



HAL
open science

Cartographie lidar des biotopes terrestres, marins et intertidaux de l'atoll de Tetiaroa

Benoît Stoll, Poeiti Tuheiava, Moana Badie, Lila De Oliveira

► To cite this version:

Benoît Stoll, Poeiti Tuheiava, Moana Badie, Lila De Oliveira. Cartographie lidar des biotopes terrestres, marins et intertidaux de l'atoll de Tetiaroa. *Spatial Analysis and GEomatics 2023 (SAGEO 2023)*, Jun 2023, Québec, Canada. hal-04127517

HAL Id: hal-04127517

<https://hal.science/hal-04127517v1>

Submitted on 13 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cartographie lidar des biotopes terrestres, marins et intertidaux de l'atoll de Tetiaroa

Benoît Stoll^{1,2}, Poeiti Tuheiva¹, Moana Badie¹, Lila De Oliveira¹

1. Laboratoire GePaSud, Université de la Polynésie française

BP6570, 98702, Faa'a – Tahiti, Polynésie française

2. benoit.stoll@upf.pf

RÉSUMÉ. Un programme de dératisation de l'atoll de Tetiaroa en Polynésie française a eu lieu en juin 2022. Dans le cadre de ce programme, un état des lieux environnemental exhaustif a été entamé avant l'opération et permettra de comparer l'état de l'environnement en présence et en l'absence de rats. La Tetiaroa Society qui coordonne les actions de recherches sur l'atoll, a émis le besoin d'une carte des biotopes afin d'optimiser les campagnes d'échantillonnages terrain. Cet article propose un protocole simple pour cartographier les principaux biotopes marins, intertidaux et terrestres à partir d'un jeu de données optiques Pléiades et données lidar aéroporté. Les biotopes marins ont été cartographiés selon des critères de profondeur issus de la bathymétrie lidar, les biotopes intertidaux interprétés à partir de données optiques et les biotopes terrestres à partir d'une stratification lidar de la végétation au moyen d'indice lidar classiques. La problématique de la représentation des biotopes terrestres dont certains sont superposés est résolue par la proposition d'une stratification des biotopes sur 4 niveaux.

ABSTRACT. A rat extermination program for the atoll of Tetiaroa in French Polynesia took place in June 2022. As part of this program, an exhaustive environmental inventory was initiated before the operation and will help to compare the state of the environment in the presence and absence of rats. The Tetiaroa Society, which coordinates research activities on the atoll, has expressed the need for a biotope map of the entire atoll in order to optimize the field sampling campaigns. This paper proposes a simple protocol to map the main marine, intertidal and terrestrial biotopes from a Pléiades optical and airborne lidar dataset. Marine biotopes were mapped using to depth criteria from lidar bathymetry, intertidal biotopes interpreted from optical data and terrestrial biotopes from lidar stratification of vegetation using conventional lidar index. The problem of representing terrestrial biotopes, some of which are superimposed, is solved by proposing a stratification of biotopes on 4 levels.

MOTS-CLES : Tetiaroa, atoll corallien, environnement, lidar, biotopes marins, terrestres, et intertidaux

KEYWORDS: Tetiaroa, coral atoll, environment, lidar, marine, terrestrial and intertidal biotopes.

1. Introduction

L'atoll de Tetiaroa est situé à 50km au nord de l'île de Tahiti en Polynésie française, par 17°00'S, 149°34'W dans le Pacifique sud.

Une exploitation intensive de coprah a eu lieu sur les *motu* (îlots coralliens) de Tetiaroa depuis le début du 20^{ème} siècle jusqu'à l'achat de l'atoll par l'acteur Marlon Brando en 1967. Depuis, en l'absence de toute activité anthropique, la nature a repris ses droits sur l'atoll à l'exception du *motu* Onetahi où s'est installé l'hôtel The Brando en 2014.

La Tetiaroa Society effectue la promotion de l'éducation, de la recherche et la préservation de l'environnement sur l'atoll et accueille de nombreux programmes scientifiques dans un but de surveillance, de préservation et de restauration environnementale. L'ensemble des thématiques environnementales est abordé comme la nidification des tortues marines (Stoll et al., 2019), les oiseaux marins, les poissons, le corail, les algues marines, la végétation, les insectes (dont les moustiques (Bossin et al., 2016a, 2016b; Stoll and Bossin, 2019)), les espèces envahissantes ou nuisibles, mais aussi le suivi de l'érosion des plages en lien avec l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes.

Une banque de données multithématique de l'atoll de Tetiaroa (Stoll and Bossin, 2019) a été mise en place pour compiler, conserver et gérer les données géomatiques historiques ainsi que celles produites par les chercheurs. Cette banque de données est accessible en ligne sur le serveur de cartes de la Tetiaroa Society.

En juin 2021, une campagne d'éradication des rats a été effectuée sur la totalité des *motu* dans un but de restauration environnementale (Tetiaroa Society, 2022). Dans ce contexte, la communauté scientifique a été chargée d'effectuer un inventaire de la biodiversité avant et après l'opération et a exprimé le besoin d'une cartographie globale des biotopes marins, intertidaux et terrestres afin d'optimiser l'organisation des campagnes d'échantillonnages scientifiques.

2. Biotopes

Les cartes des biotopes peuvent être obtenues par diverses méthodologies dépendant essentiellement des données disponibles et du niveau de précision attendu. (Corbana et al., 2015) présentent deux pistes pour la réalisation de ce type de carte : (i) De façon indirecte en utilisant des paramètres environnementaux liés à la biodiversité ; (ii) De manière directe par cartographie des assemblages spécifiques ou des communautés écologiques à partir de données aéroportées ou de capteurs satellitaires. Tetiaroa ne présentant quasiment aucun relief (5 mètres maximum), les facteurs abiotiques classiquement utilisés (altitude, pente, ensoleillement, etc.) ne permettent pas d'envisager la première méthode. Il est donc nécessaire de trouver des méthodologies adaptées aux conditions et aux données de télédétection disponibles.

Le choix des biotopes est basé sur une liste de 26 zones naturelles (terrestres, intertidales et marines) proposée par le directeur de la Tetiaroa Society à partir de son

expérience du terrain, de ses échanges avec les rangers et les scientifiques travaillant sur l'atoll. Cette liste a été confrontée à la littérature scientifique et confirmée par des prospections terrain pour aboutir à une liste définitive de 16 biotopes terrestres, 9 biotopes marins et 5 biotopes intertidaux (*Annexe 3*).

3. Données

Les données consistent en une image THR Pléiades du 11/09/2014 (50cm R,V,B,NIR), ainsi que d'un jeu d'ortho-photographies aériennes (5cm R,V,B) et de données lidar à haute densité, toutes financées par le projet IDEA (Davies et al., 2016).

La donnée lidar a été acquise en mai 2017 avec un système lidar vert à retour d'onde complète Riegl LMS-VQ820G (Mallet and Bretar, 2007) monté sur un hélicoptère Eurocopter AS350 à une altitude de vol de 500m. Elle est constituée de 1,42 milliards de points de densité moyenne 25pts/m² et une précision verticale de 4,3 cm. Ce nuage de points couvre aussi bien les milieux terrestres que marins. Pour chaque point lidar, plusieurs informations sont disponibles : sa position (x,y,z), son intensité, son numéro de retour (1^{er}, 2^{ème}, etc.), le nombre de retours total, etc.

Dans un premier temps, cette donnée a été traitée pour obtenir un modèle numérique de terrain et un modèle numérique de surface avec une résolution spatiale de 30cm (Gruen et al., 2017; Serkan Ural et al., 2019). Dans un second temps, la donnée lidar a subi des prétraitements nécessaires à l'étude de la végétation : les valeurs aberrantes, les bâtiments ainsi que d'autres structures anthropiques ont été supprimés. Les points très proches du sol correspondant à des déchets végétaux jonchant le sol ont également été nettoyés. Enfin, les valeurs d'élévation sont normalisées par rapport au sol (modèle numérique de terrain) afin que la hauteur des points corresponde à la hauteur effective de la végétation.

4. Approche multi-strate de végétation

4.1. Problématique des biotopes terrestres

L'expérience acquise lors des études sur la détection de cocotiers dans les atolls de Polynésie française (Desmier et al., 2011; Teina et al., 2009, 2008b, 2008a) a montré que les méthodes classiques de classification d'images satellites optiques sont peu adaptées à notre problématique puisqu'elles ne permettent l'accès qu'à la canopée, excluant de fait les sous-bois des cocoteraies (re)naturalisées.

La complexité structurelle des forêts de Tetiaroa est perceptible lorsque l'on traverse un *motu* du côté océan vers le lagon avec, par exemple, la présence successive (i) d'une frange arbustive, (ii) d'une cocoteraie dense avec présence d'arbres endémiques, (iii) d'une superposition, au-dessus de la lentille d'eau, d'une zone herbacée, d'une zone arbustive avec quelques cocotiers épars (iv) et pour finir une cocoteraie dense avec un sous-bois arboré et présence d'espèces arbustives. Ces différentes combinaisons de types et d'espèces de végétation illustrent bien

l'hétérogénéité mais aussi la superposition des différentes strates de végétation qu'il est difficile de cartographier.

Les échantillonnages terrain (*Figure 3.*) effectués confortent le point de vue des biologistes spécialistes de ce milieu : la structure verticale du couvert végétal des atolls peut être modélisée en 5 strates superposées : (i) strate 1 : herbacées (0-1m), (ii) strate 2 : arbustes (1-3m), (iii) strate 3 : petits arbres (3-10m), (iv) strate 4 : grands arbres (10-20m), (v) strate 5 : arbres supérieurs (>20m).

4.2. Modèle multi-strates et métriques de densités relatives de points

Dans un grand nombre d'études (Jennings et al., 1999; Ma et al., 2017) sur la donnée lidar, la végétation est assimilée à un modèle à deux strates : étage inférieur à 2m, étage supérieur à 2m. Cependant ce modèle n'est pas adapté aux forêts naturelles comportant plusieurs sous-étages (arbustes, petits arbres, grands arbres, etc.) répartis dans différentes strates.

Les indices Overall Relative point Density (*ORD*) et Normalized Relative point Density (*NRD*) sont décrites dans (McCallum, Beaty, et Mitchell 2014) comme des métriques multi-strates. Le principe de ce type de métriques lidar consiste à segmenter le nuage de points lidar en voxels empilés selon le modèle de strates adopté (*Figure 1.*) et à en analyser la répartition des points et de leurs densités.

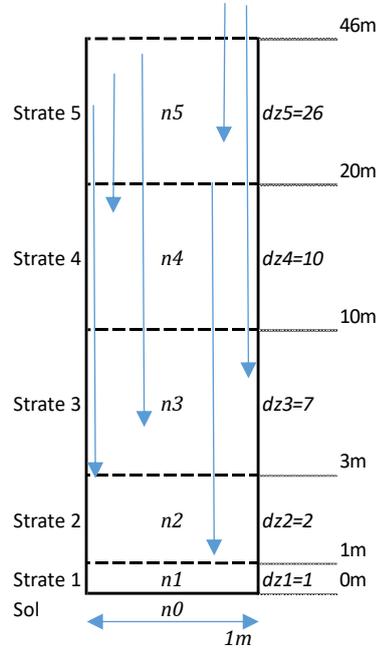
La différence entre ces deux indices réside dans l'utilisation (ou non) des points provenant des strates supérieures en lien avec le phénomène d'occlusion. L'occlusion est le fait que les impulsions lidar ont une forte probabilité d'être bloquées par les étages supérieurs de la végétation, et qu'en conséquence la densité de points lidar sera amoindrie dans les étages inférieurs. Cela est visible au sud du *motu* Rimatuu (*Figure 2*), où la forte densité de végétation dans la strate 4 engendre un trou sur la strate 3.

Nous avons choisi d'utiliser l'indice *ORD* car il prend en compte l'intégralité des points dans le calcul de chaque strate. L'indice *ORD* de la $k^{ième}$ strate est le rapport du nombre de points lidar dans la $k^{ième}$ strate par le nombre total de points dans toute la colonne de végétation et sur le sol.

$$ORD_k = \frac{n_k}{\sum_{i=0}^N n_i} \quad (1)$$

La somme cumulée des indices *ORD* des 5 strates vaut 100%, cela permet une visualisation directe de la distribution verticale de la végétation. De plus, ses valeurs sont cohérentes entre chacune des strates, ce point est crucial pour la cartographie finale : chaque strate est numériquement comparable à une autre. Bien sûr, ces avantages n'évacuent pas le problème de l'occlusion.

La densité de points disponible sur Tetiaroa a permis de calculer l'indice *ORD* sur 5 strates, avec une taille de pixel de 1m. La *Figure 2* en donne un aperçu cartographique.



dz_k est la hauteur de la $k^{ième}$ strate, et n_k est le nombre de points de la $k^{ième}$ strate.
Résolution spatiale : 1m.

Figure 1. Modèle multi-strates de la végétation de Tetiaroa

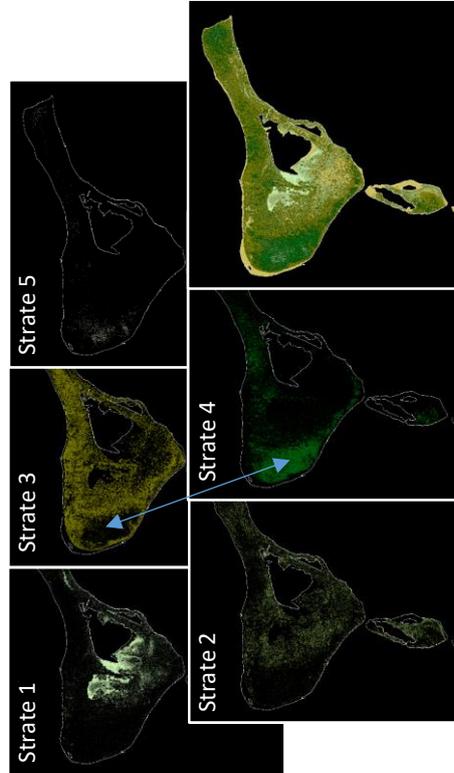


Figure 2. Strates de végétation sur le motu Rimatuu (ORD) et phénomène d'occlusion

4.3. Données terrain

Deux campagnes de vérité terrain ont eu lieu en 2019 et 2021, permettant d'effectuer 1189 échantillonnages de la végétation (Figure 3.), localisés au GPS différentiel (précision entre 2cm et 50cm), et ce, sur tous les *motu* et tous les biotopes.

Le protocole d'échantillonnages consiste à effectuer des transects réguliers traversant les *motu* de part et d'autre. Un point GPS est relevé tous les 50m et les caractéristiques de la végétation dans un rayon de 5m sont relevées pour chacune des 5 strates. Le pourcentage d'abondance-dominance (Delassus, 2015) des espèces principales, secondaires et tertiaires est estimé ainsi que le nom des espèces concernées. Enfin, l'appartenance de l'échantillon à un biotope terrestre est estimée.

5. Vectorisation

La vectorisation des biotopes intertidaux a été effectuée à partir des cartes d'occupation des sols déjà disponibles (Stoll and Longine, 2019). Les vecteurs les plus récents (2014) ont été retravaillés et corrigés par comparaison avec les prises de vues aériennes (ortho-photo à 5cm de 2017) ainsi que les données terrain.



Figure 3. Emplacement des échantillonnages terrain de 2019 et 2021

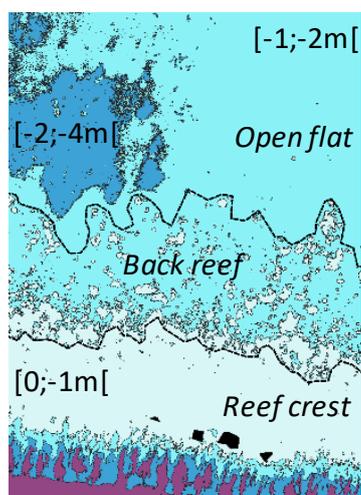


Figure 4. Frontières entre open flat, back reef et reef crest

Les biotopes marins sont essentiellement basés sur la profondeur et la localisation. La bathymétrie a été segmentée selon 6 classes de profondeurs : $[0 ; -1[$, $[-1 ; -2[$, $[-2 ; -4[$, $[-4 ; -10[$, $[-10 ; \text{min}[$. Le raster résultant a été vectorisé, donnant un fichier vecteur de type polygone avec les plages de profondeurs listées dans la table d'attributs.

De plus, un vecteur correspondant à la crête récifale a été extrait de la donnée Pléiades 2014 en repérant le corail vivant à faible profondeur grâce à l'infrarouge. Ce vecteur nous permet de séparer les biotopes situés à l'intérieur du lagon de ceux à l'extérieur.

L'attribution d'une classe à un vecteur s'est faite en analysant les caractéristiques de chaque biotope (Annexe 1.). Certains biotopes sont directement liés à une profondeur comme le *deep lagoon* qui est situé à des profondeurs inférieures à 10m à l'intérieur du lagon. Dans d'autres cas il faut déterminer la frontière séparant deux biotopes contigus (Figure 4.), ainsi le *back reef* est une zone de transition entre le *reef crest* où le corail est prédominant, et l'*open flat* où il n'y a que du sable. La segmentation à 1 mètre de profondeur permet de discriminer les fonds sablonneux des

patates de corail, une opération morphologique d'ouverture (érosion suivi de dilatation) sur le raster segmenté permet de simplifier la géométrie. Déterminer la frontière entre ces trois classes de biotopes est ainsi facilité.

De la même façon, la vectorisation des biotopes terrestres s'appuie sur un seuillage de la valeur de la métrique *ORD* de chaque strate, puis une vectorisation et attribution d'une classe de biotope terrestre. Dans certains cas, un biotope est présent dans une seule strate, et son identification est relativement directe, mais dans d'autres cas, il peut être présent sur plusieurs strates, une identification séparée par strate est opérée puis une fusion des vecteurs correspondants. Dans tous les cas, une vérification de la classe de biotope par rapport aux données de vérité terrain et aux prises de vues aériennes permet de lever toute ambiguïté.

6. Résultats

6.1. Représentation cartographique

La représentation cartographique des biotopes marins et intertidaux est relativement aisée, puisque ceux-ci sont disjoints, sans recouvrements et sans trous. Un jeu de couleur adapté suffit à obtenir une cartographie, claire et lisible.

Concernant les biotopes terrestres, le problème est plus complexe. En effet, la végétation des atolls est caractérisée par une grande diversité d'espèces et une superposition de strates quasi systématique. Un jeu de classes basé sur toutes les combinaisons végétales ne serait pas adapté à une application cartographique.

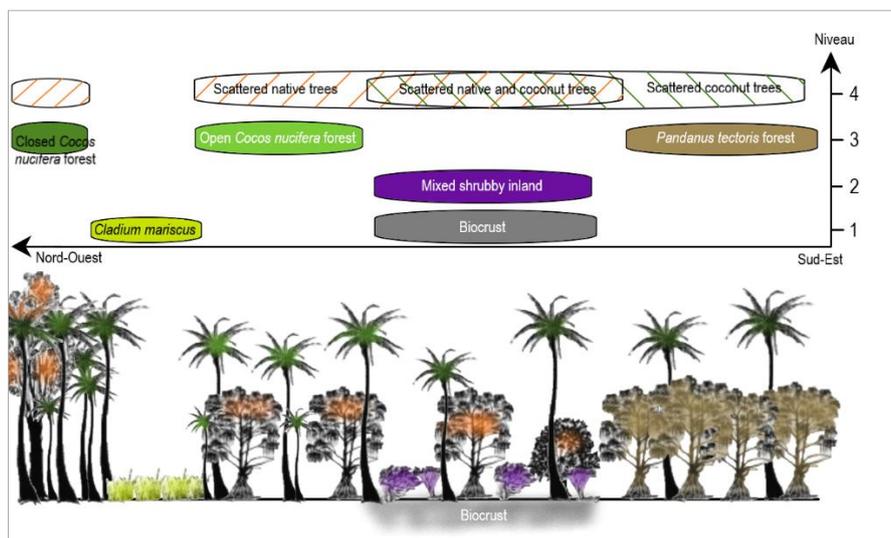


Figure 5. Représentation multi-niveaux des biotopes terrestres

Nous avons donc choisi de représenter les biotopes terrestres selon 4 niveaux (*Figure 5*) : (i) le niveau 1 : le sol et classes associées (ii) le niveau 2 : les arbustes, (iii) le niveau 3 : les couverts arborés principaux et (iv) le niveau 4 : la végétation arborée supérieure clairsemée permettant d'indiquer la présence d'un type d'arbres mais ne constituant pas un biotope forestier particulier. Une transparence appliquée sur les 3 premiers niveaux ainsi qu'un système de hachurages sur le 4^{ème} niveau permet une visualisation claire et réaliste.

6.2. Validation

La validation des biotopes marins n'a pas d'objet puisque ceux-ci sont basés uniquement sur la profondeur, le MNT lidar ayant été validé par ailleurs (Gruen et al., 2017). Par contre, il convient de valider les classes de biotope terrestres en fonction de la donnée relevée sur le terrain, et ceci pour chaque niveau de cartographie.

L'analyse des matrices de confusions et des précisions globales (*Annexe 2.*) pour chaque niveau de biotope terrestre montre que les niveaux 1 et 2 obtiennent une très bonne précision (92.73% et 88.07%), principalement due au faible nombre de classes et leur facilité de détection et d'échantillonnage.

Par contre le niveau 3, avec 5 classes de types de forêts est plus complexe ; la détection comme l'échantillonnage terrain sont moins aisés, ce qui réduit la précision à 59.41%. En particulier, les résultats (*Annexe 2.*) soulignent une confusion importante entre la classe *Cocos nucifera forest* et les classes *Open native forest* et *Closed native forest*, qui partagent un écotone commun ; concrètement il est difficile, sur le terrain, de déterminer la frontière entre une cocoteraie avec présence d'espèces natives d'une forêt native avec présence de cocotiers épars.

Le niveau 4, représentant la végétation éparse, obtient le score le plus faible avec une précision globale de 35.97%. Celle-ci est principalement due à la difficulté d'estimer visuellement les types de végétation et leur taux de recouvrement à plus de 20m de hauteur. L'imprécision relevée proviendrait plus du protocole d'échantillonnage que de la méthode de cartographie par photo-interprétation.

7. Conclusion

Détecter et représenter les biotopes d'un atoll corallien est un problème complexe : il s'agit de cartographier à la fois des biotopes marins, intertidaux et terrestres. Nous proposons pour ce faire d'utiliser les propriétés de la donnée lidar, en association avec de la donnée optique à très haute résolution et des campagnes d'échantillonnages.

La discrimination des biotopes marins est basée sur l'information de profondeur et de localisation dans l'atoll avec un travail vectoriel de nettoyage et de délimitation de la frontière entre certaines classes. Les biotopes intertidaux sont extraits de l'occupation des sols disponible. Les biotopes terrestres, quant à eux, se sont appuyés sur une cartographie lidar *ORD* de la végétation selon un modèle à 5 strates.

Pour obtenir une cartographie claire et concise, nous proposons de représenter les biotopes terrestres sur 4 niveaux (sol, arbustes, couverts forestiers dominants et couverts arborés éparses) associés à un jeu de couleur/transparence/hachurage adapté. Cette cartographie des biotopes, disponible en ligne, est une aide précieuse pour l'évaluation de l'impact de la dératification sur l'environnement de l'atoll de Tetiaroa.

L'objectif d'une cartographie simple des biotopes étant atteint, et conscients que le plein potentiel de ces données n'a pas été atteint, les auteurs envisagent d'explorer plus avant l'utilisation de la donnée lidar conjointement à la donnée optique dans un schéma de classification multi-sources. Cela permettrait de classer les biotopes coralliens plus finement, mais aussi de produire une classification multi-strates de la végétation complexe des atolls, incluant les sous-bois.

Remerciements : à l'ETH de Zurich pour la donnée. Frank Murphy et la Tetiaroa Society pour le soutien logistique et Jean-Yves Meyer pour son aide sur la végétation.

Bibliographie

- Bossin, H., Petit, H., Marie, J., Stoll, B., Cheong Sang, M., 2016a. Releases of Wolbachia mosquito males to sterilize and suppress a population of *Aedes Polynesiensis* on Tetiaroa Atoll, French Polynesia. Presented at the International Congress for Tropical Medicine and Malaria.
- Bossin, H., Petit, H., Marie, J., Stoll, B., Cheong Sang, M., 2016b. Suppression of an isolated population of the mosquito vector *Aedes polynesiensis* on the atoll of Tetiaroa, French Polynesia, by sustained release of Wolbachia-incompatible male mosquitoes.
- Corbanea, C., Langb, S., Pipkins, K., Alleaume, S., Deshayes, M., Garcia Millane, V.E., Strasser, T., Borref, J.V., Toon, J., Michael, F., 2015. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Davies, N., Field, D., Gavaghan, D., Holbrook, S.J., Planes, S., Troyer, M., Bonsall, M., Claudet, J., Roderick, G., Schmitt, R.J., Amaral Zettler, L., Berteaux, V., Bossin, H., Cabasse, C., Collin, A., Deck, J., Dell, T., Dunne, J., Gates, R., Harfoot, M., Hench, J.L., Hopuare, M., Kirch, P., Kotoulas, G., Kosenkov, A., Leichter, J.J., Lenihan, H., Magoulas, A., Martinez, N., Meyer, C., Stoll, B., Swalla, B., Tartakovsky, D.M., Teavai Murphy, H., Turyshev, S., Valdivinos, F., Williams, R., Wood, S., IDEA Consortium, 2016. Simulating social-ecological systems: the Island Digital Ecosystem Avatars (IDEA) consortium. *Gigascience - Biomed Central* 5. <https://doi.org/10.1186/s13742-016-0118-5>
- Delassus, L., 2015. Guide de terrain pour la réalisation des relevés phytosociologiques. p. 52.
- Desmier, E., Flouvat, F., Stoll, B., Selmaoui-Folcher, N., 2011. Coconut Fields Classification Using Data Mining on a Large Database of High-Resolution Ikonos Images. Presented at the Sixth International Conference on Digital Information Management, SPIE.
- Gruen, A., Tao Guo, Serkan Ural, Matthias Troyer, Sultan Kocaman, 2017. DSM/DTM-related investigations of the Moorea Avatar project. Presented at the Asian Conference on Remote Sensing, New Delhi, India.
- Jennings, S.B., Brown, N.D., Sheil, D., 1999. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 59–73.

- Ma, Q., Su, Y.J., Guo, Q.H., 2017. Comparison of canopy cover estimations from airborne lidar, aerial imagery, and satellite imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 4225–4236.
- Mallet, C., Bretar, F., 2007. Le Lidar Topographique à Retour d'Onde Complète : État de l'art. *Traitement du signal* 24, 441–465.
- Serkan Ural, Armin Gruen, Sultan Kocaman, 2019. Point clouds over Tetiaroa - 3D modeling of a tropical island by topo-bathymetric lidar. Presented at the ACRS (40th asian conference on remote sensing).
- Stoll, B., Bossin, H., 2019. Observatoire de données de Tetiaroa : Contribution à la modélisation de l'environnement des moustiques. Presented at the SAGEO, Clermont-Ferrand.
- Stoll, B., Hart, M., Gaspar, C., 2019. Contribution de la géomatique à l'observation des nids de tortues marines de Tetiaroa. Presented at the SAGEO, Clermont-Ferrand.
- Stoll, B., Longine, M., 2019. Géomorphologie à Tetiaroa : Prémices d'un observatoire de données scientifiques et environnementales. Presented at the SAGEO, Clermont-Ferrand.
- Teina, R., Béréziat, D., Stoll, B., 2008a. A Spatial Poisson Process to Classify Coconut Fields on Ikonos Pansharpened Images, in: *Proceeding of SPIE Asia-Pacific Remote Sensing (Ed.)*. Presented at the SPIE Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques, and Applications II, p. (10 pages).
- Teina, R., Béréziat, D., Stoll, B., Chabrier, S., 2009. A Comparative Study of Several Supervised Classifiers for Coconut Palm Tree Fields Type Mapping on 80cm RGB Pansharpened Ikonos Images. Presented at the Image Processing Machine Vision Applications II.
- Teina, R., Béréziat, D., Stoll, B., Chabrier, S., 2008b. Toward a Global Tuamotu Archipelago Coconut Trees Sensing using High Resolution Optical Data. Presented at the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'08, IEEE, pp. 797–800.
- Tetiaroa Society, 2022. Restauration écologique de Tetiaroa. URL <https://www.tetiaroasociety.org/fr/programmes/conservation/restoration-ecologique-de-tetiaroa>

Annexe 1. Critères d'identification des biotopes terrestres et marins

Biotopes terrestres	Niv.	Strate 1	Strate 2	Strate 3	Strate 4	Strate 5
Scattered <i>Cocos nucifera</i>	4	Photo-interprétation + terrain				
Scattered native tree	4	Photo-interprétation + terrain				
Scattered introduced tree	4	Photo-interprétation + terrain				
Scattered <i>Pandanus tectoris</i>	4	Photo-interprétation + terrain				
<i>Cocos nucifera</i> forest	3			x	x	x
Closed native forest	3			x	x	x
Open native forest	3			x	x	
<i>Calophyllum inophyllum</i> forest	3			x	x	
<i>Casuarina equisetifolia</i> forest	3			x	x	x
<i>Pemphis acidula</i> / <i>Suriana maritima</i>	2	x	x			
<i>Scaevola taccada</i> / <i>Timonius uniflorus</i>	2	x	x			
Stretch of <i>Cladium mariscus</i>	1	x				
Bio crust	1	x				
Anthropized	1	Photo-interprétation + terrain				

Fresh water	1	Photo-interprétation
Brackish water	1	Photo-interprétation

Biotopes marins	Profondeurs (m)					Position
	[0 ; -1[[-1 ; -2[[-2 ; -4[[-4 ; -10[[-10 ; min[
Pinnacle/ridge top	x	x				Intérieur
Mid lagoon			x	x		Intérieur
Deep lagoon					x	Intérieur
Open flats	x	x				Intérieur
Shifting sand flats	x					Intérieur
Hoa	x					Intérieur
Back reef	x	x				Intérieur
Reef crest	x					Intérieur
Reef crest	x	x	x			Extérieur
Fore reef				x	x	Extérieur

Annexe 2. Matrices de confusions et précision globale des biotopes terrestres.

Terrain niveau 1 Précision globale 92,73%			Terrain niveau 2 Précision globale 98,17%			
Cartographie		Cladium mariscus	Biocrust		Pemphis acidula / Suriana maritima	Scaevola taccada / Timonius
	Cladium mariscus	27	1	Pemphis acidula / Suriana maritima	26	2
	Biocrust	3	24	Scaevola taccada / Timonius	0	81

Terrain niveau 3		Précision globale 59,41%				
Cartographie		Calophyllum inophyllum	Casuarina equisetifolia	Cocos nucifera	Closed native	Open native
	Calophyllum inophyllum	15	0	1	0	0
	Casuarina equisetifolia	0	11	17	0	6
	Cocos nucifera	5	6	230	70	132
	Closed native	0	0	0	52	11
	Open native	0	0	7	6	74

Terrain niveau 4		Précision globale 35,97%			
Cartographie		Scattered coconut	Scattered native	Scattered pandanus	Scattered introduced
	Scattered coconut	53	4	8	1
	Scattered native	179	86	28	7
	Scattered pandanus	0	0	0	0
	Scattered introduced	10	14	0	2

Annexe 3. Carte des biotopes terrestres, marins et intertidaux de Tetiaroa

