

Drone et cartographie post-désastre : exemples d'applications sur un territoire cycloné (Petites Antilles du Nord, ouragan Irma, septembre 2017)

Frédéric Leone, Matthieu Péroche, Thomas Candela, Tony Rey, Vinet Freddy, Monique Gherardi, Stéphanie Defossez, Emilie Lagahé, Benjamin Pradel

▶ **To cite this version:**

Frédéric Leone, Matthieu Péroche, Thomas Candela, Tony Rey, Vinet Freddy, et al.. Drone et cartographie post-désastre : exemples d'applications sur un territoire cycloné (Petites Antilles du Nord, ouragan Irma, septembre 2017). Cartes & géomatique, 2021, 245-246, pp.163-177. hal-03607811

HAL Id: hal-03607811
https://hal.science/hal-03607811

Submitted on 19 Mar 2022

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.

N° 245 - 246

SEPTEMBRE - DÉCEMBRE 2021

CARTES & GÉOMATIQUE

CARTORISK : RISQUES NATURELS OU ANTHROPIQUES EN CARTE



REVUE DU COMITÉ FRANÇAIS DE CARTOGRAPHIE

DRONE ET CARTOGRAPHIE POST-DÉSASTRE : EXEMPLES D'APPLICATIONS SUR UN TERRITOIRE CYCLONÉ (PETITES ANTILLES DU NORD, OURAGAN IRMA, SEPTEMBRE 2017)

par Frédéric Leone, Matthieu Péroche, Thomas Candela, Tony Rey, Freddy Vinet, Monique Gherardi, Stéphanie Defossez, Emilie Lagahé

Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier, Université Paul-Valéry Montpellier 3, 34199 Montpellier
frederic.leone@univ-montp3.fr

et Benjamin Pradel

L'avion Jaune, 34980 Montferrier-sur-Lez

En contexte post-catastrophe, les moyens aériens représentent une solution efficace pour agir avec rapidité dans un environnement dévasté. Parmi ces moyens, la flexibilité, l'atout économique et les possibilités que peuvent offrir les aéronefs télépilotés, aussi appelés drones, notamment en termes de reconstitutions 3D et de cartographie, en font un outil d'investigation alternatif en pleine expansion. Cinq applications de ces relevés par drone sont illustrées dans cet article suite au passage de l'ouragan Irma sur les Antilles françaises du Nord en septembre 2017 (Saint-Martin et Saint-Barthélemy). Elles permettent non seulement d'illustrer les potentialités techniques et scientifiques de ces nouveaux outils et des modalités de leur mise en œuvre, mais aussi de discuter de leurs limites dans le cadre de retours d'expériences post-désastre. Les résultats obtenus sont multiples et à forte valeur opérationnelle pour la prévention des risques cycloniques. Ils concernent l'analyse spatiale des dispersions de débris et la reconstitution des volumes associés, la fiabilité des estimations de dommages sur les bâtiments, le suivi du processus de reconstruction, et la compréhension des impacts géomorphologiques sur le littoral.

Mots-clés : drone, cyclone, Irma, catastrophe, Antilles, retour d'expérience

In post-disaster context, air assets represent an effective solution to act quickly in a devastated environment. Among these means, the flexibility, the economic advantage and the possibilities offered by Unmanned Aircraft System, also known as UAS, particularly in terms of 3D reconstructions and cartography, make them an alternative investigation tool that is rapidly expanding. Five applications of these UAV surveys are illustrated in this article after the passage of Hurricane Irma over the French North West Indies in September 2017 (Saint-Martin and Saint-Barthélemy). They illustrate the technical and scientific potentialities of these new tools, the modalities of their implementation, and give us also the opportunity to discuss about their limitations in the context of post-disaster feedback. The results obtained are multiple and offer a high operational value for the prevention of cyclonic risks. They concern the spatial analysis of debris dispersal and the reconstruction of associated volumes, the reliability of damage estimates on buildings, the monitoring of the reconstruction process, and the understanding of geomorphological impacts on the coastline.

Keywords*: UAS, hurricane, Irma, disaster, Antilles, experience feedback*

Introduction

La saison cyclonique 2017 en Atlantique Nord a été marquée par plusieurs cyclones de forte intensité (Hoarau *et al.*, 2020). Harvey, Irma, José et Maria ont laissé un lourd bilan matériel et humain à l'échelle des Antilles (Nicolas *et al.*, 2018). Ce type de catastrophe a montré l'intérêt de collecter rapidement de l'information géoréférencée pour soutenir les opérations d'urgence, évaluer les impacts physiques et suivre le processus de reconstruction (Tatham, 2009 ; Apvrille *et al.*, 2017 ; Chowdhury *et al.*, 2017 ; http://uaviators.org/). Ces informations viennent alimenter

1 Transfert des apprentIssages de Retours d'EXpériences scientifiques pour le renforcement des capacités de réponse et d'adaptation individuelles et collectives dans un contexte de changement climatique (Petites Antilles du Nord - saison cyclonique 2017). 2018-2022. Résultats du projet sur : https://tirex.univ-montp3.fr/

par ailleurs les retours d'expériences scientifiques (Retours d'expériences) multi-dimensionnels, tels que celui porté par le projet de recherche ANR TIREX[1] dans lequel s'inscrivent nos recherches. Dans ce type de contexte, les moyens aériens représentent une solution efficace pour agir avec rapidité dans un environnement dévasté et ainsi atténuer les dangers associés à l'inspection physique et directe du territoire endommagé. Parmi ces moyens, la flexibilité, l'atout économique et les possibilités que peuvent offrir les aéronefs télépilotés, aussi appelés drones, notamment en termes de reconstitutions 3D et de cartographie, en font un outil de recherche alternatif en pleine expansion (Adams et Friedland, 2011). Ces drones ont été largement déployés au lendemain du passage de l'ouragan Irma (6 septembre 2017) sur les territoires français de Saint-Martin (STM) et Saint-Barthélemy (STB) (fig. 1). Ils nous apportent des informations cruciales pour comprendre la catastrophe, en tirer des enseignements et en préserver la mémoire spatiale.

Au-delà de l'évaluation des dommages sur le bâti, différentes applications de ces relevés par drone seront illustrées dans cet article pour les territoires de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy : cartographie de la dispersion des débris liés au vent, quantification des volumes de débris, analyse des impacts géomorphologiques, suivi de la résilience des écosystèmes côtiers et du processus de reconstruction... Elles s'inscrivent dans une tentative de reconstitution spatiale des chaînes d'impacts cycloniques. Les résultats portent autant sur la mise au point de protocoles d'analyses de dommages post-cycloniques que sur les bilans spatialisés de cette catastrophe à plusieurs temporalités. Nous pourrons ainsi apprécier non seulement la valeur ajoutée de ces relevés par drone mais également leurs limites dans le champ des missions scientifiques post-désastre.

Drones et catastrophes naturelles

L'évaluation des dommages par drone après un cyclone a déjà été expérimentée à plusieurs occasions, par exemple aux Philippines après le typhon Haiyan de 2013 (SFMA, 2016), au Vanuatu après le cyclone Pam de 2015 (Meier et Soesilo, 2015 ; Rey *et al.*, 2017), à la Dominique après l'ouragan Maria de 2017 (Shaefer *et al.*, 2020), ou aux USA après Harvey et Irma (Greenwood *et al.*, 2020). Cela a permis de cartographier les zones sinistrées plus rapidement que toute autre méthode disponible, à des résolutions fines de l'ordre de trois centimètres (Perez & Garcia, 2017), offrant ainsi la possibilité d'effectuer de la reconstruction 3D par photogrammétrie, en alternant les prises de vues verticales et obliques pour obtenir davantage de densité dans le modèle (Yamazaki *et al.*, 2015). Ces traitements ont déjà été utilisés avec succès pour identifier des dommages sur des bâtiments à un niveau détaillé, tant sur les façades que sur les toits (Fernandez Galarreta *et al.*, 2015). Cette vision en trois dimensions et à très haute résolution semble difficilement égalable par des approches aériennes classiques ou satellitaires, si ce n'est par procédé LiDAR aéroporté, approche qui reste cependant relativement coûteuse. La vue des façades est en effet un atout indéniable dans l'évaluation des dégâts causés par la submersion marine, ce type d'aléa n'affectant pas nécessairement les toitures des édifices. Toutefois, en zone urbaine, la prospection aérienne par drone peut être gênée par la concentration des constructions, ce qui peut affecter les prises de vue et dégrader l'état des bâtiments sur les modèles 3D produits (Tatham, 2009). D'autres études montrent la valeur ajoutée des drones, parfois couplés aux techniques photogrammétriques, dans le processus d'évaluation et de gestion des risques (Lucieer *et al.*, 2013 ; Giordan *et al.*, 2015), ou bien encore dans le suivi en temps réel d'un phénomène naturel (Abdelkader *et al.*, 2013). Cette technologie récente semble également bien adaptée au diagnostic des ouvrages à grands linéaires (Liu *et al.*, 2014 ; Miquel *et al.*, 2015). Il devient alors aisé de transposer ces approches à l'évaluation des impacts sur les écosystèmes et les milieux littoraux, notamment par le biais d'une quantification des changements de l'état des plages en réponse aux événements de haute énergie (Papakonstantinou *et al.* 2016 ; Nikolakopoulos *et al.*, 2018 ; Ierodiaconou *et al.*, 2016 ; Rey *et al.*, 2019).

L'ouragan Irma et ses effets

Les îles françaises de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy sont situées dans la zone cyclonique atlantique Nord, 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 et a commencé à frapper les îles des Petites Antilles le 6 septembre 2017. Irma s'est inscrite dans une saison cyclonique 2017 extrêmement active à partir de la fin du mois d'août, marquée par une succession de quatre ouragans : Harvey, classé au niveau 4 sur l'échelle Simpson-Saffir, puis Irma (cat. 5), José (cat. 4) et Maria (cat. 5). Ces trois derniers 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 de cette

2 L'énergie cumulative des cyclones tropicaux (en anglais *Accumulated cyclone energy* ou ACE) est la quantité d'énergie globale d'un ou de plusieurs cyclones, estimée à partir de la vitesse maximale des vents pour chaque période de six heures.

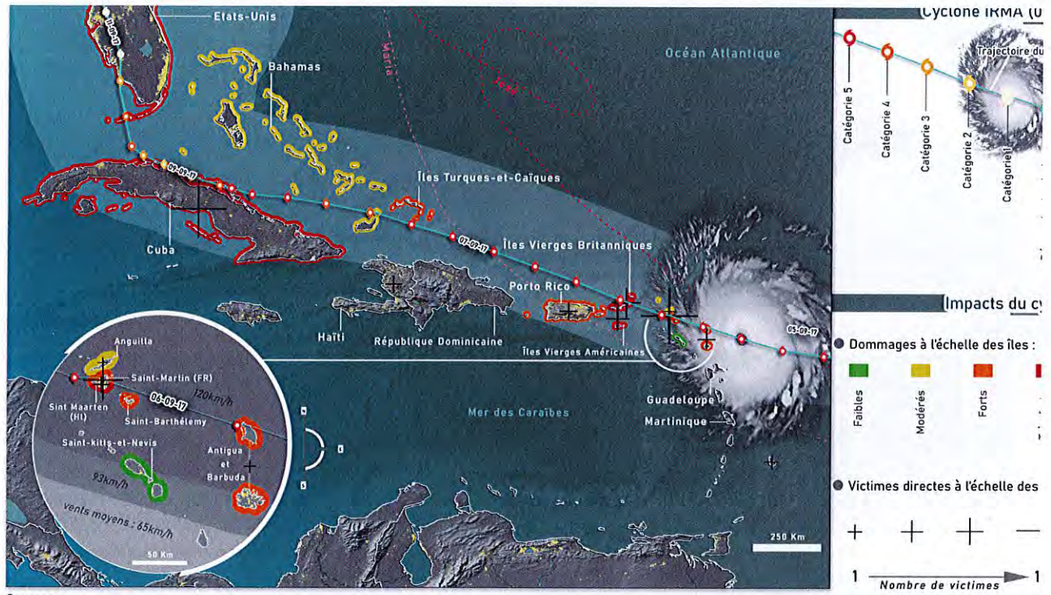


Figure 1 : Trajectoire de l'ouragan Irma et impacts associés

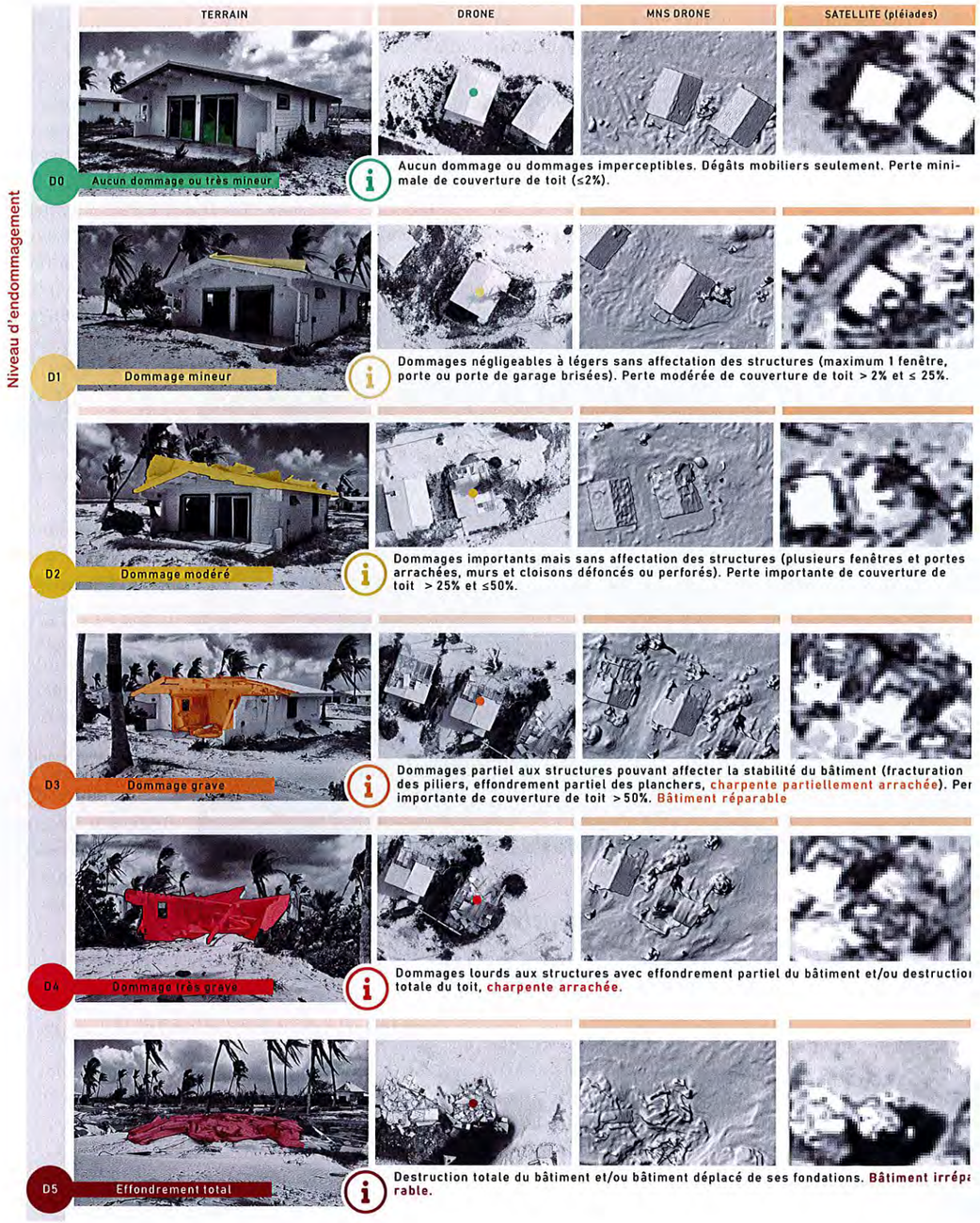


Figure 2 : Echelle d'intensité des dommages cycloniques (vent et submersion marine) et critères d'identification associés (drone vs satellite)

région (indice ACE de 66.6), juste derrière l'ouragan Ivan en 2004 (ACE de 70.4).

À Saint-Martin, les vents moyens d'Irma ont soufflé à plus de 290-295 km/h et une rafale a été enregistrée à 317 km/h (source Météo France). À l'approche du rivage, les vagues ont gonflé et déferlé avec violence. A partir des données du marégraphe de Marigot, on a pu estimer la surcote marine associée aux environs de 2,8 m. Vents et vagues ont causé des dommages considérables aux habitations, automobiles, infrastructures publiques et réseaux électriques ou téléphoniques. Les rapports officiels ont fait état de 95 % du bâti endommagé sur Saint-Martin, dont plusieurs bâtiments publics (Gustin, 2017). Le coût total des dommages assurés a été estimé à 1,17 milliards d'euros pour Saint-Martin et 823 millions pour Saint-Barthélemy. Les données transmises par le programme satellitaire européen de cartographie rapide des dommages Copernicus (2018), montrent que 40 % des bâtiments des deux territoires ont subi des dommages significatifs (STM : 54 % ; STB : 16 %). Les dommages les plus graves ont quant à eux concerné 21 % des bâtiments des territoires en question. Onze personnes y ont perdu la vie, plus quatre dans la partie néerlandaise (Sint Maarten).

Méthodes déployées

Les relevés par drone ont été réalisés au cours de quatre missions successives, espacées chacune d'environ 6 mois, avec pour objectif ultime de suivre le processus de reconstruction territoriale. La première mission s'est déroulée fin octobre 2017, soit moins de deux mois après le passage d'Irma. Après obtention des autorisations légales auprès de la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) et de la Préfecture des îles du Nord, le matériel a pu être déployé sur zone. Afin de limiter les encombrements logistiques dus au transport et les nuisances liées aux survols répétés des secteurs sinistrés, le choix du matériel s'est porté sur un multirotors quadricoptère de marque DJI (modèle Phantom 4 Pro avec capteur optique de 20 mégapixels) télépiloté par un membre agréé de notre équipe (UMR GRED). Un choix qui peut s'apparenter à une solution « *low cost* » (Shaefer *et al.*, 2020). Certaines dérogations (survol de zones habitées) et protocoles spécifiques d'approche (à proximité de l'aéroport de Grand-Case à STM), ont pu être établis pour mener à bien ces missions à caractère scientifique. Les temps de vol n'ont jamais excédé les 20 minutes, à une hauteur d'environ 80 m, selon des plans de vols en mode « Double Grid » programmés grâce à l'application « Pix4Dcapture ». Ainsi et à titre d'exemple, une zone de 44 ha a pu être couverte en 1h de temps de vol lors des 4 vols successifs, ce qui représente un temps total passé sur le terrain de 2h10. Ce type de vol a permis de collecter automatiquement 941 images aériennes obliques et géoréférencées avec 60 % de recouvrement longitudinal et 60 % de recouvrement latéral. La résolution spatiale au sol des images a été de 2,45 cm. Ce type de recouvrement combiné à la haute résolution des images a ensuite permis de produire des reconstitutions 3D par corrélation d'images (technique photogrammétrique) avec pour produits des modèles numériques de surface (MNS) et des orthophotographies mosaïquées. Ces post-traitements ont été réalisés à l'aide du logiciel « Pix4D » sur station de travail mobile. Le gain en résolution finale des images par drone est très appréciable, comparé à la résolution des images aériennes fournies par l'IGN ou des vues capturées par les satellites Pléiades deux jours après la catastrophe. La figure 2 introduit une échelle locale d'intensité cyclonique permettant d'apprécier ce comparatif orthophotographique et ses produits dérivés (MNS) pour l'analyse des différents niveaux de dommages sur le bâti. Sur l'île de Saint-Barthélemy, quelques images drones complémentaires, acquises avec le même type d'appareil, nous ont été gracieusement mises à disposition par la Collectivité.

Principaux résultats

Dispersion des débris cycloniques

Intensité des dommages au bâti : drone *vs* satellite

Les drones montrent toutes leurs potentialités lors de la spatialisation des dommages au bâti. Ainsi, et sur la base d'une typologie des dommages aux bâtiments associant les effets du vent et de la mer (fig. 2 ; Rey *et al.*, 2019), nous avons pu cartographier sur trois secteurs témoins, les intensités des dommages, afin de les comparer aux estimations fournies par les opérateurs satellitaires au lendemain de la catastrophe (Copernicus, 2017 ; SERTIT, 2017). Notre typologie des dommages a été ramenée à 4 classes après regroupement des classes D0/D1 (équivalent ND) et D3/D4 (équivalent HD). Ce regroupement a été nécessaire car les autres opérateurs ne définissent que 4 classes de dommages.

Considérant le volume total de bâtiments évalués par chaque opérateur (fig. 4), Copernicus évalue beaucoup plus de bâtiments endommagés que le SERTIT, en particulier dans les classes de dommages faibles (ND : « *Negligible to slight damage* » et MD : « *Moderately Damaged* »). Comparée à la « réalité terrain » apportée par les drones, cette surestimation est de +36 % pour Copernicus et de +12 % pour le SERTIT. Ces incertitudes spatiales (problèmes de localisation) et attributaires (niveau de dommage), augmentent artificiellement le volume global des dommages et donc l'estimation des coûts associés relayée par les autorités et les médias.

On peut affiner cette analyse en s'intéressant seulement à la fiabilité attributaire des diagnostics de dommages. Pour cela nous avons dû retenir uniquement les bâtiments communs aux 3 opérateurs. En considérant une marge de tolérance de deux niveaux de dommages (afin de prendre en compte les regroupements de classes décrits plus haut), il apparaît également des écarts significatifs de diagnostic entre l'approche par drone & terrain (GRED) et celle des opérateurs satellitaires. Sur l'ensemble de l'échantillon (514 bâtiments), le SERTIT sous-estime à hauteur de -43 % du bâti la classe ND (*Negligible to slight damage*), tandis qu'il surestime respectivement de +18 %, +5 % et +45 % les classes MD (*Moderately Damaged*), HD (*Highly Damaged*) et CD (*Completely Destroyed*). Dans une moindre mesure ces erreurs de diagnostic se retrouvent auprès de Copernicus qui tend plutôt à sous-estimer certaines classes de dommages (ND : - 7 % ; HD : -18 % ; CD : + 2,5 %), mais qui surestime au contraire les dommages de classe MD de +21 %.

La sous-estimation systématique de la classe de très faible dommage (ND) par les opérateurs satellitaires peut s'expliquer par l'impossibilité de voir depuis le ciel les dommages légers, qu'ils soient dus au vent ou à la mer. La surestimation des dommages modérés (MD) par les deux opérateurs peut s'expliquer quant à elle par l'absence de critères de diagnostic des dommages explicites et probablement la tendance excessive à classer en dommage modéré tout ce qui n'est pas vraiment visible sur les images satellites. Enfin, la surestimation par le SERTIT des bâtiments totalement détruits de classe CD (+45 %) est liée au fait que ce service a souvent confondu des toits plats (dalles de béton) ou des bâtiments en construction avec des bâtiments endommagés par le vent cyclonique. Ce niveau maximal de dommage est pourtant bien identifié par Copernicus (+ 2,5 %). Le secteur de Grand-Case (Saint-Martin) est assez représentatif de ces écarts de diagnostic, avec des dommages légers provoqués par la houle cyclonique qui sont globalement mal appréciés par les opérateurs satellitaires sur le front de mer (fig. 5).

Estimation des volumes de débris par photogrammétrie

En parallèle des analyses de dispersions et de dommages, les traitements photogrammétriques des images drones ont permis de préciser les volumes de débris produits par Irma, afin d'en faire un indicateur de catastrophe (Vinet *et al.*, 2020). Le débris post-cyclonique est incontestablement un marqueur de la vulnérabilité d'un territoire face aux cyclones. Aussi, la collecte et le traitement des débris post-catastrophe fait l'objet de plus en plus d'attention de la part des associations, des collectivités territoriales et des scientifiques. Pourtant, on manque cruellement de données précises sur les débris post-cycloniques, leur composition, leur volume et leur tonnage.

Le volume des tas de débris évolue rapidement au cours des semaines après le passage d'un cyclone en fonction des chantiers de déblaiement et des moyens matériels d'apport et d'évacuation vers le site principal. Les dépôts temporaires sont parfois évacués à plusieurs reprises sur des périodes rapprochées, ce qui n'est pas forcément visible sur les images satellites. Les drones aériens permettent justement la prise de vues des dépôts temporaires en tenant compte de ces contraintes temporelles. Les surfaces des sites de stockage sont suffisamment réduites pour permettre des vols au moyen de drones à voilure tournante, ceux privilégiés sur les espaces fréquentés. Les prises de vues obliques et verticales des dépôts parfois difficiles d'accès, permettent des reconstitutions 3D par photogrammétrie ainsi qu'une identification des types de matériaux déposés. Le calcul des volumes nécessite néanmoins d'être vigilant (1) sur l'estimation du plan de surface de base et (2) sur la présence éventuelle d'éléments déjà en place (végétation, bâtiment, conteneur, etc.) qui peuvent surestimer les calculs. Le tableau de la figure 6 montre que les valeurs peuvent varier quasiment du simple au double.

Les différents tas de déchets encore visibles lors de notre première mission ont pu ainsi être cubés. Après l'analyse des types de déchets et recoupements avec les statistiques fournies par le centre de traitement unique de Saint-Martin (écosite), ces volumes ont pu être convertis en poids et extrapolés à l'ensemble de la partie française de l'île. La densité a été estimée à 0,2 tonne/m^3 pour les encombrants et 0,1 tonne/m^3 pour les tôles. Il en ressort qu'Irma a généré un tonnage de débris que l'on peut évaluer à 60 000 tonnes, soit près de 1,7 tonne par habitant, pour un volume global de 300 000 m^3 non compactés. Malgré leur volume impressionnant, les quantités de débris récoltés par habitant sont plutôt dans la gamme inférieure des volumes généralement traités lors des cyclones de même catégorie. En l'occurrence il semble que la quantité de déchets verts ait été minorée par l'indigence de la végétation arborée et l'absence de collecte systématique des gravats.

Le site d'étude pris en exemple (fig. 6) permet d'illustrer l'estimation du volume de débris pour un type de bâti spécifique (copropriété avec des constructions à l'identique) et un niveau de dommage homogène (D2/D3). Au cours des prochains retours d'expériences, la multiplication de démarches analogues à celle-ci permettra de définir des volumes théoriques pour d'autres niveaux d'endommagement. On peut ainsi arriver à terme à la construction d'un modèle de production po-

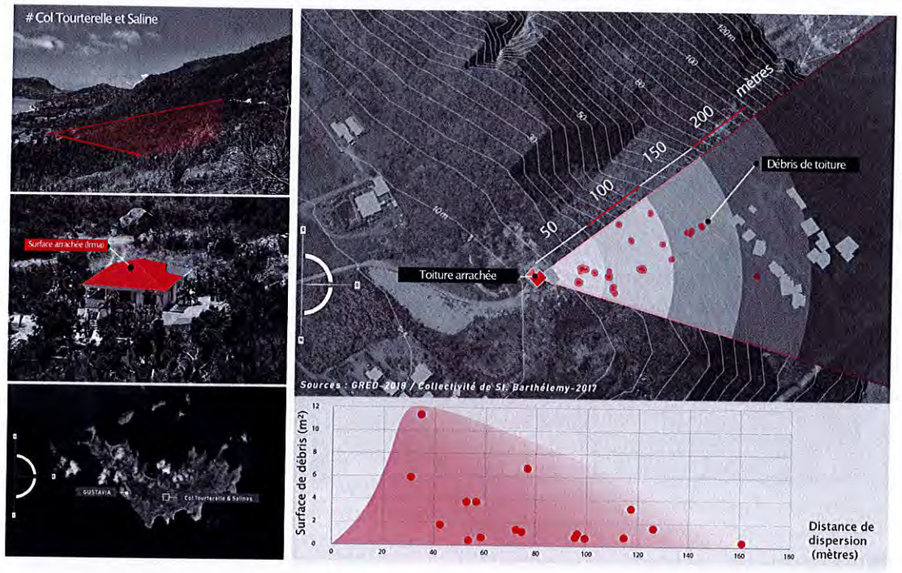


Figure 3 : Analyse de la dispersion de débris de toitures au moyen d'un drone (Saint-Barthélemy)

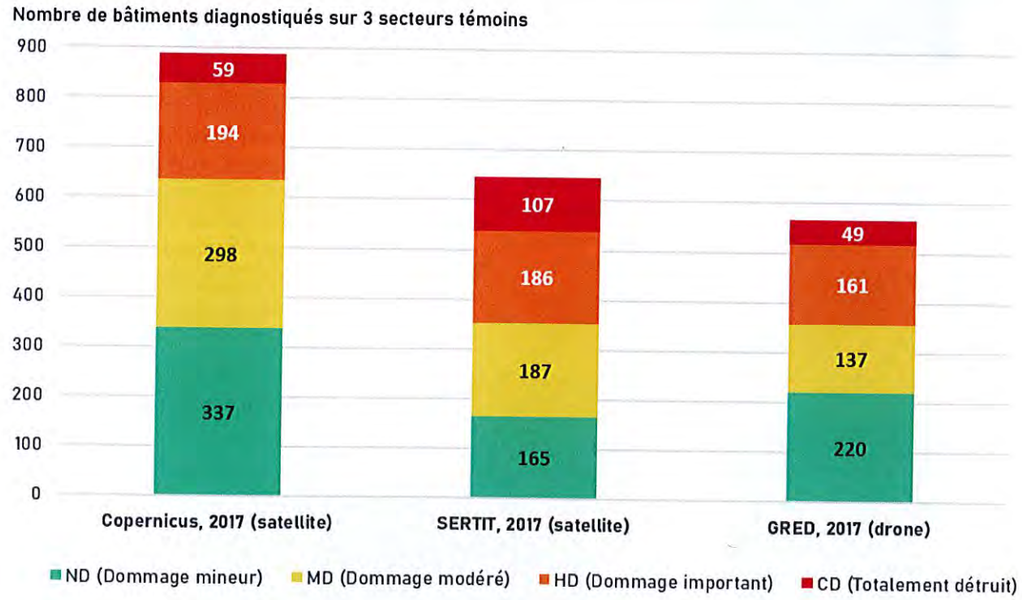


Figure 4 : Bilan comparatif des volumes de dommages sur le bâti suivant trois sources de données (satellitaires pour Copernicus et SERTIT, drone pour GRED) (Saint-Martin)

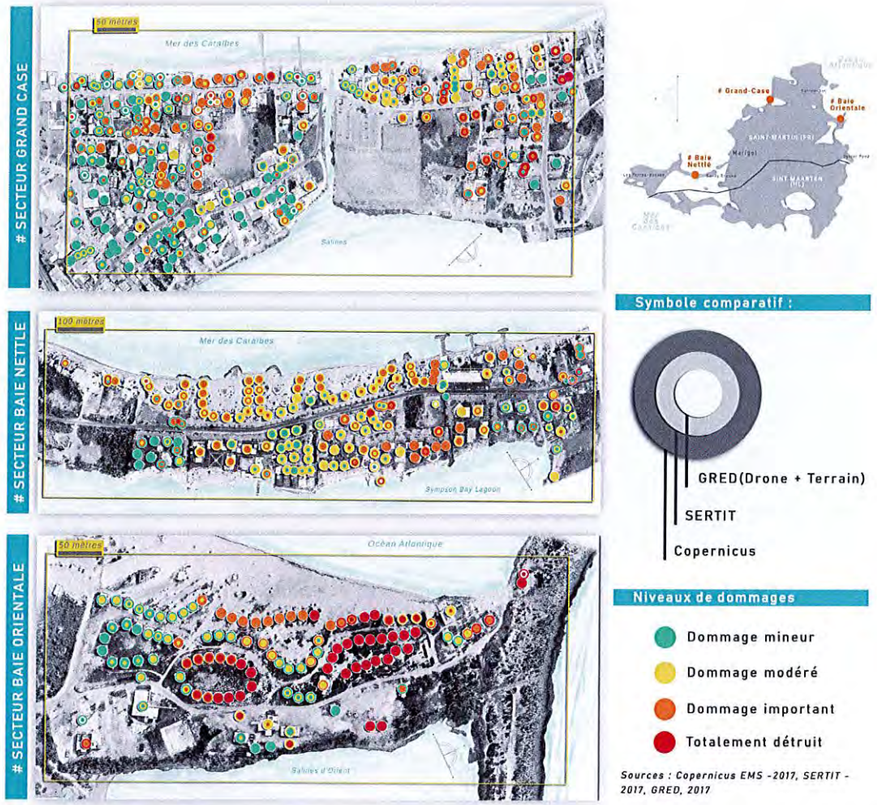


Figure 5 : Comparaison des trois sources de diagnostics de dommages (satellitaires pour Copernicus et SERTIT, drone et terrain pour GRED) (Saint-Martin)

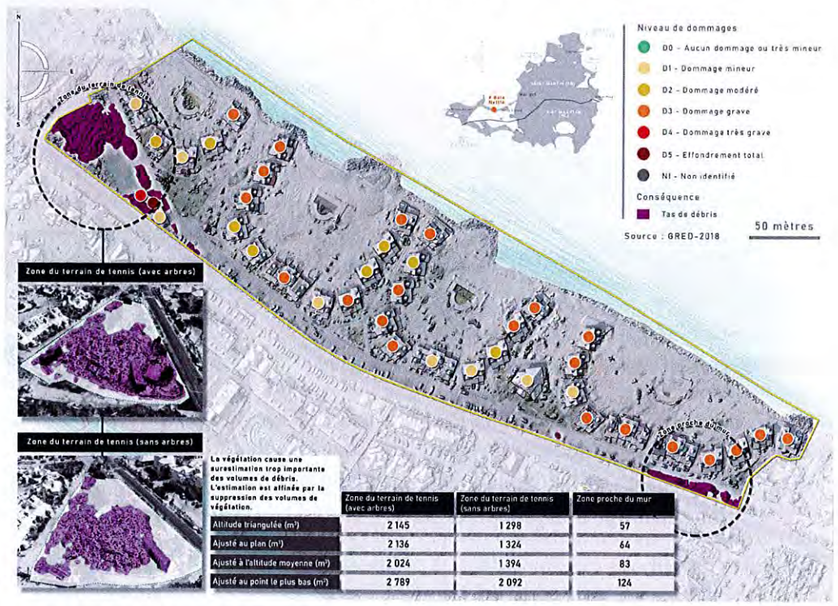


Figure 6 : Exemples de cubage de débris cycloniques à partir de traitements photogrammétriques d'images acquises par drone (Saint-Martin)

tentielle de débris cycloniques prenant en compte une grande diversité de bâtiments et d'intensités de dommages sur un territoire frappé par un cyclone de puissance donnée.

Suivi de la reconstruction

En complément des techniques habituelles de photo-interprétation, les MNS et reconstitutions 3D facilitent le suivi temporel et spatial du processus de reconstruction en permettant des calculs de différentiels altimétriques multi-dates des images drone (fig. 7). Tout comme pour l'analyse des dommages sur le bâti, un des objectifs est ici d'apprécier ce suivi depuis le terrain (par drone) et de le comparer au suivi satellitaire assuré par Copernicus (2018) dans le cadre de sa charte « *EMS Risk and Recovery Mapping* » (Dorati *et al.*, 2018). Ce travail d'analyse critique est toujours en cours et devrait révéler quelques surprises quant à la fiabilité des données fournies par ce service, destinées au Gouvernement français. Cette dynamique de reconstruction mérite d'être suivie afin d'en comprendre les modalités, leviers, difficultés et logiques spatiales en couplant observations aériennes et enquêtes de terrain. L'enjeu premier est ici d'observer dans quelle mesure ces reconstructions vont ou non prendre en compte les recommandations de l'Etat en matière de normes de constructions para-cycloniques (CSTB, 2018) et d'occupation du littoral suite à la révision du Plan de Prévention des Risques naturels (PPRn) de Saint-Martin. A la date de juillet 2019, soit 22 mois après Irma, 40 % du bâti fortement endommagé de Saint-Barthélemy étaient totalement reconstruits, contre 22 % seulement à Saint-Martin. L'effort de reconstruction a par ailleurs été plus rapide à Saint-Barthélemy avec 19 % de ce bâti reconstruit (contre 11,5 % à Saint-Martin) en mars 2018, soit sept mois après le passage d'Irma (Defossez *et al.*).

Impacts géomorphologiques

L'usage des drones a également facilité l'analyse des impacts géomorphologiques sur les morpho-systèmes littoraux des deux îles (Rey *et al.*, 2017 ; Rey *et al.*, 2020). Le site de Baie Orientale à Saint-Martin permet par exemple d'illustrer cette démarche qui conjugue une approche intensive *in situ* et une approche extensive s'appuyant sur la photo-interprétation de photographies aériennes et d'images haute résolution acquises par drone (fig. 8).

Les vagues générées par l'ouragan Irma, poussées sur le rivage par les vents violents, ont provoqué une série de changements côtiers. Ils alternent entre des formes d'ablation, notamment des falaises d'érosion identifiées sur le haut de plage, et des formes d'accumulation typiques des événements tempétueux tels que la formation de « *washover fan* » par surverse et rupture de cordons dunaires, la formation d'une berme sableuse et de petites dunes. Les investigations sur le terrain et par drone ont également permis de localiser des blocs transportés par les vagues cycloniques. Leurs caractéristiques morphométriques (taille, poids, densité), corrélées à la distance au rivage, ont permis d'apprécier l'énergie relative et la hauteur des vagues, estimées à près de huit mètres sur les côtes rocheuses. La qualité des images a également permis de relever les cocotiers couchés et orientés par la houle entrante et sortante, et d'en faire des marqueurs de pénétration des flux utiles pour calibrer des modèles de submersion marine (travail en cours). L'enquête de terrain a aussi révélé que les espèces endémiques (palétuviers, raisiniers) ont bien mieux résisté aux effets du vent et des vagues que les espèces importées, notamment les cocotiers qui se sont retrouvés déracinés et décapités.

La localisation des laisses de crue par drone a permis d'estimer la surcote cyclonique et les hauteurs maximales des vagues, respectivement de 3 m et de 5 m sur les côtes basses. Ces mêmes traces ont permis de délimiter la ligne maximale du jet de rive. Ces observations expliquent en partie les dégâts sur les habitations construites sur les plages de Baie Orientale ou de Baie Nettlé, lesquelles ont subi de plein fouet le choc mécanique des vagues, les projections en tout genre et l'inondation marine. Les ouvrages de protection côtière ont également été endommagés par les vagues et n'ont eu aucun effet amortisseur sur leur énergie, pire, ils ont aggravé les dégâts sur les habitations situées à proximité. Par contre, on peut voir sur la figure 8 le rôle filtrant et amortisseur de houle joué par une mangrove encore en état, mais menacée par l'anthropisation massive de ce littoral.

Les observations de terrain ont été complétées grâce aux images satellitaires Pléiades fournies régulièrement après le passage de l'ouragan. La cartographie du trait de côte, numérisée au 1 : 600, met en évidence un recul du rivage quasi généralisé. La forte urbanisation du littoral saint-martinois a limité la capacité d'ajustement du système côtier aux forçages cycloniques. Enfin, les images acquises par drone ont permis de visualiser l'étendue des inondations, par reconnaissance des laisses de mer, peu contrariées ici par la topographie de cette côte à lido. Ces informations sont d'une grande utilité pour la révision (toujours en cours), du Plan de Prévention des Risques naturels de Saint-Martin, dont l'objectif premier est de réglementer l'urbanisation future sur la frange littorale.

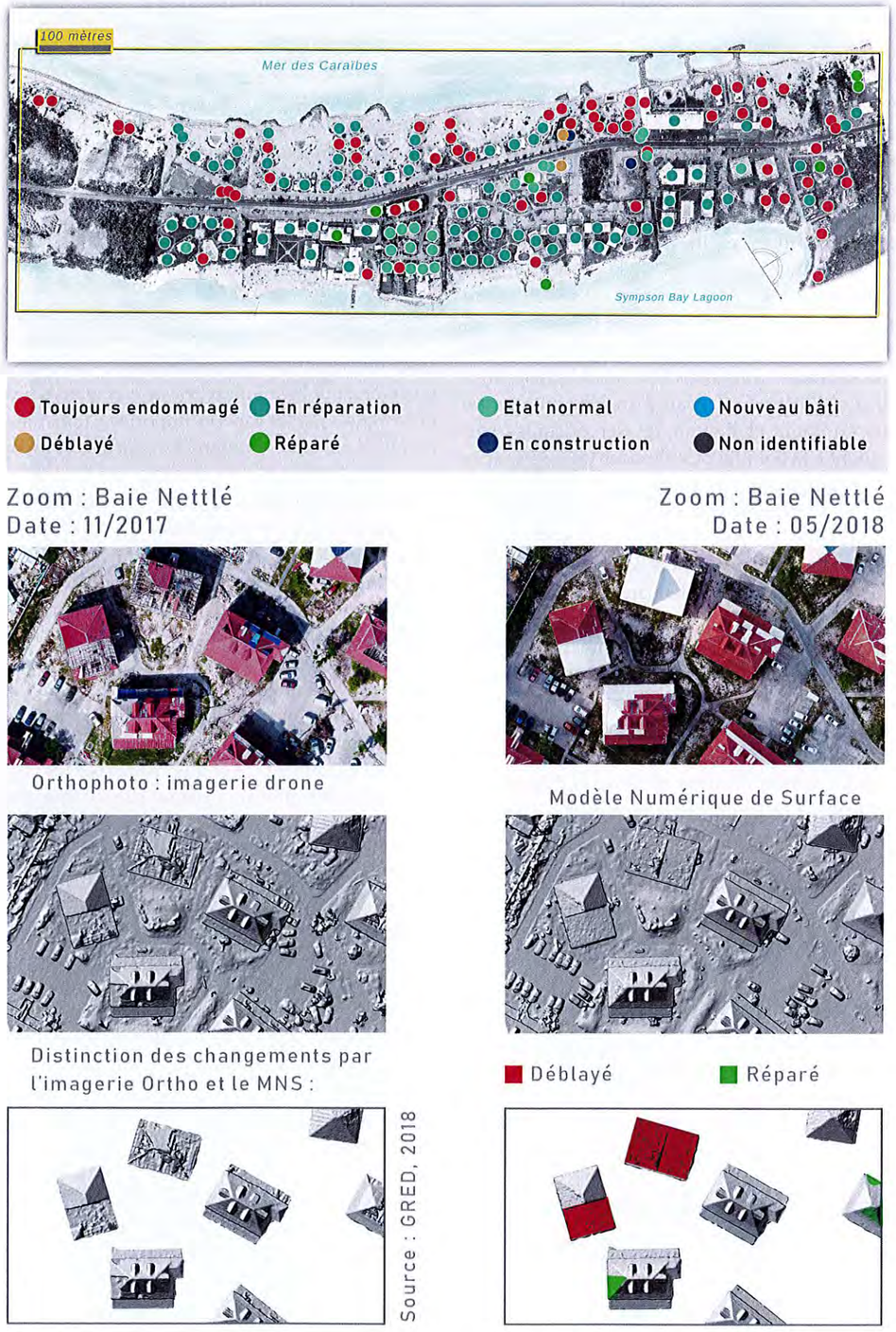


Figure 7 : Exemples de traitements altimétriques différentiels acquis par drone permettant de visualiser deux modalités de reconstruction du bâti (Saint-Martin)
Cliché BnF/DIP n°11 (détail)

Conclusion

Les drones permettent de recueillir des données empiriques de haute résolution et à très bonne continuité spatiale qui viennent considérablement enrichir les analyses post-désastres. Nous avons pu voir à travers cet exemple de catastrophe cyclonique que les applications permises sont multiples. Elles illustrent plusieurs aspects des retours d'expérience scientifiques à visée opérationnelle : reconstitution des phénomènes et de leurs impacts physiques, approche critique des données distantes apportées par d'autres opérateurs (notamment satellitaires), apports de données pour calibrer des modèles de simulation d'aléas et d'endommagement, contribution à l'amélioration des mesures de prévention normatives et réglementaires face aux risques, suivi du processus de reconstruction, etc.

Dans le domaine de la recherche scientifique appliquée à la gestion des risques, ce champ d'application s'élargit au gré des progrès technologiques apportés aux vecteurs aériens et à leurs charges utiles (Aprville *et al.*, 2017). L'autonomie des drones aériens est désormais plus grande, leur manipulation est plus accessible et le coût du matériel a globalement diminué. Les capteurs se sont diversifiés, spécialisés et miniaturisés. Ici, notre usage du drone s'est limité à du matériel grand public semi professionnel équipé d'un capteur optique dans le spectre du visible. Ce choix était motivé par la volonté d'expérimenter des protocoles et des produits accessibles et reproductibles par le plus grand nombre (photogrammétrie, photo-interprétation d'images à haute résolution, calculs volumétriques). Des expérimentations plus poussées sont néanmoins nécessaires pour extraire avec fiabilité et rapidité les caractéristiques des dommages ou du processus de reconstruction à l'aide de modèles 3D. L'usage de technologies plus performantes comme celles du LiDAR embarqué ou encore du positionnement au moyen de récepteurs GNSS/RTK devrait aboutir à une meilleure précision des reconstitutions 3D des territoires impactés (Fazeli *et al.*, 2016 ; Lin *et al.*, 2019 ; Tadia *et al.*, 2019). Des approches de classification et d'extraction d'informations, en zones urbanisées notamment, sont encore en cours de développement pour automatiser certains processus cartographiques habituellement chronophages (Khoshelham et Oude Elberink, 2012 ; Sui *et al.*, 2014 ; Jutzi *et al.*, 2014).

Globalement, et comme le montre par exemple l'analyse des impacts géomorphologiques, les images prises au moyen des drones s'insèrent dans une chaîne d'acquisition et d'analyse d'informations spatiales multi-résolutions, depuis les observations terrestres jusqu'à la photo-interprétation d'images satellites. Mais cette complémentarité du drone, pour des échelles d'analyse intermédiaires, nous apparaît indissociable des relevés de terrain. Quoi qu'il en soit, le faible encombrement et la grande capacité de manœuvre des drones en font actuellement la meilleure solution pour collecter des informations géographiques dans un environnement hostile ou inaccessible à d'autres méthodes de cartographie, tout en offrant des données comportant une meilleure résolution spatiale (Turner *et al.*, 2013).

Mais les aéronefs télépilotés présentent encore des inconvénients, comparativement aux moyens aériens classiques. Il s'agit en particulier de leurs faibles autonomie de vol et capacité de charge. Par ailleurs, les surfaces observables aux résolutions centimétriques, souvent en temps limité, demeurent réduites. Bien que certains drones aériens à voilure fixe atteignent une autonomie importante de plusieurs heures, c'est la réglementation de leur usage et leur intégration dans l'espace aérien qui posent alors problème (Biscay *et al.*, 2018). Ceci est d'autant plus prégnant que nos utilisations s'insèrent dans un contexte post-crise, période propice aux encombrements aériens et à la multiplicité des interventions par différentes catégories d'acteurs. Enfin, et même en présence de toutes les autorisations nécessaires, se pose aussi une question d'éthique en pareilles circonstances (Gaillard et Peek, 2019). C'est celle du survol à très basse altitude de populations très éprouvées, souvent démunies, et pas toujours disposées à subir une inspection aussi intrusive de leurs biens. Cet aspect est loin d'être négligeable et doit être discuté avant toute mission, au risque de devenir finalement le seul obstacle réel à ce type d'investigation.

Les protocoles de vol et d'évaluation des impacts testés par notre équipe peuvent inspirer de futures évaluations post-désastre. Les enseignements tirés contribuent à repenser la prévention sur ce territoire, tant d'un point de vue de son aménagement (repositionnement des enjeux) que des normes de protection à instaurer dans le cadre d'une politique de reconstruction adaptée aux risques cycloniques en contexte micro-insulaire.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Préfecture et les Collectivités de Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Cette recherche a été financée par l'AAP ANR OURAGANS 2017/ CATASTROPHE, RISQUE ET RESILIENCE, projet TIREX, pour « Transfert des apprentIssages de Retours d'EXpériences scientifiques pour le renforcement des capacités de

réponse et d'adaptation individuelles et collectives dans un contexte de changement climatique (Petites Antilles du Nord - saison cyclonique 2017) ». 2018-2022 : https://anr.fr/Projet-ANR-18-OURA-0002

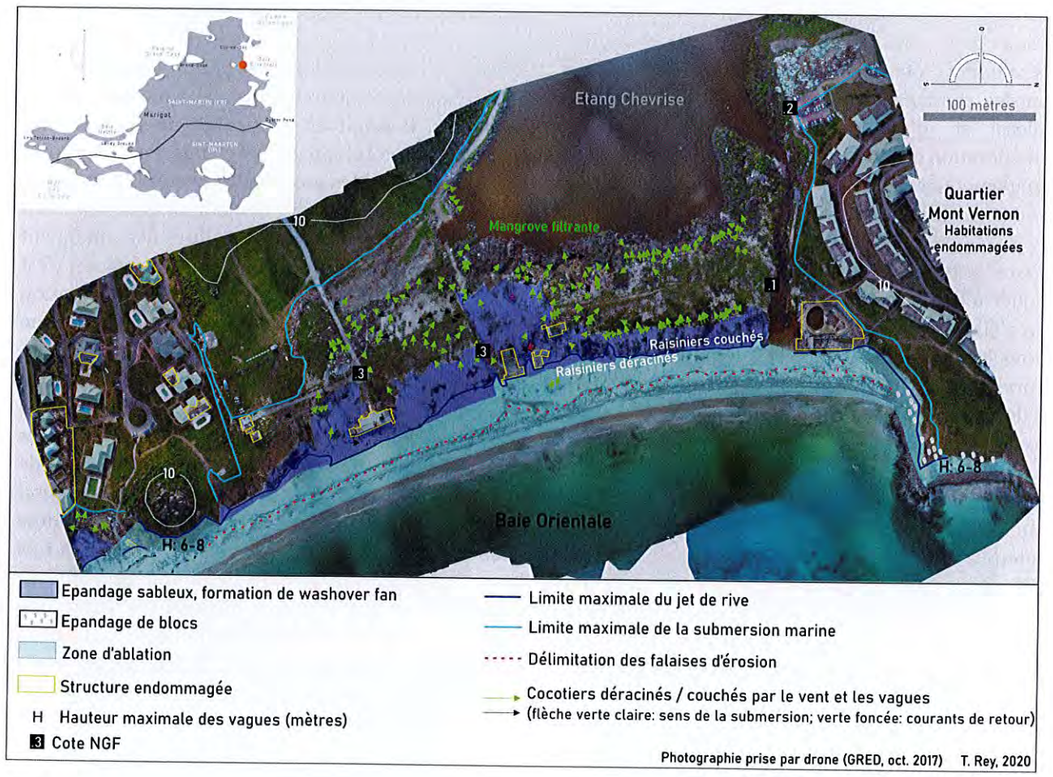


Figure 8 : Exemple de relevés géomorphologiques facilités par la haute résolution spatiale des images acquises par drone (Baie Orientale, Saint-Martin)

Bibliographie

Abdelkader M., Shaqura M., Claudel C.G., Gueaieb W., (2013). *« A UAV based system for real time flash flood monitoring in desert environments using Lagrangian microsensors ». Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta*, USA, 9 p.

Adams S. M., & Friedland C. J., (2011). « *A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management ». 9th international workshop on remote sensing for disaster response,* vol. 8.

Apvrille L., Tanzi T., Roudier Y., Dugelay J.L., (2017). « Drone humanitaire : état de l'art et réflexions ». *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 213-214, 63-71.

Biscay J.F., Natur G., Barriau D., *et al.*., (2018). « Drone et risque inondation, recommandations issues d'une expérience de terrain », 77 p., http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/recommandations-issues-d-une-experience-terrain-a11216.html

Cécé R., Bernard D., Krien Y., *et al.* (2020). « A 30-m scale modeling of extreme gusts during Hurricane Irma (2017) landfall on very small mountainous islands in the Lesser Antilles ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, https://doi.org/10.5194/nhess-2020-241

Chowdhury S., Emelogu A., Marufuzzaman M., *et al.*., (2017). « Drones for disaster response and relief operations: A continuous approximation model ». *International Journal of Production Economics*, 188, 167-184.

Copernicus, (2017). *Mapping activation EMSR232, Grand Case & Marigot: Grading Map*. Published 2017-09-21, product version: v2, quality approved. 2017. Available online: https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR232

Copernicus, (2018). *EMSN049: Reconstruction monitoring of St. Martin and St. Barthélemy islands (post IRMA).* Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises, activated on behalf of the Ministère des Outre-mer, Délégation interministérielle. Available online: https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSN049

CSTB, (2018). *Guide de bonnes pratiques pour la construction et la réhabilitation de l'habitat*. 166 p. http://www.saint-barth-saint-martin.gouv.fr/Actualites/LA-UNE/Actualites/Guide-de-bonnes-pratiques-pour-la-construction-et-la-rehabilitation-de-l-habitat

Defossez S., Rey T., Leone F., *et al.*, (accepté). *« Capacités de relèvement d'un territoire insulaire français face à un cyclone extrême. Retour d'expérience sur le cyclone Irma à Saint-Barthélemy ». Cahiers d'Outre-mer.*

Dorati C., Kucera J., Marí i Rivero I., Wania, A. (2018). « Product User Manual of Copernicus EMS Rapid Mapping ». *JRC Technical Report* JRC111889. https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/product-user-manual-cems-rapid-mapping

Fazeli H., Samadzadegan F., Dadrasjavan F., (2016). « Evaluating the potential of RTK-UAV for automatic point cloud generation in 3D rapid mapping ». *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41*, pp. 221-226.

Fernandez Galarreta J., Kerle N., Gerke M., (2015). « UAV based urban structural damage assessment using object based image analysis and semantic reasoning ». *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1087–1101, 16 p.

Gaillard J. C., Peek L., (2019). « Disaster-zone research needs a code of conduct ». *Nature*, 575, 440-442, doi: 10.1038/d41586-019-03534-z

Giordan D., Manconi A., Facello A., *et al.*, (2015). « The use of an unmanned aerial vehicle in a rockfall emergency scenario ». *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 163-169, 6 p.

Greenwood F., Nelson E. L., Greenough P. G., (2020). « Flying into the hurricane: A case study of UAV use in damage assessment during the 2017 hurricanes in Texas and Florida ». *PLoS one*, 15(2), e0227808.

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, 9 novembre 2017, Saint-Martin, https://www.gouvernement.fr/irma-reconstruction-des-iles-de-saint-barthelemy-et-saint-martin.

Hoarau K., Pirard F., Chalonge L., 2020). « Le réchauffement climatique actuel influence-t-il l'activité des ouragans extrêmes de l'Atlantique Nord (1945-2018) ? », *EchoGéo* [En ligne], 51, http://journals.openedition.org/echogeo/19141 ; DOI : https://doi.org/10.4000/echogeo.19141

Ierodiaconou D., Schimel A. C., Kennedy D. M., (2016). « A new perspective of storm bite on sandy beaches using unmanned aerial vehicles ». *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplementary Issues, 60(3), 123-137.

Jutzi B., Weinmann M., Meidow J., (2014). « Weighted data fusion for UAV-borne 3D mapping with camera and line laser scanner ». *International Journal of Image and Data Fusion*, 5(3), 226-243.

Khoshelham K., et Oude Elberink S. J., (2012). « Role of dimensionality reduction in segment-based classification of damaged building roofs in airborne laser scanning data ». Dans *Proceedings of the International Conference on Geographic Object Based Image Analysis, Rio de Janeiro, Brazil*, pp. 7-9.

Lucieer A., de Jong S. M., Turner D., (2013). « Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography ». *Progress in Physical Geography*, 1–20.

Lin Y. C., Cheng Y. T., Zhou T., *et al.*, (2019). « Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments ». *Remote Sensing*, vol. *11*, 2893, 32 p.

Liu P., Chen A. Y., Huang Y. N., *et al.*, (2014). « *A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering* ». *Smart Structures and Systems*, 13(6), 1065-1094.

Meier P., Soesilo D., (2015). « Using Drones for Disaster Damage Assessments in Vanuatu ». *Swiss Foundation for Mine Action (FSD), Technical report*, 5 p.

Miquel T., Sorin J. L., Rimlinger A., *et al.*, (2015). « PROJET DIDRO : Nouveau moyen pour la surveillance des digues et ouvrages assimilés par drones ». Dans *Congrès SHF : « Drones et hydraulique »*, SHF, p. 9.

Nicolas T., Pagney Bénito-Espinal F., Lagahé E., Gobinddass M. L., (2018). « Les catastrophes cycloniques de septembre 2017 dans la Caraïbe insulaire au prisme de la pauvreté et des fragilités sociétales ». *EchoGéo* [En ligne], n° 46. DOI: https://doi.org/10.4000/echogeo.16439.

Nikolakopoulos K. G. & Koukouvelas I. K., (2018). « UAVs for the rapid assessment of the damages in the coastal zone after a storm ». *Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018)* (Vol. 10773, p. 107731S). International Society for Optics and Photonics.

Papakonstantinou A., Topouzelis K., Pavlogeorgatos G., (2016). « Coastline zones identification and 3D coastal mapping using UAV spatial data ». *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(6), 75.

Pérez E., Garcia P., (2017). « Monitoring soil erosion by raster images : from aerial photographs to drone taken pictures ». *European Journal of Geography*, Volume 8, Number 1, 116- 128, 12 p.

Rey T., Le De 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 Issue: 3, doi: 10.1108/DPM-07-2016-0137.

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*. 7(7): 215, https://doi.org/10.3390/jmse7070215

Rey T., Candela T., Péroche M., Leone F., (2020). « Changements côtiers et inondations suite au passage d'un ouragan extrême (Irma, 2017) aux Petites Antilles », *EchoGéo* [En ligne], 51, http://journals.openedition.org/echogeo/18666 ; DOI : https://doi.org/10.4000/echogeo.18666.

Schaefer M., Teeuw R., Day S., *et al.* (2020). « Low-cost UAV surveys of hurricane damage in Dominica: automated processing with co-registration of pre-hurricane imagery for change analysis ». *Natural Hazards*, 1-30.

SERTIT, (2017). *Évaluation des dommages, situation mi-septembre 2017: Saint-Martin*. [Damage Assessing, mid-september 2017 Situation: Saint Martin]. Scale 1:23000.

SFMA, (2016). *Case Study No 9: Using Drone Imagery for real-time information after Typhoon Haiyan in The Philippines*. Geneva: Swiss Foundation for Mine Action, Report No.: 9. https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/9case-study.philippine.searchrescue.3may2016.pdf

Sui H., Tu J., Song Z., *et al.*, (2014). « A novel 3D building damage detection method using multiple overlapping UAV images. » *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *40*(7), pp. 173-179.

Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A., (2019). « Using dji phantom 4 RTK drone for topographic mapping of coastal areas ». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 6 p.

Tatham P., (2009). « An investigation into the suitability of the use of unmanned aerial vehicle systems (UAVS) to support the initial needs assessment process in rapid onset humanitarian disasters ». *International journal of risk assessment and management*, 13(1), 60-78.

Turner D., Lucieer A., Wallace L., (2013). « Direct Georeferencing of Ultrahigh - Resolution UAV Imagery ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, [online : 10.1109/TGRS.2013.2265295].

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.

Yamazaki F., Matsuda T., Denda S., Liu W., (2015). « Construction of 3D models of buildings damaged by earthquakes using UAV aerial images ». *Tenth Pacific Conference Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Pacific*; Australian Earthquake Engineering Society: McKinnon, Australia (pp. 6-8).