



HAL
open science

Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles

Tony Rey, Thomas Candela, Matthieu Péroche, Frédéric Leone

► To cite this version:

Tony Rey, Thomas Candela, Matthieu Péroche, Frédéric Leone. Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles. *EchoGéo*, 2020, 10.4000/echogeo.18666 . hal-03138219

HAL Id: hal-03138219

<https://hal.science/hal-03138219v1>

Submitted on 11 Feb 2021

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

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

Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles

Tony Rey, Thomas Candela, Matthieu Péroche et Frédéric Leone



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/18666>

DOI : 10.4000/echogeo.18666

ISSN : 1963-1197

Éditeur

Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (CNRS UMR 8586)

Référence électronique

Tony Rey, Thomas Candela, Matthieu Péroche et Frédéric Leone, « Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles », *EchoGéo* [En ligne], 51 | 2020, mis en ligne le 25 avril 2020, consulté le 27 mai 2020. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/18666> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.18666>

Ce document a été généré automatiquement le 27 mai 2020.

EchoGéo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International (CC BY-NC-ND)

Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles

Tony Rey, Thomas Candela, Matthieu Péroche et Frédéric Leone

Cette étude s'intègre dans le projet TIREX, coordonnée par F. Leone, financé par l'ANR Ouragans. Les auteurs remercient les partenaires de l'équipe TIREX, les collectivités locales de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy, Monsieur Chalifour responsable du pôle scientifique de la Réserve Naturelle à Saint-Martin et la population pour leur accueil et les témoignages précieux.

Introduction

Les petites îles tropicales sont exposées et vulnérables aux événements extrêmes parmi lesquels les ouragans les plus puissants sont malheureusement connus pour les désastres qu'ils occasionnent (Hoeke *et al.*, 2013 ; Nurse *et al.*, 2014). Les impacts sur les systèmes côtiers sont nombreux et leurs caractéristiques soulèvent encore de nombreuses interrogations malgré des avancées certaines : quelles sont les réponses morpho-dynamiques et sédimentaires des côtes à un forçage météo-marin extrême ? Quelles formes prennent-elles ? Existe-t-il des différences de réactions entre les côtes urbanisées et naturelles ? Les impacts de l'ouragan peuvent-ils créer un point de rupture ou entraîner une bifurcation radicale dans le système côtier ? Des interrogations qui ont donné des résultats prolifiques, et surtout, qui nous éloignent de tout déterminisme et catastrophisme (McInnes *et al.*, 2003 ; De la Torre *et al.*, 2008 ; Canavesio *et al.*, 2014 ; Duvat *et al.*, 2016). Les submersions marines sont une autre conséquence régulière des ouragans (Etienne, 2012 ; Brill *et al.*, 2016 ; Rey *et al.*, 2017), affectant en priorités les zones topographiques basses du littoral et dépassant parfois les digues et les dunes, jusqu'à les rompre (Fritz *et al.*, 2007).

L'évaluation *a posteriori* des effets de l'ouragan Irma a reposé sur une analyse topomorphologique diachronique sur l'observation des dégâts et le recouplement de témoignages. Les relevés ont été réalisés au mois d'octobre 2017 soit six semaines après l'ouragan puis au mois de mai 2018 (t+ 8 mois). La variété des changements a impliqué une étude systémique, multi-scalaire, à l'échelle de la cellule sédimentaire (Bray *et al.*, 1995) de façon à qualifier les agents géomorphologiques, biophysiques et anthropiques qui interagissent entre eux (Harris *et al.*, 2005 ; Rey, 2017). Les sites d'étude ont été choisis en fonction des dégâts observés après la photo-interprétation des images Pléiades post-cyclones. Nous avons également choisi des sites peu à densément urbanisés de façon à comparer la diversité des réponses morpho-sédimentaires. Les indicateurs choisis ont permis d'estimer : l'extension des inondations et les effets de site, l'influence des aménagements côtiers et des habitations du front de mer, les changements côtiers et la résistance des écosystèmes côtiers. Les inondations ont une genèse et une dynamique qui parfois déroutent, tant la cinétique est éloignée de scénario prédéfinis (Boyett, 2013 ; Torres *et al.*, 2014).

La sous-estimation des effets des ouragans et de leurs conséquences, voire leur méconnaissance pour certains, le manque de préparation et de prévention nous invitent à analyser les événements extrêmes et leurs impacts.

L'ouragan Irma : contexte et dynamique

Les îles de Saint-Martin (SXM) et de Saint-Barthélemy (SB) sont situées dans la zone cyclonique atlantique entre les latitudes 10° et 19° N., ce qui les expose aux ouragans de juillet à fin octobre. L'ouragan Irma est né au large des côtes africaines le 30 août 2017 (illustration 1a) et a commencé à frapper les îles des Petites Antilles le 6 septembre 2017 (illustrations 1a et 1b). Il est le premier ouragan de catégorie 5 à toucher les Petites Antilles depuis les bases de données de 1851 (illustration 1b). Irma s'inscrit dans une saison cyclonique chargée sur le bassin Atlantique Nord/Caraïbes. Une saison précoce, avec la tempête Arlène qui s'est formée le 19 avril, une saison extrêmement active avec à la fin du mois d'août le premier ouragan Harvey classé 4 sur l'échelle Simpson-Saffir, puis Irma (cat. 5), José (cat. 4) et Maria (cat. 5). Ces trois ouragans font partie des 25 ouragans les plus puissants de l'histoire du bassin Atlantique Nord. Irma devient aussi le deuxième ouragan le plus intense de l'histoire (indice ACE de 66.6)¹ juste derrière l'ouragan Ivan en 2004 (70.4). Enfin, Irma fait aussi partie des cinq plus puissants ouragans observés dans l'atlantique tropical depuis les années 1950 (K. Hoarau, communication orale)².

À Saint-Martin, les vents moyens ont soufflé à plus de 290-295 km/h et une rafale a été enregistrée à 317 km/h (Météo France). Selon les données du marégraphe à Marigot (SXM), nous estimons la surcote marine autour de 2,8 m. À l'approche du rivage, les vagues ont gonflé et ont déferlé avec violence. Les dommages ont été exceptionnels (illustration 1c). Vents et vagues ont causé des dommages considérables aux habitations, automobiles, réseaux électriques, téléphoniques. 95 % des structures de Saint-Martin ont été endommagées ou détruites (Gustin, 2017). Onze personnes y ont perdu la vie et quatre dans la partie néerlandaise à Sint Maarten.

Illustration 1a - Trajectoire et intensités de l'ouragan Irma du 30 août au 9 septembre 2017

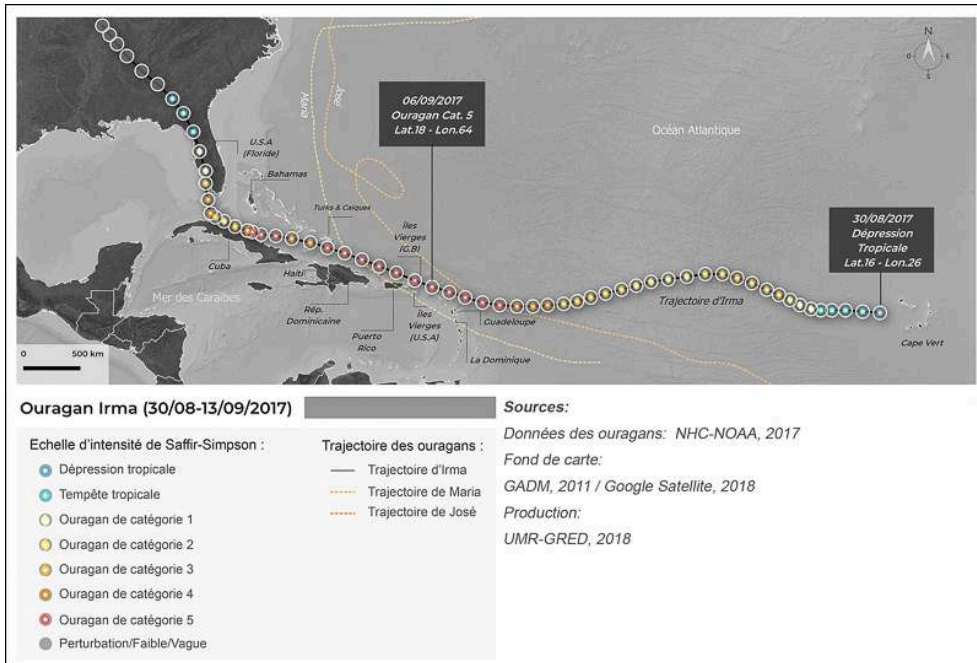


Illustration 1b - Dommages et intensités de l'ouragan Irma en Mer des Caraïbes

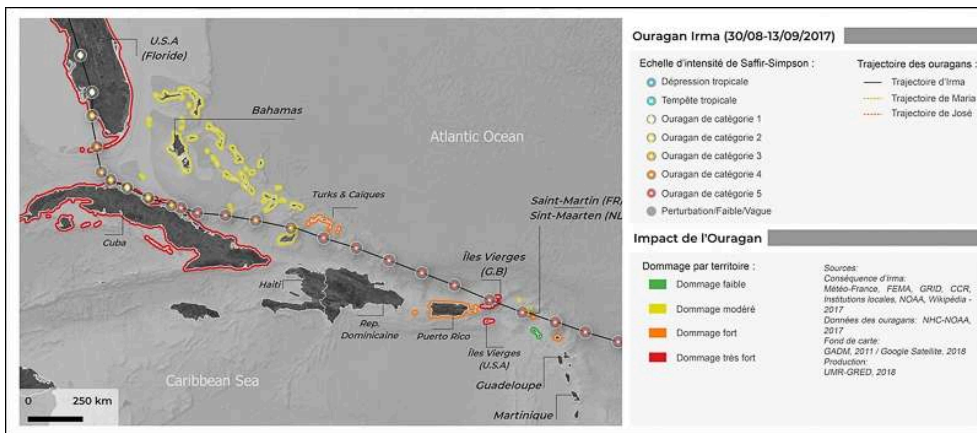
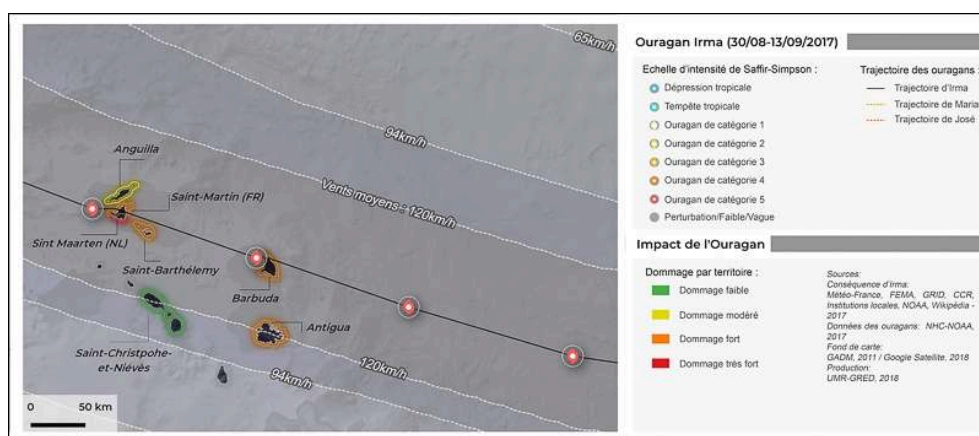


Illustration 1c - Dommages et intensités de l'ouragan Irma à l'échelle des îles de St Martin et St Barthélemy



Après la traversée de Saint-Martin et Saint-Barthélemy, l'ouragan Irma a poursuivi sa route en direction d'Anguilla, des îles Vierges Britanniques, de Porto-Rico, de la République Dominicaine, d'Haïti, de Cuba, puis a été rétrogradé en tempête tropicale au moment de toucher la côte ouest de Floride.

Sites d'étude

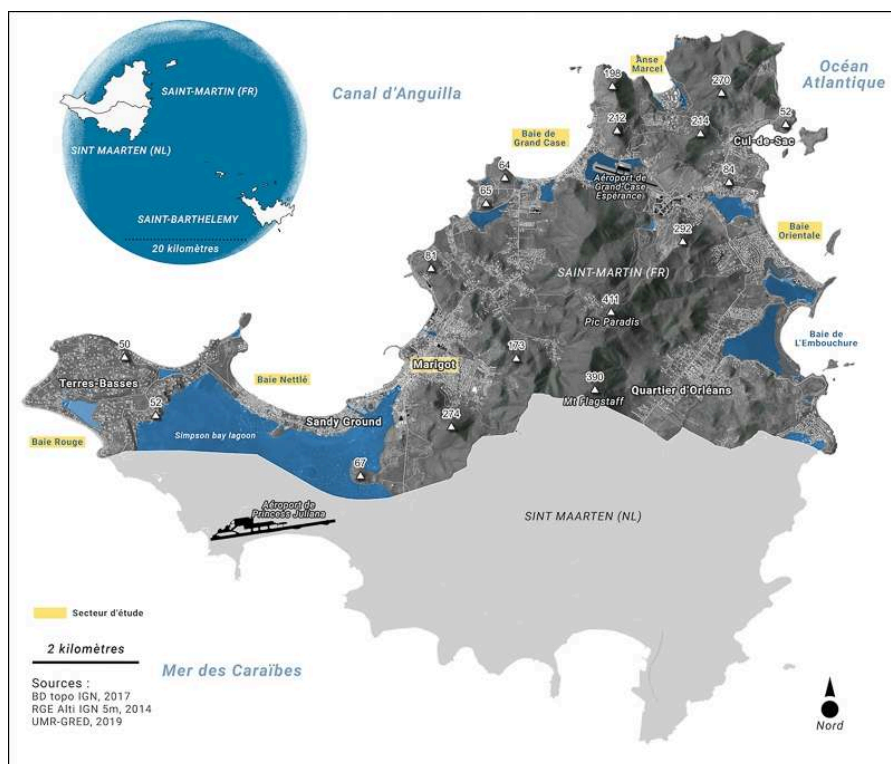
L'île de Saint-Martin (illustration 2), située entre la mer des Caraïbes et l'océan Atlantique, est une petite île découpée en deux entités politiques avec d'un côté Sint Maarten pour les Pays-Bas et Saint-Martin pour la France, d'environ 90 km² (dont 50 pour la partie française). Depuis le début des années 1980, l'île a connu une croissance démographique rapide. La population était estimée à plus de 73 000 habitants en 2015³ alors qu'elle comptait moins de 22 000 habitants en 1982⁴. La population française s'élevait à 35 941 personnes en 2014 contre 8 072 habitants en 1982.

Depuis plusieurs décennies, la pression démographique s'amplifie sur l'espace littoral de Saint-Martin. Plusieurs quartiers ont émergé en dehors de toute maîtrise foncière, sans souci ou sans possibilité financière de respecter les règles de construction. Une croissance urbaine qui va de pair avec une exposition toujours plus accrue des populations aux aléas météo-marins. En plus de cette exposition, s'ajoutent des vulnérabilités sociales, économiques et politiques aux origines profondes et anciennes (Duvat, 2008).

Saint-Martin possède une topographie variée, composées de collines, de vallées sèches, de plaines côtières. Les points hauts plafonnent à 424 m avec le Pic Paradis et le mont Caréta à 401 m. La presqu'île des Terres Basses est reliée à l'île de Saint-Martin par deux lidos qui enserrant la lagune de Simpson Bay. Les lidos sont aujourd'hui urbanisés par les quartiers Sandy Ground, Nettle et l'aéroport international de Juliana. Le littoral a une morphologie et une topographie irrégulière. Il est découpé par des côtes rocheuses qui occupent les deux tiers de l'île, le reste étant caractérisé par des plages de fond de baie. La végétation côtière est surtout représentée par la mangrove en plus de quelques espèces tropicales comme *Coccoloba uvifera* (le raisinier des plages), *Sesuvium portulacastrum* et des espèces introduites comme *Scaevola taccada*. Les fonds marins autour de l'île sont formés d'une plate-forme rocheuse. La profondeur maximale n'excède pas 30 m ce qui laisse supposer une possible mobilisation des sédiments vers

l'avant-côte et les plages par les courants pendant les tempêtes (Héquette, 2001). Ces fonds abritent des peuplements coralliens qui se concentrent surtout au nord-est de l'île.

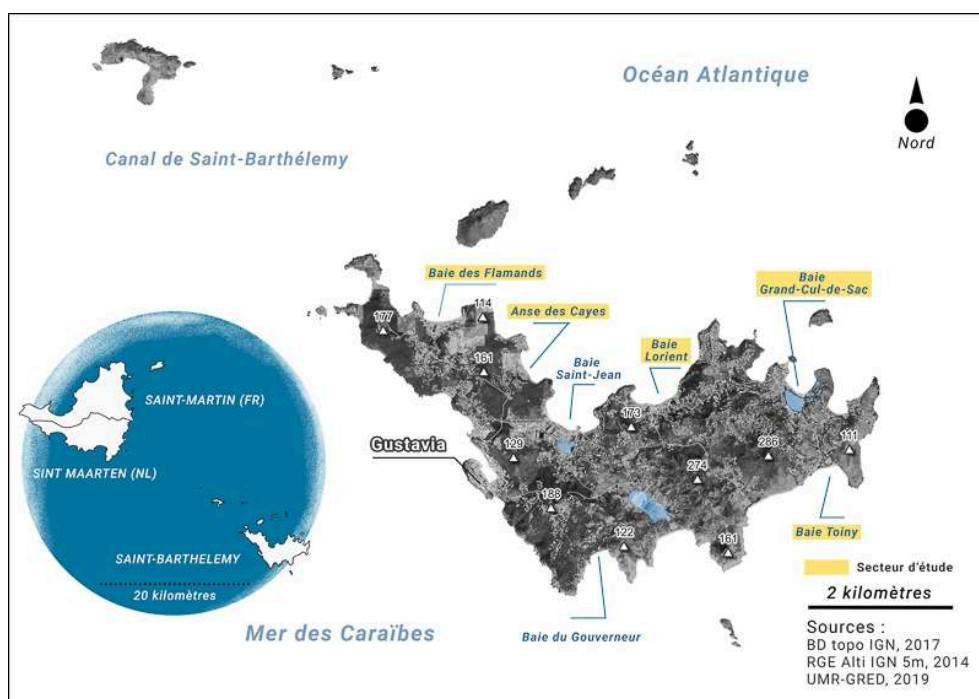
Illustration 2 - Localisation des sites d'étude à Saint-Martin



L'île de Saint-Barthélemy est principalement composée de dépôts volcaniques sous-marins recouverts par des calcaires d'âge éocène (Christman, 1953). L'île aride s'étend sur 25 km² et forme un V ouvert vers le nord (illustration 3).

La population est estimée à 9 625 habitants avec une densité moyenne de 458 hab/km² (INEDOM, 2018). Elle se concentre sur la frange côtière et s'étire vers l'intérieur des terres et des mornes en fonction de la topographie et des réseaux routiers. Les côtes rocheuses au sud-est restent préservées de l'urbanisation continue. Les mornes aux pentes raides n'atteignent pas plus de 300 m (point culminant à 286 m au Morne Vitet). Les plaines littorales sont petites, elles comportent quelques dépressions lagunaires qui, dans le passé, ont pu être transformées en marais salants (Grande Saline). Les plages sableuses occupent les échancrures et s'étirent au fond des baies. Les plus longues plages se situent au nord à anse Flamands (0,7 km) et anse des Cayes (0,6 km) et à l'ouest [anses Lorient (1 km), anse Grand Cul-de-Sac (1,1 km)] tandis que celles situées au sud sur la côte-au-vent sont plus petites et composées de matériaux plus hétérogènes et grossiers [plage Toiny (0,5 km), anse du Gouverneur (0,3 km)]. Certaines d'entre-elles bénéficient de la protection de récifs coralliens (les cayes). Les mangroves sont clairsemées autour des lagunes (Grand Étang, Grande Saline, Saint Jean) et à la marge des plages bien abritées telles que Grand Cul-de-Sac.

Illustration 3 - Localisation des sites d'étude à Saint-Barthélemy



Les vents et les vagues dominants à Saint-Martin et Saint-Barthélemy sont de direction est-nord-est et sud-est. Les hauteurs de vagues avoisinent 1 à 2 m avec des périodes courtes de 4 à 6 secondes. Ces îles sont aussi exposées aux houles en provenance du nord-nord-est avec des périodes supérieures à 10 secondes et des hauteurs de vagues significatives supérieures à 2 m (Reguero *et al.*, 2013). Les côtes sont microtidales (marnage autour de 30 cm) avec une marée mixte et une composante diurne prononcée.

Méthodes et outils

Plusieurs indicateurs topo-morphologiques, sédimentaires et anthropiques ont été évalués pour déterminer les impacts de l'ouragan Irma. Le choix des indicateurs a permis une évaluation de l'extension spatiale des inondations et des hauteurs d'eau et d'identifier les interactions entre les structures côtières, les habitations en front de mer et les écosystèmes côtiers. Les sites ont été choisis en fonction du degré d'urbanisation de façon à comparer la diversité des réponses morpho-sédimentaires. Les caractéristiques des indicateurs sont présentées par site d'étude dans le tableau 1.

Évaluation des changements côtiers

L'analyse des effets de l'ouragan Irma (submersion marine, changements côtiers, dommages) s'est appuyée sur l'utilisation d'images Pléiades, de résolution 50 cm (CNES/Airbus©) pour le mois de septembre 2017, et des images plus anciennes prises par WorldView-2, de résolution 50 cm (Digital Globe Inc.©) datant de février 2017. Nous avons également produit des vidéos et des photographies des côtes post-Irma grâce à l'utilisation d'un aéronef télépiloté Phantom 4 Pro de la marque DJI, possédant une résolution photographique de 20 mégapixels. Ces images nous ont permis d'identifier les impacts géomorphologiques de l'ouragan Irma. Pour chaque site, nous avons

cartographié les formes d'accumulation biodétritiques tels que les *washover*, localisé et mesuré les blocs coralliens déplacés et/ou projetés, nous avons également analysé les formes d'ablation telles que les falaises d'érosion. L'analyse géomorphologique de l'ouragan a intégré les dommages côtiers liés à l'action mécanique des vagues et aux projections de matériaux (tableau 1).

Enfin, les témoignages ont été très utiles car les personnes vivant sur ces espaces côtiers ont partagé leur vécu de l'événement (durée, œil du cyclone, perception...) et leur connaissance des côtes. Ils nous ont décrit un paysage côtier parfois très différent de ce qu'ils connaissaient avant l'ouragan. En outre, les échanges témoignent d'une bonne connaissance du phénomène cyclonique et des comportements à adapter (Terry, 2010).

Évaluation des inondations

Les inondations aux causes polygéniques (submersions marines, surcotes des lagunes, ruissellements pluviaux) ont rendu difficile la reconstitution de l'événement. L'étendue des inondations, les traces morpho-sédimentaires, les mesures *in situ* de la hauteur maximale du jet de rive et les dommages ont été utilisés pour cartographier et mesurer les niveaux d'eau extrêmes. Ces indicateurs ont permis de mieux cerner les causes des inondations (submersion marine, débordement des lagunes, ruissellement pluvial) (Morton et Sallenger, 2003 ; Wang et Horwitz, 2007 ; Etienne et Terry, 2012).

Évaluation des écosystèmes côtiers

L'analyse de la végétation repose sur le type d'espèces (introduites et indigènes) et l'état de dégradation : racines exhumées, végétation brûlée par le sel, cocotiers décapités, palétuviers couchés... Elle permet de se questionner sur l'impact des espèces végétales sur les vagues cycloniques et de qualifier leur rôle dans les changements côtiers, le piégeage des matériaux naturels et des détritiques. Nous n'avons pas eu la possibilité de mesurer directement les effets des récifs coralliens reconnus pour leur influence sur l'énergie des vagues (Ferrario *et al.*, 2014 ; Monismith *et al.*, 2015 ; Jeanson *et al.*, 2016 ; Rogers *et al.*, 2016 ; Storlazzi *et al.*, 2019). Néanmoins, la variabilité des niveaux d'eau observés sur les sites (surcote, jet de rive) révèle l'influence du platier récifal sur les hauteurs de vagues. Par ailleurs, le platier récifal a constitué une source importante de matériaux coralliens mobilisables par les vagues cycloniques. En effet, nous avons observé les conséquences morphologiques des transferts sédimentaires du platier vers la plage et au-delà, spécialement le long des côtes peu ou non urbanisées. Cette dynamique de transfert de sédiments constitue dès le passage de l'événement extrême une première forme d'ajustement et de résilience côtière.

Résultats et discussions

Sur les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy, la réglementation en matière d'urbanisme est mise à mal depuis plusieurs décennies. L'attractivité du littoral se traduit par l'installation de complexes hôteliers et de propriétés privées qui ont mis en place des systèmes de protection lourds tels que des enrochements sur le front de mer, des épis et des murs, sans qu'il y ait toujours eu une concertation avec les autorités

locales lors de leur mise en place. Il en résulte une grande variété de situations autant du point de vue des inondations que des changements côtiers (tableau 1).

Tableau 1 - Évaluation des impacts de l'ouragan Irma sur les côtes de Saint-Martin et Saint-Barthélemy

Sites d'étude	Caractéristiques générales des côtes basses	Erosion côtière, transfert de sédiments et accrétion		Surcote / Hauteur maximale du jet de rive	Dommages côtiers et inondations
		Ablation	Accrétion		
Baie Rouge SXM	Plage et dune (hauteur ~3m) Platier rocheux Étang Maisons côtières	Erosion de la plage et des dunes Beachrock exhumé Affouillement pied des bâtiments: 1-1,2 m	Nombreux washover (dépôts dans l'étang) Transport de blocs coralliens hétérométriques (max 108 kg) et de sables Déplacement de dalles du platier sur la plage	Hmax : 3 m Hmax : 6-8 m sur les caps rocheux	Inondations des maisons au bord de mer Murs effondrés Affouillement vertical et déplacement des enrochements Dégradation des fondations
Baie Nettlé SXM	Côte à lido Front de mer urbanisé (habitations et hôtels)	Erosion des plages sableuses Falaise d'érosion dunaire (> 40 cm) Beachrock exhumé	Transfert de sédiment vers le haut de plage Transport de blocs coralliens hétérométriques (max 300 kg) Dalles du platier cassées et arrachées du récif	Surcote : 3-4 m Hmax : 6 m Hmax : 6-8 m sur les caps rocheux	Maisons et hôtels endommagés ou détruits Affouillement des digues Déplacement des enrochements Cocotiers décapités
Marigot SXM	Absence de plages Front de mer urbanisé		Transport de blocs coralliens hétérométriques et sables sur la route	Surcote ~2 m Hmax : 4 m	Fronts de mer inondés Digues endommagées Déplacement des enrochements
Baie Orientale SXM	Plage de fond de baie Lagune et mangrove Côte urbanisée	Erosion des plages sableuses	Accrétion sur le haut de plage (formation de dunes) Transport de blocs coralliens hétérométriques Mangrove : obstacle mécanique, piégeage de sédiments et de détrit	Surcote : 3 m Hmax : 5 m Hmax : 9-10 m sur les caps rocheux	Maisons et hôtels endommagés ou détruits Déplacement des enrochements Cocotiers déracinés Salinisation de la mangrove (forte mortalité) Végétation couchée
Grand-Case SXM	Plage urbaine Front de mer urbanisé	Forte érosion de la plage Affouillement au pied des bâtiments : 50 cm	Accumulation de sables dans les aires urbaines Transport de blocs de corail	Surcote : 3 m Hmax : 5-6 m	Murs effondrés Dégradation des fondations Front de mer endommagé
Anse Marcel SXM	Plage de fond de baie Petite Mangrove Cocotiers Complexes touristiques et habitations	Erosion des plages sableuses	Faible transfert de sables	Surcote : 3 m Hmax : 3 m	Maisons et hôtels endommagés ou détruits Salinisation de la mangrove (forte mortalité) Cocotiers décapités
Anse Lorient SB	Côte à lido Platier rocheux Front de mer urbanisé (habitations et hôtels)	Falaise d'érosion dunaire > 50 cm	Nombreux washover dans les espaces non urbanisés Projection de blocs de corail sur les plages	Surcote : 2 m Hmax : 3 m et plus sur les caps rocheux	Maisons et hôtels endommagés et inondés Murs effondrés Dégradation des fondations
Anse des Cayes SB	Plage sableuse et de blocs coralliens Front de mer urbanisé (habitations et hôtels)	Falaise d'érosion dunaire > 50 cm- 1 m Beachrock exhumé	Transfert de sédiments sur le haut de plage Transport de blocs coralliens hétérométriques	Surcote : 2-2,5 m Hmax : 3 - 4 m	Maisons et hôtels endommagés Dégradation des fondations Déplacement des enrochements Cocotiers décapités
Anse Grand Cul de Sac SB	Barrière récifal Lagune connectée à la mer Lido urbanisé (station touristique)	Erosion des plages Beachrock exhumé	Déplacement de dalles du platier sur la plage (10-20 cm) Accumulation de débris coralliens Blocs coralliens piégés par la mangrove	Surcote : 3 m Hmax < 5 m	Maisons et hôtels endommagés et inondés Murs effondrés Dégradation des fondations Déplacement des enrochements Végétation couchée Salinisation de la mangrove (Forte mortalité)
Baie Flamands SB	Plage de fond de baie Lido urbanisé (station touristique)	Erosion de la plage entre les bâtiments (300 à 800m3) Falaise d'érosion dunaire > 1,7m max Beachrock exhumé	Transport de blocs coralliens (max 50 kg)	Surcote : 3 m Hmax : 5 m sur les plages Hmax : 8-10 m sur les caps rocheux	Bâtiments (resorts) endommagés Murs effondrés Dégradation des fondations Déracinement des cocotiers
Anse Toiny SB	Lido sableux Étang bordé d'une mangrove	Falaise d'érosion dunaire > 50cm	Nombreux washover Formation d'un cordon non consolidé de blocs de corail Transport de gros blocs coralliens hétérométriques (max 230 kg) Mangrove : obstacle mécanique, piégeage de sédiments et de détrit	Surcote : 2,5-3 m Hmax > 4 m sur les plages Hmax >6 m sur les caps rocheux	Déracinement des Pandanus et cocotiers Végétation couchée

Des inondations polygéniques

Dans les points bas du littoral, les vents puissants de l'ouragan Irma ont entraîné une submersion marine, des ruptures des cordons et des surverses par-dessus les digues et les ouvrages de protection côtière. L'ouragan a déclenché des pluies diluviennes (plus de 150 mm en six heures) contribuant alors au ruissellement pluvial.

Les différences de niveaux d'eau observés sur les sites étudiés s'expliquent par les caractéristiques de l'ouragan (direction des vents et des vagues, intensité...), des caractéristiques topo-morphologiques des côtes et des écosystèmes côtiers, auxquels s'ajoutent des facteurs anthropiques susceptibles d'expliquer la variabilité des hauteurs d'eau observée sur les fronts de mer et plus à l'intérieur des terres. En accord avec Duvat *et al.* (2019) et Pillet *et al.* (2019), nos relevés soulignent une exposition accrue des côtes orientales de Saint-Martin et des côtes septentrionales de Saint-Barthélemy. Sur

ces côtes basses, nous avons estimé la surcote à plus de 3 m. Le déferlement des vagues s'est ajouté aux impacts de la surcote. Les hauteurs les plus importantes ont été mesurées sur les fronts de mer densément urbanisés comme à Grand Case (SXM) ou Baie Flamands (SB). Les bâtiments côtiers ont formé un « mur de béton » sur lequel les vagues sont venues se briser. Dans la partie occidentale de Grand Case, le *run-up* des vagues a dépassé les 6 m de hauteur (illustration 4).

Illustration 4 - Inondations polygéniques sur une côte urbanisée : l'exemple de Grand Case



Fond cartographique : images drone, UMR GRED, 2017.

La projection de matériaux et l'effet de réflexion des vagues ont provoqué des dégâts extrêmement importants aux infrastructures, tels que la mise à nue de fondation (illustration 5a), l'effondrement de murs et de maisons, murs effondrés, baies vitrées brisées (illustrations 5b et 5c). Les vagues les plus hautes ont été estimées dans les zones urbaines en raison du déferlement des vagues sur les bâtiments situés en bord de mer et d'autres processus telles que les vagues infragravitaires (Krien *et al.*, 2018).

Illustration 5a - Impacts de l'ouragan Irma sur les bâtiments et les infrastructures côtières : affouillement des fondations



Illustration 5b - Impacts de l'ouragan Irma sur les bâtiments et les infrastructures côtières : murs effondrés sous l'effet de l'érosion verticale

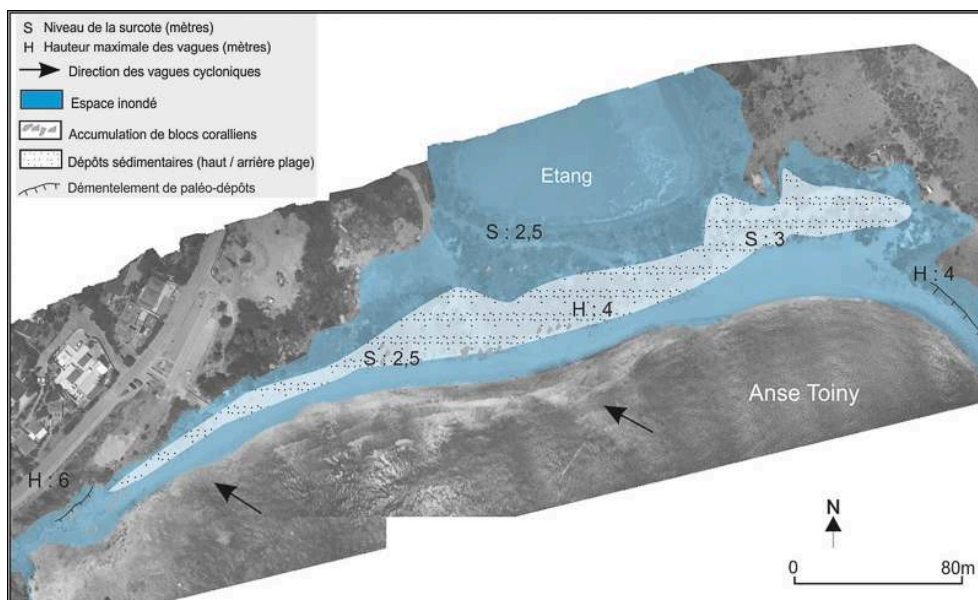


Illustration 5c - Impacts de l'ouragan Irma sur les bâtiments et les infrastructures côtières : inondations des habitations et endommagement des murs, sol, système électrique...



Les inondations les plus importantes se sont produites dans les points bas du littoral, sans grands obstacles topographiques, et où les crêtes dunaires n'excédaient pas 1,5 m. L'extension maximale de l'inondation a été mesurée sur les lidos de Nettlé et Baie Orientale, rejoignant les lagunes en arrière (illustration 6). La végétation, notamment la mangrove, n'a pas atténué les hauteurs de vagues. La largeur et la densité de la mangrove n'étaient pas suffisantes pour avoir un effet sur l'atténuation de l'énergie des vagues, en revanche, la végétation a eu un rôle de filtre sur les blocs et les déchets (*infra*).

Illustration 6 - Submersion marine dans un espace faiblement urbanisé : l'exemple de Toiny



Fond cartographique : images drone, UMR GRED, 2017.

Les fronts de mer urbanisés (habitations, murs) ont probablement limité la submersion marine, en revanche l'imperméabilisation des sols a accru les inondations par

ruissellement pluvial (ex : Gustavia SB, Marigot SXM). L'ouragan Irma s'est accompagné de pluies diluviennes. Selon les données de Météo-France, les précipitations totales ont dépassé 150 mm en six heures. De telles intensités ont provoqué des inondations importantes dans les zones urbaines, déjà touchées dans les zones côtières par la submersion marine. Les niveaux d'eau ont été plus élevés dans les ruelles, les impasses, et dans les habitations et les résidences clôturées par des murets (hôtel Mercure à Nettlé). Les inondations ont alors eu une cinétique complexe (submersion marine, pluie et ruissellement, débordement des lagunes), difficilement prévisible en raison des obstacles et du « contrôle » du bâti sur les écoulements (dont la vitesse).

Des changements côtiers rapides

Les analyses de terrain mettent en évidence des transferts sédimentaires distincts en fonction du degré d'artificialisation des côtes. Les changements ont été rapides, pour certains transitoires et éphémères.

Des situations transitoires et éphémères ?

Les côtes urbanisées ont été sensibles aux impacts de l'ouragan et ont montré une forte réactivité. Au cours de l'ouragan Irma, les vagues se sont brisées sur les murs de défense, les façades de bâtiments et sur les enrochements transversaux et longitudinaux de protection.

Dans le cas des fronts urbains quasi-continus tels que Grand Case (SXM), Baie Nettlé et Baie Flamands (SB), la ligne du rivage n'a pas évolué alors que la plage a subi une ablation latérale et verticale sévère sous l'effet de la réflexion des vagues. L'érosion a généré une diversité de dégâts : chute de mur, sapement de fondation, rupture de conduite d'eau... Les ouvrages de protection n'ont pas limité l'érosion des plages et leur structure n'a pas toujours résisté à la puissance des vagues cycloniques. Par exemple, les plages équipées de Nettlé (surtout des brise-lames et quelques murs de protection) ont reculé de 15 m de part et d'autre des ouvrages. Les habitations situées en première ligne du front de mer ont été lourdement endommagées par le déferlement des vagues, l'inondation marine et les projections de divers matériaux (blocs, palmiers...). Les éléments les plus endommagés par l'action de l'eau ont été les façades, ouvertures de fenêtres, portes et les équipements à l'intérieur des habitations. Des méga blocs d'enrochements pesant plus d'une tonne ont été déplacés par la mer en direction du haut de plage et se sont retrouvés piégés dans des habitations (illustrations 7a et 7b), ou posés sur les routes côtières (Marigot, Baie Orientale). Nous avons pu observer l'importance des transferts de sables qui ont ensablés les rez-de-chaussée de logements (volumes de 1 à 2 m³) (illustration 7c).

Illustration 7a - Matériaux transportés par les vagues cycloniques : exemple d'endommagement des habitations situées sur le front de mer



Illustration 7b - Matériaux transportés par les vagues cycloniques : enrochements déplacés par les vagues cycloniques



Illustration 7c - Matériaux transportés par les vagues cycloniques : ensablement des rez-de-chaussée des bâtiments situés sur le front de mer



Sur les côtes peu artificialisées et possédant une zone tampon suffisamment large, la forme d'ablation la plus commune reste la falaise d'érosion à l'interface plage/dune. Elle dessine une ligne plus ou moins continue en fonction des obstacles rencontrés par les vagues (végétations, propriétés, route...). Là où la zone tampon était supérieure à 20 m, nous avons pu observer une limite avec d'un côté, l'érosion côtière, et de l'autre des accumulations sédimentaires. Cette limite traduit d'une part le déplacement de la zone de *swash* vers le haut de plage, et d'autre part, un seuil énergétique située autour de 20 m à partir du rivage soit à environ à 1m NGF. Nous avons pu observer et mesurer de nombreux blocs coralliens témoignant de ce seuil énergétique notamment à Baie Nettlé. Les blocs ont été transportés à 29 m du rivage, leur taille moyenne est de 45*42*7 cm pour un poids équivalant à 15,6 kg mais l'énergie des vagues a aussi permis le déplacement de blocs plus importants tels qu'une dalle arrachée du platier, située à 35 m du rivage et pesant près de 240 kg selon les mesures effectuées. Hormis certaines situations liées à la topographie de la plage et à la morphologie des blocs et des dalles, on remarque que plus la distance au rivage augmente plus la taille des blocs diminue.

Le trait de côte des plages les moins urbanisées a généralement reculé. Par exemple, à Toiny la plage a reculé d'environ 15 m, à Baie Orientale le recul a atteint plus de 50 m. Cependant, ce qu'il faut ici mettre en avant, ce sont les transferts sédimentaires de l'avant-côte vers le haut et l'arrière plage. Les transferts de sédiments (surverse, brèche marine...) ont donné naissance à une large gamme de *washover* (Donnelly *et al.*, 2006) parfois bien individualisés (illustration 8, Baie Rouge), plus ou moins superposés et jointifs (Toiny) et d'autres plus étalés (Baie Orientale). Ils se composent principalement de sables bio-détritiques. Les plus nombreux *washover* ont été observés sur les plages peu urbanisées qui, peu contrariés par la topographie, ont pu s'étirer sur la plaine côtière, remplissant les lagunes et ensablant les routes et habitations (illustrations 8b et 8c). Le plus imposant est probablement celui qui s'est formé sur le lido à Nettlé (13000 m²). Leur présence révèle l'importance des transferts sédimentaires de l'avant-côte vers l'intérieur des terres (illustration 8a). Ces transferts constituent un processus d'ajustement de la côte à un forçage paroxystique, et à moyen terme, ils participent au processus de récupération des plages.

Illustration 8a - Impacts morphologiques de l'ouragan Irma à Baie Rouge (St Martin) : formation de washover et dommages sur les murs de clôture



Trait continu noir : murs en place ; trait en tirets noir : murs effondrés

Illustration 8b - Impacts morphologiques de l'ouragan Irma à Baie Rouge (St Martin) : transfert de sables depuis le bas de plage.



Blocs projetés et dalles démantelées.

Illustration 8c - Impacts morphologiques de l'ouragan Irma à Baie Rouge (St Martin) : effondrement des murs de clôture et formation d'un washover jusqu'à Red Pond



Source : images drone, UMR GRED, 2017.

Illustration 8d - Impacts morphologiques de l'ouragan Irma à Baie Rouge (St Martin) : dommages caractéristiques des vagues cycloniques sur les infrastructures et habitations côtières



L'ouragan Irma a aussi conduit à l'exhumation des dalles de *beachrocks*, ce qui témoigne d'un changement ponctuel de l'équilibre morpho-dynamique de la côte sableuse. À moyen et long terme, l'exhumation systématique des beachrocks traduira une tendance d'érosion (illustration 9).

Illustration 9 - Dalles de beachrock affleurantes et démantelées



Transport et dépôts de blocs coralliens par l'ouragan Irma

L'énergie des vagues a permis le transport d'importantes quantités de matériaux inertes (squelettes, blocs, conglomérats sablo-coquillers) du platier récifal vers les plages. Les vagues cycloniques ont aussi mobilisé des matériaux déjà présents sur les plages. Ils se distinguent souvent par leur couleur plus sombre par rapport aux dépôts fraîchement transportés. Les blocs sont posés les uns sur les autres. Bien triés et disposés en tuilage face aux houles incidentes, ces amas de matériaux coralliens forment des épandages de blocs (illustration 10a) et des cordons non consolidés, plus ou moins continus, avec une crête bien individualisée parallèle au trait de côte (illustration 10b). La pente dirigée vers la mer révèle une topographie en marches d'escalier, avec une pente abrupte et plutôt concave (Kelletat et Schellmann, 2002). Ces dépôts ne s'observent que sur les côtes peu artificialisées, là où les processus morpho-sédimentaires ne sont pas contrariés par les aménagements côtiers et l'urbanisation du front de mer. En fonction de la végétation présente, les processus physico-chimiques favoriseront la lithification des matériaux bio-détritiques et leur consolidation.

Illustration 10a - Mise en place de dépôts de haute énergie (Irma, 2017) : épandage de blocs coralliens



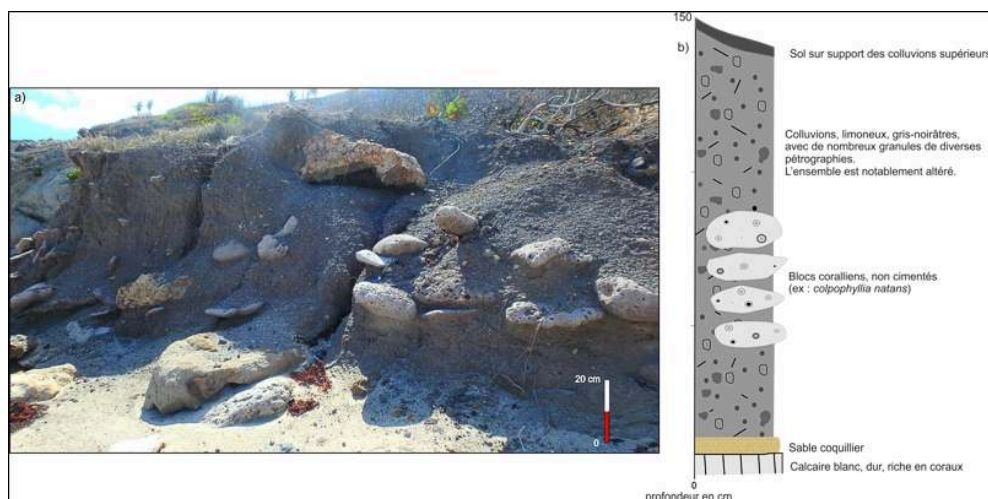
Illustration 10b - Mise en place de dépôts de haute énergie (Irma, 2017) : Exhaussement du cordon de galets



Ce type de dépôts cycloniques est assez rare à Saint-Barthélemy et St Martin, ce qui suppose une préservation délicate probablement en raison des remaniements lors

d'évènements postérieurs. Toutefois, lors de nos analyses sur la plage de Toiny (SB), un talus entaillé par les vagues a délivré une stratigraphie complexe dans laquelle plusieurs faciès de dépôts continentaux et marins s'inscrivent (illustration 11a).

Illustration 11 - Paléo-dépôt de haute énergie entaillé par l'érosion côtière (plage de Toiny, Saint-Barthélemy)



a) Photographie de la coupe sédimentaire. b) Log litho-stratigraphique simplifié

Comme illustré sur l'illustration 11b, la base de la coupe sédimentaire se caractérise par une formation constituée d'un calcaire riche en coraux typique des plateformes d'avant-côte. Sur cette formation repose une fine couche de sables fins coquilliers. Sur celle-ci, se sont déposés des colluvions qui proviennent du talus qui se raccorde au morne Vitet. La formation colluviale est altérée. Elle contient de gros blocs coralliens (4000 à 6000 cm³) émoussés, non cimentés, plus ou moins organisés sous forme de tuilage. Ce faciès s'apparente à celui des cordons formés par un ou plusieurs évènements météo-marins paroxystiques (Scheffers *et al.*, 2009) mais il est exceptionnel d'en observer d'aussi bien préservés.

Le rôle de la végétation

Quelles que soient les espèces, la végétation côtière a été très endommagée par la mer et le vent. Les dommages prennent plusieurs formes en fonction des espèces et de l'agent destructeur : végétation couchée, déracinement total ou partiel, tronc plié ou rompu, décapitation des cocotiers, sursalure de la végétation (Tate et Battaglia, 2013). En arrière du front de végétation côtière très dégradé, certaines espèces indigènes ont mieux résisté tels que *Coccoloba uvifera* (le raisinier bord de mer) et certains palétuviers comme *Laguncularia racemosa* et *Conocarpus erectus* contrairement à *Avicennia germinans* et *Rhizophora mangle* qui accusent un fort taux de mortalité (Conservatoire du Littoral, 2018). Néanmoins, les espèces les plus résistantes ont bloqué les débris (tôles, bois...) et piégé les matériaux biodétritiques (illustrations 12a et 12b).

Illustration 12a - Accumulation de débris et de blocs coralliens sous l'effet de l'ouragan Irma : sable et blocs coralliens piégés par la végétation côtière



Illustration 12b - Accumulation de débris et de blocs coralliens sous l'effet de l'ouragan Irma : amas de blocs non consolidés disposés en tuilage



Cette fonction de filtre a probablement réduit les dommages sur les zones urbaines. Il ne fait aucun doute que ces espèces indigènes favorisent également la résilience des plages (Griggs *et al.*, 2017). Le constat est différent pour les espèces introduites dont la résistance est faible (Petit et Prudent, 2008). Quasiment tous les cocotiers et palmiers ont été arrachés ou décapités.

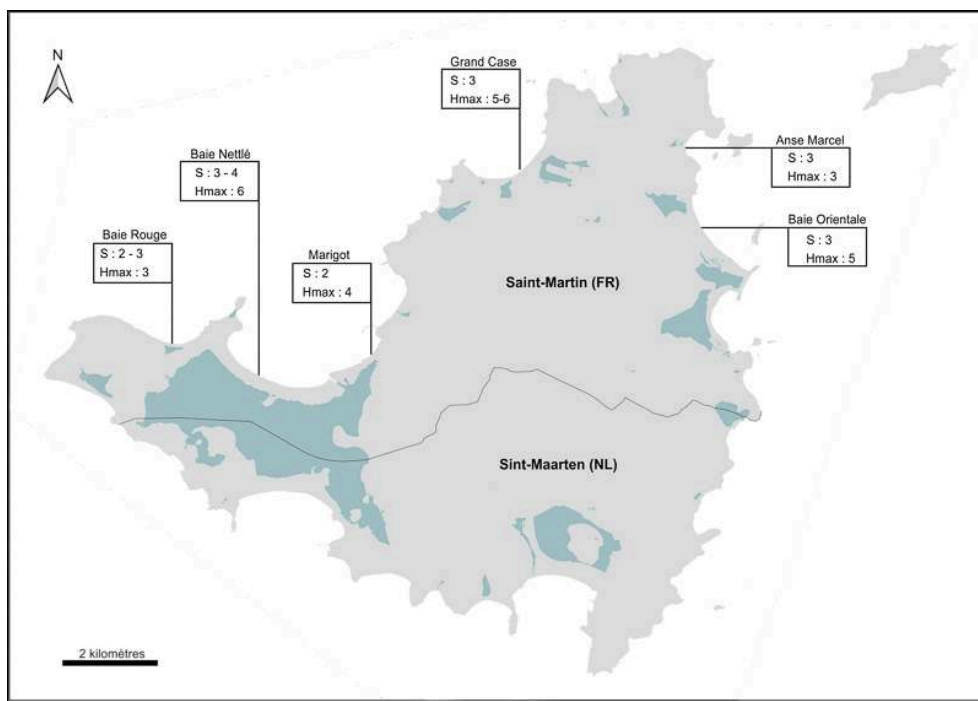
Conclusion

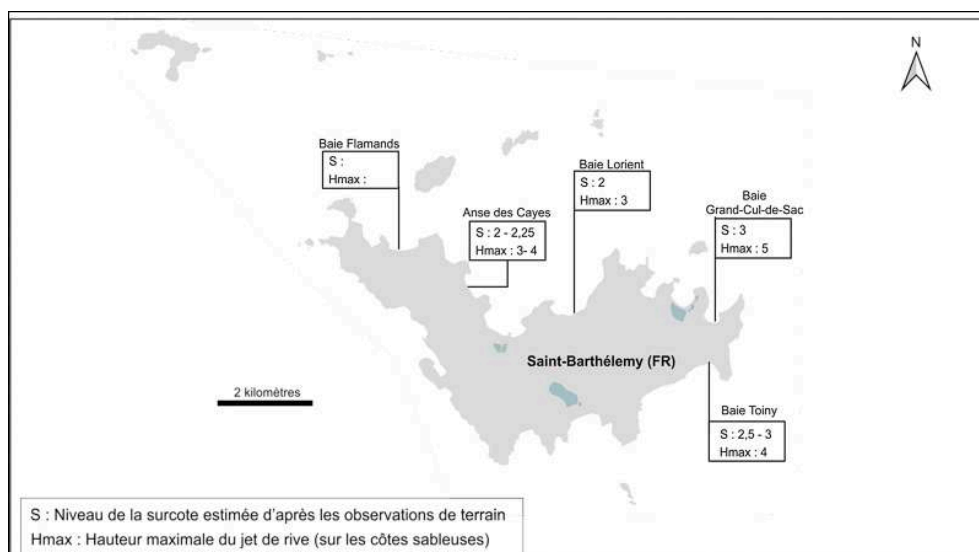
Les effets d'Irma sur les systèmes côtiers de Saint-Martin et Saint-Barthélemy sont conditionnés par les capacités de résistance et d'ajustement des plages, lesquelles diffèrent en fonction du degré de pressions exercées par les hommes sur les côtes. Les observations géomorphologiques ont révélé des niveaux d'eau extrêmes variés le long

des côtes (illustration 13). Ceux-ci peuvent s'expliquer par l'accumulation et le déferlement des vagues, ou par d'autres processus telles que les vagues d'infragravité (Rey *et al.*, 2019). Les écosystèmes côtiers, notamment les récifs coralliens, ont influencé la propagation des vagues et leur énergie, et il ne fait aucun doute que les frottements avec le fond ont réduit les hauteurs de vague à la côte. Nous pouvons aussi affirmer que la réflexion des vagues sur les fronts de mer densément urbanisés a participé à l'amplification du *run up* des vagues et aux dommages associés.

Les côtes urbanisées ont eu une forte sensibilité et une forte réactivité aux effets de l'ouragan. Comprimés par, d'un côté la pression urbaine, et de l'autre la mer, les côtes basses n'ont pas pu s'ajuster au forçage. L'exiguïté ou l'inexistence d'une zone tampon du système plage-dune a conduit à une érosion côtière et des dommages urbains souvent très importants. Deux ans après le passage de l'ouragan Irma, la résilience ou la capacité des plages urbaines à retrouver un état d'équilibre est lente et difficile, notamment si la tendance préexistante est caractérisée par l'érosion (Ding *et al.*, 2015). Sur la période d'observation post-Irma, lorsque la récupération des plages est probante, elle est souvent le fruit de rechargements avec la mise en place de géobags comme à Grand-Cul-de-Sac à St Barthélemy. La lente récupération des systèmes côtiers urbanisés souligne l'importance des seuils en termes de changement d'état ou de seuils d'irréversibilité. En effet, l'artificialisation de la cellule sédimentaire limite voire bloque les transferts de matériaux. La récupération des côtes se retrouve également entravée par les ouvrages de protection qui perturbent les dynamiques côtières.

Illustration 13 - Carte de synthèse représentant le niveau de la surcote et les hauteurs maximales du jet de rive le long des côtes sableuses





Sur les côtes plus naturelles, les hauts de plage ont migré vers l'intérieur, nourris par les sédiments venant de l'avant-côte et de l'érosion des plages. Ces transferts sédimentaires et les formes associées sont une réponse au forçage cyclonique et une première forme de résilience côtière. Loin d'être un événement catastrophique pour les plages pas ou peu artificialisées, les cyclones redynamisent les cellules littorales. Les vagues cycloniques mobilisent et remobilisent des sédiments pour alimenter l'avant-côte et les plages en sables et débris coralliens. Comme nous avons pu l'observer sur de nombreuses plages à Saint-Barthélemy et Saint-Martin, la récupération peut être extrêmement rapide. Tout d'abord, elle résulterait de l'état de dégradation *ante* et *post* cyclone, puis dépendrait d'autres paramètres comme les sources sédimentaires disponibles, les transferts côtiers, l'état des écosystèmes côtiers, la morphologie du littoral, la pente... (Woodruff *et al.*, 2013). Le retour à l'équilibre des systèmes côtiers nécessite une approche multidimensionnelle avec d'une part l'hystérèse des côtes face à un événement de haute énergie et d'autre part, des dynamiques morpho-sédimentaires complexes sur des temps plus longs (Rey, 2017).

Sur les deux îles, les superficies de mangrove sont petites hormis à Baie d'Embouchure où la largeur atteint 300 m de large. D'une manière générale, ces forêts ne sont pas suffisamment larges et denses pour atténuer l'énergie des vagues d'un cyclone de catégorie 5. Toutefois, ce rempart végétal a permis de réduire les dommages en bloquant et en filtrant les matériaux et les débris. Les forêts de mangrove ont été lourdement touchées par les vents cycloniques et les vagues : défoliation, déracinement, hyper salinisation. Leur reboisement devrait prendre 10 à 15 ans (Imbert, 2018). Le risque est que cet asynchronisme entre la récupération des plages et celui de la végétation conduisent à une dégradation bien plus sévère si un phénomène météorologique intense touchait prochainement ces îles.

Les fronts de mer urbanisés ont été un obstacle aux inondations marines mais les dommages aux bâtiments ont été extrêmement importants (Mortlock *et al.*, 2018). Les observations de terrains soulignent les processus responsables des dommages à l'intérieur et à l'extérieur des habitations et hôtels situés près du rivage :

- affouillement des fondations et murs effondrés,
- déplacement des enrochements et projection de matériaux sur les façades et l'intérieur des bâtiments,

- pressions de l'eau et du vent exercées sur les portes, les volets et les vitres,
- inondations des bâtiments et endommagement des murs, sol, système électrique...

La majorité des dommages aux bâtiments résulte de plages étroites, de dunes trop basses et surtout souligne les difficultés à gérer et aménager ces territoires insulaires qui depuis trois décennies subissent de fortes pressions démographiques et immobilières, même si les formes d'urbanisation et les problématiques foncières ne sont pas similaires entre les deux îles. Les risques côtiers sont croissants, néanmoins, les vulnérabilités notamment sociales, économiques et politiques sont différentes et résultent du caractère insulaire. Les lois et les règlements (PPRN 2011) existent mais leur respect est délicat et les lois sont parfois incohérentes (Nicolas *et al.*, 2019). Par exemple, la loi n° 96-1241 du 30 décembre 1996 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur de la zone des cinquante pas géométriques dans les départements d'outre-mer conduit à la régularisation de la situation des occupants sans titre en leur permettant d'acquérir le terrain qu'ils occupent à usage d'habitation principale. Face aux impacts d'Irma sur les littoraux de Saint-Martin et Saint-Barthélemy, c'est ici la recomposition territoriale et l'investissement des politiques publiques qui est en jeu.

BIBLIOGRAPHIE

- Boyett R., 2013. Post-Hurricane Isaac assessment: modeling confirms the HSDRRS had little impact on areas outside the system. *Riverside Mag.* Spring, p. 13-14.
- Bray M. J., Carter D. J., Hooke J., 1995. Littoral cell definition and budget for central southern England. *Journal of Coastal Research*, vol. 11, n° 2, p. 391-400.
- Brill D., May S. M., Engel M., Reyes M. *et al.*, 2014. La gestion du risque cyclonique en Polynésie française et ses limites : exemple du cyclone tropical Oli, février 2010. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, n° 3, p. 396-408.
- Christman R.A., 1953. Geology of St. Bartholomew, St. Martin, and Anguilla, Lesser Antilles. *GSA Bulletin [En ligne]*, vol. 64, n° 1, p. 65-96. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1953\)64\[85:gosbsm\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1953)64[85:gosbsm]2.0.co;2)
- Conservatoire du Littoral, 2018. Analyse et diagnostic écologique post-cyclone Irma 2017 à Saint-Martin. Rapport final, Juillet 2018. In Harteman M. *Nature et développement*. 93 p.
- De La Torre Y., Lecacheux S., Pedreros R., Balouin Y., 2008. Modélisation de la houle cyclonique dans le lagon de Mayotte. Journées Nationales Génie Côtier- Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis, p. 325-334.
- Ding D., Yang J., Li G., Dada O. A. *et al.*, 2015. A geomorphological response of beaches to Typhoon Meari in the eastern Shandong Peninsula in China. *Acta Oceanol. Sin.*, vol. 34, n° 9, p. 126-135.
- Donnelly C., Kraus N., Larson M., 2006. State of Knowledge on Measurement and Modeling of Coastal Overwash. *Journal of Coastal Research*, n° 224, p. 965-991.

- Duvat V., 2008. Le système du risque à Saint-Martin (Petites Antilles françaises). *Développement durable et territoires* [En ligne]. Dossier 11. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/7303>
- Duvat V., Magnan A., Étienne S. *et al.*, 2016. Assessing the impacts of and resilience to Tropical Cyclone Bejisa, Reunion Island (Indian Ocean). *Natural Hazards*, p. 1-40.
- Duvat V., Pillet V., Volto N. *et al.*, 2019. Geomorphology High human influence on beach response to tropical cyclones in small islands: Saint-Martin Island, Lesser Antilles. *Geomorphology*, n° 325, p. 70-91.
- Etienne S., 2012. Marine inundation hazards in French Polynesia: geomorphologic impacts of tropical cyclone Oli in February 2010. In Terry J., Goff J. (ed), *Natural Hazards in the Asia-Pacific Region: Recent Advances and Emerging Concepts*. The Geological Society of London Special Publication, vol. 361, p. 21-39.
- Etienne S., Terry J. P., 2012. Coral boulders, gravel tongues and sand sheets: Features of coastal accretion and sediment nourishment by Cyclone Tomas (March 2010) on Taveuni Island, Fiji. *Geomorphology*, n° 175-176, p. 54-65.
- Faye I., 2010. *La dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux d'Afrique de l'Ouest. Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes*. Thèse de doctorat de géographie, Université de Bretagne Occidentale: Brest, France.
- Ferrario F., Beck M. W., Storlazzi C. D. *et al.*, 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications* [En ligne], n° 5, 3794. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Fritz H., Blount C., Sokoloski R. *et al.*, 2007. Hurricane Katrina storm surge distribution and field observations on the Mississippi Barrier Islands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* [En ligne], vol. 74, n° 1-2, p. 12-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.015>
- Griggs D. J., Nilsson M., Stevance A., McCollum D., 2017. *A Guide to SDG Interactions: From Science to Implementation*. Paris, International Council for Science.
- Gustin P., 2017. *Repenser les Iles du Nord pour une reconstruction durable*. Rapport, Délégation interministérielle à la reconstruction des îles de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin [En ligne]. Saint-Martin. <https://www.gouvernement.fr/irma-reconstruction-des-iles-de-saint-barthelemy-et-saint-martin>
- Harris M.S, Gayes P.T., Kindinger J.L. *et al.*, 2005. Quaternary Geomorphology and Modern Coastal Development in Response to an Inherent Geologic Framework: An Example from Charleston, South Carolina. *Journal of Coastal Research*, p. 49-64.
- Héquette A., 2001. Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale : le rôle des courants orbitaux et de downwelling / Currents and sediment transport in the coastal zone: the role of orbital and downwelling currents. In *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 7, n° 1. p. 5-16. DOI: <https://doi.org/10.3406/morfo.2001.1082>
- Hoeke R. K., McInnes K. L., Kruger J. C. *et al.*, 2013. Widespread Inundation of Pacific Islands Triggered by Distant-Source Wind-Waves. *Global and Planetary Change*, n° 108, p. 128-138.
- Jeanson M., Dolique F., Sedrati M. *et al.*, 2016. Wave modification across a coral reef: Cap Chevalier, Martinique Island. *Journal of Coastal Research* [En ligne], vol. 75, n° 1, p. 582-586. DOI : <https://doi.org/10.2112/S175-117.1>
- Kelletat D., Schellmann G., 2002. Tsunamis on Cyprus: field evidences and 14C dating results. *Zeitschrift fur Geomorphologie (NF)*, vol. 46, n° 1, p. 19-34.

- Krien Y., Arnaud G., Cécé R. *et al.*, 2018. Can We Improve Para-metric Cyclonic Wind Fields Using Recent Satellite Remote Sensing Data? *Remote Sensing* [En ligne], vol. 10, n° 12, 1963. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10121963>
- Lemoigne B., Paulineau M., Nachbaur A., Stépanian A., 2013. *Établissement d'un état de référence du trait de côte de la Martinique. Situation en 2010 et évolution historique depuis 1951. Rapport Final.* BRGM/RP-61686-FR150, Orléans, 85 p.
- Maue R. N., 2011. Recent historically low global tropical cyclone activity. *Geophys. Res. Letts* [En ligne], vol. 38, L14803, 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GL047711>
- McInnes K. L., Walsh K. J. E., Hubbert G. D., Beer T., 2003. Impact of sea level rise and storm surges on a coastal community. *Natural Hazards*, vol. 30, n° 2, p. 187-207.
- Monismith S.G., Rogers J.S., Koweeck D., Dunbar R.B., 2015. Frictional wave dissipation on a remarkably rough reef. *Geophys. Res. Lett.*, n° 42, p. 4063-4071.
- Mortlock T.R., Metters D., Soderholm J. *et al.*, 2018. Extreme water levels, waves and coastal impacts during a severe tropical cyclone in northeastern Australia: a case study for cross-sector data sharing. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, n° 18, p. 2603-2623.
- Morton R. A., Sallenger H. Jr., 2003. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers. *Journal of Coastal Research*, n° 19, p. 560-573.
- Nicolas T., Pagny Bénito-Espinal F., Lagahé E., Gobinddass M-L., 2019. Les catastrophes cycloniques de septembre 2017 dans la Caraïbe insulaire au prisme de la pauvreté et des fragilités sociétales, *EchoGéo* [En ligne], 46. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/16439> - DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.16439>
- Nurse L.A., Mcleae R.F., Agard J. *et al.*, 2014. Small islands. In Barros V.R. *et al.* (ed.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects.* Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK) and New York (USA), Cambridge University Press, p. 1613-1654.
- Petit J., Prudent G. (ed.) 2008. *Climate Change and Biodiversity in the European Union Overseas Entities* [En ligne]. IUCN, Gland, Switzerland and Brussels, Belgium. URL: <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2010-064.pdf>
- Pillet V., Duvat V., Krien Y. *et al.*, 2019. Assessing the impacts of shoreline hardening on beach response to hurricanes: Saint-Barthélemy, Lesser Antilles. *Ocean and Coastal Management* [En ligne], n° 174, p. 71-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.023.021>
- Reguero B. G., Méndez F. J., Losada I. J., 2013. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. *Global Planet. Change* [En ligne], n° 100, p. 70-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.09.005>
- Rey T., Le Dé L., Leone F., Gilbert D., 2017. An integrative approach to understand vulnerability and resilience post-disaster: The 2015 cyclone Pam in urban Vanuatu as case study. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. 26, n° 3, p. 259-275.
- Rey T., 2017. *Des paléoenvironnements aux aléas côtiers : un géomorphologue à travers les temporalités littorales.* Dossier d'habilitation à diriger des recherches, Université Paul-Valéry Montpellier 3, Volume 1, 200 p.
- Rey T. *et al.*, 2019. Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma (St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *Journal of Marine Science and Engineering* [En ligne], n° 7, 215. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7070215>

- Rogers J.S., Monismith S.G., Kowalik D.A., Dunbar R.B., 2016. Wave dynamics of a Pacific Atoll with high frictional effects. *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 121, p. 350–367.
- Scheffers S., Haviser J., Browne T., Scheffers A., 2009. Tsunamis, hurricanes, the demise of coral reefs and shifts in prehistoric human populations in the Caribbean, *Quaternary International*, vol. 195, n° 1-2, p. 69-87.
- Stoddart D. R., Steers J. A., 1977. The nature and origin of coral reef islands. In: Jones O.A., Eidean R. (ed.), *Biology and Geology of Coral Reefs*, vol. IV. New York, Academic Press, p. 59-105.
- Storlazzi C. D., Reguero B. G., Cole A. D. et al., 2019. *Rigorously valuing the role of U.S. coral reefs in coastal hazard risk reduction* [En ligne]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2019-1027, 42 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr20191027>
- Tate A. S., Battaglia L. L., 2013. Community disassembly and reassembly following experimental storm surge and wrack application. *Journal of Vegetation Science*, vol. 24, n° 1, p. 46-57.
- Terry J. P., 2010. Geomorphic influences on the variability of coastal erosion and deposition on Ambae Island, Vanuatu, caused by Ouragan Funa in January 2008. In Oh J. H. (ed.), *Atmospheric Science. Advances in Geosciences*. Singapore, World Scientific Publishing 16, p. 193-202.
- Torres M. A., Jaimes M. A., Reinoso E., Ordaz M., 2014. Event-based approach for probabilistic flood risk assessment. *International Journal of River Basin Management*, vol. 12, n° 4, p. 377-389.
- Wang P., Horwitz M. H., 2007. Erosional and depositional characteristics of regional overwash deposits caused by multiple hurricanes. *Sedimentology*, n° 54, p. 545-564.
- Woodruff J.D., Irish J.L., Camargo S.J., 2013. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, vol. 504, 7478, p. 44-52.
- Yamano H., Kayanne H., Chikamori M., 2005. An overview of the nature and dynamics of reef islands. *Global Environmental Research*, vol. 9, p. 9-20.
- Zhang K., Liu H., Li Y. et al., 2012. The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 102-103, p. 11-23.

NOTES

1. *Accumulated Cyclone Energy*. L'ACE correspond à l'énergie cumulative des ouragans. Cet indice combine la fréquence, la durée et l'intensité des cyclones (Maue, 2011).
2. Hoarau K. L'activité des ouragans extrêmes de l'Atlantique Nord (1980-2017), 14^{èmes} rencontres Géorisques, Montpellier, le 23 janvier 2018.
3. Estimations de l'INSEE et du Department of Statistics Sint Maarten
4. Recensements 1982 : 8 072 (F) ; 13156 (PB) ; Recensement 2014 : 35 941 (F) ; Recensements 2011 : 33 609 (PB)

RÉSUMÉS

Cette étude porte sur les changements côtiers et les inondations suite au passage d'un ouragan de catégorie 5 (Irma) les 5 et 6 septembre 2017 sur les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy aux Antilles. Deux missions de terrain à t+2 mois et t+8 mois sur les deux îles ont permis d'analyser les impacts de l'ouragan Irma sur des côtes basses particulièrement sensibles aux événements météo-marins extrêmes et aux pressions anthropiques. Le retour d'expérience a été réalisé sur les côtes les plus touchées par l'évènement. Pour comparer les impacts de l'ouragan Irma et les interactions avec les systèmes côtiers et les infrastructures côtières, nous avons choisi d'analyser des côtes peu urbanisées et des littoraux densément aménagés. La méthode a reposé sur l'analyse d'images satellites avant le passage de l'ouragan Irma et l'analyse d'images drones post-évènement. Elle s'est aussi appuyée sur des observations géomorphologiques, la mesure des hauteurs de vagues et la cartographie des espaces inondées. Les systèmes côtiers ont répondu très différemment en fonction du degré d'artificialisation de la côte, révélant des changements côtiers variés, des transferts sédimentaires perturbés et une influence sur les hauteurs d'eau maximales à la côte.

This study deals with the coastal changes, flooding and damage after the passage of a category 5 hurricane (Irma) on 6 September 2017 over the islands of Saint-Martin and Saint-Barthélemy in the Lesser Antilles. Two field work were made 2 and 8 months after the catastrophe over the two islands. It made it possible to analyze the impacts of Hurricane Irma on the low-lying shores that are particularly susceptible to extreme cyclonic events and anthropogenic stressors. The field work was made on the coasts most affected by the cyclonic event. To compare impacts of hurricane Irma and interactions with coastal systems and coastal infrastructure, we chose to analyze undeveloped to highly urbanized coasts. The method was based on the analysis of satellite images and Unmanned Aerial Vehicle surveys. It also relied on qualitative observations, geomorphological and sedimentary surveys and the measurement of wave run up and the mapping of flooded areas. The coastal system revealed a variety of morpho-sedimentary responses on both the natural and highly urbanized coasts, showing varied coastal changes, perturbed sedimentary transfers and the effects of coastal structures and street on flow channeling and on water level increase

INDEX

Keywords : Hurricane, Lesser Antilles, coastal change, flooding, Irma, St Martin, St Barthélemy

Mots-clés : Ouragan, Antilles, changement côtier, inondation, Irma, St Martin, St Barthélemy

AUTEURS

TONY REY

Tony Rey, tony.rey@univ-montp3.fr, est maître de conférences HDR à l'Université Paul Valéry Montpellier 3. Il a récemment publié :

- Rey T., Leone F., Candela T. et al., 2019. Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *Journal of Marine Science and Engineering* [En ligne], vol. 7, n° 7, 215. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7070215>

- Rey T. et Defossez S., 2019. Comprendre la gestion des risques hydrométéorologiques au Cambodge, Territoire en mouvement. *Revue de géographie et aménagement* [En ligne], n° 42. URL : <http://journals.openedition.org/tem/5761> - DOI: <https://doi.org/10.4000/tem.5761>
- Rey T., Le Dé L., Leone F. et David G., 2018. Leçons tirées du cyclone Pam au Vanuatu (Mélanésie) : aléas côtiers, crues éclairs et dommages. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 23, n° 4. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11842> - DOI: <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11842>

THOMAS CANDELA

Thomas Candela, thomas.can@hotmail.fr, est doctorant à l'Université Paul-Valéry Montpellier 3, rattaché à l'UMR GRED et responsable R&D au BE RisCrisés. Il a récemment publié :

- Rey T., Leone F., Candela T. *et al.*, 2019. Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *Journal of Marine Science and Engineering* [En ligne], vol. 7, n° 7, 215. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7070215>

MATTHIEU PÉROCHE

Matthieu Péroche, matthieu.peroche@univ-montp3.fr, est maître de conférences à l'Université Paul Valéry Montpellier 3. Il a récemment publié :

- Vinet F., Péroche M., Palany P. *et al.*, 2020. Collecte et gestion des débris post-cycloniques à Saint-Martin (Antilles françaises) après le passage du cyclone Irma (sept. 2017) – *Cybergeo : European Journal of Geography*, 937, <http://journals.openedition.org/cybergeo/34154> ; DOI: <https://doi.org/10.4000/cybergeo.34154>
- Péroche M., Leone F., Aliaga B., Granjon A., 2019. Caractérisation de l'exposition des navires de croisières lors des exercices d'alerte tsunami dans le bassin des Caraïbes en 2013 et 2014. In *Rivages et Horizons, Hommages au Pr. Jean Marie Miossec*, Paris, Ed. L'Harmattan.
- Girres J.-F., Leone F., Péroche M. *et al.*, 2018. Analysis of tsunami evacuation maps for a consensual symbolization rules proposal. *International Journal of Cartography* [En ligne], vol. 4, p. 4-24. DOI: <https://doi.org/10.1080/23729333.2018.1440711>

FRÉDÉRIC LEONE

Frédéric Leone, Frederic.Leone@univ-montp3.fr, est professeur à l'Université Paul Valéry Montpellier 3. Il a récemment publié :

- Rey T., Leone F., Candela T. *et al.*, 2019. Coastal Processes and Influence on Damage to Urban Structures during Hurricane Irma St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *Journal of Marine Science and Engineering* [En ligne], vol. 7, n° 7, 215. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7070215>
- Bennani O, Druon E., Leone F., *et al.*, 2019. A spatial and integrated flood risk diagnosis. Relevance for disaster prevention at Ourika valley (High Atlas-Morocco). *Disaster Prevention and Management* [En ligne], vol. 28, n° 5, p. 548-564. DOI : [doi:10.1108/DPM-12-2018-0379](https://doi.org/10.1108/DPM-12-2018-0379)
- Leone F., Komorowski J.C., Gherardi-Leone M. *et al.*, 2018. Accessibilité territoriale et gestion de crise volcanique aux Antilles françaises (Guadeloupe & Martinique) : contribution à la planification des évacuations. *Cybergeo: European Journal of Geography, Espace, Société, Territoire*, document 865. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29425> - DOI: <https://doi.org/10.4000/cybergeo.29425>