

L'exposition des populations des atolls de Rangiroa et de Tikehau (Polynésie française) au risque de submersion marine

Atoll population exposure to marine inundation: the example of the Tuamotu Archipelago (Rangiroa and Tikehau atolls), French Polynesia

Alexandre K. Magnan, Marien Ranché, Virginie K.E. Duvat, Adrien Prenveille and Fanny Rubia

Volume 18, Number 3, December 2018

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1065321ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Magnan, A. K., Ranché, M., Duvat, V. K., Prenveille, A. & Rubia, F. (2018). L'exposition des populations des atolls de Rangiroa et de Tikehau (Polynésie française) au risque de submersion marine. *VertigO*, 18(3).

Article abstract

This paper characterizes the current exposure of people leaving on the low-lying atoll reef islands to the risk of marine inundation induced by various sea-related hazards (i.e. cyclones, distant swells and local storms). It offers one of the rare scientific studies that go beyond the general assertion on atoll populations' exposure to sea-related hazards, by bringing empirically based and detailed evidence on real exposure today. The paper builds on case studies in the Tuamotu Archipelago in French Polynesia, and combines two main types of data, i.e. the inundation levels of past events, and the management practices implemented by both inhabitants and public authorities (type of housing and coastal protection devices). The total sample is composed of 106 interviews and 931 studied houses. The results show first, that more than 61% of houses are located in an area that experienced at least one substantial marine inundation event since the 1980s. Second, that when inhabitants implement options to face coastal risks, they rather target coastal erosion (seawalls, rip-raps, vegetation plantation, etc.) than marine inundation. They only address the risk of marine inundation through housing standard, i.e. buildings' elevation. This option however remains limited as 52% and 23% of houses have floor elevations less than 50 cm and 20 cm high, respectively. As a result, the population exhibits a high level of exposure to marine flooding. Exploring the root causes of such a situation, the paper emphasises the contributions of both the population growth that occurred over the past three decades and the constraining land tenure system to the increase in houses and public buildings density in flood-prone areas. Then the paper discusses pragmatic and realistic ways to decrease population exposure in the near future.

Tous droits réservés © Université du Québec à Montréal et Éditions en environnement VertigO, 2018



This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

<https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/>

L'exposition des populations des atolls de Rangiroa et de Tikehau (Polynésie française) au risque de submersion marine

Atoll population exposure to marine inundation: the example of the Tuamotu Archipelago (Rangiroa and Tikehau atolls), French Polynesia

Alexandre K. Magnan, Marien Ranché, Virginie K.E. Duvat, Adrien Prenveille et Fanny Rubia

- 1 Les submersions d'origine météo-marine représentent une menace majeure pour les îles basses des atolls (Huetz de Lempis, 1984 ; Lewis, 1990 ; Duvat et Magnan, 2012 ; Hoeke et al., 2013 ; Duvat, 2015). Or, dans un contexte de changement climatique, quelle que soit l'évolution future de la fréquence et/ou de l'intensité des cyclones et des houles d'origine distante (Nurse et al., 2014 ; Wong et al., 2014), et là où les côtes ne s'exhausseront pas naturellement, il faut s'attendre à une augmentation de l'ampleur des submersions marines du simple fait de l'augmentation du niveau des océans¹ (Seneviratne et al., 2012 ; Nurse et al., 2014 ; Wong et al., 2014 ; Mc Lean et Kench, 2015). D'autres grands bouleversements environnementaux tels que l'acidification et le réchauffement de l'océan accentueront indirectement la vulnérabilité de ces territoires au travers d'un affaiblissement des capacités d'adaptation et de résilience d'écosystèmes comme les récifs coralliens ou les mangroves (Gattuso et al., 2015 ; Hoegh-Guldberg et al., 2018). En parallèle, des composantes humaines vont elles aussi avoir une influence importante sur les niveaux de risque² futurs, comme par exemple les modalités d'aménagement du territoire (Cardona et al., 2012 ; Magnan et Duvat, 2015 ; Duvat et al., 2017).
- 2 Il existe cependant peu d'études de cas qui font un bilan précis et argumenté du degré actuel d'exposition des enjeux humains (personnes, biens et infrastructures) à la submersion dans les îles basses (Duvat et al., 2013). C'est l'ambition de cet article qui prend pour cas d'étude les principales îles habitées des atolls de Tikehau et de Rangiroa

dans l'archipel des Tuamotu, ce dernier rassemblant près de 6 % des 275 918 habitants de la Polynésie française (en 2017). L'article se concentre sur les dernières grandes submersions dues aux cyclones et aux houles d'origine distante. La diversité des événements générateurs de submersion en termes d'intensité et de trajectoire a pour effet une forte variabilité de leurs impacts locaux, dont il faut tenir compte pour appréhender le degré d'exposition des enjeux humains. Si certains de ces phénomènes météo-marins peuvent contribuer, individuellement ou lorsqu'ils se combinent, à l'apport de matériaux coralliens à la côte, et parfois à la formation d'îlots sur la couronne récifale des atolls (Baines et McLean, 1976 ; Bourrouilh-Le Jan et Talandier, 1985), il n'en demeure pas moins que dans des environnements perturbés par l'implantation humaine et sans stratégie d'adaptation, tout porte à envisager un accroissement de l'exposition des enjeux humains et donc du risque de décès et de dommages. Dans ce contexte, divers scénarios catastrophiques sur le devenir des atolls ont émergé dans les sphères politiques, médiatiques et parfois scientifiques, qui vont jusqu'à annoncer la disparition des îles basses et, par conséquent, des migrations massives et définitives des communautés insulaires vers d'autres pays (Barnett, 2005 ; Dickinson, 2009 ; McAdam, 2010). Pourtant, en l'absence d'un bilan clair sur le niveau d'exposition actuel des populations des îles basses, de tels scénarios restent spéculatifs et demandent à être réexaminés sur la base d'une appréhension plus fine des facteurs explicatifs de l'exposition actuelle.

- 3 Cet article croise deux types de données de terrain collectées à partir d'entretiens auprès des populations des atolls de Rangiroa et de Tikehau. Le premier type de données touche à la reconstruction des limites de submersion des derniers événements générateurs de submersion marine qui ont affecté ces îles (les cyclones de 1983, la houle australe de 1996, le cyclone Oli de 2010 et la tempête locale de 2013). Le second traite des modalités d'aménagement des parcelles (ouvrages, plantation de végétation) et de l'habitat (élévation du plancher, matériaux utilisés) déployées par les résidents. Croiser les données « submersions passées » et « bâti actuel » permet une estimation empiriquement fondée de l'exposition actuelle de la population à la submersion marine. Ne mobilisant ni scénarios d'élévation future du niveau de la mer, ni scénarios d'évolution des dynamiques d'occupation du territoire à venir, cet article ne cherche en aucune façon à projeter le risque d'exposition actuel dans le futur. En revanche, au travers d'une analyse de l'évolution de la répartition des enjeux humains depuis les années 1980, de l'analyse des modes d'aménagement et d'une prise en compte de la diversité des types de submersion pouvant affecter ces territoires, il avance quelques facteurs explicatifs de l'évolution de l'exposition jusqu'à aujourd'hui.
- 4 Après avoir présenté les terrains d'étude et les événements météo-marins générateurs de submersion qui les ont affectés au cours des dernières décennies, l'article présente les méthodologies de collecte de données sur le terrain (entretiens) et d'analyse (traitements SIG). Il expose ensuite les résultats obtenus sur les submersions passées et l'exposition actuelle des enjeux humains. Enfin, il discute des facteurs explicatifs de cette exposition, aborde certaines questions cruciales que soulève l'analyse de l'exposition actuelle, et dresse un bilan de l'intérêt des démarches méthodologiques déployées dans cette étude.

Présentation du contexte d'étude

- 5 De par leurs caractéristiques physiques, en particulier leur faible altitude, leur petite dimension et le régime de houle auquel elles sont soumises, les îles coralliennes des atolls

de Rangiroa et de Tikehau sont par nature très exposées au risque de submersion marine. Elles concentrent plus de 18 % des 16 831 habitants de l'archipel des Tuamotu (Tableau 1).

Tableau 1. Situation démographique des terrains d'étude entre 1983 et 2017.

	Population (nombre d'habitants)			
	1983	1996	2012	2017
Polynésie française	166 788	219 501	268 207	275 918
Archipel des Tuamotu-Gambier	11 793	15 370	16 664	16 881
Rangiroa (Avatoru + Tiputa)	1 169	1 913	2 401	2 4709
Tikehau (Tuherahera)	279	400	540	560

Source : Institut de la Statistique de Polynésie Française, [En ligne] URL : <http://www.ispf.pf/>.

Les îles d'Avatoru et de Tiputa sur l'atoll de Rangiroa

- 6 L'atoll de Rangiroa, avec une longueur maximale de 87 km et une largeur maximale de 37 km, est le plus grand atoll des Tuamotu (Figure 1). Il possède deux passes principales situées au nord, dites d'Avatoru et de Tiputa, au bord desquelles se situent les deux principaux villages. À partir des années 1980, le village d'Avatoru s'est rapidement étendu vers l'est jusqu'à atteindre, au lieu-dit Ohotu, la passe de Tiputa. Les îles d'Avatoru à l'extrême ouest (1,3 km²) et de Tiputa à l'est (0,7 km²) présentent la morphologie classique d'un motu (Stoddart et Sachet, 1969 ; Stoddart et Steers, 1977) avec, de l'océan au lagon, la succession de trois entités principales : un bourrelet détritique constitué de sable et de débris coralliens culminant à 5 m d'altitude, un intérieur marécageux, et une côte sableuse basse (< 2 m) (Figure 2). Raccordées par des ponts, les six îles (2,2 km² au total) qui se trouvent entre l'île d'Avatoru à proprement parler à l'ouest et celle de Tiputa à l'est ne possèdent pas de zone marécageuse intérieure. Les marécages connaissent des variations de niveau avec la marée et les précipitations qui engendrent parfois leur débordement. Lors des tempêtes, les incursions d'eau marine par la côte lagonaire provoquent des phénomènes couplés de submersion-inondation.

Figure 1. Localisation du peuplement sur l'atoll de Rangiroa /Location map of settlements in Rangiroa atoll.

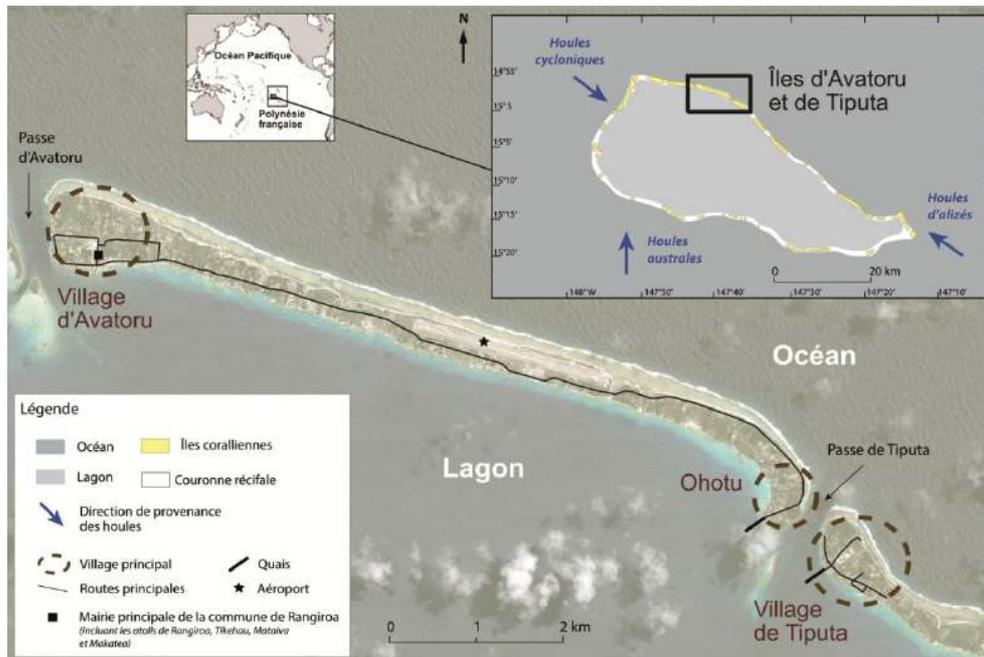
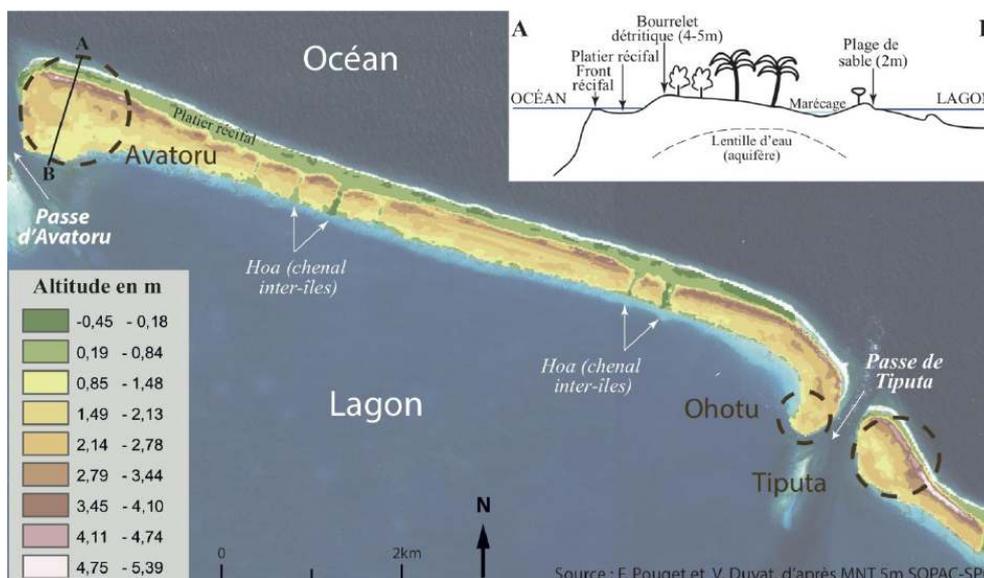


Figure 2. Carte altimétrique et croquis topographique simplifiés des îles habitées de l'atoll de Rangiroa /Elevations and simplified topography of the inhabited islands of the Rangiroa atoll.



- 7 Pour ce qui concerne la dynamique de population de l'atoll, il faut la replacer dans le contexte plus large de l'archipel des Tuamotu qui a été marqué, dès la seconde moitié du 19e siècle et sous l'impulsion des colons français, par le développement de la coprahiculture (cocotiers). Cela a eu au moins deux grands types d'effets (Ottino, 1972 ; Ravault, 1979). D'abord, l'émergence et le développement d'une économie marchande et monétaire qui se sont accompagnés, au gré des exportations de coprah, de l'importation de produits alimentaires nouveaux (riz, huile, sucre, café, lait, conserves de poisson) et aujourd'hui devenus des incontournables du régime alimentaire des Paumotu, les

habitants des Tuamotu. Ensuite, la sédentarisation des communautés en villages localisés près des passes, pour faciliter les échanges avec l'extérieur, et alors que l'occupation traditionnelle des îles suivait un mode d'habitat dispersé, voire itinérant pour pouvoir exploiter diverses îles de l'atoll selon le principe du *rahui* (schématiquement comparable à celui de la jachère). Le marché du coprah a ensuite connu une grande crise au milieu du 20^e siècle, ce qui a eu pour effet un recul du niveau de vie des *Paumotu* et un exode rural massif vers Tahiti. Des alternatives économiques ont été développées dans les années 1980 avec la perliculture, qui connaîtra cependant elle aussi une crise profonde dans les années 2000, et le tourisme, dont les effectifs stagneront assez vite. Aujourd'hui, le maintien d'une population dans les Tuamotu doit beaucoup au subventionnement de la production de coprah par le gouvernement de Polynésie française dès la fin des années 1960, et qui permet aux coprahiculteurs d'obtenir une base de salaire, très souvent complétée par l'exercice d'une autre activité (la pêche généralement). L'atoll de Rangiroa est caractéristique de cette histoire, ayant été au milieu du 20^e siècle le plus grand producteur de coprah de toute la Polynésie française. Cette production a baissé depuis, alors qu'une activité d'exportation de poisson à destination des marchés de Tahiti s'est développée et que l'atoll a acquis une renommée mondiale en matière de plongée sous-marine. Cela explique que, selon l'Institut de la statistique de la Polynésie française (ISPF), 2 709 personnes habitent aujourd'hui l'atoll (ISPF, 2017), réparties entre les deux principaux villages de Tiputa et d'Avatoru. L'île de Tiputa mesure environ 2 km de long sur 270 à 570 m de large. Elle est le foyer d'habitation le plus ancien et le nombre de bâtiments y est passé, toujours selon l'ISPF, de 133 en 1981 à 344 en 2013 (ISPF, 2017). Si Tiputa reste le chef-lieu administratif officiel de la commune qui rassemble les atolls de Rangiroa, Tikehau, Mataiva et Makatea, c'est sur « l'île » d'Avatoru – en fait constituée de 7 îles raccordées par des ponts –, à l'ouest de la passe de Tiputa, que se trouve désormais le centre névralgique de la commune : mairie principale, services techniques, gendarmerie, école, collège, centre médical, pharmacie et services de santé. L'« île » d'Avatoru est plus grande : elle fait environ 10 km de long sur 350 m de large en moyenne (900 m maximum) et compte 31 km de linéaire côtier. Elle est la plus peuplée et a été le principal réceptacle du boom démographique qu'a connu l'atoll à partir de la fin des années 1950 et plus encore de 1980 : +119 % sur l'ensemble de Rangiroa entre 1983 (1 169 habitants) et 2012 (2 567). Logiquement, le nombre de bâtiments publics et résidentiels sur l'ensemble insulaire d'Avatoru a lui aussi fortement augmenté, passant de 200 à 1 082 entre 1981 et 2013³.

L'île de Tuherahera sur l'atoll de Tikehau

- 8 L'atoll de Tikehau est situé à 15 km à l'ouest de Rangiroa. L'anneau récifal n'est interrompu que par une seule passe, dite de Tuheiava, située à l'ouest (Figure 3). L'île de Tuherahera, qui accueille aujourd'hui la quasi-totalité de la population de l'atoll (560 habitants en 2017 (ISPF, 2017)), est située au sud de l'atoll. Elle a une surface totale de 2,5 km², sa longueur maximale étant d'environ 3,5 km et sa largeur variant entre 450 et 900 m. Elle ne dépasse pas quelques mètres d'altitude, sa partie la plus élevée étant le sud (6-8 m environ) où l'on trouve les restes d'un récif ancien émergé (*feo*). Comme les îles précédentes, elle possède une topographie en pente vers la côte lagunaire et un marécage intérieur qui a été en partie comblé pour l'implantation de la piste d'atterrissage.

- 9 Après l'arrivée des Européens et l'instauration des cocoteraies, les habitants devenus producteurs de coprah se déplaçaient, comme à Rangiroa, entre plusieurs villages pour passer six mois au nord de l'atoll, et six mois au sud. Leur sédentarisation progressive sur Tuherahera s'est accompagnée, en particulier sur la période récente, d'une croissance démographique importante, bien qu'inférieure à celle de Rangiroa. La population est passée de 279 à 529 habitants entre 1983 et 2012 (+ 89 %), et le nombre de bâtiments de 134 en 1981 et 337 en 2014. Comme à Rangiroa, la culture du coprah à Tikehau est en déclin et subventionnée. L'ouverture de l'aéroport en 1977 a permis le développement d'une activité touristique sous la forme de pensions de famille et d'un complexe hôtelier international qui fournit un certain nombre d'emplois directs (femmes de ménage, par exemple) et indirects (préparation de feuilles de cocotiers séchées pour la rénovation régulière des toits des bungalows, par exemple). La pêche y constitue cependant l'une des principales sources de revenus des habitants (Kronen et al., 2009), la pluriactivité étant ici comme à Rangiroa très courante.

Figure 3. Localisation du peuplement sur l'atoll de Tikehau /Location map of settlements in Tikehau atoll.



- 10 Les observations de terrain et les discussions avec les habitants, y compris ceux ayant des fonctions institutionnelles, font apparaître une gradation rural-urbain de l'île de Tuherahera à l'ensemble insulaire d'Avatoru, l'île de Tiputa présentant une position intermédiaire.

L'origine des houles génératrices de submersion

- 11 Le climat de houles des Tuamotu du Nord-ouest associé aux houles d'alizé, qui proviennent de l'est et dominent le régime saisonnier en se renforçant pendant l'hiver austral (mai-octobre), différents types de houles de tempête (Andréfouët et al., 2012). Les premières sont dues aux cyclones qui se forment lors d'épisodes El Niño dans la zone intertropicale, et dont les vents et les houles balayent l'archipel des Tuamotu suivant des

trajectoires globalement orientées nord-sud (Larrue et Chiron, 2010). Il arrive que des cyclones qui passent à distance des Tuamotu n'affectent pas ces îles par leurs vents, mais par leurs houles, comme ce fut le cas du cyclone Oli en février 2010. Les secondes sont les houles d'origine distante, dont les conséquences restent peu étudiées (Hoeke et al., 2013 ; Nurse et al., 2014 ; Smithers et Hoeke, 2014). Elles sont générées par les tempêtes qui se forment en hiver dans les zones tempérées et polaires des hémisphères nord et sud, dont les houles peuvent atteindre les atolls des Tuamotu pendant l'été austral (novembre-mars) pour celles de nord et pendant l'hiver austral (mai-octobre) pour celles de sud. Ces houles peuvent engendrer des submersions majeures, comme cela a été le cas de la houle australe de juillet 1996 sur l'atoll de Tikehau. Enfin, des tempêtes tropicales locales de moindre intensité peuvent être à l'origine de vents et de vagues destructeurs, comme celle qui a touché l'atoll de Rangiroa en septembre 2013.

Méthodologie

- 12 Deux types de données ont été collectés sur le terrain : les caractéristiques des submersions liées à des événements passés (surfaces submergées, hauteur d'eau atteinte, etc.), et celles du bâti et des dispositifs actuels de protection face à la mer. Nous désignons par « dispositif de protection » l'ensemble des interventions techniques contribuant à la protection des enjeux humains, intentionnelles ou pas, et n'incluant pas les caractéristiques de l'habitat lui-même. Cela revient à prendre en compte les ouvrages de défense (épis, cordons d'enrochement, murs de protection, talus) et la plantation de végétation. Ces données ont été numérisées pour constituer une base de données sous format SIG.

Reconstruction des submersions passées

- 13 Les différents types d'événements retenus (cyclones et dépressions tropicales, épisodes de houles distantes et tempête locale) pour la reconstitution de submersions ont été identifiés à partir de la littérature scientifique (Dupon, 1987 ; Larrue et Chiron, 2010 ; Canavesio, 2015) et de la mémoire collective locale. Au total ont été retenus deux cyclones, une tempête tropicale, une tempête locale et un épisode de houles distantes (Tableau 2). Les cyclones Orama et Veena de 1983 se caractérisent par une pression atmosphérique minimale de 950 hPa et des pics de vents à plus 180 km/h. Ils ont généré des vagues dont la hauteur à la côte a été estimée par les habitants – il n'existe pas de mesures objectivées – entre 6 et 8 m. Les habitants ont également évalué à 6-7 m la hauteur à la côte des vagues générées par la houle australe de juillet 1996.
- 14 Un autre épisode de submersion ayant affecté ces îles a été identifié (houle distante de 2006), mais faute de données, il n'a pu être intégré à l'analyse. Enfin, il faut noter que l'événement de 2010 est très particulier en raison du couplage d'une tempête tropicale affectant directement l'atoll de Tikehau (pluie, vent, vagues) et des effets du cyclone distant Oli (février 2010), dont les fortes précipitations ont touché Tikehau⁴.

Tableau 2. Événements météo-marins retenus pour l'identification des niveaux de submersion marine/Climatic events used for the identification of marine inundation levels.

		Entretiens « submersion »
Sites d'étude	Événements	

		Nombre	Total	Profils des personnes interrogées sur les impacts de l'événement (et nombre *) -
SECTEUR D'Avatoru (atoll de Rangiroa)	Cyclone Orama (23-24 févr. 1983)	4	15	Cultivateur-pêcheur (3), maire-adjoint (1), maintenance d'hôtel (1), aiguilleur du ciel (1), employés d'hôtel (1), chercheur halieutique-perliculture (1), gérante de pension (1), pompier (1), plongeur (1)
	Cyclone Veena (10-11 avril 1983)	5		
	Houle distante (19-21 juil. 1996)	3		
	Tempête tropicale (23 sept. 2013)	3		
Tiputa (atoll de Rangiroa)	Cyclone Orama (23-24 févr. 1983)	3	6	Retraité météo-France (1), cultivateur-pêcheur (2), travaux publics (1), employés d'hôtel (1), gérante de pension (1)
	Cyclone Veena (10-11 avril 1983)	1		
	Houle distante (19-21 juil. 1996)	2		
	Tempête tropicale (23 sept. 2013)	0		
Tuherahera (atoll de Tikehau)	Cyclone Veena (10-11 avril 1983)	5	12	Boulangier et producteur de coprah (1), gendarme (1), producteur de coprah (1), producteur de coprah et pêcheur (1), pêcheur et en charge du commerce du coprah (1)
	Houle distante (19-21 juil. 1996)	4		
	Tempête tropicale (31 janv.-2 févr. 2010) + cyclone Oli (31 janv.-2 fév. 2010)	3		

Les cartes de submersion par événement ont été constituées à partir de l'agrégation des cartes d'impacts réalisées par les personnes interrogées à partir de tirages papier d'images satellites récentes à haute résolution (« reconstruction cartographique participative »). Ces cartes agrégées ont ensuite été intégrées au SIG, lequel a permis de calculer des surfaces submergées et ainsi estimer la part des îles submergées par tel ou tel événement. Il existe cependant un effet de distorsion entre d'une part, une collecte de données primaires avant tout qualitatives et issues de la mémoire longue des personnes interrogées, et d'autre part un outil moderne, le SIG, qui permet d'approcher un certain degré de précision dans la donnée secondaire (ici les calculs de surfaces). Pour limiter cet effet de distorsion tout en retranscrivant la qualité des données initiales tirées des entretiens, nous avons fait le choix, pour les données de surfaces submergées, de limiter le nombre de décimales à un chiffre après la virgule. * N.B. : une même personne a parfois été interrogée sur plusieurs événements, d'où un écart entre le nombre d'entretiens total et le nombre de personnes interrogées.

- 15 En l'absence d'études scientifiques préalables sur ces événements passés, les impacts de ces événements en termes de submersion ont été caractérisés à partir d'entretiens semi-directifs individuels, une méthode par exemple précédemment utilisée par R. Canavesio

(2015). Dans notre cas, 33 entretiens au total ont été réalisés entre le 1^{er} février et le 22 mars 2014 sur les trois sites d'étude, et dénommés ci-dessous « entretiens submersion ». Les personnes interrogées ont été choisies sur la base de critères spatiaux (proximité de l'habitat à la côte, répartition sur le littoral), afin de couvrir l'ensemble de la zone d'étude. Chaque personne interrogée devait également impérativement avoir vécu le ou les événement(s) sur lequel elle était interrogée, et être adulte au moment des faits.

- 16 D'une durée moyenne d'une heure et demie, chaque entretien a été réalisé à domicile et pour un événement donné, et en partant de l'événement que la personne interrogée a cité spontanément comme ayant été le plus marquant à ses yeux. Celle-ci a pu raconter librement l'événement et ses impacts sur la base d'une grille d'entretien permettant à l'enquêteur de le guider et de récolter, au-delà d'éléments sur la situation de l'interrogé, des informations précises sur les impacts (a) morphologiques sur l'île et (b) sur le récif corallien ; (c) sur les ressources et écosystèmes ; (d) sur les activités de subsistance et (e) les activités économiques ; (f) sur les infrastructures et les services fondamentaux ; (g) sur la démographie et la santé ; et (h) sur le bâti. Dans cet article, seules sont mobilisées les données relatives aux phénomènes (1) de submersion marine liée à l'incursion d'eau de mer sur la terre (distance de pénétration des vagues, hauteurs d'eau atteintes sur l'île, hauteur de la houle à la côte) et (2) d'inondation associée aux pluies, à la remontée de la lentille souterraine et au débordement des marécages (étendue de l'inondation et hauteurs d'eau atteintes). Une analyse plus poussée des impacts dans leur ensemble est proposée dans Duvat et al. (2017). Ces informations submersion/inondation ont également été cartographiées avec chaque interrogé à partir de tirages papiers d'images satellites récentes zoomées et sur lesquelles la personne pouvait dessiner, avec l'aide de l'enquêteur si besoin. Ce travail de « reconstruction cartographique participative » s'est donc appuyé sur la mémoire locale des événements.
- 17 Enfin, chaque entretien a été qualifié par un niveau de fiabilité reposant sur une appréciation, par deux enquêteurs⁵ et en interaction avec les autres membres de l'équipe, des degrés de cohérence « individuelle » (cohérence des réponses fournies par un seul et même interrogé, et recoupements entre les différentes catégories d'impacts abordées dans l'étude) et « collective » (par rapport aux réponses fournies par les autres interrogés). Il est important de noter que cette appréciation a également largement bénéficié d'une connaissance fine par deux des auteurs de cet article⁶ à la fois de ces milieux et de la littérature scientifique sur le thème « impacts/submersion-inondation/atolls ». Suite à cette évaluation, seuls les entretiens jugés « fiables à très fiables » ont été retenus (33 sur les 37 réalisés au total), puis intégrés à la base de données SIG (logiciel ArcGIS ; voir la sous-section « numérisation et traitements » ci-dessous). À noter également que sur l'atoll de Tikehau, les hauteurs d'eau et distances de pénétration des vagues relatives à la houle distante de 1996 ont pu être comparées, dans un second temps, aux photographies prises par le photographe professionnel B. Marty, habitant de Tuherahera⁷.
- 18 Ainsi, l'ensemble des données collectées a permis de combler un vide de connaissances scientifiques au travers de l'élaboration de cartes d'impacts présentant notamment des limites de submersion/inondation, et qui ont servi de trame de fond à notre étude. Il est important de préciser que cette approche de reconstruction cartographique participative présente l'originalité de chercher à caractériser les impacts de phénomènes qui ont eu lieu il y a plusieurs années, voire décennies. Il est donc essentiellement fait appel à la mémoire longue des personnes, ce qui introduit nécessairement des biais dans l'analyse,

par exemple une certaine imprécision dans la description des caractéristiques d'un épisode de submersion (extension spatiale, hauteurs d'eau, etc.). Il convient toutefois de noter que les personnes interrogées ont fait preuve d'une remarquable connaissance des îles, de leur géographie et de leurs ressources (Ghasarian et al., 2004). Si bien que lorsqu'elles évoquaient une limite de submersion, elles se référaient à des repères concrets (une hauteur d'eau dans leur maison, les limites de la propriété familiale, une ancienne maison ou une ancienne route, une zone de coprahiculture, etc.) qu'elles ont parfaitement su localiser dans l'espace à partir des images satellites. Cet article s'appuie donc sur la mémoire des communautés *Paumotu*, connues comme ayant encore, comme celles de nombreux autres atolls du Pacifique, un mode de transmission principalement oral du savoir, des savoir-faire et de l'histoire de la communauté, et un lien étroit à leur environnement garantissant sa bonne connaissance et une bonne compréhension des processus physiques en jeu (Ottino, 1972 ; Weisler, 1999 ; Bridges et McClatchey, 2009 ; Canavesio, 2015). Un tel contexte socioculturel rend possible le travail de reconstruction cartographique participative sur lequel s'appuient les résultats de cet article.

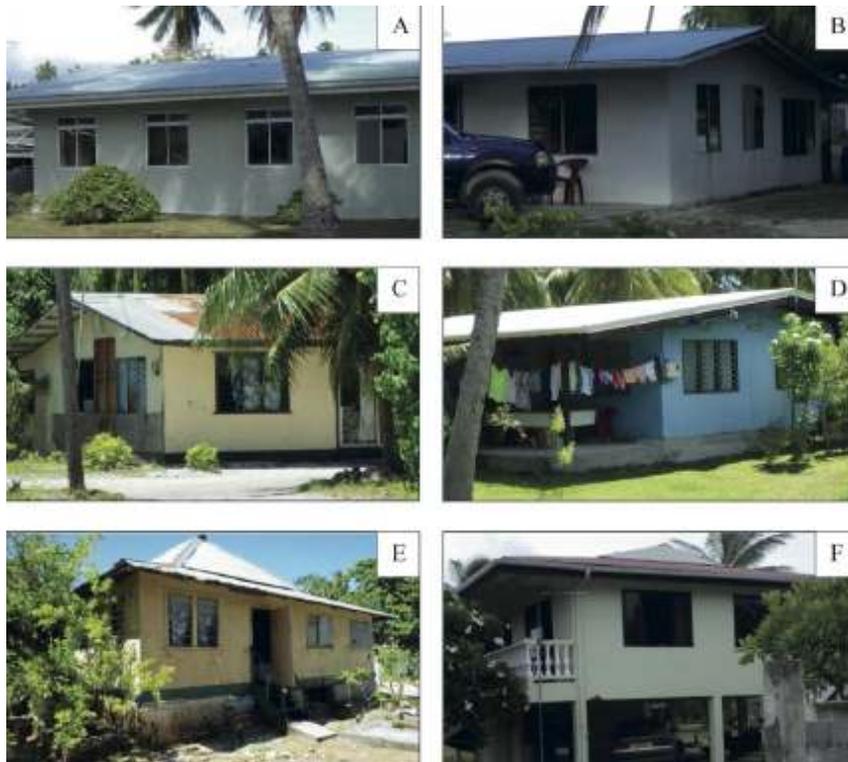
Caractérisation des dispositifs de protection et de l'habitat

- 19 L'identification et la caractérisation des dispositifs de protection des enjeux et du bâti résidentiel ont reposé sur deux méthodologies complémentaires : des grilles de caractérisation des aménagements et du bâti, et des entretiens semi-directifs auprès de la population (dénommés ci-dessous entretiens « habitat et dispositifs de protection »).

La grille de caractérisation de l'habitat

- 20 La grille de caractérisation de l'habitat repose sur deux critères renseignés à partir d'observations de terrain préalables⁸ : le type de matériaux et leur agencement (tôle, habitation anticyclonique ou non, bois, béton) et la surélévation par rapport au niveau du sol (existante ou non, type de surélévation – sur pilotis/sur dalle + hauteur en cm). La hauteur de surélévation a été estimée plutôt que systématiquement mesurée, et ce pour des raisons opérationnelles (temps de mission, difficulté à accéder directement aux maisons). Trois démarches ont cependant été mises en place pour pallier les biais induits : les niveaux de surélévation ont été mesurés précisément pour un échantillon d'une vingtaine d'habitations, à la fois pour calibrer l'appréciation visuelle des deux enquêteurs⁹ et pour identifier les marges d'erreur (différence mesure/estimation < 15 cm) ; le croisement des données des deux enquêteurs (qui ont fait le terrain ensemble ; différences < 10 cm) ; et le regroupement des données en 6 classes (Figure 4) permettant d'absorber en partie les marges d'erreur ($H = 0\text{cm}$, $0 < H < 20$, $20 \leq H \leq 30$, $30 < H \leq 50$, $50 < H < 100$, $H \geq 100$).

Figure 4. Présentation des gammes de hauteurs de surélévation des habitations/Types of buildings elevation.



Hauteur de surélévation : A : 0 cm, B : $0 < H < 20$ cm, C : $20 \leq H \leq 30$ cm, D : $30 < H \leq 50$ cm, E : $50 < H < 100$ cm, F : $H \geq 100$ cm. Photos prises sur les différents terrains d'étude.

Les entretiens sur les dispositifs de protection face à la mer

- 21 Sur les trois sites d'étude, 73 entretiens semi-directifs individuels auprès de résidents (39 à Avatoru, 19 à Tiputa, 15 Tikehau), anonymes et d'une trentaine de minutes en moyenne, ont été réalisés à domicile (Ranché et al., 2016). Ils avaient pour but d'identifier les déterminants, d'une part, de la mise en place de dispositifs de protection et d'autre part, des caractéristiques de l'habitat en termes de hauteur de surélévation, de type de surélévation et de type de matériaux. Ils ont été déployés de façon systématique au sein de secteurs « prioritaires », c'est-à-dire où parcelles et habitations sont adjacentes au trait de côte et situées soit en bordure de *hoa* (chenal inter-île), soit côté lagon, soit côté océan. Sur Avatoru, les zones prioritaires ont également intégré les secteurs de concentration de la population, en l'occurrence le village dit d'Avatoru à l'ouest, et la zone d'Ohotu à l'est. L'absence d'aménagements sur des parcelles littorales pouvant potentiellement témoigner tout autant d'une stratégie spécifique de gestion des aléas que d'une absence de stratégie, 16 parcelles de ce type ont également fait l'objet d'entretiens.
- 22 Divers types de dispositifs ont été considérés et caractérisés : les murs de protection (informations collectées sur le terrain pour chaque ouvrage : maçonné ou pas, longueur, hauteur à partir du substrat, état général), les cordons d'enrochements (matériaux, calibre, longueur, hauteur, état général), les talus (matériaux, longueur, hauteur, état général), les épis (matériaux, longueur, état général) et la végétation plantée (espèces, densité, date approximative de plantation, état général). Ces dispositifs sont présentés de

manière détaillée dans Ranché et al. (2016), et de manière synthétique dans le tableau 4 ci-dessous.

Numérisation et traitements

- 23 Les données « submersion » et « caractérisation du bâti » ont été numérisées sous ArcGis pour être intégrées dans une base de données SIG.

Les entretiens « submersion »

- 24 Les cartes de submersion et d'inondation (hauteurs d'eau, limites spatiales, différenciation submersion/inondation là où cela a été possible) ont été numérisées à partir du croisement et de l'agrégation des informations géographiquement localisées par les personnes interrogées, et en s'appuyant sur des repères fixes depuis la date de l'événement (maisons, routes, lignes d'habitations, églises, écoles, etc.). Aucune interprétation personnelle des enquêteurs n'a été réalisée et seules les informations issues des entretiens ont été retranscrites.

L'habitat

- 25 L'ensemble du bâti a été numérisé par photo-interprétation à partir des images PLEIADES du Centre national d'études spatiales (CNES)¹⁰ datées de 2013 pour Rangiroa et de 2014 pour Tikehau. Les informations issues de la caractérisation de l'habitat y ont été rajoutées. Cette couche contient donc à la fois des habitations que nous avons pu directement caractériser, et des bâtiments indifférenciés. Les photographies aériennes datées de 1962 (Tikehau), 1966 (Rangiroa), 1981 (Rangiroa et Tikehau), 1984 (Rangiroa et Tikehau), et 1998 (Rangiroa et Tikehau), et fournies par le service de l'urbanisme de Polynésie française, géoréférencées à partir des images PLEIADES, ont également permis de numériser le bâti pour chaque date.

Le trait de côte

- 26 Le trait de côte actuel (2013 sur Rangiroa et 2014 sur Tikehau), défini comme étant la ligne de stabilité qui correspond à la ligne de végétation sur les côtes non aménagées et à la face interne des ouvrages de défense sur les côtes qui en sont équipées, a aussi été numérisé (Duvat et al. 2017). L'incertitude totale maximale (géoréférencement + numérisation) est inférieure à 4 m.
- 27 Ensemble, ces données ont permis d'obtenir diverses statistiques spatiales, en particulier sur la position du bâti à différentes dates (distance au trait de côte) et sur son exposition à des niveaux de submersion définis à partir d'événements météo-marins de référence (type de submersion et nombre de bâtiments actuels situés en zone submersible).

Résultats

Submersions passées

- 28 Le tableau 3 synthétise, sur la base des 33 entretiens « submersion », les caractéristiques de la submersion liée aux événements passés étudiés.

Tableau 3. Impacts des submersions passées/Impacts of past marine inundation events.

		Surface submergée (km ²)	Part de la surface de l'île submergée (%)	Hauteur d'eau maximale évoquée lors des entretiens (en cm)
TIKEHAU (île de 2,53 km ²)	Cyclone Veena (1983)	1,2	47	60
	Houle distante 1996	2,3	91	00
	Dépression 2010 + Oli 2010	0,8	32	80
SECTEUR D'AVATORU (île de 3,56 km ²)	Cyclone Veena (1983)	1,1	31	20
	Cyclone Orama (1983)	1,1	31	60
	Houle distante 1996	0,2	6	100
	Dépression 2013	0,1	3	50
TIPUTA (île de 0,67 km ²)	Cyclone Orama (1983)	0,2	30	100
	Houle distante 1996	0,1	15	100
	Dépression 2013	0,1	15	50

- 29 Les différents événements météo-marins générateurs de submersion n'ont pas affecté de manière égale les sites étudiés, en raison de facteurs propres à ces événements (direction de provenance de la houle, en particulier) et des caractéristiques morphologiques des sites. Prenons l'exemple du cyclone Veena (10-11 avril 1983) qui a généré des houles de nord-ouest. Si celles-ci ont causé une submersion à Rangiroa dans le secteur d'Avatoru, le phénomène n'a pas affecté Tiputa du fait de l'orientation de sa face océanique. Dans le village de Tuherahera (Tikehau), la houle dans le lagon est décrite dans les entretiens comme ayant atteint une hauteur de 4 m à la côte, ce qui lui a permis de submerger Tuherahera par la côte lagonaire et par le débordement des deux *hoa* encadrant l'île (Figure 5). Depuis ces zones d'entrée, l'eau a pénétré jusqu'à 500 m dans les terres. Au niveau de l'aéroport, la submersion marine et le débordement du marécage se sont cumulés. Au sein même du village, les témoignages font état d'une hauteur d'eau de 40 à 60 cm au niveau de la route la plus proche du lagon. Malgré ces impacts conséquents, la submersion liée à Veena sur Tikehau est jugée « faible » par les habitants, lesquels ont davantage été marqués par les effets du vent (rafales > 250 km/h) dont ils estiment

collectivement qu'il a ravagé 95 % du patrimoine bâti de l'île. Un autre critère qui intervient dans l'appréciation de cet événement par les habitants de Tuherahera tient au fait qu'ils ont vécu en 1996 une submersion de beaucoup plus grande ampleur (91 % de la surface de l'île a été affectée ; voir Tableau 3).

Figure 5. Cartographie de la submersion engendrée par le cyclone Veena en avril 1983 sur l'île de Tuherahera, Tikehau /Areas flooded by Veen cyclones in April 1983 on Tuherahera island, Tikehau atoll.



Fond : Images Pléiades 22 aout 2014 (©CNES, distribution Astrium Services /Spot Image S.A, France, all rights reserved).

Sources : entretiens auprès de la population (campagne Réomers 2014)

- 30 Deux précautions doivent être mentionnées quant à l'interprétation de ces résultats. La première est que bien que les habitants connaissent très bien les îles sur lesquelles ils vivent, il est possible que des zones non habitées aient été submergées pendant l'un ou l'autre de ces événements et que les habitants n'aient pas eu connaissance de ce fait ou qu'ils ne l'aient pas gardé en mémoire. La seconde renvoie au fait que les personnes interrogées distinguent mal les submersions marines des inondations lorsque les deux phénomènes se recouvrent dans l'espace. Ces dernières peuvent être importantes et liées au débordement de marécages et/ou à la remontée des lentilles d'eau souterraine. Ainsi, au regard de l'approche rétrospective adoptée ici et en l'absence de mesures chiffrées objectivées, par exemple sur le degré de salinité des eaux intrusives liées à tel ou tel événement, il n'a pas toujours été possible de distinguer les effets de la submersion de ceux de l'inondation dans le discours des personnes interrogées, et par voie de fait sur les cartes d'impacts. En revanche, cette distinction a pu être faite lorsque les limites de l'inondation liée à la pluie et/ou au débordement du marécage ne chevauchaient pas celles de la submersion.

Dispositifs de protection des enjeux et caractérisation de l'habitat

Dispositifs de protection des enjeux

- 31 Sur les 73 entretiens « habitat et dispositifs de protection » réalisés, 16 concernent des parcelles sans dispositif de protection contre la mer (Ranché et al., 2016). Sur les 57 entretiens restants, on dénombre 74 dispositifs de protection, dont 17 actions de plantation de végétation, les autres dispositifs consistant en des murs bétonnés, des cordons d'enrochement, des épis et des talus (Figure 6, tableau 4). Seuls 5 dispositifs de protection sont présentés par les personnes interrogées comme ayant pour vocation première de lutter contre la submersion.

Figure 6. Exemples de dispositifs de protection/Examples of coastal protections.



A1 : Mur de protection construit par le service de l'équipement du Territoire (Avatoru), A2 : Mur de protection individuel (Tiputa) ; B1 : Cordon d'enrochement soutenant un remblai (Avatoru), B2 : Cordon d'enrochement non cohérent ; C1 : Talus fait de gravas et débris divers (Avatoru), C2 : Talus fait de sable (Tikehau) ; D1 : Epi ayant un impact sur le transit sédimentaire (décrochement du trait de côte) (Tikehau), D2 : Epi n'ayant pas d'impact sur le transit sédimentaire (absence de décrochement du trait de côte) (Tikehau) ; E1 : Barrière en bois (Tikehau), E2 : Ouvrage hétéroclite léger constitué de troncs de cocotiers et de blocs coralliens (Tikehau) ; F1 : Plantation de cocotiers pour stabiliser les sédiments (Tikehau), F2 : Plantation de végétation afin se protéger contre l'érosion et le vent (Avatoru).

Tableau 4. Caractérisation et fonction des modes d'aménagement du littoral selon les enquêtés/
Characterization and functions of coastal territorial management, according to the interviewees.

Dispositifs de protection face à la mer	Caractéristiques	Nombre d'enquêtés concernés	Objectifs de l'aménagement selon les enquêtés

Mur de protection bétonné	<ul style="list-style-type: none"> - Ouvrage longitudinal lourd - Mis en place par le Territoire ou particuliers - Il peut être oblique ou vertical, en plus ou moins bon état 	28	Érosion : 15 Érosion et subm. : 12 Submersion : 1
Cordon d'enrochement	<ul style="list-style-type: none"> - Ouvrage longitudinal lourd - Non maçonné, il peut être construit de façon cohérente ou par amas de matériaux divers - Vertical ou oblique 	11	Érosion : 7 Érosion et subm. : 2 Autre : 2
Talus	<ul style="list-style-type: none"> - Ouvrage longitudinal lourd - Levée constituée d'un ou de plusieurs matériaux - Hauteur très variable 	6	Érosion : 1 Submersion : 3 Autre : 2
Ouvrage hétéroclite léger	<ul style="list-style-type: none"> - Constitué de branchages et/ou de blocs de coraux de petite taille et/ou de structures en bois - Non maçonné 	3	Érosion : 2 Submersion : 1
Épi	<ul style="list-style-type: none"> - Ouvrage transversal lourd plus ou moins perpendiculaire au trait de côte - Fait de blocs de coraux et de morceaux de béton ou de ciment, gabions parfois maçonnés 	9	Érosion : 5 Érosion et subm. : 1 Autre : 3
Plantation de végétation	Trois plantes sont principalement utilisées : cocotier (<i>Cocos nucifera</i>), Filao (<i>Casuarina equisetifolia</i>), Miki Miki (<i>Pemphis acidula</i>)	17	Érosion : 7 Vent : 2 Érosion et vent : 5 Autre : 3
Total		74	Érosion (et vent) : 42 Érosion et subm. : 15 Submersion : 5 Vent : 2 Autre : 10

- 32 Les dispositifs de protection les plus répandus sont les murs bétonnés (28 unités). À Avatoru et Tiputa, l'ouvrage dominant, en longueur de linéaire côtier, consiste en un mur de protection construit par le gouvernement polynésien au début des années 1990 (cf. entretiens). Il est considéré par les habitants comme un moyen de lutter principalement contre l'érosion côtière, et très marginalement contre la submersion marine. À juste titre d'ailleurs, puisqu'un rapport de la South Pacific Islands Applied GeoScience Commission -

Secretariat of the Pacific Community : SOPAC-SPC¹¹ indique en effet qu'il n'est pas calibré pour limiter la submersion (Wilks, 2013). Cet ouvrage est en outre régulièrement interrompu par des cales de mise à l'eau (*slips* en anglais), lesquelles constituent des « axes privilégiés de pénétration de la mer » (Garcin et Lecacheux, 2013, p. 24).

- 33 Notre expertise en la matière¹² nous amène à suggérer que les autres ouvrages mis en place n'ont qu'une action très limitée face au risque de submersion. Seuls trois des six talus recensés ont, selon les habitants, pour vocation première de les protéger justement contre ce risque. Si deux d'entre eux ont une emprise relativement importante (plus de 100 m de linéaire côtier) et pourraient probablement absorber une submersion de faible intensité, le dernier est fait de matériaux meubles (sable, galets) et de petite taille (30-40 cm de hauteur sur 10-15m de longueur) qui ne lui permettent pas de protéger la parcelle concernée de la submersion. Parmi les cordons d'enrochement recensés, deux sont eux aussi considérés par les personnes interrogées comme étant efficaces pour lutter contre la submersion. Tous deux sont faits de blocs coralliens non cimentés et présentent une hauteur allant de 1 m à 1,70 m. Notre expertise sur ce type d'ouvrages de défense et ces terrains nous amène cependant à questionner leur rôle face à la submersion, notamment au regard de leur calibre insuffisant pour résister à la pression de houles de tempête (blocs constitutifs de petite taille et hauteur inférieure à celle des vagues de tempête à la côte), de leur état (moyen) et de leur relative imperméabilité. Enfin, là où elle s'observe, la plantation de végétation est trop clairsemée pour avoir un véritable rôle protecteur (cf. Figure 6). D'ailleurs, aucun interrogé ne voit la végétation qu'il a plantée comme constituant une protection suffisante contre la submersion. Au total, si une vingtaine d'interrogés estiment bénéficier d'une protection contre la submersion, seulement deux dispositifs (des talus) s'avèreraient efficaces contre une submersion de surcroît de faible intensité, et seulement sur un linéaire côtier très limité.
- 34 Compte tenu des témoignages de la population, de nos propres observations de terrain et des rapports déjà publiés sur la question, nous pouvons conclure à ce stade que les ouvrages de défense (murs, cordons d'enrochement et épis) n'ont que très peu vocation à protéger les parcelles littorales de la submersion marine. Ils sont en réalité mis en place, aux dires de près des deux tiers des personnes interrogées, avant tout pour lutter contre l'érosion et/ou pour stabiliser les remblais qui empiètent sur l'avant-côte. Ainsi, c'est d'abord au travers de la surélévation du bâti et du choix du lieu d'implantation de celui-ci sur la parcelle que les habitants répondent au risque de submersion. La sous-section suivante présente donc les caractéristiques de l'habitat telles que recensées sur le terrain.

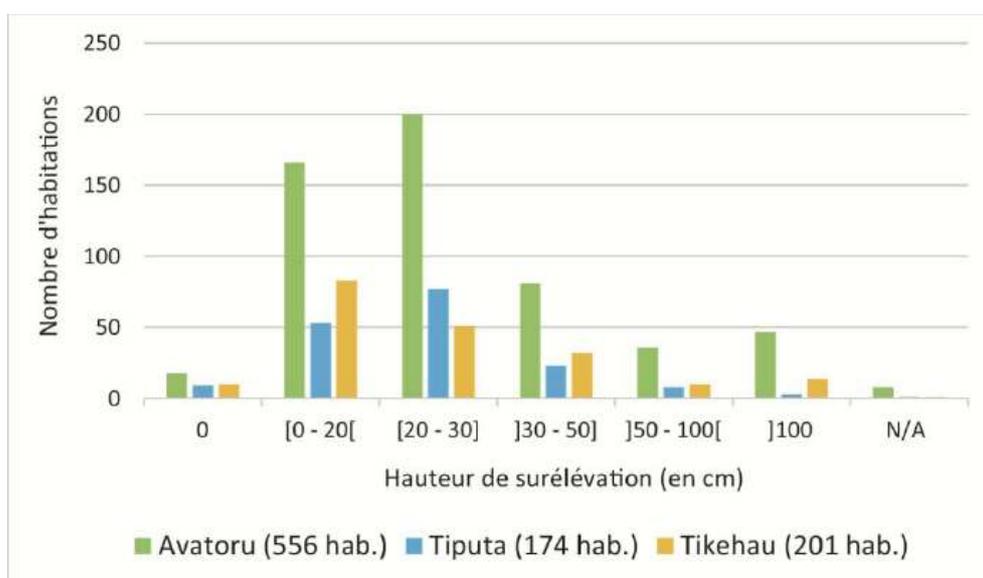
Caractérisation de l'habitat

- 35 D'un point de vue quantitatif, 931 habitations ont pu être échantillonnées (556 à Avatoru, 174 à Tiputa et 201 à Tuherahera), ce qui nous rapproche des chiffres de recensement des habitations par l'ISPF en 2012 : 900 au total, dont 746 sur Rangiroa (Avatoru + Tiputa) et 154 sur Tikehau. La différence dans les totaux est liée à des variations dans les paramètres d'identification des bâtiments, l'ISPF ne prenant par exemple pas en compte les résidences secondaires et les logements vacants. On peut néanmoins estimer que notre échantillon couvre la quasi-totalité des bâtiments présents sur les sites d'étude.
- 36 L'échantillon fait état de deux modes de surélévation de l'habitat : la construction sur dalle ou sur pilotis. Le mode de surélévation utilisé a son importance, car selon le service de l'urbanisme¹³, les constructions ne doivent pas empêcher l'écoulement de l'eau, ce qui

permet théoriquement de limiter la vulnérabilité de la construction en minimisant les surfaces s'opposant au courant. Seules les constructions sur pilotis répondent à ce critère.

- 37 La Figure 7 présente les hauteurs de surélévation de l'habitat. Celles-ci sont relativement faibles sur l'ensemble des sites : 803 habitations (86 %) sont surélevées de 50 cm ou moins, alors que moins de 7 % (soit 64 habitations) sont surélevées d'au moins 1 m. Sur ce point, l'article D.332-4 du code de l'urbanisme s'appliquant à l'ensemble de la Polynésie française, stipule que « les habitations en rez-de-chaussée doivent être édifiées sur une aire en maçonnerie de 30 cm de hauteur au minimum au-dessus du sol environnant ou sur pilotis de maçonnerie de 60 à 75 cm de hauteur au-dessus du dit sol ». Les Plans de Prévention des Risques (PPR) en cours d'instruction préconisent de construire à 1,50 m au-dessus du sol¹⁴. Ces derniers ne sont cependant pas encore approuvés du fait d'une forte opposition des habitants et élus locaux, notamment sur les questions des zones proposées « inconstructibles » dans les PPR (voir ci-dessous la sous-section « Réduire l'exposition actuelle » de la discussion – Stahl, 2018).

Figure 7. Hauteur de surélévation (en cm) des habitations par site d'étude/Elevation (in cm) of studied housing.



- 38 Pour pallier le risque de submersion, les personnes interrogées déclarent toutes également tenir compte de la distance à la côte. L'échantillon montre pourtant que près du quart des habitations sont construites à moins de 30 m du trait de côte : 29 % à Avatoru (156 habitations), 29 % à Tiputa (51) et 24 % à Tikehau (49). De même, la reconstruction de niveaux de submersion passés montre que certains événements peuvent largement dépasser ces limites, notamment sur la façade lagonaire où se concentre pourtant la majorité des habitations.

Exposition de l'habitat à la submersion

- 39 Croiser les données « submersions passées » et « bâti actuel » permet de traiter la question de l'exposition actuelle de la population au risque de submersion marine. On parlera ici de « zones submersibles » pour désigner les espaces qui ont été submergés dans le passé et qui sont donc susceptibles de l'être à nouveau. Il est alors intéressant de distinguer deux facteurs d'exposition, à savoir la localisation de l'habitat par rapport à la

mer, d'une part, et le niveau de surélévation des bâtiments, d'autre part. On peut également, grâce aux photographies aériennes anciennes, retracer l'évolution de cette exposition depuis le début des années 1980, en tout cas à partir du facteur « localisation du bâti », et ce dans le but de commencer à identifier les processus générateurs d'exposition.

Le facteur « localisation de l'habitat »

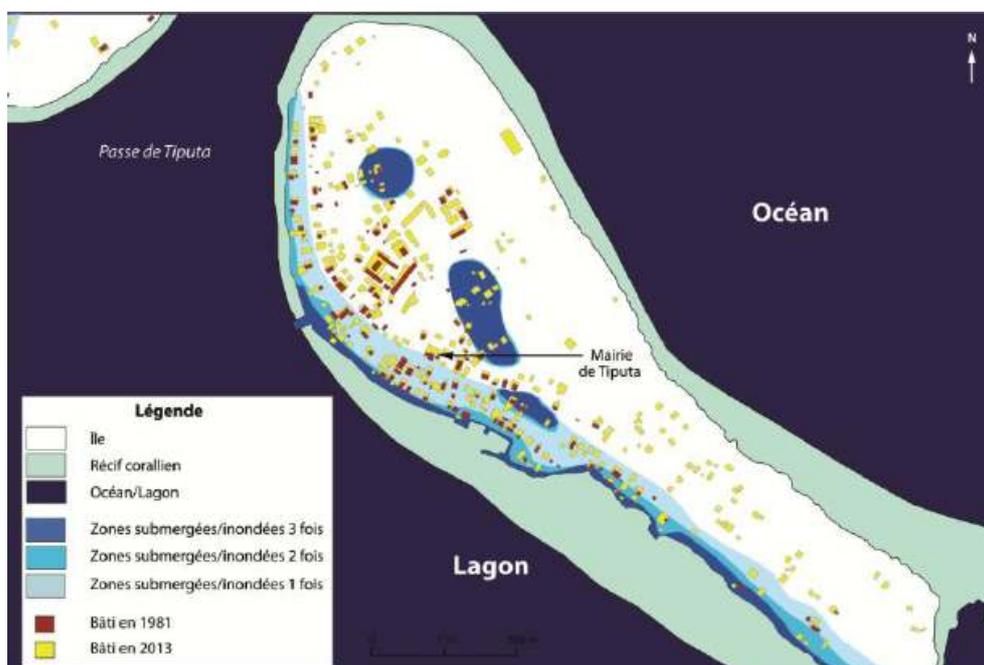
- 40 Le nombre d'occurrences des submersions pour une zone donnée a été calculé à partir de la base de données SIG, et en croisant les couches de l'ensemble des événements retenus dans cette étude (voir Tableau 2) avec la couche « habitat actuel ». Le tableau 5 montre ainsi que pour ce qui est de Rangiroa, 53 % des habitations d'Avatoru et 48 % de celles de Tiputa occupent une zone qui a déjà été submergée au moins une fois au cours des trois à quatre dernières décennies, et respectivement 14 % et 16 % pour ce qui est des zones ayant été submergées au moins 2 fois. La figure 8 propose un exemple (Tiputa) de restitution cartographique des résultats. À Tikehau, 98 % des habitations sont construites sur une zone ayant été submergée au moins 1 fois depuis le début des années 1980, pourcentage qui reflète notamment la submersion extrêmement importante de 1996 et qui avait affecté la quasi-totalité de l'île. Enfin, précisons que la part des habitations n'ayant jamais été submergées au regard des critères retenus ici s'élève respectivement pour Avatoru, Tiputa et Tuherahera à 48 %, 52 % et 2 %.

Tableau 5. Exposition des habitations à la submersion, sur la base des événements passés étudiés/
People exposure to marine inundation, based on the study of past events.

	Nombre d'habitations		
	AVATORU	TIPUTA	TIKEHAU
Zones submergées 4 fois	2	0	0
Zones submergées 3 fois	15	16	29
Zones submergées 2 fois	62	12	117
Zones submergées seulement 1 fois	213	56	50
Zones non submergées	264	90	5
Total d'habitations	556	174	201

Les lignes présentent les zones ayant été submergées seulement 1 fois, ou 2, 3 ou 4 fois depuis le début des années 1980, et au regard de notre recensement des événements de référence. Pour déterminer le nombre d'habitations localisées dans une zone ayant été submergée au moins 1 fois, il faut faire, pour Avatoru par exemple : $213 + 62 + 15 + 2 = 292$ habitations sur un total de 556, soit 53 %. Pour déterminer le nombre d'habitations localisées dans une zone ayant été submergée au moins 2 fois, il faut faire, pour Tikehau par exemple : $117 + 29 + 0 = 146$ habitations sur un total de 201, soit 73 %.

Figure 8. Localisation de l'habitat et historique des submersions depuis 1983 sur l'île de Tiputa / Location of buildings and history of marine inundation since 1983 for Tiputa island.



Fond : Image Pléiades du 1er octobre 2013 (©CNES, distribution Astrium Services /Spot Image S.A, France, all rights reserved). Source : entretiens auprès de la population (campagne Réomiers 2014) ; photographies aériennes anciennes de 1981 (Fonds photographique du service de l'Urbanisme du gouvernement de Polynésie française, autorisé par la Convention-cadre n° 58).

- 41 L'intégration des données « bâti » relatives à la situation du début des années 1980 permet de mettre en évidence la forte augmentation, en quelques décennies, de la part des habitations situées en zone submersible (Tableau 6). C'est à Avatoru que cette augmentation est la plus marquée (Figure 9), avec une multiplication par 4,6 entre 1981 et aujourd'hui du nombre d'habitations concernées. À Tiputa et Tikehau, on observe plus d'un doublement sur la même période.

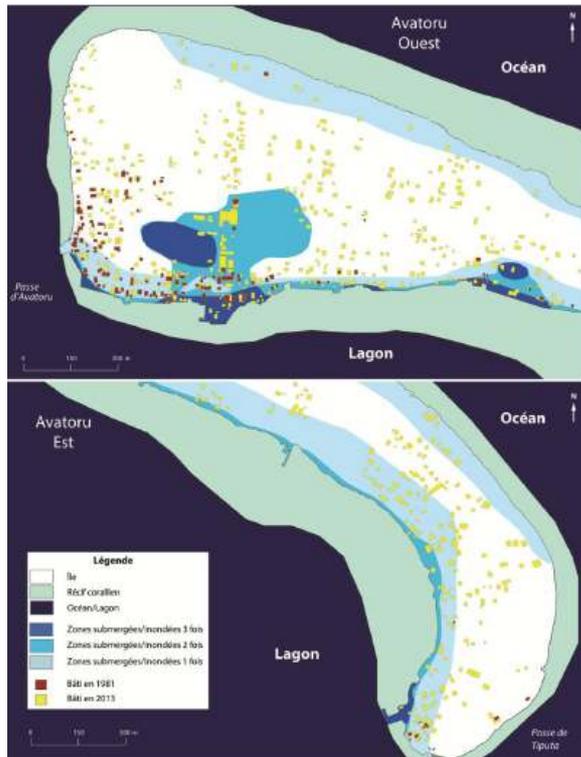
Tableau 6. Évolution entre 1981 et 2013/2014 du nombre de bâtiments situés en zone submersible/ Changes between 1981 and 2013/2014 of the number of buildings located in flood-prone areas.

	Nombre de bâtiments ¹⁵ en zone submersible (= ayant connu au moins 1 épisode de submersion depuis le début des années 1980)		
	AVATORU	TIPUTA	TIKEHAU
1981	126	71	133
2013/2014	588	151	314

- 42 Enfin, parmi les habitations actuelles situées en zone submersible, 62 (32 à Avatoru, 11 à Tiputa et 19 à Tikehau) sont construites dans un secteur où l'inondation peut être principalement attribuée à la remontée de la lentille d'eau et/ou au débordement de

marécages. À cela, il faut ajouter dans ces mêmes zones 93 bâtiments non habités (69 à Avatoru, 14 à Tiputa et 10 à Tikehau).

Figure 9. Évolution du bâti situé en zone submersible entre 1981 et 2013 dans le secteur d'Avatoru (atoll de Rangiroa)/Changes in buildings located in flood-prone areas between 1983 and 2013 in Avatoru, Rangiroa Atoll.



Fond : image Pléiades du 1er Octobre 2013 (©CNES, distribution Astrium Services /Spot Image S.A, France, all rights reserved).

Source : entretiens réalisés auprès de la population (campagne Réomers 2014) ; photographies aériennes anciennes du 20 octobre 1981 (Fonds photographique du service de l'Urbanisme du gouvernement de Polynésie française, autorisé par la Convention-cadre n° 58).

Le facteur « surélévation de l'habitat »

- 43 Les entretiens « habitat et dispositifs de protection » réalisés indiquent que des submersions d'une hauteur d'eau de 50 cm sont relativement fréquentes lors d'événements tempétueux ; *a fortiori*, celles présentant une hauteur d'eau de 20 cm le sont encore davantage. Or, à l'échelle des trois sites d'étude, 86 % des habitations (soit 803 unités) présentent une surélévation maximale de 50 cm, et 36 % (339) une surélévation de moins de 20 cm (cf. Figure 7). Partant de ce constat, nous avons choisi de classer les habitations selon un gradient allant d'« exposées » lorsqu'elles sont surélevées de 50 cm ou moins et situées dans une zone qui a été submergée au moins une fois au cours des trois à quatre dernières décennies, à « très exposées » lorsqu'elles sont surélevées de moins de 20 cm et situées dans une zone ayant été submergée au moins une fois.
- 44 Le tableau 7 présente le nombre d'habitations surélevées de 50 cm ou moins et de moins de 20 cm, et situées en zone submersible. De nombreuses habitations s'avèrent être « exposées » à « très exposées ». Dans le secteur d'Avatoru, le plus peuplé, 41 % des habitations sont « exposées » et 17 % sont « très exposées ». À Tikehau, ces proportions

sont respectivement de 85 et 45 %. Et si Tiputa affiche une situation moins tendue (46 % d'habitations exposées, 5 % très exposées), ces chiffres n'en restent pas moins préoccupants. Et ce d'autant plus que l'on dénombre par ailleurs respectivement 5, 7 et 32 % des habitations d'Avatoru, de Tiputa et de Tikehau présentant une surélévation inférieure à 20 cm et localisées dans une zone ayant été submergée au moins 2 fois depuis le début des années 1980.

Tableau 7. Nombre d'habitations situées en zone submersible et dont la surélévation est inférieure ou égale à 50 cm/Number of buildings located in a flood-prone area and that ground elevation is less than 50 cm.

	AVATORU		TIPUTA		TIKEHAU	
	≤ 50 cm	< 20 cm	≤ 50 cm	< 20 cm	≤ 50 cm	< 20 cm
Zones submergées 4 fois	1	1	0	0	0	0
Zones submergées 3 fois	13	5	14	6	25	12
Zones submergées 2 fois	51	23	11	6	101	53
Zones submergées seulement 1 fois	165	67	55	15	45	26
Total des habitations localisées en zone submersible	230	96	80	27	171	91
Total des habitations (dans et hors zones submersibles)	556		174		201	

Discussion

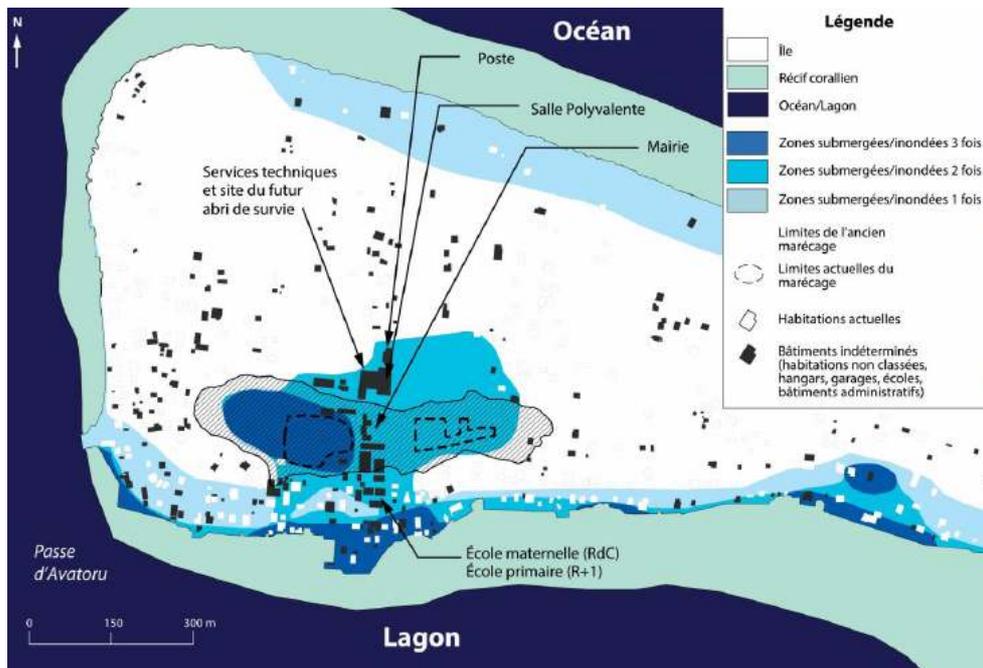
L'évolution de l'exposition à l'aléa submersion

- 45 L'évolution depuis le début des années 1980 du nombre de bâtiments situés en zone ayant déjà été submergés au moins une fois (quadruplement à Avatoru, doublement à Tiputa et à Tikehau) s'est traduite par une forte augmentation de l'exposition de ces populations au risque de submersion marine. Cela s'explique par deux grands facteurs. D'abord, par l'augmentation de la population sur ces îles. Selon les données de l'ISPF, entre 1983 et 2012, les populations des atolls de Rangiroa et de Tikehau ont été multipliées entre 1983 et 2012 par 2,2 (de 1 169 à 2 567 habitants) et 1,9 (de 279 à 529 habitants), respectivement, ce qui s'est traduit par une augmentation du nombre de bâtiments (x 3,2 à Rangiroa et x 3,8 à Tikehau). Ensuite, par la difficile prise en compte du risque de submersion dans l'aménagement du territoire. Sur ce deuxième point, deux éléments jouent un rôle prépondérant : le régime foncier et la morphologie des îles coralliennes. En Polynésie française, tout d'abord, de nombreux terrains sont en « indivision », c'est-à-dire qu'ils sont possédés par plusieurs personnes d'une même famille élargie, mais pas par un individu en particulier (Ravault, 1979 ; Bambridge, 2001). Dès lors, c'est la famille élargie qui décide de l'attribution d'une parcelle à un individu, et ce selon des règles informelles

complexes (Ottino, 1972). Ainsi les habitants sont-ils parfois contraints de s'installer sur des zones particulièrement exposées aux risques liés à la mer. De plus, pour être légale, toute décision concernant un tel terrain (construction, vente, etc.) doit être prise à l'unanimité. Mais les situations de consensus sont assez rares. Cela explique également que les règles d'urbanisme, qui reposent sur le principe de la propriété d'un terrain par un individu légal, soient difficiles à appliquer (Ravault, 1979). Il est donc compliqué pour les élus locaux d'imposer des plans d'aménagement sur ces îles¹⁶. Ensuite, la faible surface émergée de ces espaces implique une densification forcée de l'habitat qui peut, le cas échéant, se réaliser dans les zones les plus exposées que sont les côtes basses et les abords de marécages, voire sur les marécages eux-mêmes lorsqu'ils ont été remblayés et urbanisés.

- 46 L'exemple de Tikehau est intéressant. Suite au cyclone de 1906, connu pour avoir été puissant, l'ancien village situé au nord-ouest de l'île a été rasé et abandonné¹⁷. Un nouveau village a alors été installé au centre de l'île, sur la côte lagonaire (cf. Figure 3). Or, depuis les années 1980, le bâti a augmenté et s'est étendu vers le Nord-Ouest en direction de l'ancien village, donc en zone submersible. Un processus similaire de densification du bâti dans des zones naturellement exposées à la submersion et à l'inondation a opéré à Avatoru où l'on dénombre, rappelons-le, le plus d'habitations « exposées » à « très exposées ». D'autant que depuis les années 1980, les principaux bâtiments publics du chef-lieu de la commune de Rangiroa ont été construits sur un remblai de faible altitude et recouvrant aux deux tiers un ancien marécage (Figure 10). Ceci a pour effet de réduire la capacité de réponse immédiate des acteurs publics en cas de submersion/inondation. Des projets à venir, comme la construction de l'un des abris anticycloniques d'Avatoru dans un marécage, montrent bien la faible prise en compte de l'aléa submersion. Une raison majeure à cela, et qui ressort clairement des entretiens « habitat et dispositifs de protection », relève des logiques foncières en place, lesquelles limitent les marges de manœuvre des habitants comme des services publics. Avec la démographie, le « verrou foncier » constitue l'une des principales causes de l'augmentation de l'exposition et des difficultés qu'ont les acteurs publics à mettre en place des stratégies de réduction du risque, le choix du lieu d'implantation des futurs abris de survie étant également contraint par le régime foncier.

Figure 10. Exposition des bâtiments publics à l'aléa submersion sur l'île d'Avatoru /Public buildings exposure to marine inundation on Avatoru, Rangiroa Atoll.



Fond : image Pléiades du 1er Octobre 2013 (©CNES, distribution Astrium Services /Spot Image S.A, France, all rights reserved). Sources : entretiens auprès de la population (campagne Réomers 2014), PCS (Plan Communal de Sauvegarde, 2010) de la commune de Rangiroa ; photographies aériennes anciennes du 20 Octobre 1981 (Fonds photographique du service de l'Urbanisme du gouvernement de Polynésie française, autorisé par la Convention-cadre n° 58).

- 47 Si l'on compare les caractéristiques de l'habitat des différents sites étudiés, sans se préoccuper des événements passés, le village de Tuherahera (Tikehau) apparaît comme étant le moins exposé, les habitations y étant plus éloignées du trait de côte qu'à Avatoru et Tiputa (39 % à plus de 100 m du trait de côte à Tikehau contre respectivement 30 et 27 % sur Avatoru et Tiputa). Par ailleurs, à Tikehau, 62 % des habitations sont des maisons soit en dur (murs en matériaux consolidés et toits de tôles fixées), soit dites anticycloniques (*Fare MTR*, habitations préfabriquées et subventionnées par le gouvernement), contre 38 % à Tiputa et 42 % à Avatoru (Ranché et Magnan, 2016). Toutefois, Tuherahera est le village qui a connu les submersions les plus importantes. Cela démontre le rôle également important des composantes physiques de la vulnérabilité, en l'occurrence ici, et en excluant la donnée altimétrique (qui n'existe pas pour Tikehau), l'origine de la submersion d'une part, et la présence de passes, d'autre part. Concernant l'origine des submersions, la plus importante qu'a connue l'île de Tuherahera n'a pas été générée par un cyclone, mais par une houle australe (1996) qui, venue du Sud, a d'autant plus affecté le village qu'il est situé sur la façade méridionale de l'atoll. Pour ce qui est du rôle des passes, le village de Tuherahera est éloigné de la seule passe de l'atoll, laquelle joue un rôle d'évacuation de l'eau, et cela explique, selon l'ancien maire¹⁸, l'effet de gonflement du lagon et son débordement occasionnel sur la côte lagonnaire de l'île.
- 48 L'île d'Avatoru fait également état d'une situation préoccupante, d'abord parce qu'elle abrite la plus forte population située en zone « exposée » à « très exposée », et ensuite

parce que la grande majorité des bâtiments publics qui jouent un rôle dans la gestion de crise se trouvent dans des zones submersibles.

- 49 À noter enfin que sans information disponible sur les caractéristiques de l'habitat en 1980, leur évolution (hauteur et mode de surélévation, agencement et matériaux utilisés, etc.) n'a pu être correctement traitée.

Réduire l'exposition actuelle

- 50 Outre le PPR non approuvé à ce stade par la commune de Rangiroa, les seules propositions concrètes visant à réduire l'exposition de ces atolls à l'aléa submersion viennent de la SOPAC-SPC. Son rapport de 2013 sur l'analyse coût-bénéfice de différentes solutions d'adaptation face à la houle cyclonique conclue que dans les Tuamotu, ni la mise en place d'une digue de protection, ni le recul stratégique, ne constituent des solutions pertinentes (Wilks, 2013). La première est très onéreuse et partiellement inefficace pour lutter contre la submersion, car elle « ne devrait conduire qu'à une faible diminution de la profondeur d'inondation » (Wilks, 2013, p. 7). Quant au recul stratégique, il est estimé inopportun, car les modèles de submersion utilisés montrent que « la majorité de la zone d'étude est susceptible d'être frappée par des inondations très importantes et rapides, quelle que soit la distance à la côte » (Wilks, 2013, p. 7). Une relocalisation au sein même de chaque île serait donc, selon ce rapport, inutile. Sans compter qu'encore une fois, les problèmes d'accès au foncier constituent une contrainte très forte.
- 51 Pour la SOPAC-SPC, la meilleure solution est donc la surélévation progressive de l'ensemble du bâti à plus de 1 m de hauteur, soit en remplaçant les maisons de moins de 1 m de surélévation par des *Fare MTR*, soit en les surélevant à plus de 1 m. Nos résultats montrent qu'il s'agirait là en effet d'une option pertinente. Se posent toutefois des questions de capacités techniques (surélever l'existant), économiques (financer plusieurs centaines de *Fare MTR*) et sociales (acceptation par la population qui, selon des discussions informelles avec les résidents, a du mal à se faire au caractère impersonnel des *Fare MTR*).
- 52 Ce dernier point, combiné à nos résultats, nous amène à réviser les conclusions de la SOPAC-SPC quant à la relocalisation d'habitations au sein des îles elles-mêmes. En effet, les événements météo-marins qui submergent les îles sur la totalité de leur surface (postulat adopté dans le rapport SOPAC-SPC) sont rares. Dans notre étude, seule la houle distante de 1996 a eu cet effet, et seulement sur Tuherahera. Des événements générateurs de submersions de moindre ampleur, comme les cyclones Veena ou Orama en 1983, sont en revanche plus fréquents. Il reste donc pertinent de tenir compte des variations d'altitude au sein de ces îles, qui font que certains secteurs sont naturellement plus exposés que d'autres (littoraux bas et zones marécageuses). Ainsi le lieu d'implantation de l'habitat a-t-il son importance en matière d'exposition des biens et des personnes (Duvat et al., 2013), et le recul stratégique – ou tout du moins une réorganisation spatiale de l'habitat – pourrait permettre de réduire l'exposition de la population d'une île dans son ensemble. En outre, il nous semble qu'au regard des enseignements du passé en matière de submersion, la relocalisation des bâtiments de gestion de crise, y compris ceux ayant fonction de refuge selon le Plan communal de sauvegarde de la commune de Rangiroa, est essentielle étant donné que la plupart d'entre eux sont actuellement situés sur d'anciens marécages qui ont été remblayés, donc dans des zones fortement exposées au couplage submersion/inondation. La relocalisation reste cependant une option complexe à mettre

en œuvre, également pour des raisons d'ordre politique. Le principe proposé dans le PPR de Rangiroa (bande côtière inconstructible de 30 m de large côté océan, de 10 m côté lagon) rencontre par exemple une forte opposition de la part de la population et des autorités locales. Pour le secrétaire général de la mairie de Rangiroa, cette option équivaut à « de l'expropriation, et en plus sans indemnisation : on demande aux gens de ne pas utiliser une partie substantielle de leur parcelle sans proposer de compensation financière pour ça. Comment voulez-vous qu'ils adhèrent et qu'on arrive à mettre ça en place ? »¹⁹. Ce point renvoie à un problème politique complexe : le gouvernement de Polynésie française, sous l'impulsion de la réglementation française, souhaite mettre en place des documents de planification reposant sur des études scientifiques précises (modélisation de la submersion, etc.). Ces documents n'intègrent cependant pas, en l'état, certaines spécificités socioculturelles locales, en l'occurrence ici le régime foncier.

- 53 Les responsables publics locaux comme A. Timiona se retrouvent donc écartelés entre les pressions exercées par les autorités de Papeete (et indirectement de la France) qui souhaitent faire appliquer ces dispositions, et les habitants des îles qui se considèrent victimes de dispositifs exogènes inadaptés.
- 54 Enfin, notons que dans le cadre du Contrat de Projets 2008-2013, le gouvernement de Polynésie française a lancé en 2008 un programme de construction « d'abris de survie » sur les atolls des Tuamotu (Haut-Commissariat de la République en Polynésie française, s.d.). Or, d'une part tous les atolls n'en sont pas encore équipés (ni Avatoru, ni Tiputa à ce stade sur l'atoll de Rangiroa, par exemple). D'autre part, nos discussions informelles lors des travaux de terrain ont révélé une adhésion faible des populations à la démarche d'évacuation dans ces bâtiments jugés inaptes à « accueillir tout le monde sur plusieurs jours ».

De l'intérêt de la démarche d'entretien pour reconstruire les impacts des événements passés

- 55 S'il existe un Modèle numérique de terrain (MNT) récent (2013) pour les îles de l'atoll de Rangiroa que nous avons étudiées (voir figure 2), sa résolution relativement grossière contraint la réalisation de travaux de modélisation fins de la submersion. Il n'existe par ailleurs pas de MNT couvrant l'ensemble de l'île de Tuherahera sur l'atoll de Tikehau. Dès lors, le recours à des entretiens poussés sur les impacts d'événements passés (ici en termes de submersion) s'impose comme une démarche méthodologique importante dans la perspective d'étudier l'exposition réelle des populations de ces atolls. Et ce d'autant que, croisée sous SIG avec des données sur le bâti à différentes dates, cette donnée permet d'analyser l'évolution de l'exposition, *a minima* sur quelques décennies. Cette approche comporte des limites en ce qu'elle cherche à caractériser les conséquences d'événements extrêmes survenus il y a une à plusieurs décennies et n'ayant jamais fait l'objet de mesures d'impacts précises. Par définition, elle fait donc appel à la mémoire des personnes ayant vécu l'événement et qui étaient déjà adultes à ce moment-là. Cela introduit nécessairement un biais (Slovic, 1987) qui limite à la fois l'exhaustivité et la précision des données, par exemple sur les limites des zones submergées. Ceci étant, et compte tenu des caractéristiques socioculturelles de la population interrogée, d'une part, et de l'absence de toute donnée objectivée, d'autre part, nous soutenons qu'une telle approche permet de combler au moins partiellement un vide de connaissances (Gueben-Venière, 2011) pourtant cruciales aujourd'hui pour déterminer les zones les plus exposées

à l'aléa submersion. Or, une telle expertise constitue une base indispensable pour préciser les menaces potentielles véhiculées par le changement climatique et penser des stratégies locales d'adaptation.

Conclusion

- 56 Alors que les paramètres des événements générateurs de submersion (fréquence et intensité) n'ont pas ou peu évolué depuis les années 1980 (Cardona et al., 2012), l'exposition de la population des atolls des Tuamotu à la submersion marine a augmenté du fait d'une densification, dans des zones naturellement exposées, de l'habitat et des bâtiments publics.
- 57 Début 2015, on dénombrait sur nos trois sites d'étude (secteur d'Avatoru, îles de Tiputa et de Tuherahera) 481 habitations surélevées de moins de 50 cm et 214 de moins de 20 cm, localisées dans une zone submersible. Ces chiffres représentent respectivement 52 et 23 % de l'ensemble des habitations échantillonnées. Un tel taux d'exposition est le résultat d'au moins 40 années de faible prise en compte par la population, dans ses choix d'implantation du bâti, de l'aléa submersion, mais aussi d'une gestion contrainte de cet aléa par des autorités disposant de documents de planification prenant mal en compte les spécificités locales.
- 58 Cet article conforte donc, par l'apport de nouveaux cas d'étude, une conclusion désormais affirmée dans de nombreux travaux scientifiques (Cardona et al., 2012 ; Magnan et Duvat, 2015) quant à la responsabilité des sociétés humaines dans la création de leur propre vulnérabilité face aux aléas naturels, en l'occurrence ici météo-marins. En effet, l'exposition des populations des trois sites d'étude est devenue telle que la survenue aujourd'hui d'un cyclone comme Veena ou Orama, ou d'une puissante houle distante comme celle de 1996, aurait des conséquences démultipliées en termes de dégâts sur le bâti. Et ce d'autant que même si les caractéristiques des événements générateurs de submersion n'évoluaient pas sous l'influence du changement climatique, l'élévation du niveau de la mer impliquera sur ces îles urbanisées une augmentation de l'amplitude et des impacts des submersions.
- 59 Pour pallier cette augmentation de la vulnérabilité, un changement de stratégie est nécessaire de la part des décideurs (prise en compte des spécificités et des capacités de mise en œuvre de chaque territoire) et de la population (stopper les constructions en zone à risque). Car si l'évolution passée du territoire reste la même dans les décennies à venir (concentration du bâti en zone exposée, faible surélévation, faible prise en compte des événements passés, faible prise en compte des spécificités locales dans l'aménagement), l'exposition à l'aléa submersion ne pourra qu'augmenter avec le temps. Les normes et recommandations actuelles ne sont pas appliquées, notamment en raison d'une incompréhension et d'un refus de la part des décideurs locaux et de la population. On observe néanmoins que la mise en place d'aides financières a permis la démocratisation de l'utilisation de *Fare MTR*. Il est possible que d'autres aides permettent d'autres initiatives, notamment si elles sont appliquées progressivement, comme le recommande la SOPAC-SPC (Wilks, 2013). Enfin, la concertation avec la population et la prise en compte des pratiques traditionnelles (qui intégraient une surélévation du bâti, depuis lors perdue – Worliczek, 2013) favoriseraient potentiellement une meilleure conscience du risque et une meilleure acceptabilité de nouvelles normes et pratiques.

Remerciements

60 Les auteurs remercient l'Agence nationale pour la recherche pour son soutien aux projets *CapAdapt* (ANR-11-JSH1-0004) et *STORISK* (ANR-15-CE03-0003), ainsi que le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie pour son soutien au projet *Réomiers* (13-MRES-RDT-1-CVS-022). Ce travail a bénéficié du soutien financier du gouvernement français au titre du programme Investissements d'avenir administré par l'Agence nationale de la recherche (ANR) sous la référence ANR-10-LABX-14-01. Ils remercient également Pascal Correia et Nicolas Bernon du service de l'Urbanisme de Polynésie française (Convention-cadre de diffusion de données numériques n° 58), ainsi que les représentants des mairies et mairies annexes des territoires étudiés. Ils remercient enfin Samuel Etienne (EPHE-Dinard) pour des renseignements complémentaires sur le cyclone Oli (2010).

BIBLIOGRAPHIE

- Andréfouët, S., F. Ardhuin, P. Queffeuilou et R. Le Gendre, 2012, Island shadow effects and the wave climate of the Western Tuamotu Archipelago (French Polynesia) inferred from altimetry and numerical model data, *Marine Pollution Bulletin*, 65, pp. 415-424.
- Baines, G. B. K. et R. F. McLean, 1976, Sequential studies of hurricane deposit evolution at Funafuti atoll, *Marine Geology*, 21, 1, pp. 1-8.
- Bambridge, T., 2001, Revendications foncières : les temporalités constitutives et leurs dynamiques dans le champ social semi autonome de la région des Australes aujourd'hui (Polynésie française), Thèse de doctorat de sociologie, Université de Paris IX, 550 p.
- Barnett, J., 2005, Titanic states? Impacts and responses of climate change in the Pacific, *Journal of International Affairs*, 59, pp. 203-219.
- Becker, M., B. Meyssignac, C. Letetrel, W. Llovel, A. Cazenave et T. Delcroix, 2012, Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950, *Global and Planetary Change*, 80-81, pp. 85-98.
- Bourrouilh-Le Jan, F. G. et J. Talandier, 1985, Sédimentation et fracturation de haute énergie en milieu récifal : Tsunamis, Ouragans et cyclones et leurs effets sur la sédimentologie et la géomorphologie d'Atoll : Motu et Hoa à Rangiroa, Tuamotu, Pacifique SE, *Marine Geology*, 67, pp. 263-333.
- Bridges, K. W. et W. C. McClatchey, 2009, Living on the margin: ethnoecological insights from Marshall Islanders at Rongelap Atoll, *Global Environmental Change*, 19, pp. 140-146.
- Canavesio, R., 2015, Estimer les houles cycloniques à partir d'observations météorologiques limitées : exemple de la submersion d'Anaa en 1906 aux Tuamotu (Polynésie française), *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], 14, 3, URL : <https://vertigo.revues.org/15375>. Consulté le 14 septembre 2017.

- Cardona, O. D., M. K. van Aalst, J. Birkmann, J. Fordham, G. McGregor, R. Perez, R. S. Pulwarty, E. L. F. Schipper et B. T. Sinh, 2012, Determinants of risk: exposure and vulnerability. In Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor et P. M. Midgley (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, Cambridge University Press, pp. 65-108.
- Carson, M., A. Köhl, D. Stammer, A. B. A. Slangen, C. A. Kastman, R. S. W. van de Wal, J. Church et N. White, 2015, Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change*, 134, 1-2, pp. 269-281.
- Cazenave, A., H. Palanisamy et M. Ablain, 2018, Contemporary sea level changes from satellite altimetry: what have we learned? What are the new challenges? *Advances in Spatial Research*, 62, 7, pp. 1639-1653.
- Church, J. A., P. U. Clark, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. A. Merrifield, G. A. Milne, R. S. Nerem, P. D. Nunn, A. J. Payne, W. T. Pfeffer, D. Stammer et A. S. Unnikrishnan, 2013, Sea level change. In Stocker, T. F. et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1137-1216.
- Dickinson, W. R., 2009, Pacific atoll living: how long already and until when? *GSA Today*, 19, pp. 124-132.
- Dupon, J.-F, 1987, Les atolls et le risque cyclonique : le cas des Tuamotu, *Cahiers des Sciences Humaines*, 23, pp. 567-599.
- Duvat, V. K. E. et A. K. Magnan, 2012, *Ces îles qui pourraient disparaître*, Paris, Le Pommier-Belin, 191 p.
- Duvat, V. K. E., 2015, Changement climatique et risques côtiers dans les îles tropicales, *Les annales de géographie*, 705, pp. 541-566.
- Duvat, V. K. E., A. K. Magnan et F. Pouget, 2013, Exposure of atoll population to coastal erosion and flooding: a South Tarawa assessment, Kiribati, *Sustainability Science*, 8, 3, pp. 423-440.
- Duvat, V. K. E., A. K. Magnan et R. Canavesio, 2017, La reconstruction de chaînes d'impacts au service de l'évaluation de la résilience des territoires et de la réduction des risques météorologiques : le cas des atolls des Tuamotu, Polynésie française, Colloque SHF « RDT 2017 », Paris 10-11 octobre 2017, 11 p.
- Duvat, V. K. E., A. K. Magnan, R. M. Wise, J. E. Hay, I. Fazey, J. Hinkel, T. A. Stojanovic, H. Yamano et V. Ballu, 2017, Trajectories of exposure and vulnerability of small islands to climate change, *WIREs Climate Change*, 8, 6. doi:10.1002/wcc.478.
- Duvat, V.K.E., B. Salvat B. et C. Salmon, 2017, Drivers of shoreline change in atoll reef islands of the Tuamotu Archipelago, French Polynesia, *Global and Planetary Change*, 158, pp. 134-154.
- Garcin, M. et S. Lecacheux, 2013, *Projet ARAI3 : Aménagements et ouvrages côtiers polynésiens – Incidence sur l'aléa submersion et impacts environnementaux*, Orléans, BRGM/RP-61656-FR
- Gattuso, J.-P., A. K. Magnan, R. Billé, W. W. L. Cheung, E. L. Howes, F. Joos, D. Allemand, L. Bopp, S. Cooley, M. Eakin, O. Hoegh-Guldberg, R. P. Kelly, H.-O. Pörtner, A. Rogers, J. M. Baxter, D. Lafolley, D. Osborn, A. Rankovic, J. Rochette, U. R. Sumaila, S. Treyer et C. Turley, 2015, Contrasting Futures for Ocean and Society from Different Anthropogenic CO₂ Emissions Scenarios, *Science*, 349, 6243.

- Ghasarian, C., T. Bambridge, T. et P. Geslin, 2004, Le développement en question en Polynésie française, *Le Journal de la Société des Océanistes*, 119, 2, pp. 211-222
- Gueben-Venière, S., 2011, En quoi les cartes mentales, appliquées à l'environnement littoral, aident-elles au recueil et à l'analyse des représentations spatiales ? *EchoGéo*, 17, pp. 1-12.
- Haut-Commissariat de la République en Polynésie française, s.d., Les abris de survie dans les Tuamotu – Gambier, [En ligne] URL : <http://www.polynesie-francaise.pref.gouv.fr/Les-Subdivisions2/des-iles-Tuamotu-Gambier/Dossiers-et-projets/Les-abris-de-survie>, Dernière modification le : 11/05/2012 22 :34
- Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante et al., 2018, Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In : Global warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, [En ligne] URL : https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_chapter3.pdf.
- Hoeke, R. K., K. L. McInnes, J. C. Kruger, R. J. McNaught, J. R. Hunter et S. G. Smithers, 2013, Widespread inundation of Pacific islands triggered by distant-source wind-waves, *Global and Planetary Change*, 108, pp. 128-138.
- Huetz de Demps, A., 1984, Le monde des atolls et des îles basses, in collectif, Nature et hommes dans les îles tropicales : réflexions et exemples, Bordeaux, Îles et Archipels 3, pp. 93-106.
- Institut de la Statistique de la Polynésie Française (ISPF), 2017, La population légale au 17 août 2017 : 275 918 habitants, [En ligne] URL : <http://www.ispf.pf/bases/Recensements/2017/poplegale.aspx>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014, Annex II : Glossary, Mach, K.J., S. Planton et C. von Stechow (eds.), Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, R.K. Pachauri et L.A. Meyer (eds.), Geneva, Switzerland, pp. 117-130.
- Kronen, M., K. Friedman, S. Pinca, S., L. Chapman, R. Awiva, K. Pakoa, L. Vigliola, P. Boddin et F. Magron, 2009, Programme régional de développement des pêches océaniques et côtières, rapport pour la Polynésie française (résultats Kakarava, Maatea, Mataiea, Raivavae et Tikehau), Secrétariat général de la Communauté du Pacifique, 401 p.
- Larrue, S. et T. Chiron, 2010, Les îles de Polynésie française face à l'aléa cyclonique, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], 10, 3, 20 décembre 2010, URL : <http://vertigo.revues.org/10558>. Consulté le 14 septembre 2017.
- Lewis, J., 1990, Vulnerability of small island States to sea level rise: sea-defense, adjustment, and preparedness; and international strategies, Small States conference on sea level rise, 14-16 Novembre 1989, 26 p., [En ligne] URL : <http://www.islandvulnerability.org/slr1989/lewis.pdf>.
- Magnan, A. K. et V. K. E. Duvat, 2015, La fabrique des catastrophes « naturelles », *Natures Sciences Sociétés*, 23, 2, pp. 97-108.
- McAdam J., 2010, "Disappearing states" stateless and the boundaries of international law", UNSW Law research Paper No. 2010-2.
- McLean, R. et P. Kench, 2015, Destruction or persistence of coral atoll islands in the face of 20th and 21st sea-level rise, *WIREs Climate Change*, 6, 5, pp. 445-463.

- Nurse, L., R. McLean, J. Agard, L. P. Briguglio, V. Duvat, N. Pelesikoti, E. Tompkins et A. Webb, 2014, Small Islands. In Field, C. B. et al. (Eds) IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1613-1654.
- Ottino, P., 1972, Rangiroa : parenté étendue, résidence et terres dans un atoll polynésien, Paris, Éditions Cujas, 531 p.
- Ranché, M. et A. K. Magnan, 2016, Caractérisation de l'habitat des atolls de Rangiroa et Tikehau, Polynésie française. Rapport de projet (projets CapAdapt et Réomers), Paris, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales, 26 p.
- Ranché, M., A. K. Magnan et V. Duvat, 2016, Les dispositifs de protection littorale sur les atolls de Rangiroa et Tikehau, Polynésie. Rapport de projet (projets CapAdapt et Réomers), Paris, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales, 60 p.
- Ravault, F., 1979, Le régime foncier de la Polynésie française, Papeete, ORSTOM Editions, 88 p.
- Seneviratne, S. I., N. Nicholls, D. Easterling, C. M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera et X. Zhang, 2012, Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor et P. M. Midgley (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, Cambridge University Press pp. 109-230.
- Slovic, P., 1987, Perception of risk, *Science*, 236, pp. 280-285.
- Smithers, S. G. et R. K. Hoeke, 2014, Geomorphological impacts of high-latitude storm waves on low-latitude reef islands. Observations of the December 2008 event on Nukutoa, Takuu, Papua New Guinea, *Geomorphology*, 222, pp. 106-121.
- Stahl, L., 2018, Les défis présents et à venir des plans de prévention des risques naturels polynésiens, *Études caribéennes* [en ligne], 41, URL : <http://journals.openedition.org/etudescaribeennes/13106>. Consulté le 10 septembre 2018.
- Stoddart, D. R. et J. A. Steers, 1977, The nature and origin of coral reef islands. In Jones, O. A. et R. Endean (Dds), *Biology and ecology of coral reefs*, New York, Academic Press, vol. 4, pp. 59-105.
- Stoddart, D. R. et M.-H. Sachet, 1969, Reconnaissance geomorphology of Rangiroa atoll, Tuamotu Archipelago, *Atoll Research Bulletin*, 125, pp. 1-32.
- Weisler, M. I., 1999, Atolls as settlement landscapes, *Atoll Research Bulletin*, 460, 53 p.
- Wilks, R. A., 2013, Analyse préliminaire du rapport bénéfice-coût des solutions envisagées dans le cadre du projet « Réduction de risque de houle cyclonique dans l'archipel des Tuamotu, Polynésie française », Rapport Technique (PR171) de la SOPAC, Suva, Secrétariat général de la Communauté du Pacifique - SOPAC, 46 p.
- Wong, P.P., I. J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K. McInnes, Y. Saito Y. et A. Sallenger A., 2014, Coastal Systems and Low Lying Areas. In Field, C. B. et al. (Eds) IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 361-409.

Worliczek, E., 2013, La vision de l'espace littoral sur l'île Wallis et l'atoll Rangiroa dans le contexte du changement climatique. Une analyse anthropologique de la perception des populations locales, Thèse de Doctorat d'Anthropologie Culturelle et Sociale, Université de Wien et Université de Nouvelle Calédonie, 503 p.

NOTES

1. Depuis les années 1950, le rythme d'élévation du niveau de la mer dans la région qui nous intéresse ici, le Pacifique, a varié entre +2,5 et +5,5 mm/an, avec par exemple +5,1 mm/an mesurés à Funafuti (Tuvalu) et +3 mm/an à Papeete (Tahiti) (Becker et al., 2012; Cazenave et al., 2018). Il est estimé que ce rythme d'élévation d'ici la fin du siècle sera plus élevé que la moyenne mondiale (Church et al., 2013; Carson et al., 2015).
2. La notion de risque renvoie dans cet article à celle établie par le Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat dans son 5e rapport d'évaluation : « Conséquences éventuelles quand quelque chose ayant une valeur pour l'être humain (les êtres humains eux-mêmes également) est en jeu et qu'il pèse une incertitude sur ces conséquences. Le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances ou d'événements dangereux que viennent amplifier les conséquences de tels phénomènes lorsqu'ils se produisent » (IPCC 2014).
3. Selon nos calculs par analyse diachronique de photographies aériennes (voir section 3.3).
4. [En ligne] URL : <http://www.cyclonextreme.com/cyclonecaledoniesysstaison100li.htm>
5. Auteurs 4 et 5 de cet article.
6. Auteurs 1 et 3.
7. Photographies disponibles [En ligne] URL : <http://indigo.ird.fr/fr/spotlight/32694/degats-climatiques-en-polynesie-francaise-bruno-marty/page/1/SN/REPORTAGES>.
8. Le détail de la méthodologie et des résultats est présenté dans Ranché et Magnan (2016). N.B. Ce rapport est disponible sur requête auprès de l'auteur correspondant de cet article.
9. Auteurs 1 et 2.
10. [En ligne] URL : <http://www.cnes.fr/>.
11. SOPAC, [En ligne] URL : <http://gsd.spc.int/>
12. Auteur 3 notamment.
13. Chargé de mission du service de l'urbanisme du gouvernement de Polynésie Française, *communication personnelle*, avril 2015.
14. Chargé de mission du service de l'urbanisme du gouvernement de Polynésie Française, *communication personnelle*, avril 2015.
15. Nous comparons ici le nombre de bâtiments et non d'habitations, car les photos aériennes de 1981 ne permettent pas de faire une distinction.
16. Entretiens avec le secrétaire général de la mairie de Rangiroa (16/02/2015), un chargé de mission du service de l'urbanisme du gouvernement de Polynésie française (19/02/2015), et le responsable du service de l'équipement du gouvernement de Polynésie française (19/02/2014).
17. Plusieurs témoignages évoquent cela, dont celui du directeur de l'école de Tikehau (entretien du 13/02/2015).
18. *Communication personnelle*, février 2014.
19. Entretien du 16/02/2015.

RÉSUMÉS

Cet article représente l'une des rares études scientifiques cherchant à dépasser le discours général sur l'exposition des populations des atolls face aux risques liés à la mer, en l'occurrence ici à la submersion marine, en mesurant concrètement le degré réel d'exposition actuelle des populations et en observant les stratégies locales de protection/prévention de risques. Il s'applique à deux atolls de l'archipel des Tuamotu (Polynésie française) et croise deux types de données : les niveaux de submersion d'événements de référence passés, et les modes d'aménagement du territoire actuel (type d'habitat et dispositifs de défense des côtes). Les résultats reposent sur 106 entretiens semi-directifs et la caractérisation de 931 habitations. Ils indiquent d'abord que plus de 61 % des habitations sont aujourd'hui localisées dans une zone ayant connu au moins un épisode de submersion depuis les années 1980. Ensuite, que la stratégie de réponse des habitants face au risque de submersion marine passe moins par la mise en place de dispositifs de protection (murs, cordons d'enrochement, plantation de végétation, etc.) que par une surélévation de l'habitat. Celle-ci reste néanmoins limitée, puisque respectivement 52 % et 23 % des habitations sont surélevées de moins de 50 cm et 20 cm par rapport au niveau du sol et 23, et donc au mieux à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer. Cela démontre un fort degré d'exposition à l'aléa submersion marine. Cet article analyse également les grands facteurs explicatifs de cette situation, à savoir une forte croissance démographique associée à un régime foncier contraignant qui, ensemble, expliquent la densification de l'habitat et des bâtiments publics dans des zones naturellement exposées. Des pistes concrètes de réduction de cette exposition sont discutées.

This paper characterizes the current exposure of people living on the low-lying atoll reef islands to the risk of marine inundation induced by various sea-related hazards (i.e. cyclones, distant swells and local storms). It offers one of the rare scientific studies that go beyond the general assertion on atoll populations' exposure to sea-related hazards, by bringing empirically based and detailed evidence on real exposure today. The paper builds on case studies in the Tuamotu Archipelago in French Polynesia, and combines two main types of data, i.e. the inundation levels of past events, and the management practices implemented by both inhabitants and public authorities (type of housing and coastal protection devices). The total sample is composed of 106 interviews and 931 studied houses. The results show first, that more than 61% of houses are located in an area that experienced at least one substantial marine inundation event since the 1980s. Second, that when inhabitants implement options to face coastal risks, they rather target coastal erosion (seawalls, rip-raps, vegetation plantation, etc.) than marine inundation. They only address the risk of marine inundation through housing standard, i.e. buildings' elevation. This option however remains limited as 52% and 23% of houses have floor elevations less than 50 cm and 20 cm high, respectively. As a result, the population exhibits a high level of exposure to marine flooding. Exploring the root causes of such a situation, the paper emphasises the contributions of both the population growth that occurred over the past three decades and the constraining land tenure system to the increase in houses and public buildings density in flood-prone areas. Then the paper discusses pragmatic and realistic ways to decrease population exposure in the near future.

INDEX

Keywords : Atolls, exposure, coastal risks, marine submersion, French Polynesia

Mots-clés : Atoll, exposition, risques côtiers, submersion marine, Polynésie française

AUTEURS

ALEXANDRE K. MAGNAN

Géographe, Institut du développement durable et des relations internationales Sciences Po – 27 rue Saint-Guillaume, 75 007 Paris, France, et Laboratoire LIENSs (Littoral, Environnement, Sociétés) UMR CNRS 7266, Université de La Rochelle & CNRS – 2 rue Olympes de Gouges, 17 000 La Rochelle, France, téléphone : +33 1 45 49 76 70, courriel : alexandre.magnan@iddri.org

MARIEN RANCHÉ

Géographe, Institut du développement durable et des relations internationales, Sciences Po – 27 rue Saint-Guillaume, 75 007 Paris, France

VIRGINIE K.E. DUVAT

Géographe, Laboratoire LIENSs (Littoral, Environnement, Sociétés), UMR CNRS 7266, Université de La Rochelle & CNRS – 2 rue Olympes de Gouges, 17 000 La Rochelle, France

ADRIEN PRENVEILLE

Géographe, Association Géodyssées, 3bis rue Eugène Fromentin, 17 000 La Rochelle, France

FANNY RUBIA

Géographe, Association Géodyssées, 3bis rue Eugène Fromentin, 17 000 La Rochelle, France