



## Master RNET

Ressources et Risques Naturels des Environnements Tropicaux  
Mention Sciences de la Terre, des Planètes et de l'Environnement

# Cartographie automatisée du trait de côte de l'île de La Réunion par télédétection satellitaire à l'aide de l'outil SAET

Jonathan Rayan Rower

MITANTSOA NY HAJA HARILALA

Soutenu le 20 août 2025

Encadrants :

Pr Gwenaëlle PENNOBER, Université de La Réunion, UMR Espace-Dev

Manoa RANAIVOSON RAPATSALAHY, doctorant, Université de La Réunion, UMR Espace-Dev



*Bonjour,*

*À Dieu tout-puissant, source de force, de sagesse et d'espérance,*

*À ma grand-mère, ma véritable famille, pilier inébranlable dans les moments difficiles,*

*À ma famille élargie, qui ne m'a jamais abandonné,*

*À tous les jeunes que j'ai eu la chance d'accompagner lors des animations avec l'association PIROI,*

*À tous les chrétiens laïcs de l'Église FPMA de La Réunion, qui m'ont accompagné dans ma foi et m'ont guidé comme une famille, m'aidant à m'adapter à la vie ici en tant qu'étranger, et m'enseignant les règles de savoir-vivre et de savoir-faire indispensables à mon intégration, leur soutien précieux a été un pilier essentiel à la réussite de mon stage.*

# REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Le Professeur Gwenaëlle Pennober**, *mon encadrante et tutrice*, pour son accompagnement tout au long de ce stage. Je remercie également **M. Manoa Ranaivoson Rapatsalahy**, *doctorant à l'Université de La Réunion*, pour son aide précieuse et ses explications éclairantes.

Mes remerciements s'adressent aussi à **M. Philippe Rouet**, ainsi qu'à **M. Carlos Cabezas Rabadán** et **M. Jesús Palomar Vázquez**, *fondateurs de l'outil SAET*, pour leur soutien technique.

Je tiens à souligner que la mobilité et l'encadrement dans le cadre de ce stage, réalisé dans le cadre d'un échange entre *l'Université d'Antananarivo* et *l'Université de La Réunion*, m'ont offert des défis variés qui ont contribué à renforcer mon autonomie et ma capacité d'adaptation.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à **l'agence Erasmus+ de l'Union européenne** pour l'octroi de la bourse qui m'a permis de réaliser cette mobilité d'études à l'Université de La Réunion pour la formation RNET-GT. Ce soutien financier et institutionnel a été essentiel pour mener à bien ce projet académique et personnel.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1 ETAT DE L'ART</b>	<b>3</b>
1.1 Indicateurs de dynamique côtière . . . . .	3
1.2 Télédétection et suivie du rivage . . . . .	5
1.3 Apports des séries temporelles pour l'observation côtière . . . . .	9
1.4 Travaux antérieurs sur La Réunion . . . . .	9
<b>2 MATERIELS ET METHODES</b>	<b>11</b>
2.1 Présentation de la zone d'étude . . . . .	11
2.1.1 Contexte géographique et morphologique . . . . .	11
2.1.2 Contexte océanographique . . . . .	12
2.1.3 Contexte Hydrodynamique . . . . .	13
2.1.4 Contexte anthropique . . . . .	14
2.1.5 Contexte climatique et météorologique . . . . .	14
2.2 Données utilisées . . . . .	16
2.2.1 Données satellitaires Sentinel-2 . . . . .	16
2.2.2 Autre données . . . . .	17
2.3 Outils et logiciels au service de l'étude . . . . .	18
2.3.1 Présentation de l'outil Shoreline Analysis and Extraction Tool . . . . .	18
2.3.2 Analyse de la dynamique littorale avec Digital Shoreline Analys System . . . . .	20
2.4 Manipulation des données . . . . .	21
<b>3 RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>26</b>
3.1 Extraction du Trait de côte . . . . .	26
3.1.1 Étalonnages des paramètres retenus . . . . .	26
3.1.2 Validation de TDC . . . . .	29
3.1.3 Trait de côte pour chaque unité géomorphologique . . . . .	31
3.2 Dynamique de littorale . . . . .	35
3.2.1 Analyse à long terme . . . . .	36
3.2.2 Analyse à moyen terme . . . . .	38
3.2.3 Analyse à court terme : impact d'un épisode des houles . . . . .	41
<b>CONCLUSION</b>	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>VIII</b>

# LISTE DES FIGURES

1.1	Extraits des marqueurs morphologiques de détection du rivage (Boak and Turner, 2005) . . . . .	5
8figure.caption.3		
2.1	Situation géographique de l'Île de la Réunion . . . . .	12
2.2	Les différents régimes de houles à la réunion (Météo-France La Réunion, 2021; Pedreros et al., 2009) . . . . .	14
2.3	Frise chronologique des événements extrêmes (2018 - juillet 2025) (Belon et al., 2024). . . . .	15
2.4	Fonctionnement de l'outil SAET avec de liste des paramètres pour l'extraction du TDC (Palomar-Vázquez et al., 2023). . . . .	20
2.5	Découpage en unité géomorphologique de la plage . . . . .	21
2.6	Schéma méthodologique du travail . . . . .	25
3.1	Répartition globale des images Sentinel-2 par classes de couverture nuageuse (2015-2025) . . . . .	26
3.2	Nombre annuel d'images exploitables selon différents seuils de couverture nuageuse (%) . . . . .	27
3.3	Paramètres adaptés par unité géomorphologique . . . . .	28
3.4	Intégration temporelle des conditions hydrodynamiques et des acquisitions satellitaires pour la validation des TDC. . . . .	29
3.5	Validation des positions de TDC avec des TDC de référence de Chery (2024). . . . .	30
3.6	Validation des positions de TDC avec l'orthophoto de (Dynalit, 2025). . . . .	31
3.7	Superposition des séries temporelles de houle significative et des événements extrêmes maritimes : analyse croisée et visualisation . . . . .	35
3.8	Dynamique à long terme du trait de côte à La Réunion (2015-2025) : distribution spatiale des EPR . . . . .	36
3.9	Analyse saisonnière (Australe et Cyclonique) de la dynamique de la série des TDC (2015-2025) dans les trois, illustrant la distribution des taux d'accrétion et d'érosion. . . . .	38
3.10	Tendances interannuelles de la série des TDC par site et période entre 2015 et 2025 . . . . .	40
3.11	Évolution à court terme du trait de côte dans la Baie de Saint-Paul suite au cyclone Garance (01/01/2025 - 15/03/2025) . . . . .	42
3.12	Évolution à court terme du trait de côte dans la Baie de Saint-Paul suite au cyclone Garance (01/01/2025 - 15/03/2025) . . . . .	42
3.13	Variations rapides du trait de côte au site de Saint-Denis lors de l'événement cyclonique Garance (entre 01/01/2025 et 15/03/2025) . . . . .	43

14	a) Nombre de publications et de citations par année pour les articles incluant les mots-clés « satellite » et « ligne de rivage ». Ces données ont été extraites de la base Web of Science via la requête suivante : TI = (« satellite* » ET « shoreline* ») OU AB = (« satellite* » ET « shoreline* ») OU AK = (« satellite* » ET « shoreline* »), où TI désigne le titre, AB le résumé, et AK les mots-clés auteurs. b) Méthodes actuelles pour la cartographie automatique des lignes de rivage sur des images optiques, classées en deux catégories : « résolution au pixel » et « résolution sous-pixel ». Cette figure est adaptée de Vitousek et <i>al.</i> , (2023). Les références indiquées en gras sont celles évaluées dans la présente étude. . . . .	I
15	Un exemple illustrant la manière de placer une ligne de base (Baseline). Les transects résultants croiseront les lignes de rivage, quel que soit l'emplacement choisi. Les lignes de base dans un jeu de données peuvent être toutes d'un seul type ou constituer une combinaison des trois. . . . .	II
16	Les modèles statistiques générées après calcul par DSAS (Himmelstoss et al., 2018) . . . . .	III
17	Beach_code . . . . .	III
18	Dossier temporaire des images enregistré dans chaque scènes Sentinel-2 . . . . .	IV
19	Cinématique de plage à long terme . . . . .	VI

# LISTE DES TABLEAUX

16table.caption.7

2.2	Paramètres de <b>recherche des scènes d’images</b> (Palomar-Vázquez et al., 2023).	19
2.3	Paramètres de <b>téléchargement des scènes d’images</b> (Palomar-Vázquez et al., 2023).	19
2.4	Paramètres de <b>traitement des scènes d’images</b> (Palomar-Vázquez et al., 2023).	19
2.5	Les modèles statistiques générées par DSAS (Himmelstoss et al., 2018, 2021)	21
3.1	Statistiques interannuelles de WLR par site et période	40
3.2	Écarts-types de recul et d’accrétion selon les sites d’étude	43
3	Caractéristiques des événements de forte houle (Belon et al., 2024)	II
4	Valeurs du code plage (beach_code) pour les zones d’étude	V
5	Statistiques descriptives des variations du trait de côte par site, catégorie et saison	VII
6	Tests statistiques Mann-Whitney pour le contraste de saison	VII



# LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>APS</b>	Approximate-Pixel Shoreline
<b>AWEIsh</b>	Automated Water Extraction Index with Shadows (1.4)
<b>AWEInsh</b>	Automated Water Extraction Index No Shadows (1.3)
<b>BRGM</b>	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
<b>CANDHIS</b>	Centre d'Archivage National des Données de Houle In-Situ <sup>1</sup>
<b>CEREMA</b>	Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
<b>CGAT</b>	groupe Cartografia GeoAmbiental y Teledeteccion <sup>2</sup>
<b>CLMS</b>	Copernicus Land Monitoring Service Copernicus Land Monitoring Service <sup>3</sup>
<b>DSAS</b>	Digital Shoreline Analysis System <sup>4</sup>
<b>ECFAS</b>	European Coastal Flood Awareness System <sup>5</sup>
<b>ESA</b>	European Space Agency <sup>6</sup>
<b>MAJA</b>	Maccs-Atcor Joint Algorithm
<b>MNDWI</b>	Modified Normalized Difference Water Index (1.2)
<b>NDVI</b>	Normalized Difference Vegetation Index (1.5)
<b>NDWI</b>	Normalized Difference Water Index (1.1)
<b>REFMAR</b>	Réseau de Référence des Observations Marégraphiques <sup>7</sup>
<b>SAET</b>	Shoreline Analys and Extraction Tool <sup>8</sup>
<b>SDS</b>	Subpixel-Detected Shoreline
<b>SHOM</b>	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine <sup>9</sup>
<b>TDC</b>	Trait De Côte

- 
1. <https://candhis.cerema.fr/>
  2. <https://cgat.webs.upv.es/datasets/>
  3. <https://land.copernicus.eu/en/products/coastal-zones/coastal-zones-2018> - Consulté le 14/03/2025
  4. <https://www.usgs.gov/centers/whcms/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas>
  5. <https://www.ecfas.eu/>
  6. <https://www.esa.int/>
  7. <https://data.shom.fr/donnees/refmar/download#001=eyJjIjpbLTUyMjgwNyw1ODIyOTI3XSwieiI6NiwicilI6MC>
  8. [https://github.com/jpalomav/SAET\\_master](https://github.com/jpalomav/SAET_master) - Consulté le 19/12/2024 mise à jour avril 2025
  9. <https://data.shom.fr/>

# RÉSUMÉ

La surveillance précise du trait de côte est un enjeu majeur pour les territoires insulaires exposés à des variations naturelles et anthropiques. À La Réunion, caractérisée par une grande diversité géomorphologique et une sensibilité particulière à l'érosion, il est indispensable de disposer d'un suivi régulier afin d'évaluer les évolutions littorales dans un contexte de changements climatiques, de montée du niveau marin et d'urbanisation croissante. Dans ce cadre, ce travail a porté sur l'évaluation de l'outil Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET) appliqué à une série temporelle d'images satellites Sentinel-2, couvrant la période de 2015 à 2025. La méthodologie combine des traitements automatisés avec des calibrations adaptées aux spécificités locales du littoral réunionnais, ainsi qu'une validation rigoureuse par confrontation avec des données terrain et des orthophotos à haute résolution. L'intégration de données marégraphiques et océanographiques a permis de mieux comprendre les variations du trait de côte, en distinguant les évolutions durables des fluctuations ponctuelles liées aux conditions hydrodynamiques. Les résultats confirment que SAET génère une série temporelle fiable et cohérente, capable de refléter fidèlement les dynamiques littorales à différentes échelles temporelles, depuis les variations au jour le jour jusqu'aux impacts d'événements extrêmes comme les cyclones. Cette étude met en évidence la complexité des processus d'érosion et d'accrétion à La Réunion, où s'entrelacent influences naturelles et actions humaines. Certaines limites ont été identifiées, notamment la forte contrainte liée à la couverture nuageuse, fréquente dans un climat tropical, ainsi que les difficultés rencontrées dans des contextes sédimentaires divers, qui compliquent l'extraction automatique précise du trait de côte. Ces éléments soulignent l'importance de compléter les analyses par des données de terrain et des informations sur les caractéristiques sédimentologiques, ainsi que d'intégrer davantage les impacts anthropiques pour améliorer la compréhension et la modélisation des évolutions côtières. Ce travail constitue une évaluation opérationnelle de l'applicabilité de SAET pour le suivi du littoral réunionnais, apportant des bases fiables pour alimenter les observatoires locaux et soutenir la gestion durable du littoral dans un cadre multicritère. Il souligne aussi la nécessité d'une évaluation continue et d'une validation permanente des méthodes utilisées, pour accompagner les évolutions futures de la zone côtière.

**Mots clés :** Cartographie côtière, Télédétection satellitaire, Trait de côte, Validation temporelle, Dynamique littorale, SAET

# ABSTRACT

Shoreline dynamics represent a critical challenge for island territories exposed to both natural and anthropogenic influences. Réunion Island, characterized by significant geomorphological diversity and marked vulnerability to coastal erosion, demands precise and regular monitoring to assess coastal changes amidst climate change, sea-level rise, and increasing urbanization. Within this context, this study evaluates the applicability of the Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET) applied to a time series of Sentinel-2 satellite images spanning 2015 to 2025. The methodology combines automated processing with calibrations tailored to the specific local characteristics of Réunion's coastline, complemented by rigorous validation through comparison with field data and high-resolution orthophotos. The integration of tidal and oceanographic data enhanced the interpretation of observed shoreline variations by distinguishing long-term changes from short-term hydrodynamic fluctuations. Results demonstrate that SAET produces a reliable and coherent temporal series of the shoreline that accurately captures coastal dynamics at multiple temporal scales from daily fluctuations to the impact of extreme events such as cyclones. The study highlights the complexity of coastal processes on Réunion Island, involving both erosion and accretion influenced by natural forces and human activities. Some limitations remain, notably challenges related to persistent cloud cover in tropical climates and the heterogeneous sedimentary environments that complicate automated shoreline extraction. These factors emphasize the need to incorporate additional complementary datasets, particularly in situ and sedimentological observations. Moreover, a more comprehensive integration of anthropogenic impacts is crucial to improve modeling and understanding of coastal evolution. This operational evaluation of SAET demonstrates its suitability for supporting local coastal observatories and fostering sustainable coastal management. It also underscores the importance of ongoing method validation and adaptation to evolving environmental conditions, ensuring the robustness of shoreline monitoring efforts.

**Key words :** Coastal Mapping, Satellite Remote Sensing, Shoreline, Temporal Validation, Coastal Dynamics, SAET

# INTRODUCTION

Le littoral est un système complexe de composantes physiques interconnectées impliquant des processus à la fois offshore et terrestres. L'érosion côtière est l'un de ces processus physiques, dans lequel les éléments solides du littoral qu'ils soient cohésifs ou meubles sont altérés ou redistribués, généralement par des forces naturelles telles que les vagues, les marées, les courants côtiers et le vent (Prasad and Kumar, 2014). En France, environ 950 km de côtes sont concernées par ce phénomène, qui réduit progressivement les espaces littoraux souvent densément aménagés, menaçant les écosystèmes, les activités économiques et les infrastructures humaines<sup>10</sup> (Nicholls et al., 2007). À l'échelle mondiale, le changement climatique, par la montée du niveau de la mer, l'intensification des tempêtes et la modification des courants marins, accentue ces processus et renforce la nécessité d'une gestion des littoraux, rendant nécessaire une adaptation des politiques côtières aux évolutions de forçages<sup>11</sup> (Vousdoukas et al., 2020). Cependant, l'érosion ne dépend pas uniquement des facteurs climatiques : les activités humaines, comme l'artificialisation des rivages, les modifications des bassins versants et des régimes hydrologiques et certains rejets d'eaux dans l'océan, perturbent aussi les équilibres naturels et amplifient l'érosion (Durand and Belon, 2021; Pontee, 2013; De La Torre, 2004).

Dans ce contexte global, l'île de La Réunion illustre concrètement ces enjeux. Le trait de côte à La Réunion présente une sensibilité à l'érosion du fait de sa situation géographique exposée aux forçages australes et cycloniques, ainsi qu'aux dynamiques sédimentaires des rivières. De La Torre, (2012), signalait que près de 50 % du littoral réunionnais était en recul, avec 38 % des zones affectées par une érosion modérée (10 à 20 cm/an) et 12 % par une érosion prononcée (plus de 20 cm/an) . Cette érosion naturelle est accentuée par l'artificialisation du rivage et des bassins versants qui impactent les dynamiques hydro-sédimentaires littorales et altèrent les défenses naturelles (récifs coralliens). 18 % du trait de côte est totalement artificialisé et le taux d'artificialisation du littoral réunionnais est particulièrement important : près de 35 % des terres situées à moins de 500 m de la mer sont aujourd'hui artificialisées. Sur les 19 communes de l'île qui possèdent une façade littorale, 17 sont concernées par un Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) avec la mobilisation de solutions diverses pour lutter contre l'érosion (enrochements, des digues, des remblais, mais aussi des solutions basées sur la nature). On compte près de 3 000 bâtiments d'habitations soumis à un aléa côtier, ce qui représente environ 10 500 personnes (données issues de la compilation des données PER Risques naturels).

Le choix des modalités de lutte contre le recul des côtes doit être étayé par des mesures scientifiques pour caractériser les processus et les dynamiques morphologiques en jeu. Pendant longtemps l'imagerie satellitaire a été peu mobilisée pour des suivis opérationnels et récurrents en raison du manque de résolution spatiale et temporelle des satellites, du coût élevé des images

---

10. <https://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-littoral-a17.html> – Consulté le 30/03/2025

11. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> – Consulté le 30/03/2025

satellites et donc un accès limité aux données en raison de l'absence de politiques de données ouvertes. Les initiatives telles que Copernicus (2015) ou Landsat Data Policy(2008) ont modifié l'accès aux données et l'amélioration continue des résolutions spatiales et temporelles imposent la télédétection satellitaire aujourd'hui comme une méthode efficace pour la surveillance côtière à grande et petite échelle. Elle permet d'accéder à des données régulières et couvrant de vastes zones, indispensables pour suivre les dynamiques rapides et complexes du littoral (Luijendijk et al., 2018; Harley et al., 2017). Les images Sentinel-2, avec leur résolution spatiale intermédiaire (10 à 20 m) et leur fréquence de revisite élevée (5 jours), sont particulièrement adaptées à cette tâche. L'extraction automatique du trait de côte repose sur certaines constantes comme l'utilisation d'indices spectraux tels que le NDWI (1.1), MNDWI (1.2), NDVI (1.5), l'AWEIsh (1.3) ou l'AWEInsh (1.4), qui facilitent la distinction entre surfaces terrestres et aquatiques, même dans des environnements complexes (McFeeters, 1996; Feyisa et al., 2014).

Cependant, l'application de ces méthodes localement comme à La Réunion doit prendre en compte les spécificités locales, notamment la morphologie variée, les effets des marées, la turbidité et la végétation littorale (Poursanidis et al., 2015). C'est dans cette perspective que s'inscrit ce mémoire, réalisé dans le contexte de l'Observation du Littoral (Nout Bord'Mer) au sein de l'OSU-Réunion . L'objectif principal est de développer et d'évaluer une méthode automatisée de détection du trait de côte à partir d'une série temporelle d'image sentinel-2 couvrant la période 2015-2025, spécifiquement adaptée au contexte réunionnais. La problématique centrale de ce travail est : **“Comment valider la série temporelle des traits de côte extraits automatiquement par l'outil SAET, afin de garantir la fiabilité et l'utilité de cette série dans l'analyse de la dynamique côtière par télédétection satellitaire?”**

Pour répondre à cette problématique, ce rapport s'organise en trois grandes parties. La première partie traite de l'état des connaissances sur le trait de côte et les outils de télédétection. La deuxième partie présente le cadre d'étude, les données et la méthodologie utilisées. Enfin, la troisième partie expose les résultats obtenus et leur discussion.

# Chapitre 1

## ETAT DE L'ART

L'étude du trait de côte repose sur une compréhension des indicateurs morphodynamiques et sur l'utilisation de méthodes adaptées pour suivre ses évolutions dans le temps et l'espace. La télédétection spatiale, associée à l'exploitation de séries temporelles d'images satellitaires, offre aujourd'hui des outils puissants pour analyser ces dynamiques, notamment dans des contextes géomorphologiques complexes comme celui de l'île de La Réunion.

### 1.1 Indicateurs de dynamique côtière

Le littoral est une zone tampon entre la terre et la mer aux délimitations floues. Il existe donc plusieurs marqueurs cartographiques de cet espace, la ligne qui souligne cette frontière, que l'on désigne sous le terme générique trait de côte (Boak and Turner, 2005). De même, ces traits de côte ne sont pas des positions fixes, mais des entités en mouvement sous l'influence des forces naturelles et des aménagements humains (Boak and Turner, 2005; Harley et al., 2017).

Ainsi cette mobilité du trait de côte s'inscrit dans une dynamique multi-échelle, marquée par une cyclicité de quatre ordres principaux : (i) À **très court terme**, de la seconde à la journée, le trait de côte peut varier sous l'effet d'une vague (run up), d'un train de houle ou d'une phase de marée ; (ii) Vient ensuite le **court terme**, qui correspond à des échelles de quelques jours à quelques mois, et reflète une variabilité saisonnière ou liée à des événements extrêmes comme une tempête ou une saison de forte houle ; (iii) À **moyen terme**, sur plusieurs années à quelques décennies, les changements du trait de côte sont influencés par des facteurs tels que les variations climatiques (comme El Niño), ou encore la construction d'infrastructures humaines telles que des digues, ports ou barrages qui modifient durablement les forçages et les apports sédimentaires ; (iv) Enfin, sur le **long terme**, à l'échelle de plusieurs siècles voire de millénaires, l'évolution du trait de côte dépend de processus globaux comme les variations du niveau marin (transgressions ou régressions), la subsidence ou la surrection tectonique, entraînant des déplacements profonds et durables du littoral.

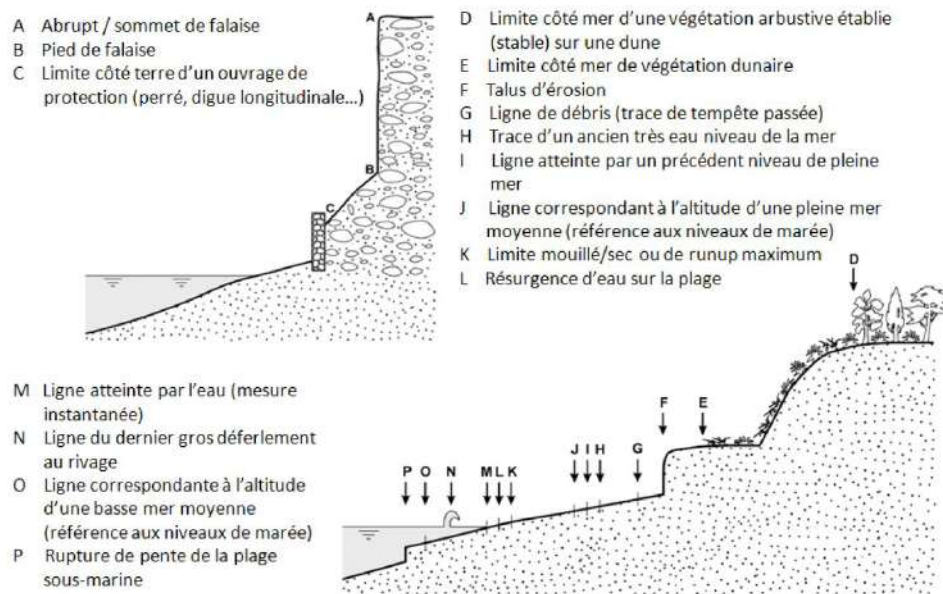
Pour comprendre et suivre les changements morphologiques des environnements côtiers, il est donc important de définir et localiser un trait de côte. Cette ligne de rivage peut être observée selon différents marqueurs, tels que la limite de la végétation, le pied d'une falaise ou encore le jet de rive (run up), correspondant à la limite maximale atteinte par les vagues sur la plage (Moore, 2000; Mahabot, 2016). La significativité des résultats dépend étroitement du marqueur sélectionné, d'où la nécessité d'ajuster l'indicateur aux caractéristiques géomorphologiques de chaque secteur et aux objectifs de l'étude (Crowell et al., 1991). Le déplacement résulte d'un jeu

complexe entre érosion, accrétion et forces hydrodynamiques, notamment la houle, les courants et les marées (Harley et al., 2017; Hapke et al., 2010; Ranasinghe, 2020). Ces évolutions sont par ailleurs fortement influencées par les aménagements humains, qui peuvent modifier les flux sédimentaires et la morphologie côtière (Pontee, 2013; Durand and Belon, 2021).

Boak et Turner, (2005), conviennent de faire la différence entre les notions d'indicateur et de marqueur. Un indicateur est un paramètre quantifiable formant une mesure de potentielle évolution littorale, alors qu'un marqueur est un repère physique (ou visuel) servant à situer la position du rivage. Un indicateur pourrait être le taux de recul calculé à partir de la variabilité de la ligne de référence; les marqueurs pourraient correspondre à la limite de la végétation ou la ligne de swash (Boak and Turner, 2005; Mahabot, 2016; Vousedoukas et al., 2018).

La dynamique de la ligne de rivage est contrainte par différents forçages naturels qui sont variables selon les positions géographiques et qui peuvent se combiner. Les cycles de marée modifient la position apparente du rivage, avec des amplitudes variables selon les régions (sensiblement moins en milieu microtidal qu'en milieu mésotidal ou macrotidal) ce qui crée un caractère cyclique dans les données qui n'est pas forcément associable aux questions d'érosion et d'accrétion du rivage (Hapke et al., 2010; Harley et al., 2017). Les phénomènes météo-marins (tempêtes, dépressions) occasionnent des surcotes (submersion) et des périodes d'érosion entraînant des variations rapides et parfois ponctuelles de la ligne de rivage (Nicholls and Cazenave, 2010; Vousedoukas et al., 2020; Vitousek et al., 2017). Ils sont d'autant plus impactant si ils se combinent à une marée haute de fort coefficient et une forte dépression (effet cocktail ou combinatoire). Les infrastructures côtières, comprenant notamment les quais, les ports ou les enrochements, perturbent la distribution naturelle des sédiments, ce qui peut donner lieu à des déséquilibres pérennes dans les processus d'érosion et d'accrétion (Blangy et al., 2009; Pontee, 2013).

Le recensement proposé par Boak & Turner, (2005) compte plus de quarante-cinq marqueurs permettant de définir le trait de côte que l'on peut classer en géologiques, géomorphologiques, altimétriques, repères de fonctionnalités liées à la végétation ou aux constructions humaines (cf. figure 1.1).



**FIGURE 1.1.** Extraits des marqueurs morphologiques de détection du rivage (Boak and Turner, 2005)

Les marqueurs varient selon le type de littoral : ainsi la position du pied de plage ou la zone de swash sur le littoral de plage sableuse sont souvent retenus ainsi que la limite de végétation, le pied de la falaise ou la ligne de crête sur le littoral rocheux, récifal (Boak and Turner, 2005). L'association de plusieurs marqueurs est souvent nécessaire pour une représentation fiable du trait de côte et de la dynamique côtière (Voudoukas et al., 2018; Hapke et al., 2010). Ainsi sur les plages sableuses sont souvent combinés pied de plage à marée haute et limite de végétation (Boak and Turner, 2005; Thieler and Danforth, 1994; Woodroffe, 2002).

## 1.2 Télédétection et suivi du rivage

L'imagerie satellitaire a longtemps été peu mobilisée pour assurer un suivi opérationnel et régulier de la mobilité du trait de côte. Plusieurs freins expliquent cette situation. Tout d'abord, la résolution spatiale des satellites disponibles jusqu'au début des années 2000 était souvent insuffisante pour détecter avec précision les déplacements parfois infra décimétriques du trait de côte, notamment sur des plages étroites ou dans des contextes fortement anthropisés (Woodroffe, 2002; Mahabot, 2016; Luijendijk et al., 2018). De plus, la résolution temporelle, c'est-à-dire la fréquence de passage des satellites, ne permettait pas un suivi adapté aux échelles de variabilité littorale sus décrites, en particulier pour les dynamiques de très court ou court terme (Maiti and Bhattacharya, 2009). À ces limites techniques s'ajoutait un coût élevé des images satellitaires, qui restreignait leur utilisation à des projets ponctuels ou à des institutions disposant de moyens importants (Addo et al., 2008). L'accès aux données était en effet fortement contraint par l'absence de politiques de données ouvertes, limitant la diffusion et la réutilisation des images par les chercheurs, les gestionnaires ou les collectivités territoriales (Woodcock et al., 2008). Ces obstacles ont longtemps freiné l'intégration des données satellitaires dans les dispositifs de surveillance côtière, au profit de méthodes plus classiques comme la photo-interprétation aérienne, les relevés topographiques ou les observations de terrain (Boak and Turner, 2005). Les initiatives telles que Copernicus (2015) ou Landsat Data Policy (2008) ont modifié l'accès aux



données et l'amélioration continue des résolutions spatiales et temporelles imposent aujourd'hui la télédétection satellitaire dans l'arsenal d'outil mobilisé en contexte d'observatoire pour la surveillance de l'évolution du trait de côte à grande et petite échelle (Gens, 2010; Luijendijk et al., 2018).

La télédétection spatiale est depuis peu devenue une approche incontournable pour suivre la ligne de rivage (*cf.* Annexe 3.2.3). Ses atouts sont de plusieurs ordres. Grâce à leurs fauchées de plusieurs km à quelques centaines de km, un satellite a une capacité synoptique à couvrir de larges zones. Ils ont en outre une capacité de revisite qui s'est nettement amélioré : ils peuvent délivrer des données cohérentes géométriquement (corrections géométriques) et spectralement (corrections atmosphériques) à quelques jours d'intervalle à haute résolution spatiale (Sentinel-2 : revisite tous les 5 jours), le tout pour un coût inférieur à celui des levés terrestres ou aériens au kilomètre (Luijendijk et al., 2018; Harley et al., 2017; CEREMA, 2020). Depuis Landsat 1-ERTS-1 (renommé Landsat 1) en 1972 (Polcyn, 1976; Welby, 1978), les télédétections ont affiné des outils capables de dessiner et de suivre les mutations du littoral à des échelles spatiales et temporelles variées adaptées à cet environnement complexe aux limites floues et interactions multiples à toutes les échelles. Ces observations permettent aujourd'hui de capturer des dynamiques complexes, souvent invisibles à l'œil nu, dans un environnement côtier caractérisé par des limites morphologiques floues et des interactions multiples entre facteurs naturels et anthropiques (Kraus and Galgano, 2001; Maiti and Bhattacharya, 2009; Mendoza et al., 2023). De plus, la diversité des satellites disponibles, offrant des résolutions spatiales et spectrales variées, permet d'adapter l'observation aux besoins spécifiques des études côtières. Par exemple, les satellites à haute résolution comme Sentinel 2 fournissent des images open source accessibles à tous tandis que la très haute résolution de SPOT 6/7 fournit des images détaillées accessibles au secteur public, Sentinel 2 acquiert des données dans le spectre visible proche infrarouge et moyen infrarouge tandis que SPOT 6/7 couvre principalement le visible et le proche infrarouge, ce qui reste suffisant pour la caractérisation morpho-sédimentaire des plages à haute fréquence temporelle et coût modéré. Ainsi, la télédétection répond aux principaux défis du suivi du trait de côte en offrant une solution efficace, reproductible et adaptée à la complexité des environnements côtiers.

L'extraction d'un trait de côte d'une image satellite s'appuie surtout sur le calcul d'indices spectraux qui mettent en lumière les écarts de réflectance entre les surfaces terrestres et celles de l'eau (McFeeters, 1996; Xu, 2006) ou encore entre la réflectance des sols nus de la plage et de la végétation ou de l'urbanisation en arrière plage (Gens, 2010; Viana-Borja and Ortega-Sánchez, 2019). Pour la limite eau/surface émergées, deux classiques utilisés dans ce contexte sont le NDWI (1.1) (Normalized Difference Water Index) (McFeeters, 1996) et sa version revue, le MNDWI (1.2) (Modified Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006); ces indices impliquent de mobiliser des satellites qui acquièrent des données dans les longueurs d'onde du vert et du proche ou moyen infrarouge aident à distinguer l'eau et la terre tout en atténuant le masque que peut jeter la végétation ou les bâtiments. Dans les zones côtières densément végétalisées, l'indice NDVI (1.1) (Normalized Difference Vegetation Index), initialement conçu pour mesurer la biomasse végétale (Rouse, 1973), peut être détourné pour mieux localiser la ligne de rivage en distinguant les zones végétalisées des surfaces nues ou aquatiques. Ce complément est particulièrement utile dans les régions où la végétation de l'arrière-plage ou les formations herbacées littorales peuvent masquer visuellement la transition entre terre et mer. En parallèle, d'autres indices ont été proposés pour améliorer l'extraction automatique du trait de côte dans des contextes spécifiques. Par exemple, l'AWEI (1.3) (1.4) (Automated Water Extraction Index) permet de mieux détecter l'eau dans les zones urbaines ou ombragées, là où les

méthodes classiques comme le NDWI (1.1) échouent en raison de l'absorption par les surfaces sombres (Feyisa et al., 2014). De même, l'indice de luminosité (Brightness Index) peut aider à distinguer l'eau trouble des plages sablonneuses, en se basant sur l'intensité réfléchie globale plutôt que sur des bandes spectrales spécifiques (Klemas, 2011; Shi et al., 2015). Toutefois, l'efficacité de chaque indice dépend fortement du contexte géomorphologique, des conditions atmosphériques et de la couverture terrestre locale. Ainsi, plusieurs auteurs recommandent une analyse comparative multi-indices pour identifier le plus pertinent selon le site étudié (Wicaksono and Wicaksono, 2019).

$$NDWI = \frac{VERT - NIR}{VERT + NIR} \quad (1.1)$$

$$MNDWI = \frac{VERT - SWIR_1}{VERT + SWIR_1} \quad (1.2)$$

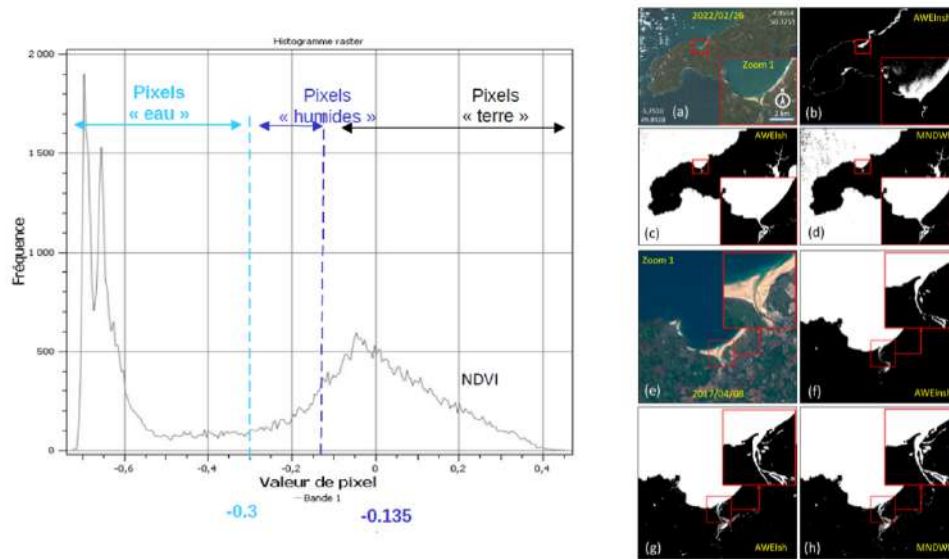
$$AWEI_{sh} = BLEU + 1.5 \times VERT - 1.5 \times (PIR + SWIR_1) - 0.25 \times SWIR_2 \quad (1.3)$$

$$AWEI_{nsh} = 4 \times (VERT - SWIR_1) - (0.25 \times SWIR_1 + 2.75 \times SWIR_2) \quad (1.4)$$

$$NDVI = \frac{NIR - ROUGE}{NIR + ROUGE} \quad (1.5)$$

Le NDWI (1.1) et, le MNDWI (1.2), sont ainsi performant dans les eaux limpides (ou turbides) et sur les étendues de sable clair, mais leur performance diminue rapidement quand l'eau est trouble ou qu'il y a beaucoup de végétation (Palomar-Vázquez et al., 2023; Poursanidis et al., 2015). L'AWEI ((1.3), (1.4)), dont le calcul prend en compte les ombres, reste solide dans ces milieux, mais il peut à l'inverse confondre des sols imbibés d'eau avec des zones immergées de petits fonds, ce qui appelle toujours une vérification sur le terrain (Rokni et al., 2014). Enfin, le NDVI (1.5), dont le but est de mesurer la "**verdure**", perd de son intérêt dans un contexte d'images à haute résolution spatiale dans les quartiers urbanisés où les jardins mêlent leurs réflectances aux toits et aux routes en béton (Pardo-Pascual et al., 2012).

Afin de circonscrire précisément le littoral, il faut impérativement différencier les pixels marins de ceux terrestres, une opération qui requiert un seuillage adéquat. Des seuils fixes peuvent être employés, mais des approches plus sophistiquées, tel l'algorithme d'Otsu, modifient automatiquement ce seuil selon la distribution des pixels dans l'image (Otsu, 1979). Toutefois, dans les régions littorales complexes, présentant divers environnements (marais, flore, sable humide), ces procédés peuvent s'avérer délicats, exigeant souvent des ajustements méticuleux (Liao et al., 2001). Ces contraintes mettent en évidence la nécessité d'adapter la méthode au terrain et d'associer différents indicateurs ou procédés pour fiabiliser et reproduire les résultats (Mallet et al., 2013; Pardo-Pascual et al., 2012).



**FIGURE 1.2.** A gauche : histogramme montrant le principe du seuillage sur un indice spectral à partir de l'indice NDVI<sup>1</sup> (1.5) (CEREMA, 2020) ; A droite : Les différentes seuillage des indices peuvent extraire l'eau et la terre en télédétection (Palomar-Vázquez et al., 2023).

Pour suivre la morphodynamique des littoraux, dans un contexte de résolution spatiale haute (entre 30 m et 5 m) ou même très haute (inférieur à 5 m) la forte répétitivité des satellites sur de vastes territoires et sur de longues périodes permet via : (i) la détection de changement (ii) la production de séries temporelles de détecter rapidement des impacts morphologiques et d'évaluer la récupération (Luijendijk et al., 2018; Vos et al., 2019).

De nombreux logiciels et outils ont été créés pour automatiser l'extraction de la ligne de côte à partir d'images satellites. Les systèmes d'information géographique (SIG) ont longtemps été utilisés pour la photo-interprétation et la numérisation manuelle, offrant flexibilité et précision locale, mais ils dépendent toujours de l'expertise humaine et ne sont pas toujours adaptés aux grandes échelles (Boak and Turner, 2005). Pour pallier ces limites, des chaînes automatisées comme CoastSat (Vos et al., 2019), SHOREX (Pardo-Pascual et al., 2014) et les solutions du CEREMA (CEREMA, 2020) ont été développées. Ces outils standardisent l'extraction sur de longues séries temporelles, intégrant classification avancée, seuillage (notamment par Otsu) et corrections atmosphériques, en exploitant la puissance du cloud computing via Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Chaque outil a sa propre façon de segmenter pour tracer la ligne entre la terre et l'eau. Prenons CASSIE (Hagenaars et al., 2018) par exemple, qui se sert du NDWI. Ce dernier utilise les bandes verte et proche infrarouge à 10 m sur Sentinel-2, mais il peut parfois confondre l'écume lié au déferlement des vagues avec la plage émergée qui sont tous les deux des objets à forte réflectance dans toutes les longueurs d'onde, ce qui limite son utilisation à des houles faibles ( $H_s < 0,5$  m) (Hagenaars et al., 2018). CoastSat contourne cette difficulté en identifiant les zones d'écume via classification supervisée et utilise le MNDWI (1.2), intégrant la bande SWIR moins sensible à ce phénomène, couplé à un seuillage par Otsu pour une extraction sub-pixel précise (Vos et al., 2019). SHOREX utilise l'AWEI (1.3) (1.4) pour la segmentation initiale, renforçant la séparation eau/ter (Palomar-Vázquez et al., 2018). Les satellites conviennent particulièrement à cette recherche, car ils sont disponibles gratuitement, passent souvent sur la Terre environ 5 et 8 jours, et leur image malgré leurs détails élevés, les

images de Pléiades<sup>2</sup> ou SPOT<sup>3</sup>, bien que précises, sont coûteuses et génèrent, puis affine la détection par analyse de voisinage et ajustement polynomial sur la bande SWIR<sub>1</sub>, robuste pour différencier les surfaces (Pardo-Pascual et al., 2014; Rokni et al., 2014).

Ces outils reposent souvent sur des plateformes commerciales ou nécessitent des données complémentaires (orthophotographies haute résolution) parfois indisponibles à l'échelle européenne. Dans ce contexte, dans le cadre du projet européen ECFAS (European Coastal Flood Awareness System) Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET) a été développé entièrement autonome et open source, pour la surveillance et l'alerte des inondations côtières à l'échelle continentale (Palomar-Vázquez et al., 2023). SAET applique les mêmes algorithmes sub-pixel que SHOREX, mais fonctionne uniquement avec des données publiques ouvertes, sans dépendre d'orthophotographies haute résolution. Il offre une automatisation complète et une adaptation paramétrique aux conditions locales, idéal pour gérer rapidement et fiablement de larges secteurs littoraux soumis à des événements extrêmes. La combinaison de ces outils, exploitant leurs forces respectives, optimise la surveillance côtière : CoastSat pour un prétraitement robuste, SHOREX et SAET pour une détection automatique précise adaptée aux environnements complexes.

### **1.3 Apports des séries temporelles pour l'observation côtière**

En utilisant une séquence d'images satellites avec une profondeur temporelle significative, la surveillance des processus littoraux s'est accrue (Luijendijk et al., 2018; Masselink et al., 2016).

L'utilisation de ces séries chronologiques soulève néanmoins différents problèmes. Les changements dans des conditions de capture, comme les nuages, les changements de luminosité ou les événements atmosphériques, rendent difficile la normalisation des données au fil du temps, en particulier dans les zones tropicales avec des reliefs complexes (Palomar-Vázquez et al., 2023). Pour relever ces défis, les études visent à créer des techniques automatisées ou partiellement automatisées, qui peuvent gérer de grandes quantités d'images avec moins d'intervention humaine toujours plus ou moins suggestives (Vos et al., 2019).

L'essor que l'on observe depuis peu des approches qui unissent l'observation de la Terre et la simulation des déplacements de sédiments met en lumière les perspectives grandissantes qu'offrent les suivis chronologiques. Ils permettent d'enrichir notre savoir et d'affiner la gestion globale des environnements littoraux (Castelle and Masselink, 2023). Ces avancées représentent un seuil décisif en termes d'aptitude à assurer une surveillance continue, exacte, et immédiatement applicable des côtes, qu'il s'agisse d'une vision d'ensemble ou d'un point de vue plus spécifique.

### **1.4 Travaux antérieurs sur La Réunion**

Le littoral de l'île de La Réunion a fait l'objet de plusieurs études scientifiques, mêlant dossiers institutionnels (Cuet et al., 2023; De La Torre, 2004; De La Torre et al., 2006, 2012; Pennober et al., 2021, 2024), articles de recherche (Mahabot et al., 2017a,b) et thèses (Cordier,

---

2. <https://dinamis.data-terra.org/pleiades/>

3. <https://dinamis.data-terra.org/spot-6-7/>

2007; Mahabot, 2016; Machabée, 2024). Si certains de ces travaux sont aujourd'hui un peu anciens (Robert, 1974), ils ont cependant permis de caractériser les morphologies en présence et de poser le cadre des mécanismes en cours.

Depuis peu l'Observatoire du Littoral de La Réunion (Nout Bord'Mer), joue un rôle central dans la caractérisation des risques côtiers et dans le partage d'information dédié à ces derniers. Il s'appuie sur 2 observatoires du trait de côte OBSCOT porté par le BRGM à l'échelle de l'île et le SNO dynalit (Service national des dynamiques littorales) porté par l'OSU-Réunion sur les sites de l'Ermitage et la Saline. Il combine, relevés topographique et marqueurs paysagers de terrain (DGPS) traitement d'eau, traitement d'images aériennes (photo interprétation) et satellitaires (Sentinel-2, Pléiades) (classification, calculs d'indices) , pour caractériser les dynamiques côtières à différentes résolutions spatiales : moyen terme : décennie, saisonnier, et les épisodes morphogéniques (houles cycloniques et australes ) (Mahabot et al., 2017a; Belon et al., 2021).

Par ailleurs, les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) élaborés à La Réunion s'appuient sur ces données combinées (observations satellitaires, levés topographiques, modélisations) pour fournir un cadre réglementaire efficace face aux risques d'érosion et de submersion marine. Dans ce contexte, l'étude actuelle s'inscrit dans une volonté de développer une méthode automatisée, reproductible et adaptée à la forte répétitivité temporelle offerte par les images Sentinel-2. Cette approche vise à réduire la charge manuelle, améliorer la précision des extractions et garantir une cohérence temporelle des résultats, répondant ainsi aux besoins opérationnels et scientifiques pour une gestion durable et efficace du littoral réunionnais.

## **Chapitre 2**

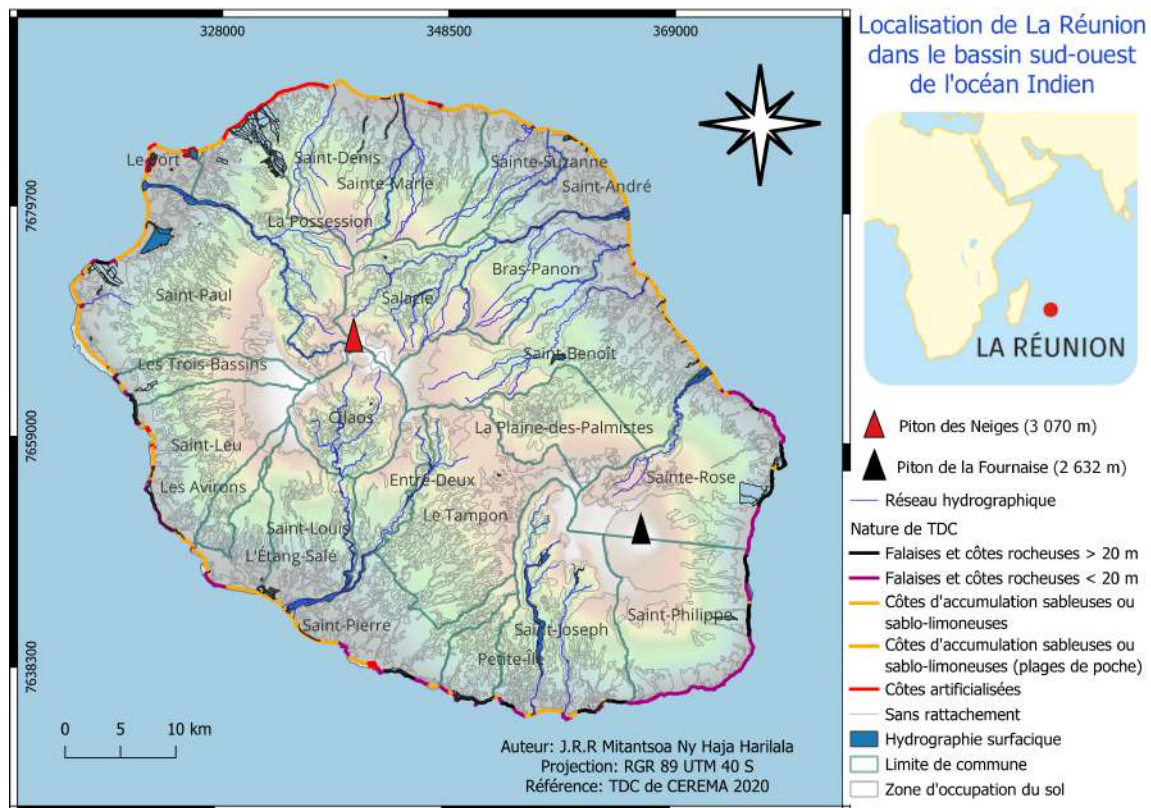
### **MATERIELS ET METHODES**

#### **2.1 Présentation de la zone d'étude**

La compréhension fine des dynamiques côtières repose sur une connaissance approfondie du contexte géographique, morphologique, océanographique et anthropique de la zone étudiée. L'île de La Réunion, située dans l'océan Indien, offre un terrain d'étude particulièrement riche et complexe pour la détection automatique du trait de côte, du fait de ses caractéristiques géomorphologiques variées, de son régime hydrodynamique intense et des pressions anthropiques croissantes. Cette diversité impose une adaptation rigoureuse des méthodes de télédétection et d'analyse spatiale, afin de garantir la fiabilité et la pertinence des résultats.

##### **2.1.1 Contexte géographique et morphologique**

La Réunion est une île volcanique d'environ 2 512 km<sup>2</sup>, située à 55°32' de longitude Est et 21°08' de latitude Sud, au nord du tropique du Capricorne (Smietana, 2011), à environ 700 km à l'est de Madagascar et 180 km à l'ouest de l'île Maurice (Lénat and Bachèlery, 1988). Son littoral s'étend sur environ 210 à 256 km, présentant une grande diversité morphologique qui reflète son origine volcanique récente et son évolution géomorphologique dynamique comprenant des falaises abruptes, des plages sableuses et des zones récifales (Battistini, 1984).



**FIGURE 2.1.** Situation géographique de l'Île de la Réunion

Cette diversité se traduit par quatre grands types de littoraux :

- **Les côtes rocheuses basaltiques** (environ 43 % du linéaire côtier), composées de falaises abruptes, plateformes d'érosion et coulées de lave, principalement sur les façades sud et sud-est (Saint-Ange et al., 2013).
- **Les côtes alluvionnaires** (environ 32 %), constituées de plages de sable noir volcanique et de cordons de galets, alimentées par les apports sédimentaires fluviaux issus de l'érosion des massifs montagneux (Montaggioni, 1978; Louvat and Allègre, 1997).
- **Les zones récifales et lagunaires**, localisées surtout sur la côte ouest, où les plages de sable blanc corallien sont protégées par des récifs frangeants (Battistini, 1975; Mahabot et al., 2017a).
- **Les côtes aménagées**, concentrées dans les zones urbanisées, où les infrastructures modifient la morphologie naturelle (Bulteau et al., 2015).

La morphologie côtière réunionnaise est donc marquée par une forte hétérogénéité spatiale, qui influence directement la réflectance des surfaces observées par satellite et complique la détection automatique du trait de côte (Pardo-Pascual et al., 2012; Palomar-Vázquez et al., 2022). Cette complexité nécessite une approche méthodologique adaptée, tenant compte des caractéristiques spécifiques de chaque type de littoral.

## 2.1.2 Contexte océanographique

L'île de La Réunion est située dans l'océan Indien tropical, au sein d'un vaste système océanique dominé par le courant sud-équatorial qui s'écoule d'est en ouest à une vitesse

moyenne d'environ 0,5 nœud (0,25 m/s) sur une largeur de près de 2 000 km (Piton and Taquet, 1992; Yvergnaux, 2022). Ce courant chaud et oligotrophe, alimenté par les alizés du sud-est, influence fortement les conditions de surface autour de l'île, notamment la température, la salinité et la turbidité des eaux côtières (Petit, 2006). La Réunion se trouve dans une zone océanique à circulation anticyclonique tropicale, soumise à une variation saisonnière entre un été chaud et humide (novembre à avril) et un hiver plus frais et sec (mai à octobre), ce qui modifie les caractéristiques physiques des masses d'eau (Piton and Taquet, 1992). La dynamique océanographique locale est également marquée par la présence de contre-courants équatoriaux subsuperficiels qui contribuent à la complexité des flux d'eau autour de l'île (Hisard et al., 1976). Ces phénomènes influencent la distribution des nutriments et la stratification thermique, affectant indirectement la turbidité et la réflectance des eaux, paramètres cruciaux pour la qualité des images satellitaires utilisées dans la détection du trait de côte.

Sur le plan côtier, cette circulation océanique se combine aux effets des houles et des vents dominants. La Réunion est exposée à des houles australes et cycloniques intenses, qui modèlent fortement la morphologie côtière et les processus d'érosion (Pedreros et al., 2009). La turbidité variable, liée aux apports fluviaux et aux remobilisations sédimentaires par la houle, complique la séparation optique entre eau et terre dans les images satellites, rendant nécessaire une adaptation fine des méthodes de traitement.

### 2.1.3 Contexte Hydrodynamique

Le contexte hydrodynamique de La Réunion est caractérisé par l'interaction de plusieurs phénomènes physiques majeurs qui influencent directement la dynamique du trait de côte et la morphologie littorale.

La Réunion est située dans une zone microtidale, avec une amplitude marémotrice faible, généralement inférieure à 0,5 mètre entre la pleine mer et la basse mer astronomique (Cordier, 2007). Cette faible amplitude limite l'impact direct des marées sur le déplacement apparent du trait de côte, mais les surcotes atmosphériques, notamment lors des tempêtes tropicales et cyclones, peuvent provoquer des élévations temporaires du niveau de la mer de plusieurs décimètres à plus d'un mètre (Météo-France La Réunion, 2021; CEREMA, 2020). Ces surcotes augmentent la submersion des zones basses et accentuent les processus d'érosion côtière.

Le vent joue un rôle double dans la dynamique côtière. Il est le principal moteur de génération des houles locales et régionales, en particulier les houles australes et cycloniques qui impactent fortement le littoral réunionnais (Météo-France La Réunion, 2021; Bousquet et al., 2021; Pedreros et al., 2009). Par ailleurs, le vent contribue à la déflation éolienne, c'est-à-dire au soulèvement et au transport des sédiments fins (sables et poussières) sur les plages et dunes, modifiant ainsi la morphologie des cordons littoraux. Ces transports éoliens peuvent être significatifs dans les secteurs exposés, notamment sur la côte ouest (Cazes-Duvat, 2003; Pye, 2015).

La Réunion est soumise à trois principaux types de houle (cf. figure 2.2) (Pedreros et al., 2009) :

- **Houles australes** : provenant du sud-ouest, elles sont les plus fréquentes et responsables d'une érosion modérée mais continue sur la côte ouest et nord.
- **Houles cycloniques** : associées aux cyclones tropicaux, elles sont rares mais très énergétiques, provoquant des érosions rapides et importantes, voire des submersions majeures.







## 2.2 Données utilisées

Une analyse précise et fiable de la ligne de rivage dépend principalement de la qualité des données utilisées. Dans ce cadre, le choix des sources d'information est fondamental pour tirer des conclusions pertinentes. Cette section dresse un inventaire des jeux de données mobilisés ici, en mettant d'abord l'accent sur les images satellites, base de la détection automatique, puis sur les ensembles complémentaires qui viennent affiner l'interprétation des variations de la côte.

### 2.2.1 Données satellitaires Sentinel-2

Le projet mobilise des données open source à haute résolution. Les images Sentinel-2 ont été choisies pour cette étude parce qu'elles sont idéales pour suivre l'évolution des zones côtières. En effet, ces satellites délivrent des images optiques multispectrales à une résolution fine, allant de 10 à 20 mètres selon la bande. La Réunion est couverte par une seule tuile Sentinel-2 (40KCB) ce qui facilite les traitement et la vision synoptique à l'échelle de l'île. Cette particularité assure une homogénéité spatiale et temporelle meilleure, élément clé pour analyser de façon fiable les dynamiques côtières. En plus, la fréquence de revisite est d'environ 5 jours grâce aux constellations Sentinel-2A et Sentinel-2B (voir loin Sentinel-2C et Sentinel-2D) fournit une série chronologique dense, indispensable pour suivre les changements rapides et saisonniers du littoral.

Bandes Sentinel-2	Sentinel-2A		Sentinel-2B		Résolution spatiale (m)
	Longueur d'onde centrale (nm)	Largeur de bande (nm)	Longueur d'onde centrale (nm)	Largeur de bande (nm)	
Bande B <sub>1</sub> – Aérosol côtier	442.7	21	442.2	21	60
Bande B <sub>2</sub> – Bleu	492.4	66	492.1	66	10
Bande B <sub>3</sub> – Vert	559.8	36	559.0	36	10
Bande B <sub>4</sub> – Rouge	664.6	31	664.9	31	10
Bande B <sub>5</sub> – Végétation "red edge"	704.1	15	703.8	16	20
Bande B <sub>6</sub> – Végétation "red edge"	740.5	15	739.1	15	20
Bande B <sub>7</sub> – Végétation "red edge"	782.8	20	779.7	20	20
Bande B <sub>8</sub> – PIR	832.8	106	832.9	106	10
Bande B <sub>8A</sub> – PIR "étroit"	864.7	21	864.0	22	20
Bande B <sub>9</sub> – Vapeur d'eau	945.1	20	943.2	21	60
Bande B <sub>10</sub> – SWIR - Cirrus	1373.5	31	1376.9	30	60
Bande B <sub>11</sub> – SWIR <sub>1</sub>	1613.7	91	1610.4	94	20
Bande B <sub>12</sub> – SWIR <sub>2</sub>	2202.4	175	2185.7	185	20

**TABLE 2.1.** Bandes spectrales de l'instrument MSI à bord de Sentinel-2A et Sentinel-2B (Source : Wikipedia)<sup>1</sup>

Parmi les bandes exploitées (*cf.* Tableau 2.1), les bandes visibles (BLEUE, VERTE, ROUGE) jouent un rôle fondamental. La bande BLEUE est particulièrement utile pour pénétrer les eaux peu profondes et détecter les variations de la turbidité, ce qui facilite la différenciation entre zones immergées et marges. La bande VERTE améliore la discrimination entre la végétation côtière et les eaux, tandis que la bande ROUGE est sensible à la végétation terrestre et aux sédiments, contribuant à une meilleure délimitation du littoral. La bande PIR est un atout majeur pour la détection du trait de côte, car l'eau absorbe fortement cette longueur d'onde, ce qui crée un contraste net entre la terre et la mer. Par ailleurs, les bandes du proche infrarouge moyen, SWIR<sub>1</sub> et SWIR<sub>2</sub>, sont sensibles à l'humidité du sol et à la végétation, permettant d'affiner la distinction entre zones humides, sable sec et eau, ce qui est important pour éviter les erreurs dans l'extraction automatique du trait de côte. La bande SWIR<sub>1</sub> est très utile pour détecter précisément la limite entre l'eau et la terre, surtout grâce à son fort contraste spectral dû à l'absorption importante de l'eau dans cette gamme (Knaeps et al., 2018). C'est pourquoi la bande SWIR<sub>1</sub> est particulièrement bien adaptée pour localiser précisément le trait de côte dans

des environnements côtiers complexes Et la bande aérosol côtier est utilisée pour le masque de nuages. Cette bande, en repérant les aérosols et la brume dans l'air, nettoie chaque image en jetant les pixels sales, ce qui rend les longues séries temporelles beaucoup plus fiables.

## 2.2.2 Autre données

### — Données de marée (SHOM) et données de houle (CANDHIS)

Bien que La Réunion soit soumise à un régime de marée semi-diurne relativement stable, la précision dans l'interprétation des traits de côte impose une correction du niveau marin au moment exact de l'acquisition des images satellites (10h35 pour La Réunion), afin de différencier les variations ponctuelles dues aux marées des évolutions morphologiques durables (Pugh et al., 2014). À cet effet, les données horaires de la station marégraphique de la Pointe des Galets, fournies par le SHOM<sup>2</sup> via la plateforme REFMAR<sup>3</sup>, constituent la seule source fiable disponible sur l'île. Une approche statistique fondée sur la moyenne ( $\mu$ ) et l'écart-type ( $\sigma$ ) des hauteurs d'eau a été utilisée pour classer les images Sentinel-2 selon trois niveaux : marée basse ( $< \mu - \sigma$ ), intermédiaire (entre  $\mu - \sigma$  et  $\mu + \sigma$ ) et marée haute ( $> \mu + \sigma$ ). Cette méthode, couramment employée pour l'analyse des zones intertidales à partir de données satellitaires (Kim et al., 2021; Chang et al., 2022), a été automatisée par un script Python.

Parallèlement, les conditions de houle jouent un rôle déterminant dans la dynamique côtière réunionnaise, notamment en période de forte houle australe ou cyclonique. Les données issues du dispositif CANDHIS, en particulier celles de la station 97403<sup>4</sup> (Rivière des Galets), offrent des mesures de hauteur significative des vagues (Hm0) toutes les 30 minutes. Ces séries temporelles permettent de détecter les événements de forte énergie marine susceptibles d'engendrer des modifications rapides du littoral (CEREMA, 2020). Leur croisement avec les données marégraphiques et les images Sentinel-2 permet une détection fine des épisodes de récession ou d'accrétion du trait de côte. Cette intégration temporelle et spatiale améliore la robustesse de l'interprétation et limite les biais liés à des événements extrêmes (Mitsopoulos and Peña, 2023; IFREMER, 2023).

### — Données de référence

La validation des traits de côte extraits par télédétection a été réalisée en superposant ces derniers avec des traits de côte de référence issus de travaux antérieurs et des observatoires pérennes tels que le SNO Dynalit et OBSCOT. Ils ont été produits et/ou valorisés par plusieurs mémoires de Master Chery, (2024), Ranaivoson Rapatsalahy, (2023) et Rambeau, (2024), Sababady, (2023). La méthode employée repose sur une superposition visuelle des traits de côte extraits et des traits de référence dans un système d'information géographique (SIG). Étant donné les écarts temporels fréquents entre les images Sentinel-2 (utilisées pour la détection) et les dates et heures des traits de référence, une zone tampon (buffer) de tolérance de 2 à 3 mètres a été appliquée de part et d'autre du trait détecté. Si le trait de côte de référence se trouve inclus dans cette zone tampon, la

2. <https://data.shom.fr/>

3. <https://data.shom.fr/donnees/refmar/download#001=eyJjIjpbLTlTY2MjgwNyw1ODIyOTI3XSwieiI6NiwicilI6MC>  
- Consulté le, 04/05/2025

4. [https://candhis.cerema.fr/\\_public\\_/campagne.php?Y2FtcD05NzQwMw==](https://candhis.cerema.fr/_public_/campagne.php?Y2FtcD05NzQwMw==) - Consulté le, 04/05/2025

validation est considérée comme positive. En revanche, si le trait de côte modélisé se situe en dehors de cette bande de tolérance, la validation est considérée comme négative, ce qui suggère une erreur de détection ou une incertitude significative dans le positionnement. Dans ce cas, une analyse plus approfondie est nécessaire afin de déterminer si cet écart résulte d'une variabilité naturelle du trait de côte (par exemple, une forte dynamique sédimentaire entre les deux dates) ou d'une erreur liée au traitement ou à la qualité des données Sentinel-2.

Ce protocole est inspiré de méthodologies similaires appliquées dans des travaux antérieurs portant sur la précision de la détection côtière à partir de données satellites (Pardo-Pascual et al., 2012; Almonacid-Caballer et al., 2016). Ces auteurs soulignent l'intérêt de la validation par tolérance spatiale sous forme de buffer, particulièrement adaptée dans les environnements côtiers soumis à des dynamiques rapides et à des contraintes de disponibilité temporelle des images. La validation visuelle reste ainsi une méthode robuste, notamment en l'absence de séries temporelles parfaitement synchronisées (Luijendijk et al., 2018).

## **2.3 Outils et logiciels au service de l'étude**

### **2.3.1 Présentation de l'outil Shoreline Analysis and Extraction Tool**

Le **Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET)** est un outil open source développé conjointement par le projet European Coastal Flood Awareness System (ECFAS) du groupe Cartografia GeoAmbiental y Teledeteccion (CGAT). Tels que (i) le projet ECFAS est une initiative européenne visant à développer un système d'alerte précoce intégré pour les inondations côtières, en combinant données météorologiques, océanographiques et modélisations pour améliorer la gestion des risques littoraux ; (ii) le groupe CGAT, dans le cadre du projet ECFAS, est un groupe de recherche collaborant à des programmes visant à améliorer la surveillance et l'analyse des phénomènes littoraux, notamment les inondations côtières.

L'outil permet l'extraction automatique et précise du trait de côte à partir d'images satellites, notamment Sentinel-2 et Landsat 8 et 9, en comparant des acquisitions pré- et post-événements extrêmes tels que les tempêtes (Palomar-Vázquez et al., 2023). SAET exploite des images Sentinel-2 de niveaux 1\_C (non corrigées atmosphériquement) et 2\_A (corrigées) obtenues via des chaînes de traitement reconnues comme Sen2Cor ou MAJA<sup>5</sup>. L'outil identifie la ligne de haute mer (High Water Line, HWL), qui correspond à la limite terre/mer observable à marée haute ou basse, et sert de référence pour suivre les évolutions côtières. Il nécessite une installation sous Python version 3.9.7<sup>6</sup> et est compatible aux environnements Windows et Linux. Son code source, ainsi que les instructions d'installation et tutoriels<sup>7</sup> détaillés, sont accessibles en open source via GitHub<sup>8</sup>, garantissant une transparence et une reproductibilité complète du processus.

L'utilisation de SAET implique un ajustement itératif des paramètres de traitement afin d'obtenir une ligne de rivage la plus fidèle possible à la réalité, validée par superposition sur

5. <https://www.cesbio.cnrs.fr/outils/maja/>

6. <https://www.python.org/downloads/release/python-397/> - Consulté le, 19/12/2024

7. <https://www.youtube.com/watch?v=ygLoW4z1K4w> - Consulté le, 19/12/2024

8. [https://github.com/jpalomav/SAET\\_master](https://github.com/jpalomav/SAET_master)

l'image satellite (cf. figure 2.4). Cette optimisation adaptée à chaque unité géomorphologique permet de tenir compte des spécificités locales pour assurer la précision des résultats. Ce processus garantit ainsi la pertinence et la robustesse des données extraites, en fonction des typologies de plage et des conditions environnementales propres à chaque site d'étude.

L'outil propose plusieurs modes d'utilisation adaptés aux besoins variés des utilisateurs souhaités. Ces modes couvrent l'ensemble du processus, depuis la recherche (cf. Tableau 2.2) et le téléchargement (cf. Tableau 2.3) des images satellites jusqu'à l'extraction finale du TDC (cf. Tableau 2.4). Les principaux modes incluent :

- **Mode recherche (`python sp_searching_run.py`)** : permet de rechercher les images disponibles autour d'une date spécifique, selon des critères définis comme la couverture nuageuse et la zone d'intérêt.

Paramètre	Description	Obligatoire	Exemple d'usage	Valeur par défaut
-help	Affiche l'aide de l'outil	Non	-help, -h	-
-fp	Périmètre de recherche (coordonnées ou NONE pour désactiver)	Oui	fp=lon,lat ou fp=minLon,minLat,maxLon,maxLat ou fp=NONE	NONE
-sd	Date de début (AAAA-MM-JJ)	Oui	-sd=20211001	-
-cd	Date centrale (événement)	Oui	-cd=20211001	-
-ed	Date de fin (AAAA-MM-JJ)	Oui	-ed=20211001	-
-mc	Couverture nuageuse maximale en pourcentage	Non	-mc=10	100
-lp	Type de produit Landsat	Oui	-lp=landsat_ot_c2_l1/landsat_ot_c2_l2/NONE	landsat_ot_c2_l1
-ll	Liste d'identifiants de scènes Landsat (6 chiffres)	Oui	-ll=198032 / -ll=198032,199031 / -ll=NONE	NONE
-sp	Type de produit Sentinel-2	Oui	-sp=S2MSI1C / S2MSI2A / NONE	S2MSI1C
-sl	Liste d'identifiants de scènes Sentinel-2 (tile)	Oui	--sl=30TYJ / --sl=30TYJ,30TYK / --sl=NONE	NONE
-so	Filtrage zones sans données (S2 uniquement)	Non	-so=0 (tout) / -so=1 (filtre zones)	1

**TABLE 2.2.** Paramètres de recherche des scènes d'images (Palomar-Vázquez et al., 2023).

- **Mode téléchargement (`sp_downloading_run.py`)** : télécharge les images sélectionnées puis exécute automatiquement l'extraction du TDC.

Paramètre	Description	Obligatoire	Exemples
-sp	Choix de la plateforme satellite : Sentinel-2 (s) ou Landsat 8/9 (l)	Oui	-sp=s (Sentinel-2), -sp=l (Landsat 8/9)

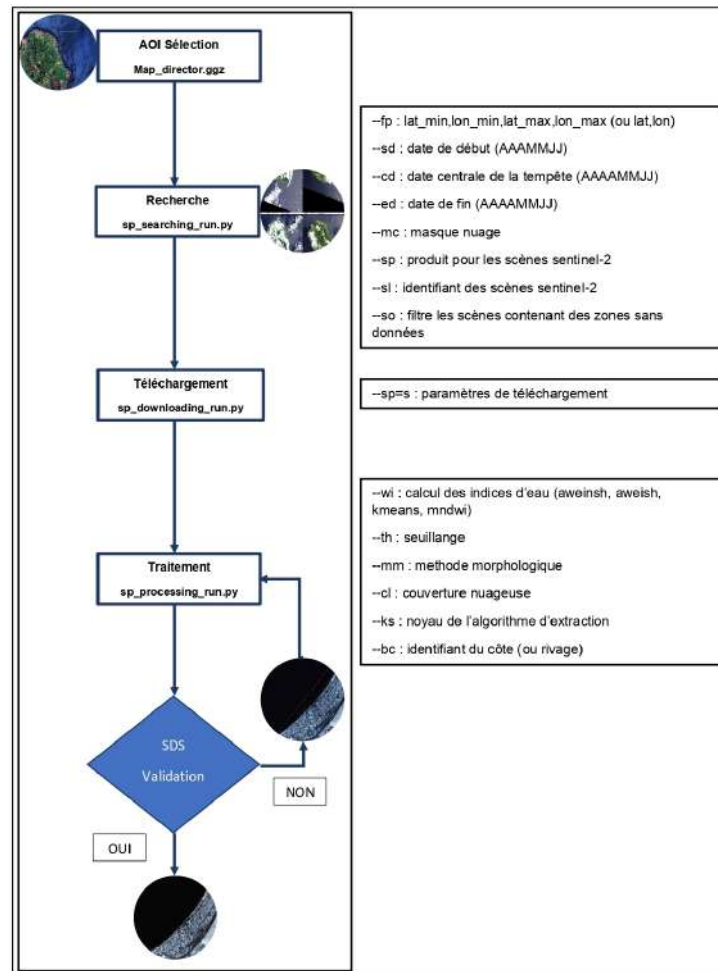
**TABLE 2.3.** Paramètres de téléchargement des scènes d'images (Palomar-Vázquez et al., 2023).

- **Mode traitement (`sp_processing_run.py`)** : utilise des images déjà téléchargées pour extraire ou retraiter le TDC (valable avec ou sans téléchargement des scènes).

Paramètre	Description	Obligatoire	Exemples d'usage	Valeur par défaut
-wi	Type d'indice d'eau (e.g. aweinsh, mndwi, ndwi)	Non	--wi=aweinsh, -wi=aweinsh	
-th	Méthode de seuillage (standard 0, Otsu bimodal 1, Otsu multimodal 2)	Non	-th=0, --th=1, -th=2	0
-mm	Méthode morphologique (érosion, dilatation) pour extraction trait de côte	Non	-mm=erosion, --mm=dilation	dilation
-cl	Niveau de sévérité masque nuages (0=faible, 1=moyen, 2=élevé)	Non	-cl=0, -cl=1, -cl=2	0
-ks	Taille du noyau (3 ou 5 pixels) pour analyse du trait de côte	Non	-ks=3, --ks=5	3
-bc	Liste de codes plages à traiter (séparés par virgule, NONE=traiter toutes)	Non	-bc=1683, -bc=1683,2485,758, -bc=NONE	NONE

**TABLE 2.4.** Paramètres de traitement des scènes d'images (Palomar-Vázquez et al., 2023).

- Récapitulatif des paramètres de fonctionnement de l'outil SAET



**FIGURE 2.4.** Fonctionnement de l'outil SAET avec de liste des paramètres pour l'extraction du TDC (Palomar-Vázquez et al., 2023).

### 2.3.2 Analyse de la dynamique littorale avec Digital Shoreline Analysis System

Une fois les traits de côte extraits automatiquement à l'aide de l'outil TDC, l'étape suivante consiste à analyser leur évolution spatiale au fil du temps. L'objectif n'est pas seulement d'obtenir ces lignes, mais surtout de quantifier les variations entre elles d'une année à l'autre, en particulier dans les secteurs où les changements sédimentaires sont les plus marqués, qu'il s'agisse d'érosion ou d'accumulation.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse des variations spatio-temporelles du trait de côte a été réalisée à l'aide de l'outil Digital Shoreline Analysis System (DSAS), développé par l'US Geological Survey. Cet outil, initialement conçu comme une extension d'ArcGIS Desktop, permet d'automatiser les calculs statistiques de déplacement du trait de côte à partir de lignes vectorielles représentant sa position à différentes époques (Thieler et al., 2008). La version 6.0, utilisée dans le cadre de ce travail, constitue la plus récente évolution du logiciel et fonctionne de manière autonome, sans dépendance à ArcGIS (Himmelstoss et al., 2024).

Le fonctionnement de DSAS repose sur la définition préalable d'une **ligne de base (base-line)**, qui sert de référence à partir de laquelle sont projetés des transects perpendiculaires. Cette

baseline peut être positionnée à terre, en mer ou entre les deux, selon les spécificités de l'étude (cf. Annexe 3.2.3). Ces transects croisent les différentes positions du trait de côte, fournissant ainsi des points de mesure précis pour calculer les changements.

Une fois les transects générés, DSAS calculera divers indicateurs statistiques (cf. Tableau 2.5) qui quantifient les taux d'évolution du trait de côte sur la période étudiée (par exemple, de 2015 à 2025). Ces résultats sont ensuite visualisés sous forme cartographique (cf. Annexe 3.2.3), facilitant l'interprétation spatiale des dynamiques littorales.

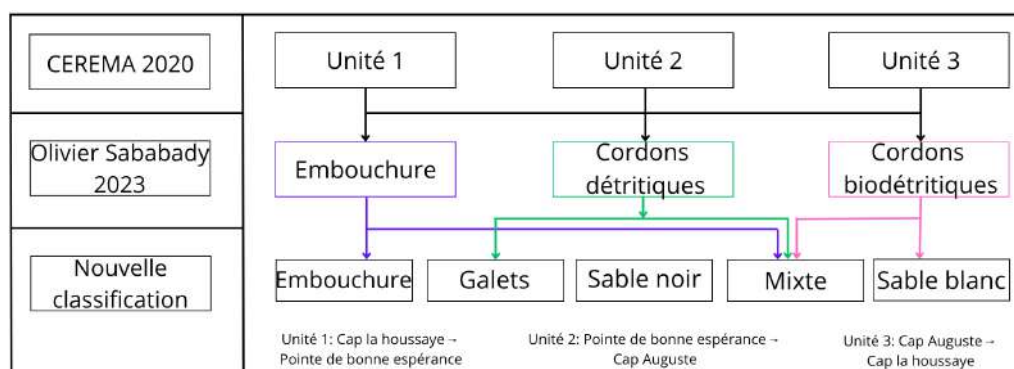
Modèles_statistiques	Valeurs	Description
Distance mesurée en m	NSM	Net Shoreline Movement (Déplacement net du trait de côte)
	SCE	Shoreline Change Envelope (Enveloppe de variation du trait de côte)
Taux mesuré en m/an	EPR	End Point Rate (Taux de variation entre dates extrêmes)
	WLR	Weighted linear Regression (Régression linéaire pondérée)
	LRR	Linear Regression Rate (Taux de variation par régression linéaire)

**TABLE 2.5.** Les modèles statistiques générées par DSAS (Himmelstoss et al., 2018, 2021)

Il est important de souligner que la qualité des résultats dépend fortement de la rigueur dans la préparation des données d'entrée, notamment la précision spatiale des traits de côte extraits avec SAET, ainsi que du choix approprié de la baseline et de l'espacement des transects. Cette méthodologie permet d'obtenir une analyse fiable, reproductible et standardisée des évolutions côtières, essentielle pour la gestion et la planification du littoral.

## 2.4 Manipulation des données

Cette section détaille le processus de traitement des images Sentinel-2, adapté à la diversité morphologique des plages réunionnaises. Le littoral est découpé en cellule hydrosédimentaire selon la classification du (CEREMA, 2020) et les travaux de Sababady, (2023), permettant d'adapter finement le traitement à chaque segment côtier (cf. figure 2.5).



**FIGURE 2.5.** Découpage en unité géomorphologique de la plage

Le traitement des images Sentinel-2 avec l'outil SAET commence par une recherche automatisée des scènes via la plateforme ESA qui sont à vérifier sur la plateforme Copernicus, qui filtre les images selon la zone géographique et la période d'intérêt et de télécharger après. Il est



important de noter que, bien que la majorité des bandes soient à une résolution de 20 mètres, la bande B<sub>8</sub> (NIR) possède une résolution native de 10 mètres ; pour assurer une homogénéité dans le traitement, cette dernière est convertie à 20 mètres.

La sélection des images exploitables repose sur un paramètre fondamental : la couverture nuageuse (mm) (*cf.* Tableau 2.2). Afin d'objectiver ce critère, une extraction statistique des taux de couverture nuageuse a été réalisée sur l'ensemble des scènes acquises, avec un classement systématique des images par tranches de 10% (0–10%, 10–20%, ... jusqu'à 100%). Cette première étape a permis de quantifier précisément la disponibilité du stock d'images pour chaque classe et chaque année. Parallèlement à cette démarche quantitative, une inspection visuelle a été conduite spécifiquement sur la frange côtière, zone centrale de l'étude, afin d'affiner la sélection (**sans ou peu de nuages, partiellement nuageux et no data**). Cette double approche, combinant agrégats de métadonnées et contrôle qualitatif, répond aux recommandations reconnues pour la pré-analyse des images Sentinel-2 et la gestion du masquage nuageux (Hagolle et al., 2015; Zhu and Woodcock, 2012; Ju and Roy, 2008).

Certaines images référencées comme «no data» absentes d'information utile sur la zone d'étude ont été systématiquement exclues, ces lacunes résultant principalement de la géométrie orbitale des satellites Sentinel-2 avec une fréquence de revisite d'environ cinq jours (Drusch et al., 2012). En outre, la présence occasionnelle de doublons pour une même date, liée à la politique de retraitement de l'ESA, a pu introduire une variabilité supplémentaire dans la qualité ou l'étendue spatiale utile des scènes. Une harmonisation a été appliquée afin de préserver l'homogénéité de la base d'images sur l'ensemble de la période. Alors, la détermination du seuil optimal de couverture nuageuse a été menée à partir des statistiques agrégées sur les taux par année et par classe. Ce choix est important : il doit permettre un équilibre entre la quantité d'images disponibles et leur qualité intrinsèque pour garantir la cohérence temporelle et la comparabilité des analyses ultérieures.

L'étape suivante consiste à segmenter l'interface terre/mer. Pour cela, SAET calcule plusieurs indices spectraux spécifiques comme NDWI (1.1), MNDWI (1.2), AWEI<sub>sh</sub> (1.3) et AWEI<sub>lnsh</sub> (1.4) appliqués sur les bandes téléchargées. Bien que la classification par la méthode K-means soit également disponible, elle s'avère moins performante lorsqu'elle est appliquée sur une seule bande, ce qui peut entraîner des erreurs. Les indices sont donc binarisés à l'aide de seuils, fixes ou adaptatifs (méthode d'Otsu), afin de distinguer clairement les pixels d'eau, de terre et ceux correspondant au niveau du TDC.

Cependant, avant d'obtenir une ligne de rivage exploitable, les pixels issus de cette classification binaire présentent souvent des irrégularités : petits groupes isolés, trous ou contours discontinus. Pour corriger ces petits défauts, SAET utilise des opérations morphologiques comme l'érosion ou la dilatation. L'érosion sert à supprimer les petits éléments isolés et à réduire les contours, tandis que la dilatation sert à agrandir les zones et à remplir les trous, ce qui lisse le trait de côte. Ce choix influence la forme finale du masque et donc la façon dont on détecte les pixels qui seront considérés comme faisant partie du trait de côte approximatif.

Une fois ces pixels choisis, ils sont vus comme des points dans l'espace. Pour mieux situer le trait de côte, SAET utilise un calcul scalaire en deux dimensions, basé sur l'analyse locale du gradient (Laplacien scalaire) de réflectance dans la bande SWIR<sub>1</sub>. Cette méthode permet de trouver la ligne d'inflexion avec une précision supérieure à la résolution des images, ce qui permet de suivre les changements du littoral (Palomar-Vázquez et al., 2023). Par ailleurs, la gestion de la couverture nuageuse est un aspect complémentaire du traitement. Trois niveaux de filtrage sont proposés : 0 pour ne pas traiter les nuages, 1 pour éliminer les nuages opaques

et leurs ombres, et 2 pour exclure différents types de nuages à diverses altitudes ainsi que leurs ombres. Ce paramètre garantit la fiabilité des résultats en fonction du degré de nettoyage souhaité.

Le traitement se concentre uniquement sur les plages définies par un masque polygonal (beach\_code) (cf. Annexe 3.2.3), ce qui permet d'analyser les zones côtières importantes (cf. figure 2.6). Ce processus s'appuie aussi sur des données supplémentaires, comme la grille des scènes Sentinel-2 et la couche polygonale des plages provenant du Copernicus Land Monitoring Service. Bien que cette couche soit initialement conçue pour les côtes européennes, on peut l'adapter à la Réunion en changeant ou en ajoutant des polygones selon les besoins spécifiques de l'étude. En résumé, l'ensemble des traitements permettant d'obtenir le trait de côte à une date donnée s'appuie sur des protocoles rigoureux, depuis l'acquisition des images Sentinel-2 jusqu'à l'extraction de la ligne de rivage. Par ailleurs, les images intermédiaires sont stockées dans un dossier temporaire nommé 'Temp' pour chaque image (cf. Annexe 3.2.3).

L'analyse diachronique du TDC repose sur une approche méthodologique articulée en deux étapes majeures : l'extraction semi-automatisée des traits de côte via l'outil SAET, puis leur traitement statistique à l'aide du logiciel Digital Shoreline Analysis System (DSAS) dans un environnement SIG. Une fois les traits de côte validés sur la période 2015–2025, l'interprétation de leur dynamique s'appuie sur trois échelles temporelles pertinentes : courte, moyenne (saisons) et interannuelle, conformément aux travaux de référence sur l'évolution côtière en milieu insulaire tropical (Luijendijk et al., 2018; Mahabot et al., 2017b).

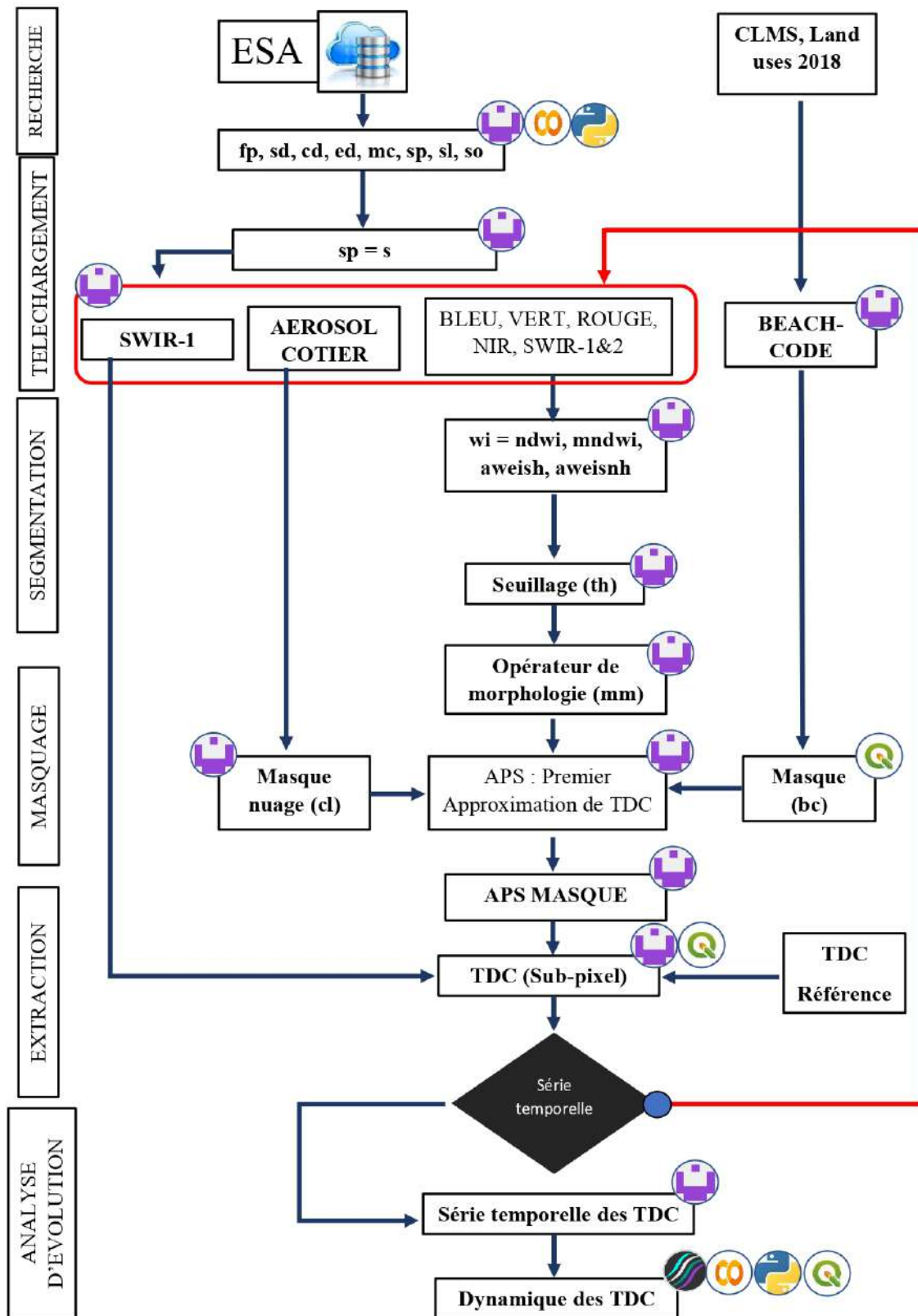
Les sites sélectionnés (Ermitage et la Saline, Baie de Saint-Paul, Saint-Denis) illustrent une diversité géomorphologique et sédimentaire significative : plages sableuses volcanique à granulométrie fine et pente faible à Saint Paul, cordons mixtes à galets au nord (Saint Paul), et à granulométrie mixte de sable blanc en contexte d'arrière récif frangeant. Ces caractéristiques influencent directement la mobilité du rivage face aux forçages marins et ont été prises en compte pour ajuster la sensibilité de détection du SAET en fonction des types de réflectance. La pente de plage et la granulométrie ont été documentées à partir de levés locaux et de la littérature (Mahabot, 2016; CEREMA, 2020), afin d'affiner l'interprétation des réponses morphodynamiques observées.

L'analyse spatio-temporelle s'appuie sur la normalisation des données dans un SIG, avec un enrichissement des attributs selon les standards DSAS (Thieler et al., 2008), permettant une traçabilité et une exploitation statistique harmonisées. Cette structuration data-driven autorise une exploration des dynamiques littorales selon plusieurs échelles temporelles complémentaires, en cohérence avec les référentiels scientifiques dans les milieux insulaires tropicaux (Luijendijk et al., 2018; Mahabot et al., 2017b).

La dynamique de la série des TDC sont analysés : (i) À **long terme**, l'EPR est privilégié pour mesurer le déplacement net global du trait de côte entre deux dates, offrant une évaluation simple et robuste des tendances d'érosion ou d'accrétion sur la période 2015-2025. (ii) À **moyen terme**, la WLR permet de quantifier les variations intra-annuelles et interannuelles, intégrant toutes les positions du trait de côte pour une estimation plus précise des vitesses et directions des changements saisonniers et annuels. (iii) À **court terme**, l'EPR détecte et quantifie des déplacements rapides dus à des événements extrêmes, tels que les houles, facilitant une analyse ciblée de la vulnérabilité littorale face à ces impacts (Himmelstoss et al., 2018, 2021, 2024).

Ces calculs ont été automatisés dans un environnement Python (notamment via les bibliothèques pandas, statsmodels, numpy pour le traitement statistique, et matplotlib pour la visualisation), en lien avec QGIS pour la géovisualisation et la production des cartes syn-

thétiques. Cette approche offre une base scientifique robuste pour interpréter les dynamiques littorales à différentes échelles, en tenant compte des caractéristiques géophysiques locales, de la variabilité météorologique et des contraintes techniques des données satellitaires. Elle s'inscrit dans la continuité des méthodes recommandées pour le suivi des zones côtières par télédétection dans les territoires tropicaux (Luijendijk et al., 2018; Pennober et al., 2021).



**FIGURE 2.6.** Schéma méthodologique du travail

## Chapitre 3

# RÉSULTATS ET DISCUSSION

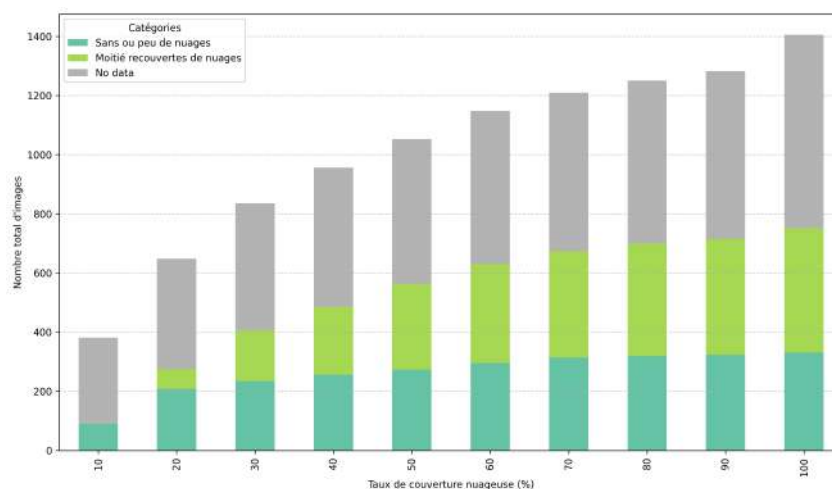
Cette section présente une analyse détaillée des résultats obtenus à partir des données satellitaires et complémentaires, en mettant en lumière les dynamiques littorales observées sur la période 2015-2025. L'objectif est d'interpréter ces évolutions dans leur contexte hydrodynamique et climatique, tout en tenant compte des événements extrêmes qui influencent fortement le trait de côte à La Réunion.

### 3.1 Extraction du Trait de côte

#### 3.1.1 Étalonnages des paramètres retenus

##### — Couverture nuageuse

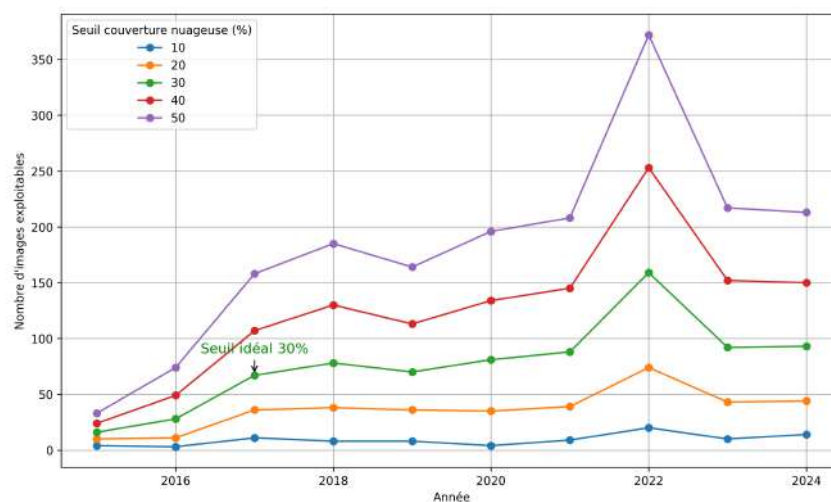
La répartition globale des images Sentinel-2 selon les tranches de couverture nuageuse montre une forte variabilité du nombre de scènes disponibles pour chaque intervalle de 10 % (cf. figure 3.1). On constate que les catégories à faible couverture nuageuse (<30 %) sont plus restreintes numériquement, tandis que les tranches supérieures à 40 % concentrent une proportion croissante d'images non exploitables ou partiellement utilisables du fait du masquage trop important.



**FIGURE 3.1.** Répartition globale des images Sentinel-2 par classes de couverture nuageuse (2015-2025)

Afin de garantir la robustesse temporelle du jeu de données analysé, l'impact du choix du seuil de couverture nuageuse a été confronté à l'évolution interannuelle du nombre d'images exploitables (*cf.* figure 3.2). L'analyse met en évidence qu'un seuil trop restrictif (10–20 %) garantit certes une qualité d'image optimale, mais diminue drastiquement la fréquence et la régularité des observations, ce qui limite la capacité de suivi multi-temporel. À l'opposé, des seuils élevés (>40 %) augmentent le nombre de scènes, mais introduisent d'importantes disparités interannuelles ainsi que des artefacts spatiaux dus à la présence persistante de nuages sur les zones littorales ciblées.

Le seuil de 30 % de couverture nuageuse s'est ainsi imposé comme un compromis optimal, combinant une couverture temporelle adéquate et une stabilité interannuelle satisfaisante, tout en préservant une qualité d'image compatible avec les exigences des analyses morphodynamiques. Ce seuil a permis de constituer une base homogène et fiable utilisée pour l'ensemble des traitements subséquents sur les traits de côte.



**FIGURE 3.2.** Nombre annuel d'images exploitables selon différents seuils de couverture nuageuse (%)

#### — Paramètres retenus

L'ajustement spécifique des paramètres selon les caractéristiques propres à chaque unité géomorphologique permet d'optimiser le traitement des données. La figure 3.3 présente l'ensemble des paramètres sélectionnés pour chaque zone, en tenant compte des spécificités locales. Afin d'illustrer concrètement cette démarche, des schémas des différentes zones d'étude sont proposés, tandis que l'Annexe 3.2.3 détaille les valeurs attribuées au paramètre *beach\_code* pour chaque site analysé. Cette approche personnalisée permet d'optimiser le traitement des données et d'assurer une cohérence méthodologique sur l'ensemble du littoral étudié.

Paramètres	Plage à Sable blanc		Plage à Galets	Plage à Sable noir		Embouchure ou delta	Plage Mixte	
	+ Récif	- Récif		+ Récif	- Récif		+ Récif	- Récif
Water Index (wi)	NDWI	AWEISH	MNDWI ou NDWI	MNDWI	AWEINSH	MNDWI	NDWI	MNDWI ou NDWI
Thersold (th)	0	0	0	0	1	0	0 or 2	0
Morphologic method (mm)	Erosion	Erosion	Erosion	Erosion	Erosion	Erosion	Erosion	Erosion
Cloud mask (cl)	2	2	2	2	2	2	2	2
Kernel size (ks)	3	5	5 or 3	3	3	3 or 5	3	3
Beach code (bc)	8192, 8194, 8195, 8196, 8197, 8198, 8199, 8200, 8201, 8202, 8203, 8204, 8205, 8206, 8207, 8208, 8209, 8210, 8211, 8215, 8216, 8217, 8221, 8222, 8233, 8234, 8280	8212, 8213, 8214, 8281	8228, 8230, 8231, 8235, 8237, 8238, 8239, 8240, 8241, 8242, 8243, 8244, 8245, 8246, 8247, 8248, 8249, 8250, 8251, 8253, 8254, 8255, 8256, 8257, 8258, 8259, 8260, 8262, 8263, 8265	2825, 8226	8224, 8267, 8271, 8272, 8277, 8278, 8279	8223, 8229, 8236, 8252, 8261, 8264, 8266, 8274, 8282	8193, 8218, 8219, 8220, 8227	8232, 8268, 8269, 8270, 8273, 8275, 8276, 8283
	Hermitage	Saint Leu	Saint Benoît	Etang Salé	Baie St Paul	Rivière de	Saint Leu	St Pierre

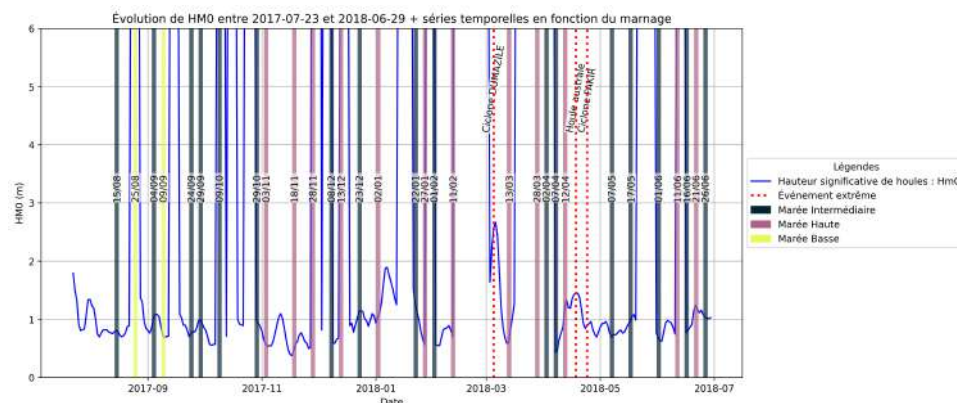
**FIGURE 3.3.** Paramètres adaptés par unité géomorphologique

### 3.1.2 Validation de TDC

#### — Couverture nuageuse

La figure 3.4 illustre l'évolution de la hauteur significative des vagues (HM0) mesurée par la bouée CANDHIS (station 97403 – Pointe des Galets) entre juillet 2017 et juin 2018 (extraits sur la période de 2015 au 2025), en parallèle des dates d'acquisition des images Sentinel-2 (barres verticales colorées), classées selon leur niveau de marée (basse, intermédiaire ou haute) à l'heure d'acquisition (10h35). Les événements extrêmes sont représentés par des barres rouges pointillées correspondant aux cyclones (Dumazile, Fakir, etc.).

On observe que certaines crêtes dans la courbe HM0 (en bleu) coïncident clairement avec ces événements extrêmes, confirmant leur impact énergétique significatif sur la façade littorale. Ces pics, parfois supérieurs à 3 ou 4 mètres, traduisent des conditions de mer particulièrement agitées susceptibles de provoquer un recul brutal du trait de côte. Toutefois, de nombreux pics mineurs ou isolés apparaissent sans correspondance apparente avec des événements identifiés, ces anomalies peuvent être dues à des dysfonctionnements de la bouée, comme souvent rapporté sur cette station (problèmes de capteurs, interruptions post-tempête, artefacts de mesure). Cette instabilité technique, bien que regrettable, est un biais connu dans les séries CANDHIS et doit être prise en compte dans l'analyse (CEREMA, 2021; IFREMER, 2023).



**FIGURE 3.4.** Intégration temporelle des conditions hydrodynamiques et des acquisitions satellitaires pour la validation des TDC.

Les barres verticales colorées indiquent les dates d'acquisition Sentinel-2 utilisées pour l'extraction du trait de côte via SAET, paramétrées selon les données de marée fournies par REFMAR (SHOM). La classification des marées en trois classes statistiques (basse, intermédiaire, haute) permet ici d'identifier dans quelles conditions hydrodynamiques chaque trait de côte a été extrait. Cette précision est essentielle, car les variations du trait de côte observées d'une image à l'autre peuvent être partiellement expliquées par l'état de la marée au moment du passage satellite, surtout sur les plages à faible pente ou dans les zones sableuses. On note que la rareté des images combinant simultanément une forte houle et une marée haute souligne l'intérêt de cette méthode croisée pour éviter les faux positifs dans la détection de dynamiques littorales.

#### — Avec les données de références



On valide les traits de côte extraits par l'outil SAET, appliqués à l'unité géomorphologique de Saint Gille, l'Ermitage, et la Saline, caractérisée par une plage à sable blanc avec récif. Cette zone est particulièrement complexe à analyser en raison de la présence de structures récifales, de reflets dans l'eau peu profonde avec la dépression d'arrière récifale, et de variations sédimentaires fines (sable, beach rock), qui compliquent l'interprétation par imagerie optique. L'approche de validation repose sur la superposition spatiale des traits de côte extraits à partir des images Sentinel-2 (2017–2023) avec des données de référence fournies par Chery (2024), issues d'images Pléiades à très haute résolution (*cf.* figure 3.5). Pour chaque année, un buffer de tolérance de 2 mètres a été appliqué de part et d'autre du trait de côte extrait, conformément aux recommandations méthodologiques de Pardo-Pascual *et al.* (2012) et Almonacid-Caballer *et al.* (2016), afin de prendre en compte les incertitudes liées à la résolution spatiale des capteurs et aux conditions de détection.

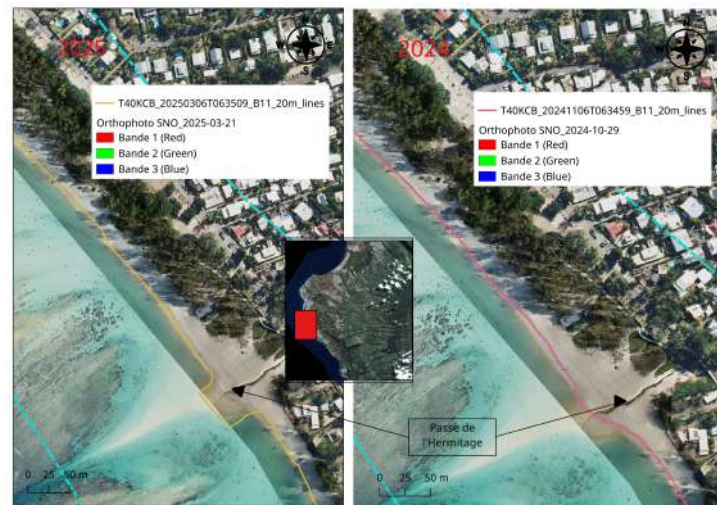
L'analyse visuelle montre que, dans la majorité des cas, les traits extraits se situent à l'intérieur de la zone tampon, indiquant une bonne concordance spatiale avec les traits de référence. Cette validation positive confirme la fiabilité des paramètres de traitement utilisés dans SAET, même dans un contexte côtier complexe. Les légers écarts observés ponctuellement peuvent être attribués à des phénomènes naturels (variabilité saisonnière, redistribution sédimentaire post-cyclonique) ou à des artefacts liés à la réflectance du substrat récifal.



**FIGURE 3.5.** Validation des positions de TDC avec des TDC de référence de Chery (2024).

La figure 3.6 présente la validation des traits de côte à partir des images Sentinel-2 du 6 mars 2025 (à gauche) et du 6 novembre 2024 (à droite), en comparaison directe avec les orthophotos haute résolution issues du SNO DynaLiT acquises respectivement les 21 mars 2025 et 29 octobre 2024. L'analyse visuelle montre une bonne concordance spatiale entre les lignes extraites et la limite terre-mer observable sur les orthophotos. Sur les deux scènes, les traits de côte générés suivent avec fidélité le front de plage observable sur les images de référence. Une anomalie localisée est cependant observable au niveau de la passe de l'Ermitage, à l'embouchure d'un petit écoulement permanent. Cette ravine active en surface mais non pérenne génère des perturbations spectrales et morphologiques localisées, affectant la détection automatique du trait de côte. Cette zone a donc été exclue de l'analyse quantitative de la dynamique côtière, conformément aux bonnes pratiques de filtrage des zones perturbées recommandées dans la littérature (Luijendijk *et al.*, 2018;

Almonacid-Caballer et al., 2016).



**FIGURE 3.6.** Validation des positions de TDC avec l'orthophoto de (Dynamit, 2025).

Il est important de souligner que la validation réussie dans une zone aussi techniquement exigeante que l'Ermitage renforce la robustesse de l'algorithme à l'échelle régionale. En effet, si l'outil parvient à extraire des traits de côte fiables dans une cellule littorale soumise à de fortes contraintes optiques et morphodynamiques, sa performance est probablement meilleure ou équivalente dans des zones plus homogènes et moins perturbées. Ce principe d'extrapolation de validation dans le cadre d'une étude insulaire est cohérent avec les approches adoptées dans plusieurs travaux sur la télédétection côtière à large échelle (Luijendijk et al., 2018; Vos et al., 2023). Il convient de rappeler que l'absence de métadonnées précises (date exacte au format JJ/MM/AAAA) pour d'autres jeux de données (Rambeaud, 2024; Ranaivoson Rapatsalahy, 2023; Sababady, 2023; Dynamit, 2025) a restreint leur usage dans la phase de validation. Cette limitation souligne l'importance d'une standardisation et documentation rigoureuse des données de référence pour les applications diachroniques en télédétection.

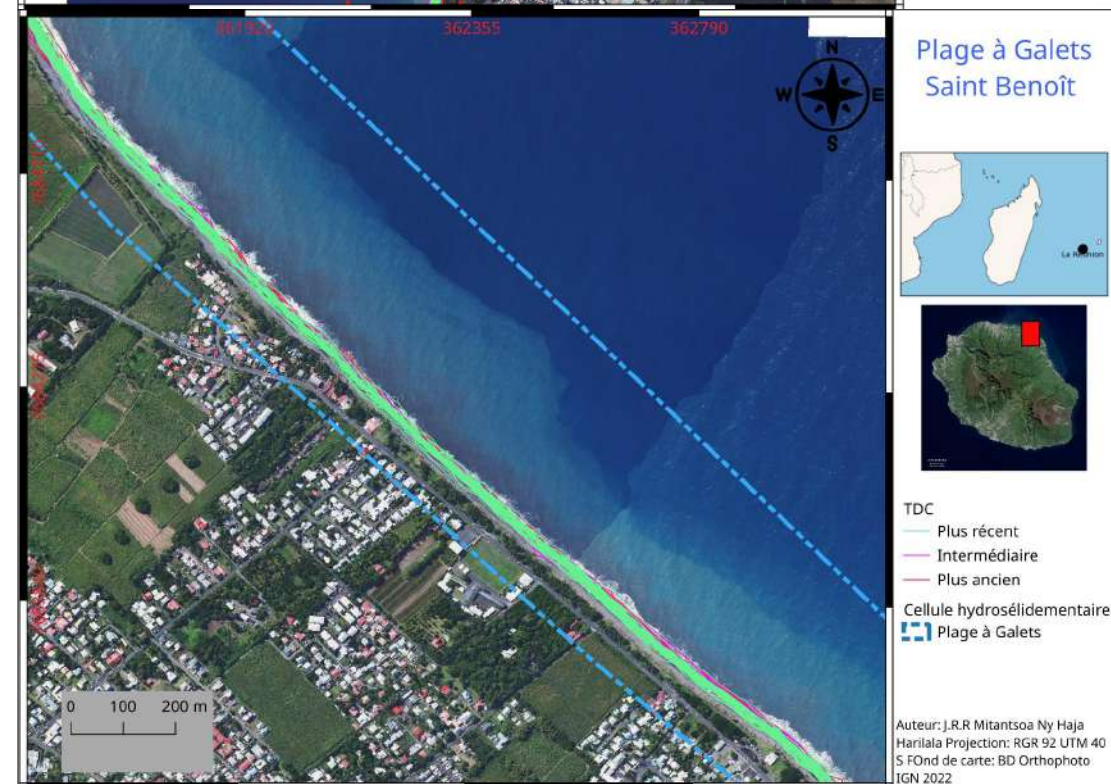
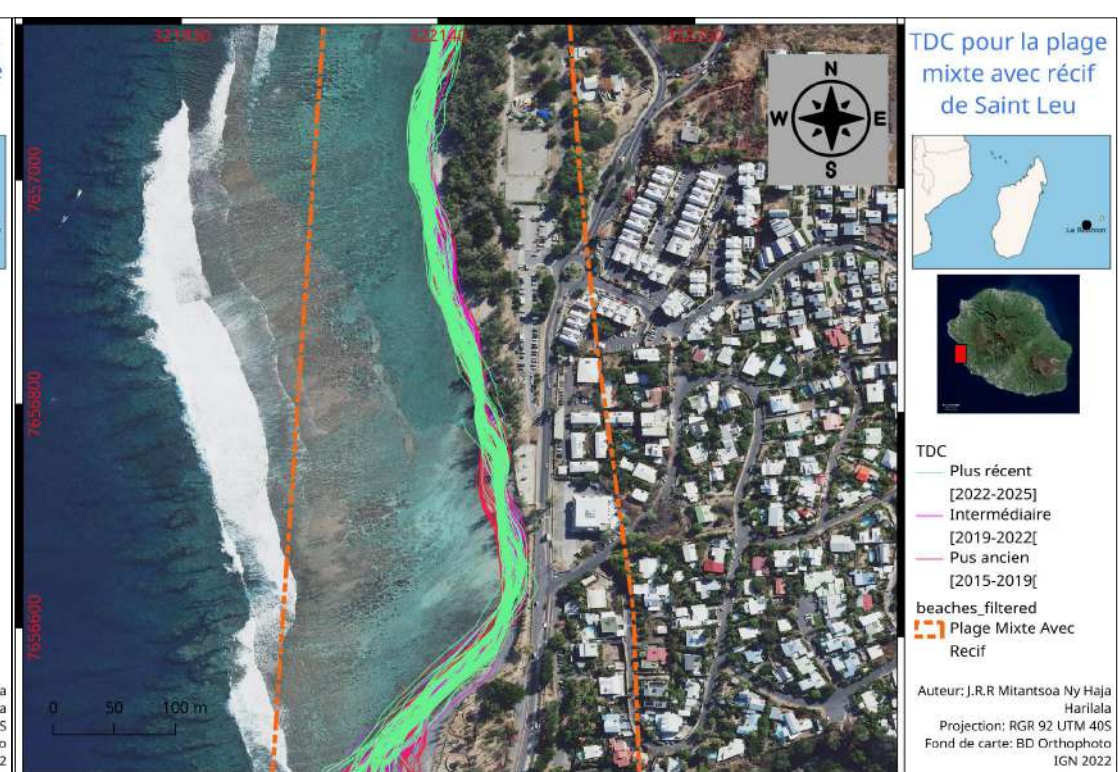
### 3.1.3 Trait de côte pour chaque unité géomorphologique

L'ensemble des traits de côte a été extrait à l'aide de l'outil SAET pour les huit types d'unités géomorphologiques identifiés sur le littoral de La Réunion (cf. figure 3.3). Cette présentation visuelle permet d'apprécier la diversité des dynamiques côtières selon les contextes géomorphologiques et la présence ou non de récifs, offrant ainsi un aperçu clair et précis des résultats obtenus. Ces extractions s'appuient sur une série temporelle d'images Sentinel-2, pré-traitées et validées grâce à une confrontation avec les données marégraphiques (REFMAR), les hauteurs significatives de houle (CANDHIS), ainsi que les référentiels cartographiques et topographiques disponibles (photographies aériennes orthorectifiées, levés DGPS). Les lignes de rivage sont comparées aux traits de côte de référence établis par Chery (2024).

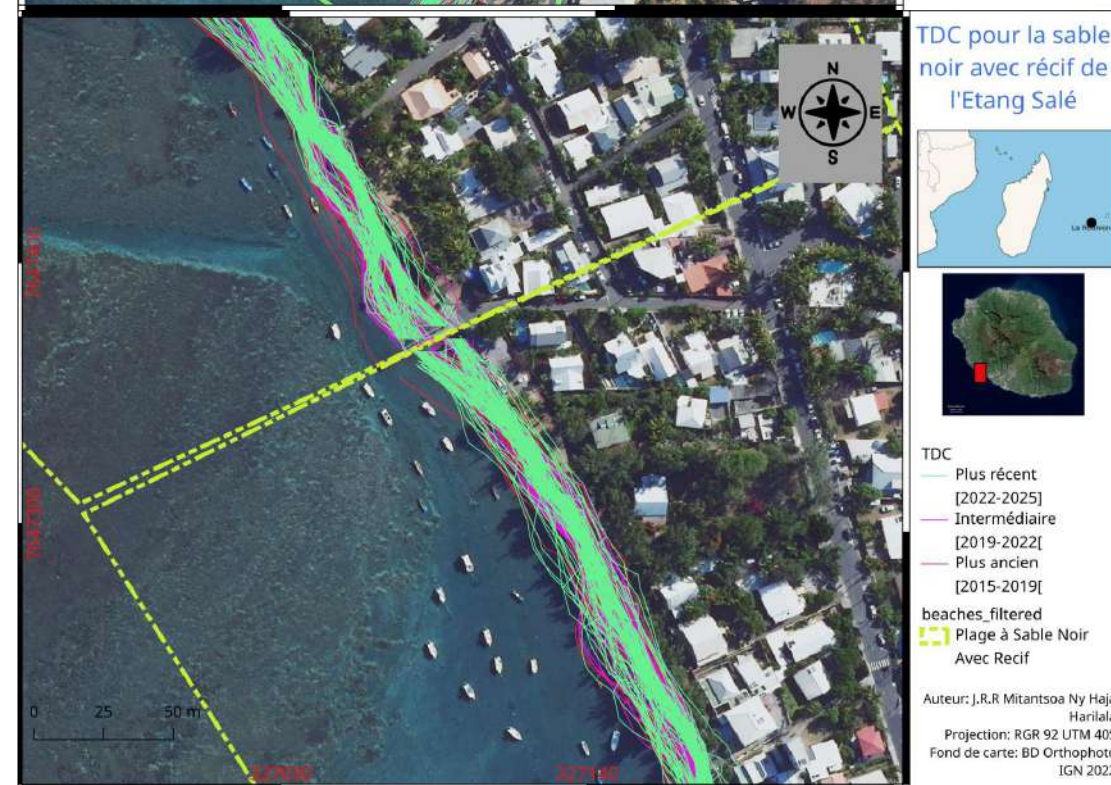
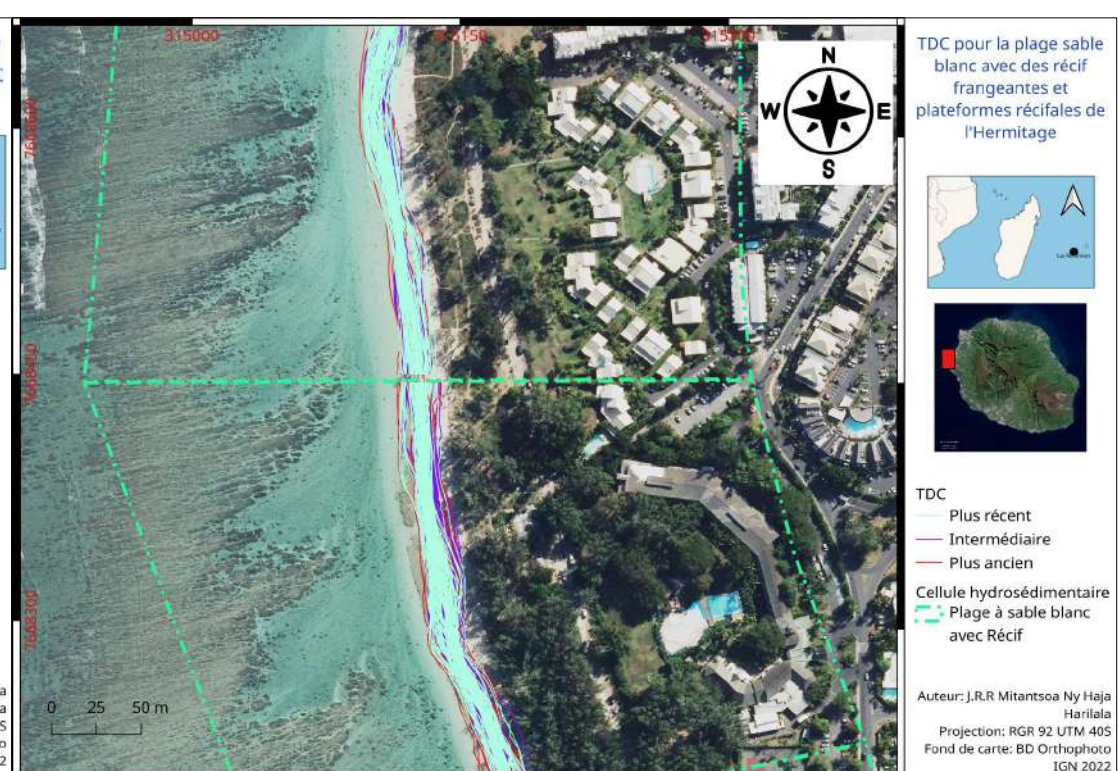
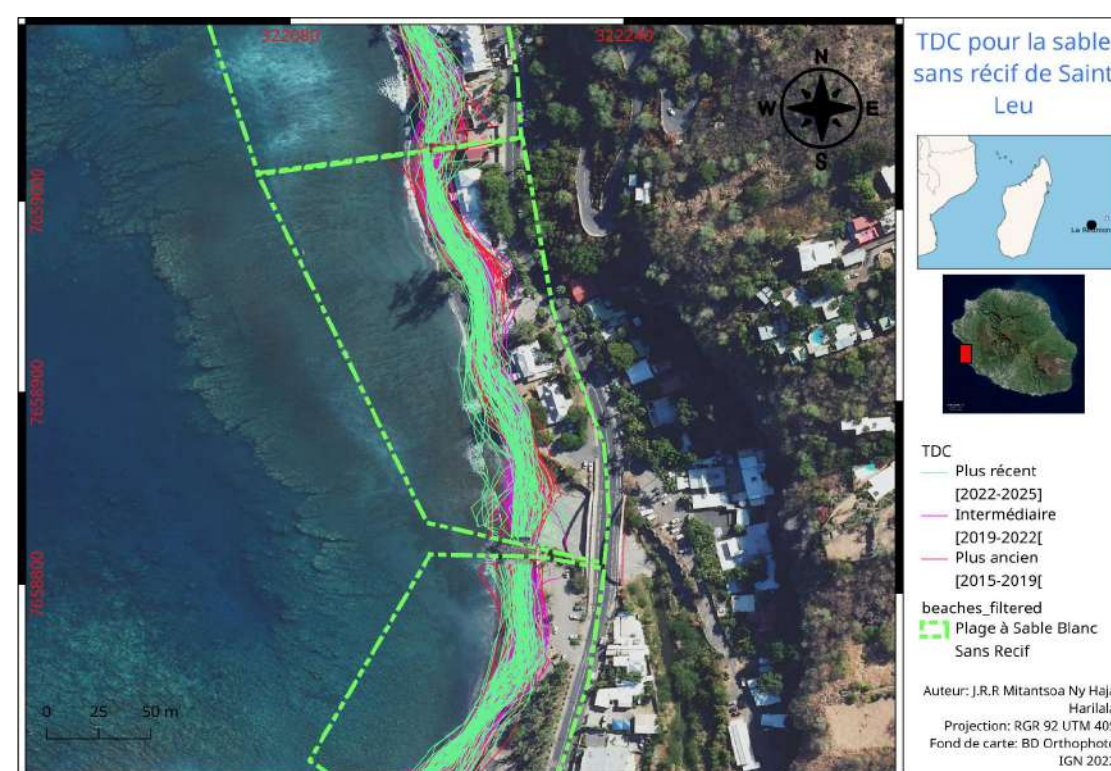
Les traits de côte représentés pour chaque cellule correspondent à trois périodes distinctes : plus ancien, intermédiaire et plus récent, ce qui permet d'apprécier visuellement l'évolution spatiale du trait de côte dans chaque contexte sédimentaire. L'exemple ci-joint de la cellule « **plage à sable blanc avec récif** » de l'Ermitage illustre bien la méthodologie retenue : les

variations latérales du TDC y sont relativement limitées, suggérant une stabilité relative dans cette zone protégée par un récif frangeant. Des déplacements plus marqués sont toutefois observables dans certains secteurs, témoignant de dynamiques localisées. Sans détailler ici l'interprétation morphodynamique propre à chaque unité, développée dans la partie validation et discussion. Cette carte témoigne de l'efficacité de la méthode automatisée pour capter les variations spatiales et temporelles du trait de côte à une échelle multi-cellulaire. Elle offre ainsi une base précieuse pour la surveillance et la gestion différenciée du littoral réunionnais selon ses spécificités sédimentaires et morphologiques.





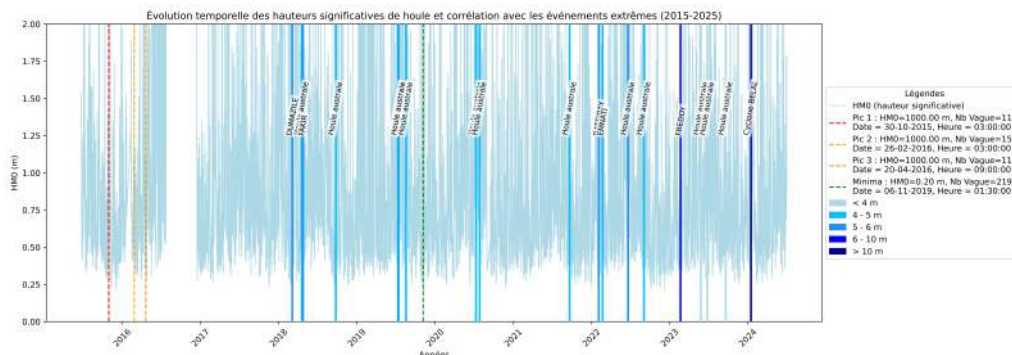






## 3.2 Dynamique de littorale

L'analyse de la dynamique littorale a été organisée selon un cadre temporel structuré en trois cycles d'étude permettant d'explorer la variabilité morphodynamique à différentes échelles. Ce cadre s'appuie sur la superposition des signaux de houle significative et des événements extrêmes majeurs recueillis entre 2015 et 2024 (cf. figure 3.7). La sélection de ces cycles repose sur une volonté d'optimiser la pertinence des données tout en s'adaptant aux contraintes liées à la disponibilité et à la qualité des séries temporelles.



**FIGURE 3.7.** Superposition des séries temporelles de houle significative et des événements extrêmes maritimes : analyse croisée et visualisation

### — Analyse à long terme (2015-2025)

Cette période décennale est appréhendée à l'échelle insulaire afin d'identifier les tendances générales d'érosion ou d'accrétion. Elle fournit un cadre global solide de l'évolution durable du littoral, sans être perturbée par les fluctuations ponctuelles.

### — Analyse à moyen terme

Elle comprend deux axes complémentaires. D'une part, une **analyse saisonnière** segmentée entre les saisons cyclonique et estivale, caractéristique du climat réunionnais et permettant de différencier les effets récurrents d'actions naturelles propres à chaque saison. Cette démarche se concentre sur les trois sites étudiés en détail. D'autre part, une **analyse interannuelle**, réalisée à partir de neuf périodes annuelles cohérentes, permet d'étudier les variations morphologiques en minimisant les biais liés aux fluctuations météorologiques et atmosphériques, via une sélection temporelle stricte. Ce traitement offre une vision robuste des mécanismes morphodynamiques sur des échelles intermédiaires, en lien avec la gestion côtière.

### — Analyse à court terme

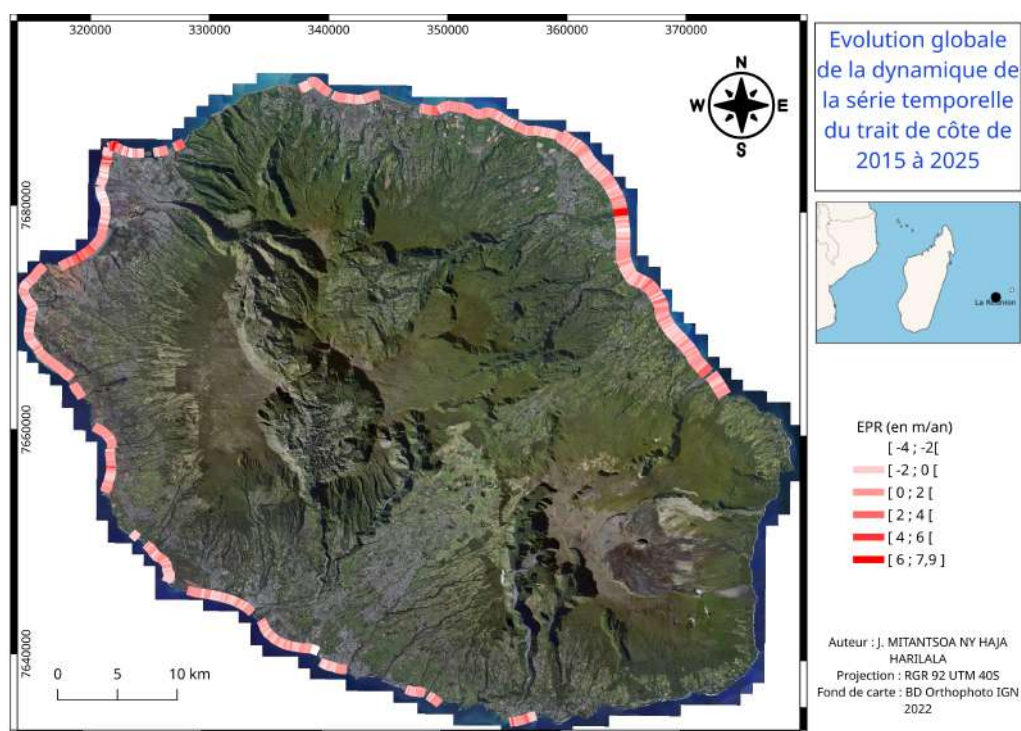
Elle cible les épisodes d'intense houle et cyclones provoquant des modifications abruptes du trait de côte. Les périodes retenues pour cette analyse couvrent notamment du **30 décembre 2017 au 1er janvier 2019** et du **1er août 2024 au 6 juillet 2025**, intégrant des événements majeurs tels que Dumazile, Fakir, la houle de 2024 et le cyclone Garance (cf. figure 3.7 et Annexe 3.2.3). Ces épisodes constituent des chocs morphodynamiques significatifs susceptibles d'impacter localement la morphologie.

Il convient toutefois d'insister sur la prudence analytique à adopter. En effet, la qualité des données de houle issues de la base CANDHIS, bien qu'essentielle pour ce type d'analyse,

présente des zones d'ombre. Certaines valeurs extrêmes détectées dans les séries peuvent relever de dysfonctionnements instrumentaux ou représenter des pics ponctuels difficiles à interpréter systématiquement (??). Par conséquent, dans les analyses moyennes et courtes, une attention critique est portée à l'utilisation de ces données afin d'éviter toute conclusion biaisée. Cette approche prudente justifie de ne pas s'appuyer exclusivement sur les données CANDHIS pour l'étude moyen terme et court terme, tout en conservant leur présentation (WMO, 2024)<sup>1</sup>.

### 3.2.1 Analyse à long terme

L'évaluation de la dynamique du trait de côte sur l'ensemble du littoral réunionnais entre 2015 et 2025, à travers l'EPR, met en évidence une grande diversité de comportements selon les sites étudiés. Aucun secteur ne présente une stabilité significative, ce qui confirme le caractère très dynamique et évolutif du littoral de l'île sur la décennie étudiée. Cette variabilité traduit la complexité des processus côtiers qui se manifestent à différentes échelles spatiales et temporelles (cf. figure 3.8 et Annexe 3.2.3).



**FIGURE 3.8.** Dynamique à long terme du trait de côte à La Réunion (2015-2025) : distribution spatiale des EPR

Parmi les secteurs du nord et du nord-ouest, notamment Saint Denis, Ermitage, La Saline, Saint Paul, La Possession, et Le Port, les tendances globales se traduisent par des bilans majoritairement positifs, avec des EPR moyens allant de 0,27 m/an à Saint Denis jusqu'à 1,44 m/an au Port. Cette évolution résulte d'une prédominance de l'accrétion, qui concerne entre 60 % et 70 % des transects, bien que des reculs ponctuels localisés apparaissent, particulièrement marqués à Saint Paul (-1,33 m/an). Ces résultats s'accordent avec les observations historiques du CEREMA (2020), qui montrent des avancées significatives sur des sites clés tels que l'embouchure

1. <https://community.wmo.int/en/activity-areas/Marine/WME>

des rivières. Ces évolutions peuvent être liées à des apports sédimentaires naturels, aux interactions hydrodynamiques spécifiques de la façade nord-ouest, et à des formes d'artificialisation protégeant certains secteurs.

Les zones situées à l'ouest et au sud-ouest, incluant Étang Salé, Saint Louis et Saint Pierre, présentent des dynamiques plus contrastées. Saint Pierre se caractérise par un recul global moyen (-0,27 m/an), tandis que d'autres sites comme Étang Salé et Saint Louis gardent une relative stabilité avec des taux proches de zéro mais accompagnés de reculs localisés malgré une proportion notable d'accrétion. Ces tendances sont en cohérence avec les données historiques du CEREMA qui soulignent une morphologie plus instable et des fluctuations marquées attribuables à la morphologie locale, à la variabilité des houles, ainsi qu'à l'impact d'usages et protections anthropiques disparates.

Sur la façade est et sud-est, les secteurs de Sainte Marie, Sainte Suzanne, Saint Benoît, Saint Joseph, Saint Leu et Sainte Gile affichent des dynamiques majoritairement favorables à l'avance littorale, avec des moyennes d'EPR élevées, jusqu'à 1,18 m/an à Saint Joseph. La prépondérance de l'accrétion sur ces sites est largement documentée dans la littérature et par le CEREMA (2020), qui y identifie des secteurs bénéficiant d'apports sédimentaires et d'une moindre exposition aux houles intenses. Néanmoins, quelques transects ponctuels indiquent des reculs modérés, mettant en lumière la complexité intrinsèque des processus côtiers selon les sous-zones et micro-environnements.

L'impact des événements extrêmes sur cette dynamique globale est notable. Entre 2015 et 2025, plusieurs épisodes marquants, tels que les cyclones, ainsi que de multiples houles australes d'intensité variable, ont provoqué localement des déplacements abrupts du trait de côte, contribuant à des reculs temporaires parfois significatifs. Ces occurrences soulignent la nécessité d'une analyse à moyen terme, intégrant la variabilité saisonnière et interannuelle, pour capter les effets transitoires mais puissants des facteurs météorologiques et océanographiques sur la morphodynamique.

Le caractère pluridimensionnel de cette étude est renforcé par la qualité et la quantité des données exploitées. L'utilisation d'une série temporelle décennale, obtenue grâce aux images Sentinel-2 à haute résolution spatiale, a permis une extraction précise et homogène des traits de côte via le SAET. Ce dispositif méthodologique garantit une consistance des mesures et une bonne représentation spatiale grâce au nombre important de transects analysés par site, limitant ainsi les effets de bruit statistique et des variations locales isolées.

Cependant, il convient de relativiser les résultats en tenant compte du niveau variable d'artificialisation du littoral réunionnais. Infrastructures telles que digues, ports, enrochements et autres aménagements influent directement sur la dynamique observée, modifiant parfois significativement les bilans naturels du trait de côte. Cette interaction complexe entre processus naturels et impacts anthropiques impose une lecture prudente et contextualisée des taux d'érosion et d'accrétion mesurés.

Par ailleurs, cette étude a avant tout une vocation méthodologique visant à démontrer la faisabilité d'une surveillance opérationnelle du trait de côte par l'intégration de données satellitaires et d'outils automatisés. À ce stade, les taux calculés doivent être considérés comme des indicateurs préliminaires, plutôt que comme des bilans définitifs de l'évolution côtière. Plusieurs axes d'amélioration restent à explorer pour affiner cet outil, notamment en augmentant la fréquence d'acquisitions pour mieux restituer la dynamique saisonnière, en intégrant des données topographiques et bathymétriques, ainsi qu'en affinant la définition des traits de côte pour réduire les incertitudes.

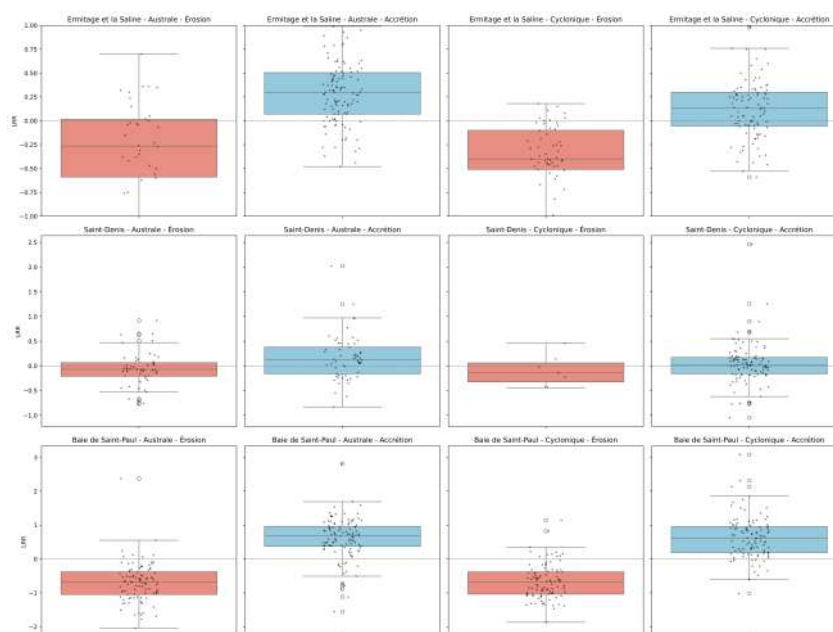


La mise en œuvre de cette approche ouvre déjà des pistes intéressantes pour une gestion adaptative du littoral, capable de répondre aux enjeux liés aux événements extrêmes et à l'évolution morphologique. La phase suivante de l'étude, centrée sur une analyse à moyenne échéance temporelle, permettra d'approfondir la compréhension des mécanismes saisonniers et interannuels qui sous-tendent cette dynamique, afin de mieux anticiper les changements futurs et renforcer la résilience des territoires côtiers.

### 3.2.2 Analyse à moyen terme

#### — Variations saisonnières

L'étude de la dynamique côtière sur la période 2015-2025 met en évidence des variations saisonnières significatives, bien que celles-ci diffèrent selon les sites étudiés. Ces résultats, obtenus par analyse statistique des taux de déplacement du trait de côte (WLR) (cf. Annexe ??).



**FIGURE 3.9.** Analyse saisonnière (Australe et Cyclonique) de la dynamique de la série des TDC (2015-2025) dans les trois, illustrant la distribution des taux d'accrétion et d'érosion.

Pour le site Ermitage et la Saline, l'accrétion moyenne est nettement plus élevée durant la saison australe comparativement à la saison cyclonique. Ce contraste est confirmé par un test statistique robuste ( $p < 0,01$ ), soulignant un effet saisonnier marqué. L'érosion, en revanche, présente des valeurs moyennes comparables entre les deux saisons, témoignant d'un équilibre dynamique relatif et d'une mécanique érosive qui ne varie pas significativement avec la saison. Cette dissociation peut s'expliquer par la domination des houles hivernales australes, favorisant des processus progressifs d'accumulation sédimentaire, contrairement à la saison cyclonique caractérisée par des événements intenses mais ponctuels, qui induisent une érosion localisée sans affecter la moyenne saisonnière significativement.

Au niveau de Saint-Denis, les différences saisonnières sont plus ténues. Les tendances à

l'accrétion et à l'érosion varient peu entre australe et cyclonique, et les tests statistiques ne révèlent pas de différences significatives. Ceci suggère une dynamique côtière plus stable, avec une variabilité interannuelle pouvant masquer des effets saisonniers ponctuels.

Pour la Baie de Saint-Paul, les taux moyens d'accrétion et d'érosion sont plus élevés que dans les autres sites, indiquant un littoral actif soumis à des processus énergétiques plus intenses. Cependant, cette intensité ne se traduit pas par des variations saisonnières marquées, renforçant l'idée d'une influence combinée et quasi permanente des forçages cycloniques et australs sur ces secteurs.

Globalement, cette analyse moyenne montre que les effets saisonniers sur la dynamique du trait de côte sont localement spécifiques : ils sont clairement perceptibles pour l'accrétion à l'Ermitage, tandis que d'autres secteurs côtiers sont moins sensibles aux saisons, voire dominés par des fluctuations interannuelles et des événements climatiques extrêmes. Ces résultats soulignent la nécessité d'une prise en compte contextuelle des phénomènes naturels, notamment la fréquence et l'intensité des houles australes et cyclones, dans la gestion côtière.

Il convient de préciser que cette analyse saisonnière moyenne terme constitue une étape importante mais nécessite d'être complétée par une étude interannuelle plus approfondie. Une telle analyse intégrant la variabilité temporelle fine permettra de mieux saisir la complexité des réponses du trait de côte aux forçages climatiques et environnementaux, et d'affiner les prévisions pour la gestion durable des littoraux.

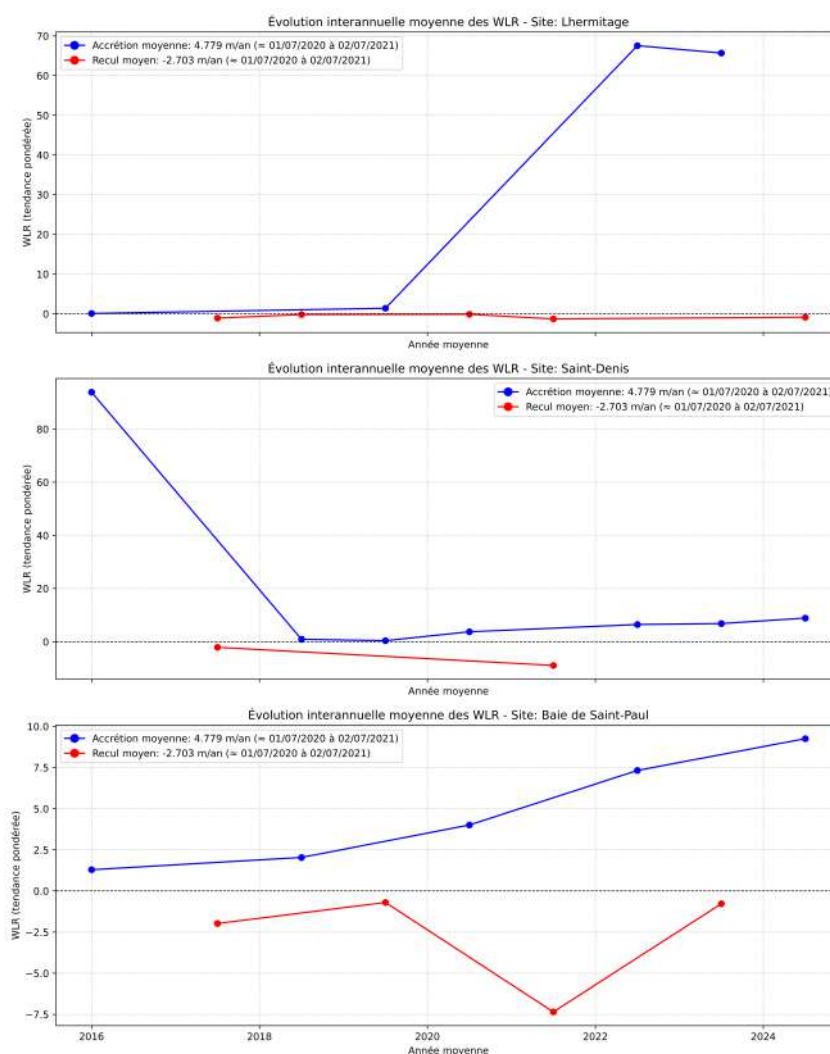
#### — Evolution interannuelle

Après avoir approfondi l'étude du trait de côte à moyen terme sur une échelle saisonnière, nous nous sommes intéressés à une temporalité plus étendue via une analyse interannuelle couvrant neuf périodes successives de juin 2015 à juin 2025. Cette approche élargie permet d'appréhender les dynamiques littorales dans leur évolution globale, en distinguant les phases répétées d'accrétion et de recul qui façonnent la morphologie côtière au cours des années.

Les statistiques calculées, synthétisées dans le Tableau 3.1, apportent des éléments quantitatifs solides pour comprendre la variabilité spatiale et temporelle observée sur chacun des trois sites étudiés. Ces données sont illustrées dans la figure 3.10, qui visualise les tendances annuelles des taux pondérés de régression linéaire (WLR), reflet fiable des évolutions du trait de côte.

**TABLE 3.1.** Statistiques interannuelles de WLR par site et période

Site	Période	Nombre points	Moyenne WLR	Médiane WLR	Écart-type WLR	WLR min	WLR max	Prop. accréction	Prop. recul	Moyenne accréction	Moyenne recul	Année moyenne
Baie de Saint-Paul	1	201.000	1.288	1.730	6.448	-15.420	20.130	0.582	0.418	5.652	-4.790	26/06/2015 à 28/06/2017
Baie de Saint-Paul	2	200.000	-1.980	-2.995	8.242	-24.010	22.780	0.355	0.645	7.066	-6.960	28/06/2017 à 29/06/2018
Baie de Saint-Paul	3	202.000	2.033	2.895	7.340	-22.930	21.340	0.634	0.366	6.463	-5.631	29/06/2018 à 30/06/2019
Baie de Saint-Paul	4	202.000	-0.702	0.005	7.166	-44.130	15.010	0.500	0.500	3.844	-5.248	30/06/2019 à 01/07/2020
Baie de Saint-Paul	5	200.000	4.006	3.875	7.737	-16.560	28.230	0.730	0.270	7.455	-5.319	01/07/2020 à 02/07/2021
Baie de Saint-Paul	6	199.000	-7.351	-10.500	13.813	-34.270	41.240	0.271	0.724	11.032	-14.296	02/07/2021 à 03/07/2022
Baie de Saint-Paul	7	201.000	7.319	7.150	8.941	-20.260	35.050	0.816	0.184	10.186	-5.390	03/07/2022 à 04/07/2023
Baie de Saint-Paul	8	200.000	-0.778	-1.205	8.527	-18.550	30.310	0.440	0.560	6.261	-6.308	04/07/2023 à 05/07/2024
Baie de Saint-Paul	9	200.000	9.252	6.500	10.497	-11.170	45.130	0.830	0.170	11.816	-3.271	05/07/2024 à 06/07/2025
Ermitage et la Saline	1	151.000	0.042	0.120	2.423	-8.280	5.820	0.517	0.477	1.853	-1.920	26/06/2015 à 28/06/2017
Ermitage et la Saline	2	151.000	-1.113	-0.760	3.225	-10.640	16.580	0.338	0.662	1.915	-2.658	28/06/2017 à 29/06/2018
Ermitage et la Saline	3	151.000	-0.237	0.110	2.041	-8.750	4.940	0.530	0.457	1.160	-1.863	29/06/2018 à 30/06/2019
Ermitage et la Saline	4	151.000	1.361	0.810	3.719	-8.530	12.610	0.616	0.384	3.555	-2.158	30/06/2019 à 01/07/2020
Ermitage et la Saline	5	151.000	-0.175	0.280	4.605	-14.160	10.960	0.530	0.464	3.096	-3.916	01/07/2020 à 02/07/2021
Ermitage et la Saline	6	151.000	-1.326	-1.260	5.902	-15.650	19.860	0.444	0.556	4.011	-5.584	02/07/2021 à 03/07/2022
Ermitage et la Saline	7	153.000	67.534	2.100	808.285	-9.910	9.999.990	0.673	0.314	101.407	-2.338	03/07/2022 à 04/07/2023
Ermitage et la Saline	8	152.000	65.675	-0.095	811.122	-7.620	9.999.990	0.487	0.513	137.396	-2.369	04/07/2023 à 05/07/2024
Ermitage et la Saline	9	153.000	-0.907	-1.610	4.759	-16.940	13.000	0.392	0.608	3.876	-3.993	05/07/2024 à 06/07/2025
Saint-Denis	1	107.000	93.887	0.770	966.698	-7.890	9.999.990	0.589	0.393	161.037	-2.367	26/06/2015 à 28/06/2017
Saint-Denis	2	107.000	-2.171	-1.040	5.743	-29.570	14.320	0.346	0.654	2.669	-4.730	28/06/2017 à 29/06/2018
Saint-Denis	3	107.000	0.871	1.200	6.065	-47.520	15.470	0.664	0.336	3.223	-3.766	29/06/2018 à 30/06/2019
Saint-Denis	4	107.000	0.344	-0.190	3.083	-5.500	12.170	0.449	0.551	2.669	-1.548	30/06/2019 à 01/07/2020
Saint-Denis	5	107.000	3.679	3.210	5.611	-21.370	30.220	0.869	0.131	4.861	-4.171	01/07/2020 à 02/07/2021
Saint-Denis	6	107.000	-8.975	-9.010	8.466	-27.210	40.730	0.056	0.944	13.242	-10.295	02/07/2021 à 03/07/2022
Saint-Denis	7	107.000	6.423	5.410	4.435	-1.370	30.360	0.981	0.019	6.564	-1.000	03/07/2022 à 04/07/2023
Saint-Denis	8	108.000	6.779	6.400	6.964	-4.860	35.770	0.843	0.157	8.312	-1.424	04/07/2023 à 05/07/2024
Saint-Denis	9	108.000	8.829	7.765	6.361	-1.470	44.600	0.972	0.028	9.111	-1.067	05/07/2024 à 06/07/2025



**FIGURE 3.10.** Tendances interannuelles de la série des TDC par site et période entre 2015 et 2025

À la Baie de Saint-Paul, les résultats mettent en évidence une dynamique fortement

fluctuante. En effet, les moyennes des WLR oscillent entre des phases d'accumulation modérée et des épisodes de recul prononcé, témoignant d'une interaction complexe des processus littoraux. Cette alternance traduit les effets conjoints des variations hydrodynamiques et des événements climatiques ponctuels, avec une proportion d'accrétion généralement majoritaire mais accompagnée de prolongés épisodes d'érosion. L'amplitude élevée des écarts-types et l'importance des valeurs extrêmes rappellent que cette zone subit des changements localisés parfois intenses, qui doivent être pris en compte dans toute gestion côtière effective.

Le site de Ermitage présente une physionomie plus calme, avec des valeurs moyennes de WLR proches de zéro, traduisant une stabilité relative du trait de côte sur la période. Pourtant, quelques pics d'accumulation rapide ponctuent cette stabilité, suggérant des influences locales ou des anomalies ponctuelles qu'il conviendrait d'explorer plus avant. La répartition équilibrée entre accrétion et recul conforte l'idée d'un système dynamique mais contrôlé, possiblement modéré par des facteurs géomorphologiques propres au site.

Le site de Saint-Denis reflète une situation intermédiaire, affichant à la fois des phases d'accumulation marquées et des pics d'érosion significatifs. La diversité des comportements observés, traduite notamment par des écarts-types très élevés, souligne la forte hétérogénéité des processus d'érosion et de sédimentation. Ces données montrent que le site est sensible à divers facteurs environnementaux, pouvant engendrer tantôt une croissance rapide du trait de côte, tantôt un recul accéléré.

La transition entre l'analyse saisonnière et interannuelle est essentielle. Alors que la première met en lumière les variations ponctuelles et la rapidité des changements à court et moyen terme, cette analyse interannuelle éclaire les tendances dominantes qui se dégagent sur plusieurs années. Elle intègre ainsi des phénomènes cumulés et des cycles naturels plus longs, offrant un cadre robuste pour la gestion et la prévision. Cette analyse interannuelle constitue par ailleurs un préalable indispensable pour passer à des évaluations encore plus fines portant sur le court terme, où seront considérées spécifiquement les influences des houles significatives et événements extrêmes sur le trait de côte. Ces prochaines études permettront de compléter la compréhension dynamique des systèmes côtiers en prenant en compte la variabilité rapide et les impacts directs des conditions météorologiques et océaniques.

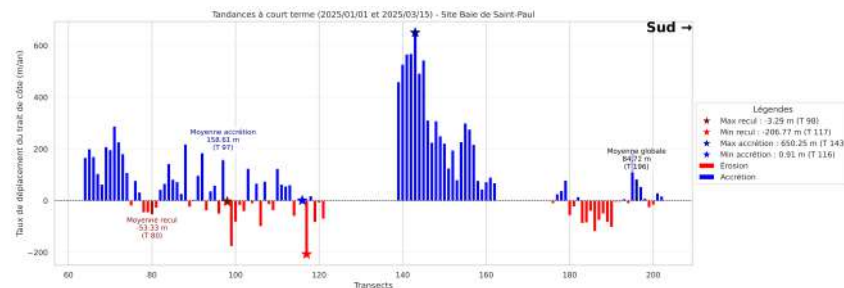
Les résultats présentés soulignent la nécessité d'une approche dynamique et multi-échelle dans l'étude et la gestion du trait de côte. La prise en compte des variations interannuelles enrichit la connaissance des mécanismes à l'œuvre et guide l'anticipation des évolutions futures, en cohérence avec les analyses saisonnières réalisées précédemment et les études à venir à court terme.

### **3.2.3 Analyse à court terme : impact d'un épisode des houles**

L'analyse à court terme, centrée sur l'impact du cyclone Garance entre le 01/01/2025 et le 15/03/2025 (28/02/2025), met en lumière des dynamiques côtières rapides et contrastées sur plusieurs sites de l'Île. Les indicateurs utilisés, notamment l'EPR exprimant une vitesse moyenne annualisée de recul ou d'accrétion, traduisent la réponse directe et ponctuelle du trait de côte à cet événement extrême.

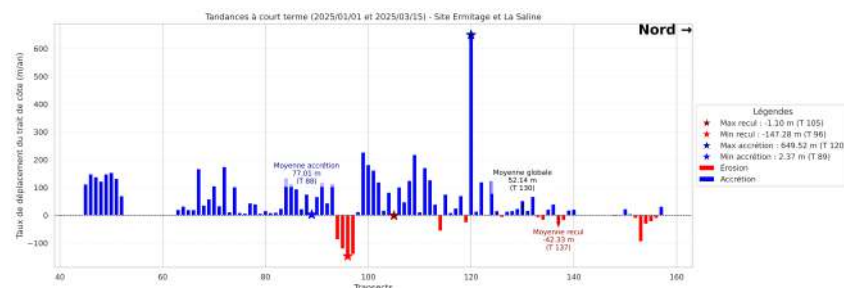
Sur la Baie de Saint-Paul (*cf.* figure 3.11), les données révèlent une forte dynamique d'accré-

tion affectant 65,1 % des transects avec une moyenne d'EPR atteignant 158,6 m/an, tandis que 34,9 % des tronçons sont en recul avec un taux moyen de -53,3 m/an. Cette asymétrie vers l'accrétion traduit l'apport sédimentaire probable induit par la houle cyclonique et la configuration locale favorisant l'accumulation de sédiments. Néanmoins, la part importante de recul souligne la nature hétérogène des impacts, qui peuvent s'expliquer par les variations d'orientation des plages et leur exposition aux vents et houles dominants.



**FIGURE 3.11.** Évolution à court terme du trait de côte dans la Baie de Saint-Paul suite au cyclone Garance (01/01/2025 - 15/03/2025)

Dans le secteur de l'Ermitage et la Saline (*cf.* figure 3.12), une tendance similaire est observée avec 79,2 % des transects en accrétion (moyenne de 77,0 m/an) contre 20,8 % en recul (-42,3 m/an). Les valeurs d'EPR plus modérées par rapport à Saint-Paul indiquent une réponse dynamique mais moins intense, probablement liée à des conditions morphologiques plus stabilisantes ou à des effets de topographie locale modulant les apports et pertes sédimentaires.

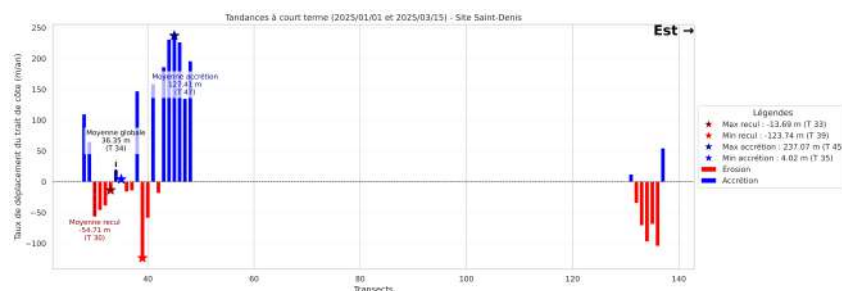


**FIGURE 3.12.** Évolution à court terme du trait de côte dans la Baie de Saint-Paul suite au cyclone Garance (01/01/2025 - 15/03/2025)

L'étude du site de Saint-Denis (*cf.* figure 3.13) présente une dynamique plus équilibrée, avec la moitié des transects en recul (-54,7 m/an) et l'autre moitié en accrétion (127,4 m/an). La médiane globale négative (-4,8 m/an) suggère une légère tendance au recul net du trait de côte. Il convient toutefois de noter que l'outil Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET) rencontre des difficultés spécifiques sur ce site en raison de la présence dominante de galets dans les plages au lieu de sable. Cette particularité sédimentaire engendre des artefacts dans l'extraction des traits de côte qui peuvent biaiser la représentation des dynamiques observées.

La zone ouest de Saint-Denis, entre la cimétière et l'embouchure de la rivière, fait l'objet d'une dynamique complexe. Les secteurs proches des embouchures montrent une tendance à l'accrétion, cohérente avec l'apport sédimentaire fluvial classique. En revanche, les zones riches en galets affichent un recul du trait de côte, contredisant la direction attendue des dérives littorales. Cette observation souligne la nécessité d'intégrer la nature des sédiments comme

facteur clé d'interprétation et illustre les limites des méthodes automatisées dans des contextes sédimentaires atypiques.



**FIGURE 3.13.** Variations rapides du trait de côte au site de Saint-Denis lors de l'événement cyclonique Garance (entre 01/01/2025 et 15/03/2025)

L'analyse révèle que l'impact du cyclone Garance se manifeste par une forte variabilité spatiale et temporelle des taux d'érosion et d'accrétion. L'EPR, ajusté en taux annuel pour correspondre à la courte période entre les deux dates du suivi, permet de quantifier les déplacements relatifs du trait de côte, même si la période courte amplifie la variabilité des valeurs.

Le contexte morphologique local, notamment l'orientation des côtes, joue un rôle fondamental. Les secteurs protégés ou orientés différemment subissent une moindre érosion, voire de l'accrétion, tandis que les zones exposées montrent souvent un recul prononcé. Les caractéristiques sédimentaires (sable fin versus galets) interviennent également en modifiant la réponse aux actions hydrodynamiques de la houle et des courants.

Par ailleurs, les embouchures (Rivière de Galets, Rivière de Saint Denis, Rivière de Pluie) agissent comme points d'apport sédimentaire renforçant localement l'accrétion. Ces zones dynamiques sont sujettes à des variations rapides et peuvent expliquer la coexistence de tendances opposées à proximité.

La forte dispersion des valeurs (écarts-types élevés) (*cf.* Tableau 3.2) dans toutes les zones étudiées reflète la nature hétérogène des impacts cycloniques, avec des secteurs subissant d'importantes modifications morphologiques tandis que d'autres restent relativement stables. Cette dissymétrie souligne l'intérêt de l'approche transect par transect pour comprendre la complexité des processus côtiers à court terme.

**TABLE 3.2.** Écarts-types de recul et d'accrétion selon les sites d'étude

Site	Écart-type global (m/an)	Écart-type recul (m/an)	Écart-type accrétion (m/an)
Baie de Saint-Paul	162,514	45,652	154,154
Ermitage et La Saline	95,105	48,340	88,647
Saint-Denis	112,293	35,447	84,096

## CONCLUSION

Ce travail a permis d'aborder de manière concrète et scientifique la problématique centrale de la validation et de la fiabilisation d'une série temporelle de traits de côte extraits automatiquement par l'outil SAET, dans le contexte complexe et varié du littoral réunionnais. L'objectif était de démontrer la capacité de la télédétection satellitaire à haute fréquence, notamment via les images Sentinel-2, à fournir une cartographie automatique du trait de côte suffisante pour analyser finement la dynamique côtière insulaire, tout en garantissant une robustesse et une pertinence des données extraites.

Les résultats obtenus confirment que SAET, couplé à une méthodologie rigoureuse de traitement et de sélection des images, est un outil performant pour l'extraction automatique du TDC à une résolution spatiale adaptée (20 m), même dans des environnements géomorphologiques hétérogènes comprenant plages sableuses, récifs coralliens, secteurs rocheux (galets) et zones anthropisées. La phase de calibration fine des paramètres selon les cellules géomorphologiques spécifiques s'est avérée importante pour atteindre une précision satisfaisante et adapter la méthode aux particularités locales de chaque segment côtier. Cette personnalisation a permis d'améliorer la qualité des extraits, limitant les erreurs liées aux variations de végétation littorale, la turbidité variable des eaux ou la couverture nuageuse.

La validation spatiale des traits de côte extraits a été menée par superposition avec des données de référence issues d'orthophotos haute résolution (SNO DynaLiT), et de Chery, (2024) issues d'images Pléiades. Cette validation a démontré une bonne concordance spatiale des lignes extraites, avec une marge de tolérance compatible avec la résolution des capteurs et la variabilité naturelle du littoral. Elle a conforté la pertinence de la série temporelle déduite, qui peut être considérée comme fiable pour des études diachroniques à moyen et long terme. Par ailleurs, l'intégration des données marégraphiques (SHOM) et de houle (CANDHIS) dans le processus analytique a permis d'affiner l'interprétation des variations, distinguant ainsi des évolutions morphologiques durables des fluctuations ponctuelles liées aux états de marée ou aux épisodes de forte houle, éléments essentiels pour garantir la robustesse des résultats.

L'analyse dynamique sur la décennie 2015-2025 a révélé la grande diversité des comportements littoraux à La Réunion, avec des zones majoritairement en accrétion (notamment sur la façade nord-ouest) et d'autres présentant un recul global, témoignant d'interactions complexes entre processus naturels et impacts anthropiques. À l'échelle saisonnière et interannuelle, des variations significatives ont été observées, en lien avec la saisonnalité des houles australes et des cyclones tropicaux, illustrant la nécessité d'une surveillance multi-échelle. Enfin, l'étude à court terme des épisodes extrêmes, notamment le cyclone Garance début 2025, a mis en exergue des modifications brutales et localisées du trait de côte, soulignant l'importance d'une telle série temporelle pour suivre la vulnérabilité côtière aux événements météorologiques extrêmes.

Cependant, cette étude souligne aussi certaines limites et pistes d'amélioration. La gestion de la couverture nuageuse reste un défi, notamment durant les saisons humides, période cruciale

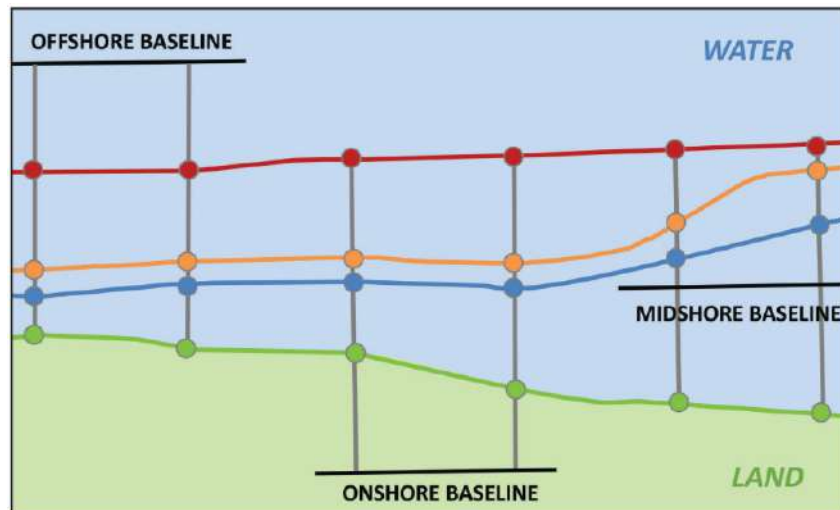
pour l'observation des impacts cycloniques. L'intégration de données complémentaires, telles que les orthophotos haute résolution régulières, des données bathymétriques, ou des images satellitaires haute résolution (d'absence de nuage), pourrait améliorer la précision et la continuité des suivis. De plus, le traitement automatique rencontre des difficultés dans des contextes sédimentaires atypiques (plages à galets, zones à végétation dense) où les indices spectraux classiques ont une fiabilité réduite, nécessitant le développement d'algorithmes adaptés ou hybrides combinant apprentissage machine et connaissances géomorphologiques. Enfin, la prise en compte des effets anthropiques, à travers l'intégration de bases de données d'aménagements côtiers et d'activités humaines, contribuerait à mieux comprendre et modéliser la dynamique littorale dans ses composantes naturelles et induites.

En termes de perspectives, la constitution d'une base continue et actualisée de séries temporelles du trait de côte, associée à des modèles prédictifs intégrant la variabilité hydrodynamique et climatique, permettra une surveillance opérationnelle plus fine et réactive, essentielle face au changement climatique et à la montée du niveau marin. L'outil SAET peut être déployé pour un suivi régulier facilitant la gestion durable des infrastructures et la prévention des risques côtiers à La Réunion, mais aussi transféré à d'autres zones tropicales présentant des caractéristiques similaires. L'association des données satellitaires avec des campagnes de terrain ciblées renforcerait par ailleurs la validation et la calibration des paramètres, améliorant la confiance des acteurs locaux dans l'usage de ces outils.

Bref, ce travail montre que la cartographie automatisée du trait de côte à La Réunion par l'outil SAET, combinée à la télédétection Sentinel-2, constitue une approche innovante, fiable et adaptable pour étudier et suivre les dynamiques côtières insulaires. La problématique de validation des séries temporelles est ici résolue par un protocole rigoureux croisant données satellitaires, données de terrain et indicateurs océanographiques, garantissant ainsi la qualité et l'utilité des résultats pour la recherche scientifique et la gestion côtière. Cette méthode ouvre la voie à un suivi pérenne et précis des interfaces terre-mer, indispensable pour anticiper les évolutions du littoral dans un contexte environnemental et anthropique en profonde mutation.



## Dynamique des publications sur la télédétection appliquée à la détection du trait de côte (Luijendijk et al., 2018)



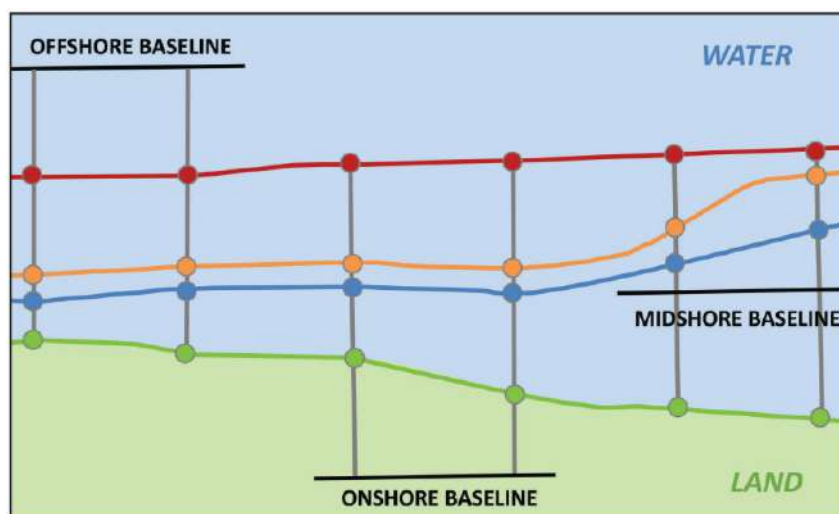
**FIGURE 14.** a) Nombre de publications et de citations par année pour les articles incluant les mots-clés « satellite » et « ligne de rivage ». Ces données ont été extraites de la base Web of Science via la requête suivante : TI = (« satellite\* » ET « shoreline\* ») OU AB = (« satellite\* » ET « shoreline\* ») OU AK = (« satellite\* » ET « shoreline\* »), où TI désigne le titre, AB le résumé, et AK les mots-clés auteurs. b) Méthodes actuelles pour la cartographie automatique des lignes de rivage sur des images optiques, classées en deux catégories : « résolution au pixel » et « résolution sous-pixel ». Cette figure est adaptée de Vitousek et *al.*, (2023). Les références indiquées en gras sont celles évaluées dans la présente étude.

**TABLE 3.** Caractéristiques des événements de forte houle (Belon et al., 2024)

Date	Hauteur significative (m)	Période (s)	Direction	Événement
05/03/2018	5.0	12	NO	Dumazile
18/04/2018	4.8	18	SSO	Houle australe
24/04/2018	5.0	10	NNO	Fakir
24/09/2018	4.0	17	SO	Houle australe
12/07/2019	5.3	15	SSO	Houle australe
15/07/2019	4.5	15	SSO	Houle australe
18/08/2019	4.5–5.0	16	SSO	Houle australe
10/07/2020	4.8	9	SSO	Houle australe
27/07/2020	4.5	8	SSO	Houle australe
20/09/2021	4.0	10	SSO	Houle australe
03/02/2022	5.5	8	NE	Batsirai
21/02/2022	4.9	8	NNE	Emnati
20/06/2022	5.6	12	SSO	Houle australe
02/09/2022	4.2	10	SSO	Houle australe
20/02/2023	6.1	9	NE	Freddy
26/05/2023	3.41	10	SSO	Houle australe
25/06/2023	3.38	8	SSO	Houle australe
19/09/2023	3.47	14	SO	Houle australe
15/01/2024	11.6	–	–	Belal
24/08/2024	12.0	–	SSO	Houle australe
28/02/2025	10.0	–	–	Garance
25/05/2025	5.0	–	SSO	Houle australe
06/06/2025	3.5	–	SO	Houle australe

## Caractéristiques des événements de forte (Belon et al., 2024)

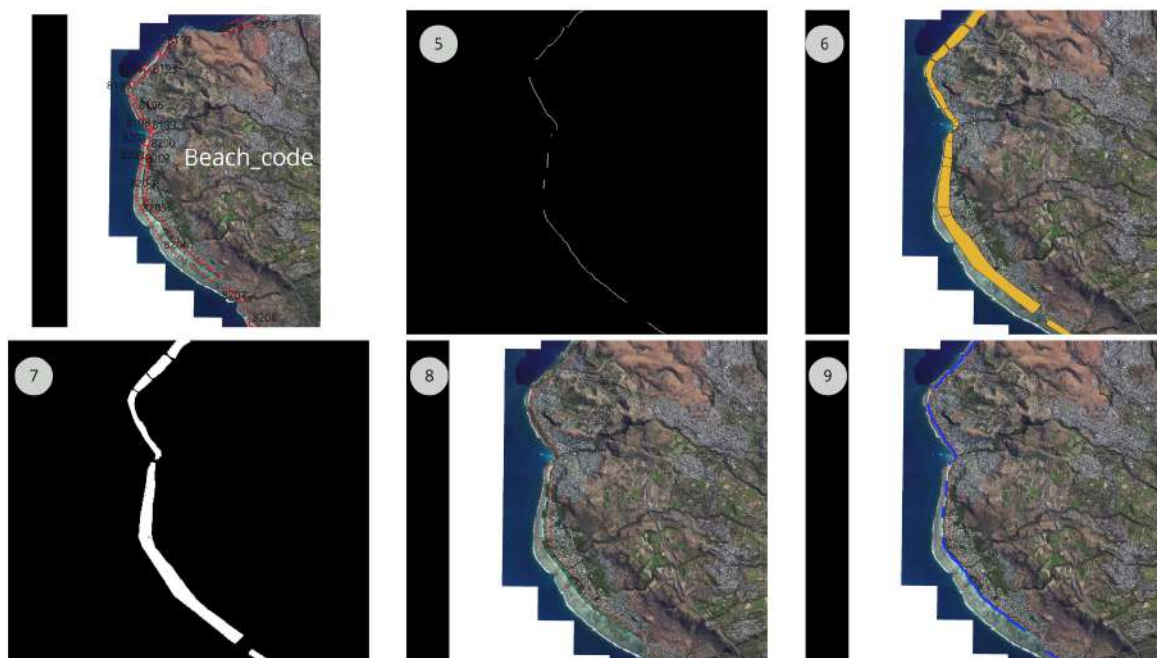
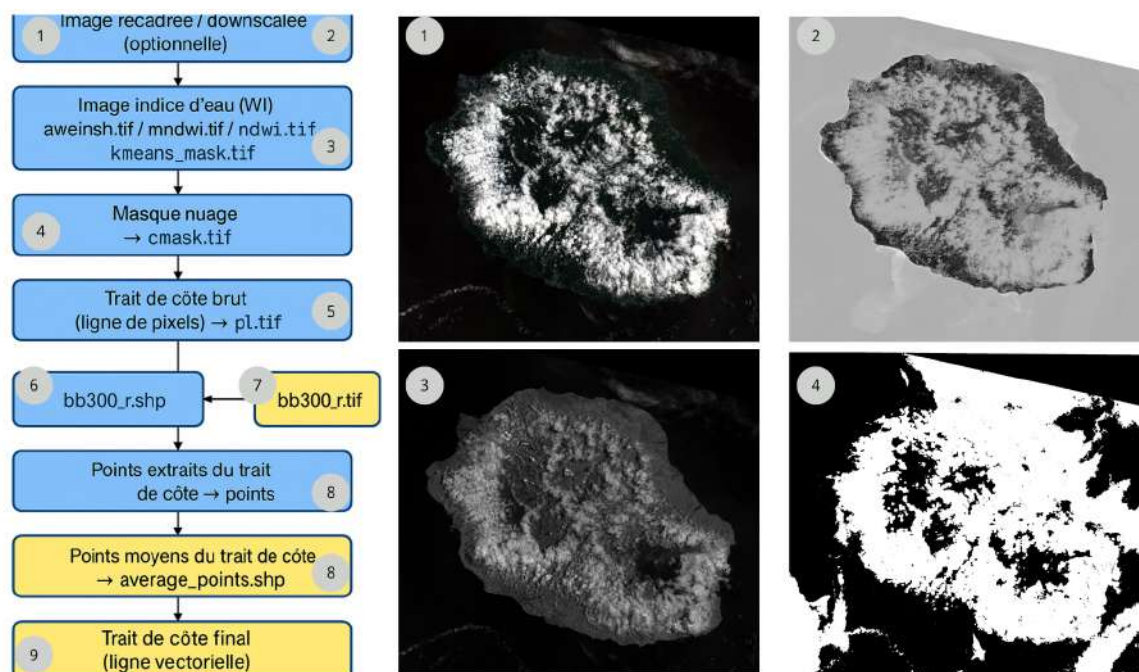
### Processus de la création de Baseline et Transect



**FIGURE 15.** Un exemple illustrant la manière de placer une ligne de base (Baseline). Les transects résultants croiseront les lignes de rivage, quel que soit l'emplacement choisi. Les lignes de base dans un jeu de données peuvent être toutes d'un seul type ou constituer une combinaison des trois.



## Dossier temporaire des images enregistré dans chaque scènes Sentinel-2



**FIGURE 18.** Dossier temporaire des images enregistré dans chaque scènes Sentinel-2

## Valeurs du code plage (beach\_code) pour les zones d'étude

**TABLE 4.** Valeurs du code plage (beach\_code) pour les zones d'étude

Site	Beach_code
Baie de Saint Paul	8272, 8273, 8274, 8275, 8276, 8277, 8278, 8279
Etang Salé	8223, 8224, 8225, 8226, 8227, 8283
Ermitage et La Saline	8201, 8202, 8203, 8004, 8205, 8006, 8207, 8208
La Possession	8267, 8268
Le Port	8269, 8270, 8271
Saint Benoit	8235, 8236, 8237, 8238, 8239, 8240, 8241, 8242, 8243, 8244, 8245, 8246, 8247, 8248, 8249, 8250, 8251, 8252, 8253
Saint Denis	8261, 8262, 8263, 8264, 8265, 8266
Saint Gille	8192, 8193, 8194, 8195, 8196, 8197, 8198, 8199, 8200
Saint Joseph	8282
Saint Leu	8209, 8210, 8211, 8212, 8213, 8214, 8215, 8216, 8217, 8218, 8219, 8220, 8221, 8222
Saint Louis	8228, 8229, 8230, 8231, 8232
Saint Pierre	8233, 8234, 8280, 8281
Sainte Marie	8258, 8259, 8260
Sainte Suzanne	8254, 8255, 8256, 8257



# Cinématique de plage à long terme

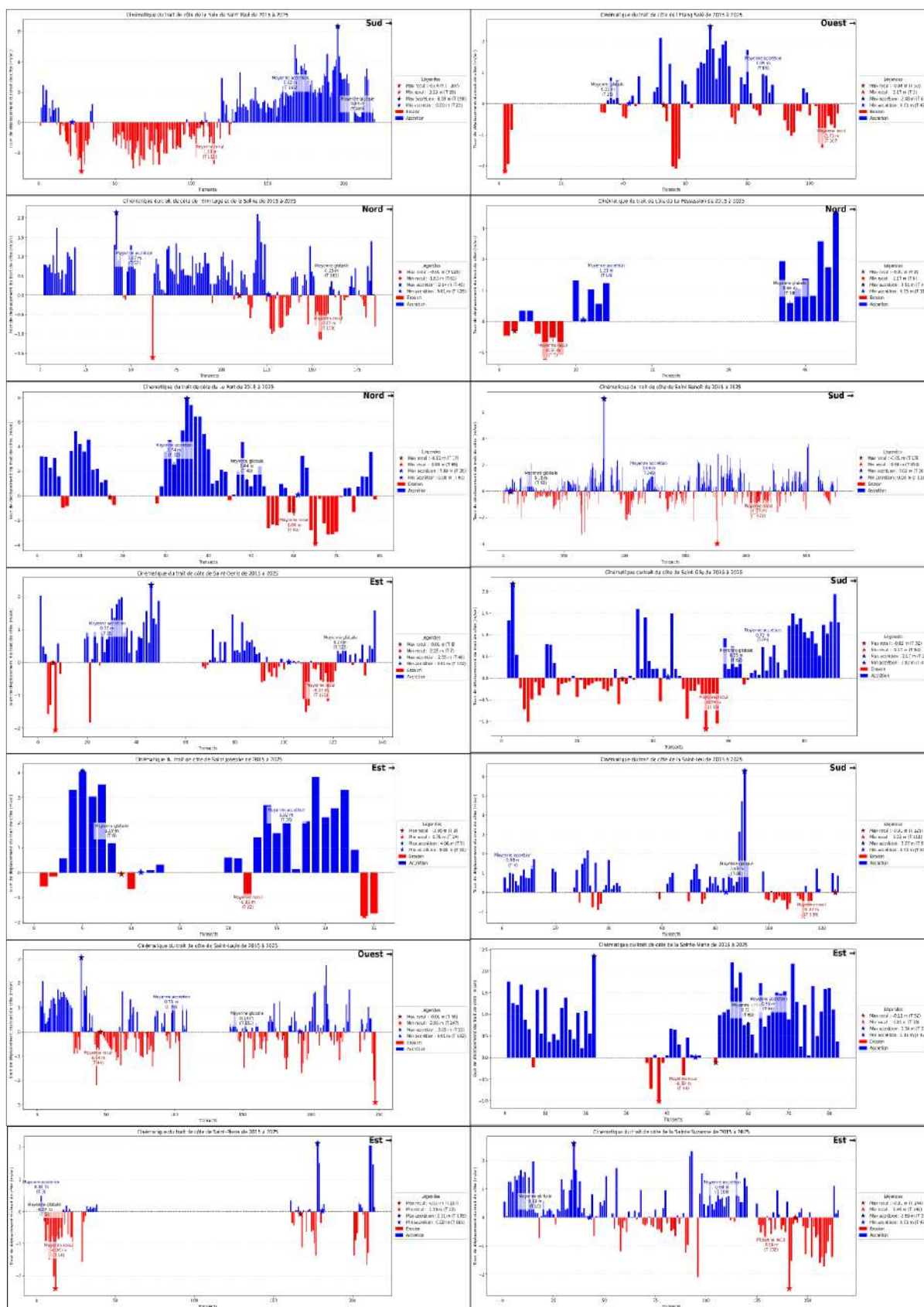


FIGURE 19. Cinématique de plage à long terme

# Statistiques des comparaisons saisonnières pour les 3 sites (Baie de Saint Paul, Ermitage, Saint-Denis)

**TABLE 5.** Statistiques descriptives des variations du trait de côte par site, catégorie et saison

Site	Catégorie	Saison	Count	Mean	Median	Std.	Q25	Q75	Min	Max	Skew	Kurtosis
Ermitage et la Saline	Accrétion		102.000	0.418	0.350	0.306	0.200	0.543	0.010	1.600	1.490	3.014
Ermitage et la Saline	Accrétion		65.000	0.291	0.250	0.222	0.140	0.350	0.010	1.010	1.341	1.891
Ermitage et la Saline	Érosion		51.000	-0.359	-0.270	0.376	-0.475	-0.060	-1.390	0.000	-1.370	1.084
Ermitage et la Saline	Érosion		87.000	-0.350	-0.290	0.332	-0.455	-0.085	-1.450	0.000	-1.598	2.703
Saint-Denis	Accrétion		57.000	0.337	0.210	0.361	0.090	0.470	0.010	2.020	2.346	7.773
Saint-Denis	Accrétion		57.000	0.290	0.150	0.379	0.090	0.380	0.010	2.460	3.853	19.423
Saint-Denis	Érosion		51.000	-0.263	-0.200	0.219	-0.350	-0.090	-0.830	-0.010	-1.092	0.303
Saint-Denis	Érosion		51.000	-0.232	-0.170	0.234	-0.320	-0.065	-1.050	0.000	-1.560	2.376
Baie de Saint-Paul	Accrétion		101.000	0.754	0.720	0.460	0.420	1.020	0.060	2.810	1.324	3.887
Baie de Saint-Paul	Accrétion		104.000	0.706	0.665	0.539	0.280	0.990	0.030	3.080	1.380	3.191
Baie de Saint-Paul	Érosion		102.000	-0.761	-0.705	0.452	-1.050	-0.415	-2.040	-0.090	-0.522	-0.326
Baie de Saint-Paul	Érosion		98.000	-0.727	-0.670	0.405	-1.035	-0.410	-1.870	-0.030	-0.146	-0.590

## Tests statistiques Mann-Whitney pour le contraste de saison

**TABLE 6.** Tests statistiques Mann-Whitney pour le contraste de saison

Site	Catégorie	p-value
Ermitage et la Saline	Accrétion	0.0026
Ermitage et la Saline	Érosion	0.7109
Saint-Denis	Accrétion	0.3811
Saint-Denis	Érosion	0.2373
Baie de Saint-Paul	Accrétion	0.2302
Baie de Saint-Paul	Érosion	0.7909





## BIBLIOGRAPHIE

- Addo, K. A., Walkden, M., and Mills, J. t. (2008). Detection, measurement and prediction of shoreline recession in accra, ghana. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(5) :543–558.
- Aggarwal, K. K. and Singh, Y. (2005). *Software Engineering*. New Age International Publishers, New Delhi, India, 2nd edition.
- Almonacid-Caballer, J., Sánchez-García, E., Pardo-Pascual, J. E., Balaguer-Beser, A. A., and Palomar-Vázquez, J. (2016). Evaluation of annual mean shoreline position deduced from landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, 372 :79–88.
- Battistini, R. (1975). *Eléments de terminologie récifale indopacifique*. Station marine d’Endoume.
- Battistini, R. (1984). Beach-rocks et arrécifes à madagascar et dans les îles voisines : leur utilisation pour l’étude de l’évolution de la ligne de rivage. *MOM Éditions*, 8(1) :11–18.
- Belon, R., Durand, G., Chatain, E., and Prosperi, A. (2024). Rapport d’activité des actions du brgm dans le cadre de l’observatoire du littoral de la réunion (2023) : rapport final v0. Technical Report RP-72825-FR, BRGM.
- Belon, R., Gayer, C., and Moutoussamy, L. (2021). Obscot 2019-2020 – observation et gestion de l’érosion côtière à la réunion : rapport final. Technical Report RP-70759-FR, BRGM. 175 illustrations, 1 annexe (53 p.).
- Blangy, A., De La Torre, Y., Vaslet, E., Mallet, C., and Dewez, T. (2009). Morphodynamique des littoraux de la réunion. phase 3 : Suivi et gestion de l’érosion côtière sur 12 sites identifiés comme sensibles. Rapport technique BRGM/RP-57431-FR, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Disponible en ligne.
- Boak, E. H. and Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection : A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4) :688–703.
- Bousquet, O., Barruol, G., Cordier, E., Barthe, C., Bielli, S., Calmer, R., Rindraharisaona, E., Roberts, G., Tulet, P., Amelie, V., et al. (2021). Impact of tropical cyclones on inhabited areas of the swio basin at present and future horizons. part 1 : overview and observing component of the research project renovrisk-cyclone. *Atmosphere*, 12(5) :544.
- Bulteau, T., Baills, A., Petitjean, L., Garcin, M., Palanisamy, H., and Le Cozannet, G. (2015). Gaining insight into regional coastal changes on la réunion island through a bayesian data mining approach. *Geomorphology*, 228 :134–146.
- Castelle, B. and Masselink, G. (2023). Morphodynamics of wave-dominated beaches. *Cambridge Prisms : Coastal Futures*, 1 :e1.

- Cazes-Duvat, V. (2003). Étude de vulnérabilité des plages coralliennes de l'île de la réunion. Rapport d'expert, Office National des Forêts (ONF) & Association Parc Marin de La Réunion. Expert en géomorphologie et aménagement des littoraux.
- CEREMA (2020). Dynamiques et évolution du littoral - fascicule 17 : La réunion - atlas cartographique. Consulté le 9 mai 2025.
- CEREMA (2021). International coastal wave measurement networks : Overview of candhis waverider buoy network. Présentation institutionnelle du Cerema sur le dispositif CANDHIS. Consulté le 1 juillet 2025.
- Chang, M., Li, P., Li, Z., and Wang, H. (2022). Mapping tidal flats of the bohai and yellow seas using time series sentinel-2 images and google earth engine. *Remote Sensing*, 14(8) :1789.
- Chery, L. A. (2024). Dynamique du littoral versus fréquentation du littoral dans le secteur de l'hermitage (la réunion). Rapport de stage master 2, rnet parcours gt, Université de La Réunion. hal-04937284.
- Cordier, E. (2007). *Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage/La Saline (La Réunion) : processus physiques et flux sédimentaires*. PhD thesis, Université de la Réunion.
- Crowell, M., Leatherman, S. P., and Buckley, M. K. (1991). Historical shoreline change : error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3) :839–852.
- Cuet, P., Jouvenot, F., Lagoutte, E., Mouquet, P., Pennober, G., Révillion, C., Schultz, M., and Cammas, J.-P. (2023). *Compte-rendu d'exécution final du projet FEDER «RENOVRISK TRANSFERT»*. PhD thesis, Observatoire des sciences de l'univers de La Réunion (OSU-R).
- De La Torre, Y. (2004). Synthèse morphodynamique des littoraux de la réunion, état des lieux et tendances d'évolution à l'échelle de l'île [synthesis of morphodynamics of la réunion coasts : inventory and trends across the island]. Technical report, BRGM/RP53307-FR.
- De La Torre, Y., Bastone, V., Bodere, G., and Desprez, A. (2012). Morphodynamique des littoraux de la réunion. phase 4. Technical report, BRGM/RP-57431-FR, La Réunion, France.
- De La Torre, Y., Dolique, F., and Jeanson, M. (2006). Morphodynamique des littoraux de mayotte. phase 2 : mise en place d'un réseau de quantification de l'érosion côtière. Technical report, BRGM/RP-54832-FR.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., et al. (2012). Sentinel-2 : Esa's optical high-resolution mission for gmes operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120 :25–36.
- Durand, G. and Belon, R. (2021). Guide des bonnes pratiques pour la gestion des ouvrages implantés sur le littoral de la réunion. Rapport final BRGM/RP-70651-FR, BRGM. 43 ill., 8 tabl.
- Duvat, V., Salmon, C., and Magnan, A. (2016). Trajectoires de vulnérabilité des littoraux de l'île de la réunion aux risques liés à la mer (1950-actuel). *IDDRI*.
- Dynalit, O. R. (2025). Portail geonetwork - données sno dynalit réunion.  
[https://geosur.osureunion.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/search?resultType=details&sortBy=relevance&any=SN0%20DYnalit&fast=index&content\\_type=json&from=1&to=20](https://geosur.osureunion.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/search?resultType=details&sortBy=relevance&any=SN0%20DYnalit&fast=index&content_type=json&from=1&to=20). Consulté le 20 juillet 2025.
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051) :686–688.

- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., and Proud, S. R. (2014). Automated water extraction index : A new technique for surface water mapping using landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140 :23–35.
- Gens, R. (2010). Remote sensing of coastlines : detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 31(7) :1819–1836.
- GIEC (2023). Changement climatique 2023 : Synthèse du sixième rapport d'évaluation. Rapport de synthèse, Organisation météorologique mondiale et Programme des Nations unies pour l'environnement.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. (2017). Google earth engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202 :18–27.
- Hagenaars, G., de Vries, S., Luijendijk, A. P., de Boer, W. P., and Reniers, A. J. H. M. (2018). On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery : A case study of the sand motor mega-scale nourishment. *Coastal Engineering*, 133 :113–125.
- Hagolle, O., Huc, M., Pascual, D. V., and Dedieu, G. (2015). A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of formosat-2, landsat, venus and sentinel-2 images. *Remote Sensing*, 7(3) :2668–2691.
- Hapke, C. J., Himmelstoss, E. A., Kratzmann, M. G., List, J. H., and Thieler, E. R. (2010). National assessment of shoreline change : Historical shoreline change along the new england and mid-atlantic coasts. Scientific Investigations Report 2010-1118 1–57, U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Kinsela, M. A., Middleton, J. H., Mumford, P. J., Splinter, K. D., Phillips, M. S., Simmons, J. A., Hanslow, D. J., and Short, A. D. (2017). Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. *Scientific Reports*, 7(1) :6033.
- Himmelstoss, E., Henderson, R., Farris, A., Kratzmann, M., Bartlett, M., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J., and Thieler, E. (2024). Digital shoreline analysis system ; version 6.0. *US Geological Survey : Reston, VA, USA*.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., and Farris, A. S. (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide. Open-File Report 2018-1179, U.S. Geological Survey.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., and Farris, A. S. (2021). Digital shoreline analysis system (dsas) version 5.1 user guide. Technical report, US Geological Survey.
- Hisard, P., Citeau, J., and Morlière, A. (1976). Le système des contre-courants équatoriaux subsuperficiels : permanence et extension de la branche sud dans l'océan atlantique. *Cahiers ORSTOM, Série Océanographie*, XIV(3) :209–220. Disponible sur <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:19722>.
- Hoeke, R. K., McInnes, K. L., Kruger, J. C., McNaught, R. J., Hunter, J. R., and Smithers, S. G. (2013). Widespread inundation of pacific islands triggered by distant-source wind-waves. *Global and Planetary Change*, 108 :128–138.
- IFREMER (2023). Une année de sciences océaniques – rapport annuel 2023. Technical report, Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.

- INSEE (2023). Les chiffres clés de la réunion, territoire, population et emploi. Technical report, Direction de l'Économie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités (DEETS), La Réunion. Consulté en 2025.
- Ju, J. and Roy, D. P. (2008). The availability of cloud-free landsat etm+ data over the conterminous united states and globally. *Remote Sensing of Environment*, 112(3) :1196–1211.
- Khouakhi, A., Villarini, G., and Vecchi, G. A. (2017). Contribution of tropical cyclones to rainfall at the global scale. *Journal of Climate*, 30(1) :359–372.
- Kim, K., Jung, H. C., Choi, J.-K., and Ryu, J.-H. (2021). Statistical analysis for tidal flat classification and topography using multitemporal sar backscattering coefficients. *Remote Sensing*, 13(24) :5169.
- Klemas, V. (2011). Remote sensing techniques for studying coastal ecosystems : An overview. *Journal of Coastal Research*, 27(1) :2–17.
- Knaeps, E., Doxaran, D., Dogliotti, A., Nechad, B., Ruddick, K., Raymaekers, D., and Sterckx, S. (2018). The seaswir dataset. *Earth System Science Data*, 10(3) :1439–1449.
- Kraus, N. C. and Galgano, F. A. (2001). Beach erosional hot spots : types, causes, and solutions. Technical report, US Army Corps Engineers.
- Lénat, J. and Bachèlery, P. (1988). Dynamics of magma transfer at piton de la fournaise volcano (réunion island, indian ocean). In *Modeling of volcanic processes*, pages 57–72. Springer.
- Liao, P.-S., Chen, T.-S., and Chung, P.-C. (2001). A fast algorithm for multilevel thresholding. *Journal of Information Science and Engineering*, 17(5) :713–727.
- Louvat, P. and Allègre, C. J. (1997). Present denudation rates on the island of reunion determined by river geochemistry : basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(17) :3645–3669.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., and Aarninkhof, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, 8(1) :6641.
- Machabée, J. (2024). *Caractérisation de l'hydro-morphodynamique de la zone intertidale du récif frangeant de l'Hermitage par caméra vidéo (La Réunion)*. PhD thesis, Université de la Réunion.
- Mahabot, M.-M. (2016). *Suivi morphodynamique des plages récifales de La Réunion en contexte d'observatoire*. PhD thesis, Université de la Réunion, Saint-Denis, La Réunion.
- Mahabot, M.-M., Jaud, M., Pennober, G., Le Dantec, N., Troadec, R., Suanez, S., and Delacourt, C. (2017a). The basics for a permanent observatory of shoreline evolution in tropical environments ; lessons from back-reef beaches in la reunion island. *Comptes Rendus Geoscience*, 349(6-7) :330–340.
- Mahabot, M.-M., Pennober, G., Suanez, S., Troadec, R., and Delacourt, C. (2017b). Effect of tropical cyclones on short-term evolution of carbonate sandy beaches on reunion island, indian ocean. *Journal of Coastal Research*, 33(4) :839–853.
- Maiti, S. and Bhattacharya, A. K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction : A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology*, 257(1-4) :11–23.
- Mallet, C., Garnier, C., and Marçot, N. (2013). Gestion de l'érosion des côtes à falaises rocheuses. *Géosciences*, (17) :18–25.

- Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suanez, S., Jackson, D., and Floc'h, F. (2016). Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the atlantic coast of europe. *Geophysical Research Letters*, 43(5) :2135–2143.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (ndwi) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7) :1425–1432.
- Mendoza, E., Salameh, E., Sakho, I., Turki, I., Almar, R., Ojeda, E., Deloffre, J., Frappart, F., and Laignel, B. (2023). Coastal flood vulnerability assessment, a satellite remote sensing and modeling approach. *Remote Sensing Applications : Society and Environment*, 29 :100923.
- Mitsopoulos, P. and Peña, M. (2023). Characterizing coastal wind speed and significant wave height using satellite altimetry and buoy data. *Remote Sensing*, 15(4) :987.
- Montaggioni, L. F. (1978). *Recherches géologiques sur les complexes récifaux de l'archipel des Mascareignes (Océan Indien Occidental)*. PhD thesis, Université d'Aix-Marseille.
- Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1) :111–124.
- Météo-France La Réunion (2021). Les types de houles touchant la réunion. Consulté le 14 août 2025.
- Météo-France La Réunion (2023). Saison des pluies 2023-2024 à la réunion. Consulté le 1er août 2025.
- Nicholls, R. J. and Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985) :1517–1520.
- Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V., Codignotto, J. O., Hay, J., Ragoonaden, S., Woodroffe, C. D., et al. (2007). Coastal systems and low-lying areas. *IPCC Fourth Assessment Report, Chapter 6*.
- ONERC (2012). Les outre-mer face au défi du changement climatique. Technical report, La Documentation française. Rapport au Premier ministre et au Parlement.
- Orlowsky, B. and Seneviratne, S. I. (2012). Global changes in extreme events : regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, 110 :669–696.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1) :62–66.
- Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J., and Sanchez-García, E. (2018). Shorex : a new tool for automatic and massive extraction of shorelines from landsat and sentinel 2 imagery. In *7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab)*. Santander.
- Palomar-Vázquez, J., Cabezas-Rabadán, C., Castaneda, C., Gracia, F. J., Fernández-Sarría, A., Priego-De-Los-Santos, E., Pons-Crespo, R., and Pardo-Pascual, J. E. (2022). Inferring volumetric changes at a shallow lake from subpixel satellite-derived shorelines. *Applied Geography*, 149 :102792.
- Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., and Cabezas-Rabadán, C. (2023). Shoreline analysis and extraction tool (saet) : A new tool for the automatic extraction of satellite-derived shorelines with subpixel accuracy. *Remote Sensing*, 15(12) :3198.
- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., and Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from landsat tm and etm+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123 :1–11.

- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., Palomar-Vázquez, J., and Rodrigo-Aleman, R. (2014). Evaluation of storm impact on sandy beaches of the gulf of valencia using landsat imagery series. *Geomorphology*, 214 :388–401.
- Pedrerros, R., Lecacheux, S., Le Cozannet, G., Durand, A., and De la Torre, Y. (2009). “HOULREU” Quantification de la houle centennale de référence sur les façades littorales de La Réunion. Technical Report RP-57829-FR, BRGM. 93 figures, 14 tables.
- Pennober, G., Chery, L. A., Machabée, J., Benoit, Y., Rouet, P., and Payen, G. (2024). Quatrième phase de mise en œuvre d’un système d’observation des plages récifales de la réunion intégré au sno dynalit : rapport final, convention deal osu/réunion. Rapport final 45, OSU Réunion, UMR Espace-Dev, La Réunion.
- Pennober, G., Jouvenot, F., Cordier, E., Machabée, J., Benoit, Y., Stamenoff, P., and Rouet, P. (2021). Troisième phase de mise en œuvre d’un système d’observation des plages récifales de la réunion intégré au sno dynalit : rapport final, convention deal osu/réunion. Rapport final 34, OSU Réunion, Espace-Dev, La Réunion.
- Petit, M. (2006). *Halieutique et environnement océanique : le cas de la pêche palangrière à l’espadon depuis l’île de la Réunion*. IRD Editions.
- Piton, B. and Taquet, M. (1992). Océanographie physique des parages de l’île de la réunion (océan indien). *Document Scientifique ORSTOM, La Réunion*.
- Polcyn, F. C. (1976). Nasa/cousteau ocean bathymetry experiment. remote bathymetry using high gain landsat data. Technical report, NASA.
- Pontee, N. (2013). Defining coastal squeeze : A discussion. *Ocean & Coastal Management*, 84 :204–207.
- Poursanidis, D., Chrysoulakis, N., and Mitraka, Z. (2015). Landsat 8 vs. landsat 5 : A comparison based on urban and peri-urban land cover mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35 :259–269.
- Prasad, D. H. and Kumar, N. D. (2014). Coastal erosion studies—a review. *International Journal of Geosciences*, 2014.
- Pugh, D., Woodworth, P. L., and Woodworth, P. (2014). *Sea-level science : understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.
- Pye, K. (2015). *Aeolian dust and dust deposits*. Elsevier.
- Rambeaud, E. (2024). Typologie et indicateur d’érosion côtière : étude méthodologique et bibliographique pour l’observatoire du littoral de la réunion. Mémoire de master 2, Université de Bretagne Occidentale, UMR Espace-Dev, IRD. Rapport final de stage, 108 pages.
- Ranaivoson Rapatsalahy, M. (2023). Analyse de la dynamique du trait de côte de la baie de saint paul, la réunion (*Étude réalisée dans le cadre d’un projet de recherche sur l’impact potentiel du changement climatique sur la dynamique du trait de côte de La Réunion*). Rapport de stage master 2, Université de La Réunion. Projet de recherche sur l’impact du changement climatique.
- Ranasinghe, R. (2020). On the need for a new generation of coastal change models for the 21st century. *Scientific Reports*, 10(1) :2010.
- Robert, R. (1974). *Morphologie littorale d’île de la Réunion*. Centre universitaire de la Réunion.

- Rocle, N. (2017). *L'adaptation des littoraux au changement climatique : une gouvernance performative par expérimentations et stratégies d'action publique*. PhD thesis, Université de Bordeaux.
- Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., and Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5) :4173–4189.
- Rouse, J. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. *NASA/GSFCT Type II Report*.
- Sababady, O. (2023). Contribution à la caractérisation du rivage dans le contexte de l'observatoire du littoral de la réunion. Mémoire de master 2, Université de La Réunion / IRD, UMR Espace-Dev. Soutenu le 21 juin 2023.
- Saint-Ange, F., Bachèlery, P., Babonneau, N., Michon, L., and Jorry, S. J. (2013). Volcaniclastic sedimentation on the submarine slopes of a basaltic hotspot volcano : Piton de la fournaise volcano (la réunion island, indian ocean). *Marine Geology*, 337 :35–52.
- Shi, K., Zhang, Y., Zhu, G., Liu, X., Zhou, Y., Xu, H., Qin, B., Liu, G., and Li, Y. (2015). Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in lake taihu using 250 m modis-aqua data. *Remote Sensing of Environment*, 164 :43–56.
- Smietana, M. (2011). *Pétrologie, géochronologie (K-Ar) et géochimie élémentaire et isotopique (Sr, Nd, Hf, Pb) de laves anciennes de La Réunion : Implications sur la construction de l'édifice volcanique*. PhD thesis, Université de la Réunion.
- Thieler, E. R. and Danforth, W. W. (1994). Historical shoreline mapping (i) : improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research*, pages 549–563.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., and Ergul, A. (2008). The digital shoreline analysis system (dsas) version 4.0 - an arcgis extension for calculating shoreline change. Open-File Report 2008-1278, U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA.
- Viaña-Borja, S. P. and Ortega-Sánchez, M. (2019). Automatic methodology to detect the coastline from landsat images with a new water index assessed on three different spanish mediterranean deltas. *Remote Sensing*, 11(18) :2186.
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L., and Storlazzi, C. D. (2017). Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7(1) :1399.
- Vitousek, S., Buscombe, D., Vos, K., Barnard, P. L., Ritchie, A. C., and Warrick, J. A. (2023). The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. *Cambridge Prisms : Coastal Futures*, 1 :e10.
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., and Turner, I. L. (2019). Coastsat : A google earth engine-enabled python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122 :104528.
- Vos, K., Splinter, K. D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E. C., Luijendijk, A. P., Calkoen, F., Almeida, L. P., et al. (2023). Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth & Environment*, 4(1) :345.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., and Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9(1) :2360.

- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., and Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10(3) :260–263.
- Welby, C. W. (1978). Application of landsat imagery to shoreline erosion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44(91) :1173–1178.
- Wicaksono, A. and Wicaksono, P. (2019). Geometric accuracy assessment for shoreline derived from ndwi, mndwi, and awi transformation on various coastal physical typology in jepara regency using landsat 8 oli imagery in 2018. *Geoplanning J. Geomat. Plan*, 6(1) :55–72.
- Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Goward, S. N., Helder, D., Helmer, E., et al. (2008). Free access to landsat imagery. *SCIENCE VOL 320* : 1011.
- Woodroffe, C. D. (2002). *Coasts : form, process and evolution*. Cambridge University Press.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (ndwi) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14) :3025–3033.
- Yvergniaux, N. (2022). Modélisation de la circulation océanique dans le sud-ouest de l’océan indien. Mémoire de master 1 sciences de la mer, Université Aix-Marseille, Institut Pythéas, Observatoire des Sciences de l’Univers. 06 mai 2022.
- Zhu, Z. and Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in landsat imagery. *Remote sensing of environment*, 118 :83–94.



# CONTACT

J'espère que vous avez eu l'occasion de consulter mon projet. N'hésitez pas à me contacter pour toute question, demande de précision ou échange complémentaire.



**3, Rue Pitel, 97490 Saint-Denis, La Réunion (France)**



**jotahanrayanrower.mitantsoanyhajaharilala@croix-rouge.fr**



**44006146@co.univ-reunion.fr**



**+262 693 81 23 59**



Facebook: Jonathan Rayan Rower



Twitter/X: @RowerNy



LinkedIn



ORCID: 0009-0005-6961-0522



HAL ID: rayan-rower



**Stage réalisé au sein de l'UMR ESPACE Dev**



## Master RNET

Ressources et Risques Naturels des Environnements Tropicaux  
Mention Sciences de la Terre, des Planètes et de l'Environnement

# Cartographie automatisée du trait de côte de l'île de La Réunion par télédétection satellitaire à l'aide de l'outil SAET

Jonathan Rayan Rower

MITANTSOA NY HAJA HARILALA

Soutenu le 20 août 2025

Encadrants :

Pr Gwenaëlle PENNOBER, Université de La Réunion, UMR Espace-Dev

Manoa RANAIVOSON RAPATSALAHY, doctorant, Université de La Réunion, UMR Espace-Dev