



Analyse de l'évolution du trait de côte sur l'atoll d'Ouvéa (Nouvelle-Calédonie) sur 67 ans à partir d'images : quelles dynamiques temporelles ?

**Natacha VOLTO ¹, Virginie DUVAT ^{1,2}, Louise BURBAN ¹,
Myriam VENDÉ-LECLERC ³**

1. Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs), UMR 7266 CNRS, La Rochelle Université, France.
natacha.volto@univ-lr.fr ; virginie.duvat@univ-lr.fr ; louise.burban@univ-lr.fr
2. Institut Universitaire de France, Paris, France.
virginie.duvat@univ-lr.fr
3. Observatoire du Littoral (OBLIC), DIMENC, Nouvelle-Calédonie.
myriam.vende-leclerc@gouv.nc

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet FUTURISKS dédié à l'analyse des risques côtiers passés à futurs dans les territoires d'Outre-mer insulaires tropicaux français. Elle apporte des éclairages précis sur le rythme de l'érosion côtière au sein de l'atoll d'Ouvéa, situé dans l'archipel des Iles Loyauté en Nouvelle-Calédonie dans l'océan Pacifique occidental. Elle se base sur l'analyse d'images aériennes anciennes, sur les images satellites mises à disposition gratuitement par Copernicus, la NASA et l'USGS ainsi que sur des images satellites récentes de type Pléiades à très haute résolution. Une approche novatrice est déployée grâce à l'utilisation de produits dérivés provenant de la base de données mondiales sur les eaux de surface réalisée à partir de plus de 4 millions d'images satellites. Une application open-source programmée en Python, CoastSat, capable d'extraire automatiquement l'évolution du trait de côte à partir des images Sentinel-2 et Landsat disponibles, a également été exploitée pour analyser les tendances d'évolution du littoral sur Ouvéa sur une plus courte période. L'étude actuelle n'est pas exhaustive et des travaux complémentaires sont nécessaires pour expliquer les résultats obtenus. L'intérêt est, à terme, de compléter les données existantes et d'apporter des informations essentielles pour guider les acteurs publics dans l'élaboration de leur stratégie d'adaptation côtière.

Mots-clés :

Trait de côte, Indice MNDWI, CoastSat, Google Earth Engine, Erosion, Changement climatique.

1. Introduction

L'atoll d'Ouvéa ($20^{\circ}34'40.59''S$ $166^{\circ}27'58.83''E$) (Figure 1) appartient à l'archipel des Iles Loyauté, situé à l'Est de la Grande Terre en Nouvelle-Calédonie. Il a une forme triangulaire et s'étire au maximum sur 50 km d'Ouest en Est et sur 35 km du Nord au Sud pour une surface d'environ 145 km^2 . Il s'agit d'un atoll basculé (vers l'Ouest) qui présente une forte dissymétrie géomorphologique. À l'Ouest, sa couronne récifale est très étroite, discontinue et surmontée de rares îlots, ce qui permet aux « coups d'Ouest » de pénétrer dans le lagon et d'atteindre la côte lagonaire de l'île principale et habitée qui s'étire sur plus de 38 km. Sur la face Est de l'atoll, l'île principale s'est formée sur une couronne récifale plus large et continue. Sur sa face océanique, tournée vers l'Est, cette île possède des côtes majoritairement rocheuses, interrompues par quelques plages de sable. Le lagon d'Ouvéa se caractérise par un faible stock sédimentaire. La forte exposition de la côte lagonaire basse et meuble de l'île aux forçages météo-marins et la faiblesse du stock sédimentaire disponible dans le lagon sont favorables à l'érosion côtière, qui constitue une préoccupation majeure des habitants de l'atoll.

Cette préoccupation est à l'origine de la présente étude, qui vise à produire des données d'évolution de la position du trait de côte, à partir de plusieurs approches, sur l'ensemble du linéaire côtier lagonaire et océanique de l'atoll sur la période 1954-2021, dans le but de mettre en évidence les secteurs en érosion et de mesurer si l'érosion s'est accélérée au cours des dernières décennies dans un contexte d'accélération de l'élévation du niveau de la mer. Dans cette perspective, différentes sources d'images et de données ont été mobilisées.

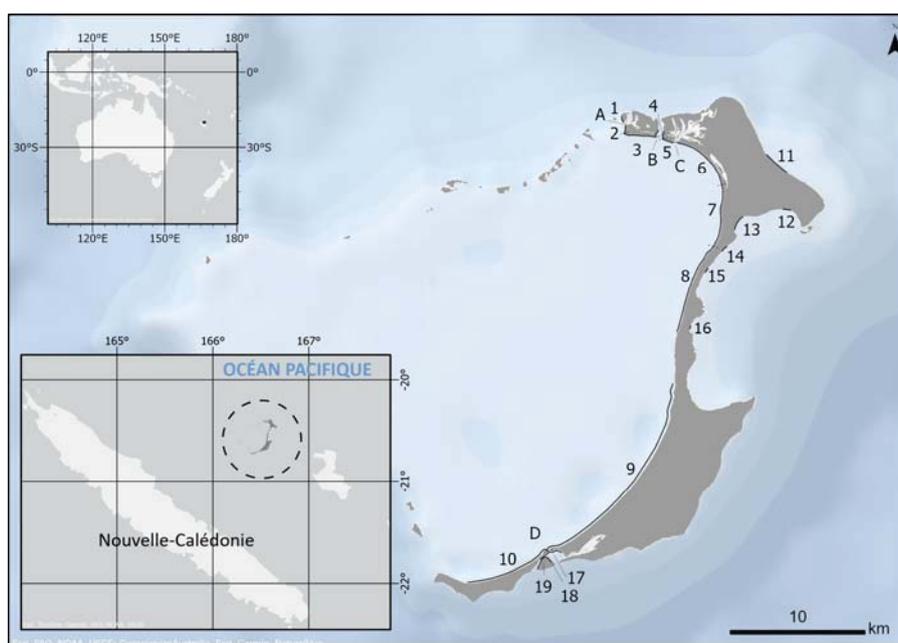


Figure 1. L'Atoll d'Ouvéa : Le linéaire côtier a été découpé en 19 sections.

2. Matériel et méthode

Les photographies aériennes anciennes d'Ouvéa ont été téléchargées sur le site internet « Remonter le temps » de l'IGN pour les années 1954, 1976, 1982 et sur la plateforme de téléchargement de la Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres de la Nouvelle-Calédonie (DITTT) pour les images aériennes de 2002 et 2012. Les images satellites de 2019 proviennent d'OBLIC et les images satellites de 2021 ont été commandées via le dispositif DINAMIS (Tableau 1). Des orthomosaïques ont été réalisées avec le logiciel de photogrammétrie Agisoft Metashape pour chacune des années (Figure 2). Les images satellites de 2019 ont été orthorectifiées et les images multispectrales basse résolution (2 m) de 2021 ont été fusionnées avec les images en nuance de gris haute résolution, avec l'algorithme Gram Schmidt Cubic Convolution Pan-sharpening, pour obtenir des images colorées à 0.5 m de résolution spatiale. Entre 59 et 206 points de calage ont été positionnés de façon homogène pour géoréférencer les orthomosaïques et les images satellites. La BDORTHO-NC a été utilisée comme image de référence (Fonds DITTT - Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie (2013) avec le système de coordonnées RGNC91-93/Lambert Nouvelle Calédonie (EPSG : 3163).

Tableau 1. Données et applications utilisées.

<i>Dénomination</i>	<i>Fournisseur</i>	<i>Date</i>	<i>Résolution(m)</i>
<i>Photographies aériennes anciennes</i>	<i>IGN</i>	<i>1954, 1976, 1982</i>	<i>1.3, 0.5, 1.1</i>
	<i>DITTT</i>	<i>2002, 2012</i>	<i>1.9, 0.9</i>
<i>Produit Global Surface Water (GSW)</i>	<i>EC JRC / Google</i>	<i>1984-2021</i>	<i>30</i>
<i>Images sat. Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI</i>	<i>GEE</i>	<i>1999-2021</i>	<i>30</i>
<i>Image sat. Pléiades (panchromatique)</i>	<i>OBLIC</i>	<i>2019</i>	<i>0.5</i>
<i>Images sat. Sentinel-2</i>	<i>GEE</i>	<i>2015-2021</i>	<i>10</i>
<i>Image sat. Pléiades (pansharpening)</i>	<i>CNES, Airbus DS</i>	<i>2021</i>	<i>0.5</i>
<i>BDORTHO-NC</i>	<i>DITTT, Gouv. NC</i>	<i>Après 2007</i>	<i>0.5</i>
<i>Anaconda Navigator 2.5.2</i>	<i>Anaconda</i>		
<i>Python 3</i>	<i>Python Software Foundation</i>		
<i>Jupyter Notebook 6.5.4</i>	<i>Communauté Jupyter</i>		
<i>CoastSat 2.3</i>	<i>(VOS et al., 2019)</i>		
<i>Metashape 1.7.5</i>	<i>Agisoft</i>		
<i>ArcMap 10.6 et ArcGIS Pro 3.0.0</i>	<i>ESRI</i>		
<i>DSAS version 5</i>	<i>USGS</i>		
<i>ENVI 5.4</i>	<i>NV5 Géospatial</i>		
<i>Google Earth Engine (GEE)</i>	<i>Google</i>		

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

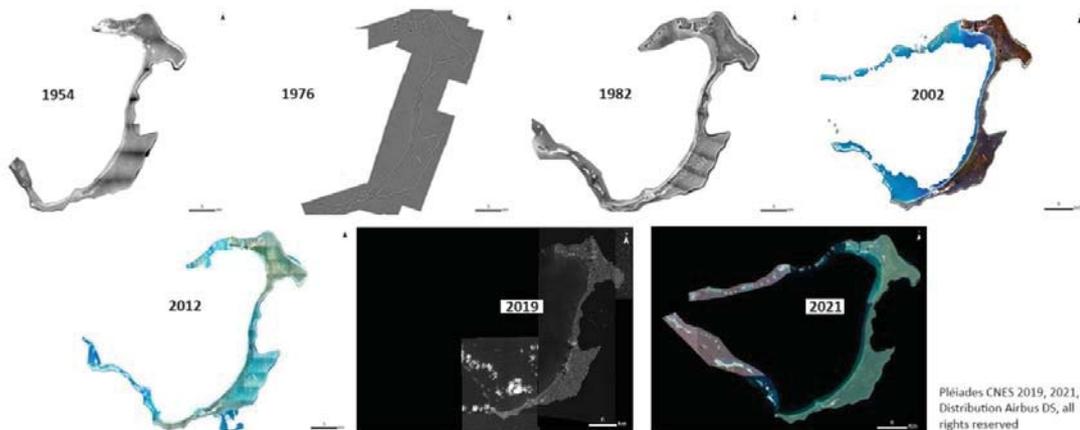


Figure 2. Images aériennes et satellites utilisées.

Il existe une multitude de définitions du trait de côte et numériser le trait de côte à partir de l'interprétation d'images est complexe. Par exemple, la numérisation de la limite terre/mer est souvent ardue en raison de la qualité et de la résolution spatiale des images et de l'heure de la prise de vue qui coïncide rarement avec une hauteur d'eau minimale (Figure 3). Par conséquent, la ligne de végétation (DUVAT *et al.*, 2017) a été sélectionnée comme indicateur du trait de côte et numérisée manuellement en étant attentif à distinguer les ombres et en analysant les images prises sur le terrain pour les zones d'arbres inclinés.

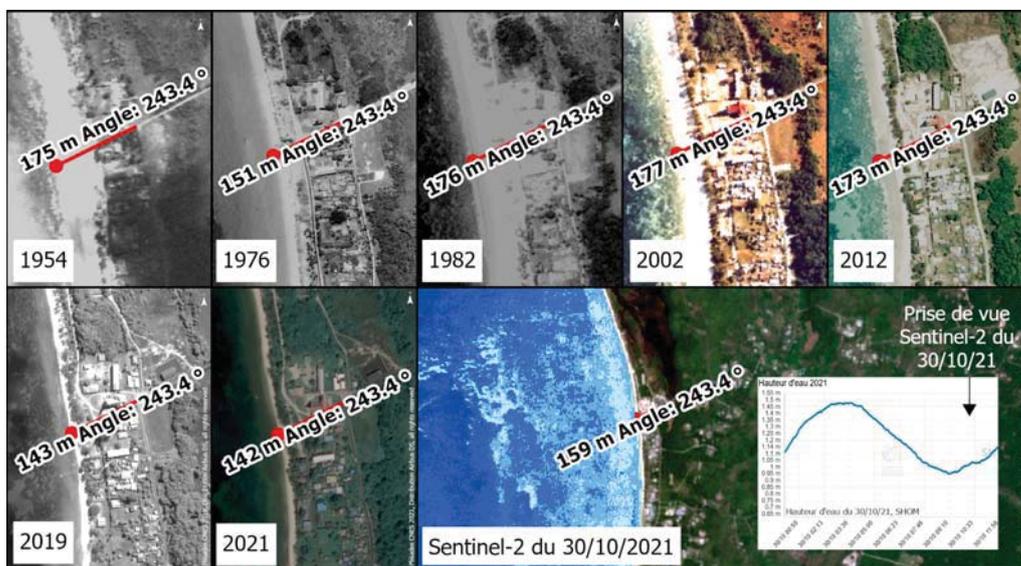


Figure 3. Difficultés pour détecter la limite terre/mer : le même segment a été tracé avec le même angle et le même point de départ jusqu'à la limite terre/mer.

Le linéaire côtier a été segmenté en 19 sections cohérentes et le calcul de l'évolution de la position du trait de côte a été réalisé tous les 10 m à l'aide de transects générés avec l'extension DSAS (USGS). L'erreur globale (Eg) moyenne est comprise entre 4.22 m et

7.83 m dans le nord de l'atoll et entre 2.98 m et 4.48 m dans sa partie sud. Ainsi, des marges d'erreurs de 8 m et de 5 m ont été respectivement retenues pour les parties nord et sud. Dans le nord (le sud), les évolutions comprises entre $-8 \text{ m} \leq x \leq +8 \text{ m}$ ($-5 \text{ m} \leq x \leq +5 \text{ m}$), ne sont pas significatives (stabilité relative), alors que les évolutions $>+8 \text{ m}$ ($>+5 \text{ m}$) témoignent d'une situation d'avancée et les changements $<-8 \text{ m}$ ($<-5 \text{ m}$) d'un recul de la position du trait de côte. De nombreuses études ont été menées sur Ouvéa à partir d'images d'archives, aériennes (avion, drone) et de satellites (GARCIN *et al.*, 2022 ; DUMAS *et al.*, 2019 ; LE DUFF, 2018 ; COHEN *et al.*, 2016). Cette étude examine l'atoll dans son ensemble et explore différentes approches pour comprendre les changements à long terme, en prenant en considération les zones envahies par l'eau de façon plus ou moins régulière et la dynamique des plages.

La première approche s'appuie sur des produits dérivés provenant de la base de données mondiales sur les eaux de surface (GSW) réalisée à partir de plus de 4 millions d'images satellites (PEKEL *et al.*, 2016). L'intérêt est de regarder les zones recouvertes en eau saisonnièrement ou de façon permanente sur une zone d'étude. Pour réaliser ces produits, l'intégralité des archives des capteurs Landsat 5, Landsat 7, et Landsat 8 a été exploitée de 1984 à 2021 afin d'observer la localisation et la persistance de l'eau sur tous les pixels qui composent la surface du globe. Les cartes annuelles des surfaces en eau sont notamment accessibles via le service de traitement géospatial GEE. Elles ont été téléchargées via GEE sur l'atoll entier, à 30 m de résolution spatiale, puis des masques sur l'emprise ont été réalisés. Les images ont ensuite été regroupées dans des métafichiers pour extraire les statistiques zonales et exporter les vecteurs par année. La première carte disponible date de 2000 (Figure 4).

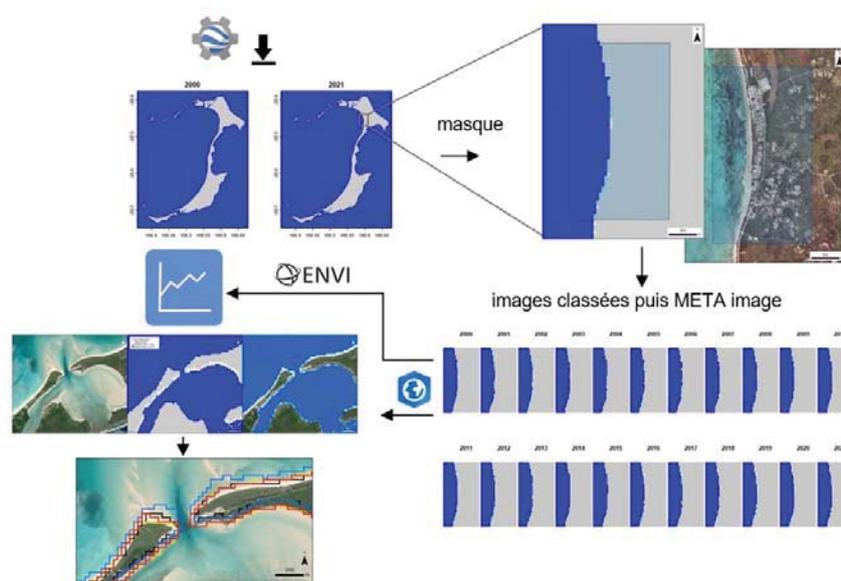


Figure 4. Etapes pour obtenir les statistiques et les vecteurs à partir des cartes annuelles du Global Surface Water 1984-2021 (EC JRC/Google).

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

La seconde approche s'est intéressée à l'algorithme de détection du trait de côte, implémenté dans CoastSat, capable d'extraire automatiquement 39 ans d'évolution et optimisé pour les côtes constituées de plages sableuses. CoastSat utilise le package API Python de GEE pour accéder aux images satellites, Landsat et Sentinel-2. Un environnement virtuel a été créé avec Anaconda et un notebook Jupyter a permis d'installer les packages python et d'exécuter le script étape par étape en adaptant les paramètres aux images de la zone d'étude (longueur de la plage, couleur du sable...). L'indice modifié de l'eau par différence normalisé, MNDWI, (XU, 2006) est notamment appliqué pour distinguer l'eau du sable et un classificateur de réseau neuronal est utilisé pour classer chaque pixel en « eau », « eau claire », « sable », « autre couverture ». Le seuillage est ajustable par l'opérateur (Figure 5).

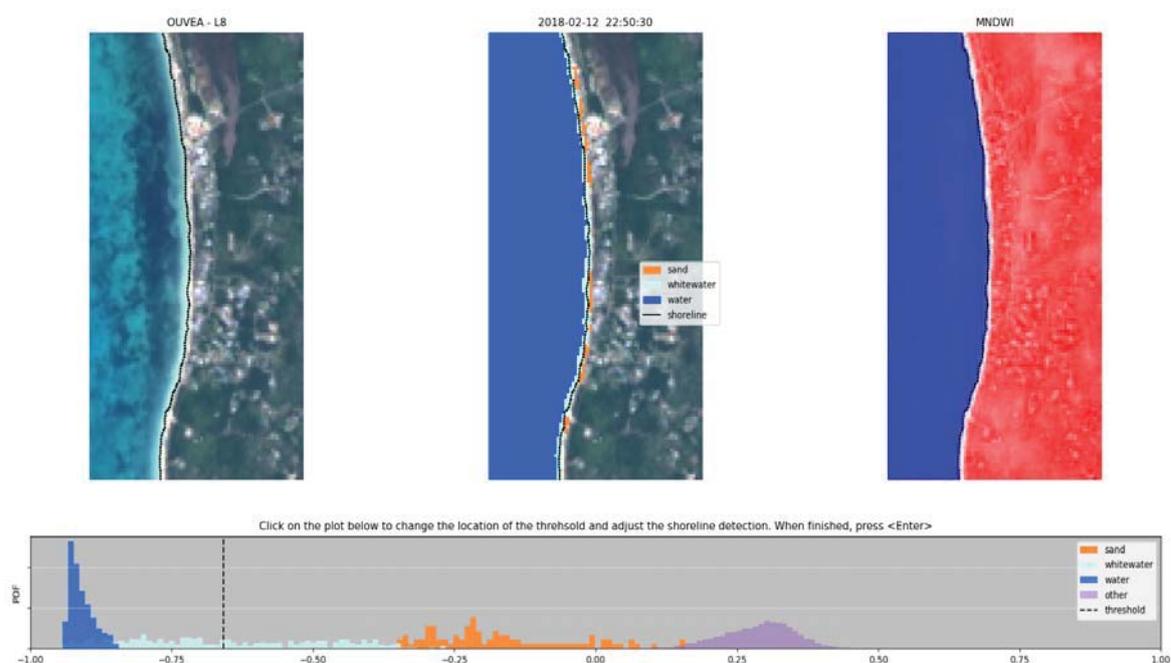
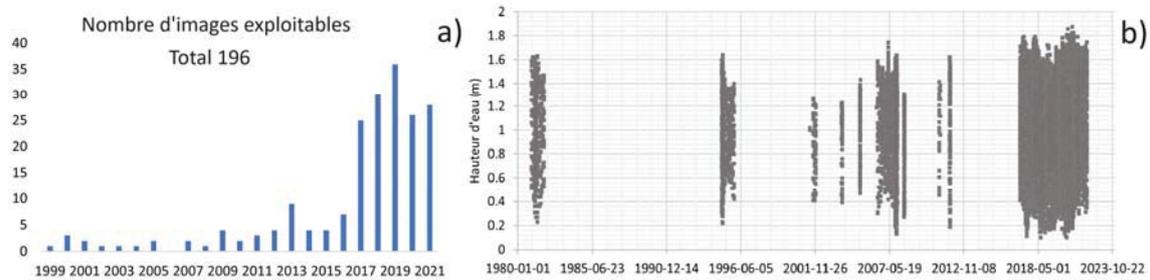


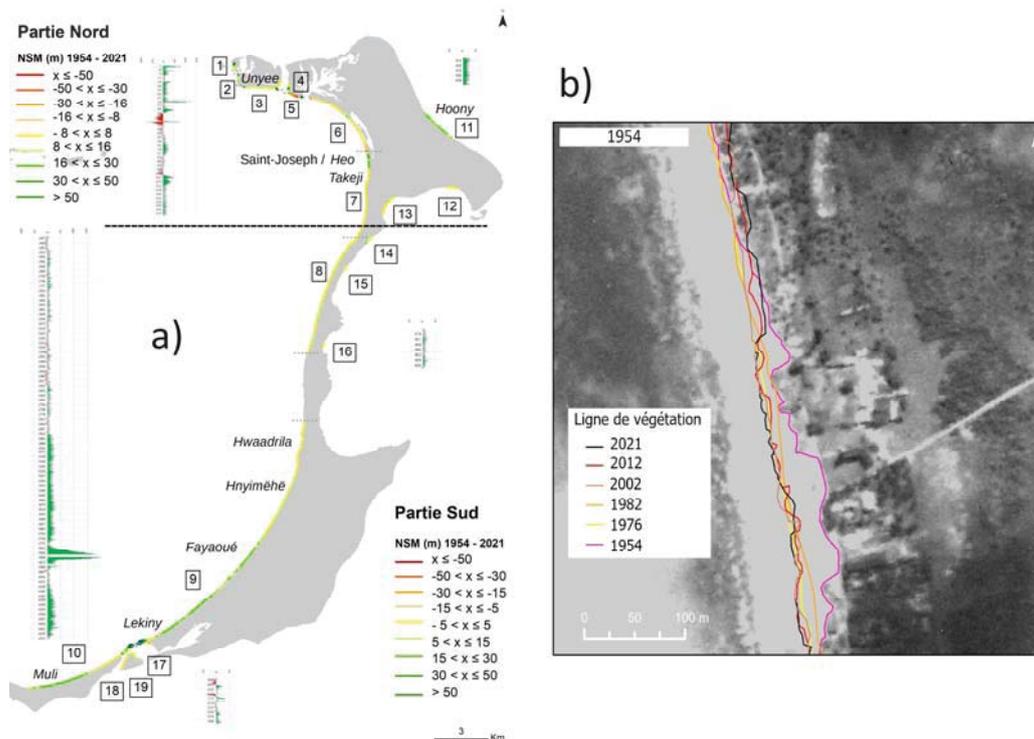
Figure 5. Capture de l'étape de validation de la position du trait de côte, CoastSat. De gauche à droite, image satellite de Landsat 8, résultat de la classification et indice MNDWI.

Sur la zone d'étude, de 1984 à 2021, 203 images de Landsat 7, 5 de Landsat 9 et 385 de Sentinel-2 sont disponibles mais seulement 196 sont exploitables. L'étude a porté sur toutes les images exploitables dans un premier temps et en raison de discontinuités dans les relevés de hauteurs d'eau à Ouvéa (Figure 6) et des différences de résolution spatiale (10 m pour Sentinel-2 et 30 m pour Landsat), les résultats ont été basés sur les images Sentinel-2 de 2017 à 2021 sélectionnées en fonction de la hauteur d'eau lors de la prise de vue.



3. Résultats

Les résultats obtenus en numérisant la ligne de végétation sur la période 1954-2021 (Figure 7) révèlent notamment une érosion significative sur la section 5 qui correspond au système plage-dune situé au nord (87 % de transects en recul ; évolution moyenne de -18.4 m et recul maximum de -38.6 m) et sur la section 6 qui se poursuit jusqu'à la limite nord du village de Saint-Joseph/Heo (26.4 % de transects en recul ; évolution moyenne de -3.3 m et recul maximum de -78.6 m). Au droit du village de Saint-Joseph/Heo, la section 7 a été stable sur 66.7 % de sa longueur et en érosion sur 6.6 % de sa longueur.



Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

En se focalisant uniquement sur les 163 transects situés au niveau de Saint-Joseph/Heo et en analysant la dynamique d'évolution de la ligne de végétation, on constate que 5.5 % ont enregistré un recul et 36.2 % une stabilité entre 1954 et 2021 tandis que 93.9 % ont démontré une stabilité entre 2012 et 2021.

Les traits de côte extraits des cartes annuelles du GSW (Figure 8, b) suggèrent un envahissement du village par l'eau entre 2000 et 2021. Les données statistiques, extraites de ces cartes, révèlent l'étendue et l'évolution des surfaces en eau, pour la même zone (Figure 8, a). La surface en eau pour la classe « eau permanente » est maximale en 2015. Cette observation suggère une réduction de la surface de la plage la même année, suivie d'une nouvelle diminution après 2018.

Les traits de côte exportés de CoastSat indiquent la même tendance. En effet, la réduction de la largeur de la plage représente environ 2.7 m par an de 2017 à 2021 (Figure 8, c). Bien que CoastSat offre un accès à toutes les images satellites disponibles gratuitement sur la zone d'étude, les résultats obtenus ne sont pas utilisables à long terme en raison des interruptions dans les données du marégraphe et du faible nombre d'images satellites exploitables (sans nuages) dont la prise de vue coïncide avec des hauteurs d'eau inférieures à 1 m. Les résultats pour une même année étant très fluctuants, seuls les résultats avec les images Sentinel-2 depuis 2017 sont présentés (Figure 8, c).

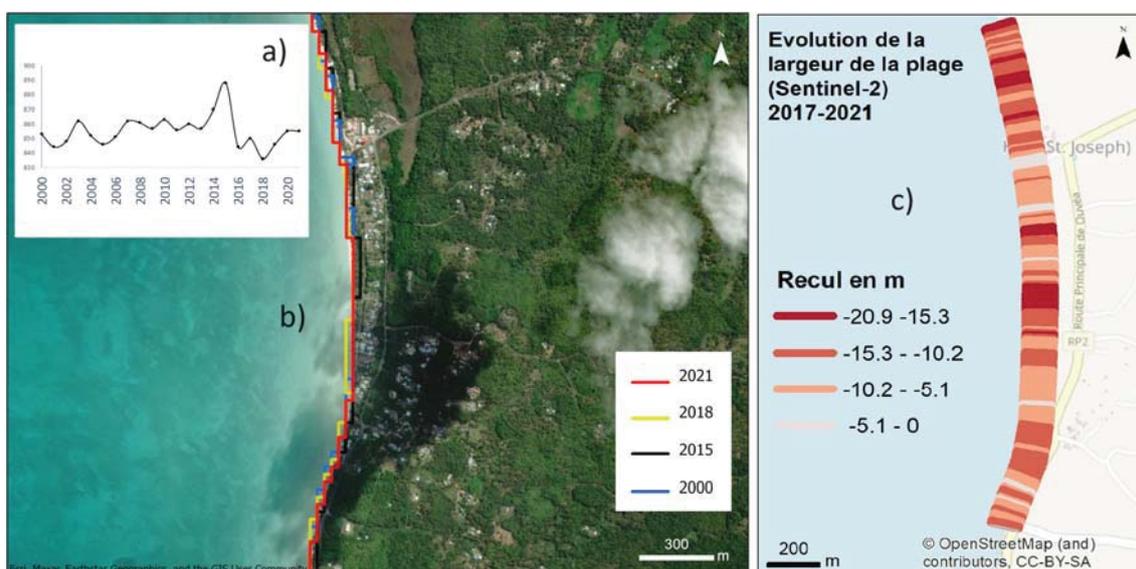


Figure 8. a) Graphique représentant le nombre de pixels pour la classe « eau permanente » généré à partir des statistiques des cartes annuelles du Global Surface Water 1984-2021 (EC JRC/Google) ; b) Vecteurs associés pour 2000, 2015 (surface en eau plus importante), 2018 (surface en eau plus faible) et 2021 ; c) Résultat de l'évolution de la largeur de la plage avec CoastSat.

5. Conclusion

Cette étude présente différentes approches pour appréhender l'évolution du trait de côte à Ouvéa sur le temps long. Elle est contrainte par la qualité et la disposition des données en imagerie. En se focalisant sur le village Saint-Joseph/Heo, elle suggère un recul de la plage et l'envahissement du village par l'eau entre 2000 et 2021 et une certaine stabilité de la ligne de végétation. Il n'est pas observé d'accélération dans l'érosion du trait de côte. Dans la continuité de cette étude, des travaux sont en cours pour recréer des séries continues de données marégraphiques par analyse harmonique depuis les années 80. De plus, des instruments de mesure réalisent actuellement l'acquisition de paramètres physiques et de modèles numériques de surface dans différentes parties de l'atoll. Ces données seront analysées afin de compléter les résultats présentés ici et d'expliquer l'évolution mesurée de la position du trait de côte. En complément, un travail de prospective sera mené, qui permettra de tester la réponse du trait de côte à différentes interventions techniques (ingénierie côtière et solutions fondées sur la nature) et de projeter l'évolution du trait de côte au cours des prochaines décennies. L'augmentation des images satellites exploitables, la disponibilité des données marégraphiques en continu et l'intégration de la valeur des pentes des plages pourraient permettre d'ajuster la position des traits de côte, améliorant ainsi la précision des résultats obtenus avec CoastSat. Ce dernier devrait également évoluer pour permettre l'extraction du trait de côte à partir d'images à très haute résolution de Maxar type World-View. De même, la prochaine version du produit GSW intégrera les flux des images Sentinel, ce qui augmentera la précision des cartes annuelles mondiales des surfaces en eau.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'ANR au titre de France 2030 portant la référence ANR-22-POCE-0002 dans le cadre du projet de recherche FUTURISKS. Les auteurs remercient les membres de l'Association pour la sauvegarde de la biodiversité d'Ouvéa (ASBO) pour leur accueil et leur aide sur le terrain.

6. Références bibliographiques

- COHEN O., DUMAS P., LE DUFF M., ALLENBACH M. (2016). *Etude du rivage par photogrammétrie aéroportée à très haute résolution spatiale. Exemple à Ouvéa, Nouvelle-Calédonie*. XIV^{ème} Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil Toulon, vol. 29. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2016.041>.
- DUMAS P., LE DUFF M., GODET K., ALLENBACH M. (2019). *Analyse géohistorique du risque cyclonique en Nouvelle-Calédonie (XIX^{ème}-XXI^{ème})*. In: Géohistoire de l'environnement et des paysages, Ed. CNRS, Paris, pp. 321-331.
- DUVAT V., SALVAT B., SALMON C. (2017). *Drivers of shoreline change in atoll reef islands of the Tuamotu Archipelago, French Polynesia*. Global and Planetary

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

Change, Volume 158, 2017, Pages 134-154, ISSN 0921-8181.

<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.09.016>.

GARCIN M., VENDE-LECLERC M., VALENTINI N. (2022). *Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie (OBLIC). Bilan des actions 2020-2022*. Rapport BRGM/RP-71652-FR, 111 p.

LE DUFF M. (2018). Thèse de doctorat en géographie, Université de la Nouvelle-Calédonie.

PEKEL J.F., COTTAM A., GORELICK N., BELWARD A.S. (2016). *High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes*. *Nature* 540, 418-422.

<https://doi.org/10.1038/nature20584>.

VOS K., SPLINTER K.D., HARLEY M.D., SIMMONS J.A., TURNER I.L. (2019). *CoastSat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery*. *Environmental Modelling and Software*. 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>.

XU H. (2006). *Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery*, *Int. J. Remote Sens.*, 27, pp. 3025-3033 <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.