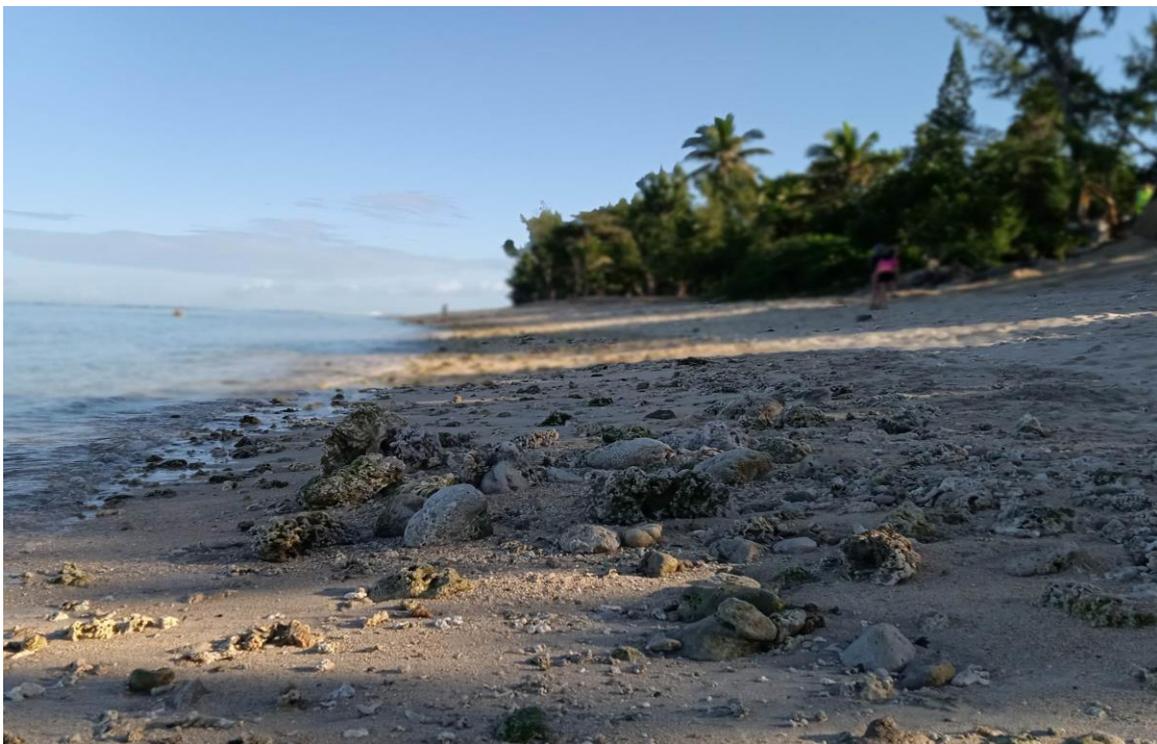




Quatrième Phase de mise en œuvre d'un système d'observation des plages récifales de La Réunion intégré au SNO Dynalit

Rapport final



G. Pennober, Pr Université de la Réunion, UMR ESPACE-DEV, OSU-Réunion

L. Arly Chery, UMR ESPACE-DEV, OSU-Réunion

J. Machabée, UMR ESPACE-DEV, OSU-Réunion

Y. Benoit, OSU-Réunion, UAR 3365

P. Rouet, UMR ESPACE-DEV, OSU-Réunion



G. Payen, OSU-Réunion, UAR 3365

Citation du rapport

Pennober G., Arly Chery L., Machabee J. Benoit Y, Rouet P. G. Payen (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. OSU/Réunion, UMR Espace-Dev,45 p.

Sommaire

1	Rappels du contexte et des objectifs de l'accord cadre	5
1.1	Démarche de labellisation et paysage des infrastructures à l'échelle nationale et européenne	5
1.2	Le Service National d'Observation DYNALIT	7
1.3	Le SNO Dynalit à La Réunion.....	8
1.3.1	Objets de la convention.....	8
1.3.2	Questions Scientifiques	9
2	Mesure et Instrumentation déployée à la réunion	9
2.1	Etendue du site	9
2.2	Instrumentation	10
2.3	Référentiel	10
2.4	Mesures 2D : Profils de plage	11
2.5	Photogrammétrie par drone : MNT et MNE	13
2.6	Suivi de la position du trait de côte	15
2.7	Autres mesures hors cadre opérationnel.....	17
2.7.1	Les suivis des forçages météo-marins : Le système caméra vidéo de l'Hermitage	17
2.7.2	Caractérisation sédimentaire des estrans sableux	19
3	Bancarisation et diffusion des données	21
3.1	SI de l'OSU-Réunion.....	21
3.2	Disponibilité des données	23
4	Résultats sur la période 2021-2023.....	25
4.1	Valorisation scientifique	25
4.1.1	Sur le site de La Réunion la valorisation scientifique	25
4.1.2	Collaboration scientifique avec l'Université de Mayotte.....	25
4.2	Former et diffuser les savoirs	26
4.2.1	Accueil d'étudiants en stage de master	26
4.2.2	DIPLÔME UNIVERSITAIRE "Processus d'érosion des plages et stratégies de gestion du trait de côte"	27
4.3	Analyses des dynamiques hydro-morpho-sédimentaires.....	30
4.3.1	Les informations issues de la caméra vidéo (Machabée, 2024)	30

4.3.2	Analyse des volumes différentiels sur les profils de référence sur la période 2021-2023	32
4.3.3	Analyse des dynamiques du trait de côte	39
5	CONCLUSION	43
6	BIBLIOGRAPHIE	44

1.1

1 Rappels du contexte et des objectifs de l'accord cadre

1.1 Démarche de labellisation et paysage des infrastructures à l'échelle nationale et européenne

Les travaux menés dans le cadre des conventions OSU-Réunion/DEAL entre 2012-2023 ont permis (i) d'aboutir à l'intégration de plages récifales de La Réunion, suivies en termes de dynamique topographique depuis les années 1990, dans le réseau SOERE "trait de côte, aménagements littoraux" (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement) en 2012 puis dès 2014 dans le SNO Dynalit (Service National d'Observation des Dynamiques Littorales) (ii) de créer les chroniques nécessaires à l'observation sur le long terme (11 ans).

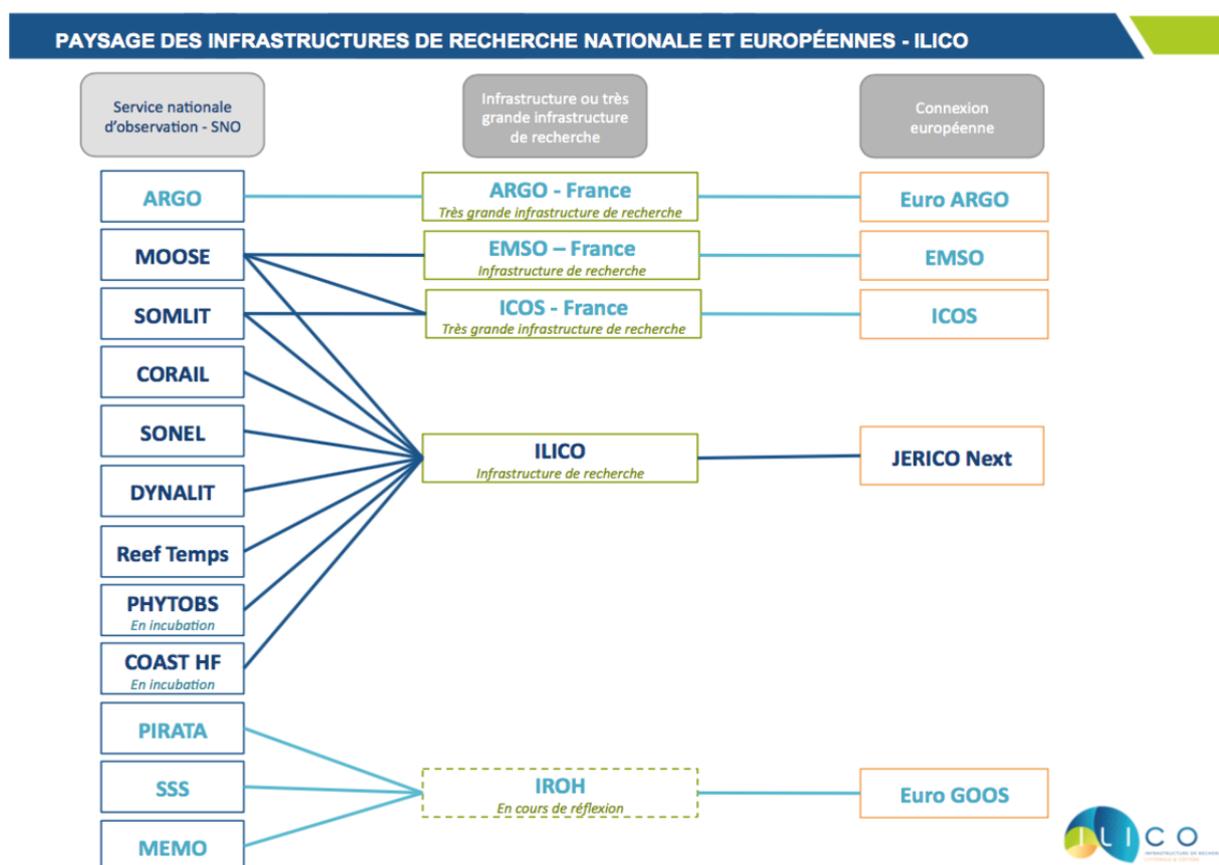
Pour rappel, le SOERE "trait de côte, aménagements littoraux" a été labellisé par l'ALLENVI (l'Alliance nationale de recherche pour l'Environnement) entre 2011 et 2016. Il se composait d'un réseau de laboratoires et de sites ateliers dédiés à la caractérisation des dynamiques hydrosédimentaires des plages. Les activités de l'AllEnvi s'inscrivent dans les stratégies nationales du gouvernement français, conformément aux objectifs du Grenelle de l'Environnement. Elles relèvent de la Stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI).

En parallèle, compte tenu des processus déjà observés et des conséquences attendues du changement climatique sur les littoraux, il existe une demande sociétale, émanant des riverains et des élus, pour une stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Cette demande a été exprimée dans le Livre bleu, rédigé à la suite du Grenelle de la Mer par le Secrétariat Général de la Mer, et a conduit à l'adoption de cette stratégie dès 2012. Développer et partager la connaissance sur le trait de côte est devenu l'axe A de cette stratégie

Pour répondre à cette stratégie nationale, en 2014, un nouveau consortium pluridisciplinaire de laboratoires a choisi de privilégier une labellisation par l'INSU (Institut des Sciences de l'Univers) et décroche le label SNO Dynalit pour des observatoires de plages, falaises et estuaires. En 2015, l'IR-ILICO (Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière) a été créée pour fédérer à l'échelle nationale les initiatives et services d'observation du littoral. Cette IR s'inscrit dans la continuité du projet européen JERICO (Joint European Research Infrastructure network for Coastal Observatories) (Figure 1), achevé en 2015, et qui a l'ambition de se poursuivre au travers de JERICO-S3. Ce projet européen vise à harmoniser et renforcer les systèmes d'observation tout en contribuant à définir de « meilleures pratiques pour la conception, la mise en fonctionnement, la maintenance, la

distribution et la définition de normes de qualité pour les données acquises via ces systèmes ».

Afin de dynamiser l'intégration des sites dans les outremer français, l'IR ILICO a lancé en 2021 un appel à projets dédié à ces territoires pour la création de sites pilotes. Ces sites visent à assurer une cohérence entre plusieurs SNO de l'IR. À l'horizon 2025, l'OSU-Réunion, doté du SNO Dynalit, ambitionne d'inscrire les observations du littoral réunionnais (paramètres physiques, chimiques et biologiques) dans plusieurs labels SNO : Sonel, Reeftemps, Somlit et Benthobs (Figure 1) sous la forme de SNO ou de SNO like.



(ARGO ; COAST-HF, Coastal ocean observing system - High frequency ; CORAIL, Service d'observation des récifs coralliens de Polynésie française ; DYNALIT, Dynamique du littoral et du trait de côte ; EMSO, European multidisciplinary seafloor and water column observatory ; EuroGOOS, European global ocean observing system ; ICOS, Integrated carbon observation system ; ILICO, Infrastructure de recherche littorale et côtière ; IROH, Infrastructure de recherche d'observations hauturières ; JERICO Next, Joint European infrastructure network for coastal observatories ; MEMO, Mammifères échantillonneurs du milieu océanique ; MOOSE, Mediterranean ocean observing system for the environment ; PHYTOBS, Réseau d'observation du phytoplancton ; PIRATA, Pilot research moored array in the tropical Atlantic ; Reef Temps, Réseau de capteurs de température dans le domaine côtier du Pacifique sud ; SOMLIT, Service d'observation en milieu littoral ; SONEL, Système d'observation du niveau des eaux littorales ; SSS, Système d'observation de la salinité des océans - Sea surface salinity)

Figure 1 : Paysage des infrastructures de recherche nationales et européennes dans le domaine côtier et hauturier (source : Illico)

1.2 Le Service National d'Observation DYNALIT

Pour rappel, le Service National d'Observation DYNALIT est dédié à la métrologie récurrente et à long terme des littoraux (plages, falaises, estuaires) et de leur dynamique. DYNALIT répond à la nécessité d'observer quantitativement l'hydromorphodynamisme, avec deux objectifs principaux : (i) Scientifiques : comprendre les processus d'érosion dans le contexte du changement climatique ; (ii) Sociétaux : gérer le littoral, notamment en ce qui concerne les risques d'érosion. Le SNO DYNALIT a été conçu et structuré pour alimenter à la fois la recherche académique et les stratégies de gestion du trait de côte.

Le socle minimal de données pour garantir la labellisation d'un site était, sur la période 2011 à 2018, la production de profils de plage deux fois par an. En 2018, suite à l'assemblée générale du SNO Dynalit, une nouvelle charte de données a été introduite. Cette nouvelle charte exige désormais la production de Modèles Numériques de Terrain (MNT), fournissant des données topographiques surfaciques, deux fois par an. À partir de ce socle minimal, chaque site définit sa stratégie instrumentale pour répondre aux questions scientifiques qu'il porte les questions scientifiques soutenues par le SNO Dynalit Réunion sont : (i) Quelle est la cinématique actuelle et future des environnements littoraux et du trait de côte, et quelles sont les réponses morphologiques dans différents contextes de forçages météo-marins ? (ii) Quelles sont les interactions entre les processus hydrodynamiques (transports sédimentaires) et les réponses morphologiques ? (iii) Quelle est l'importance relative des facteurs anthropiques et naturels ?

En outre, du point de vue technique, le SNO Dynalit vise à : (i) Garantir une intercalibration et homogénéisation des mesures des paramètres littoraux, qui sont très diversifiées et adaptées aux caractéristiques des sites (Figure 2). (ii) Mutualiser des ressources face aux défis technologiques liés à la mesure. Garantir l'accessibilité des données via Internet en respectant les quatre principes FAIR : *Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*. Le socle minimal de données pour garantir la labellisation d'un site était sur la période 2011 à 2018 la production 2 fois par an de profils de plage. Il a évolué en 2018 suite à l'assemblée générale du SNO Dynalit à travers la production d'une nouvelle charte de données. Cette nouvelle charte Dynalit mentionne à présent la production de Modèles Numériques de Terrain (donc des données topographiques surfaciques) 2 fois par an. A partir de ce socle minimal chaque site définit sa stratégie instrumentale pour répondre aux questions scientifiques qu'il porte.

Les **questions scientifiques** soutenues par le SNO Dynalit sont : (i) Quelle est la cinématique actuelle et future des environnements littoraux et du trait de côte et quelles sont les réponses morphologiques dans différents contextes de forçages météo-marins ? (ii) Quelles sont les interactions entre les processus hydrodynamiques (transports sédimentaires) et les réponses morphologiques ? (iii) Quelle est l'importance relative des facteurs anthropiques et naturels ?

En outre, **du point de vue technique**, le SNO Dynalit vise à : (i) garantir une Intercalibration et homogénéisation des mesures des paramètres littoraux qui sont très diversifiées et adaptées aux caractéristiques des sites (Figure 2) ; (ii) mutualiser des ressources face aux défis technologiques liés à la mesure ; (iii) garantir l'accessibilité de la donnée via Internet en répondant aux quatre principes FAIR : *Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*.

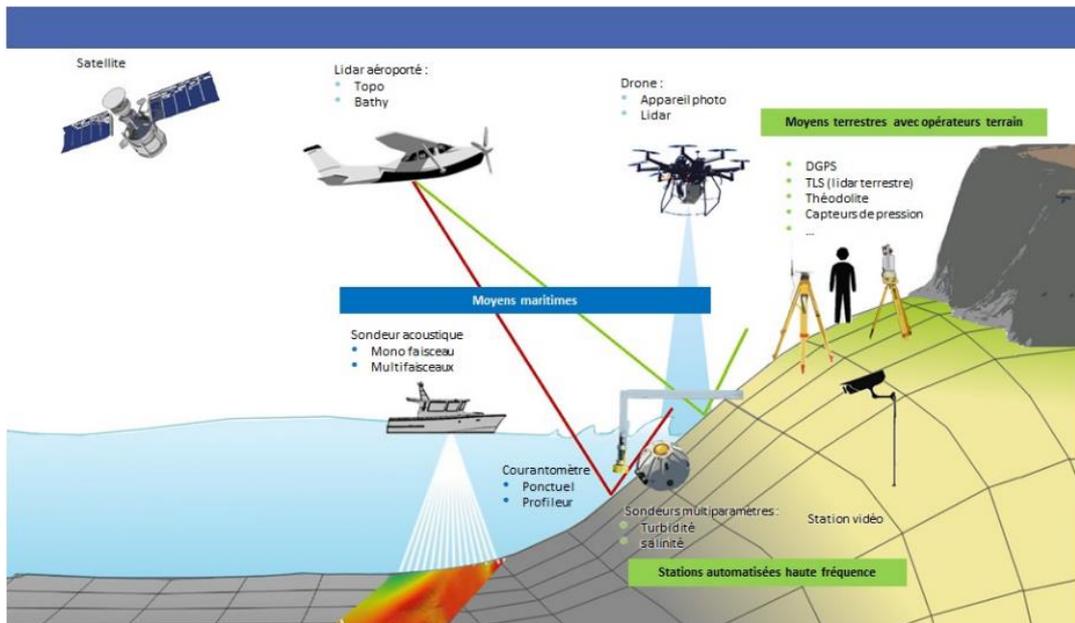


Figure 2 : Parc instrumental des sites ateliers du SNO Dynalit

1.3 Le SNO Dynalit à La Réunion

1.3.1 Objets de la convention

Les objectifs des conventions DEAL/OSU-Réunion sur la période 2012-2023 sont de pérenniser les conditions opérationnelles de l'infrastructure d'observation pour le long terme à La Réunion, en : (i) soutenant les actions d'observation par la réalisation de levés de terrain dans la continuité des mesures historiques et afin de produire le socle minimal de données nécessaire au maintien du label SNO DYNALIT ; (ii) soutenant une activité de recherche instrumentale et sur les indicateurs ; (iii) poursuivant la bancarisation des données sur l'IDS (Infrastructure de Données Spatiales) GEOSUR; (iv) contribuant à la valorisation des savoirs par la formation des acteurs clés et la publication scientifique.

La convention 2021-2023 avait comme spécificité de pérenniser les actions engagées sans nouvelle activité puisqu'il s'agit d'une période de transition vers l'observatoire du littoral qui définit à partir de 2024 le nouveau cadre d'action. Elle a été prolongée par avenant jusqu'en janvier 2024 afin d'avoir le même cadre temporel

que la convention Observatoire du Littoral qui intégrera à partir de 2024 la composante SNO Dynalit.

1.3.2 Questions Scientifiques

Le Site de l'Hermitage-La Saline à La Réunion a été le premier site outre-mer à être inscrit dans une démarche de labellisation de type observatoire pérenne des dynamiques littorales. Les mesures réalisées sur le littoral et l'instrumentation associée visent à contribuer à répondre à une question disciplinaire scientifique principale : Quelles sont dynamiques topographiques de la plage biodétritique ou carbonatée à La Réunion aux différentes échelles temporelles pertinentes en réponse aux forçages hydrologiques ?

2 Mesure et Instrumentation déployée à la réunion

2.1 Etendue du site

Si toutes les plages récifales historiquement suivies par le LGSR (travaux coordonnés par R. Troadec) des années 1990 à 2010 bénéficient d'un suivi type SNO Dynalit (de Cap Champagne à Manapany), seul le site de l'Hermitage-La Saline est aujourd'hui labellisé (Figure 3).

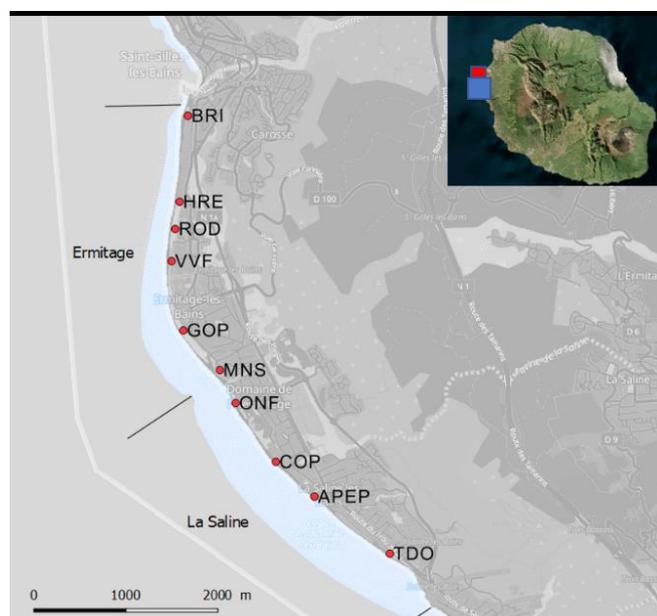


Figure 3 : Site atelier Hermitage-La Saline du SNO Dynalit et Localisation des principaux profils de plage sur le site (réalisation F. Jouvenot, 2021)

2.2 Instrumentation

L'instrumentation du site comporte :

- Des suivis topographiques,
- Un suivi de lignes de rivage
- Suivi des forçages météo-marins

Chacun de ces volets peut être composé d'une partie opérationnelle et/ou d'un volet recherche. Notons qu'à ce jour, seuls les volets suivis topographiques et de lignes de rivage sont actuellement dans la partie opérationnelle de l'observatoire.

Notons que les suivis topographiques initiés dès 2012 (Mahabot, 2012 ; Mahabot 2016, Mahabot *et al.* 2017a et b) sur la base des acquisitions du LGSR à l'échelle de la côte ouest récifale, le cadre géographique, le socle minimal de données et l'instrumentation ont peu à peu évolué. En effet, les suivis topographiques visent, de prime abord, à répondre au socle minimal de données pour une labellisation SNO Dynalit. Depuis 2018 il n'est plus constitué que de 2 MNT par an. Au vu de l'importance des séries temporelles longues, de l'emprise spatiale du MNT que nous pouvions produire par rapport à l'étendu du site de l'Hermitage La Saline il a été décidé de pérenniser les mesures initiées en 2012 donc des suivis topographiques de type 2D profil à l'échelle de la côte ouest et d'intégrer un suivi 3D d'une section de plage par MNT.

2.3 Référentiel

Les données topographiques 2D et 3D sont classiquement (lorsque c'est possible) aujourd'hui acquises par géodésie satellitaire (GPS, Glonass, Galileo...). Ce type de géolocalisation n'a qu'une précision de quelques mètres, car les perturbations atmosphériques (entre autres) entraînent des écarts sur les signaux satellitaires. Aussi, pour obtenir une précision centimétrique, il est nécessaire d'avoir un récepteur GNSS statique : une "Base" qui « connaît » sa position très précisément (au millimètre) et compare en temps réel sa position réelle et sa position estimée via les signaux des satellites. Le résultat obtenu est un flux de données (RTCM) qui va servir à un autre récepteur GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellite) mobile afin de préciser sa position.

Avant 2020, un récepteur fixe, le temps de la campagne de terrain, était déployé successivement sur chaque site. Entre 2020 en 2022, suite à une panne de la borne fixe utilisée par l'OSU-Réunion, le réseau GNSS Lél@¹ (<http://www.reseau-lela.com/>) a été utilisé grâce à un abonnement par instrument. Une sensible

¹ Réseau GNSS sur l'île de La Réunion Réseau Lél@ : <https://w3.leica-geosystems.com>

différence dans la mesure avait été notée dans le passage d'un instrument à un autre.

Le déploiement du réseau Centipède RTK à La Réunion a ouvert de nouvelles perspectives à partir de 2022. L'OSU Réunion et SEAS-OI ont permis l'extension du réseau Centipède RTK qui est aujourd'hui constitué de 5 bases GNSS dont 4 liées au consortium OSU-Réunion-SEAS-OI. L'intérêt du réseau Centipède RTK est qu'il est gratuit, collaboratif, constitué de bases GNSS ouvertes et disponibles pour toute personne se trouvant dans la zone de couverture (rayon de 10 km recommandé). Le réseau est étendu par des instituts publics, des particuliers, des acteurs privés sur les différents territoires. A partir d'avril 2023, suite à une période de test concluante, le réseau Centipède RTK² est développé et mobilisé pour les acquisitions drone.

Les changements de référentiels ont généré de sensibles différences dans la mesure mais dans un ordre de grandeur inférieur à la précision de la mesure recherchée pour les environnements sédimentaires qui est de l'ordre de 10 cm.

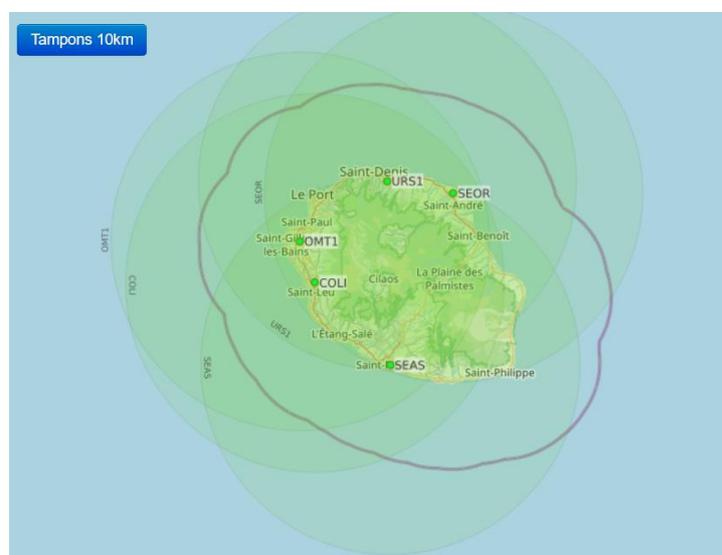


Figure 4 : Réseau d'antennes GNSS à la Réunion au 27/05/2024 (source <https://docs.centipede.fr/>)

2.4 Mesures 2D : Profils de plage

L'objectif est de quantifier les processus morfo-sédimentaires des plages d'arrière récif à l'échelle d'une saison, d'une année et à moyen terme. L'analyse de données topographiques de plage acquises sous forme de profil ou de transect de plage par DGPS permettent à la fois d'étudier la morphologie des plages mais également de

² <https://docs.centipede.fr/docs/base/>

quantifier des volumes de sédiments mobilisés à différents échelle spatiale et temporelle.

Les suivis topographiques originels se caractérisent par des suivis bi-annuels de profils de plage par DGPS initialement de type Topcon Hyper II puis Leica GS18i depuis 2021. A noter qu'en raison du caractère arboré du site, une station totale Leica ICB 50 peut être utilisée localement. Celle-ci n'est pas dépendante de la couverture satellitaire et de la visibilité du site dépendante de la densité de la canopée mais l'utilisation de plusieurs instruments pour un même profil en complique la bancarisation et le traitement.

Les acquisitions débutent à la tête de profil matérialisée par une borne pour une grande partie d'entre elles. Lors de la pose de la borne en 2012-2013, une demande d'Autorisation d'Occupation Temporaires (AOT) sur le Domaine Maritime Public (DPM) a été réalisée, elle est renouvelée tous les 5 ans. Les levés topographiques se font point par point le long de la radiale aidé du carnet de terrain grâce à l'affichage en fond d'écran de couches d'information géographique (BD ORTHO IGN). Pour réaliser une mesure, il suffit de se positionner sur le point à mesurer pendant quelques secondes et de "buller" correctement la canne télescopique. La mesure finale d'un point correspond à la moyenne des mesures réalisées en fonction de la durée prédéfinie. Selon la morphologie de la plage le nombre de points levés varie : une plage avec un pendage régulier aura des points plus espacés, au contraire en présence de rupture de pente sur une plage les points seront plus resserrés.

L'instrument Leica GS18i avec correction de la position en temps réel (RTK) connecté au réseau lel@ ne nécessite plus de phase de post-traitement. Les éphémérides des satellites du réseau GNSS sont mis à jour sur chaque instrument. La transformation des hauteurs ellipsoïdales z en altitude dans le système altimétrique local IGN89 est dès lors automatique. Les fichiers de sortie finaux sont transmis au format .csv.

A partir de ces fichiers x , y et z , les différentes représentations, couches, courbes des profils de plages, peuvent être générées.

La génération des profils nécessite le calcul de la distance séparant la tête de profil par rapport aux points de levés. Cette distance est calculée grâce à la relation trigonométrique de Pythagore.

$$distance = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2}$$

avec X_0 et Y_0 coordonnées du PR ; X_i et Y_i coordonnées d'un point

Les altitudes z sont ensuite reportées en fonction des distances obtenues. Le volume de sédiment du profil de plage est calculé en considérant la morphologie de la surface du profil décrit comme constante sur un linéaire de 1 m de part et d'autre de celui-ci. Le principe du calcul consiste à intégrer la surface de la courbe au-dessus de l'altitude $Z=0$ du système altimétrique local IGN89. Cependant, en

l'absence de fonction mathématique propre au profil de plage, il est malheureusement impossible de réaliser cette intégration. Pour y remédier, on considère que la surface occupée par la courbe correspond à la somme des aires des trapèzes comprises entre deux points mesurés successivement (Figure 5).

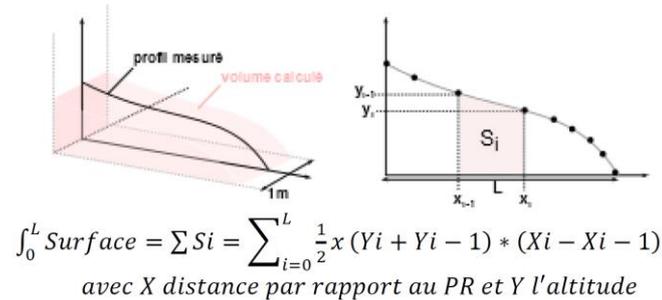


Figure 5 : Méthode de calcul du bilan volumique par décomposition surfacique (Mahabot, 2016).

Les volumes différentiels ou bilans volumiques entre levés de dates différentes sont obtenus par soustraction des volumes en mètre cube. Si le gain est négatif, la plage en question est en érosion, en revanche un gain positif signifie un engraissement de la plage. Un volume cumulé correspond à la somme des bilans volumiques date à date. Concernant l'incertitude sur le volume de sédiment, celui-ci est calculé en considérant une erreur verticale de 0.02 m (en lien avec la précision du DGPS observée) pour chaque point du profil c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle à la longueur du profil.

$$\Delta V = 0,02 * L \text{ avec } L \text{ longueur du profil de plage}$$

2.5 Photogrammétrie par drone : MNT et MNE

L'OSU-Réunion s'est adapté à la charte 2018 du SNO Dynalit et s'est orienté vers la photogrammétrie par drone grâce à l'acquisition d'un drone de type Phantom 4 RTK à des fins de modélisation numériques 3D. Le service drone de l'OSU acquiert ses données en toute autonomie depuis 2019. Ce drone est rattaché au MAP (Manuel d'Activité Particulière) du CNRS. Toutes les phases d'homologation et de formation avaient été réalisées en amont (voir rapport phase 3).

A La Réunion, les vols au-dessus de la Réserve Naturelle Marine de La Réunion (RNMR) nécessitent une demande d'autorisation préalable de celle-ci puis une déclaration à la DGAC (30 jours au minimum avant la date du vol). Cette phase administrative est assurée par le service drone de l'OSU-Réunion.

L'ensemble de ce protocole est aujourd'hui maîtrisé par l'équipe drone de l'OSU-Réunion. Les survols pour la réalisation des acquisitions aériennes ont été effectués

par drone DJI Phantom 4 RTK équipé de sa balise de correction D-RTK 2 pour obtenir une précision centimétrique sur la position des photographies. La précision altimétrique des données est entre 3 et 10 cm sur les surfaces nues de la plage. Un protocole de traitement des surfaces végétalisées est en réflexion. Il en résulte qu'aujourd'hui les données produites par drone au sein de la cellule drone de l'OSU-Réunion sont des MNE (Modèles Numériques d'Élévation). Ces MNE sont équivalents à des MNT sur les surfaces nues de la plage (Figure 6).

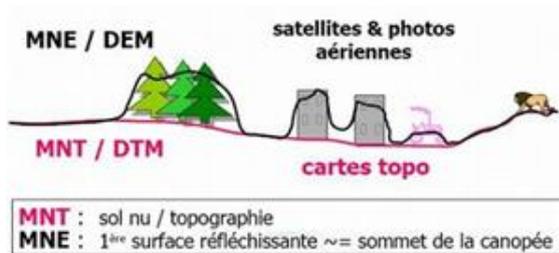


Figure 6 : Différence entre MNE et MNT (source : M. Bernard, Forum Photogrammétrie, 2009)

Le plan de vol actuel de la zone de l'Hermitage permet de couvrir un secteur d'un peu plus d'1,2 kilomètre de long sur un peu plus de 200 m de large intégrant une partie de la dune arborée et de la DAR (dépression d'arrière récif) (Figure 7).

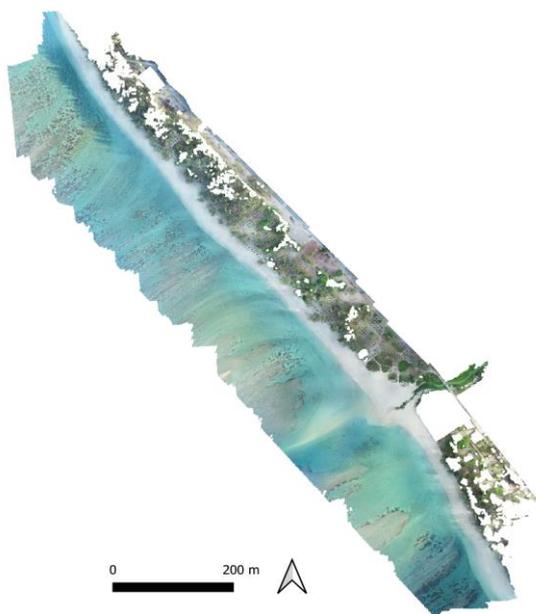


Figure 7: Mosaïque de photographies aériennes sur le site de la passe de l'Hermitage : emprise de la zone de modélisation 3D

Les vols ont été effectués en double grid (angle de vue de 60° avec 4 passages sur la même zone. Chaque passage à un angle de +90° par rapport au passage précédent, de manière à avoir 4 angles de vues différents sur la même portion de plage). Ce type de vol permet d'avoir une meilleure couverture, notamment en ayant quelques points de mesure sous la canopée si nécessaire en cas de littoral arborée. La hauteur de vol est réglée à 70 m, ce qui donne une résolution de 1,92 cm/pixel.

En raison des caractéristiques du site (forte fréquentation et réflectance potentielle des surfaces : eau et sable blanc), les mesures sont effectuées tôt dans la journée, juste après le lever du soleil. En effet, on peut observer une réflexion spéculaire sur les surfaces d'eau de rugosité inférieure à la résolution du capteur. Sur les images, la réflexion spéculaire se traduit par une tâche blanche qui correspond à une saturation des capteurs si le capteur se situe exactement dans la direction du rayonnement réfléchi, ou bien sombre dans le cas contraire. De même, le sable blanc ayant un fort potentiel de réflectance de l'éclairement solaire, on peut avoir à des heures plus tardives une saturation des capteurs optiques. Une exposition trop forte peut se traduire par une information dégradée. Un pixel blanc (de saturation de toutes les longueurs d'onde) est même considéré comme une absence de donnée par le logiciel de traitement. De même, il faut éviter au maximum les jours venteux, en raison des difficultés de survol mais aussi et surtout en raison des embruns, qui en altérant les basses couches de l'atmosphère provoquent du bruit dans la suite du traitement des données.

À la fin des acquisitions aéroportées par drone suit l'étape de traitement des données brutes à partir de logiciel de photogrammétrie SfM (Structure from Motion). La photogrammétrie SfM est une technique de traitement destinée à reproduire une scène en 3D à partir d'images 2D issues de la vision par ordinateur. Cette technique s'appuie sur l'intelligence artificielle et repose principalement sur la détection des points homologues (même pixels) par la méthode SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 1999). En outre, d'après Jaud (2019) cette méthode de détection SIFT permet de détecter des points homologues indépendamment des changements d'orientation d'échelle et d'illumination entre les photographies.

Le logiciel de photogrammétrie SfM choisi pour la réalisation des traitements des photographies est Agisoft PhotoScan4 aujourd'hui appelé Agisoft MetaShape depuis la dernière mise à jour fin 2018). Le traitement photogrammétrique se fait en 7 étapes de traitement principales : (i) présélection des images dans le set de données acquises (ii) alignement des images par détection de points homologues (iii) créations de masques, pointage de cibles pour géoréférencement (iv) optimisation de l'alignement (v) construction d'un nuage de points dense (vi) construction d'un maillage de type TIN (réseau irrégulier de triangulation) (vii) générer un MNT et une mosaïque d'image.

Les données MNT drone et DGPS profils sont réalisées lors d'une seule et même campagne à la fin de la saison des houles australes (novembre) et à la fin de la saison des houles cycloniques (avril-mai).

2.6 Suivi de la position du trait de côte

- La position de la ligne de rivage est mesurée par la numérisation du pied de plage et de la limite de végétation basse et des ouvrages de haut de plage aux échelles supérieures au 1/5 000 (Figure 4). Si jusqu'alors la production du trait de côte était

le résultat d'une digitalisation à l'écran par une saisie en 2D au format shape sous QGIS ou ARGIS sur fond image BD ORTHO® de l'IGN ou de données des satellites Pléiades issues initialement du fond Kalideos Réunion³ puis via DINAMIS (Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Satellitaire)⁴, depuis 2023 un nouveau protocole plus robuste est mis en œuvre par l'UMR Espace-Dev sur le site de l'Hermitage-La Saline. Ce protocole nécessite des images au format ortho-TOC (top of canopy) garantissant la superposition des pixels en X,Y et enlevant les effets de la variabilité des caractéristiques de l'atmosphère dans les valeurs spectrales. Les données Kalideos et DINAMIS remplissent ses conditions.

Les deux lignes de rivage extraites sont le pied de plage et la limite de végétation. Le protocole repose sur une chaîne de traitement d'images satellites Pléiades sur l'outil de traitement d'image libre Orfeo ToolBox (OTB) développé par le CNES. Un script shell/bash permet l'automatisation de l'extraction de la ligne de rivage. Ce script est divisé en trois parties à savoir:

1) Une préparation de l'environnement de travail: Le répertoire de travail est défini par l'emplacement du script qui doit être dans le même dossier que le raster découpé. L'initialisation des variables consiste à partir du nom de fichier image connu, le nom et le chemin des fichiers raster contenant les résultats sont définis vers deux répertoires. Un répertoire de travail dont les chemins des variables ligne de rivage et ligne de végétation sont définis et un répertoire tampon dont les chemins pour les différents indices radiométriques et les masques sont définis.

2) Calcul d'indices, des masques et des résultats: Trois indices sont calculés avec l'outil `otbcli_RadiometricIndices` à partir des seuils déterminés de manière empirique sur les images Pléiades: NDVI (Indice de Végétation par différence Normalisée), NDWI2 (Indice de l'Eau Normalisée 2) et BI2 (Indice de Brillance 2). Plusieurs masques sont définis à partir des indices, puis ces masques sont combinés avec `otbcli_BandMath` pour générer le masque de la ligne de rivage. Les formules utilisées sont les suivantes:

NDVI: `"im1b1 > 0.35 ? 1:0"` (pour l'enregistrement de la ligne de végétation)

NDVI: `"im1b1 < -0.2 ? 1:0"` (masque eau)

NDWI2: `"im1b1 >0 ? 1:0"`

BI2: `"im1b1 <100 ? 1:0"`

Masque de la ligne du rivage: `"(im1b1*4 + im2b1*2 + im3b1) > 4? 1:0"`

3) Post-Traitement sur QGIS: Les résultats obtenus après l'exécution manuelle de la chaîne de traitement par Orfeo ToolBox (OTB) sont des fichiers raster. Sous QGIS,

³ <https://lareunion.kalideos.fr/drupal/fr>

⁴ <https://dinamis.data-terra.org/>

ces rasters ont été convertis en vecteurs, suivi d'une épuration des données par suppression des polygones intrus à savoir le polygone cadre, les polygones isolés et les polygones en double. Ensuite, les polygones ont été transformés en polylignes via le menu vecteur de QGIS. Après cette conversion, les polylignes ont été scindées et les segments intrus supprimés en vue d'avoir que la ou les ligne(s) suivant l'interface terre-mer. La continuité des lignes pour les zones d'ombre, les zones de Beach Rock et les zones d'écume a été créée et à la fin les segments ont été fusionnés afin d'avoir une seule ligne représentative dans la table attributaire de la couche vecteur. La ligne a ensuite été simplifiée et lissée avant d'être exportée sous le format shapefile attendu par DSAS (Digital Shoreline Analysis System).

Le logiciel MobiTC (développé par le CEREMA⁵) avait permis jusqu'alors d'analyser la mobilité du trait de côte (Trmal *et al.*, 2012). Cet outil n'étant plus maintenu, nous utilisons à présent l'outil *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* de ARGIS (outil SIG propriétaire). Cependant l'outil est aussi accessible en *stand alone* dans sa version 6 mais avec des fonctionnalités réduites pour le moment⁶. Nous avons eu accès aux Licences Arcgis via l'IRD qui met à disposition de ses équipes des licences sous la forme de jetons individuels grâce à l'achat d'une licence institutionnelle.

Le DSAS est un logiciel qui permet à l'utilisateur de calculer des statistiques sur le taux de changement à partir de plusieurs positions historiques du littoral. Le taux de changement a été collecté à des intervalles de 10 m et affiché à la fois statistiquement et spatialement, ce qui permet d'identifier les zones de recul/accrétion sur n'importe quel tronçon du littoral. Le *End Point Rate (EPR)* obtenu en divisant la distance du mouvement de la ligne de rivage par le temps écoulé entre la position la plus ancienne et la position la plus récente de la ligne de rivage est calculé sur la base de travaux de Mahabot (2016).

2.7 Autres mesures hors cadre opérationnel

2.7.1 Les suivis des forçages météo-marins : Le système caméra vidéo de l'Hermitage

Les forçages météo-marins en contexte d'arrière récif ont commencé à être instrumentés en mode exploratoire dans une perspective d'observatoire pérenne durant la 3ème phase de la convention.

Sur la période décembre 2019 à octobre 2022, une caméra est installée sur un support structurel du poste MNS de l'Hermitage, située à environ 30 m du pied de plage et à une hauteur de 8 m. L'objectif de cette installation est d'évaluer comment cette nouvelle instrumentation peut compléter les dispositifs déjà en place sur le site d'étude du SNO Dynalit à l'Hermitage (Drone, DGPS et satellite).

⁵ <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/MobiTC>

⁶ <https://code.usgs.gov/cch/dsas/-/tree/v6.0.168>



Figure 8 : Localisation et caractéristiques du système d'observation par caméra des processus hydrodynamiques que le site MNS

Une chaîne de traitements a été développée à l'UMR Espace-Dev, principalement en utilisant Matlab. Cette chaîne intègre des scripts open source, certains consultables sur internet, d'autres partagés par l'IUEM, et pour la majeure partie, développés par J. Machabee (soutenance de thèse le 5 juillet 2024).

Cette chaîne de traitement peut être divisée en plusieurs phases distinctes. La première phase est la calibration, qui comprend une étape initiale en laboratoire pour déterminer les paramètres internes de la caméra, suivie d'une étape sur le terrain pour situer la caméra dans l'espace. Ensuite, le prétraitement des vidéos (256 Mo, environ 10 minutes, à 2 Hz) consiste à obtenir des images instantanées, des images moyennes et des timetacks (concaténation de lignes de pixels colocalisées). La phase de rectification vise à corriger les images instantanées et moyennes pour éliminer les distorsions radiales et tangentielles. Vient ensuite le géoréférencement, qui associe des coordonnées géographiques à chaque point pixel. Enfin, des indicateurs sont définis, avec un focus particulier sur l'étude d'un transect et la position de la ligne d'eau sur ce transect pour le site d'étude.

2.7.2 Caractérisation sédimentaire des estrans sableux

Les caractéristiques sédimentaires des estrans biodétritiques de La Réunion ne sont plus étudiées. Ces questions sont hors d'atteinte des équipes actuelles en termes de moyens humains affectés, aussi bien d'encadrement que techniques. Les estrans biodétritique peuvent se caractériser par une grande hétérogénéité granulométrique qui demande le déploiement d'un large arsenal de protocoles de mesures (morphométrie, granulométrie,...).

Pourtant, elles sont fondamentales dès lors que les mesures de mitigation des impacts des forçages morphogéniques sur les littoraux à La Réunion sont principalement le reprofilage des estrans et des interventions sur le couvert végétal. En effet, la végétation, les irrégularités topographiques sur le haut de plage ou toutes autres rugosités diminuent la compétence du vent, favorisant ainsi le dépôt des sédiments transportés (Meur-Ferec et Ruz, 2002). La compétence du vent dépend également de la cohésion du matériel, de la granulométrie et du fetch.

Plusieurs réflexions ont été initiées, dont celle sur la rugosité des estrans : la rugosité des estrans reflète la morphologie et la granulométrie, dans le cadre d'un stage de Master 2, en continuité avec le programme FEDER Renovrisk Transfert pour produire un proxy sédimentaire. La rugosité est un concept complexe difficile à définir dans un contexte général, car c'est une notion dépendant du contexte d'application et qui englobe un grand nombre de configurations géométriques possibles. Elle est cependant reconnue sous le terme de mesure des « irrégularités ». Aussi, la rugosité est souvent calculée comme le rapport de la distance réelle le long d'une surface à la distance linéaire (Storlazzi *et al.*, 2016). À une échelle plus large, elle peut être considérée comme équivalente à la topographie, qui permet de mesurer les variations du relief. Historiquement, la rugosité a été mesurée soit à l'aide de méthodes manuelles simples et subjectives telles que la « chaîne et la bande », basées sur le principe de triangulation, ou de méthodes géophysiques compliquées et coûteuses (Storlazzi *et al.*, 2016). Les méthodes qui consistent à calculer la rugosité à partir des outils géospatiaux sont cependant en plein

développement. Ces approches sont liées au développement de la photogrammétrie très haute résolution (Casella *et al.*, 2022) et à l'exploitation des MNT et MNE produits à travers différents indicateurs (Burns *et al.*, 2015). L'indice de rugosité fournit une indication de la texture, de la rugosité ou de l'irrégularité d'une surface en se basant sur des mesures spécifiques, telles que les pentes locales, les variations d'altitude, les déviations entre points ou d'autres paramètres liés à la topographie.

L'analyse de la rugosité s'est faite sur deux logiciels : ENVI Classic et QGIS. Ces mesures sont intégrées comme des fonctions de base. ENVI Classic est un logiciel propriétaire de traitement d'images géospatiales. Il offre de nombreuses fonctionnalités pour l'analyse des données d'imagerie. Il permet de calculer les pentes à partir d'images raster en utilisant différentes méthodes, telles que la méthode de différence d'altitude ou la méthode des moindres carrés. Le logiciel utilise les valeurs d'altitude dans l'image pour déterminer la variation de pente dans une zone donnée. QGIS est un logiciel libre de SIG qui propose une variété d'algorithmes appropriés pour cette tâche, tels que le calcul des pentes, des dérivées et d'autres indicateurs de rugosité.

Ces logiciels permettent d'obtenir des mesures quantitatives de la rugosité du terrain à partir de MNT. Ces logiciels calculent la mesure quantitative de l'hétérogénéité du terrain, telle que décrite par Riley *et al.* en 1999. Elle est calculée pour chaque emplacement en résumant les changements d'altitude dans une grille de 3x3 pixels. Cette mesure est obtenue en considérant la différence d'élévation entre une cellule centrale et les 8 cellules voisines. Ces analyses permettent de caractériser la rugosité de manière objective.

Après avoir calculé la rugosité du MNT sur les parties non végétalisées du profil, on procède à la création de profils de terrain. Ce profil permet d'obtenir des mesures précises de l'altitude à intervalles réguliers le long des tracés. Cette approche par profils permet plus facilement de comparer les caractéristiques de rugosité entre différentes zones ou périodes. En utilisant les outils de dessin disponibles dans QGIS, on peut créer des polygones qui représenteront les profils de mesure.

L'outil Profile Tool de QGIS pour générer des profils topographiques sur une série temporelle de MNT permet d'extraire des informations détaillées sur les variations d'altitude qui permettent de mesurer et évaluer la variabilité de la rugosité le long de chaque profil et dans le temps.

À partir de cette réflexion méthodologique, il faudra à présent déterminer les conditions d'exploitation de cet indicateur sur des environnements anthropisés. Dans ce rapport, les résultats ne seront donc pas présentés.

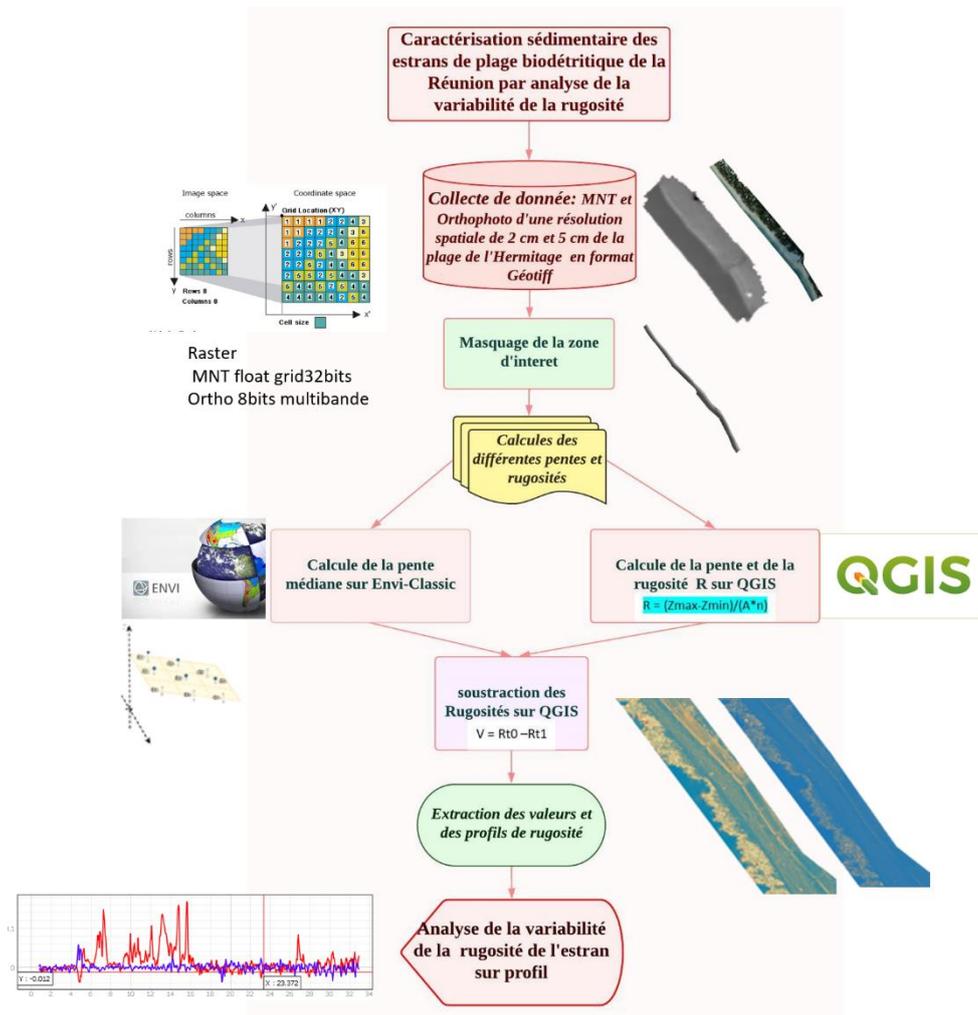


Figure 9 : Protocole d'étude de la rugosité des estrans à partir des MNT drone (source : Mahadia Mohamed, 2023)

3 Bancarisation et diffusion des données

3.1 SI de l'OSU-Réunion

En complément des services techniques et instrumentaux proposés par l'OSU-Réunion, ce dernier propose également un Système d'Information (SI) pour la gestion du cycle de vie de la donnée, depuis son acquisition jusqu'à sa diffusion.

La figure 10 schématise le flux de la donnée mis en place à l'OSU-Réunion, illustré ici pour 3 IR différentes : (i) ACTRIS pour l'observation des processus atmosphériques, (ii) OZCAR pour la zone critique, (ii) ILICO pour le domaine littoral et côtier. Le flux de données au sein du SI de l'OSU-Réunion se résume à 3 principaux niveaux :

- L'acquisition : elle peut être permanente dans le cas de réseaux d'observations pérennes, ou ponctuelle dans le cadre de programmes de recherches. Les modes d'acquisition de la donnée brute sont soit automatisés, soit manuels.
- La gestion : elle consiste à classer, ranger la donnée sur les serveurs du SI de l'OSU-Réunion. Différents traitements allant d'un simple filtrage à une validation scientifique complète peuvent également être appliqués à la donnée entrant au niveau 2. Les règles de traitement, de stockage, de nommage des données sont dictées par les différents IR ou SNO pour lequel ou lesquels la donnée est produite.
- La diffusion : elle a pour objectif de rendre visible la donnée sur des catalogues numériques des pôles de données nationaux ou locaux. La diffusion suit différentes règles dictées par le réseau d'observation pour lequel la donnée est produite, avec un accès public ouvert ou restreint. Elle peut se faire dès l'acquisition de la donnée sans aucun traitement ni filtrage, ou après une procédure d'analyse validée scientifiquement.

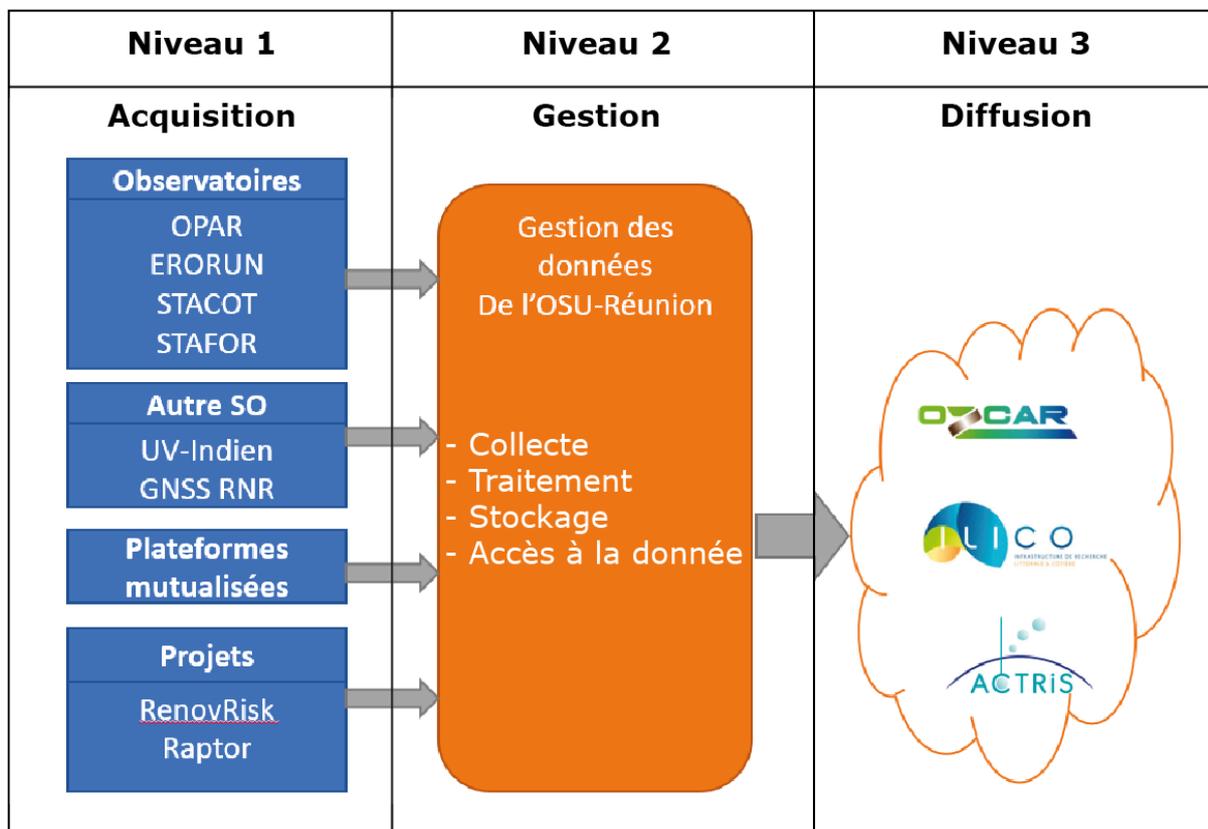


Figure 10 : schématisation du flux de données géré par le SI de l'OSU-Réunion, pour les exemples des IR ACTRIS, OZCAR et ILICO.

Ce SI a pour objectif de répondre aux différentes exigences des Infrastructures de Recherche (IR), des SNO, des pôles ou centres de données et services nationaux. Son

organisation nécessite alors d'être suffisamment souple pour répondre à des besoins souvent très différents, et réactive pour répondre à toute nouvelle demande de changement au niveau national.

Le choix a été fait de conserver et diffuser la donnée localement, sur les serveurs de l'OSU-Réunion, avec une visibilité et une interopérabilité avec les catalogues de données nationaux, en respectant le principe FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable).

3.2 Disponibilité des données

Les données bancarisées à l'OSU-Réunion sont diffusées sur le catalogue Geosur (Geosur - Accueil (univ-reunion.fr)) qui recense l'ensemble des données d'observations pérennes ou acquises sur programme de recherche, produites par l'OSU-Réunion et les laboratoires partenaires. Toutes ces données et métadonnées sont diffusées en open access, assurant un accès libre à l'ensemble des informations relatives à la généalogie de la donnée (contexte et méthodes de production, responsables scientifiques et opérateurs terrain) présentées sous la forme d'une fiche de métadonnée (Figure 11). L'accès à la donnée peut se faire en téléchargement direct (la donnée est alors en open-access) ou sur requête auprès de l'auteur ou d'un point contact (responsable de la donnée) identifié sur la fiche de métadonnées. Dans tous les cas, des conditions d'utilisation et de citation peuvent être mentionnées et à préciser pour toute exploitation de cette donnée.

Selon les termes de la charte du SNO Dynalit, les données produites et validées sont à diffuser en open data, et le socle minimal requis se compose de 2 modèles numériques de terrain (MNT) des plages intégrant les sites ateliers. Les conditions d'accès aux données complémentaires produites dans le cadre de ce SNO restent à la convenance du responsable scientifique. Le choix a ainsi été fait d'ouvrir l'accès à l'ensemble des données de suivis des littoraux coralliens de La Réunion.

Le catalogue Geosur doit permettre l'accès "open data" aux données suivantes par instrument :

- Les données topographiques relevées bi-annuellement aux DGPS depuis Décembre 2012 :
<https://geosur.osureunion.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/d07f6653-8f82-4c78-ba8e-8f0e430f2aa4>
- À compléter avec les données :
<https://geosur.osureunion.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/02c45ddb-7a1e-4b0a-bff5-c956361d45c1>
- Les MNT produits bi-annuellement par photogrammétrie aérienne, acquise par drone :
<https://geosur.osureunion.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/c0cae920-5c49-4ede-b455-82e8a49ccb1d>

- Les couches vectorielles des limites du trait de côte, sur la base de la BD ORTHO® de l'IGN, depuis 1997.
- Les couches vectorielles des limites du trait de côte, sur la base des images satellites Pléiades, depuis 2017.

Les données historiques de profils de plage sur la période 1992-2011, de par la méthode d'acquisition et leur niveau de précision différent, ont été bancarisées mais ne sont pas accessibles ni partagées.

Les données sont accompagnées de fiches métadonnées (Figure 11) permettant de contextualiser la donnée (étendue, géographique, mode de production, précision, période, référent,...). Une mise à jour est en cours pour intégrer les nouvelles conditions de la mesure décrites ci-dessus.

The screenshot shows a metadata page on the Geosur website. At the top, there are navigation links: 'Geosur', 'Catalogue de données', 'Sites d'observation', and 'Services d'accès aux données'. Below this is a search bar with 'Retour à la recherche' and navigation arrows. The main title is 'Levés Drone 2019 - île de La Réunion, St-Gilles Les Bains, Plage de l'Hermitage'. A blue box contains descriptive text: 'Modèle Numérique de Terrain (MNT) et Orthophotographie du secteur de plage de l'Hermitage (La Réunion, Saint-Gilles les Bains, 97460). - Le MNT est construit par photogrammétrie aérienne acquise par drone. - Les données sont acquises sur le site d'observation Station Côtière et Marine (STACOT) du SNO Dynamique et produites par l'OSU-Réunion et l'UMR Espace-Dev.' A blue diagonal stamp reads 'Mis à jour continue'. Below this is a 'Téléchargements et liens' section with three rows: 'MNT drone Hermitage 2019-04-09' with a 'Télécharger' button, 'ORTHO drone Hermitage 2019-04-10' with a 'Télécharger' button, and 'Site Web DYNALIT' with an 'Ouvrir le lien' button. The 'À propos de cette ressource' section includes 'Catégories' (Cartes & graphiques, Jeux de données, Imagerie/Cartes de base/Occupation des terres) and 'Mots-clés' (SNO DYNALIT, IR ILICO, MNT, Orthophotographie, DRONE, île de La Réunion). On the right, there is an 'Aperçu' section with a satellite image of the beach, labeled 'Plage Corallienne Hermitage, La Réunion'. Below that is 'Étendue spatiale' with a map showing the location near 'Ravine de l'Hermitage', 'La Saline les Bains', 'L'Ermitz', and 'La Saline'. At the bottom right, there is an 'Étendue temporelle' section with 'Date de publication' (2019-10-17) and 'Période' (mar. avr. 09 2019 04:00:00 GMT+0400 to mer. avr.).

Figure 11: exemple d'une fiche de métadonnées du catalogue GEOSUR (<http://geosur.osureunion.fr>).

4 Résultats sur la période 2021-2023

4.1 Valorisation scientifique

Pour la période, la valorisation scientifique est de 3 ordres : des publications scientifiques, des conférences et des thèses. Ces productions concernent le site de La Réunion mais aussi le site labellisé SNO Dynalit Mayotte car une collaboration de recherche a été initiée entre 2021 et 2023 avec l'Université de Mayotte pour soutenir leur activité et initier des premières comparaisons instrumentales intersites.

4.1.1 Sur le site de La Réunion la valorisation scientifique

- **Article dans une revue ACL internationale**

- Tulet, P., Aunay, B., Barruol, G., Barthe, C., Belon, R., Bielli, S., Bonnardot, F., Bousquet, O., Cammas, J.-P., Cattiaux, J., Chauvin, F., Fontaine, I., Fontaine, F.R., Gabarrot, F., Garabedian, S., Gonzalez, A., Join, J.-L., Jouvenot, F., Nortes-Martinez, D., Mékiès, D., Mouquet, P., Payen, G., Pennober, G., Pianezze, J., Rault, C., Revillion, C., Rindraharisaona, E.J., Samyn, K., Thompson, C., Vérèmes, H., 2021. ReNovRisk: a multidisciplinary programme to study the cyclonic risks in the South-West Indian Ocean. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04624-w>

- **Conférence**

Jaimie Machabée , France Floc'H , Gwenaëlle Pennober (2022) Video camera to monitor microtidal fringing reef beaches : Lesson from a year of observation in Reunion Island, WIOMSA 12th Scientific Symposium, Oct 2022, Port Elizabeth, South Africa

- **Soutenance de thèse**

Jaimie Machabée . Caractérisation de l'hydro-morphodynamique de la zone intertidale du récif frangeant de l'Hermitage par caméra vidéo (La Réunion) Université de La Réunion, 5 juillet 2024 sous la direction de Pennober G. (Univ-Réunion), Delacourt C (Univ-Bretagne occidentale) Floc'h F. (Univ-Bretagne occidentale).

4.1.2 Collaboration scientifique avec l'Université de Mayotte

Grâce à l'expertise acquise à La Réunion et l'existence d'une école doctorale à l'Université de la Réunion et de l'implantation de l'UMR Espace-dev à la Réunion et à Mayotte, une collaboration avec l'Université de Mayotte qui porte le SNO Dynalit Mayotte a été initiée sous la forme de la co-direction d'une thèse.

- **Article dans une revue ACL internationale**

Sarah Charroux , Matthieu Jeanson , Sophie Morisseau , Gwenaelle Pennober.
Short-term observation beach hydro-sedimentary dynamics of reef pocket: study case of Sakouli, Mayotte. Journal of Coastal Research, 2023, 40 (1), <10.2112/JCOASTRES-D-23-00021.1>.

- **Conférences**

Charroux, M Jeanson, S Morisseau, Y Mercky, G Pennober (2022) Seasonal evolution on reef fringed pocket beaches in a context of relative sea level rise. ICC2022, 10th International Conference of the International Association of Geomorphologists (IAG) Coimbra (Portugal) 12- 16 September 2022

S Charroux, M Jeanson, S Morisseau, Y Mercky, G Pennober (2022) Short-term observation beach hydro-sedimentary dynamics of reef pocket: study case of Sakouli, Mayotte, WIOMSA, 12th scientific Symposium. Port Elizabeth, South Africa, Oct 2022.

- **Soutenance de thèse**

Sarah Charroux (2023). Les systèmes littoraux de Mayotte : Dynamiques hydro-sédimentaires dans un contexte de subsidence rapide. Géographie. Université de la Réunion. <tel-04428839> co-direction Pennober G. (Univ-Réunion), Jeanson M. (Univ-Mayotte)

4.2 Former et diffuser les savoirs

4.2.1 Accueil d'étudiants en stage de master

La formation et la formation par la recherche sont associées à la démarche du SNO Dynalit. Depuis 2012 plusieurs stages de Master ont été réalisés à partir des données acquises. Sur la dernière période un stage de M1 (2 mois) et deux stages de master 2 (5 mois) ont été réalisés.

Tableau 1 : Stages de master réalisés dans le domaine de la convention

Nom Prénom	Année durée	titre	Master	Direction	Université
Olivier Sababady	2023 5 mois	Contribution à la caractérisation du rivage dans le contexte de l'observatoire du littoral de La Réunion	M2RNET GT	Pennober	Université de La Réunion
Marion MOSSINO	2022 3 mois	Suivi morphodynamique des plages récifales de l'ouest de l'île de La Réunion	M1 IGREC	Pennober	Université de Bretagne Sud

M Mahadia AHMED	2022 5 mois	Caractérisation sédimentaire des estrans de plages biodétritiques de La Réunion par analyse de la variabilité de la rugosité	M2 RNET	Pennober	Université de La Réunion
-----------------	----------------	--	---------	----------	--------------------------

4.2.2 DIPLÔME UNIVERSITAIRE "Processus d'érosion des plages et stratégies de gestion du trait de côte"

Les 4eme et 5eme sessions du DIPLÔME UNIVERSITAIRE "Processus d'érosion des plages et stratégies de gestion du trait de côte" se sont déroulées respectivement les

- entre le 3 et le 7 novembre 2022
- entre le 19 au 23 octobre 2023

Elles ont été conjointement organisées par Gwenaëlle Pennober, professeur à l'Université de La Réunion et Madame Vidoni Vérane, chargée d'opérations risques littoraux et observatoire du littoral SPRINR/UPRN au sein de la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Réunion.

Ce compte rendu de session de formation revient sur les plannings du Diplôme Universitaire sur les intervenants, les thèmes d'intervention et sur les participants et les conditions d'évaluation.

- **Le Planning et intervenants**

Le planning type des 3 journées est le suivant. La première journée est consacrée comme chaque année à des visites de sites. Chaque année le choix des visites fait l'objet d'une discussion entre la DEAL, Le BRGM et l'Université (voir le programme ci-dessous). Les 2 journées en salle se sont déroulées sur le campus du Moufia de l'Université de La Réunion dans les locaux de l'OSU-Réunion (voir photos 1 et 2). Le tableau ci-dessous précise les thèmes des interventions, les créneaux planifiés des interventions, la liste des intervenants et leur organisme de rattachement. La diversité des acteurs impliqués et son adaptation chaque année atteste du caractère partenarial de la formation tel que pensé dans l'Observatoire du Littoral et de la volonté de l'adapter au contexte et à l'actualité de l'île de La Réunion dans le domaine de la gestion du littoral.

Tableau n° 2 : Programme des interventions de la session 2022 du DU "Processus d'érosion des plages et stratégies de gestion du trait de côte".

Matières	Volume prévisionnel	Dates	Heures de début	Heures de fin	CM prévisionnel	Prénom	Nom		Statut
UE 1 : les différents littoraux de La Réunion									
Etudes de sites : L'Hermitage, Cap Champagne	7,5	03-nov-22	8:00	9:30	1,50	Gwenaelle	PENNOBER		Pr UR
Etudes de sites : Cap Champagne		03-nov-22	9:45	11:15	1,00	Gwenaelle	PENNOBER		
Etudes de sites : Bie de Saint Pual		03-nov-22	11:30	12:30	1,00	Remy	BELON		Professionnel ext BRGM
Etudes de sites : cimetière Saint Denis		03-nov-22	14:00	17:00	0,50	Remy	BELON		Professionnel ext BRGM
UE 2 : Environnement littoraux sédimentaires : rappel des concepts et définition									
Introduction	7,50	04-nov-22	8:00	8:30	0,50	Gwenaelle	PENNOBER		Pr UR
Géomorphologie littorale (falaises, détritiques)		04-nov-22	8:30	9:30	1,00	Remy	BELON		Professionnel ext BRGM
Géomorphologie littorale : présentation du film de D. Jay		04-nov-22	9:30	9:45	0,15				DEAL
Géomorphologie littorale (biodétritique)		04-nov-22	10:00	11:00	1,00	Gwenaelle	PENNOBER		Pr UR
notion d'hydrodynamique côtière (SNO Dynalit, Reefemps, SONEL)		04-nov-22	11:00	12:15	1,25	Emmanuel	CORDIER		IGE OSU-UR
Géomorphologie littorale suivis (SNO dynalit : profils, MNT drone, trait de côte)		04-nov-22	14:00	15:00	0,50	Gwenaelle	Pennober		CDD OSU REUNION
Géomorphologie littorale suivis (SNO dynalit- Camera)		04-nov-22	15:00	15:30	0,50	Jaimie	MACHABEE		Doctorante UMR - Espace DEV UR
Géomorphologie littorale suivis (Obscot, autres suivis des houles)		04-nov-22	15:45	17:15	2,00	Remy	BELON		Professionnel ext BRGM
UES : Techniques actuelles de surveillance et de préservation du milieu littoral									
Risques côtiers PPRI (loi climat et résilience) outils	7,00	07-nov-22	8:00	8:30	0,50	Xavier	PAYET		ext professionnel chargé d'étude Littoral (DEAL)
Risques côtiers PPRI (volet réglementaire)		07-nov-22	8:30	9:00	0,50	Verane	Vidoni		ext professionnel chargé d'étude Littoral (DEAL)
GEMAPI			9:00	0:00					TCO
Risques côtiers : Caractérisation des aléas (PPRI)		07-nov-22	9:30	10:00	1,00	Remy	BELON		Professionnel ext BRGM
Risques côtiers : Nouvelle Stratégie de l'état de gestion intégrée du trait de côte		07-nov-22	10:00	11:00	1,00	Patrick	JOSSERAND		ext professionnel Responsable unité Risque Littoral (DEAL)
Observatoire : SI GEOSUR		07-nov-22	11:00	12:00	1,00	Guillaume	PAYEN		IGE OSU-UR
Observatoires : Stratégie Nationale autour des observatoires		07-nov-22	13:30	15:00	1,50	Christophe	DELACOURT	pb de connexion	Pr UR
Risques côtiers PPRI (IMMOcor, guide d'ouvrage, gestion sédimentaire) résultats de la recherche RENOVRIISK -transfert		07-nov-22	15:00	16:00	1,00	Remy	BELON		Professionnel ext BRGM
Renovrisk -Transfert - Conclusion		07-nov-22	16:00	16:30	0,50	Gwenaelle	PENNOBER		Pr UR

- Les candidats et diplômés des sessions 2022 et 2023

Lors des 2 dernières sessions 25 ingénieurs, techniciens ont suivi la formation et 1 élue.

En 2022, nous avons reçu 14 candidatures, 14 étudiants ont été acceptés pour suivre la formation, 1 étudiant n'a pas pu se libérer pour suivre la formation, 11 ont passés les évaluations pour l'obtention du diplôme universitaire, le taux de réussite est de 100%.

Tableau 3 : Liste des diplômés de 2022 et leur organisme d'origine

Nom	Prénom	Organisme d'origine
BELIVISEE	GERARD	Mairie Bras Panon
BOYER	JEAN MARIE	Collectivité CINOR
DIJOUX	ALEXANDRE	Mairie de Saint Pierre
LANGLADE	FREDERIC	Mairie de Saint-Denis
LE ROUX	REMY	Collectivité TO
LEGENDRE	FREDERIC	Mairie Bras Panon
MARTINO	CÉCILE	Collectivité CINOR
NASSOR- CALICHIAMA	FAOUZIA	Mairie Du Port
PAYET	THIERRY	DEAL
SALAS	CHRISTOPHE	ONF
VITRY	ERIC	Collectivité TO

Pour la session 2023 nous avons reçu 20 candidatures, 13 étudiants ont suivi la formation, 9 ont passé les évaluations pour l'obtention du diplôme universitaire, le taux de réussite est de 100%.

Tableau 4 : Liste des diplômés de 2023 et leur organisme d'origine

Nom	Prénom	Organisme d'origine
AMOUDOM-MARIAYE	PATRICK	---
MARTEL	STÉPHANE	DEAL
RAOUX	MAXIMILIEN	Mairie du Port
CLERVIL	GILBERT	DEAL
PAYET	BERTRAND	Mairie
VERMINARDI	MYLENE	Mairie Saint Leu
MAHOUSA	ERIKA	Sainte Suzanne
MERCHIOR	MARIE MANUELLA	Mairie Saint Leu Elue
ODON	OLIVIER	Région Réunion

Chaque année, 7 à 8 étudiants du Master 2 RNET-GT (Ressource Naturelles et Risques en Environnement Tropical Insulaire) participent aux 3 journées de formation dans le cadre de l'UE Risques côtiers. Cette mutualisation offre un cadre de formation initiale et continu original.

Le DU "**Processus d'érosion des plages et stratégies de gestion du trait de côte**" étant une formation universitaire accréditée par l'Université de La Réunion, cette formation fait l'objet d'une évaluation pour l'obtention du diplôme du DU. 20 ingénieurs et techniciens ont obtenu le diplôme sur les 2 dernières sessions.

Une cérémonie de remise des diplômes a été organisée le mardi 20 mars 2023 dans les locaux de l'OSU-Réunion.

4.3 Analyses des dynamiques hydro-morpho-sédimentaires

Ces analyses sont de 3 ordres : (i) les données issues de la caméra vidéo couplée à une sonde de pression (ii) l'analyse des volumes différentiels à partir des profils de plage (iii) analyses des tendances sur le MNT SNO dynalite (iv) analyse des dynamiques du trait de côte.

4.3.1 Les informations issues de la caméra vidéo (Machabée, 2024)

Les premiers résultats obtenus de l'analyse de la position de la ligne d'eau sur les *timestacks* moyens, ainsi que du couplage avec une sonde placée sur le platier, couvrant la période du 26 février 2020 au 31 janvier 2021, ont révélé une cyclicité dans la position de la ligne d'eau. On observe un recul de 1,4 m en hiver et une avancée de 0,9 m.

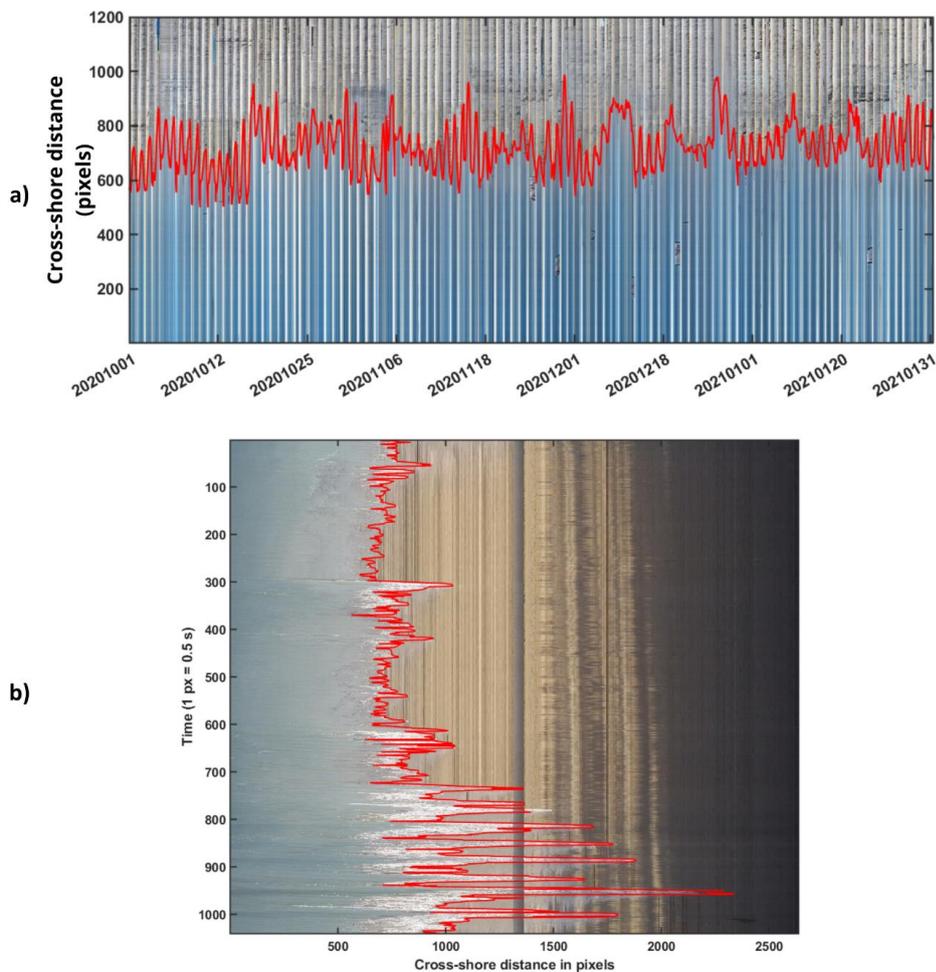


Figure 12 : Exemples de timestacks (a) moyens sur la période octobre 2020 à janvier 2021 (b) instantanés lors de la houle du 8 juillet 2020.

Cependant, une grande variabilité journalière, d'environ 1 m, est notée lorsqu'on se place à un niveau d'eau de 0 +/- 0,01 m IGN. En étendant l'étude sur le bas de la plage, on observe également une variabilité quotidienne du profil de la plage, avec des phases d'érosion et d'accrétion survenant pendant et après des événements de houle, sélectionnés en fonction d'un seuil de hauteur significative (> 90^e percentile). Ces phases d'érosion et d'accrétion ne sont pas uniformes sur l'ensemble du bas de la plage. La plus forte cinématique se situe sur la partie centrale du bas d'estran.

L'étude du jet de rive à partir des timestacks instantanés a permis de mettre en lumière les processus vecteurs de la submersion dans le secteur MNS. On observe notamment que le setup, c'est-à-dire l'élévation du plan d'eau causé suite au déferlement de la houle sur la zone front-récifal (pente externe, crête), contribue à hauteur de 40 % au runup (jet de rive sur l'estran). Les ondes longues, à savoir les ondes infragravitaires ($0,004 < f < 0,04$ Hz) et les ondes de très basse fréquence ($f < 0,004$ Hz), contribuent à près de 50 %, tandis que seulement 10 % sont liés à la bande gravitaire. L'étude des événements de houle révèle que ceux ayant eu un effet érosif étaient caractérisés par une forte composante infragravitaire. Par exemple, lors de l'événement du 29 mars 2020, pour lequel le modèle WW3 prévoyait une hauteur significative de houle de 2,5 m, le runup maximum a atteint 1,6 m, avec un R2% moyen de 0,87 m, tandis que la hauteur significative de houle infragravitaire (IG) et à très basse fréquence (VLF) sur le platier était respectivement de 0,36 m et 0,47 m. En comparaison, lors de l'événement du 9 mars 2020, avec une houle de 3 m, le runup était de 1,2 m, avec un R2% moyen de 0,47 m, et les hauteurs significatives de houle IG et VLF sur le platier étaient respectivement de 0,25 m et 0,20 m. Le R 2% représente la valeur de runup dépassée 2% du temps, donc les valeurs extrêmes. Les périodes observées correspondent aux modes de phénomène de résonance et nécessitent une étude plus approfondie.

La caméra a également permis d'observer d'autres phénomènes, notamment une exondation anormalement prolongée des coraux du platier récifal, un marnage important et ses conséquences sur la position de la ligne d'eau sur l'estran, ainsi qu'un événement de houle australe significatif ($H_s > 5$ m). À ce jour, certaines données restent encore inexploitées, offrant ainsi la possibilité de confirmer ou d'infirmer les résultats précédents, notamment en ce qui concerne la cyclicité de la position de la ligne d'eau.

Les pistes d'amélioration du système caméra envisagées sont un passage à Python et l'automatisation des phases de prétraitements pour produire un outil libre. D'autres applications de ce type à La Réunion ont été proposées dans le cadre du programme Interreg Telcoast en cours d'instruction.



Figure 13 : Caractéristiques de la position de ligne d'eau moyenne

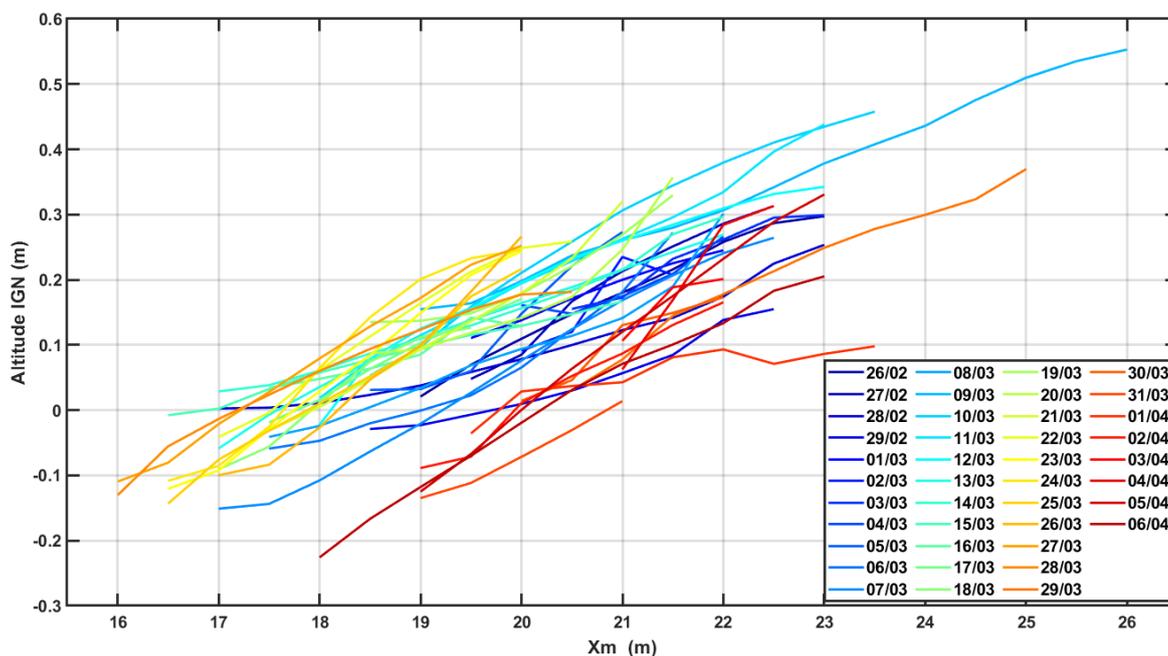


Figure 14 : Profils journaliers du bas de plage dressés sur la période 26 février 2020 au 6 avril 2020

4.3.2 Analyse des volumes différentiels sur les profils de référence sur la période 2021-2023

Dans l'objectif de quantifier les processus morphosédimentaires des plages d'arrière récif à moyen terme, l'analyse de données topographiques de profils de plage acquis par DGPS permettent à la fois d'étudier la morphologie des plages mais également

de quantifier des volumes de sédiments mobilisés à différents échelle spatiale et temporelle sur le site labellisé SNO Dynalit.

- **Représentation des profils sur la période 2021-2023**

La représentation des profils sur la période 2021-2023 montre qu'il n'y a pas de changement majeur dans la morphologie générale des profils mesurés.

Sur le **compartiment de l'Hermitage Nord**, toutefois le profil ROD montre sur l'estran une amplitude de variation de l'ordre de 4 m et de 1 m pour BRI. Rappelons que le profil BRI n'est pas dans le secteur affecté par les reprofilages et extractions de matériaux (Figure 15)

Sur le **compartiment Hermitage sud / La Saline**, le profil TDO montre une variation étonnante dans la partie végétalisée avec l'apparition et la disparition saisonnière d'une dune bordière végétalisée. Le profil ONF quant à lui semble montrer un démaigrissement à l'échelle de l'estran (Figure 16).

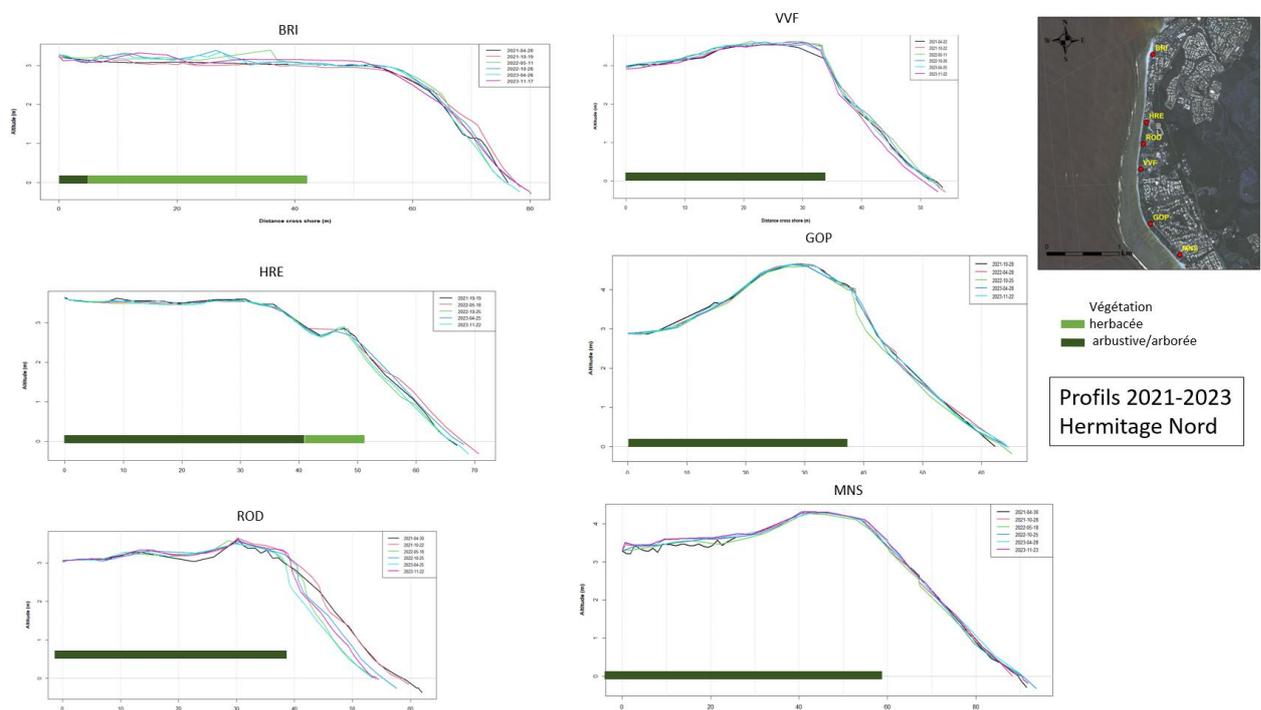


Figure 15 : Profils de la section Hermitage Nord sur la période 2021-2023.

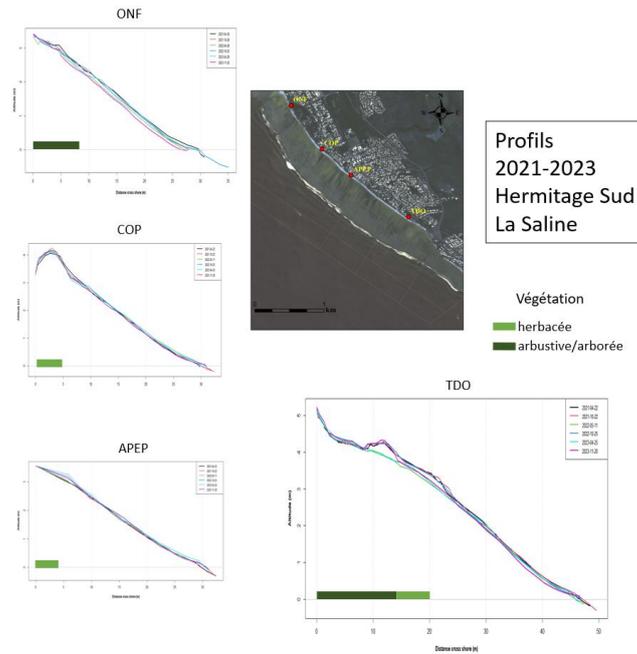


Figure 16 : Profils de la section Hermitage Sud - La Saline sur la période 2021-23.

- Analyse des bilans volumiques

Nous n'avons pour but d'établir aucune information sur les interventions humaines en termes de recherche et de prélèvements sédimentaires. Les bilans volumiques profils tiennent compte des interventions sur l'arrière plage si le PR (point de référence) du profil a été positionné en position rétro-littorale, ce qui peut masquer certains processus en cours sur l'estran.

Le **compartiment de l'Hermitage** présente des situations toujours contrastées et avec des tendances différentes.

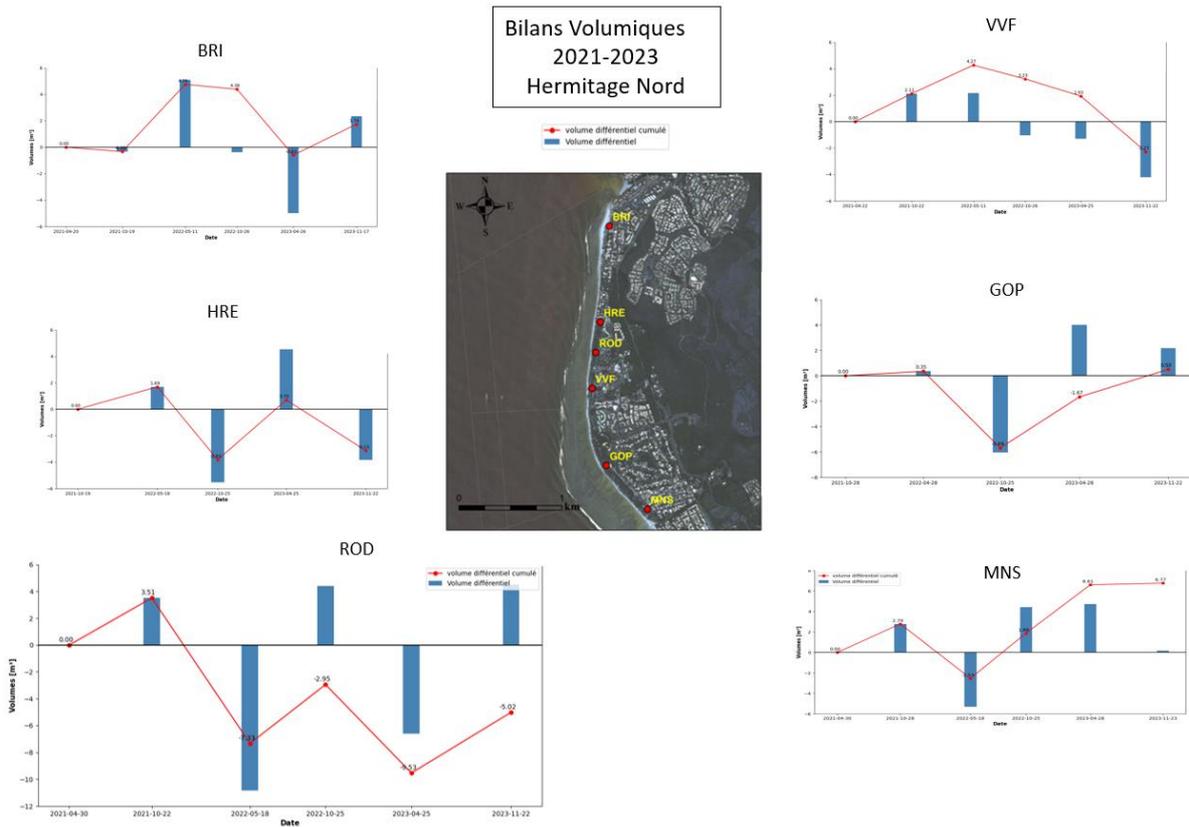


Figure 17 : Bilans volumiques saisonniers sur la période avril 2021- décembre 2023 pour le secteur Hermitage nord

Avec un profil ROD (Rondavelle) relativement stable en volume sur la période précédente (2017-2021) présente à présent un déficit par rapport à la situation 2021 avec de forts déficits liés aux périodes cycloniques, notons le passage du cyclone Batsirai en février 2022. Des déficits s’observent aussi après la saison cyclonique 2022 pour HRE GOP et MNS. Pour la saison cyclonique 2023 elle impact significativement les profils BRI, HRE et ROD.

Sur ce secteur, sur cette période ROD présente les plus fortes variations volumiques (perte jusqu’à 7,33 m³ à l’issue de la saison cyclonique 2022) alors que les variations sur les autres profils sont au maximum de l’ordre de + 4,5 m³. Bien qu’ayant une tendance au démaigrissement, ROD présente des accrétions et érosions saisonnières traduisant des transferts sédimentaires.

On notera aussi que MNS décrit comme atone (Mahabot, 2016) présente un engraissement sur les deux dernières périodes ce qui traduit peut-être les interventions humaines sur ce secteur (recharges, reprofilages).

Le profil des Brisants (BRI) avait montré une forte variabilité historique se traduisant sur la période étudiée par une relative stabilité. De même le profil du VVF, qui sur la période précédente représentait la plus forte perte sédimentaire (de l’ordre de 15m³ en 2021), a vécu une période de recharge faible (avec une recharge cumulée de 4,27 m³ entre avril 2021 et avril 2022) et de nouveau en érosion depuis la fin de la saison australe 2022.

Au sud de la passe de l'Hermitage, le compartiment de La Saline est suivi par 4 profils dont 3 présentent des situations faiblement déficitaires. Les plus fortes variations concernent le profil TDO. Le profil APEP présente quant à lui une légère recharge cumulée mais l'impact de la saison australe 2023 a réduit cette accrétion à +1,27 m³.

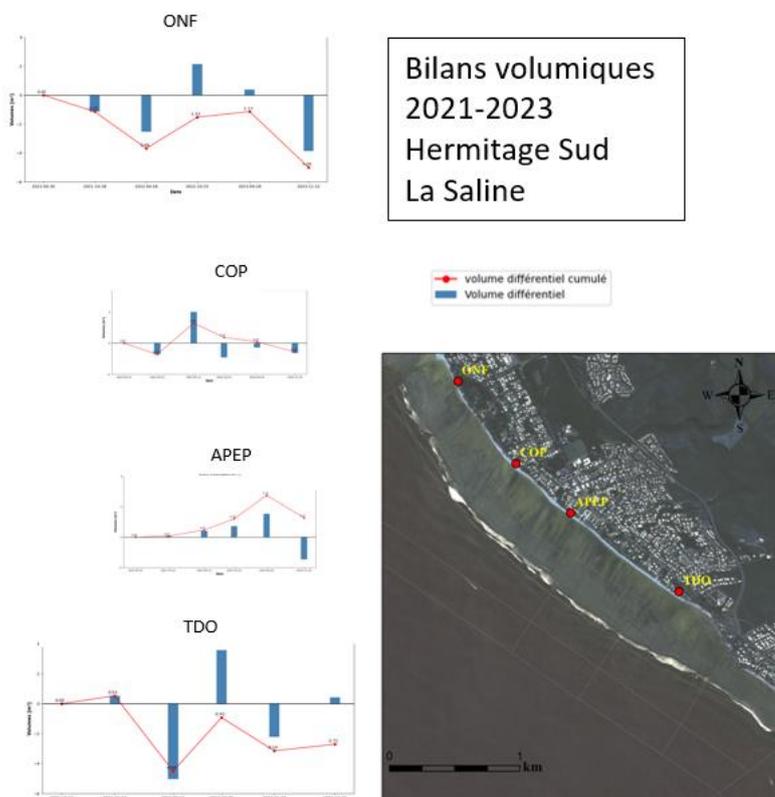


Figure 18 : Bilans volumiques saisonniers sur la période avril 2021- décembre 2023 pour le secteur l'Hermitage sud La Saline

La représentation cartographique des bilans sur la période montre une tendance à l'érosion sauf pour le poste MNS (en accrétion), APEP et BRI relativement stables (Figure 18).

Carte des Bilans volumiques 2021-2023
sur les profils de référence
Profils :
Avril 2021- novembre 2023
Sauf GOP et HRE octobre 2021 – novembre 2023

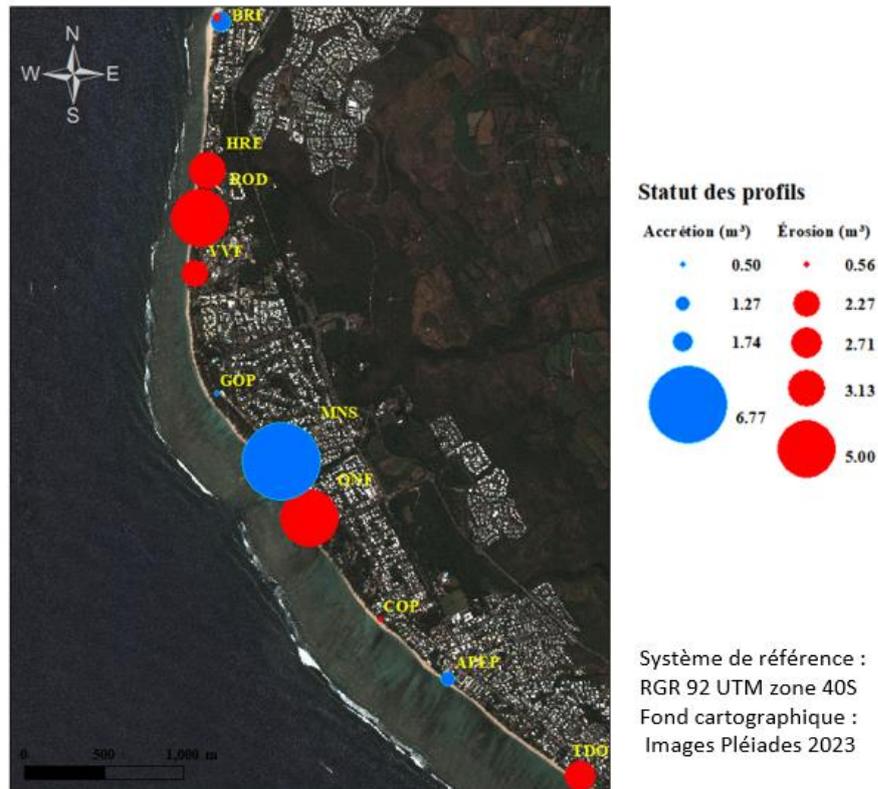


Figure 19: Carte des Bilans volumiques 2021-2023 sur le secteur Hermitage La Saline

Il est intéressant de contextualiser ces observations avec la tendance à l'échelle temporelle de l'observatoire c'est-à-dire en 2023 à 10 ans. La carte présentée en figure 20 montre l'extraordinaire accrétion au niveau de BRI lié à la perturbation de la dérive littorale par la construction des digues du Port de Saint Gilles qui masque par son importance l'accrétion du profil APEP toujours par rapport à sa situation de 2013, l'érosion de ONF, VVF et TDO entre 8.13 et 4,33 m³ en 10 ans. Pour les autres profils la tendance n'est pas significative à l'échelle du profil (estran, dune).

Carte des Bilans volumiques 2013-2023
 Sur 2 profils distants de 10 ans
 Profil décembre 2013- novembre 2023

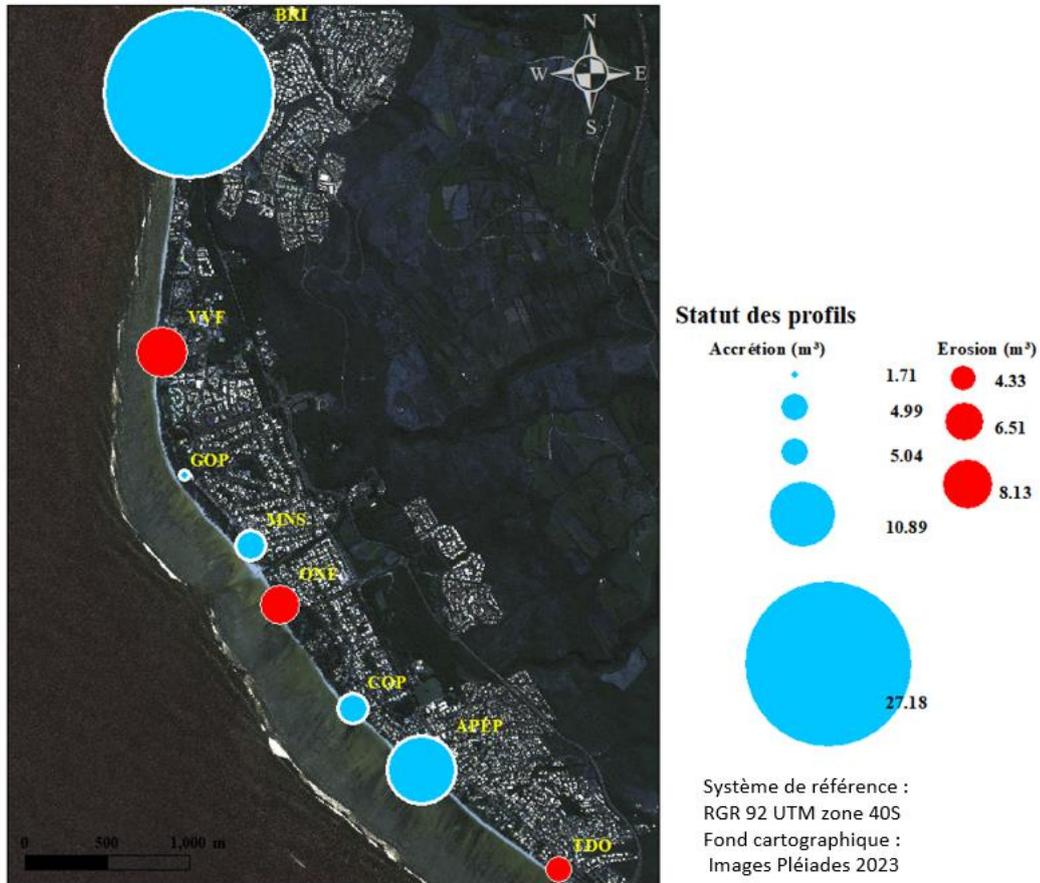


Figure 20: Carte des Bilans volumiques 2013-2023 sur le secteur Hermitage La Saline

- Analyse de la tendance par les MNT

La soustraction des MNT sur le secteur de la passe de l'Hermitage entre les profils GOP et ONF montrent une situation plus érosive que les profils car des accrétions en arrière dune peuvent masquer des pertes de sédiments sur la plage à l'échelle du profil. On notera que sur la période 2021-2023 entre le secteur dit des restaurants de plage aujourd'hui disparus et GOP se concentrent les plus fortes pertes sédimentaires. Le secteur autour de MNS reste le plus stable alors que ONF montre une baisse du niveau de la plage.



Figure 21 : Soustraction des MNT du 04/30/2021 au 04/28/2023 sur la passe de l'Hermitage entre les profils GOP et ONF

4.3.3 Analyse des dynamiques du trait de côte

L'analyse des dynamiques du trait de côte est réalisée par la représentation de la progression ou de la régression des traits de côte de référence (pied de plage, limite de végétation).

Sur le site de l'**Hermitage Nord**, sur la période 2021-2023 la ligne de rivage pied de plage d'une avancée au nord (ce que ne montrait pas le suivi du profil des Brisants), un recul dans le secteur médian entre VVF et ROD et une situation au sud assez positive sauf sur un secteur médian entre APEP et TDO.

Dans le secteur de la Hermitage sud **Saline**, la situation est contrastée sur tout le transect avec des secteurs successifs en accrétion et d'autres en érosion.

Cinématique du bas de plage sur la période 2021-2023

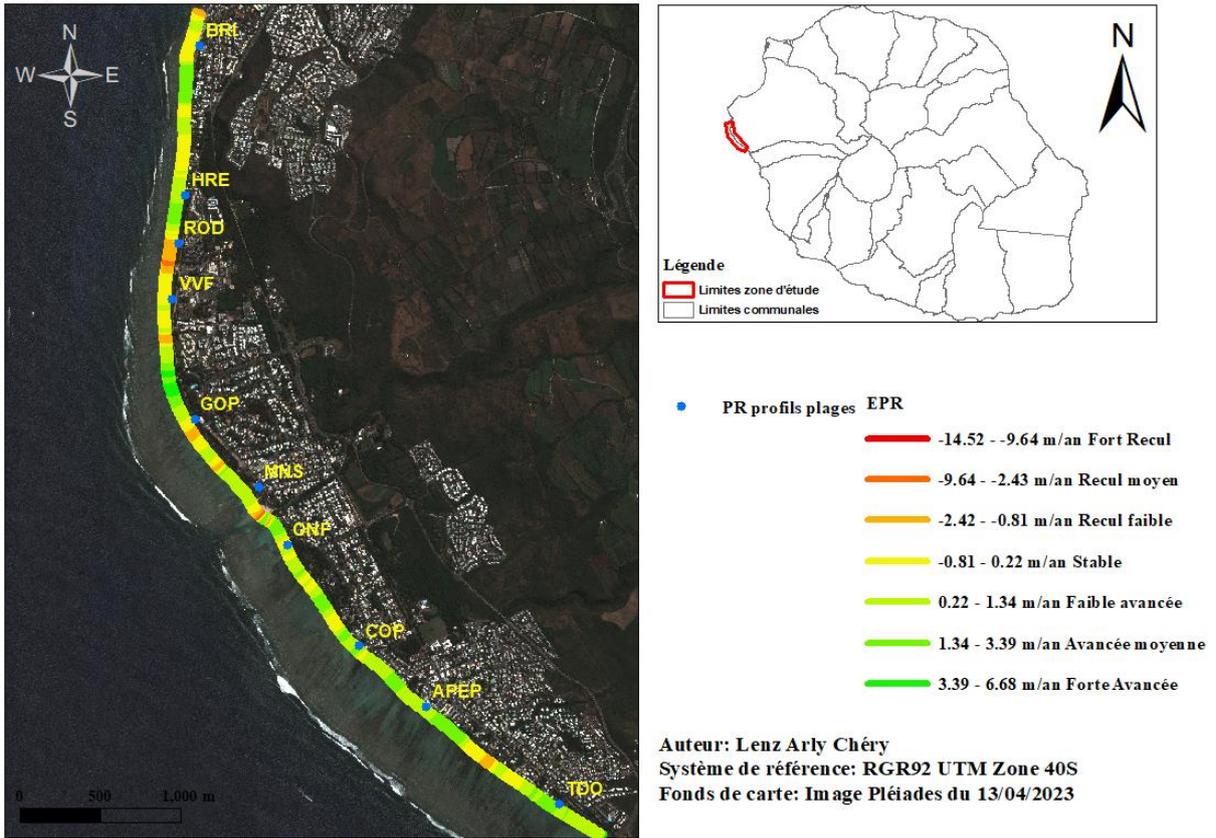


Figure 21: Cinématique du pied de plage sur la période 2021-2023 dans le secteur Hermitage La Saline (réalisation : L. Arly Chery, 2024)

A l'échelle de la durée de vue de l'observatoire, c'est-à-dire 10 ans, le recul du rivage apparaît plus significativement avec en particulier un taux de recul pouvant aller jusqu'à 1,31 m par an dans le secteur de ROD et VVF. Entre GPO et MNS un recul jusqu'à 0,35 m par an.

Cinématique du trait de côte sur la période 2013-2023

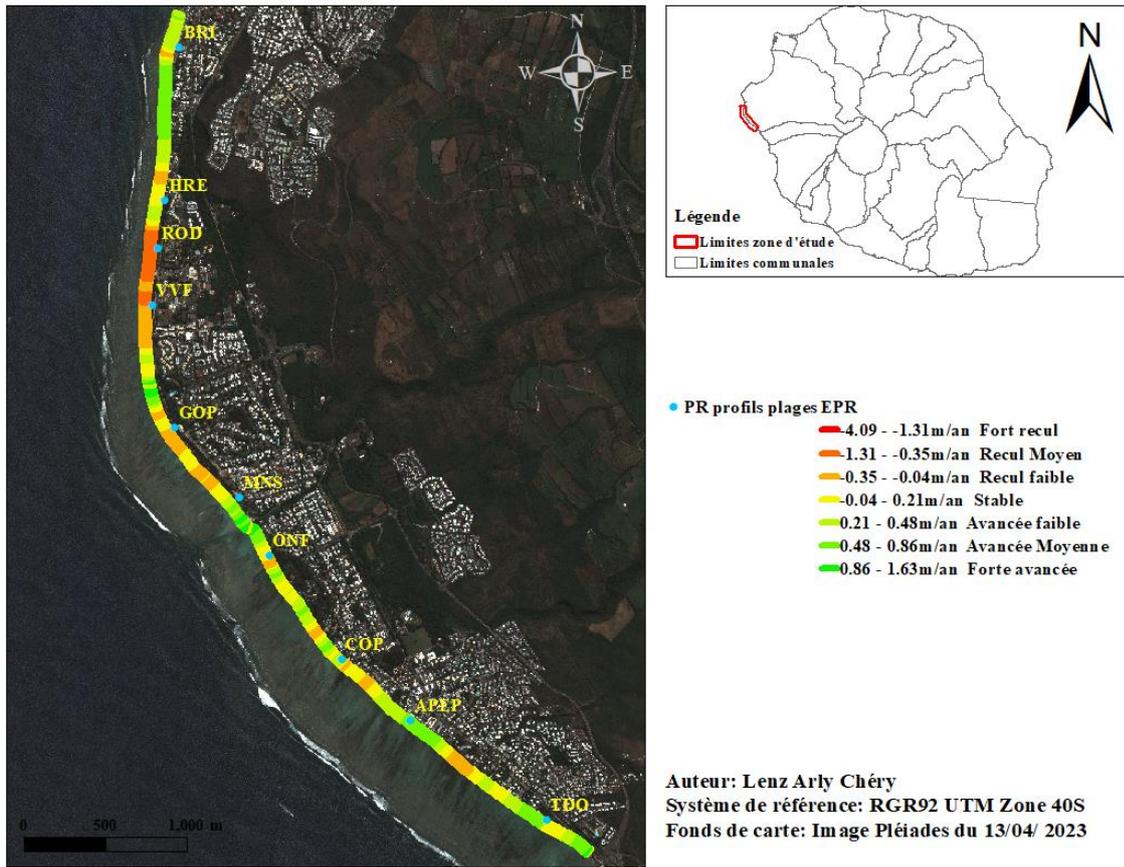


Figure 22 : Evolution de la position du pied de plage 2013-2020 Hermitage-La Saline (réalisation : L. Arly Chery, 2024)

La numérisation du pied de plage sur les photographies aériennes panchromatiques historiques de 1950 ortho-photographiées par l'IGN présente plus d'incertitude. Elle est cependant intéressante à analyser ici pour avoir la tendance à 73 ans. La zone HRE à MNS présente un recul franc estimé jusqu'à 40 cm par an soit un recul du pied de plage jusqu'à 29 m. L'avancée générée par l'arrêt de la dérive littoral sur le site des Brisants se traduit par une accrétion de près de 60 m qui se traduit un recouvrement de la plateforme corallienne et réduit la surface de production sédimentaire et d'amortissement de la houle.

Cinématique du bas de plage sur la période 1950-2023

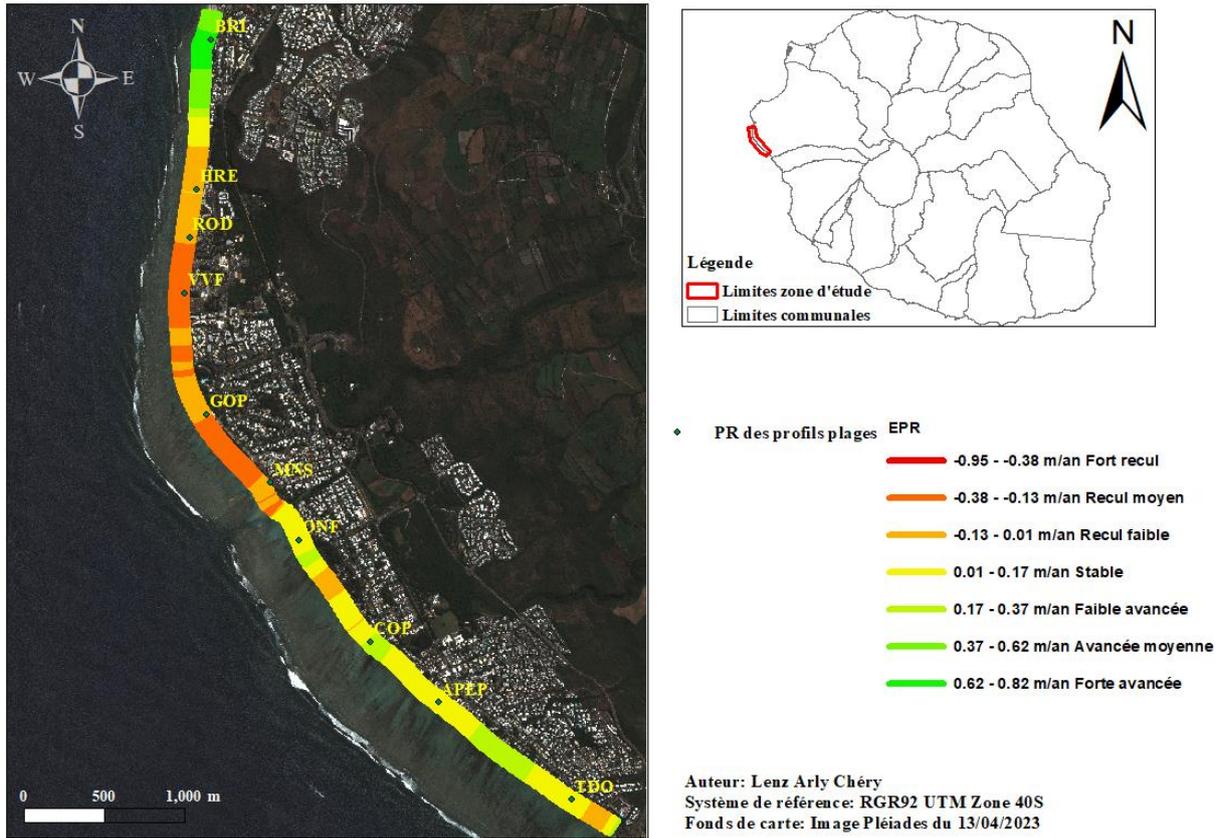


Figure 23 : Evolution de la position du pied de plage 1950-2023 Hermitage-La Saline (réalisation : L. Arly Chery, 2024)

5 CONCLUSION

Labellisés depuis 2012, les suivis des dynamiques du trait de côte et des morphologies associées coordonnés et mis en œuvre au sein de l'OSU-Réunion par l'UAR 3365 et l'UMR Espace-Dev offrent un suivi inégalé du site labellisé. L'observatoire, labellisé SOERE puis SNO, est encore jeune : les chroniques les plus longues ont 10 ans, alors que des formes d'érosion sont signalées sur le littoral ouest depuis les années 1980 (*in* Mahabot, 2015). Le déplacement de la position du pied de plage sur 73 ans montre clairement les secteurs les plus impactés. Le secteur au nord de l'Hermitage est toujours celui qui montre le plus de signes d'érosion. L'accrétion au nord, liée à la perturbation de la dérive littorale vers le nord, ne peut faire oublier cet aspect.

Cet observatoire, inscrit dans la stratégie nationale de gestion du trait de côte, vise à contribuer à la mitigation des risques liés à l'érosion et à la submersion marine. Informer, former et diffuser les savoirs sont plus que jamais ses objectifs, qui prennent une nouvelle dimension avec la création de l'observatoire du littoral de La Réunion.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Agisoft., 2015. Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur - Professional Edition, Version 1.1 87.
- Bousquet, O., Barruol, G., Cordier, E., Barthe, C., Bielli, S., Calmer, R., Rindraharisaona, E., Roberts, G., Tulet, P., Amelie, V., Fleischer-Dogley, F., Mavume, A., Zucule, J., Zakariasy, L., Razafindradina, B., Bonnardot, F., Singh, M., Lees, E., Durand, J., ... Marquestaut, N. (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. <https://doi.org/10.3390/atmos12050544>
- Bruch, W., E. Cordier, and F. Floc'h, Wave transformation and water level over la saline fringing reef (la réunion island), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, submitted, 2021.
- Burns, J., Delparte, D., Gates, R., & Takabayashi, M. (2015). Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 3, e1077. <https://doi.org/10.7717/peerj.1077>
- Burns, J. H. R., Delparte, D., Gates, R. D., & Takabayashi, M. (2015). utilizing underwater three-dimensional modeling to enhance ecological and biological studies of coral reefs. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W5, 61-66. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-61-2015>
- Casella, E., Lewin, P., Ghilardi, M., Rovere, A., & Bejarano, S. (2022). Assessing the relative accuracy of coral heights reconstructed from drones and structure from motion photogrammetry on coral reefs. *Coral Reefs*, 41(4), 869-875. <https://doi.org/10.1007/s00338-022-02244-9>
- Folk R.-L. et Robles R. 1964. Carbonate sands of Isla Perez, Alacran Reef, Yucatan. *J Geol* 72(3): 255-292.
- Jaud, M., 2019. Photogrammétrie drone en domaine littoral. Présentation de la formation drone 64. IUEM-BREST., 64 p.
- Jouvenot, F., 2018. Suivi morphodynamique des plages de La Réunion pendant l'été austral 2016-2017. Mémoire master 1, Université de La Réunion. p. 23
- Jouvenot F. 2019, Approche multi-protocoles de la morphodynamique des plages de La Réunion labellisée Service National d'Observation DYNALIT. Mémoire de Master RNET. Université de La Réunion. p.44

- Lowe, D.G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features, in: Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, Kerkyra, Greece, pp. 1150-1157 vol.2. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Mahabot, M.-M., 2012. Vers la pérennisation du suivi du trait de côte à la Réunion dans le cadre du SOERE « Trait de côte ». Mémoire de master 2, Université de La Réunion 54 p.
- Mahabot, M.-M., 2016. Suivi morphodynamique des plages récifales de la reunion en contexte d'observatoire. Université de La Réunion 265 p.
- MahabotM.-M., Pennober G., Suanez S., Troadec R., Delacourt C.,2017. Effect of Tropical Cyclones on Short-Term Evolution of Carbonate Sandy Beaches on Reunion Island, Indian Ocean. Journal of Coastal Research, Coastal Education and Research Foundation, 2017, 33 (4), pp.839-853. <10.2112/JCOASTRES-D-16-00031.1>. <hal-01398914>
- Mahabot M.M, Jaud M., Pennober G., Le Dantec N., Troadec R., et al.,2017. The basics for a permanent observatory of shoreline evolution in tropical environments; lessons from back-reef beaches in La Reunion Island. Comptes Rendus Géoscience, Elsevier Masson, 2017, 349, pp.330-340. <10.1016/j.crte.2017.09.010>. <hal-01616211>
- Meur-Ferec C., Ruz M.-H., 2002 Transports éoliens réels et théoriques en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas-de-Calais, France). Géomorphologie, 2002, 4, p. 321-334.
- Riley, Shawn & Degloria, Stephen & Elliot, S.D.. (1999). A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. International Journal of Science. 5. 23-27.
- Storlazzi, C. D., Dartnell, P., Hatcher, G. A., & Gibbs, A. E. (2016). End of the chain? Rugosity and fine-scale bathymetry from existing underwater digital imagery using structure-from-motion (SfM) technology. Coral Reefs, 35(3), 889-894. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1462-8>
- Trmal C., Pons F., Sabatier F.,2012 MobiTC, outil de calcul automatique de l'évolution historique du trait de côte : exemples sur 3 types de morphologies côtières. XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil Cherbourg, 12-14 juin 2012. © Editions Paralia (10.5150/jngcgc.2012.055) -T- <http://www.paralia.fr>
- Yamano H., Kayanne H., Matsuda F., Tsuji Y., 2002. Lagoonal facies, ages, and sedimentation in three atolls in the Pacific, Marine Geology, Volume 185, Issues 3-4,2002,pp. 233-247,ISSN 0025-3227,[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00188-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00188-3).