiel pour mieux prédire et cartographier ces évolutions. En particulier, l'extraction automatique de la limite subtidale du banc de vase, zone charnière où l'énergie des vagues est amortie, offre une lecture précieuse de l'état et de la dynamique des bancs. Le traitement des images satellites via des modèles de classification d'image comme le Random Forest permet d'intégrer leur complexité texturale dans des chaînes de traitement robustes produisant des résultats stables dans le temps. L'ensemble de ces travaux vise in fine à éclairer la compréhension morphologique des bancs de vase et à appuyer les politiques de gestion du littoral guyanais.

## 1.4. La télédétection au service du suivi littoral

La télédétection est un ensemble de techniques permettant de déterminer à distance les propriétés des objets naturels ou artificiels à partir du rayonnement (ou énergie) qu'ils émettent ou réfléchissent. Elle permet d'observer, cartographier et analyser les phénomènes naturels à distance, à partir d'images acquises par des capteurs embarqués sur différents vecteurs, ou supports, comme des satellites, des avions ou des drones. En Guyane, cette technologie est particulièrement bien adaptée pour suivre l'évolution des bancs de vase, difficiles à étudier sur le terrain en raison de leur étendue et de leur accessibilité limitée. La nébulosité importante de la Guyane laisse néanmoins des fenêtres d'observations parfois restreintes

### 1.4.1. Des capteurs complémentaires pour un suivi multi-sources

Plusieurs types de capteurs sont utilisés en télédétection :

- **Optiques** (Sentinel-2, SPOT, Pléiades) : sensibles à la lumière visible et infrarouge, ils permettent de détecter les zones de turbidité de l'eau et de localiser les bancs de vase. L'utilisation de ces capteurs, dit passifs, est limitée par la nébulosité potentiellement importante en Guyane en saison des pluies.
- **Radar** (Sentinel-1) : capables de fonctionner quelles que soient les conditions météo, ils offrent une vue continue sur les surfaces émergées et permettent de repérer les structures vaseuses en surface. Bien qu'il soit utilisé sur d'autres littoraux, il apparaît, après évaluation, qu'il n'est malheureusement pas assez résolu pour décrire le champ de vague en Guyane.
- **Lidar** : utilisés ponctuellement pour restituer en 3D la topographie des zones intertidales. Ces levés aéroportés, bien que précis, sont très onéreux. La disponibilité, l'emprise spatiale et la revisite sont très hétérogènes en Guyane.

- **Thermiques** : utiles dans certaines études pour détecter des variations de température des eaux côtières, mais peu mobilisés ici.

#### **1.4.2. Un usage ciblé pour le suivi des bancs de vase**

En Guyane, les satellites Sentinel-2 sont les plus utilisés. Ils comprennent en réalité trois satellites, Sentinel-2A, Sentinel-2B, Sentinel-2C qui travaillent en tandem pour fournir une couverture optique de la surface terrestre tous les cinq jours. Cela permet de disposer d'images régulières et d'une résolution temporelle accrue, essentielle pour suivre des phénomènes dynamiques comme la migration des bancs de vase. Sentinel-2 permet d'identifier les zones d'accumulation sédimentaire, de suivre la turbidité de l'eau et donc d'anticiper les impacts sur la mangrove ou les plages.

## **2. Matériel et méthode**

### **2.1. Déroulé du stage**

Avant de commencer toute opération technique, il a été nécessaire de procéder à une étape préliminaire d'analyse du contexte géographique, environnemental et socio-économique de la Guyane française, ainsi qu'à une familiarisation avec la dynamique spécifique des bancs de vase. L'objectif visait à la fois à développer une compréhension approfondie des concepts et des mécanismes physiques qui contrôlent la migration des bancs de vase sur le plateau des Guyanes, et à analyser les implications locales de ces dynamiques pour les populations et les infrastructures. Cette étape a impliqué la lecture et l'analyse de la bibliographie scientifique associée, la consultation de rapports techniques produits par le BRGM et l'ODYC, ainsi que des échanges réguliers avec les encadrants scientifiques à distance et en présentiel.

Il a fallu plusieurs semaines pour intégrer les interactions entre les divers facteurs qui influent sur la morphodynamique côtière :

- La houle (alizés de nord-est, houles de nord saisonnières),
- La marée (régime méso-tidal semi-diurne),
- Les courants côtiers et la prédominance de la dérive vers l'ouest
- Les apports sédimentaires provenant de l'Amazone et leur redistribution.

Sur le plan socio-économique, la Guyane se distingue par une forte concentration de sa population sur les communes littorales (Cayenne, Kourou, Mana, entre autres), ce qui accroît la vulnérabilité aux phénomènes de recul du trait de côte et de submersion marine. La diversité culturelle, la croissance démographique soutenue et les disparités économiques influent également sur les capacités d'adaptation et les stratégies de gestion côtière.

Cette étape d'immersion scientifique et contextuelle a permis de comprendre le phénomène physique des bancs de vase, mais aussi de définir l'enjeu stratégique de leur suivi pour anticiper les périodes critiques

(érosion ou accrétion). Elle a également permis d'identifier les particularités logistiques du télétravail entre Bordeaux (site d'i-Sea à Pessac) et la Guyane, et d'anticiper l'adaptation au contexte technique et humain du BRGM Guyane en deuxième partie de stage.

La phase préparatoire a aussi permis de se familiariser avec l'environnement Linux et les outils spécifiques utilisés chez i-Sea pour le traitement des données Sentinel-2, notamment via une connexion à la machine distante « Attila » qui permet de se connecter à un environnement virtuel. L'apprentissage de commandes et de raccourcis spécifiques a été nécessaire afin d'optimiser les durées de calcul, parfois étalées sur plusieurs heures, et de permettre le traitement simultané de plusieurs périodes. Chronophage par essence, une large part du travail lors de la phase de production des données socle a été le contrôle et la rectification manuel des résultats ainsi que la création puis le placement des polygones d'entraînement du modèle via un opérateur. S'ils sont placés sur des pixels qui représentent un nuage ou un champ de vague au lieu d'être placés sur un banc de vase comme ils le devraient, la classification donne un mauvais résultat et il faut recommencer l'entraînement.

## **2.2. Cartographie du prisme d'accrétion des bancs au large par télédétection satellitaire**

Le suivi satellitaire des bancs de vase repose sur l'utilisation d'images multispectrales à moyenne résolution spatiale (10 m) et à haute fréquence temporelle (deux à trois revisites par semaine), issues des satellites Sentinel-2 du programme européen Copernicus. Ces données sont essentielles à la mise en œuvre des traitements automatisés (voir Figure 12) développés par i-Sea et le BRGM dans le cadre de l'Observatoire de la Dynamique Côtière (ODyC). Des indicateurs de qualité ont été générés, mais non exploités dans ce mémoire ; cependant, ils le seront dans le cadre de la poursuite du stage. Une figure ainsi qu'un tableau récapitulatif sont disponibles en fin de partie 2.4 afin de faciliter la lecture (Figure 13 et Tableau 1).

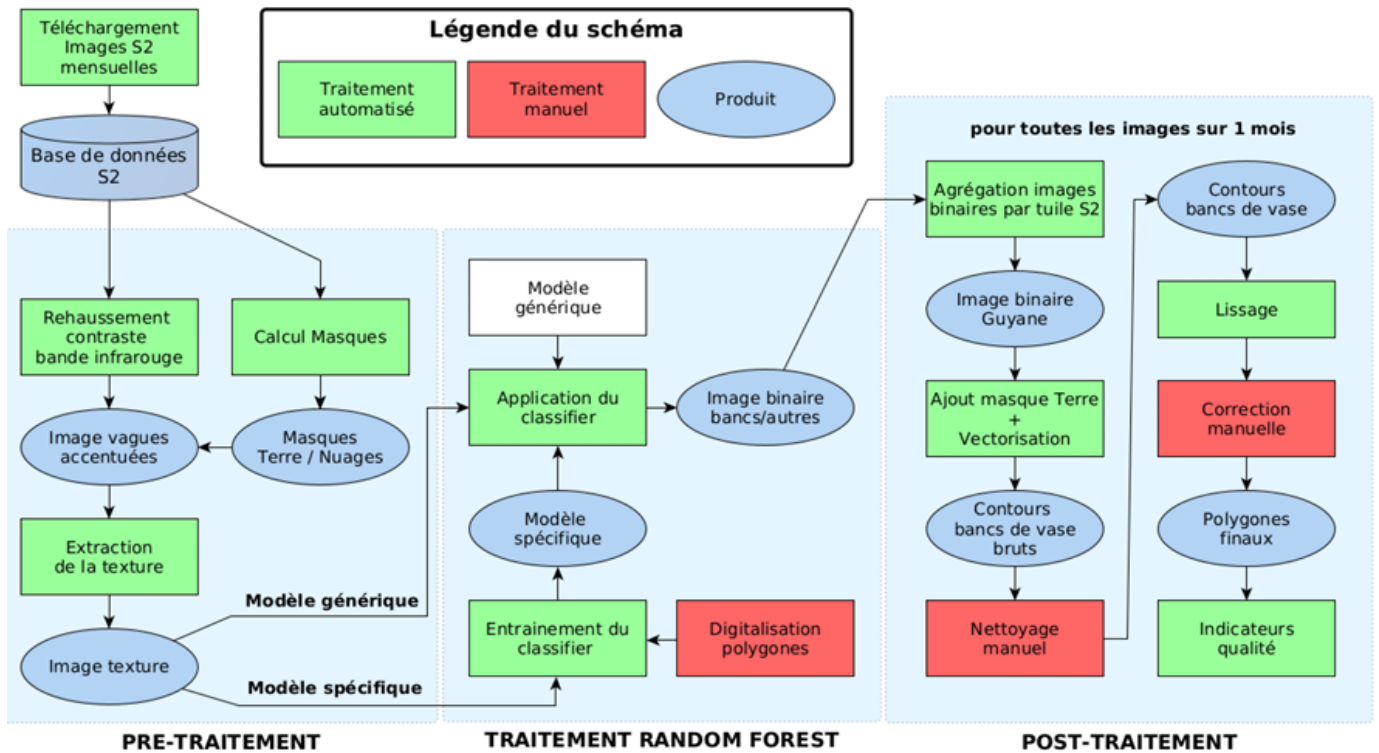


Figure 12 : Chaîne de traitement pour la cartographie des bancs de vase à partir d'images Sentinel-2 par analyse et classification des indicateurs de texture représentant les champs de vagues ; Mud bank mapping workflow from Sentinel-2 imagery based on the analysis and classification of texture indicators for wave field representation (source : rapport 2024 BRGM / ISEA, 25 janvier 2025)

### 2.2.1. Limite de dissipation des vagues sur le prisme sédimentaire d'un banc de vase

Grâce à la limite de dissipation des vagues qui correspond à la frontière morphologique entre le champ de vague et les bancs, il est possible de délimiter la partie subtidale de ceux-ci. Cette zone caractérise l'endroit où l'énergie des ondes incidentes subit une atténuation significative en raison de l'épaisseur et de la consistance du prisme sédimentaire subtidal. En pratique, cette zone représente un élément fondamental pour l'identification des bancs au sein d'images satellitaires, car la dissipation progressive du champ de vagues engendre une signature texturale particulière, qui se différencie de celle constatée dans les zones d'eau libre. Cette limite caractérise donc la transition entre la bande d'eau soumise à l'agitation des houles océaniques et les eaux plus calmes recouvrant le banc, ce qui favorise la décantation des sédiments et le développement des vasières intertidales.

### 2.2.2. Sources de données et capteurs utilisés

Le programme Sentinel-2 inclut en ce moment trois satellites opérationnels : Sentinel-2A, lancé en juin 2015, Sentinel-2B en mars 2017 et Sentinel-2C en décembre 2023. Leur objectif principal consiste à effectuer une observation optique de la surface de la Terre, avec une fréquence de revisite de cinq jours à l'équateur.



Chaque satellite est équipé d'un capteur multispectral MSI (MultiSpectral Instrument) qui capture 13 bandes spectrales allant du visible à l'infrarouge proche et à l'infrarouge à ondes courtes. Les niveaux de résolution spatiale s'étendent de 10 mètres (pour les bandes visibles et proche infrarouge) à 20 mètres (pour les bandes spécifiques à l'étude de la végétation, de la bathymétrie côtière ou de la turbidité), et atteignent même 60 mètres pour les bandes utilisées dans les corrections atmosphériques.

L'intérêt des bandes du proche infrarouge (PIR) est qu'elles ne réagissent qu'aux fortes turbidités supérieures à environ 50 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) ce qui permet de limiter l'impact de la turbidité de surface lors de l'étape de rehaussement de contraste du champ de vagues. Par conséquent, en cas de forte turbidité fréquente en Guyane souvent plus de 100 NTU (Gratiot, 2007), il y a la possibilité de récupérer les fronts de turbidité dans l'image réhaussée.

Ce degré de précision est approprié pour l'analyse approfondie des structures subtidales et intertidales, ce qui permet de détecter les zones d'accumulation de sédiments, de définir les limites d'amortissement des vagues sur un banc de vase et de suivre leur évolution sur plusieurs années.

### **2.2.3. Étendue spatiale et période temporelle**

Le traitement a été réalisé sur le tronçon de littoral s'étendant de l'estuaire du Maroni, à la frontière avec le Suriname, jusqu'à l'embouchure de l'Approuague. Cette région englobe les zones les plus cruciales pour l'analyse des processus côtiers en Guyane, comprenant Cayenne, Kourou, Sinnamary, Mana et Awala-Yalimapo.

L'analyse porte sur la période qui s'étend de janvier 2016 à décembre 2022, qui correspond avec la disponibilité effective des séries Sentinel-2 (avec uniquement les données de Sentinel-2A en 2016, puis la combinaison de Sentinel-2A et Sentinel-2B à partir de mi-2017). Les années 2023 et 2024, qui ont déjà été examinées dans le contexte d'une autre composante du projet, ne sont pas incluses dans cette analyse, mais 2023 y sera pour la suite du mémoire, quant à l'année 2024, elle sera analysée en fin de stage.

Cette période d'observation permet de couvrir quasiment un cycle complet de migration des bancs de vase (7-8 ans), ce qui rend possible l'observation successive des étapes d'accrétion, de stabilisation, de démantèlement et de phase inter-banc.

### **2.2.4. Outils et environnement technique**

Le traitement et l'analyse des données satellitaires ont été effectués à l'aide de l'infrastructure technique fournie par i-Sea, qui repose sur un environnement Linux déployé sur un serveur distant. Cet environnement mutualisé offre la possibilité de lancer des calculs complexes et parallèles sur des serveurs de calculs via des scripts et des algorithmes sophistiqués pour traiter les importantes quantités de données produites par les séries Sentinel-2 soit presque une dizaine d'images par semaine, chacune représentant de 250 à 850 Mo de données.

Des scripts internes ont été développés dans le but d'extraire et de convertir les polygones en lignes continues délimitant les avant-bancs subtidaux, et ont été exécutés directement dans l'environnement Linux. Cette phase est fréquemment accompagnée d'une étape de nettoyage manuel visant à rectifier les incohérences causées par des erreurs de catégorisation ou des artefacts visuels.

L'intégration dans le flux de traitement a été réalisée en utilisant des bibliothèques Python spécialisées dans le traitement d'images satellitaires. Cela a permis de fusionner l'extraction de textures, la classification et la production cartographique dans un processus semi-automatisé.

Le logiciel QGIS a été employé simultanément pour visualiser, manipuler et valider visuellement les résultats. Cet instrument a particulièrement été utile pour générer et affiner les polygones d'entraînement requis par le modèle de classification supervisée Random Forest, tout en vérifiant la cohérence morphologique des détections réalisées. La combinaison de ces outils a facilité le suivi uniforme et reproductible des bancs de vase, tout en permettant une adaptation flexible des traitements aux contraintes spécifiques rencontrées entre 2016 et 2022.

#### **2.2.5. Critères de choix des images et base de données collectées**

En raison des conditions météorologiques spécifiques en Guyane, la nébulosité représente un obstacle significatif pour l'observation via des capteurs optiques. Les images ont été choisies en fonction de plusieurs critères :

- Un faible taux de nébulosité sur la zone d'étude, afin de limiter l'occultation des structures subtidales
- Une hauteur de marée compatible avec la détection des limites de l'avant-banc, évitant notamment les marées hautes susceptibles de masquer les zones d'intérêt.

La sélection et le moissonnage des images ont été effectués en se basant sur les métadonnées disponibles sur le site Copernicus.

Pour les besoins de ce projet, un jeu de données de 1016 images a été moissonné (Tableau 1). Les disparités saisonnières et annuelles dans la collecte d'images sont en lien avec la nébulosité sur le littoral guyanais : les mois de janvier à juin, lors des saisons des pluies, montrent un couvert nuageux important. La Niña comme en 2021 et 2022. Enfin, la collecte d'images a été sous-échantillonnée à un mois sur deux sur la période 2016 à 2020 afin de respecter les délais de production des données socle du stage.

#### **2.2.6. Prétraitements des images**

Les données provenant des satellites Sentinel-2 utilisées correspondent aux produits L1C, c'est-à-dire que les pixels expriment la réflectance de la surface via un modèle de correction atmosphérique du signal spectral et les images sont ortho rectifiées, c'est-à-dire que la représentation spatiale de l'image est nettoyée des effets de distorsion engendrés, par exemple, par le relief. Cet ensemble de traitements, opéré par le

producteur d'images, permet les comparaisons temporelles et spatiales au sein d'un jeu d'images. Les bandes spectrales utilisées s'étendent du domaine visible à l'infrarouge proche, ce qui facilite la distinction des variations de réflectance entre l'eau turbide et la vase émergée ou proche de l'émersion.

Le prétraitement automatisé a consisté à :

- Effectuer un découpage des images dans la zone d'intérêt (Maroni - Approuague).
- Appliquer un masque de type nuage afin d'exclure les zones impactées.

Ces prétraitements, bien que totalement automatisés, nécessitent un contrôle humain pour s'assurer que les zones d'intérêt ne sont pas altérées ou amputées, notamment lors de la création des masques nuage et du découpage.

### **2.2.7. Mise en lumière des caractéristiques texturales des images**

La phase initiale du traitement implique l'extraction d'indicateurs permettant de caractériser la texture des images PIR de la bande 08 des satellites Sentinel-2. Cette étape vise à mettre en lumière les structures particulières des avant-bancs subtidaux. Ces zones, soumises à l'action des vagues, présentent un champ de vagues spécifique dont la forme et l'homogénéité diffèrent nettement de celles constatées en zone ouverte ou sur les vasières intertidales. L'homogénéité texturale est utilisée pour distinguer les zones présentant une turbidité uniforme, fréquemment observée dans les vasières, des zones caractérisées par des variations rapides.

L'extraction de ces caractéristiques texturales est réalisée en effectuant une analyse de l'image, en utilisant des filtres et des transformations spécifiquement conçus pour accroître le contraste entre les zones de bancs et leur environnement. Dans ce cadre, les images issues de la bande 08 (infrarouge proche – PIR) ont été converties en descripteurs texturaux d'Haralick, un ensemble de mesures statistiques. Cette zone caractérise l'endroit où l'énergie des ondes incidentes subit une atténuation significative en raison de l'épaisseur et de la consistance du prisme sédimentaire subtidal. L'emploi des descripteurs de Haralick, fréquemment utilisés dans le domaine du traitement d'image (Haralick et al., 1973), constitue une approche robuste permettant de convertir la complexité visuelle des champs de vagues en variables numériques intégrables dans des modèles de classification supervisée.

## **2.3 Classification**

### **2.3.1. Modèle Random Forest**

La classification repose principalement sur le classifieur supervisé Random Forest, qui est un modèle d'apprentissage supervisé utilisant un ensemble d'arbres de décision. Chaque arbre est formé sur un échantillon aléatoire des données et génère sa propre classification. Le choix final est déterminé par un vote à la majorité impliquant tous les arbres.

Dans ce cadre, le modèle a été formé en utilisant des polygones d'apprentissage définis dans QGIS. Ces polygones, générés à partir des images Sentinel-2 de l'année 2023 (année de référence), illustrent deux catégories : banc de vase, champs de vague. Les images les plus anciennes (2016–2022) ont ensuite été classifiées automatiquement par le modèle, en appliquant les mêmes paramètres et seuils que pour les années récentes, afin de garantir une homogénéité temporelle des résultats.

### **2.3.2. Harmonisation et validation**

Pour garantir la cohérence spatiale et temporelle des détections, diverses vérifications ont été réalisées :

- Comparaison visuelle entre mois consécutifs pour détecter les incohérences morphologiques
- Superposition des cartes de 2023 en vue d'une harmonisation méthodologique. Vérification de la continuité des trajectoires migratoires des bancs d'une année à l'autre.

Dans le contexte de la recherche actuelle, cette étape s'est confirmée cruciale afin de garantir que la réduction du nombre de mois analysés (6 par an pour la période 2016-2021, 12 mois pour 2022) n'altère pas la perception des tendances globales de migration (Tableau 1).

## **2.4. Post-traitement et génération des produits cartographiques**

On obtient par la suite de la classification un contour du banc de vase du mois, se basant sur les meilleurs résultats des limites de chaque date du mois. S'il n'y en a qu'une après nettoyage de la ligne, cette seule limite est gardée et s'il n'y a aucune de correcte dus aux nuages ou à l'impossibilité de détecter, on coupe la ligne de sorte qu'on ne garde pas de mauvais résultats. Les images non retenues pour la classification et la vectorisation peuvent toujours être utiles pour certaines zones en vraie couleur qui ne sont pas couvertes par les images classifiées ou reclassifiées (Tableau 1). Puis un lissage est effectué après avoir bien sélectionné notre limite de banc de vase.

Après avoir extrait et harmonisé la limite subtidale, un processus de post-traitement a été réalisé pour préparer les données en vue de leur intégration dans les outils et les bases de données du BRGM, en particulier l'Observatoire de la Dynamique Côtière (ODyC). Cette étape a consisté à :

- Vérifier la continuité spatiale des limites afin d'éliminer toute discontinuité artificielle qui ne serait pas en adéquation avec une rupture morphologique authentique.
- Corriger les erreurs de détection dues à des problèmes optiques, des nuages résiduels ou des zones de forte turbidité temporaire qui ne sont pas liées à un banc.
- Éliminer les segments isolés qui ne sont pas associés à une structure identifiable sur l'image originale ou sur des acquisitions similaires effectuées à des moments proches.

Les produits finaux ont été organisés en couches SIG, sous forme de fichiers shapefile comprenant :

- La géométrie de la zone subtidale,
- Les métadonnées associées telles que la date d'acquisition, l'identifiant Sentinel-2, la couverture nuageuse, etc.,
- Des caractéristiques qui autorisent le suivi dans le temps (année, mois, numéro de banc lorsqu'il est identifié)

Ces couches sont par la suite intégrées dans la base de données ODyC et BRGM, où elles peuvent être croisées avec d'autres types de données telles que le trait de côte, la bathymétrie, les données de houle et de marée, ainsi que les inventaires écologiques. Le but est d'obtenir une série de données cohérentes qui permettront de suivre la migration des bancs de vase sur plusieurs années et de prévoir leur impact sur les zones côtières sensibles.



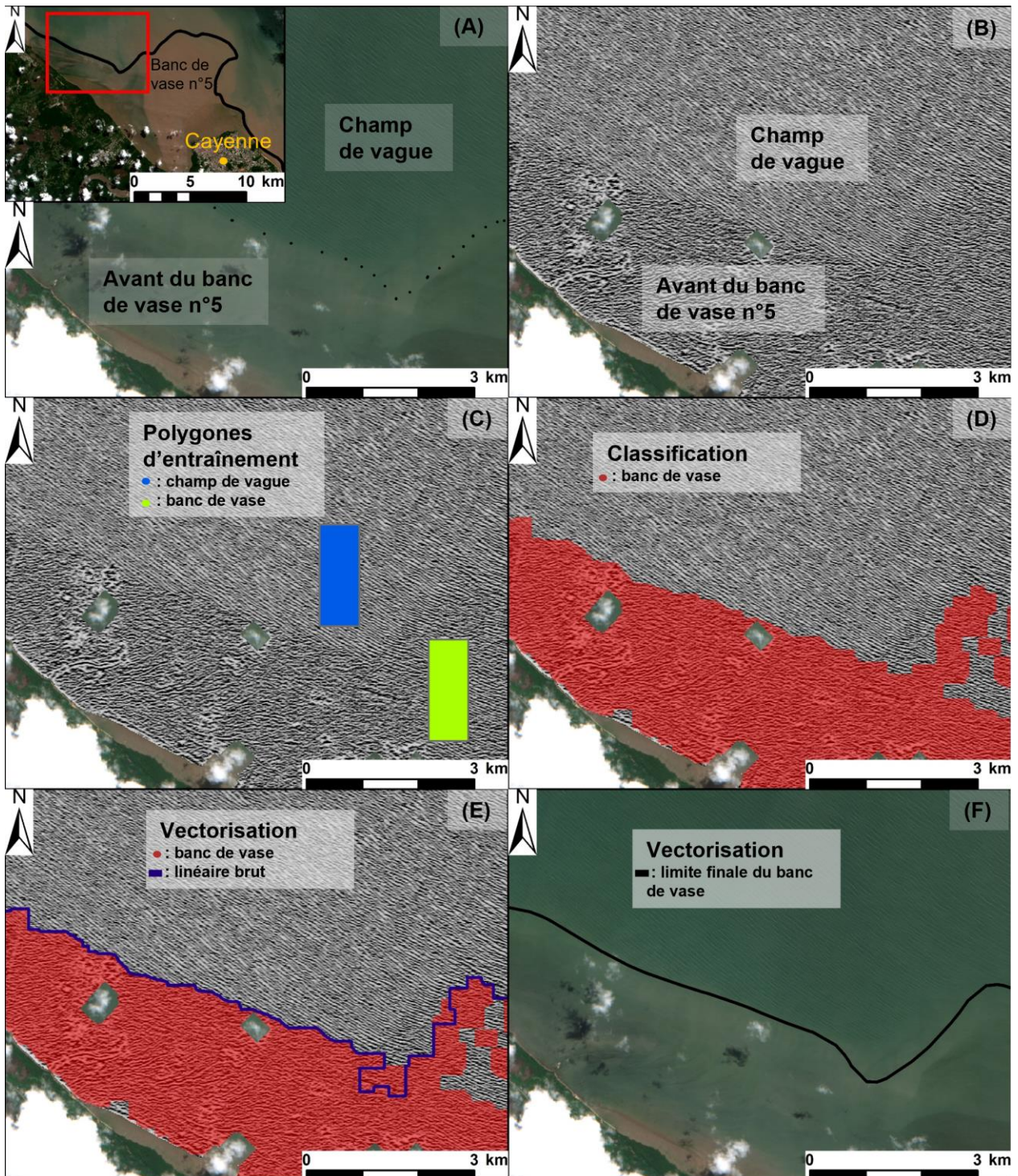


Figure 13 : Mise en pratique de la chaîne de traitement Sentinel-2 par analyse et classification des indicateurs de texture extraits d'image de champs de vagues, banc n°5, le 15 et 25 juin 2022 ; Implementation of the Sentinel-2 processing chain through the analysis and classification of texture indicators extracted from wave field imagery, bank n°5 on June 15 and 25, 2022

(A) Image Sentinel 2 en vraie couleur du 15 juin 2022 sur laquelle quelques nuages peuvent être visibles, carte de localisation du banc de vase n°5 ; (B) Image « texturée » dans laquelle on peut distinguer la différence de contraste entre les champs de vague et le banc de vase ; (C) Polygones d'entraînement placés pour illustrer les champs de vagues entre le bancs de vase et les eaux côtière sans bancs ; (D) Banc de vase détecté dans l'image classifiée ; (E) Limite brute du banc de vase du mois de juin 2022 ; (F) Limite finale du banc de vase : sur cette image, aucune retouche n'a été effectuée en raison de la réussite du traitement. (sources : A, B, C, D, E, F – i-Sea, BRGM, Guillaume Brunier, Audran Dantin, 2025)



Tableau 1 : Bilan des images Sentinel-2 téléchargées, traitées et utilisées pour les post-traitements (2016–2023) ; Summary of Sentinel-2 images downloaded, processed, and used for post-processing (2016–2023)

|                                                                             |      | Mois    |         |       |       |       |       |         |       |           |         |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-----------|---------|----------|----------|
|                                                                             |      | Janvier | Février | Mars  | Avril | Mai   | Juin  | Juillet | Août  | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre |
| Années                                                                      | 2023 | ...     |         |       |       |       |       |         |       |           |         |          |          |
|                                                                             | 2022 | 10      | 12      | 6     | 14    | 10    | 8     | 14      | 12    | 18        | 18      | 12       | 10       |
|                                                                             | 2021 | 16      | 8       | 16    | 12    | 10    | 14    | 16      | 20    | 20        | 22      | 10       | 6        |
|                                                                             | 2020 | 12      | 18      | 14    | 12    | 14    | 10    | 16      | 20    | 20        | 22      | 14       | 16       |
|                                                                             | 2019 | 16      | 12      | 18    | 12    | 12    | 16    | 20      | 14    | 22        | 22      | 22       | 16       |
|                                                                             | 2018 | 8       | 4       | 16    | 12    | 8     | 6     | 12      | 22    | 24        | 22      | 12       | 14       |
|                                                                             | 2017 | 4       | 0       | 5     | 2     | 4     | 5     | 13      | 14    | 8         | 10      | 13       | 11       |
|                                                                             | 2016 | 2       | 2       | 3     | 3     | 6     | 3     | 6       | 6     | 9         | 6       | 10       | 7        |
| Nombre total d'images téléchargées par mois de 2016 à 2022                  |      | 68      | 56      | 78    | 67    | 64    | 62    | 97      | 108   | 121       | 122     | 93       | 80       |
| Pourcentage d'image post traitée par rapport au nombre d'images téléchargés |      | 55,00   | 85,29   | 40,00 | 78,48 | 52,63 | 79,73 | 83,49   | 55,00 | 45,86     | 83,58   | 88,57    | 39,13    |

| Nombre total d'images téléchargées par année | Nombre total d'images téléchargées                   | Nombre estimé de dates utilisées (1 date ≈ 2 images) | Nombre total estimé de dates utilisées (1 date ≈ 2 images) | Espace de stockage utilisé (1 dossier d'une date traitée ≈ 6GB) | Espace total de stockage minimum utilisé                   |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 194                                          | 1210, soit, 1016 durant le stage (sans compter 2023) | 97                                                   | 605, soit, 508 sans compter 2023                           | 582                                                             | 3630 Go = 3,63 To, soit, 3048 = 3,048 To sans compter 2023 |
| 144                                          |                                                      | 72                                                   |                                                            | 432                                                             |                                                            |
| 170                                          |                                                      | 85                                                   |                                                            | 510                                                             |                                                            |
| 188                                          |                                                      | 94                                                   |                                                            | 564                                                             |                                                            |
| 202                                          |                                                      | 101                                                  |                                                            | 606                                                             |                                                            |
| 160                                          |                                                      | 80                                                   |                                                            | 480                                                             |                                                            |
| 89                                           |                                                      | 44,5                                                 |                                                            | 267                                                             |                                                            |
| 63                                           |                                                      | 31,5                                                 |                                                            | 189                                                             |                                                            |

## **2.5. Limites et contraintes rencontrées**

Le traitement des images Sentinel-2 en Guyane a des limites propres :

- Nébulosité persistante : en saison humide, la nébulosité est telle que certaines périodes sont peu utilisables. Ce critère a favorisé les mois à faible couverture, au détriment de la densité temporelle pour certaines années (2016–2021 : 6 mois sur 12 traités).
- Variabilité spectrale de l'eau : la turbidité élevée et les matières en suspension dans la colonne d'eau peuvent parfois générer des signatures similaires à celles d'un avant-banc, conduisant à des faux positifs dans la classification.
- Résolution spatiale : bien que Sentinel-2 ait une résolution de 10 m, certaines structures fines du champ de vagues ou de micro-vasières restent difficiles à identifier ou à délimiter avec précision.
- Temps de calcul : l'exécution du modèle générique sur l'environnement Linux distant (« Attila ») peut durer de quelques minutes à plusieurs heures en fonction de la taille de l'image et des opérations demandées, ce qui nécessite une optimisation des sessions de travail.
- Interaction avec les marées : l'absence de filtrage direct par hauteur de marée dans cette étude signifie que certaines images peuvent contenir une portion masquée de l'avant-banc à marée haute, affectant la précision de la ligne extraite.

## **2.6. Analyse diachronique avec le DSAS**

L'analyse de la migration des bancs de vase a été effectuée par l'intermédiaire du logiciel DSAS (Digital Shoreline Analysis System), développé par l'USGS (United States Geological Survey) et intégré en tant qu'extension dans ArcGIS. Cet outil, initialement développé pour l'analyse des variations du trait de côte, permet la réalisation des mesures diachroniques de l'évolution spatiale d'objet linéaire représentant les limites successives d'une entité morphologique, comme des traits de côte à différentes périodes. Dans le cadre de cette étude, l'outil DSAS a été utilisé sur les limites d'amortissement des vagues matérialisant un banc de vase à différentes temporalités. L'étude se focalise uniquement sur le déplacement du front avant du banc afin de représenter la migration annuelle de l'objet le long de la côte.

### **2.6.1. Préparation à l'analyse de la migration des bancs**

Les lignes représentant la limite subtidale d'un banc de vase ont été agrégées en sept bancs distincts (en comptant le proto banc de vase 7) : banc 1 (Awala-Yalimapo), banc 2 (Iracoubo), banc 3 (Sinnamary), banc 4 (Kourou), banc 5 (Cayenne), banc 6 (Régina) et banc 7 (Est de Régina). La nomenclature toponymique des bancs est en lien avec les territoires communaux que ces objets traversent sur la période d'étude.

Les fichiers de formes vectoriels de chaque banc ont été préparés afin d'assurer leur compatibilité avec l'outil DSAS. Ce dernier fonctionne en s'appuyant sur le formalisme des geodatabases sur ArcMap. Les fichiers de formes représentant les limites d'un banc doivent intégrer les informations ci-dessous :

- L'attribution d'un identifiant unique (ID) à chaque ligne.
- L'application de la nomenclature DSAS implique le renseignement du champ textuel représentant la date de chaque tracé et appelé « DATE\_ », avec une attention particulière portée au respect d'un format uniformisé, à savoir JJ -MM- AAAA.
- L'ajout du champ représentant l'incertitude du tracé et appelé « UNCERTAINTY » permet de spécifier la précision spatiale de la limite du banc de vase en fonction de la résolution de Sentinel-2 et des éventuelles corrections manuelles. Celle-ci est fixée à 200 m.

L'analyse avec l'outil DSAS s'appuie sur des comparaisons, le long d'un transect, des distances d'intersection des limites d'un banc de vase. Ces transects sont générés perpendiculairement à une ligne de base. Les lignes de base ont été créées à l'ouest de chaque banc et perpendiculairement à la côte. Les transects sont créés à droite de la ligne de base de sorte à analyser le front avant d'un banc. Les transects sont générés tous les 100 m le long de la ligne de base afin de prendre en compte les évolutions de morphologie d'un banc de vase.

L'analyse avec l'outil DSAS s'appuie sur des comparaisons, le long d'un transect, des distances d'intersection des limites d'un banc de vase. Ces transects sont générés perpendiculairement à une ligne de base. Les lignes de base ont été créées à l'ouest de chaque banc et perpendiculairement à la côte. Les transects sont créés à droite de la ligne de base de sorte à analyser le front avant d'un banc. Les transects sont générés tous les 100 m le long de la ligne de base afin de prendre en compte les évolutions de morphologie d'un banc de vase.

### **2.6.2. Calcul des indicateurs de migration**

Le logiciel DSAS permet le calcul de plusieurs indicateurs de mobilité spatiale et temporelle d'objet linéaire. La migration d'un banc de vase est, historiquement, exprimée en km/an et se basait sur des fréquences d'observation disparates. L'usage du capteur Sentinel 2, avec ses revisites hebdomadaires, accroît la densité des observations avec une limite mensuelle sur une période de 8 ans. Ce jeu de données dense permet de dresser une tendance d'évolution lissée de la migration d'un banc. L'outil DSAS propose un calcul du taux d'évolution multi-date de la position d'un banc par régression linéaire. L'outil utilisé est appelé « Linear Regression Rate » (LRR). Le LRR représente le taux de déplacement dans le temps d'une entité morphologique, ici, l'avant-banc subtidal déterminé par une régression linéaire appliquée aux positions temporelles successives des lignes de délimitation des bancs de vase. Cette mesure est exprimée en kilomètres par an et permet de quantifier la vitesse de migration vers l'ouest, en considérant la totalité de la série chronologique disponible (Himmelstoss et al., 2021). La valeur de LRR est calculée sur chaque transect, en moyenne 50 à 60 par banc de vase. Le calcul de la valeur de LRR est accompagné par un calcul du coefficient de détermination de la régression linéaire, appelé LR2 : plus cette valeur approche de 1, plus l'évolution de la position du banc de vase dans le temps peut être décrite par une relation linéaire et plus la valeur de LRR est, par conséquent, significative. Le seuil de LR2 retenu pour considérer la validité d'un transect est d'être supérieur à 0.9. La série de données

LRR de chaque banc est ensuite analysée via des statistiques descriptives : la moyenne, l'écart-type, la valeur maximum et minimum, la médiane, les quantiles Q1 et Q3.

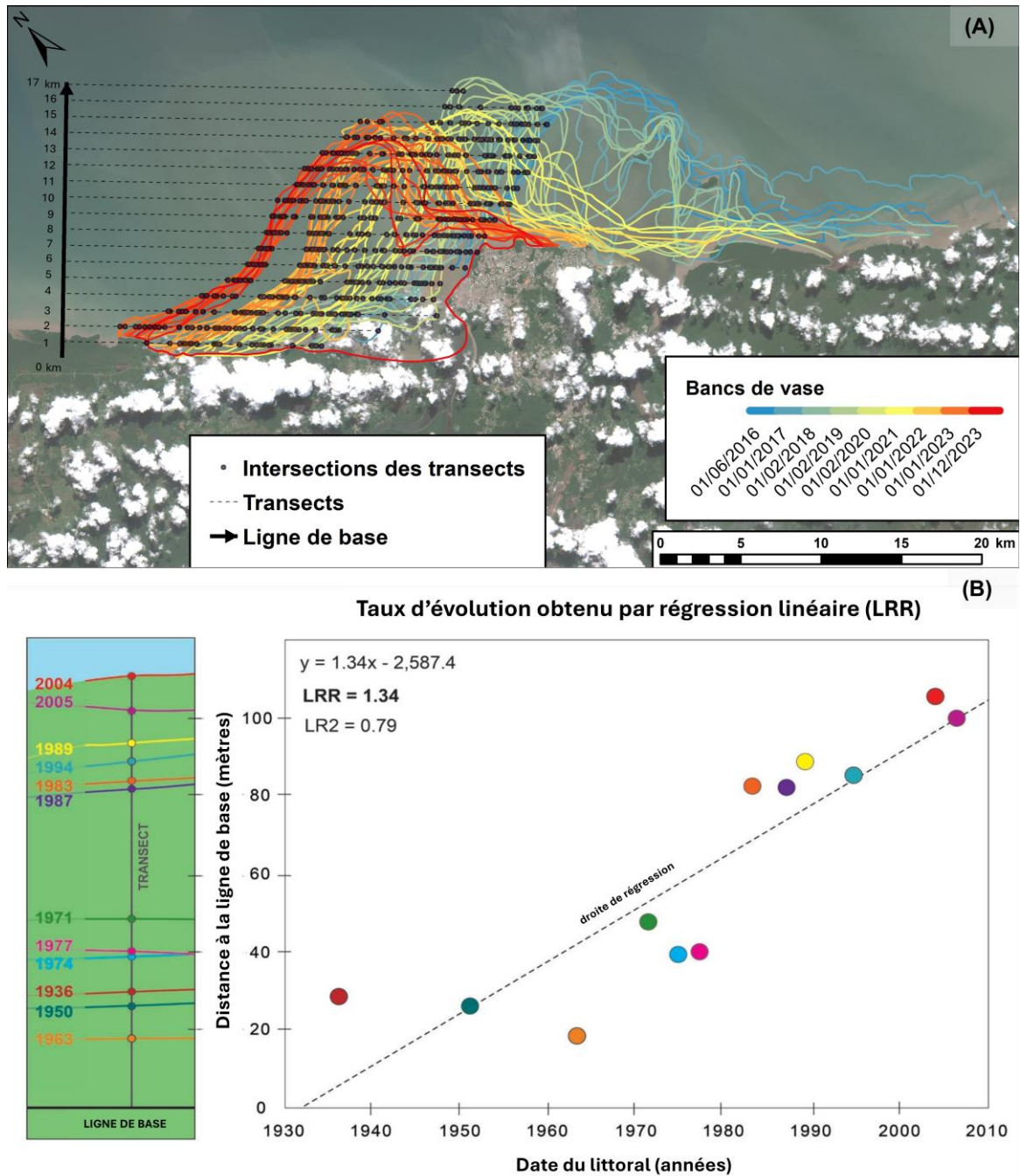


Figure 14 : Calcul du taux de migration des bancs de vase via l'outil DSAS. Calculation of mud bank migration rates from DSAS software

(A) Carte montrant l'évolution des bancs de vase de 2016 à 2023, fond de carte de Cayenne, 28 septembre 2022. Création d'une baseline (ligne de base) qui coupe avec des transects tous les 100 m l'avant-banc. (B) Nuages. (sources : (A) DSAS, Cayenne 28 septembre 2022 Copernicus, i-Sea, BRGM, Guillaume Brunier, Audran Dantin (B) Himmelstoss et al., 2021 ; montage par Audran Dantin)

### 3. Résultats

#### 3.1 Délimitations des bancs de vase de 2016 à 2023

D'une manière générale, les bancs apparaissent comme des structures allongées et discontinues qui migrent vers l'ouest ce qui concorde avec les observations antérieures dans la littérature (Anthony et al., 2019, 2013; Augustinus, 1980; Froidefond et al., 1988; Gardel and Gratiot, 2006; Proisy et al., 2009). La Figure 15 ci-dessous présente la dynamique des bancs de vase sur le littoral guyanais de janvier 2016 à décembre 2023. Sept entités principales ont été individualisées : banc 1 (Awala-Yalimapo), banc 2 (Iracoubo), banc 3 (Sinnamary), banc 4 (Kourou), banc 5 (Cayenne), banc 6 (Régina) et banc 7 (Est de Régina). La dynamique générale de migration vers l'ouest des bancs est clairement observable. Ces systèmes montrent par ailleurs des évolutions spécifiques : pouvant être soulignés :

- L'apparition ces dernières années du proto banc de vase 7 à l'est du banc 6 de Régina sur le cap vaseux de la Pointe Béhague en rive droite de l'Approuague.
- Le banc de vase 2 est très allongé, il donne l'impression de se diviser en deux bancs. La présence de l'estuaire du fleuve Iracoubo sur cette région du banc peut, par effet de chasse hydraulique, permettre aux vagues du large de pénétrer en profondeur dans la structure du banc.
- L'apex (partie la plus au large du banc de vase) présente des irrégularités dans le temps. C'est le cas aussi de l'arrière des bancs qui reste plus complexe à détecter que l'avant, notamment à cause des panaches fluviaux de l'estuaire du Maroni et de l'Approuague (pour les bancs 1 et 6 respectivement).
- La densité de lignes est plus faible de 2016 à 2021, car pour rappel, 6 mois sur 12 ont été traités chaque année durant cette période, contrairement à 2022 et 2023 où l'ensemble des données sur l'année ont été traités. Cela est la résultante de la forte nébulosité en Guyane sur certains mois et sur certaines zones.
- A certains mois, la limite subtidale du banc 6 présente des ruptures toujours liées à la nébulosité

Ces résultats attestent la forte instabilité du littoral guyanais et mettent en évidence la nécessité d'une approche diachronique. Le suivi effectué de 2016 à 2023 autorise notamment l'observation d'un cycle de migration quasi intégral (huit ans), comprenant les phases d'accrétion, de stabilisation et de démantèlement des bancs, offrant par conséquent une base solide pour les analyses quantitatives par DSAS présentées dans les sections suivantes.



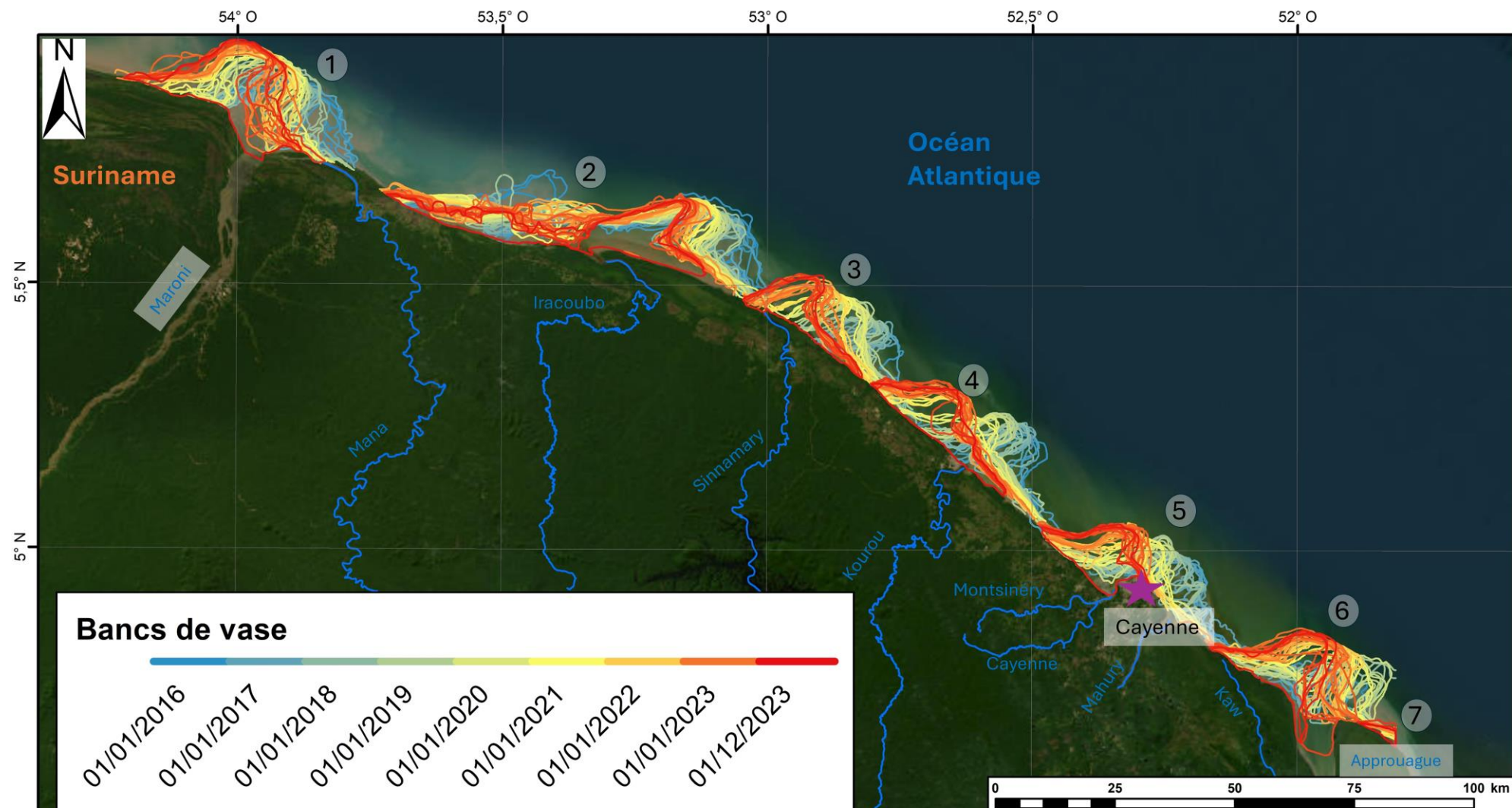


Figure 15 : Cartographie des bancs de vase de 2016 à 2023. Mud bank mapping from 2016 to 2023. (sources : Bd topo 2018 IGN, i-Sea, BRGM, Guillaume Brunier, Audran Dantin, 2025)

## 3.2. Dynamique des bancs

Parmi les sept structures individualisées à l'issue de l'analyse diachronique (Figure 15), trois ont été sélectionnées pour une investigation détaillée : Kourou, Cayenne et Régina. Ces bancs de vase affectent ou affecteront directement les dynamiques sédimentaires des littoraux urbains des communes de Rémire-Montjoly, Cayenne, Macouria et Kourou. La migration ou le départ d'un banc de vase enclenche différentes phases de mobilité du trait de côte induisant des aléas et des risques spécifiques sur les littoraux sableux, conformément au modèle de rotation de plage décrit par Anthony et Dolique (2004). Les taux de migration concernant les autres bancs (Awala-Yalimapo, Iracoubo, Sinnamary, Régina 2) ont également été produits. Le tableau récapitulatif (Tableau 2) rassemble l'ensemble des statistiques descriptives des taux de migration pour chaque banc.

Le banc 2 est calculé différemment des autres bancs au vu de sa longueur. La baseline y a été placée différemment et il sera analysé pour la suite de ce stage. Comme on peut le voir dans le Tableau 2, son avant-banc ne se déplace guère en 7-8 années, en revanche son arrière-banc, lui, progresse vers l'Ouest.

*Tableau 2 : Synthèse des statistiques de migration pour les 6 bancs de vase présents en Guyane. Synthesis of migration statistics for the six mudbanks present in French Guiana*

| Banc | Commune associée | Nombre de transects | Moyenne (en km/an) | Écart-type (en km/an) | Min (en km/an) | Q25 (en km/an) | Médiane (en km/an) | Q75 (en km/an) | Max (en km/an) |
|------|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|
| n°1  | Awala-Yalimapo   | 208                 | 2,63               | 1,72                  | 0              | 1,89           | 2,01               | 2,75           | 8,15           |
| n°2  | Iracoubo         | 500                 | 0,06               | 0,49                  | -1             | -0,38          | -0,30              | 0,15           | 0,98           |
| n°3  | Sinnamary        | 102                 | 2,79               | 0,05                  | 2,54           | 2,77           | 2,78               | 2,79           | 2,96           |
| n°4  | Kourou           | 151                 | 2,72               | 0,65                  | 0,32           | 2,62           | 2,96               | 3,24           | 3,50           |
| n°5  | Cayenne          | 169                 | 1,77               | 0,30                  | -1,46          | 1,74           | 1,81               | 1,86           | 2,95           |
| n°6  | Régina           | 130                 | 2,08               | 0,45                  | 0              | 1,87           | 2,01               | 2,19           | 4,27           |

### 3.2.1. Dynamique du banc de Kourou

La carte en Figure 16 met en évidence une succession de tracés de différentes couleurs illustrant les positions annuelles de la limite d'avant-banc. La représentation du dégradé temporel, s'étendant du bleu (2016) au rouge (2023), révèle une progression vers ouest, conformément à la dynamique générale observée le long du littoral guyanais. La largeur du banc varie en fonction des différents secteurs : son apex, localisé dans la portion centrale, présente une expansion notable vers le large, alors que les zones situées à proximité de l'embouchure du Kourou montrent des structures plus resserrées. Cette configuration illustre une potentielle contrainte morphologique provoquée par l'effet de chasse du chenal de l'estuaire du Kourou qui peut influencer

directement la forme du banc. L'arrivée du banc de vase en 2016 sur le littoral de Kourou coïncide avec un phénomène de rotation massif de la plage et de cas de submersion marines lors d'épisode de fortes vagues (Longueville, 2018, 2017; Longueville and Bourbon, 2016b). L'envasement a stabilisé ce littoral à mesure que le banc de vase progresse vers l'ouest au-delà du cap de la pointe Charlotte. L'avant du banc s'est éloigné de 23 km du littoral de Kourou. Ce dernier est encore sous l'influence de l'arrière du banc de vase en 2023 qui persiste à amortir l'énergie des vagues. Le prochain banc de vase se situe à Macouria à 19,5 km à l'est de ce littoral. Entre le banc 4 et 5, l'intervalle inter-banc est de 9,6 km en 2023.

Le graphique en Figure 16 représente le taux de migration (LRR, en km/an) en fonction de la position sur le front du banc de vase 4 depuis la côte vers le large. Les résultats obtenus révèlent des vitesses comprises entre 2 et 3,5 km/an sur la majeure partie du banc, avec un maximum observé entre 3 et 3,5 km/an dans sa portion centrale. Une diminution progressive du LRR est observée vers l'extrémité Est, où les vitesses chutent en dessous de 2 km/an, ainsi qu'une forte variabilité locale au-delà de 15 km le long de la baseline. Certains transects y affichent des valeurs faibles ( $< 1$  km/an), ce qui traduit à la fois un déficit de données et le déplacement de l'apex du banc.

Ces résultats montrent que le banc de Kourou s'est déplacé en moyenne de 2,96 km/an. Le secteur est aujourd'hui encore envasé et protégé des vagues. Un départ de cette entité et donc un retour de conditions hydrodynamiques agitées peut-être estimé à 3 ans et demi. La phase inter-banc qui en résultera devrait durer au moins 3 années avant l'arrivée du banc 5 qui progresse en moyenne de 1,81 km/an. La présence de la ville de Kourou et d'infrastructures sensibles telles que le port et le Centre spatial guyanais confère à ce littoral un enjeu stratégique. Dans ce cadre, plusieurs stations d'observation de l'Observatoire de la dynamique côtière (ODyC) ont été installées dans la zone, afin d'assurer un suivi continu de la migration du banc et de ses répercussions sur le trait de côte.

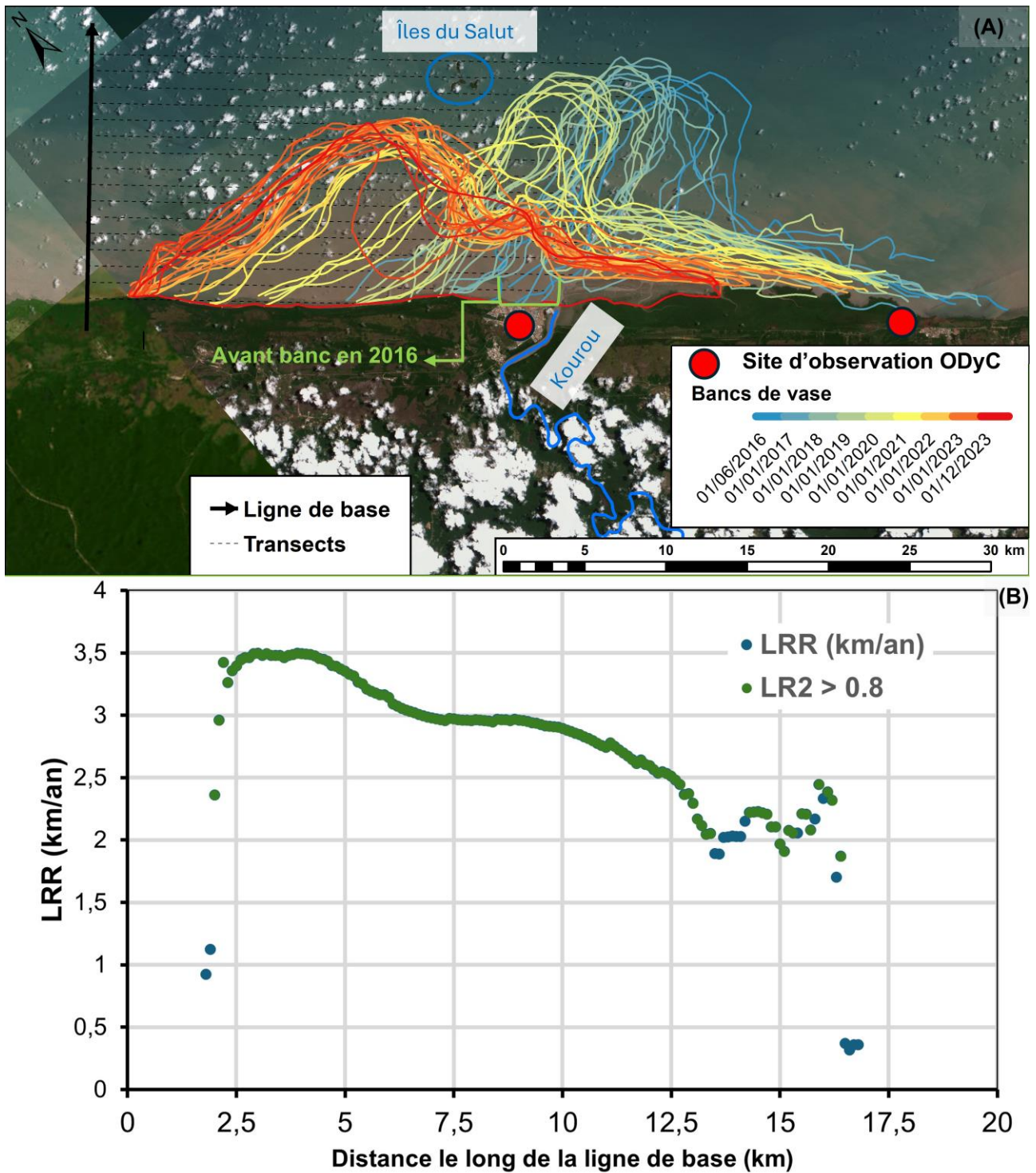


Figure 16 : Position du banc de vase de Kourou et taux de migration annuel, 2016-2023. Location of the mud bank of Kourou and its annual migration rates.

Taux de Migration du banc de vase situé au large de Kourou entre 2016 et 2023, avec en (A) la superposition des limites subtidales dans le temps à Kourou. Sources : Bd topo 2018 IGN, Copernicus, Sentinel 2, 08/2025. En (B) les résultats du calcul du taux de migration linéaire (LRR, Linear Regression Rate) et LR2 obtenus à l'aide du module DSAS. (sources : Copernicus, DSAS, i-Sea, BRGM, Audran Dantin, 2025)





Figure 17 : Prises de vues drone de la plage de Kourou en 2017 et en 2023. UAV's photographs of Kourou beach in 2017 and 2023.

(A) Prise de vue drone de la plage de Kourou en mars 2017 : à l'approche du banc de vase en 2016, la plage est dans une dynamique érosive ; un renforcement du cordon sableux par une digue de sable à été opéré pour protéger les habitations du recul du trait de côte très prononcé à cette période. (B) Prise de vue drone de la plage de Kourou en novembre 2023 : l'avant-côte est complètement envasée, la plage et l'ancienne digue de sable sont recouvertes par la végétation. (sources : ODyC, BRGM, montage : Audran Dantin, 2025)

### 3.2.2. Dynamique du banc de Cayenne

La carte sur la Figure 18 montre la progression du banc de Cayenne sur l'un des principaux secteurs de côtes rocheuses et sableuses de Guyane. L'arrivée et le départ de ce banc de vase ont créé des phénomènes de rotation de plage avec un aléa de recul du trait de côte prononcé de 10 à 25 m/an sur plusieurs secteurs des plages des communes de Cayenne et Rémire-Montjoly (Brunier et al., 2016; Moisan and De la Torre, 2014; Moisan and Prian, 2011; Nebel and Brunier, 2023). Littoral urbain soumis à des aléas intenses, des stations d'observation de l'ODyC ont y ont été mises en place sur les principales plages de baies de ce secteur. L'avant du banc est positionné sur l'anse Châton sur la commune de Cayenne. La plupart des plages de Cayenne et de Rémire-Montjoly sont envasées. Après une mobilité intense du trait de côte sur la période 2012 à 2015, l'envasement vient stabiliser ce littoral. La position et l'emprise de l'arrière-banc de 2016 à 2017 est très hétérogène spatialement sous l'influence, probable, de l'estuaire du fleuve Mahury. L'envasement du secteur sableux de Sablance (site ODyC) sur la commune de Macouria commence à partir de fin 2016 et début 2017. Le dévasement des plages de Cayenne et Rémire-Montjoly est observée lorsque la limite arrière du banc atteint ces secteurs en 2021. Cette observation est confirmée par les relevés de terrain réalisés par l'observatoire ODyC (Lanson and Longueville, 2022). Ces plages sont en régime inter-banc et fortement impactées par des aléas d'érosion de 20 m/an environ sur leurs secteur est (Nebel and Brunier, 2023). Le site ODyC de Tonate, devant le bourg éponyme, était en forte érosion inter-banc

En (B), le nuage de points fait grâce aux données DSAS représente le taux de migration linéaire (LRR, en km/an) en fonction de la position sur les transects du banc de vase de Cayenne. Les valeurs moyennes se situent dans un intervalle compris entre 1,5 et 2 km/an, se révélant légèrement inférieures à celles relevées à Kourou. Cette modération relative de la vitesse de migration pourrait s'interpréter par la dissipation de

l'énergie des houles dans cette section du littoral, dont l'irrégularité des côtes rocheuses et la bathymétrie y sont plus marquées comme l'ont déjà suggéré Gardel et Gratiot (2005) et Anthony et al. (2010). Pour la même raison que pour le banc de vase de Kourou, les points près de la côte et à l'extrémité du banc au large traduisent à la fois un déficit de données et le déplacement de l'apex.

Les résultats mentionnés mettent en évidence que le banc de Cayenne représente une entité dont la dynamique se révèle complexe, et qui présente une homogénéité moindre en comparaison de celle de Kourou. Sa migration affecte de manière directe l'évolution des plages sableuses urbaines de Rémire-Montjoly et de Montabo, qui sont particulièrement vulnérables aux phénomènes d'érosion. Dans ce contexte, la présence de stations d'observation du dispositif ODyC dans ce secteur est jugée indispensable afin d'améliorer la précision de l'interprétation des données satellitaires et d'anticiper les conséquences sur les zones côtières à forte densité de population et urbanisées.



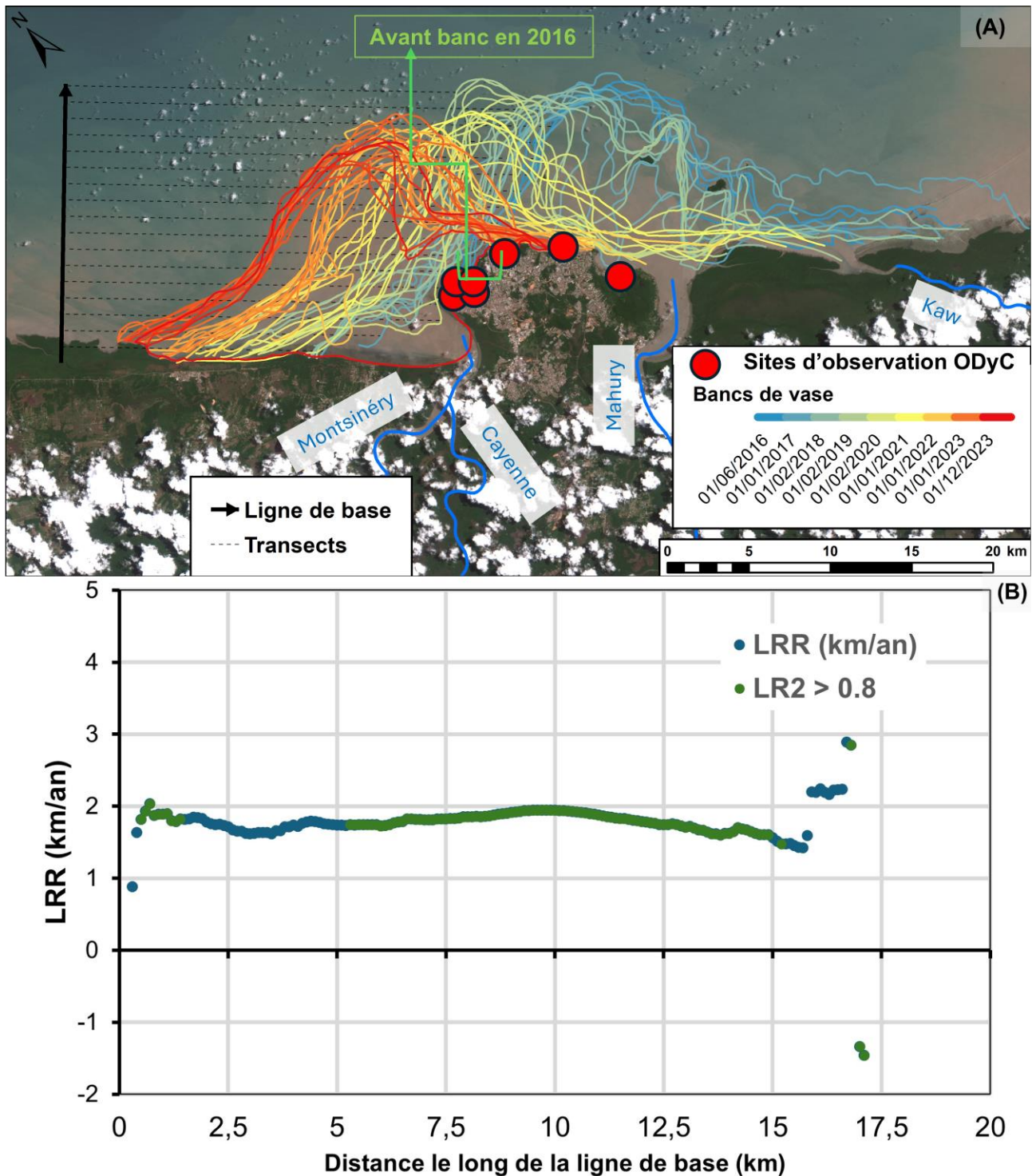


Figure 18 : Position du banc de vase de Cayenne et taux de migration annuel, 2016-2023. Location of the mud bank of Cayenne and its annual migration rates, 2016-2023.

Taux de Migration du banc de vase situé au large de Cayenne entre 2016 et 2023, avec en (A) la superposition des limites subtidales dans le temps à Cayenne. Sources : Bd topo 2018 IGN, Copernicus, Sentinel 2, 08/2025. En (B) les résultats du calcul du taux de migration linéaire (LRR, Linear Regression Rate) et LR2 obtenus à l'aide du module DSAS. (sources : Copernicus, DSAS, i-Sea, BRGM, Audran Dantin, 2025)



*Figure 19 : Prises de vues drone de la plage des Salines, à Rémire-Montjoly en 2021 et en 2023. UAV's photographs of Saline beach, Rémire-Montjoly city, in 2021 and 2023.*

*(A) Prise de vue drone de la plage des Salines en septembre 2021 : la plage est large d'environ 50 à 100 m, l'avant-côte est envasée ; la plage est stable. (B) Prise de vue drone de la plage des Salines en novembre 2023 : l'avant-côte est complètement dévasée, les vagues déferlent et la plage est en érosion rapide suite au départ du banc de vase. (sources : ODyC, BRGM, montage : Audran Dantin, 2025)*

### 3.2.3. Dynamique du banc de Régina

En (A) la carte sur la figure 20 montre la position du banc de vase 6 et illustre la difficulté d'identifier cet objet lorsqu'il est sous l'influence de l'effet de chasse hydraulique d'un fleuve majeur comme l'Approuague. La forme de ce banc est difficilement détectable de 2017 à 2019, puis elle devient assez homogène au fil des mois à partir de 2020. L'estuaire de l'Approuague et la proximité des marais de Kaw exercent une influence prépondérante en modifiant les conditions hydrodynamiques locales et en accentuant les disparités morphologiques.

En (B), les valeurs se situent dans l'intervalle de 1,5 à 2,5 km/an dans la majorité de la zone considérée, ce qui indique une dynamique active, mais globalement plus faible que celle constatée à Kourou. La tendance moyenne observée est de l'ordre de deux kilomètres par an, caractérisée par une stabilité relative au niveau de la zone centrale du banc. Cependant, une augmentation de la vitesse est observée à environ 11 km sur la ligne de base où certains transects excèdent ponctuellement la valeur de 2,5 km par an, allant jusqu'à 3 km/an. Cette hétérogénéité reflète l'influence à la fois des marées, du panache fluvial de l'Approuague et des conditions de vagues locales, lesquelles déterminent la vitesse et la direction de la migration.

Par rapport au Mahury et au site ODyC, l'avant du banc n° 6 à l'Est, se trouve respectivement à 8,4 km et 12 km. Se déplaçant d'environ 2 km/an, on peut donc dire qu'il arrive au Mahury dans 4 ans et au premier site ODyC dans 6 ans à partir de fin 2023.



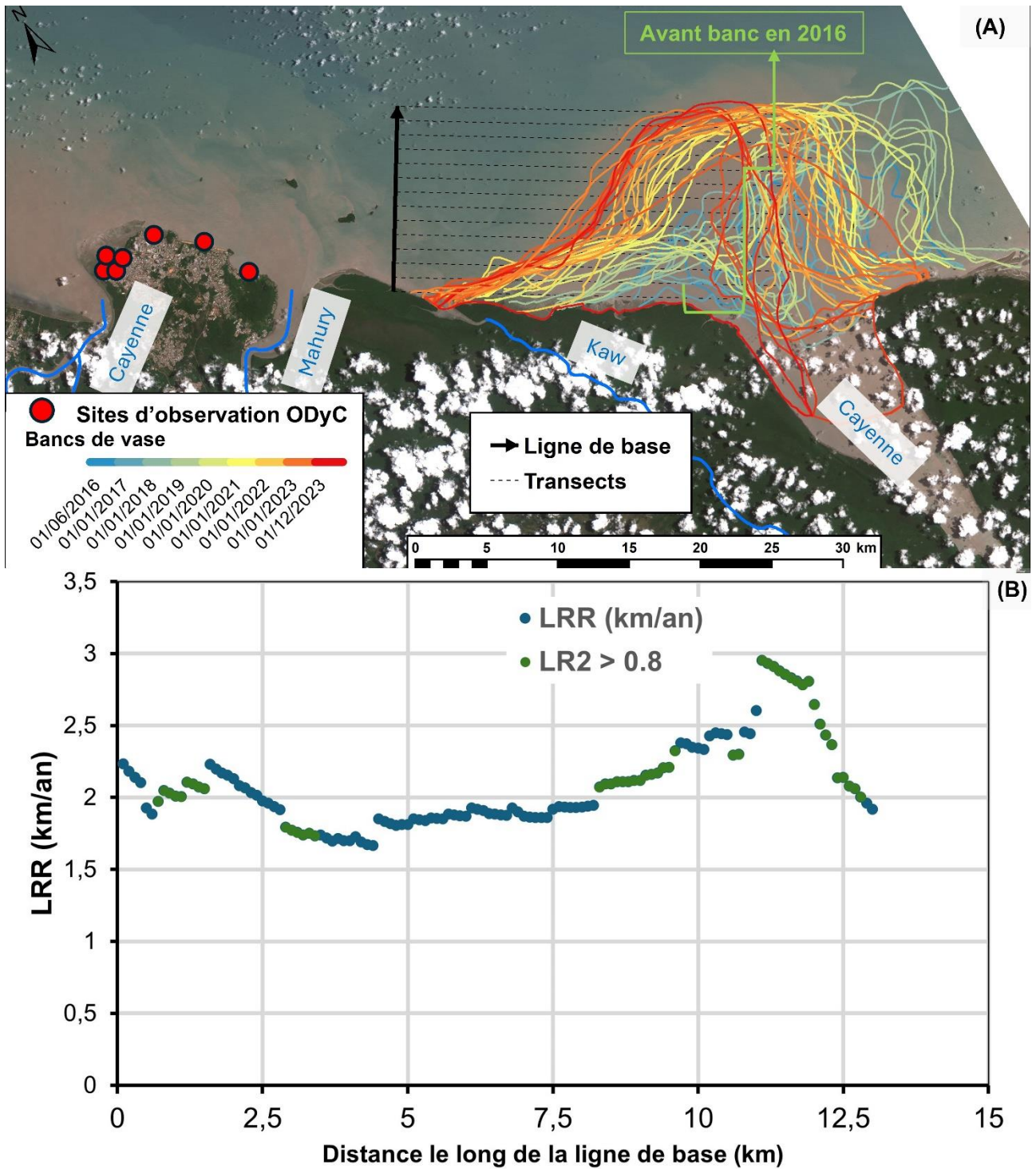


Figure 20 : Position du banc de vase de Cayenne et taux de migration annuel, 2016-2023. Location of the mud bank of Cayenne and its annual migration rates, 2016-2023.

Taux de Migration du banc de vase situé au large de l'estuaire de l'Approuague et des marais de Kaw entre 2016 et 2023, avec en (A) la superposition des limites subtidales dans le temps. Sources : Bd topo 2018 IGN, Copernicus, Sentinel 2, 08/2025. En (B) les résultats du calcul du taux de migration linéaire (LRR, Linear Regression Rate) et LR2 obtenus à l'aide du module DSAS. (sources : Copernicus, DSAS, i-Sea, BRGM, Audran Dantin, 2025)

## 4. Discussion

### 4.1. Limites de l'approche cartographique des bancs de vase par télédétection et les incertitudes associées

Comme tout travail scientifique fondée sur l'imagerie satellitaire, la méthodologie employée dans cette étude est sujette à des limites et à des incertitudes qu'il est impératif de mettre en évidence. La première limite provient de la nature de la limite d'amortissement des vagues sur la structure subtidale d'un banc de vase :

- l'amortissement de l'énergie des vagues en contexte hyper-turbide est lié à des changements de densité des eaux côtière en lien avec leur turbidité, de bathymétrie (profondeur plus faible) et de nature des fonds (vase avec différents niveaux de viscosité) (Berlamont et al., 1993; Winterwerp et al., 2007; Winterwerp, 2002).
- La position de la crête de vase constituant le prisme d'accrétion au large d'un banc de vase peut varier de position au cours d'un cycle de marée en fonction du niveau d'eau.
- La densité de crête de vase est aussi beaucoup plus hétérogène sur l'arrière d'un banc (façade est et nord-est exposé frontalement aux champs de vagues) et permet une propagation de ce dernier à l'intérieur du banc. La limite arrière d'un banc est, par conséquent plus difficile à identifier et son tracé peut considérablement varier.
- L'hydrodynamique des vagues (direction, hauteur et période) peut sensiblement altérer la position de la zone d'amortissement comme généré une texture de champs de vagues croisés qui sont plus difficile à classifier sur les images.

Une limite temporelle vient s'ajouter à cette contrainte spatiale, cette dernière étant liée à la nébulosité assez importante en Guyane, particulièrement pendant les saisons des pluies de janvier à juin. La persistance de cette couverture nuageuse défavorise une exploitation de certaines périodes, entraînant une diminution de la densité temporelle des séries d'images et, par conséquent, une perte d'information dans l'analyse diachronique. Des interruptions de données s'étendant sur plusieurs mois sont susceptibles d'introduire un biais dans l'évaluation des trajectoires ou des vitesses de migration.

Il convient également d'interpréter avec précaution les résultats obtenus à partir du module DSAS. Pour rappel une incertitude spatiale de deux cents mètres a été attribuée à chaque limite. Cette marge d'erreur affecte la précision absolue des vitesses estimées, mais reste correcte au vu de l'ampleur du phénomène.

Enfin, il convient de noter que la méthodologie demeure semi-automatisée : bien que la majeure partie du flux de traitement s'appuie sur des scripts Linux et Python, une proportion significative du travail est consacrée à la vérification et à la correction manuelle des résultats, incluant les masques de nuages, les polygones d'entraînement et le nettoyage des artefacts. Cette dépendance vis-à-vis de l'opérateur introduit une

variabilité subjective, bien que limité grâce aux méthodes de classifications supervisées, liée à son interprétation du phénomène.

## **4.2. Intégration de la dynamique des bancs dans la gestion à court terme des aléas littoraux**

### **4.2.1. Littoral Kouroucien**

Arrivé en 2016, le banc de vase 4 a sérieusement impacté la dynamique de cellule littorale de Kourou (Longueville et al., 2018) : à l'insu de la phase de transition vers l'envasement du modèle dynamique de Anthony and Dolique (2004), la dérive littorale s'est inversée vers l'est érodant fortement la plage sur le secteur urbain de la piste de l'anse et de la cité des 205 ; et redéployant les sédiments érodés vers le sud-est de la cellule, secteur de la Cocoteraie, et en partie vers le nord-ouest, secteur de la pointe Charlotte. Cette phase s'est accompagnée de l'affouillement de la voirie de l'avenue de l'Anse. Les logements en arrière du littoral ont été menacés d'affouillement. Les services de l'état et la collectivité ont déployés des digues de sables massives pour contenir le phénomène. A partir de 2018-2020, la cellule littorale est envasée, l'énergie des vagues est amortie et la dynamique du trait de côte ralentie très fortement.

En 2023, la cellule littorale est positionnée sur l'arrière du banc et termine sa phase d'envasement. Le départ de ce dernier, via nos analyses, peut-être estimé à 3 ans et demi. La dynamique inter-banc au sein de la cellule littorale pourrait intervenir autour de 2026-2027. Le banc de vase 5 est situé à 19,5 km de Kourou : son arrivé peut être estimé autour de 2033-2034.

La commune de Kourou, avec l'appui du BRGM, des services de l'état et de l'ODyC a mis en place une stratégie de gestion du littoral prévoyant le confortement temporaire de la plage via un rechargement de sable et la mise en place d'épis bois (durée de vie 20 ans) à l'échéance 2026. Un projet plus vaste de repli stratégique de l'urbanisme de la bande côtière est prévu à moyen terme. La cinématique des bancs de vase appuiera le chronogramme de cette vaste et complexe stratégie.

### **4.2.2. Littoral de Cayenne et Rémire-Montjoly**

L'arrivée du banc de vase entre 2012-2013 sur les cellules littorales sableuses de Cayenne et Rémire-Montjoly a entraîné une rotation de plage provoquant une forte érosion de 10 à 20 m/an sur 3 ans sur le secteur nord-ouest de ces cellules (Brunier et al., 2016). Les sables ont été transportés sur les secteurs sud-est de ces cellules. La phase d'envasement a considérablement amoindri la dynamique du trait de côte de ces cellules à partir de 2015. Les cellules littorales sont en phase de transition vers le dévasement avec une reprise de l'hydrodynamique des vagues et une érosion particulièrement marquée sur les secteurs sud-est de ces plages. L'urbanisme et les logements d'habitation, bien que protégés par des ouvrages d'enrochements mal dimensionnés, sont actuellement très vulnérables à l'aléa d'érosion côtière.

En décembre 2023, le banc 6 de Régina se situe à environ 8 km de l'embouchure du Mahury. Compte tenu des vitesses moyennes de migration estimées entre 2 et 2,5 km/an, il est attendu que son avant-banc atteigne l'estuaire d'ici quatre ans, soit en fin 2027. Par conséquent, la phase d'inter-banc des cellules littorales de Cayenne et Rémire-Montjoly pourrait durer au moins 8 ans et demi avant une nouvelle phase de transition vers l'envasement en 2031.

Ces dynamiques érosives sont connues sur le secteur de Cayenne et Rémire-Montjoly car récurrentes. Les temporalités estimées sur les futures phase dynamique de ces plages sous l'influence des bancs de vase permettront aux communes de Cayenne et de Rémire-Montjoly ainsi que les services de la DGTM, de mettre en place des solutions de gestion du littoral à court terme adaptées à ces temporalités, comme des barrières anti-submersion, une évaluation des ouvrages de protection, guidés les riverains dans le confortement de ces ouvrages. Les communes de Rémire-Montjoly et Cayenne, en adhérant au décret-loi Climat et Résilience, se sont engagées à construire des cartes de projections du recul du trait de côte qui intégreront ces dynamiques.

#### 4.2.3. Conclusion

À l'échelle régionale, cette analyse prospective met en évidence la rythmicité de la migration des bancs de vase amazonien sur l'ensemble du littoral de Guyane. Cette rythmicité dans le cycle de migration permet d'anticiper à court terme l'évolution du comportement morphodynamique des cellules littorales à enjeux comme les plages de Kourou, Cayenne et Rémire-Montjoly. Il a été déterminé que les plages de Kourou suivront un comportement morphodynamique d'inter-banc autour de 2026. Les plages de Cayenne et Rémire-Montjoly suivent actuellement un comportement inter-banc, il est estimé que le prochain banc de vase franchira l'estuaire du Mahury en 2028 et permettra 1 à 3 ans plus tard de ralentir les dynamiques du trait de côte. L'intégration d'outils de télédétection, tels que les images Sentinel-2 et l'analyse de la migration des bancs permet une identification précoce de l'aléa d'érosion et une orientation des décisions relatives à l'aménagement du territoire. L'apport de ces travaux, en complément des travaux existant sur le sujet au sein de l'ODYC, sera :

- Le renforcement des diagnostics d'aléas littoraux produit par l'observatoire ODyC, ainsi que leur communication à des publics variés (élus, experts, techniciens, et grand public)
- Une vision prospective pour l'adaptation de l'urbanisme littoral dans le cadre des stratégies de gestion locale du trait de côte, en limitant l'extension dans les secteurs à forte probabilité de recul

Ce travail appuiera, ultimement, la recherche scientifique fondamentale sur les littoraux sous influence des sédiments de l'Amazonie : en effet, malgré une vue d'ensemble de la dynamique des bancs de vase, la quantification l'influence des paramètres hydrodynamiques et bathymétriques sur leur forme et leur évolution est encore peu documenté et expérimenté. C'est donc un travail important et multidisciplinaire qui doit être mené, afin que toutes les parties liées à l'étude du phénomène sur tous les angles puissent avancer au mieux face à un phénomène naturel qu'on ne peut contrôler.



## 5. Bilan du stage

### 5.1. Chronogramme de vos travaux, missions

| Phase                                    | Dates approximatives | Tâches                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Immersion & bibliographie                | 28 avr – 23 mai      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrivée i-Sea</li> <li>• Découverte de la Guyane à distance</li> <li>• Bibliographie sur les bancs de vase, l'environnement Linux et la télédétection</li> <li>• Démarches pratiques et administratives</li> <li>• Contact avec le BRGM Guyane (distanciel) et le BRGM Nouvelle-Aquitaine</li> </ul> |
| Mise en place de la chaîne de traitement | 26 mai – 28 juil     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prétraitement, traitement, post-traitement sur Copernicus, Attila (machine d'I-SEA, QGIS)</li> <li>• Collaboration I-SEA, redéfinition des objectifs</li> </ul>                                                                                                                                      |
| Préparation au départ & transition       | 29 juil – 1 août     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfert de fichiers, sauvegardes</li> <li>• Arrivée en Guyane</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                           |
| BRGM Guyane – carto & analyse            | 4 août – 24 août     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrivée BRGM Guyane</li> <li>• Découpe des bancs (QGIS), DSAS (ArcMap), statistiques (Excel),</li> <li>• Première approche du terrain : profils topographiques sur la plage de Montjoly (DGPS)</li> </ul>                                                                                            |
| Rédaction mémoire                        | 28 avr – 24 août     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rédaction continue du mémoire, avec des échanges réguliers avec le tuteur de stage, puis finaux avec I-SEA et le professeur référent.</li> </ul>                                                                                                                                                     |
| Post-mémoire                             | 25 août – 26 sept    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sorties terrain (bathymétrie)</li> <li>• Analyse complémentaire des bancs avec intégration des données Sentinel-2 de 2024</li> <li>• Organisation des fichiers et archivage</li> <li>• Rapport interne</li> </ul>                                                                                    |

Figure 21 : Chronogramme des travaux du stagiaire, Internship work timeline (source : Audran Dantin, 2025)

### 5.2 Remarques personnelles sur le travail de l'entreprise ; Master 2 GLM – UM et UPVM

Mon immersion au sein des établissements m'a permis d'apprécier la rigueur méthodologique et l'organisation qui structurent le travail quotidien. J'ai apprécié l'approche pluridisciplinaire que ce soit au BRGM ou à i-Sea.

### 5.3. Difficultés rencontrées

Ne pouvant pas accéder directement au terrain, il m'a fallu développer une compréhension théorique et interprétative à partir de données satellitaires, bibliographiques et cartographiques. Être entouré que de géomaticien pouvait être perturbant au vu du vocabulaire technique et des outils que je ne connais pas et qu'ils utilisent. Cependant, j'ai désormais de nouvelles compétences acquises professionnellement.

### 5.4. Bilan du stage, personnel, universitaire et professionnel

Sur le plan personnel, ce stage a été une expérience très enrichissante. Il m'a permis de renforcer mon autonomie, ma capacité à m'adapter à des environnements interdisciplinaires, ainsi que ma confiance dans l'analyse de problématiques complexes. J'ai désormais un aperçu concret des méthodes de travail et attentes en milieu public et privé dans des structures plus ou moins grandes au niveau national.

## 6. Bibliographie

### Ouvrages scientifiques :

- Abascal Zorrilla, N., Huybrechts, N., Orseau, S., Vantrepotte, V., Anthony, E., Gardel, A., 2024. Numerical Investigation of the Sediment Load Exchange between a Coastal Mud Bank and Its Neighbouring Estuary. *Water* 16, 2885. <https://doi.org/10.3390/w16202885>
- Abascal Zorrilla, N., Vantrepotte, V., Gensac, E., Huybrechts, N., Gardel, A., 2018. The Advantages of Landsat 8-OLI-Derived Suspended Particulate Matter Maps for Monitoring the Subtidal Extension of Amazonian Coastal Mud Banks (French Guiana). *Remote Sensing* 10. <https://doi.org/10.3390/rs10111733>
- Allison, M. a, Lee, M.T., Ogston, A.S., Aller, R.C., 2000. Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America. *Marine Geology* 163, 241–256. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00120-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00120-6)
- Anthony, E.J., 2015. Assessment of peri-urban coastal protection options in Paramaribo-Wanica, Suriname (Final report). WWF, Paramaribo, Suriname.
- Anthony, E.J., Brunier, G., Gardel, A., Hiwat, M., 2019. Chenier morphodynamics on the amazon-influenced coast of suriname, South America: Implications for beach ecosystem services. *Frontiers in Earth Science* 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00035>
- Anthony, E.J., Dolique, F., 2004. The influence of Amazon-derived mud banks on the morphology of sandy headland-bound beaches in Cayenne, French Guiana: a short- to long-term perspective. *Marine Geology* 208, 249–264. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.04.011>
- Anthony, E.J., Gardel, A., Dolique, F., Péron, C., 2010a. Mud banks , sand flux and beach morphodynamics : Montjoly Lagoon beach , French Guiana.
- Anthony, E.J., Gardel, A., Gratiot, N., 2013. Fluvial sediment supply, mud banks, cheniers and the morphodynamics of the coast of South America between the Amazon and Orinoco river mouths. Geological Society, London, Special Publications 388, 533–560. <https://doi.org/10.1144/sp388.8>
- Anthony, E.J., Gardel, A., Gratiot, N., Proisy, C., Allison, M. a, Dolique, F., Fromard, F., 2010b. The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank–shoreline interactions. *Earth-Science Reviews* 103, 99–121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.09.008>
- Anthony, E.J., Gratiot, N., 2012. Coastal engineering and large-scale mangrove destruction in Guyana, South America: Averting an environmental catastrophe in the making. *Ecological Engineering* 47, 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.07.005>
- Augusseau, P.E., Proisy, C., Gardel, A., Brunier, G., Granjon, L., Maury, T., Mury, A., Staquet, A., Santos, V.F., Walcker, R., Degenne, P., Lo Seen, D., Anthony, E.J., 2025. MANG@COAST: A spatio-temporal modeling approach of muddy shoreline mobility based on mangrove monitoring. *Environmental Modelling & Software* 186, 106345. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106345>
- Augustinus, P.G.E.F., 2004. The influence of the trade winds on the coastal development of the Guianas at various scale levels: a synthesis. *Marine Geology* 208, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.04.007>
- Augustinus, P.G.E.F., 2002. Muddy Coasts of the World - Processes, Deposits and function, *Proceedings in Marine Science*. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1568-2692\(02\)80081-X](https://doi.org/10.1016/S1568-2692(02)80081-X)
- Augustinus, P.G.E.F., 1989. Cheniers and chenier plains: A general introduction. *Marine Geology* 90, 219–229. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90126-6](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90126-6)
- Augustinus, P.G.E.F., 1980. Actual development of the chenier coast of suriname (South America). *Sedimentary Geology* 26, 91–113. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(80\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0037-0738(80)90007-X)
- Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E., Winterwerp, J., 1993. The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering* 21, 105–128. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90047-C](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90047-C)
- Brunier, G., 2023. Commune de Macouria - Expertise état des lieux de l'érosion côtière (Rapport d'expertise No. BRGM/RP-72492-FR). BRGM, Guyane - (973).
- Brunier, G., Anthony, E.J., Gratiot, N., Gardel, A., 2019. Exceptional rates and mechanisms of muddy shoreline retreat following mangrove removal. *Earth Surface Processes and Landforms* 44, 1559–1571. <https://doi.org/10.1002/esp.4593>
- Brunier, G., Cam, M., Longueville, F., Nebel, T., 2024. Evolution du trait de côte en Guyane. Caractérisation de la dynamique côtière entre 1950 et 2021. (Rapport final No. BRGM/RP-72903-FR). BRGM.

- Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E.J., Gardel, A., Dussouillez, P., 2016. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology* 261. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.025>
- Froidefond, J.M., Pujos, M., Andre, X., 1988. Migration of mud banks and changing coastline in French Guiana. *Marine Geology* 84, 19–30. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90122-3](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90122-3)
- Gardel, A., Gratiot, N., 2006. Monitoring of Coastal Dynamics in French Guian from 16 Years of SPOT Satellite Images Mangrove dynamics 2004, 2004–2007.
- Gensac, E., Gardel, A., Lesourd, S., Brutier, L., 2015. Morphodynamic evolution of an intertidal mudflat under the influence of Amazon sediment supply – Kourou mud bank, French Guiana, South America. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 158. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.03.017>
- Gratiot, N., Gardel, A., Anthony, E.J., 2007. Trade-wind waves and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: Input from ERA-40 wave data and field investigations. *Marine Geology* 236, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.09.013>
- Grisel, M., Sigwald, R., 2019. Stratégie de gestion du littoral de Kourou (Rapport d'étude). ARTELIA, Kourou.
- Jolivet, M., Anthony, E.J., Gardel, A., Brunier, G., 2019. Multi-Decadal to Short-Term Beach and Shoreline Mobility in a Complex River-Mouth Environment Affected by Mud From the Amazon. *Frontiers in Earth Science* 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00187>
- Lanson, M., Longueville, F., 2022. Observatoire de la dynamique côtière de Guyane – ODyC : Bilan de l'année 2021 (Rapport final No. BRGM/RP-71796-FR). BRGM.
- Longueville, F., 2018. Observations à la suite des épisodes l'érosion marine de fin février/début mars 2018 sur le littoral de Kourou (Guyane). (Rapport d'expertise No. BRGM/RP-67900-FR). BRGM.
- Longueville, F., 2017. Observations suite aux épisodes d'érosion marine de fin d'année 2016 sur le littoral de Kourou (Guyane). Rapport d'expertise. (Rapport d'expertise No. RP-66669-FR). BRGM.
- Longueville, F., Bossennec, G., 2019. Rapport d'expertise : Observations à la suite des épisodes de submersion marine du 28 octobre 2019 sur le littoral d'Awala-Yalimapo (Guyane) (Rapport d'expertise No. BRGM/RP-69426-FR). BRGM.
- Longueville, F., Bourbon, P., 2016a. Synthèse sur les techniques pour le suivi du trait de côte et adaptation dans le contexte de la Guyane (Rapport final No. BRGM/RP-65906-FR). BRGM.
- Longueville, F., Bourbon, P., 2016b. Compte rendu des épisodes de submersions marines de février 2016 à Kourou (Guyane). Rapport d'expertise. (Rapport d'expertise No. RP-65691-FR). BRGM.
- Longueville, F., Brivois, O., 2019. Projection de la position du trait de côte aux horizons 2030 et 2050 sur les rizières de Mana. (Rapport final No. BRGM/RP-69182-FR).
- Longueville, F., Elineau, S., Pedreros, R., Bulteau, T., 2018. Projection de la position du trait de côte et caractérisation de la submersion marine sur le littoral de Kourou (Rapport final No. RP-68508-FR). BRGM.
- Longueville, F., Garcin, M., Desmazes, F., Lanson, M., 2022a. Projection de la position du trait de côte sur Awala-Yalimapo aux horizons 2030 et 2050 (Rapport final No. BRGM/RP-71936-FR). BRGM.
- Longueville, F., Lanson, M., 2022. Épisodes d'érosion du 3 au 7 janvier 2022 sur le littoral d'Awala-Yalimapo (Guyane) : avis et recommandations du BRGM. Rapport d'expertise. (Rapport d'expertise No. BRGM/RP-71515-FR). BRGM.
- Longueville, F., Thieblemont, R., Bel Madani, A., Idier, D., Palany, P., D'Anna, M., Dutrieux, P.-C., Védie, L., Lanson, M., Suez-Panama-Bouton, B., 2022b. Impacts du changement climatique sur différents paramètres physiques en Guyane : caractérisation et projection - GuyaClimat (Rapport final No. BRGM/RP-72111-FR). BRGM, Guyane - (973).
- Moisan, M., De la Torre, Y., 2014. Évolution du trait de côte en Guyane : Caractérisation de la dynamique côtière entre 1950 et 2013 à l'échelle régionale (Rapport final No. RP62904- FR). BRGM.
- Moisan, M., Prian, J.-P., 2011. Etat de la connaissance de la caractérisation physique de la côte en Guyane, des pressions anthropiques et des impacts générés : Synthèse et Analyse critique. (Rapport final No. BRGM/RP-60823-FR). BRGM, Guyane - (973).
- Nebel, T., Brunier, G., 2023. Observatoire de la dynamique côtière de Guyane – ODyC : Bilan de l'année 2022 et fiches de site (Rapport final No. BRGM/RP-72892-FR). BRGM, Guyane - (973).
- Otvos, E.G., 2005. Cheniers, in: Schwartz, M.L. (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 233–235. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1\\_67](https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_67)

- Proisy, C., Gratiot, N., Anthony, E.J., Gardel, A., Fromard, F., Heuret, P., 2009. Mud bank colonization by opportunistic mangroves: A case study from French Guiana using lidar data. *Continental Shelf Research* 29, 632–641. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.09.017>
- Prost, M.T., 1989. Coastal Dynamics and Chenier Sands in French Guiana. *Marine Geology* 90, 259–267.
- SHOM, 2022. Références Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d’outre-mer. SHOM.
- Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., D’Anna, M., Idier, D., Belmadani, A., Slangen, A.B.A., Longueville, F., 2023. Chronic flooding events due to sea-level rise in French Guiana. *Scientific Reports* 13, 21695. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48807-w>
- Winterwerp, J., de Graaff, R., Groeneweg, J., Luijendijk, A., 2007. Modeling of wave damping at Guyana mud coast. *Coastal Engineering* 54, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.012>
- Winterwerp, J.C., 2002. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud 22, 1339–1360.

### **Formations i-Sea**

- Beguet, B., 2022. SIG/Géomatique. Support de formation, i-Sea, Pessac.
- Beguet, B., 2022. Géomatique : Modèles Numériques de Terrain et traitement d’images. Support de formation, i-Sea, Pessac.
- Beguet, B., 2022. Télédétection. Support de formation, i-Sea, Pessac.

### **Linux**

- Garion, C., 2015. Introduction to Linux. ISAE-SUPAERO, Toulouse.

### **Rapports i-Sea / BRGM – Guyane**

- i-Sea, 2024. Automatisation de la détection haute fréquence des bancs de vase, Rapport annuel 2023, BRGM, 39 p.
- i-Sea, 2025. Détection automatisée à haute fréquence et par satellite de la limite des bancs de vase au large de la Guyane Française, Rapport annuel 2024, Convention R&D BRGM, 27 p.

### **Sites consultés :**

<https://www.brgm.fr/fr>

<https://observatoire-littoral-guyane.fr/>

<https://i-sea.fr/>

<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

<https://geoconfluences.ens-lyon.fr/>

<https://www.geoportail.gouv.fr/>

<https://www.insee.fr/>

<https://www.franceguyane.fr/>

<http://pluiesextremes.meteo.fr/guyane/Le-climat-guyanais.html>

[https://www.larep.fr/orleans-45000/economie/mines-energie-eau-accidents-climatiques-le-brgm-revient-sur-le-devant-de-la-scene-selon-sa-presidente\\_14686241/](https://www.larep.fr/orleans-45000/economie/mines-energie-eau-accidents-climatiques-le-brgm-revient-sur-le-devant-de-la-scene-selon-sa-presidente_14686241/)

## 7. Glossaire

**ATTILA** : Nom du serveur distant utilisé chez i-Sea pour le traitement des images Sentinel-2 dans un environnement Linux.

**Bd Topo (IGN)** : Base de données topographiques de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière).

**BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Établissement public français de référence dans les applications des sciences de la Terre.

**CNES** : Centre National d'Études Spatiales. Agence spatiale française responsable du programme spatial français.

**Copernicus** : Programme européen d'observation de la Terre fournissant des données satellites (Sentinel).

**DGTM** : Direction Générale des Territoires et de la Mer. Service déconcentré de l'État en Guyane.

**DSAS** : Digital Shoreline Analysis System. Extension d'ArcGIS développée par l'USGS pour l'analyse diachronique des lignes de côte ou d'objets linéaires.

**ENSO** : El Niño Southern Oscillation. Oscillation australe influençant le climat, comprenant les phases El Niño et La Niña.

**EPIC** : Établissement Public à caractère Industriel et Commercial. Statut juridique du BRGM.

**ERA-40** : ECMWF Reanalysis 40 years. Base de données climatologique issue de la réanalyse de 40 ans de données météorologiques par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMET).

**GIEC (IPCC)** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Intergovernmental Panel on Climate Change).

**GLM** : Master Gestion des Littoraux et des Mers, mention Géographie-Aménagement-Environnement-Développement (GAED).

**IGN** : Institut national de l'information géographique et forestière.

**INSEE** : Institut National de la Statistique et des Études Économiques.

**LRR** : Linear Regression Rate. Indicateur calculé dans DSAS pour exprimer le taux de migration d'un objet linéaire (km/an).

**LR<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination associé à la régression linéaire, mesurant la qualité de l'ajustement (0–1).

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain. Représentation numérique de la topographie.

**MNS** : Modèle Numérique de Surface. Représentation numérique incluant la topographie et les éléments présents en surface (bâtiments, végétation).

**MSI** : MultiSpectral Instrument. Capteur multispectral embarqué sur les satellites Sentinel-2.

**NTU** : Nephelometric Turbidity Unit. Unité de mesure de la turbidité de l'eau.

**ODyC** : Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane. Structure de suivi scientifique et opérationnel de l'évolution du littoral guyanais.

**OSL** : Optically Stimulated Luminescence. Méthode de datation basée sur la luminescence stimulée optiquement de grains de quartz.

**PIR** : Proche Infrarouge (bande spectrale utilisée en télédétection, 0,7–1,5  $\mu\text{m}$ ).

**QGIS** : Logiciel libre de Systèmes d'Information Géographique (SIG).

**RCP** : Representative Concentration Pathway. Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre utilisés par le GIEC.

**RF (Random Forest)** : Algorithme de classification supervisée basé sur un ensemble d'arbres de décision.

**SIG** : Système d'Information Géographique.

**SHOM** : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

**SLGITC** : Stratégie Locale de Gestion Intégrée du Trait de Côte.

**USGS** : United States Geological Survey. Organisme américain producteur de données géographiques et environnementales.

**ZIC (ITCZ)** : Zone Intertropicale de Convergence (Intertropical Convergence Zone). Bande équatoriale où se rencontrent les alizés, influençant la pluviométrie en Guyane.



## 8. Annexes

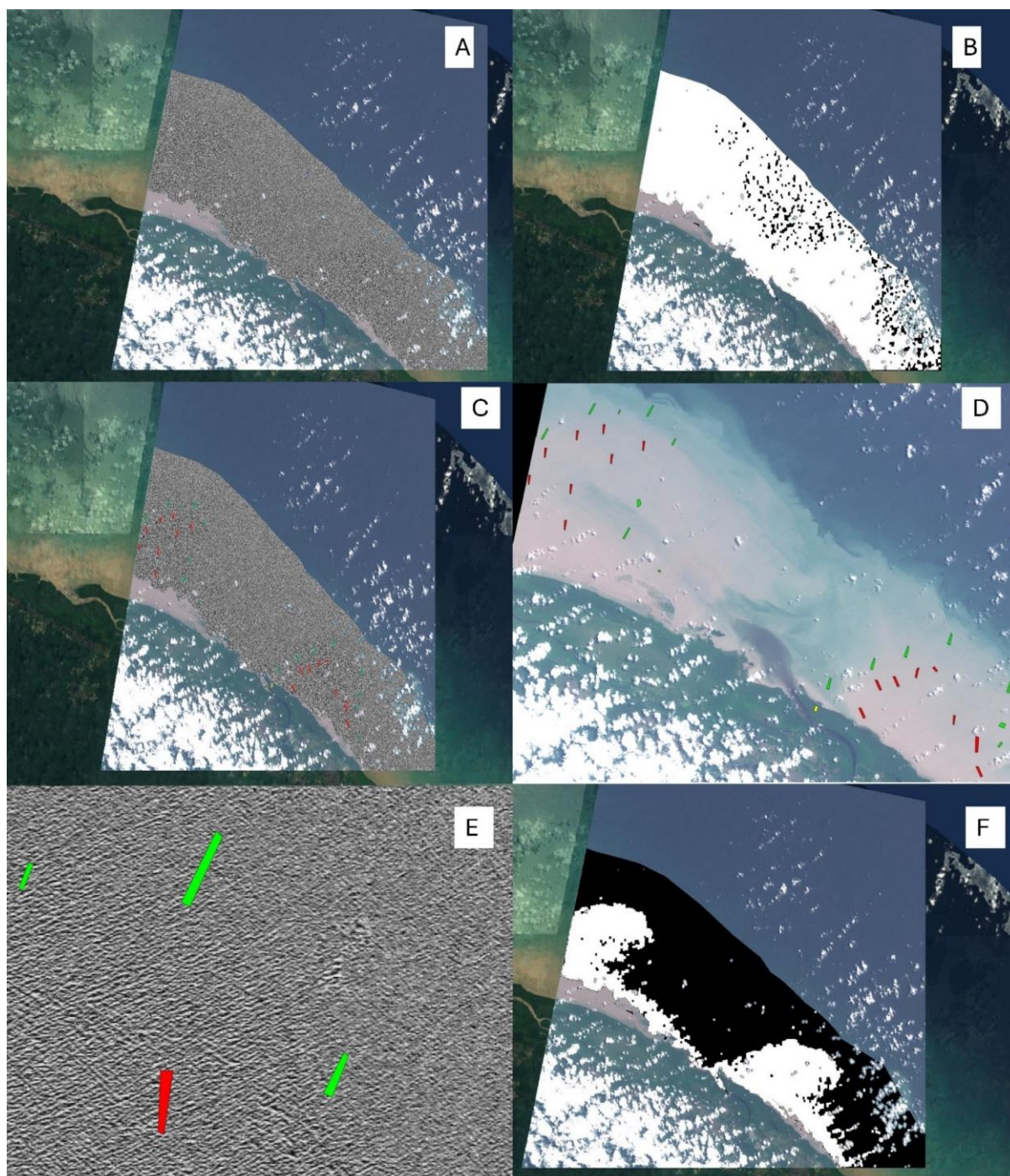


Figure 22 : Autre exemple mise en pratique de la chaîne de traitement Sentinel-2 par analyse et classification des indicateurs de texture extraits d'image de champs de vagues, banc n°2 à l'Ouest et 3 à l'Est.

(A) image rehaussée (B) Classification non convaincante, (C) Polygones d'entraînement sur les pixels de l'image rehaussée (D) Polygone d'entraînement sur l'image en vraie couleur, (E) zoom sur les polygones d'entraînement : en vert champ de vague, en rouge banc de vase, (F) Nouvelle classification convaincante prête à être vectorisée. (sources : Copernicus, QGIS, i-Sea, Audran Dantin, 2025)



Figure 23 : Prise de vue drone à Kourou 28/11/2023 (source : Guillaume Brunier, 2023)

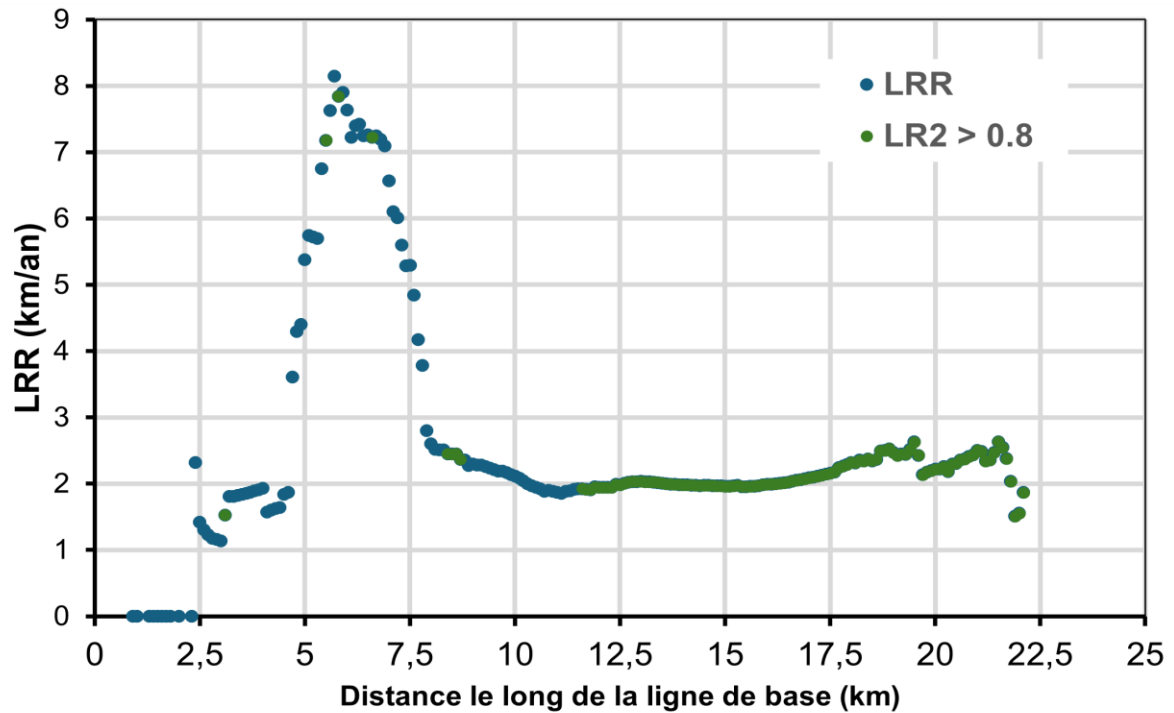


Figure 24 : résultats du calcul du taux de migration linéaire (LRR, Linear Regression Rate) et LR2 banc n°1, obtenus à l'aide du module DSAS. (sources : DSAS, Audran Dantin, 2025)

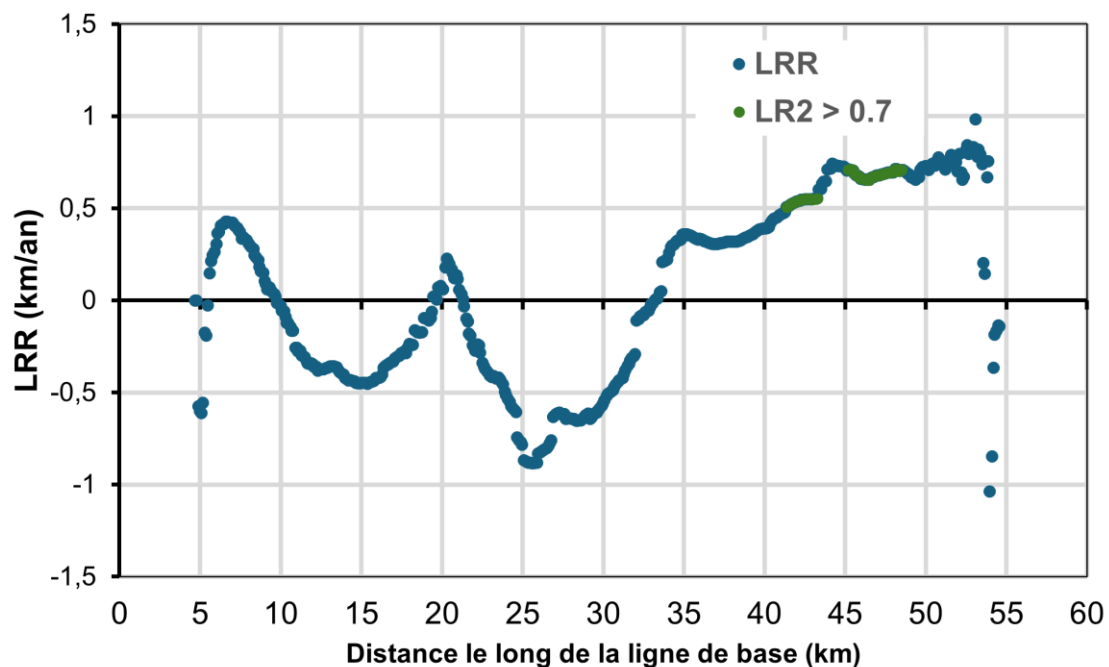


Figure 25 : résultats du calcul du taux de migration linéaire (LRR, Linear Regression Rate) et LR2 banc n°2, obtenus à l'aide du module DSAS. (sources : DSAS, Audran Dantin, 2025)

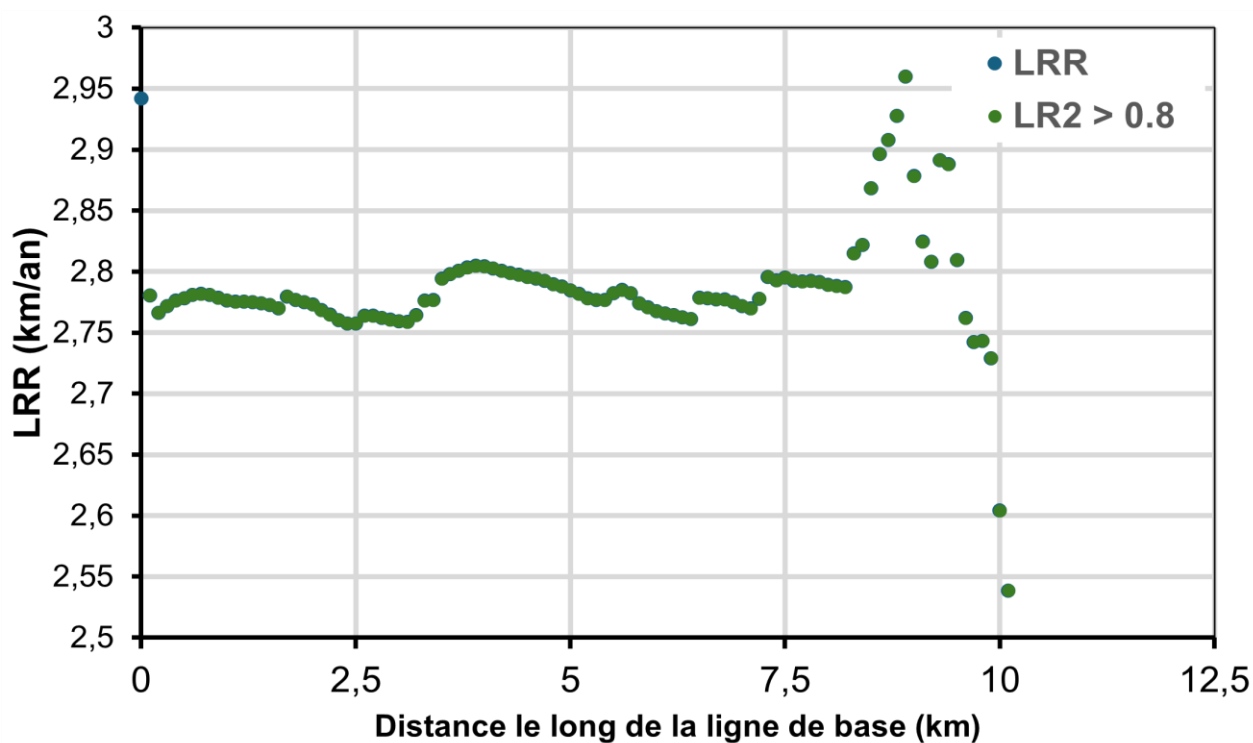


Figure 26 : résultats du calcul du taux de migration linéaire (LRR, Linear Regression Rate) et LR2 banc n°3, obtenus à l'aide du module DSAS. (sources : DSAS, Audran Dantin, 2025)



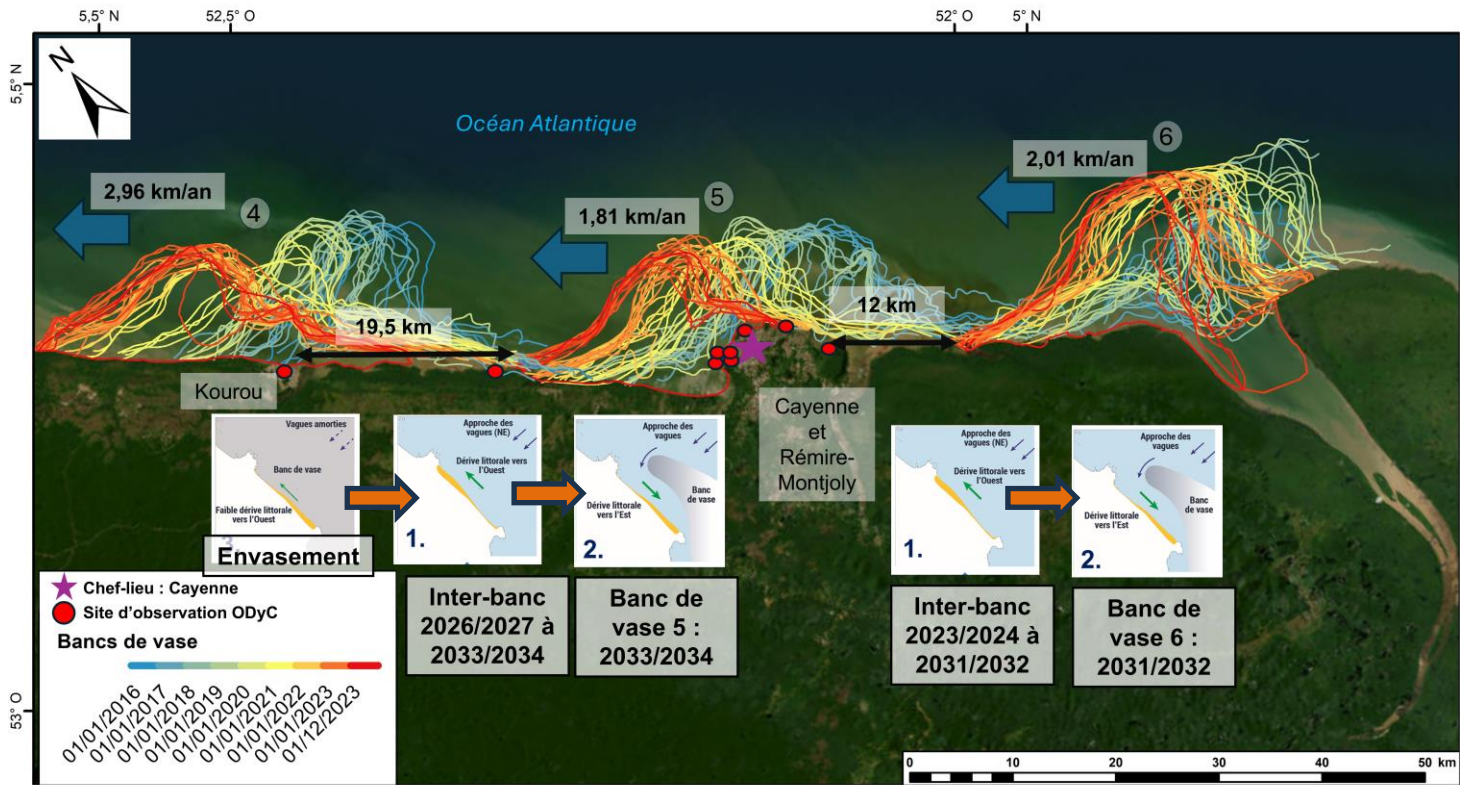


Figure 27 : Carte illustrant une première approche prospective de l'avancée des bancs de vase 4, 5 et 6. (sources : Copernicus, i-Sea, BRGM, Audran DANTIN, 2025)



Figure 28 : Mur tagué sur la plage de Montjoly « rendez la plage au public, reculez ce mur » (source : Audran DANTIN, 2025)



