

**UNIVERSITÉ DE
FRANCHE-COMTÉ**

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ
CENTRE DE TÉLÉ-ENSEIGNEMENT UNIVERSITAIRE DE BESANÇON

ctu

Tuteur universitaire :

Alexandre Moine

Tuteur professionnel :

Jean-François Faure

**Mémoire de Master en Aménagement et Gouvernance dans les
Pays des Suds**

Octobre 2018

**Analyse des impacts de l'ouragan Mathieu par
télédétection : Zoom sur la végétation et
l'urbain dans le Sud d'Haïti**

François Xavier Lamure Tardieu



Table des matières

Résumé	7
Abstract	8
Remerciements	9
Glossaire	10
Définition	11
Introduction	12
1 Le Grand Sud	15
1.1 Sa Géographie	15
1.1.1 Géologie, relief et climat	16
1.1.2 Occupation du sol	17
1.2 Jérémie	19
2 Les ouragans	21
2.1 Exposition d’Haïti aux ouragans	23
2.1.1 Cas de l’ouragan Mathew	24
3 Suivi post-Matthew et observation de la Terre	25
3.1 Etat des lieux : le Diagnostic Territorial du Grand Sud	25
3.2 Cas du Recovery Observatory : principes et finalités	26

3.3	Rôles et usages de l'observation satellitaire post-cataclysmique	27
3.4	Impacts visibles par la télédétection	28
3.4.1	Urbain	28
3.4.2	Végétation	29
3.4.3	Usages	30
3.5	Méthode d'actualisation du Diagnostic territorial par télédétection	36
3.5.1	Données utilisées	36
3.5.2	Méthodes de classification des images	38
3.5.3	Indices	39
3.5.4	Traitement des données	40
3.5.5	Images Sentinel	40
3.5.6	Images Pléiades	42
3.5.7	Types Spatialisation des impacts identifiés	42
4	Résultats, analyse et discussion	45
4.1	Impacts cartographiés	45
4.1.1	Végétation	45
4.2	Évolution du NDVI temporellement et spatialement	47
4.2.1	Occupation du sol végétale de chaque zone	48
4.2.2	Urbain	51
4.3	Discussions	55
4.4	Pertinence des résultats pour l'actualisation du Diagnostic territorial	59
4.5	Préconisations pour le suivi territorial post-ouragan	59
4.6	Perspectives	60
	Conclusion	62

5 Annexes	64
5.1 images d'origine	64
5.2 Déroulement du stage	64
6 Bibliographie	67

Table des figures

1.1	Le Grand Sud (Lamure Tardieu, 2018)	15
1.2	Le Relief du Grand Sud (CNIGS 2017)	16
1.3	Carte des forêts en Haïti (Lorenzo Orioli 2012)	17
1.4	Occupation du Sol dans le Grand Sud (CNIGS 2017)	18
1.5	La ville de Jérémie et sa structure du bâti (Lamure Tardieu, 2018 adapté de PRRNU, 2017)	20
2.1	Fonctionnement de l'ouragan (Monique Terrier <i>et al.</i> 2017)	22
2.2	Vitesses du vent lors du passage de l'ouragan Matthew (Lamure Tardieu, 2018 adapté de NHC, 2016)	24
3.1	Captation des informations de la télédétection	31
3.2	Spectre électromagnétique	32
3.3	Réflectance de la végétation (Baldrige et al. 2009 ; Kingfield et Beurs (2017))	33
3.4	Réflectance des matériaux de construction du bâti (Baldrige et al. 2009 ; Kingfield et Beurs (2017))	34
3.5	Bandes Spectrales de Sentinel (cesbio, 2018)	37
3.6	Traitement des images Sentinel	41
3.7	Traitement des images Pléiades	42
3.8	Quartiers analysés	43
3.9	Zones d'études de la végétation	44
4.1	Carte du NDVI pour les quatre images Sentinel 2	46

4.2	Boîte à moustaches des indices de NDVI moyen pour l'ensemble des zones	47
4.3	Carte d'occupation de sol par zone (Lamure Tardieu, 2018)	48
4.4	Indices de NDVI après retrait des nuages	49
4.5	Comparaison de l'évolution temporelle du NDVI entre les zones d'études littoral sud et littoral prioritaire	50
4.6	Comparaison de l'évolution temporelle du NDVI entre les zones d'études plaine et littoral prioritaire	50
4.7	Comparaison de l'évolution temporelle du NDVI entre les zones d'études des rivières prioritaire et non prioritaire	51
4.8	Résultat de la classification Kmeans pré et post-ouragan (Lamure Tardieu, 2018)	52
4.9	Comparaison résultat Kmeans post-ouragan et emprise urbaine (Lamure Tardieu, 2018)	53
4.10	Boîte à moustaches pour tous les dégâts	53
4.11	Boîte à moustaches des indices par zone d'habitat	54
4.12	Boîte à moustaches des indices par type de dégât	55
4.13	Centre urbain structuré : dégâts identifiés (Indice de brillance et cuirasse)	55
4.14	Habitat Précaire : dégâts identifiés (Indice de brillance et cuirasse)	56
5.1	Images Pléiades utilisées pour la classification de l'urbain	65
5.2	Images Sentinel pour le suivi de la végétation	65
5.3	Plan de travail de la réalisation de l'étude	66

Résumé

Le 4 octobre 2016, un ouragan de Catégorie 4 a frappé la Presqu'île d'Haïti, touchant cette zone pour la première fois depuis les années 1960. Plus de 500 personnes sont mortes, et de nombreux dégâts sur les infrastructures et la végétation est à déplorer. Le Committee on Earth Observation Satellites, qui promeut l'utilisation des images satellites a mis en place le Recovery Observatory, afin de suivre la reconstruction. Cette étude se focalise sur l'usage de la télédétection dans le suivi de la végétation dans la pointe ouest de la Presqu'île et la ville de Jérémie post-ouragan. Des images satellites Sentinel 2 sur quatre dates et Pléiades sur deux dates ont permis d'analyser l'évolution. Il en ressort que la végétation a été bien impactée tout de suite après l'ouragan mais que la reprise a été effective, avec l'utilisation de l'indice NDVI comme mesure. Dans la ville de Jérémie, l'utilisation d'indices de brillance et de cuirasse n'a pas permis d'identifier correctement les dégâts.

Mots - clés : télédétection, détection de changement, reconstruction, ouragan, végétation, urbain, Matthew

Abstract

On October 4, 2016, a Category 4 hurricane went on the Haitian Peninsula More than 500 people have died, and impacts are very important in the infrastructure and the vegetation. CEOS, an association of space agencies, promotes the use of satellite images and the recovery observatory to monitor recovery. This study is focused on the use of remote sensing in the post-hurricane monitoring of the west of the peninsula and the city of Jeremie. Sentinel 2 satellite images used on four dates and Pleiades on two dates allowed to analyze the evolution. It was found that the vegetation was well impacted immediately after the hurricane but that the recovery was effective, with the use of NDVI as a measure. In the city of Jeremie, the use of brilliance and cuirass indices are not allowed to correctly identify the damage.

Keywords : Remote sensing, change detection, hurricane, urban, vegetation, recovery

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu le Centre National d'Études Spatiales (CNES) pour m'avoir proposé ce stage, et notamment Hélène de Boissezon, Agwilh Collet et Frédéric Moll pour leur soutien dans le déroulement du stage.

Merci également aux membres du Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS), Boby Piard et Philémon Mondésir et à Rose-May Guignard du Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire (CIAT), pour leurs conseils et encouragements.

Mes remerciements vont aussi aux chercheurs de l'Unité Mixte de Recherches (UMR) Espace Dev de l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD) et plus particulièrement Jean-François Faure, Nadine Dessay, Thibault Catry, Renaud Marti, Sylvie Laleu et Agnès Clément sans quoi ce stage n'aurait pu se réaliser.

Je n'oublierais pas, M. Moine, mon tuteur universitaire, Professeur à l'Université de Franche-Comté, pour m'avoir encouragé dans la rédaction de mon mémoire.

Je remercie les autres stagiaires de cet été 2018, que je n'oublierais pas même si ma présence a été quelque retardée.

À mes parents, mes frères et sœurs, à Trachide pour leurs encouragements et leurs supports.

À mon oncle, Jean-François, pour son aide même de loin.

Glossaire

Sigle	Terme
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
PNGR	Plan National de Gestion du Risque
PNRU	Plan National de Réponse aux Urgences
SWIR	Short-Wave Infrared
CNIGS	Centre National de l'Information Géo-Spatiale
CIAT	Comité Interministériel à l'Aménagement du Territoire
IRD	Institut de Recherche sur le Développement
CNES	Centre National d'Études Spatiales
SPOT	Satellite pour l'observation de la Terre
DTGS	Diagnostic Territorial du Grand Sud
ESA	European Space Agency
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
OCHA	Office pour la Coordination des Affaires Humanitaires des Nations-Unis

Définition

Terme	Définition
Aléa	phénomène résultant de facteurs ou de processus qui échappent, au moins en partie, au contrôle de l'homme : inondation, cyclone, glissement de terrain, éruption volcanique, séisme, tsunami
Risque	probabilité d'occurrence de dommage compte tenu des interactions entre facteurs d'endommagement (aléas) et facteurs de vulnérabilité (peuplement, répartition des biens)
Vulnérabilité	ex prime le niveau d'effet prévisible de l'aléa sur des enjeux (l'homme et ses activités)
Végétation	C'est un groupement végétal : un ensemble structuré d'espèces végétales
Fauchée	surface d'observation des capteurs d'un satellite

Introduction

En 2018, de nombreuses catastrophes naturelles ont impacté la Terre. À notre époque, il reste toujours aussi difficile de les prévoir même si le développement de la science a permis une meilleure compréhension de ces phénomènes (Hu et Smith 2018). Parmi ces derniers, les évènements climatiques telles que les tempêtes ravagent de nombreuses zones.

L'aléa est un « phénomène qui résulte de facteurs ou de processus, qui échappent en partie au contrôle de l'homme »¹. Les ouragans sont des tempêtes avec des vents supérieurs à 118 km/h (Stanturf *et al.* 2007). Cet aléa ouragan, en présence d'enjeux humains, économiques ou environnementaux devient un risque et un facteur de vulnérabilité pour les populations et l'environnement. La démographie galopante qui se conjugue avec la concentration des activités et des hommes dans les zones côtières, l'urbanisation sauvage, les embouteillages des voies de communication lors des évacuations, la paupérisation de la population, tout concourt à une vulnérabilité accrue des écosystèmes et une augmentation des dommages mortels et économiques lors des catastrophes (Grünewald *et al.* 2010). Les pays en voie de développement en sont souvent les premières victimes. Entre le manque d'infrastructures, les moyens de secours, et le manque de gouvernance, ces pays sont démunis.

La situation géographique des Caraïbes en fait une zone particulièrement sensible au passage de ces ouragans. En plein cœur de cet axe, se situe l'île d'Hispaniola partagée entre la république d'Haïti et la République Dominicaine. Parmi les dix plus grandes catastrophes mortelles naturelles depuis 1915 dans ce pays, sept sont des tempêtes. Au cours des quarante dernières années, Haïti a subi quasiment une tempête par an, ce qui en fait l'état des Caraïbes avec le plus haut taux de désastres par km² (Guha-Sapir 2018).

Les climatologues considèrent que la multiplication et l'intensité des ouragans est susceptible de perdurer pour les quarante prochaines années (Stanturf *et al.* 2007) ; (Cannizzo et Griffen 2018). Les risques peuvent être réduits en identifiant les vulnérabilités et les risques de survenance,

1. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/alea>

mais seul la survenue d'un désastre rend réel la catastrophe. La mise en place de mécanismes liés à la gestion de ces aléas se répand de plus en plus « dans les stratégies étatiques, humanitaires et communautaires, pour des questions de survie mais aussi d'ordre économique, sécuritaire et politique » (Grünwald *et al.* 2010).

En 2016, l'ouragan Matthew a impacté une grande partie du sud du pays, causant des dommages importants sur les zones urbaines et la végétation, faisant plus de 500 morts, 400 blessés et laissant 175 000 personnes sans abris (Anon 2016). Les réseaux d'eau ont été endommagés, les maisons aux toits de tôles ont été balayées par les vents et la pluie, et les champs complètement détruits. Dans ce contexte d'urgence, la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures a été activée pour réaliser des captures d'images satellites et la production de cartes pour évaluer la situation.

Chaque ouragan est unique et apporte avec lui son lot de dommages. L'évaluation des dommages est un processus indispensable dans la phase d'urgence. Urgence de secours des personnes, évaluation des bâtiments pour limiter les risques supplémentaires de destructions ou d'épidémies. La phase de reconstruction urbaine et celle de revégétalisation sont également des enjeux cruciaux. Compte tenu des vulnérabilités et des aléas identifiés, le retour à une vie « normale » se réalise avec plus ou moins de temps et d'étapes en fonction des acteurs. Comme le rappellent les chercheurs (Rathfon *et al.* 2013), « la reconstruction fait partie d'un processus à différentes étapes, qui vont varier en fonction des acteurs.

En ce sens, l'imagerie satellitaire joue un grand rôle, dans sa capacité à être mis à disposition dans des temps très courts et avec une fiabilité qui permet une première estimation des dégâts. La diversité des capteurs (optique et RADAR) actuellement disponibles nécessite des capacités et des ressources indispensables, pour la mise en œuvre pratique de ces outils d'information. L'élaboration de produits cartographiques issus des images satellites doit ainsi se baser sur (1) un cahier des charges précis contenant les spécificités des produits répondant aux besoins des acteurs de la gestion de crise et des autorités locales et (2) des recommandations issues d'experts du milieu de la télédétection, afin de pouvoir servir de support d'aide à la décision pour les pouvoirs publics.

C'est dans ce cadre que le Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) a développé le programme Recovery Observatory, pour promouvoir l'utilisation des images satellites et contribuer au renforcement des capacités des acteurs dans la phase de reconstruction. L'Institut de recherche sur le Développement, et plus particulièrement l'Unité mixte de recherches (UMR) Espace-Dev, m'a accueilli dans leur laboratoire, pour évaluer la végétation et les zones urbaines

du sud d'Haïti après le passage de l'ouragan Matthew.

L'objectif de ce mémoire est donc de proposer des méthodologies de suivi cartographique de la phase post-crise liée au passage du cyclone Matthew via (1) la production d'indicateurs de la reconstruction de la ville de Jérémie à partir d'imagerie satellitaire très haute résolution (Pléiades) et (2) la cartographie des impacts du cyclone sur la végétation du sud à partir d'imagerie haute résolution Sentinel 2. Pour cela, une étude de caractérisation des dommages causés par l'ouragan à l'urbain et à la végétation et identifiables par télédétection, puis une comparaison des images Sentinel 2 et Pléiades pré et post cyclone seront menées pour évaluer la reconstruction et la reprise de la végétation par l'analyse d'images post-catastrophe. Enfin, des recommandations sur l'utilisation des données d'observations de la Terre et sur les méthodes de traitement pour la production d'indicateurs cartographiques seront établies afin de proposer une approche semi-opérationnelle répondant aux besoins des acteurs locaux de la gestion de crise pour l'aide à la décision.

Chapitre 1

Le Grand Sud

Le Grand Sud, région géographique, fait partie de l'île d'Haïti, ou Hispaniola, qui est située en Amérique centrale forme la deuxième plus grande île de l'arc caribéen. La république d'Haïti occupe un tiers du territoire à l'ouest d'Hispaniola, soit environ 27 000 km².



FIGURE 1.1 – Le Grand Sud (Lamure Tardieu, 2018)

1.1 Sa Géographie

Cette région est constituée de trois départements, la Grand-Anse, le Sud et les Nippes (Figure 1.1). Cet ensemble se situe le long de la Presqu'île entre les bornes géographiques -72,966 et

-74,391 de longitude et 18,123 et 18,692 de latitude. . La Presqu'île porte le nom de péninsule de Tiburon. Les côtes du nord se jettent sur l'Océan Atlantique tandis que le sud est baigné par la mer des Caraïbes. Cette région, avec une superficie de 5933 km², regroupe une population estimée en 2015 à environ 1 585 000 habitants soit 21 % de la superficie et 15 % de la population totale du pays. La région est faiblement urbanisée, soit 22 % (IHSI, 2015).

1.1.1 Géologie, relief et climat

Cette région est parcourue par deux types de roches, les roches magmatiques et les roches sédimentaires. Cette géologie se reflète sur le relief. Le sol, principalement calcaire, pourrait expliquer le plus faible ruissellement d'érosion de surface, la principale activité agricole étant plutôt axée sur « la foresterie et l'agroforesterie qu'à l'agriculture proprement dite » (Anon 2017). Le relief mélange les plaines et bordures littorales d'un côté et des montagnes et des mornes, dont le Pic Macaya, plus haut sommet de la région étudiée qui culmine à 2347 m, à l'intérieur des terres (Figure 1.2).

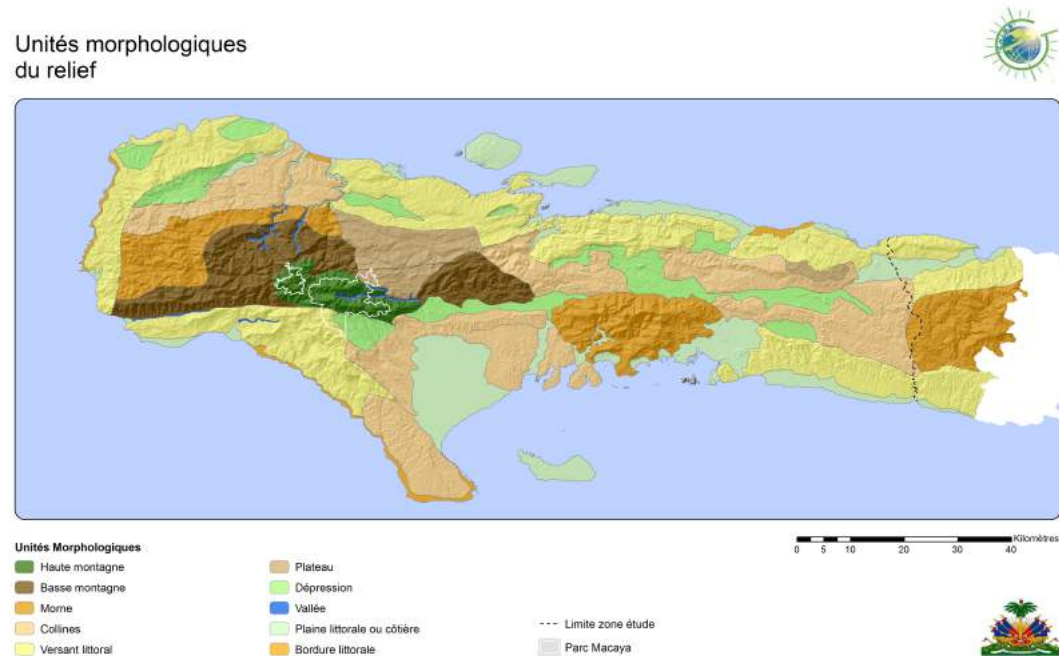


FIGURE 1.2 – Le Relief du Grand Sud (CNIGS 2017)

Le climat y est tropical, avec deux saisons principales, la saison sèche de décembre à février et la saison humide d'avril à octobre¹. La saison des ouragans se situe entre août et octobre. À

1. <https://www.climatsetvoyages.com/climat/haiti>

Jérémie, des précipitations importantes tombent tous les mois y compris les mois les plus secs, la température moyenne étant de 26 degrés celsius².

1.1.2 Occupation du sol

L'arrière-pays se distingue par la richesse de la faune et de la flore, plusieurs espaces ont été érigés en parcs nationaux dont le parc Macaya ces dernières années.

1.1.2.1 Végétation

Le relatif éloignement de la capitale, a favorisé la persistance d'un couvert végétal et d'une faune endémique, même si de plus en plus menacée par la déforestation. D'après le CNIGS, la région possède plus de 35% de l'agroforesterie et près de 50% du couvert forestier national » (Orioli 2012; CNIGS 2017) (Figure 1.3).

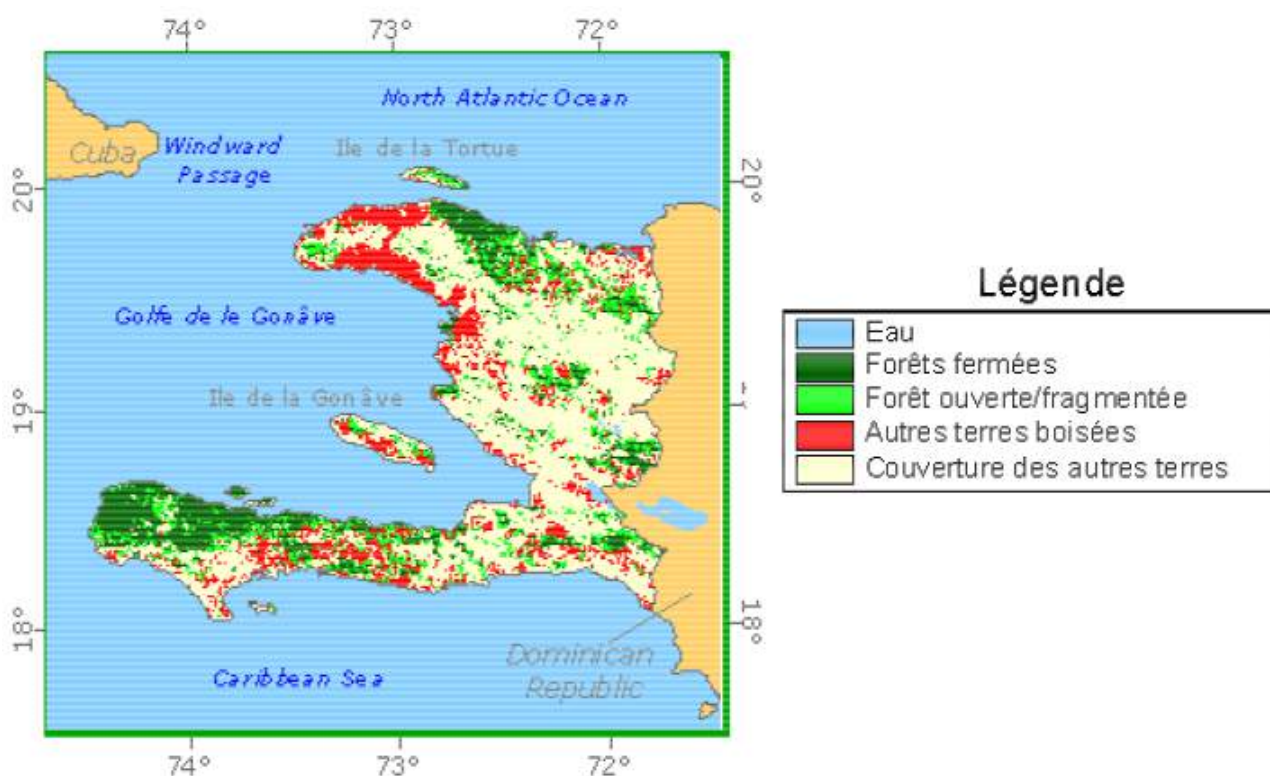


FIGURE 1.3 – Carte des forêts en Haïti (Lorenzo Orioli 2012)

La nomenclature de la végétation, utilisée en Haïti dans la classification des occupations de sol, distingue cinq classes (Communication personnelle, 2018) (Figure 1.4) :

2. <https://fr.climate-data.org/location/764356/#climate-graph>

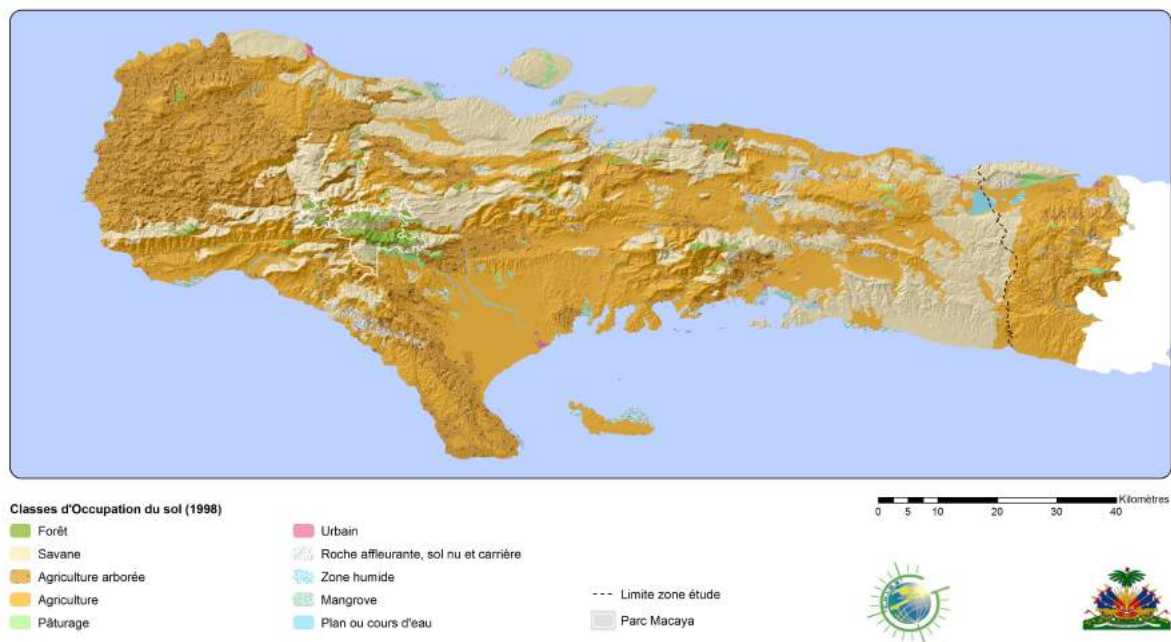
Occupation du sol
(1998)

FIGURE 1.4 – Occupation du Sol dans le Grand Sud (CNIGS 2017)

- la strate arborée, dont la superficie est faible mais qui représente un enjeu national de protection, notamment le parc Macaya avec des altitudes supérieures à 1 500 m. Leur présence est avérée sur tout le territoire avec des attroupements particuliers le long des rivières. Elle est composée principalement de pins, présents dans les forêts d'altitude et de feuillus.
- la strate arbustive, se rencontre en bordure des forêts d'altitude entre 600 et 1500 m. où sur les versants littoraux ;
- la strate herbacée (pâturages) peu présente, limitée par la chaleur tropicale ;
- les zones humides intérieures, trop humides, peu présentes ;
- les zones humides côtières et marines, par exemple les mangroves. Deux classes doivent être ajoutées, non assimilées à de la végétation mais détectables par la télédétection :
- l'agriculture arborée et les systèmes agro-forestiers, mélange d'une strate arborée et d'agriculture dans des sous-étages, se retrouve dans toutes les conditions de relief ;
- l'agriculture avec ou sans couvert arboré, visible dans les grandes plaines littorales ou le long des cours d'eau (CNIGS 2017).

Les arbres font partie intégrante de la culture et de l'économie haïtienne. Ils sont utilisés dans la filière bois-énergie, dans la construction et dans la fabrication de meubles et d'objets artisanaux.

1.2 Jérémie

Ville créée en 1760, Jérémie est le chef-lieu de la commune du même nom et du département de la Grand-Anse. Elle est subdivisée en neuf sections communales, plus petite entité administrative. Sa population est estimée à 134 000 personnes et une superficie de 427,22 km² soit une densité de 314 habitants par km². Cette commune concentre près du tiers de la population du département de la Grand Anse (28,6 %). Adossée à la montagne, sa densité est l'une des plus élevées de la région. La ville compte 42 000 habitants, soit approximativement 1/3 de la population communale. (Anon 2015).

Traversée par deux rivières, la rivière Grand Anse et la rivière Voldroque, et par des ravines torrentielles, la ville est menacée par l'aléa inondation et les submersions marines. Frappée par plus de 20 ouragans et des incendies depuis le 18^e Siècle, son tracé a évolué en conséquence. La ville s'est graduellement urbanisée (Commune de Jérémie 2017) au détriment de l'environnement naturel, lié à la déforestation et à l'érosion des terres environnantes. La ville s'est constituée autour d'un quartier historique au centre-ville, avec une continuité du bâti et une mixité d'usage, le Centre Urbain Structuré. À ce quartier s'est greffé progressivement au fil de l'histoire des « nouveaux quartiers (six) » plus ou moins organisés . Les quartiers sont un mélange d'habitations résidentielles et de petits commerces, écoles ou églises entrecoupés par la présence d'une végétation souvent arborée (Commune de Jérémie 2017) (Figure 1.5).

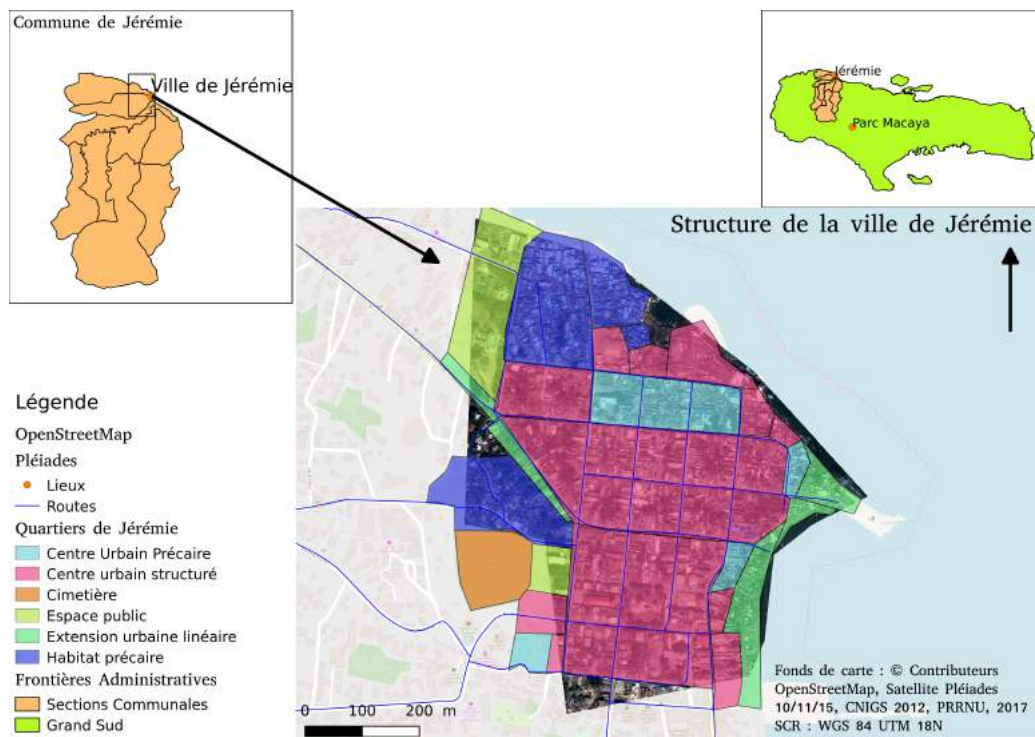


FIGURE 1.5 – La ville de Jérémie et sa structure du bâti (Lamure Tardieu, 2018 adapté de PRRNU, 2017)

Chapitre 2

Les ouragans

Un ouragan est un phénomène météorologique, « formé d'une immense masse nuageuse, quasi-circulaire d'environ 500 à 1 000 kilomètres de diamètre, au sein de laquelle les vents atteignent des vitesses considérables. » (Monique Terrier *et al.* 2017) . Le mot « ouragan » fait ainsi référence à une tempête qui se déplace dans l'Atlantique nord et le nord-est du Pacifique, avec des niveaux de vent supérieurs à 118 km/h. Il se constitue en bordure de l'Afrique de l'ouest, par le réchauffement des masses d'eaux chaudes, qui vont ensuite généralement se déplacer vers l'arc des Caraïbes et mourir sur les côtes des États-Unis (Stanturf *et al.* 2007). Trois phénomènes se conjuguent ensemble (Figure 2.1) :

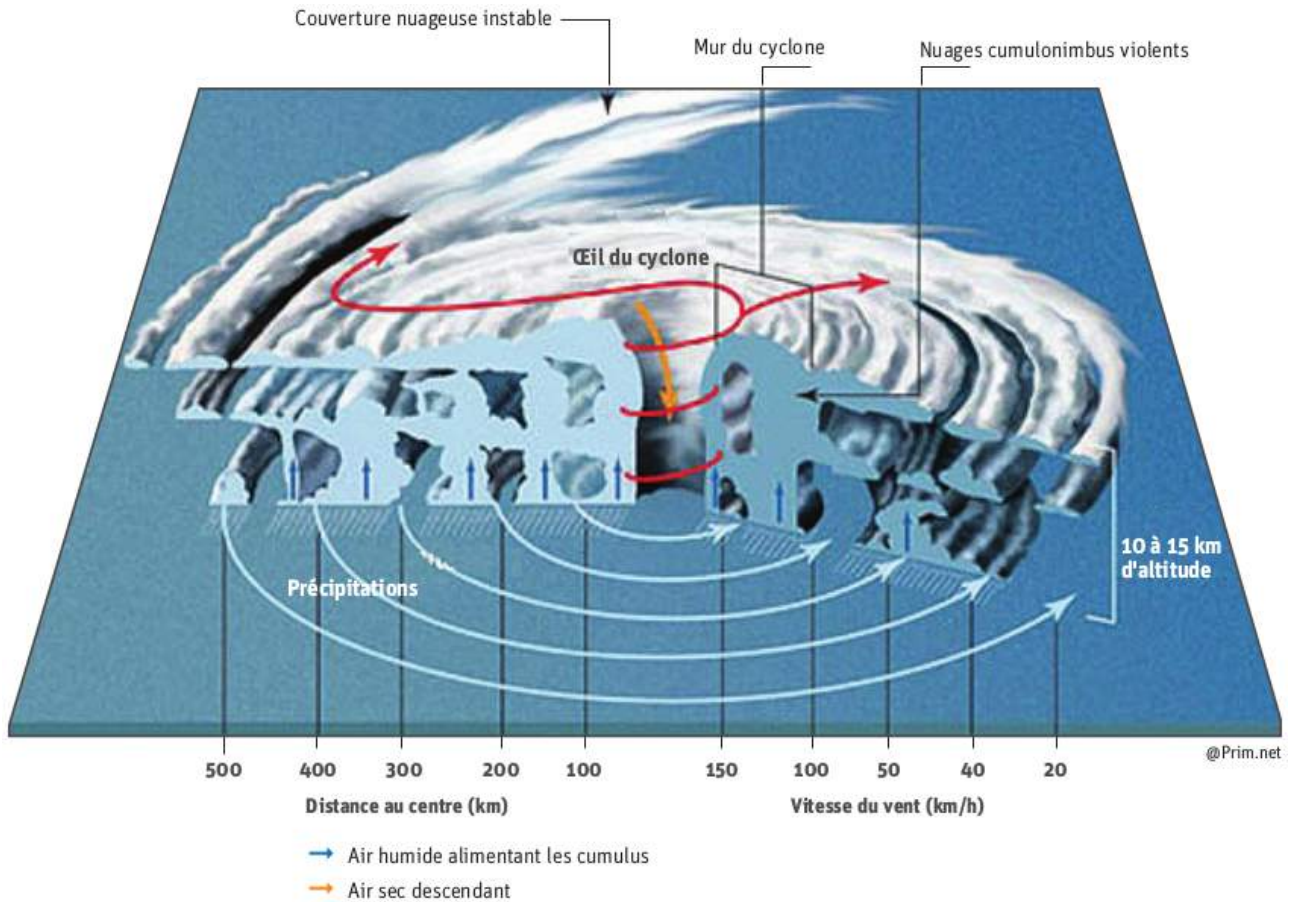
- une dépression atmosphérique dont les effets se font surtout sentir au centre de l'ouragan ;
- des vents tourbillonnants dont l'intensité maximale se fait sentir au niveau du mur de l'ouragan signé à environ 50 km de l'œil ;
- des précipitations qui peuvent se faire sentir dans tout l'espace occupé par l'ouragan (Monique Terrier *et al.* 2017).

L'échelle dite de Saffir-Simpson, créé en 1969, catégorise les ouragans en fonction de la vitesse du vent moyen pendant une minute à 10 m. de hauteur. Cinq catégories d'ouragans ont été définies (Figure 2.1).

D'autres échelles s'intéressent plutôt aux dommages économiques causés. La plus utilisée, l'échelle de Fujita améliorée, fut introduite en 2007. La catégorie est définie par l'association du type de bâtiment ou du type d'espèce végétale, et des impacts reçus sur ces derniers, auxquels est associé un niveau de vent capable d'infliger ces dégâts² (Tableau 2.2.

1. <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-cyclones#>

2. <http://www.keraunos.org/recherche/echelles-et-indicateurs/echelle-amelioree-de-fujita-ef-scale-enhanced-fujita-scale.html>

FIGURE 2.1 – Fonctionnement de l'ouragan (Monique Terrier *et al.* 2017)

Classe	Vents maximum
1	118 et 153 km/h
2	154 et 177 km/h
3	178 et 209 km/h
4	210 et 249 km/h
5	supérieurs à 249 km/h (catégorie des super-cyclones)

TABLE 2.1 – Échelle de Saffir-Simpson¹

DÉGÂTS OBSERVÉS	INTENSITÉ	VENT ESTIME
Casse de petites branches d'arbres, couvertures de toit faiblement endommagées, gouttières cassées,...	EF0	105 à 135 km/h
Couvertures de toit en grande partie soufflées, portes envolées, arbres cassés,...	EF1	135 à 175 km/h
Toits entièrement détruits, gros arbres cassés, projections à grande distance,...	EF2	175 à 220 km/h
Etage supérieur des maisons solides en grande partie détruit, arbres dépouillés et en partie écorcés,...	EF3	220 à 270 km/h
Maisons solides en grande partie détruites, y compris au rez-de-chaussée, arbres projetés à distance,...	EF4	270 à 320 km/h
Tous les arbres et structures proéminentes sont détruits et projetés à distance, les maisons solides sont intégralement rasées...	EF5	> 320 km/h

TABLE 2.2 – Échelle de Fujita améliorée

Par exemple, un conifère sera classé dans la catégorie 28, et la perte de ces grandes branches classera l'impact au niveau 2, soit des vents qui l'ont touché estimé entre 100 et 140 km/h, ce qui permettra de le classer dans l'intensité EF0.

2.1 Exposition d'Haïti aux ouragans

L'île se trouve sur la trajectoire de la majorité des dépressions qui ont touché l'Atlantique nord, ce qui renforce sa vulnérabilité face aux phénomènes cycloniques. Ainsi, en quinze ans, le pays a dû faire face à plus de sept cyclones qui ont affecté plusieurs milliers de personnes (Monique Terrier *et al.* 2017). Les zones côtières jouent un rôle de tampon, mais sont surtout les premières victimes et les plus menacées, par exemple les mangroves. L'urbanisation, la démographie galopante ainsi que l'érosion favorisée par un déboisement récurrent contribuent à aggraver les conséquences de ces catastrophes.

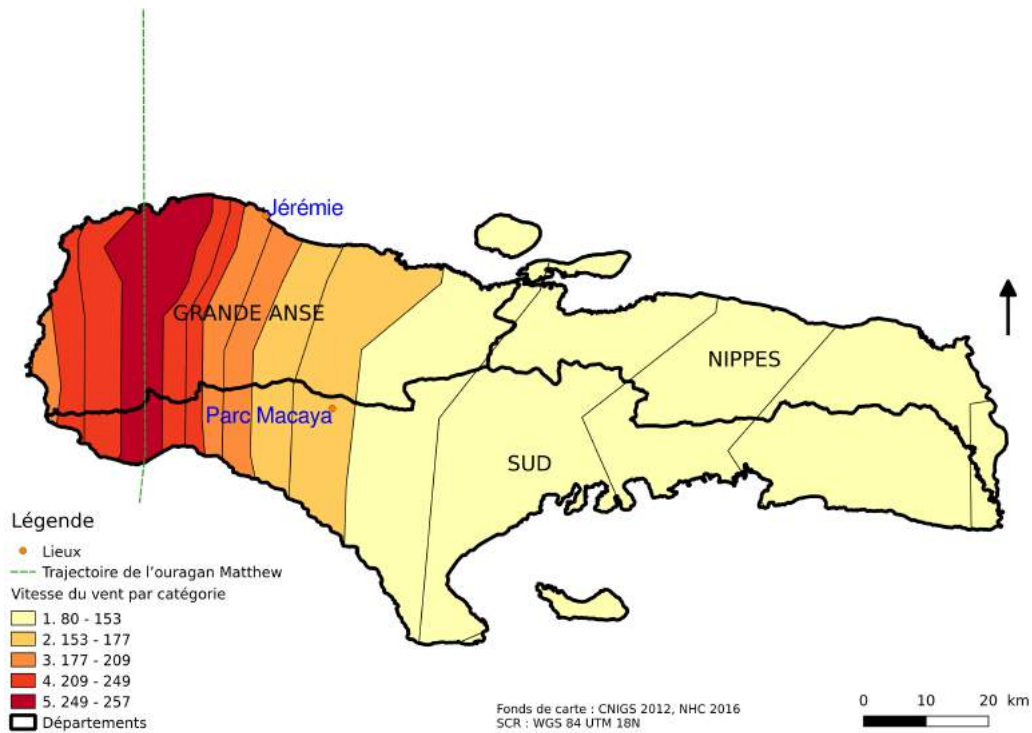


FIGURE 2.2 – Vitesses du vent lors du passage de l'ouragan Matthew (Lamure Tardieu, 2018 adapté de NHC, 2016)

2.1.1 Cas de l'ouragan Mathew³

L'ouragan Matthew s'est développé près des îles sous le vent le 28 septembre 2016. Il découle d'une onde tropicale qui s'est formée le 25 septembre 2016, près du continent africain. Le 30 septembre, il est devenu un ouragan majeur en atteignant la catégorie 5 avant de rétrograder en catégorie 4 avant d'atteindre les côtes haïtiennes le 4 octobre 2016. L'œil est passé le long de l'extrême sud-ouest d'Haïti où il a engrangé des précipitations, chutes d'arbres, glissements de terrain, vents violents et dommages urbains (Figure 2.2). C'est le premier ouragan de cette catégorie à atteindre le Grand Sud depuis le passage de l'ouragan Cleo en 1964. Au niveau national, il a conduit à la mort de 546 personnes et à une perte économique d'environ 3 milliards de dollars américains de dommages, soit la plus grosse catastrophe économique depuis le tremblement de terre de 2010 (Benfield 2017).

3. <https://weather.com/storms/hurricane/news/hurricane-matthew-bahamas-florida-georgia-carolinas-forecast>

Chapitre 3

Suivi post-Matthew et observation de la Terre

3.1 Etat des lieux : le Diagnostic Territorial du Grand Sud

L'exode rural est de plus en plus prononcé en direction des centres urbains, la question d'un aménagement du territoire qui puisse s'adapter à ces contraintes se pose. Les années 70 ont vu apparaître les premiers textes de lois de l'ère moderne suivi en 1982 par la loi sur la Régionalisation et l'Aménagement du Territoire. Il faudra néanmoins attendre la Constitution de 1987, pour que cette décentralisation soit considérée comme la pierre angulaire du développement à venir du pays (Bernardin 1999).

L'État haïtien met en place progressivement depuis quelques années des outils et des politiques publiques pour le suivi de l'aménagement du territoire, qui allie le développement économique au développement humain et social. En ce sens, le Comité Interministériel à l'Aménagement du Territoire (CIAT) est un acteur de premier plan dans la mise en œuvre fonctionnelle de cette volonté politique.

Le Diagnostic Territorial du Grand Sud (DTGS), dont le maître d'ouvrage est le CIAT, est un outil d'évaluation du territoire du Grand Sud. Loin de s'arrêter à cette définition, il s'intéresse plus particulièrement aux acteurs et aux interactions qui les lient à l'espace géographique, à travers les actions qu'ils y mènent ou qu'ils subissent au contact de ce dernier. « Le diagnostic doit permettre la formulation d'un jugement sur la cohérence du territoire, mais aussi la

mobilisation des acteurs » (Sylvie Lardon et Vincent Piveteau 2005). Comme l'écrit (Sylvie Lardon et Vincent Piveteau 2005), le diagnostic mêle différentes échelles et différents objectifs. Le DTGS intervient à deux niveaux, un niveau général de l'espace géographique vu en fonction des enjeux naturels à l'échelle de la région, à savoir la géologie et le relief, et de manière moins prononcée l'occupation de sol. Ce dernier enjeu « naturel » néanmoins est à relativiser car il évolue aussi en fonction des déplacements de population, qui aménagent, utilisent et gèrent ces espaces. Un second temps est consacré à l'étude des relations entre les populations qui peuplent cette région à travers divers prismes de vision et à des échelles plus précises, par exemple autour de l'attraction des villes sur les zones qui les entourent.

De manière plus précise, le DTGS vise à éclairer les enjeux et les contraintes auxquels fait face cette région et qui doivent être pris en compte dans la mise en place d'une économie capable de relever les défis du futur. Ainsi, le rapport dresse un inventaire des ressources économiques de la zone, s'intéresse à (i) l'aménagement du territoire et les ajustements possibles, (ii) l'articulation des différentes villes entre elles, (iii) l'environnement topographique et naturel ainsi que (iv) l'agriculture. Comme le DTGS, cette étude nécessite une approche qui mêle connaissance de l'espace, et des acteurs qui aménagent cet espace, afin de pouvoir identifier et proposer des pistes d'actions à mener, à différents pas de temps. En effet, tant dans le choix des images de télédétection à traiter que dans le choix des zones d'études, il s'agit de rapporter l'évolution d'une situation donnée après le passage d'un ouragan. Ce passage va impacter les acteurs et l'espace géographique. Il s'agit ainsi d'observer les différents impacts visibles, les documenter et les analyser et ainsi mieux appréhender et comprendre comment ces impacts vont perturber et faire évoluer les acteurs et l'espace géographique. Par exemple, la construction de produits d'information telles que des cartes sur la végétation permettent de poser des hypothèses pour expliquer le comportement et la résilience de chacune des occupations de sol face au passage de la catastrophe. En définitive, cette étude vise à enrichir le débat sur l'impact des zones touchées, comparer l'évolution de la situation pré et post-ouragan et proposer des recommandations pour le suivi des impacts, la reconstruction ou la reprise de la végétation. Ces recommandations adaptées au contexte de l'étude s'ajoutent à celles déjà définies et intégrées au DTGS.

3.2 Cas du Recovery Observatory : principes et finalités

Dès 1999, les agences spatiales françaises et européennes (CNES et ESA) ont vu la nécessité de la mise sur pied d'une Charte internationale « Espace et catastrophes majeures » afin que la

technologie spatiale puisse servir aux équipes de secours lors des grandes catastrophes. Rejoint progressivement par d'autres agences spatiales et des organismes de sécurité civile, la charte intervient actuellement sur de nombreux sites touchés et contribue à la prise de conscience de la nécessité de suivre les catastrophes pour diminuer les risques afférents. Le tremblement de terre de 2010 en Haïti, a été l'occasion de développer des synergies au delà de l'activation de la charte. Ainsi est né le projet Kal-Haïti, qui a permis de créer une communauté d'acteurs intéressés autour de la diffusion et de l'utilisation de ressources, pour servir la reconstruction en Haïti (Boissezon et Dubois 2014). Le passage de l'ouragan Matthieu sur une zone beaucoup plus étendue et moins accessible que ne l'était le tremblement de terre, avec des dommages combinés de l'urbain et de la végétation, et dont la reconstruction prendra des années a montré les limites des technologies de la Charte comme du Programme Copernicus des Risques et Désastres, axés sur les réponses à court terme (CEOS ROOT 2016). Le CEOS a créé le programme de l'Observatoire de la Reconstruction (Recovery Observatory) (RO) pour démontrer et renforcer l'utilisation des images satellites dans les désastres majeurs, à moyen et à long terme (3 à 4 ans), favoriser des partenariats institutionnels entre acteurs et inciter l'innovation au service de la reconstruction. Lancé quelques mois après l'ouragan, le RO se focalise sur la production d'images et de données dérivées sur le bâti, le transport, l'agriculture, la santé, l'éducation et l'environnement ainsi que sur le renforcement de capacités des partenaires du programme (CEOS ROOT 2016). Le Ro s'inscrit de par cette action dans les deux premières phases du cycle de vie d'une catastrophe, même si son action principale concerne la deuxième phase :

1. la réponse d'urgence ;
2. la reconstruction ; (Grünwald *et al.* 2010) .

3.3 Rôles et usages de l'observation satellitaire post-cataclysmique

La télédétection est d'après la définition du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL)¹, l' « Ensemble des connaissances et des techniques permettant de déterminer certaines caractéristiques physiques et biologiques de points observés à partir de mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ».

La télédétection est un outil indispensable à l'heure actuelle pour pallier ou renforcer les

1. <http://www.cnrtl.fr/definition/t%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection>

besoins d'information sur un territoire. Elle permet une analyse, une évaluation puis un suivi, à différents niveaux d'échelle spatiale, spectrale et temporelle des dommages. Elle vient en accompagnement de visites sur le terrain qui restent indispensables pour prendre conscience pleinement de la réalité d'un phénomène. Dans le cas des ouragans, l'imagerie satellitaire optique a de fortes contraintes, souvent liées aux nuages, c'est pourquoi l'utilisation de radar permet de faciliter l'évaluation des dégâts.

La télédétection permet d'analyser l'occupation du sol et leurs évolutions. Ces impacts sont visibles à diverses échelles pour différentes occupations de sol. La télédétection est souvent associée à différentes techniques pour évaluer les impacts d'un ouragan. De manière plus spécifique, le type d'occupation du sol analysé ainsi que la zone d'étude visée et notamment sa taille va influencer sur les méthodes choisies en télédétection. De plus, face aux pertes de communications avec les zones impactées, l'imagerie permet souvent d'apporter une première idée sur la réalité des dégâts. Par ailleurs, dans les premiers jours, la thématique accessibilité est primordiale pour orienter les actions de terrain en fonction des zones les plus touchées et des voies de communication opérationnelles. Lors du tremblement de terre de 2010, les équipes de la sécurité civile français ont utilisé cette carte, lors de l'activation de la charte internationale risques et désastres, pour déterminer les zones prioritaires d'appuis de leurs équipes de sauveteurs (Boissezon et Dubois 2014).

La télédétection qui joue un grand rôle dans chacune des phases post-catastrophe permet de faire un état des lieux après une catastrophe et de suivre ensuite dans un deuxième temps la reconstruction ou la reprise de la végétation.

3.4 Impacts visibles par la télédétection

Les ouragans causent de nombreux dommages, mais ceux identifiables par télédétection dans l'urbain comme pour la végétation sont cependant restreints.

3.4.1 Urbain

Les impacts sur les zones urbaines dépendent de la qualité et des types de bâti, qui vont être frappés avec plus ou moins de dureté par le vent ou la pluie. La structure du bâti joue un rôle important. Les structures faites de matériaux légers ou locaux, mobiles, qui ne possèdent pas toujours un vrai toit sont généralement les plus impactées. Les structures réalisées à partir de

matériaux semi-résistants ou des produits mélangés et des murs durcis en bois, métal et ciment peuvent résister à des vents modérés, leur intégrité structurelle n'est pas véritablement impactée. Ces structures sont souvent des maisons individuelles ou des petits magasins. Les structures lourdes construites avec des matériaux en dur tel que le ciment ou l'acier résistent généralement bien, leur structure est conçue pour résister aux vents violents et assurer leur intégrité, il s'agit des grands centres (commerciaux), des hôpitaux ou des services publics. D'une manière générale, le principal élément endommagé est le toit, et peut se propager aux murs, ce qui conduit à la destruction du bâtiment (Ziad Al Achkar *et al.* 2012). Les précipitations et les submersions causent des inondations, la destruction des ponts et des routes, les glissements de terrains par l'érosion et le changement d'affectation du sol. Les débris provenant de toutes ces structures deviennent des projectiles qui vont abîmer les autres structures ou bloquer l'accessibilité des routes.

Dans le Grand Sud, les zones urbaines se trouvent principalement dans les zones côtières, ce qui a favorisé le niveau accru des dommages. À Jérémie, 80 % de toutes les constructions ont été détruites, notamment toutes les maisons en tôles ondulées. Certaines maisons en béton ont par contre résisté. La commune de Jérémie a estimé qu'il y avait 24 mille familles sinistrées, soit 18 % des ménages de la commune, plus de 16 mille logements détruits et près de 11 mille endommagés. Les bâtiments gouvernementaux tout comme l'hôpital principal n'ont pas pu résister non plus. Des infrastructures de communication sont restées impraticables durant plusieurs jours à cause d'inondations et de dommages aux routes et aux ponts (Stewart 2017) ; (Benfield 2017) ; (Commune de Jérémie 2016).

3.4.2 Végétation

La diversité des types de végétation cause des dégâts très variables, auxquels sont liés les facteurs biotiques et abiotiques de chacun des types. Ceux-ci affectent surtout la strate arborée, à cause de la hauteur plus importante des arbres, plus susceptibles d'être impactés par le vent. Les dommages conduisent à différents types d'impacts à différents espaces de temps. Lors de l'ouragan, l'abrasion en est la principale forme car elle attaque toute les parties de la plante. Des feuilles en passant par les branches pour finir par le houppier, elle contribue à la défoliation, au dépouillement et à la casse des branches et parfois du tronc (Brokaw et Walker 1991). La défoliation reste toutefois un impact limité car les feuilles ont généralement tendance à être rapidement remplacées. Les plus grosses branches peuvent tomber sur les strates inférieures détruisant au passage les arbres de ces strates. « Les tiges individuelles peuvent se plier, casser,

se renverser par un déracinement partiel ou impacter le système racinaire jusqu'au déracinement total » (Stanturf *et al.* 2007).

D'autres impacts résultent des premiers et apparaissent de façon progressive après l'ouragan. Les tiges et les troncs endommagés sont moins résistants aux prochains passages d'évènements climatiques. La verse des troncs peut conduire à un déracinement ultérieur. D'autres effets plus subtils ont été répertoriés, comme la mort programmée des pins à moyen terme (6 mois à 2 ans), l'attaque par des insectes ou la pourriture (eliana kampf *et al.* 2007). Le retour à la « normale » de la végétation est longue, les différents types d'impacts peuvent être visibles pendant des décennies (Brokaw et Walker 1991).

Toutes ces destructions favorisent à l'inverse un dynamisme de repeuplement, notamment à cause de la canopée qui devient moins dense, les herbacées et la strate arbustive colonisent rapidement les espaces laissés vacants. Les forêts « primaires » sont remplacées par de la végétation et des forêts avec un enracinement superficiel. La structure de la forêt et sa composition évolue mais peut s'avérer critique pour le dynamisme de plusieurs écosystèmes forestiers comme le site (Allen *et al.* 2005). Les ouragans participent ainsi à la biodiversité végétale.

En effet, en atteignant une des zones les plus agricoles et forestières du pays, l'ouragan a détruit nombre de plantations de riz, maïs, café, cacao, cocotiers, bananiers, arbres à pain. etc. Dans certaines zones, 80 % des cultures seraient perdues selon l'Office pour la Coordination des Affaires Humanitaires des Nations-Unis (OCHA) (Stewart 2017). À partir du capteur Modis des satellites Terra et Aqua, il est possible d'observer que la végétation a été fortement impactée après l'ouragan. En fonction des zones, la reprise a été plus ou moins marquée. D'après la FAO, sur les départements de la Grand Anse et du Sud, 15 à 20 % des arbres ont été déracinés ou cassés. Les pins, les mangroves et les cocotiers n'ont pas repris alors qu'en moyenne, 80 % des arbres restés debout ont redémarré leur cycle végétatif (Bloesch 2016).

3.4.3 Usages

Les usages de la télédétection sont larges et variés. Cependant, de nombreuses contraintes tant de temps que de ressources humaines, techniques et financières rendent l'exercice de la télédétection difficile. Il est donc important de cibler les différentes possibilités en fonction des contraintes de chaque théâtre d'opération. La diversité des besoins de télédétection a nécessité le développement de technologies adaptées. Pour récupérer l'information afin qu'elle soit utilisable,

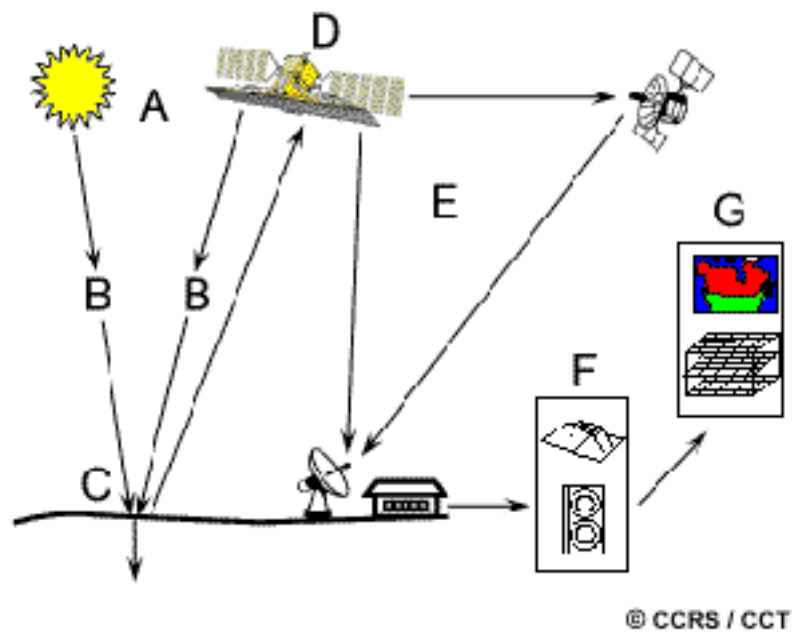
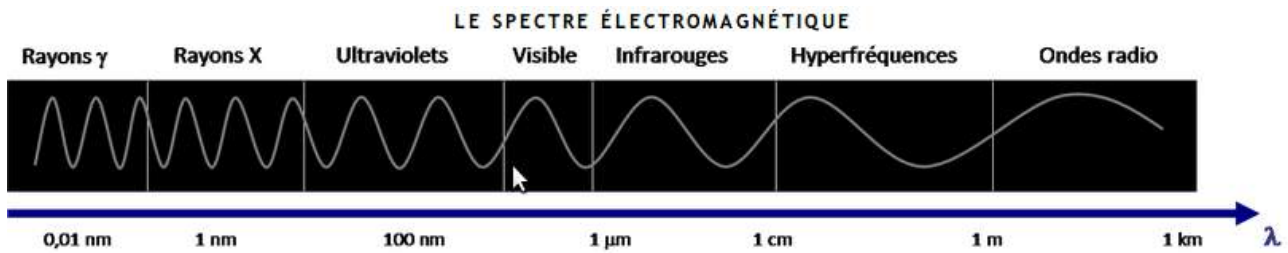


FIGURE 3.1 – Captation des informations de la télédétection

divers technologies sont combinées ensemble comme cela est expliqué par la (Figure suivante 3.1 du site des Ressources naturelles du Canada :

- Source d'énergie ou d'illumination (A) - Le soleil illumine la Terre, ce qui permet au capteur d'utiliser cette source lumineuse pour récupérer des données. La source lumineuse se propage sous forme d'énergie électromagnétique ;
- Rayonnement et atmosphère (B) - Lors de la traversée de l'atmosphère, la source lumineuse et l'énergie produite par le capteur sont perturbées par leur interaction avec l'atmosphère, de même lorsque l'énergie réfléchi par la cible revient vers le capteur.
- Interaction avec la cible (C) - L'énergie lumineuse, appelée énergie incidente interagit avec la surface de la cible. « Une partie de cette énergie sera réfléchi.
- Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) -Le capteur à distance va percevoir l'énergie réfléchi ou émise par la cible et l'enregistrer sous forme de données
- Transmission, réception et traitement (E) -Les données enregistrées au sein du capteur vont être transmises « souvent par des moyens électroniques à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques) ».
- Interprétation et analyse (F) - Des techniques d'interprétation « visuelle et/ou numérique de l'image traitée » sont ensuite mises en œuvre pour extraire les informations demandées.
- Application (G) - « La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de

FIGURE 3.2 – Spectre électromagnétique²

nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier ».

L'étude portera uniquement sur les capteurs optiques, qui utilisent l'énergie du soleil comme source lumineuse extérieure pour capter l'énergie. Une image est constituée de pixels, qui est la plus petite unité cartographique. Chaque pixel est défini par ces coordonnées cartésiennes dans un plan d'abscisse x, d'ordonnée y et de centre O. La quantité d'énergie reçue est enregistrée sous forme de valeurs numériques dans chaque pixel, dans différentes bandes spectrales.

3.4.3.1 Éléments d'une image

3.4.3.1.1 La fauchée

Elle correspond à la mesure de la largeur de chaque image prise par un capteur. Elle varie entre une dizaine et une centaine de kilomètres en fonction des types de capteurs. Elle est liée à la résolution spatiale. donc plus la fauchée est grande plus la résolution spatiale sera faible. ##### La Résolution spatiale 10 m. de résolution spatiale est équivalent à 10 m. * 10 m. soit 100 m. de surface captée sur le terrain.

3.4.3.1.2 La résolution spectrale

Une image est constituée d'une ou de plusieurs bandes spectrales. Chaque bande spectrale correspond à un ensemble de fréquences localisées le long du spectre électromagnétique. En télédétection spatiale, le domaine du visible, constitué par les bandes perceptibles par l'œil humain en passant par les bandes de l'infrarouge (Proche Infrarouge) et l'Infrarouge Moyen sont les rayonnements les plus utilisés.

La cible va alors réfléchir, émettre, transmettre ou absorber l'énergie incidente³.

2. <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvcd/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-4-spectre-electromagnetique.html>

3. <http://pdf.coursgeologie.com/2013/Cours%20de%20Teledetection.pdf>

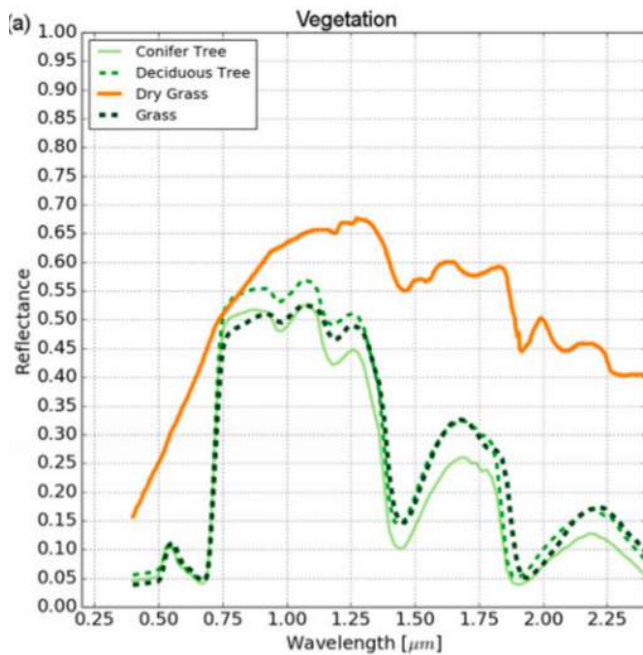


FIGURE 3.3 – Réflectance de la végétation (Baldrige et al. 2009 ; Kingfield et Beurs (2017))

$$EI = E_R + E_A + E_T$$

-E_I : Energie Incidente -E_R : Energie réfléchie -E_A : Energie Absorbée -E_T : Energie transmise

Le rapport entre énergie réfléchie et énergie incidente porte le nom de réflectance :

$$R\acute{e}flectance = \frac{E_R}{E_I}$$

L'énergie et la distribution spectrale réfléchie à la surface terrestre dépendent des interactions de cette surface avec la végétation, les sols et les matériaux des constructions humaines. (Baldrige *et al.* 2009) ont déterminé la réponse spectrale de plusieurs matériaux végétaux et urbains. Dans le cas de la végétation, la signature spectrale va évoluer en fonction du type et de la santé de la végétation comme la Figure 3.3 l'indique.

En effet, chaque type de végétation a sa propre signature spectrale, les espèces arborées et l'herbe ont cependant une signature spectrale très rapprochée. Les herbes sèches ont par contre une signature spectrale, qui se différencie tout particulièrement des autres à partir de l'infrarouge (0,75 μm). Dans le cas où la végétation est en bonne santé, la végétation va absorber la majorité de l'énergie dans le visible (0,4 - 0,7 μm) et réfléchir la majorité de son énergie dans l'infrarouge (0,75 - 1,35 μm), ce qui facilite la photosynthèse. Les caractéristiques propres

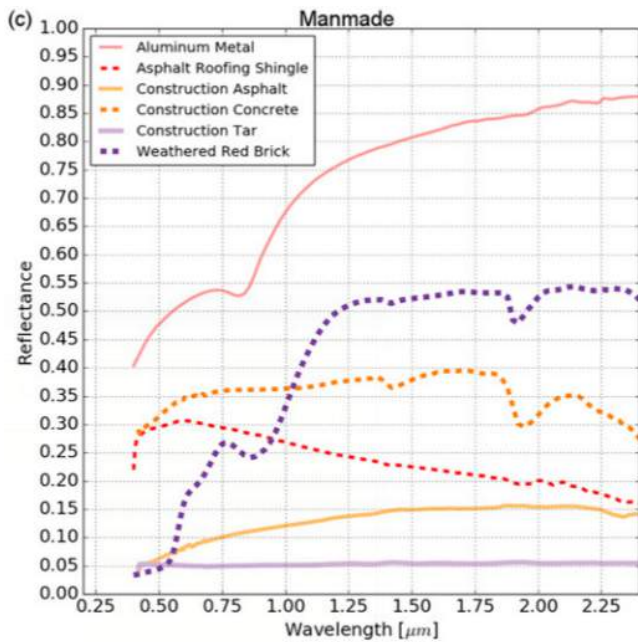


FIGURE 3.4 – Réflectance des matériaux de construction du bâti (Baldrige et al. 2009; Kingfield et Beurs (2017))

au peuplement telles que l'âge ou la couverture foliaire vont aussi influencer sur la réflectance de manière plus ou moins prononcée. Lorsque la plante dépérit, la courbe de la réflectance spectrale va être inversée. (Kingfield et Beurs 2017). Les sols ont une faible réflectance dans le visible, alors qu'ils apparaissent bien dans l'infrarouge et l'infrarouge moyen (1,5 - 2,5 μm). Leur signature spectrale sera dépendante principalement de leur structure, la taille des particules, et la composition qui varie plus ou moins entre l'organique et le minéral. Par contre, la réflectance des matériaux de construction dans l'urbain est très variée et dépend principalement de la composition du matériau. Les vents et les précipitations mélangés aux débris causent une perturbation de la signature physique et spectrale de la surface terrestre. Les débris dispersés par l'ouragan peuvent ainsi abîmer les surfaces végétales, causant la perturbation de la photosynthèse, rendant difficile la détection des végétaux dans le spectre visible et l'infrarouge, tout en augmentant la réflectance dans l'infrarouge moyen (Kingfield et Beurs 2017) Figure 3.4.

3.4.3.1.3 La résolution temporelle

Elle dépend du satellite et de ses capteurs, la « zone de chevauchement des fauchées et la latitude⁴ ». Dans le cas d'un ouragan, cette revisite périodique des lieux touchés est fondamentale. Il s'agit notamment de constater la reconstruction urbaine, le nettoyage des débris, la reprise de la végétation, mais aussi comment celle-ci s'opère. De plus, dans les tropiques, les nuages sont souvent présents dans les images, rendant la tâche ardue dans

4. <http://nilerak.hatfieldgroup.com/French/NRAK/EO/html/rsbch9.html>

l'utilisation des images. Pour atténuer leur effets, il est possible de réaliser une reconstruction de l'image complète à partir de plusieurs images temporelles. Ainsi plus la quantité d'images est abondante, plus il sera possible de sélectionner des images potentiellement adaptées à la situation d'étude. À partir des images mises à disposition, il est possible d'utiliser les masques calculés par les chaînes de traitements ou d'utiliser d'autres masques mieux à même de retirer les nuages et leurs ombres (Hu et Smith 2018).

3.4.3.2 Les types d'images

3.4.3.2.1 Images satellites

Il existe une multitude de capteurs, c'est pourquoi il est primordial de référencer les capteurs qui sont susceptibles d'être utilisés dans l'étude des ouragans. L'étude de la végétation et de l'urbain nécessite l'utilisation de satellites multispectraux afin de pouvoir identifier plus facilement les différents objets en fonction de leurs signatures spectrales. Dans le cadre de la végétation, plusieurs satellites peuvent être utilisés en fonction des impératifs d'études et des contraintes inhérentes. Le radiomètre Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) est embarqué au sein des satellites Terra et Aqua depuis 1999. Leur fauchée autour des 2300 km avec un passage quotidien atténuent la contrainte des nuages du fait de la répétitivité des images disponibles. Les bandes 1 et 2 qui correspondent aux rayonnements du rouge et de l'infrarouge, seules bandes d'une résolution de 250 m. parmi les autres bandes disponibles facilitent leur usage pour la détection de la végétation⁵. La pérennité de MODIS depuis plus de 18 ans lui a permis de devenir le capteur de référence pour les scientifiques qui mènent des études sur les ouragans (Zeng *et al.* 2016 ; Kingfield et Beurs 2017).

Pour affiner les résultats, d'autres satellites avec une résolution plus faible (30 m.), Landsat ou Sentinel sont également utilisés. (Kingfield et Beurs 2017) ont choisi l'utilisation de Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM+, pour étudier l'effet d'une tornade, la résolution spatiale de ces capteurs étant suffisante pour évaluer la trajectoire de la tornade et ainsi déterminer les dommages y afférents, la tornade ayant souvent un rayon bien moindre qu'un ouragan. D'autres auteurs comme (Hu et Smith 2018) ont couplé les images Landsat 8 OLI et Sentinel-2, sélectionnant les images avec moins de 50 % de nuages et appliquant des masques pour retirer le reste des nuages et leurs ombres. La répétitivité des images Sentinel-2 est une grande force de ces satellites.

Lorsque le sujet d'étude est l'urbain, il est nécessaire de s'intéresser aux satellites à Très Haute

5. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

Résolution. Ainsi les satellites qui ont une résolution inférieure au mètre (Pléiades, Quickbird, Worldview, etc.) permettent aujourd'hui de quantifier de manière très précise les dégâts ainsi que les changements d'occupation de sol par exemple la création de camps de déplacés ou de zones de regroupements de gravats issus des bâtiments dévastés. Ces capteurs sont souvent plus limités en bandes spectrales, gardant le visible et le proche infrarouge. De plus, la relative densité des habitations, l'hétéroclité des habitations rendent difficile des classifications automatiques pertinentes, surtout quand le vent a déplacé, emporté des débris qui modifient les occupations de sol, et qui complexifient ainsi la détection des changements. La photo-interprétation est ainsi souvent de mise pour produire un travail d'évaluation des dégâts.

3.4.3.2.2 Photo aérienne

Les orthophotos aériennes lorsque qu'elles existent ont généralement des résolutions spatiales très faibles de l'ordre du mètre ou du décimètre et permettent d'apporter une finesse d'image difficilement atteignables sur de très grandes zones avec des satellites de nos jours. Elles sont souvent utilisées pour produire l'occupation de sol de référence.

3.5 Méthode d'actualisation du Diagnostic territorial par télédétection

La télédétection permet d'apporter des éléments supplémentaires de compréhension de la situation, à des niveaux d'échelle et de temps variés. C'est un outil d'aide à la décision indispensable pour appuyer les acteurs dans la connaissance de leur territoire et réaliser un aménagement de ce dernier cohérent avec les besoins de la population, tout en tenant compte des forces et faiblesses du territoire. L'imagerie satellitaire permet de répondre à des enjeux d'analyse nécessaires pour mieux comprendre les phénomènes d'urgence et de reconstruction ainsi que leurs caractéristiques.

3.5.1 Données utilisées

Différents types de données sont nécessaires à la réalisation de cette étude. En effet, il s'agit de sélectionner celles qui permettront de réaliser les analyses tout en les restreignant spatialement, temporellement, spectralement par rapport aux demandes d'évaluation demandées. Il est donc primordial de réaliser un catalogue de ces données afin d'être sûr que des données importantes

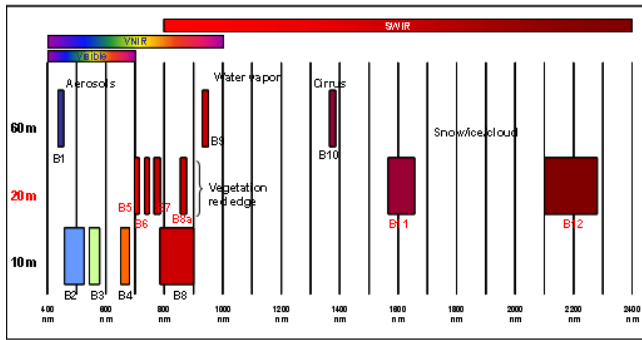


FIGURE 3.5 – Bandes Spectrales de Sentinel (cesbio, 2018)

n'ont pas été oubliées et que chaque donnée identifiée puisse jouer son rôle dans la recherche de la précision des objectifs à atteindre.

3.5.1.1 Images

L'étude se focalise sur la zone la plus proche du passage de l'ouragan, soit le bout de la Presqu'île situé dans la zone sud-ouest, divisé entre le département de la Grand-Anse et le département du Sud. Le choix des satellites s'est arrêté sur Sentinel 2 et Pléiades. Sentinel 2 cumule un passage tous les 12 jours sur les zones sélectionnées et Pléiades permet une analyse très précise de la situation avec son capteur qui fournit une image en très haute résolution.

Les images Sentinel 2 sont fournies au niveau L2A, c'est à dire qu'une correction atmosphérique a été appliquée aux images d'origine. Les bandes spectrales utilisées sont celles du spectre visible auxquelles ont été ajoutés le proche infrarouge (Figure 3.5). La résolution spatiale et la fauchée permettent une analyse d'une zone importante avec une précision adéquate pour l'étude de la végétation.

Quatre dates ont été sélectionnées pour l'étude de la végétation avec Sentinel 2 (Figure 5.2) :

- 24 décembre 2015 (10 mois avant l'impact) cette date sert d'image de référence, car c'est celle qui est la moins nuageuse. Elle permet d'apprécier l'évolution de la végétation.
- 19 septembre 2016 (2 semaines avant impact), donne un état sur la végétation pré-ouragan
- 09 octobre 2016 (5 jours après impact), permet d'évaluer les impacts de l'ouragan
- 29 septembre 2017 (11 mois et demi après impact). Cette date quasiment un an après l'impact permet d'évaluer la reprise normale de la végétation par rapport aux impacts liés vraisemblablement à l'ouragan.

Les images Pléiades sont fournies avec la fusion Panchromatique et Multispectrale déjà

effectuée, qui porte le nom de « Pansharpening ». Les bandes spectrales utilisées sont celles du spectre visible auxquelles a été ajouté le proche infrarouge. La résolution spatiale et la fauchée permettent l'analyse de la ville de Jérémie avec une précision adéquate pour l'étude de la végétation (Figure 5.1).

Le capteur Modis a été utilisé pour évaluer la pertinence des résultats lors de l'utilisation de l'indice NDVI. Les données ont été récupérées sur Google App Engine, et s'arrêtent en mars 2017. Les images issues du travail de Madame Landy Cyprien ont été utilisées pour la photo-interprétation des mangroves lors de la délimitation des occupations de sol (Landy Cyprien 2016). Les photos aériennes issues du CNIGS datées de 2014 et 2015 ont servi pour la photo-interprétation des occupations de sols.

3.5.1.2 Vecteur

Différentes sources de données ont été utilisées en sus des images satellites pour affiner les méthodes de travail et les résultats :

- zones prioritaire, le CNIGS dispose de l'outil Risk Analysis Tools, pour suivre l'état de la végétation. Cet état est évalué tous les 15 jours, à partir d'images MODIS. Les zones pour lequel a été observé un changement inhabituel sur une longue période de temps ont été identifiées et sélectionnées comme prioritaire. L'objectif est de produire annuellement et lors d'un désastre une occupation du sol à très haute résolution des ces zones dans le cadre du RO.
- données hydrologiques issues du CNIGS et d'OpenStreetMap
- données routières issues d'OpenStreetMap
- emprise urbaine créée par le Diagnostic territorial à partir de la digitalisation du bâti effectuée par le CNIGS sur les photos aériennes de 2014. Ces points ont été agglomérés ensuite grâce au logiciel MorphoLim, avec le seuil retenu de 200 m. pour délimiter la concentration de l'emprise urbaine de la ville de Jérémie .

3.5.2 Méthodes de classification des images

En fonction des besoins d'identifications des occupations de sol, diverses techniques peuvent être mises en œuvre. Le choix d'une méthode va être liée aux ressources disponibles ainsi qu'aux capteurs disponibles.

3.5.2.1 Classification supervisée

Elle se déroule en plusieurs étapes :

1. détermination d'échantillons : l'opérateur dispose d'échantillons issus du terrain relié à une occupation du sol. Dans le cas où ces échantillons sont non existants, la photo-interprétation, composition colorée ou signature spectrale peut être utilisée pour classier des échantillons de façon manuelle sur la même image ou d'autres images.
2. classifieur : à partir de ces échantillons, un algorithme de classification va tenter de classier le reste de l'image dans les occupations de sol déterminées par l'opérateur.
3. évaluation de la classification : une partie de l'image va être évaluée pour estimer le pourcentage de données qui sont bien classifiées. Le Kappa est souvent utilisé, il permet d'estimer le pourcentage des occupations de sol bien classifiés dans l'image et celles qui sur le terrain Si la classification ne répond pas au niveau attendu, d'autres essais sur les étapes antérieures vont être poursuivis pour arriver à un résultat acceptable.

3.5.2.2 Classification non supervisée Kmeans

La classification non supervisée Kmeans utilise un algorithme automatique qui vise à répartir l'ensemble des pixels dans des classes homogènes. L'objectif est d'avoir un écart intra-classe le plus faible possible et un écart inter-classe le plus élevé possible. Ce classement utilise l'intensité lumineuse de chaque pixel dans chacune des bandes de l'image pour déterminer le classement optimal. L'opérateur doit choisir le nombre de classes qu'il souhaite obtenir, le nombre de points qui vont servir comme points d'origine pour déterminer les classes ainsi que le nombre d'itérations à appliquer.

3.5.3 Indices

3.5.3.1 Végétation

L'impact intervient à différents niveaux, liés aux paramètres intrinsèques de l'ouragan et de la surface sur laquelle est passée l'ouragan. L'utilisation de capteurs à différentes échelles permet ainsi de faciliter des évaluations différentes, qui peuvent se recouper. Les différentes bandes de chaque image, les compositions colorées, les indices permettent de caractériser avec plus ou moins de succès les impacts. Les indices sont des calculs de pixels entre différentes bandes spectrales d'une image.

Différents indices sont utilisés pour analyser la détection du changement. Parmi tous ces indices, pour des raisons de pertinence, nous en avons retenu un, le NDVI.

Le NDVI, indice de référence a été utilisé. il permet d'évaluer l'état de la végétation et indique le « niveau d'activité photosynthétique ». Il est moins sensible aux facteurs topographiques et à la luminosité que d'autres indices de végétation (Zhang *et al.* 2013).

$$NDVI = \frac{NIR - rouge}{NIR + rouge}$$

$$\Delta NDVI = NDVI_{pre} - NDVI_{post}$$

- $NDVI_{pre}$: date antérieure à l'ouragan - $NDVI_{post}$: la date postérieure à l'ouragan Ce dérivé du NDVI permet d'évaluer les différences entre deux dates, par une soustraction pixel par pixel. La différence observée représente les dommages causés à la végétation (Hu et Smith 2018).

3.5.3.2 Urbain

— Indice de Cuirasse

$$IC = 3 * Vert - Rouge - 100$$

Il permet de discriminer plus facilement entre le sol et la végétation.

— Indice de Brillance

$$\sqrt{PIR^2 + Rouge^2}$$

Il permet de discriminer plus facilement entre le sol nu et le bâti.

3.5.4 Traitement des données

Le calcul du NDVI pour les images Sentinel 2 a été réalisé par l'utilisation de la bande spectrale 4, le rouge et la bande spectrale 8, soit le proche infrarouge.

Chaque théâtre d'opération a nécessité le traitement des images en fonction des zones d'études et de la présence ou non de nuages.

3.5.5 Images Sentinel

Dans le cas des images Sentinel 2 (Figure 3.6), les étapes suivies ont consisté en :

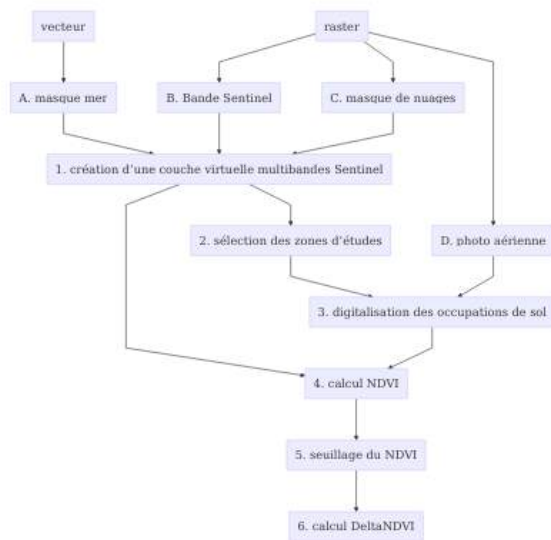


FIGURE 3.6 – Traitement des images Sentinel

1. création d'une couche virtuelle par la fusion des différentes bandes utilisées dans notre étude (Rouge, Vert, Bleu et Infrarouge) avec l'outil Gdal. Puis, application d'un masque nuages fourni dans les données brutes et découpe de la zone d'étude en appliquant un masque mer (Données B et C).
2. sélection des zones d'études choisies sur les images Sentinel 2 (Étape 2 dans la figure). Ces zones doivent être visibles sur les quatre images choisies, ce qui restreint le choix des zones possibles. De plus, certaines zones doivent faire partie des zones prioritaires définies par nos partenaires. Sélection des photos aériennes correspondantes aux zones choisies (Données D).
3. digitalisation des occupations de sol sur les images Sentinel 2 à partir des photos aériennes (Étape 3).
4. calcul du NDVI sur les quatre images Sentinel 2 après fusion des bandes et application des masques (Étape 2) et sur les occupations du sol.
5. seuillage du NDVI en retirant les valeurs inférieures à 0, qui ne correspondent pas à de la végétation.
6. calcul du $\Delta NDVI$

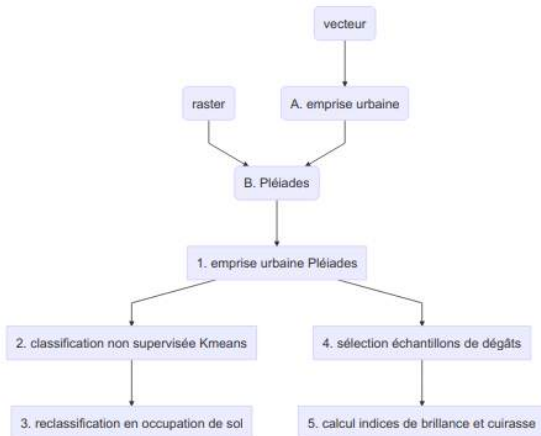


FIGURE 3.7 – Traitement des images Pléiades

3.5.6 Images Pléiades

Dans le cas des images Pléiades (Figure 3.7), les étapes suivies ont consisté en :

1. application d'un masque d'emprise urbaine sur les images Pléiades d'origine (Données A et B).
2. classification non supervisée Kmeans en 20 classes des images.
3. reclassification en 5 classes puis photo-interprétation des images Pléiades pour en déterminer les occupations de sol.
4. sélection d'échantillon de dégâts pour chaque type d'habitat urbain à évaluer.
5. calcul d'indices de brillance et de cuirasse.

3.5.7 Types Spatialisation des impacts identifiés

3.5.7.1 Urbain

La connaissance et l'évaluation des impacts permet la mise en place d'outils pour généraliser leur détection. La comparaison par photo-interprétation des images pré et post ouragan par composition colorée en couleurs naturelles a permis d'identifier les impacts. Deux quartiers de



FIGURE 3.8 – Quartiers analysés

Jérémie, la zone du centre urbain structuré et la zone de l'habitat précaire, qui de par leur structure urbanistique combinent les principaux types de construction du bâti ont été choisis pour mener l'étude (Figure 3.8). Un total de 60 échantillons a été choisi pour l'ensemble des deux zones. Lors de la phase de sélection des échantillons, deux types d'impacts dénommés blancs et noirs ont été plus précisément identifiés, par l'analyse des bandes spectrales.

3.5.7.2 Description des zones d'études dans la végétation

Les zones ont été sélectionnées en fonction des prioritaires déterminées par le CNIGS et par la contrainte des nuages qui varie en fonction de nos images (Figure 3.9 :

- prioritaire
 - RivièreP : cette zone montagneuse est séparée en deux par une rivière, à l'intérieur de la scène Sentinel.
 - LittoralP : zone du littoral dans la pointe ouest de l'île.
- Hors prioritaire
 - Littoral sud : zone côtière au sud de la Presqu'île.
 - Rivière : cette zone montagneuse est séparée en deux par une rivière, à l'intérieur de la scène Sentinel, plus au sud que la zone prioritaire de même typologie.

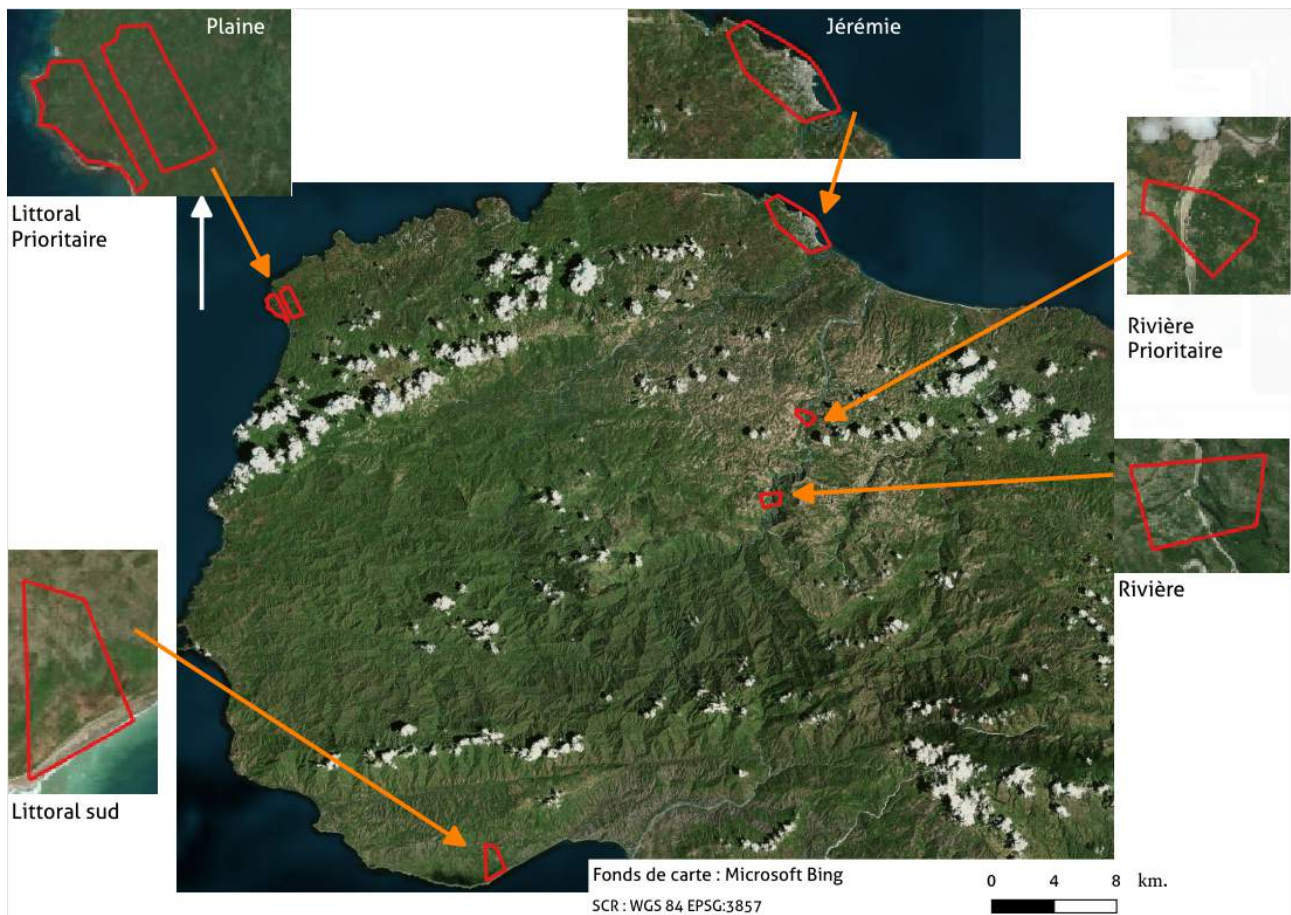


FIGURE 3.9 – Zones d'études de la végétation

- Urbain (Jérémie) : la ville de Jérémie dont l'analyse complète est répartie entre la végétation et le bâti
- Plaine : zone de plaine proche de la zone prioritaire LittoralP

L'objectif était de pouvoir comparer les zones entre elles, c'est pourquoi deux zones ont la même typologie mais une des deux est située dans un prioritaire alors que l'autre ne l'est pas. D'autre part, la zone de plaine est proche de la zone prioritaire du littoral même si elle se trouve à l'intérieur des terres. Cette proximité permettra de comparer deux zones dans la même zone géographique même si dans les faits, l'occupation du sol sera sensiblement différente.

Chapitre 4

Résultats, analyse et discussion

4.1 Impacts cartographiés

4.1.1 Végétation

La figure suivante détaille le NDVI pour les quatre images sélectionnées. Les parties blanches à l'intérieur de la scène Sentinel correspondent aux nuages. L'observation du calcul de l'indice NDVI sur les quatre images Sentinel montre une chute flagrante de ce dernier après l'ouragan et une hausse de ce dernier dans la dernière image, soit 11 mois après l'ouragan. Les valeurs du NDVI comprises entre 0,4 et 0,9 correspondent généralement à la végétation. La chute du NDVI après l'ouragan pourrait s'expliquer par la baisse de l'activité photosynthétique. Le propos doit cependant être nuancé, car les nuages ont généralement un NDVI entre 0 et 0,3 et à cause de leur mauvaise détection par les outils automatiques, certains sont toujours présents sur les images.

Le recours à des zones d'études prioritaires permettra d'affiner les résultats et de proposer des hypothèses pour expliquer cette chute.

D'une manière générale, il y a une chute du NDVI dans l'image post-ouragan, même si la présence des nuages rend difficile la visualisation. Le propos doit être nuancé, certaines zones avec un haut taux d'indice sont en fait des nuages ou des ombres de nuages qui font varier le résultat en conséquence (Figure 4.1).

4.1.1.0.1 Zones d'études

L'étude se focalise sur la végétation, les occupations de sol de type sol, route, rivière, plage ont

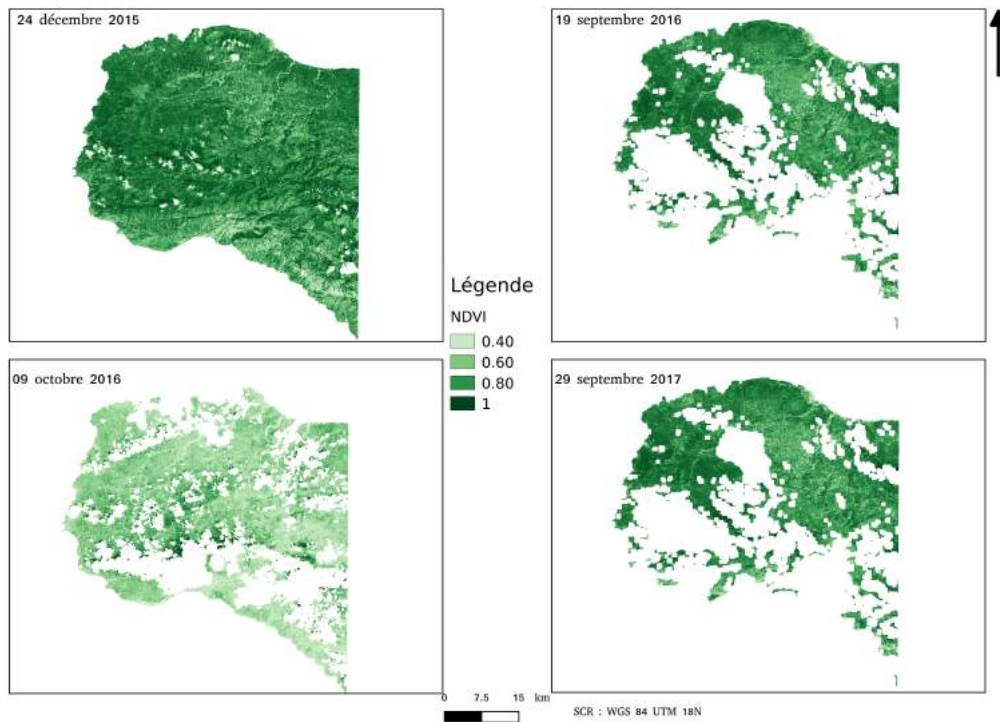


FIGURE 4.1 – Carte du NDVI pour les quatre images Sentinel 2

été enlevées pour les analyses futures même s'ils apparaissent dans la carte des occupations de sol et pour le calcul du pourcentage des occupations de sol.

4.1.1.0.2 NDVI

Le calcul du NDVI des différentes zones permet d'observer plus finement les évolutions qui sont en jeu (Figure 4.2). La comparaison des deux images pré-ouragan montrent un NDVI médian plus fort en septembre 2016 qu'en décembre 2015. Cette différence pourrait s'expliquer par les effets des saisons. Le mois de septembre est en pleine période de la saison humide alors qu'en décembre la saison sèche vient de commencer. Toute la végétation croît en septembre, les valeurs sont resserrées autour de la médiane. En décembre, le comportement de la végétation est fonction des espèces, c'est pourquoi les valeurs du NDVI sont plus éparées. La boîte à moustaches post-ouragan d'octobre montre une chute totale du NDVI. Un an après, le NDVI médian a augmenté, même si les valeurs restent très éparées, avec un écart entre le minimum et le maximum très important, la médiane étant proche du 1^{er} quartile .

4.1.1.1 Occupation de sol générale

— Zone Prioritaire

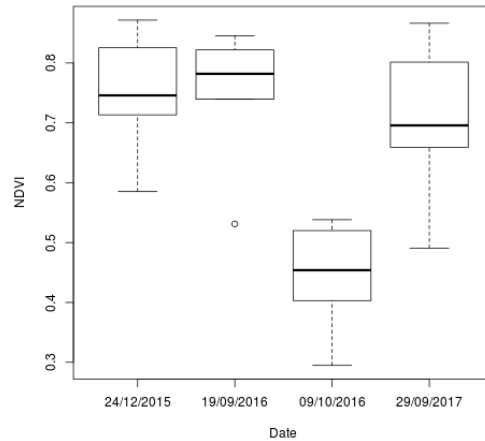


FIGURE 4.2 – Boîte à moustaches des indices de NDVI moyen pour l'ensemble des zones

- RivièreP : strate arborée (~ 22%), d'herbacées et d'arbustes pour 4 % pour les deux et 6 % d'urbain
- LittoralP : mangrove, strate arborée, herbacée et arbustive même si l'espace est très hétérogène, chaque strate occupant entre 10 et 20 % de l'espace total.
- Hors Prioritaire
 - Littoral sud : prédominance de la strate arbustive (45%), puis de la strate herbacée (35%), 9 % pour la strate arborée et les cultures.
 - Rivière : strate arborée (35%), d'arbustes (4%) et d'herbacées (1%).
 - Urbain (Jérémie) : uniquement utilisé pour le calcul du NDVI
 - Plaine : strate arbustive (41 %), strate arborée (35%) et 9 % d'herbacées (Figure 4.3)

-Hors Prioritaire

4.2 Évolution du NDVI temporellement et spatialement

La Figure 4.4 donne pour les quatre images et pour chacune des zones l'évolution du NDVI. La première information observable est la baisse du NDVI entre la date la plus proche pré-ouragan et la plus proche post-ouragan, globalement une chute par deux. La dernière date suivie, soit environ un an après l'ouragan montre la reprise de la végétation dans toutes les zones. Une zone se distingue néanmoins, celle de la plaine qui recouvre quasiment son niveau avant ouragan. Elle est suivie de près par la zone qui lui est la plus proche géographiquement parlant, la zone du littoralP. Les deux zones de la rivière et du sud ont également vu une reprise similaire même

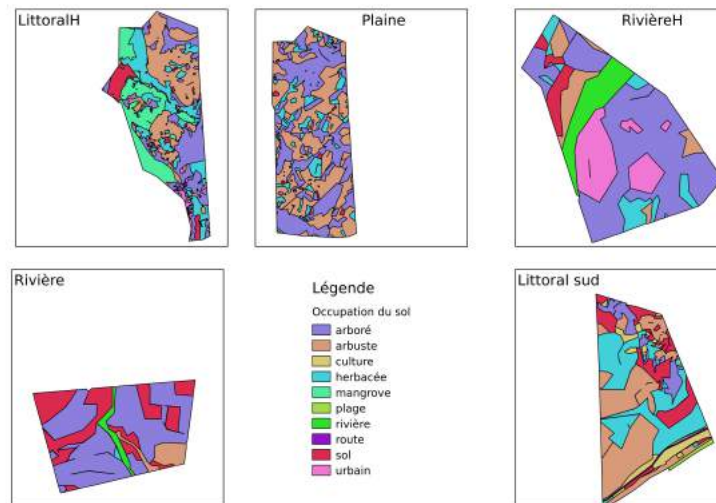


FIGURE 4.3 – Carte d’occupation de sol par zone (Lamure Tardieu, 2018)

si la zone de la rivière avait avant l’ouragan un indice plus élevé que la zone du sud. La rivièreP a un comportement particulier qu’il faudra sans doute analyser plus finement pour en évaluer les raisons. La zone de Jérémie a un NDVI qui diminuait déjà avant l’ouragan. Après l’ouragan, la reprise est effective mais de façon moins prononcée que pour les autres zones, qui est sans doute lié à l’urbanisation continue de cette ville, ce qui réduit l’espace laissé à la végétation. Les données issues du capteur MODIS, indiquent une chute de l’indice NDVI par deux . Il y a une forte reprise post-ouragan, mais de manière générale, en prenant un an d’écart, soit le mois de février, en 2016, l’indice est à 0,50 alors qu’en 2017, il peine à atteindre les 0,40.

4.2.1 Occupation du sol végétale de chaque zone

L’étude se focalise sur la végétation, les occupations de sol de type sol, route, rivière, plage ont été enlevées pour les analyses futures même s’ils apparaissent dans la carte des occupations de sol et pour le calcul du pourcentage des occupations de sol

4.2.1.0.1 Littoral sud et Littoral prioritaire

La zone littoralP se trouve dans la pointe de la Presqu’île très proche du passage de l’œil alors que la zone de littoral sud est située au sud de la Presqu’île. Les deux zones disposent des mêmes occupations de sol, sauf pour les cultures, disponibles uniquement dans le littoral sud et la mangrove disponible seulement dans le littoral prioritaire (Figure 4.5). Côtières, ces deux zones ont subi directement l’ouragan, d’autant plus que les cultures n’avaient pas de protection, étant directement le long de la côte. De manière générale, les zones urbaines ont

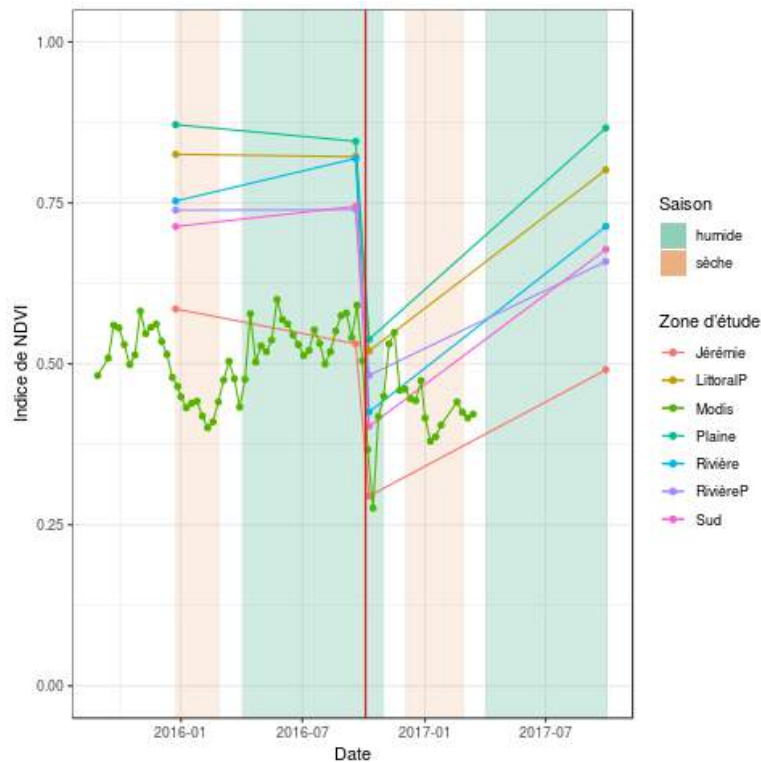


FIGURE 4.4 – Indices de NDVI après retrait des nuages

été impactées fortement quelque soit la zone. Les cultures sans protection ont été balayées . Les zones urbaines, très végétalisées ont connu la même situation. Les zones arborées ont été dans les deux zones bien frappées de même que la mangrove. Dans la zone du littoral prioritaire, la strate arbustive a été moins frappée que la strate arborée, la strate herbacée étant la moins perturbée. Globalement la zone du littoral sud a été plus frappée, elle a dû faire face à plusieurs types d'impacts comme les vents, par la submersion marine et par ruissellement des eaux depuis les bassins versants... En reprenant le graphique de suivi de l'indice ndvi sur les six zones d'études pour les quatre dates, il apparaît d'après l'indice NDVI de ces deux zones que la reprise de la végétation est effective et atteint quasiment son niveau d'avant ouragan pour le littoral prioritaire. Pour la zone du littoral sud, elle n'arrive pas à retrouver son niveau d'avant-ouragan. Cette différence peut être liée à différentes caractéristiques et notamment la part des différentes occupations dans cette zone.

4.2.1.0.2 Plaine et Littoral prioritaire

La zone de la plaine et celle du littoral prioritaire occupent la même zone géographique. Leurs occupations sont identiques, sauf pour la mangrove disponible seulement dans le littoral prioritaire (Figure 4.6). De façon globale, l'urbain est la première occupation du sol impactée suivant les zones. Les strates arborées, arbustives et herbacées ont été frappées dans les mêmes

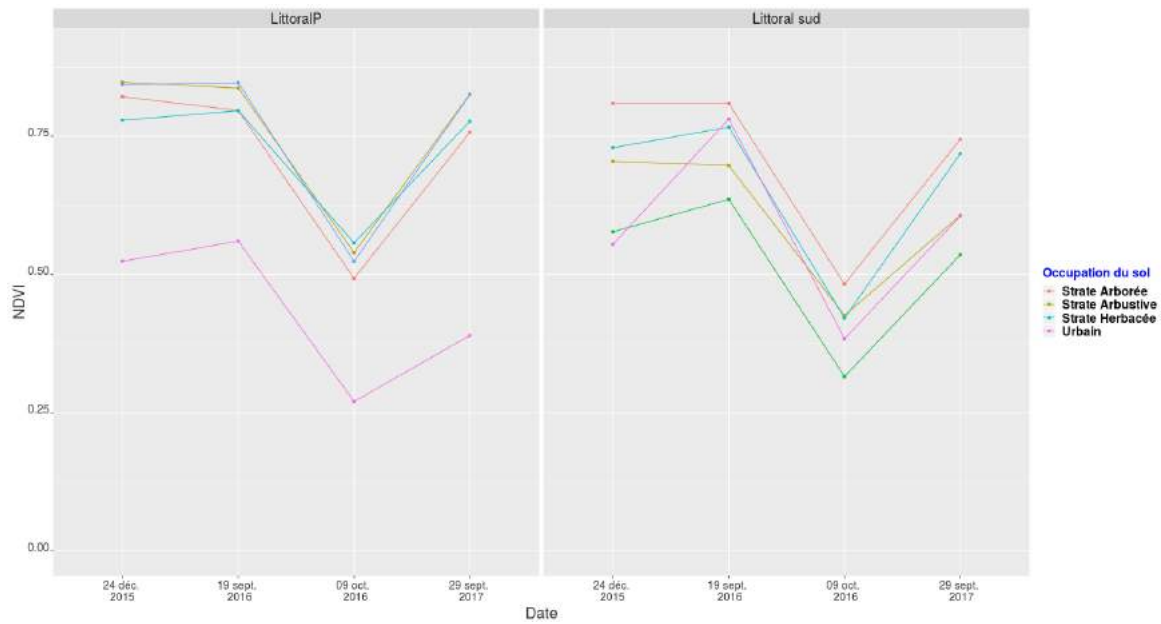


FIGURE 4.5 – Comparaison de l'évolution temporelle du NDVI entre les zones d'études littoral sud et littoral prioritaire

conditions dans les deux zones, ce qui paraît cohérent, les deux zones partagent le même espace et les mêmes conditions topographiques. La mangrove a été atteinte du même niveau que la strate arborée dans la zone du littoral prioritaire. En reprenant le graphique de suivi de l'évolution du ndvi, la reprise a repris dans les mêmes conditions, même si elle semble plus prononcée dans la plaine, l'atteinte ou le type d'occupations de sol prédominant joue un rôle dans l'évolution globale.

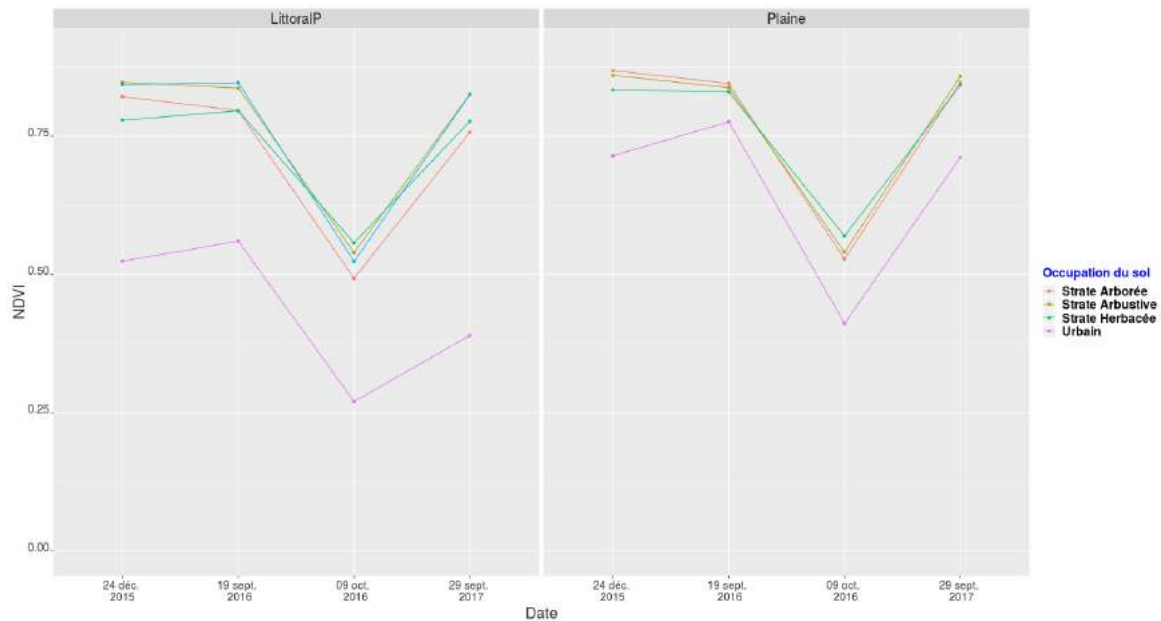


FIGURE 4.6 – Comparaison de l'évolution temporelle du NDVI entre les zones d'études plaine et littoral prioritaire

4.2.1.0.3 Rivière et Rivière prioritaire

Les deux zones occupent un espace dans la zone montagneuse à l'intérieur du Grand Sud. Leurs occupations de sol sont identiques à part l'urbain présent uniquement dans la rivière prioritaire (Figure 4.7). Les impacts ont été mieux ressentis dans la zone rivière, pour la strate arborée et la strate arbustive, alors que la zone herbacée a été fortement impactée. Il faudrait d'autres études pour comprendre l'impact au niveau des herbacées, l'occupation de sol et sa mauvaise interprétation pourrait expliquer ce résultat. Dans la rivière prioritaire, l'impact a été plus mesuré, sauf pour l'urbain. La reprise post-ouragan montre que la rivière prioritaire a été moins atteinte que la zone de rivière, mais qu'en plus la reprise a été moins marquée, cette zone n'arrivant pas à retrouver son niveau d'indice pré-ouragan. Une des explications pourrait être la présence de la zone urbanisée qui a évolué au détriment de la végétation. La zone de rivière n'a, elle, pas repris son niveau d'avant ouragan même si la courbe semble indiquer que la reprise progresse.

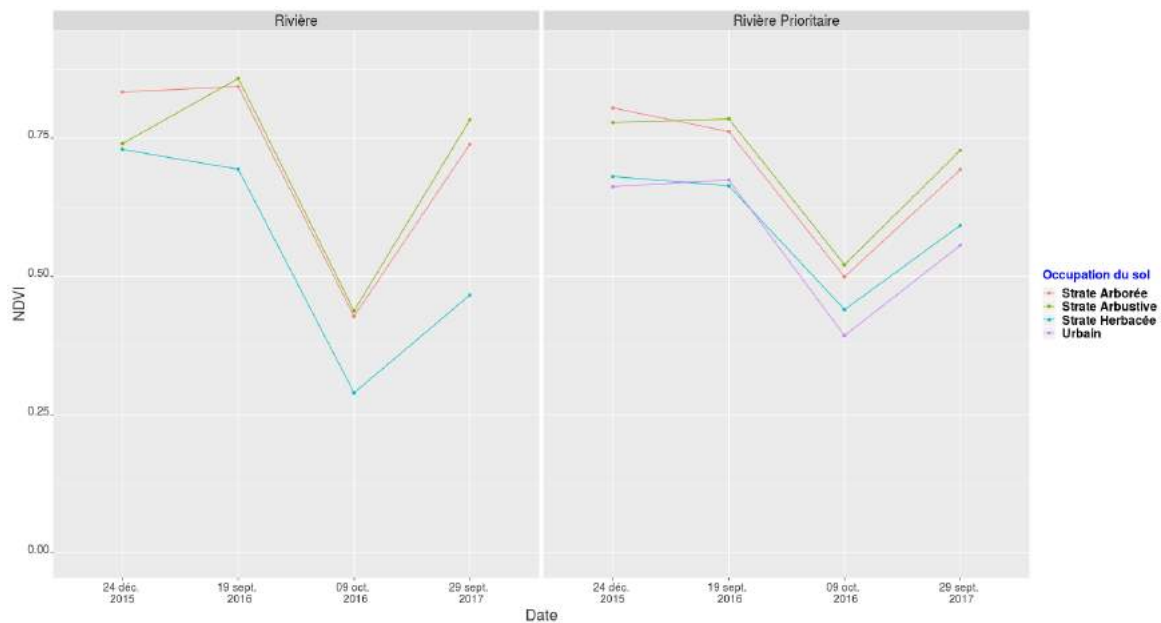


FIGURE 4.7 – Comparaison de l'évolution temporelle du NDVI entre les zones d'études des rivières prioritaire et non prioritaire

4.2.2 Urbain

L'urbain se caractérise par un mélange de zones bâties plus ou moins denses avec des zones végétales, parfois collé au bâti mais aussi parfois séparé du bâti. Les deux dates ont un an d'écart, l'estimation des impacts dus au seul ouragan sont malaisés.

4.2.2.1 Classification des Occupations de Sol : Kmeans

La classification Kmeans en 20 classes a bien fonctionné sur le pré-ouragan, les classes sont facilement interprétables par photo-interprétation et permettent une reclassification manuelle en six classes, enfin en quatre classes (Figure 4.8). Par contre, le bâti étant généralement couvert par de la végétation, les deux classes de végétation et bâti se superposent ensemble, ce qui rend difficile la séparation des deux classes, c'est pourquoi la classe végétation est très présente dans toute la carte. En 2016, par contre, la classification a été beaucoup plus difficile, la confusion des classes apparaît plus prononcée. Les classes végétation sont peu apparentes. Elles ont été remplacées par le bâti. La comparaison inter-date est dans ce cas réellement difficile y compris par photo-interprétation. Cinq classes ont été classées par l'algorithme comme impact. Pourtant en regardant plus précisément ces classes, elles sont en fait constituées de plusieurs types d'occupations de sol, l'algorithme ayant eu du mal à faire la distinction entre les classes. L'usage d'indices pourrait permettre de pallier à ces difficultés.

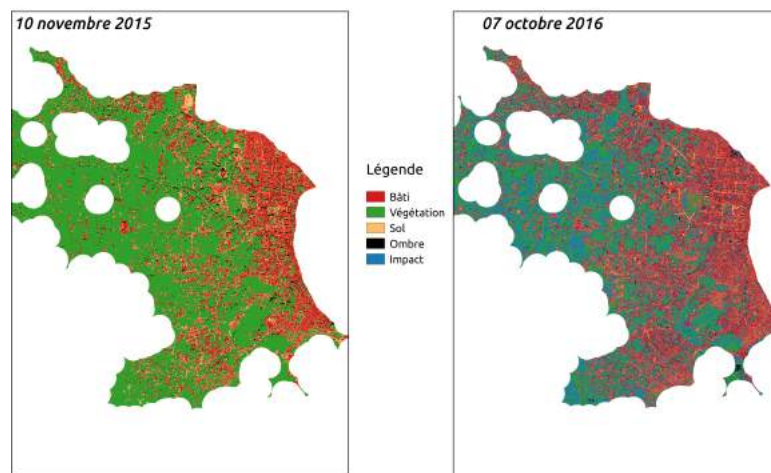


FIGURE 4.8 – Résultat de la classification Kmeans pré et post-ouragan (Lamure Tardieu, 2018)

L'analyse de la comparaison entre la classification Kmeans de 2016 et l'emprise urbaine (bâti) de 2015 montre une bonne classification du bâti existant dans la ville. En 2015, le classificateur n'a pas réussi à détecter tout le bâti, celui-ci étant couvert majoritairement par de la végétation couvrante (Figure 4.9).

4.2.2.2 Photo-interprétation et indices

L'étude de la trame urbaine, en particulier le Centre-Ville par les indices, de la cuirasse et de la brillance se sont révélés décevants à discriminer de façon évidente les impacts identifiés. Les

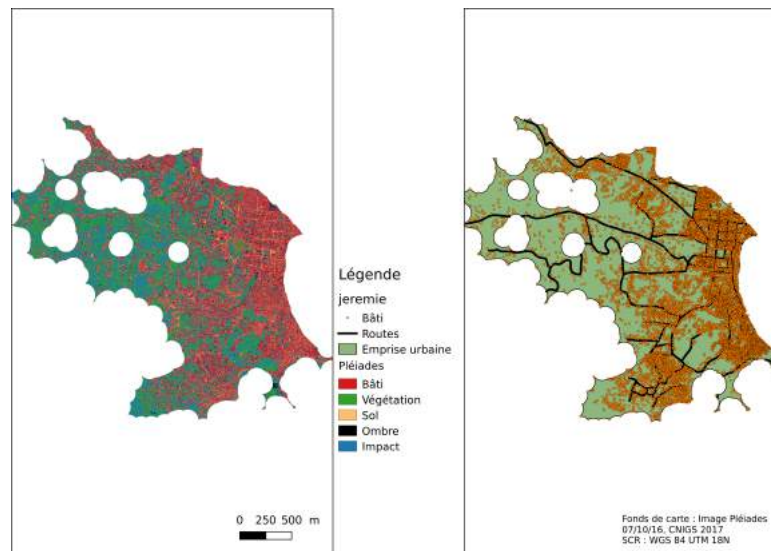


FIGURE 4.9 – Comparaison résultat Kmeans post-ouragan et emprise urbaine (Lamure Tardieu, 2018)

impacts sont plus difficilement identifiables dans la zone Habitat Précaire. Ils se confondent avec le reste du bâti, notamment les impacts en noir. Pour les impacts blancs, les surfaces en pixels sélectionnées sont souvent plus grandes, ce qui pose question sur les impacts directement liés à l'ouragan. Étant donné que l'image post-ouragan a quelques jours d'écart avec l'ouragan, la question de savoir si ces impacts découlent directement de l'ouragan est posée (Figure 4.14).

Les boîtes à moustaches (Figure 4.10) montrent qu'en 2015, les deux indices sont très resserrés autour de la médiane, il y a une homogénéité des signatures spectrales du bâti avant impact. Après impact, les boîtes sont très étendues, les différences de signatures spectrales sont importantes.

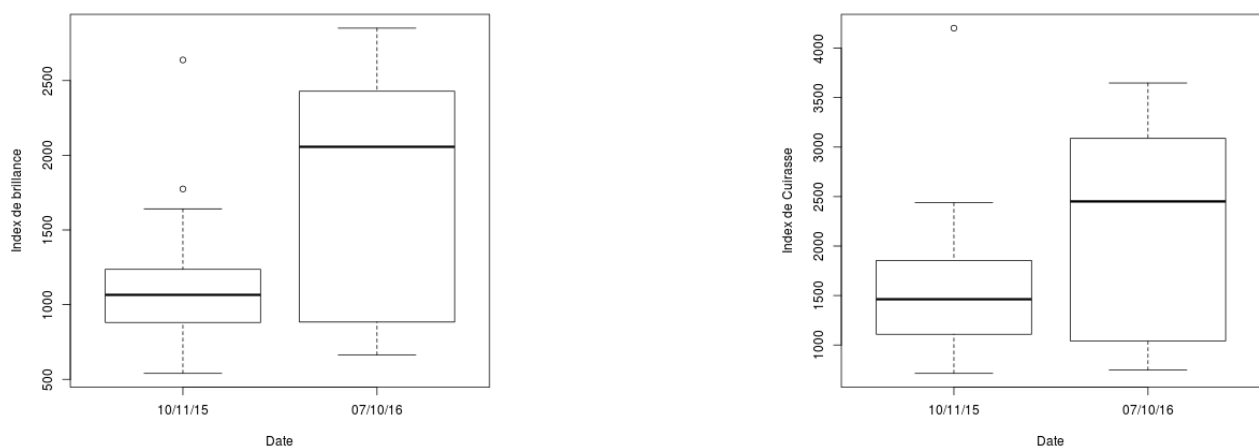


FIGURE 4.10 – Boîte à moustaches pour tous les dégâts

En coupant les échantillons en fonction de leur zone d'appartenance, les résultats restent dans la même tendance pour les deux indices (Figure 4.11). Dans la zone du centre urbain structuré, les valeurs sont très rapprochées autour de la médiane en 2015, alors qu'en 2016, les valeurs deviennent très hétérogènes. Le même comportement est constaté dans l'habitat précaire même si le plus grand écart dans les valeurs de 2015 peuvent expliquer en partie qu'en 2016, l'hétérogénéité soit plus grande que pour le centre urbain structuré. Les toitures sont en partie différentes entre les deux zones, sans doute une plus grande hétérogénéité des matériaux de construction ou du moins un mélange des matériaux. Dans la zone du centre urbain structuré, les impacts sont visibles même si 25 % des valeurs ont une réponse spectrale très différente des 75 % restants. Dans l'habitat précaire, l'hétérogénéité des impacts est plus importante, sans doute que l'impact a détruit des bâtis déjà précaires et non seulement les toits (Figure 4.11).

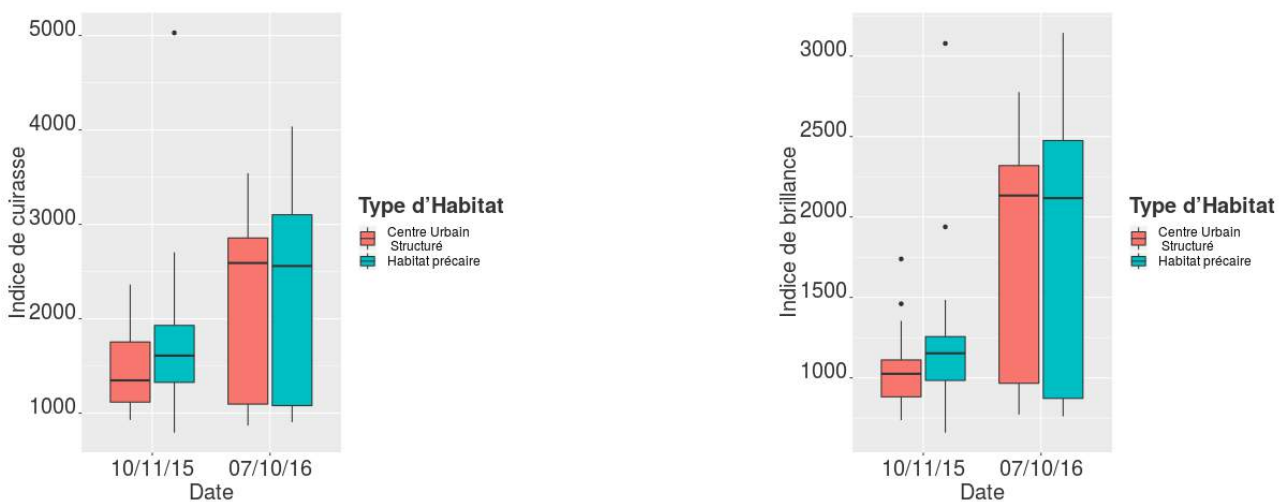


FIGURE 4.11 – Boîte à moustaches des indices par zone d'habitat

Les deux types d'impact identifiés sur le bâti ont une homogénéité quasiment identique en 2015. Il semblerait ainsi que le type de toiture soit identique dans les deux cas. Par contre, en 2016, deux comportements radicalement différents apparaissent. Les impacts noirs se resserrent tandis que les blancs ont des valeurs d'indice très différentes. Ces deux types d'impacts semblent caractériser ainsi deux impacts différents qu'il faudrait étudier plus attentivement (Figure 4.12).

Les analyses sur l'image proprement dite en reprenant les bornes identifiées (1^{er} et 3^e quartile) par les boîtes à moustaches n'ont pas permis de discriminer les dégâts, ni par couleur ni par zone spatiale, dans les deux indices (Figure 4.13 et Figure 4.14).

Néanmoins, à priori le type de dégât blanc se discrimine bien dans l'image. Mais dans la zone Habitat Précaire, il est difficile d'identifier précisément quel est l'impact et quelle est son étendue réelle (Figure 4.14). Il y a aussi présence de réverbération de lumière, qui complexifie

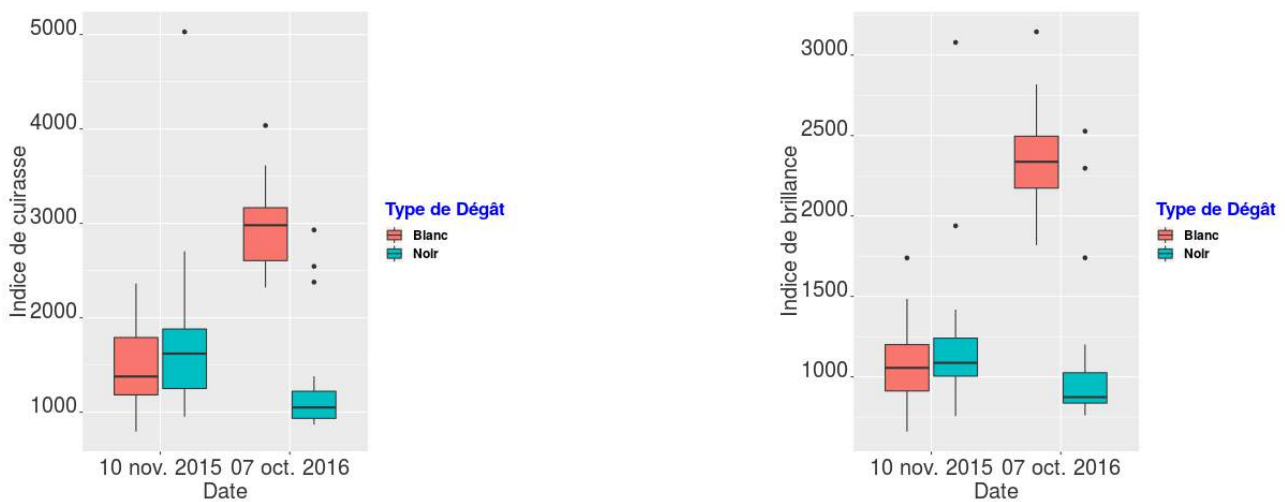


FIGURE 4.12 – Boîte à moustaches des indices par type de dégât

la détection des éléments.

4.3 Discussions

Les impacts observés dépendent de différentes causes. D'une manière générale, tant à Jérémie que dans nos zones d'études végétales, les différents traitements réalisés relèvent une chute de l'activité photosynthétique après l'ouragan (Hu et Smith 2018). L'état de la végétation calculé sur l'imagerie satellite Sentinel 2 sur les parties non ennuagées montre une chute de l'indice dans les images suivantes.

Les causes de cet effondrement sont diverses. Le premier élément, l'ouragan qui impacte des zones sur son passage. La vitesse du vent en est la principale cause même si le type d'occupation du sol touchée y joue un rôle non négligeable. Il faut distinguer les facteurs biotiques des facteurs abiotiques qui leur sont associées, tels que le sol ou le relief même si leur cumul est indispensable pour évaluer la véritable complexité des écosystèmes et leur adaptation.

La première déclinaison concerne les occupations de sols. Elles peuvent être séparées en différentes strates, la strate arborée, la strate arbustive et la strate herbacée et les zones humides. D'une manière générale, plus la plante est haute, plus elle est sensible au vent. Les arbres sont donc les premiers touchés, les arbres les plus hauts qui accaparent la canopée en la rendant dense, souffrent du passage du vent bien plus que les canopées plus éclatées. À l'inverse, les cultures sont souvent considérées comme endommagées (Wagner *et al.* 2012).

La seconde déclinaison tient aux différentes espèces végétales dans chacune de ces strates. La connaissance des différents types de forêts qu'elles soient de feuillus ou de pins est cruciale. Le

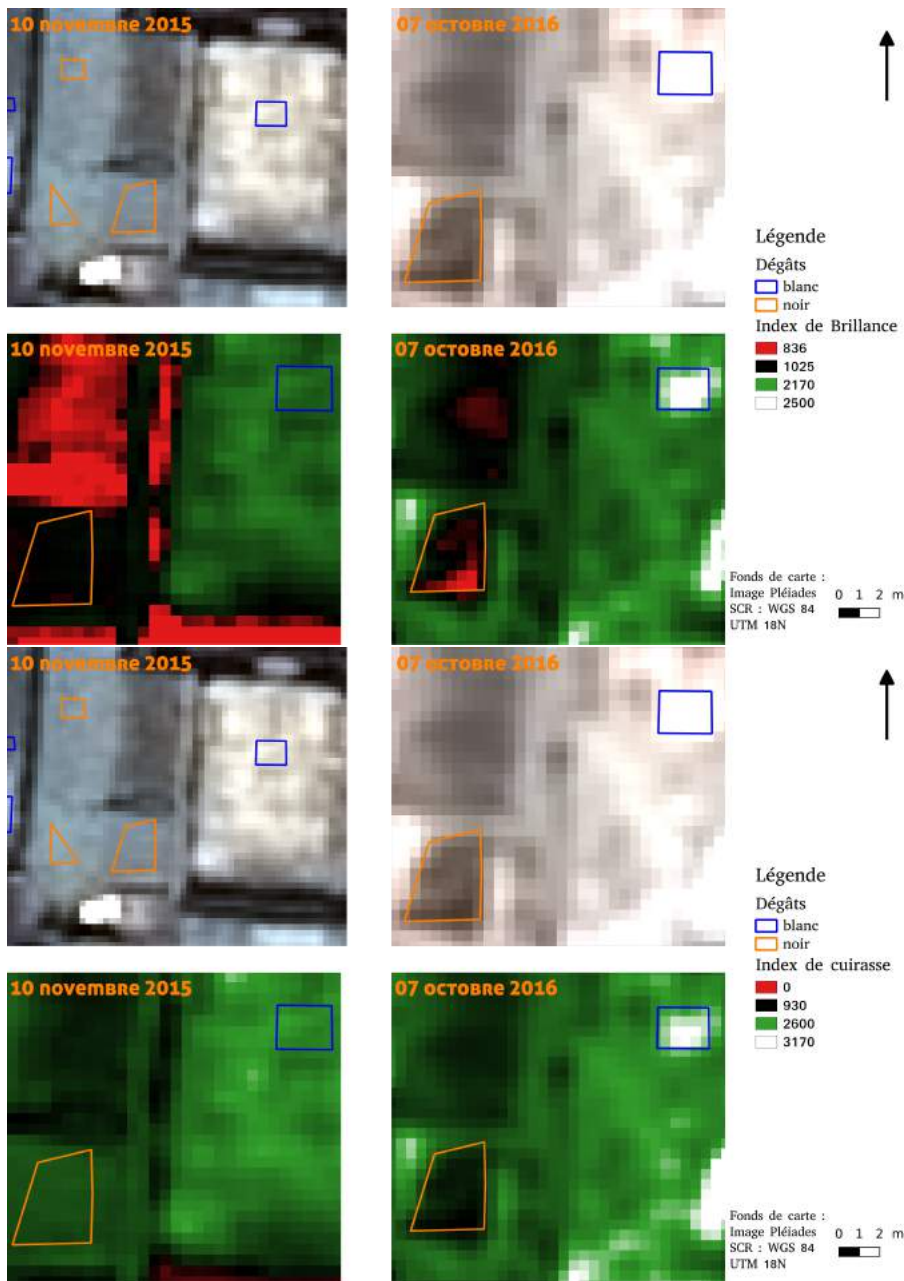


FIGURE 4.13 – Centre urbain structuré : dégâts identifiés (Indice de brillance et cuirasse)

type de forêts détermine les facteurs biotiques et abiotiques qui lui sont associés. En ce sens, les impacts dépendent du type d'espèce végétale. Chaque espèce a ses propres caractéristiques de défense et de réaction à l'ouragan. Caractéristiques « internes » au niveau du tronc, du système racinaire ou du houppier. Il a été ainsi démontré que la capacité ou le temps mis à la réfoliation variait (Brokaw et Walker 1991). Certains impacts sont invisibles et n'apparaissent que de nombreuses années après l'ouragan, comme la mort « programmée » des pins, constatée entre trois et cinq ans. Caractéristiques « externes », définies comme l'organisation du peuplement. La densité de peuplement, au sein de laquelle l'écartement ou l'éparpillement des plantes vont jouer un rôle pour filtrer ou accentuer l'impact du vent (Brokaw et Walker 1991). Les

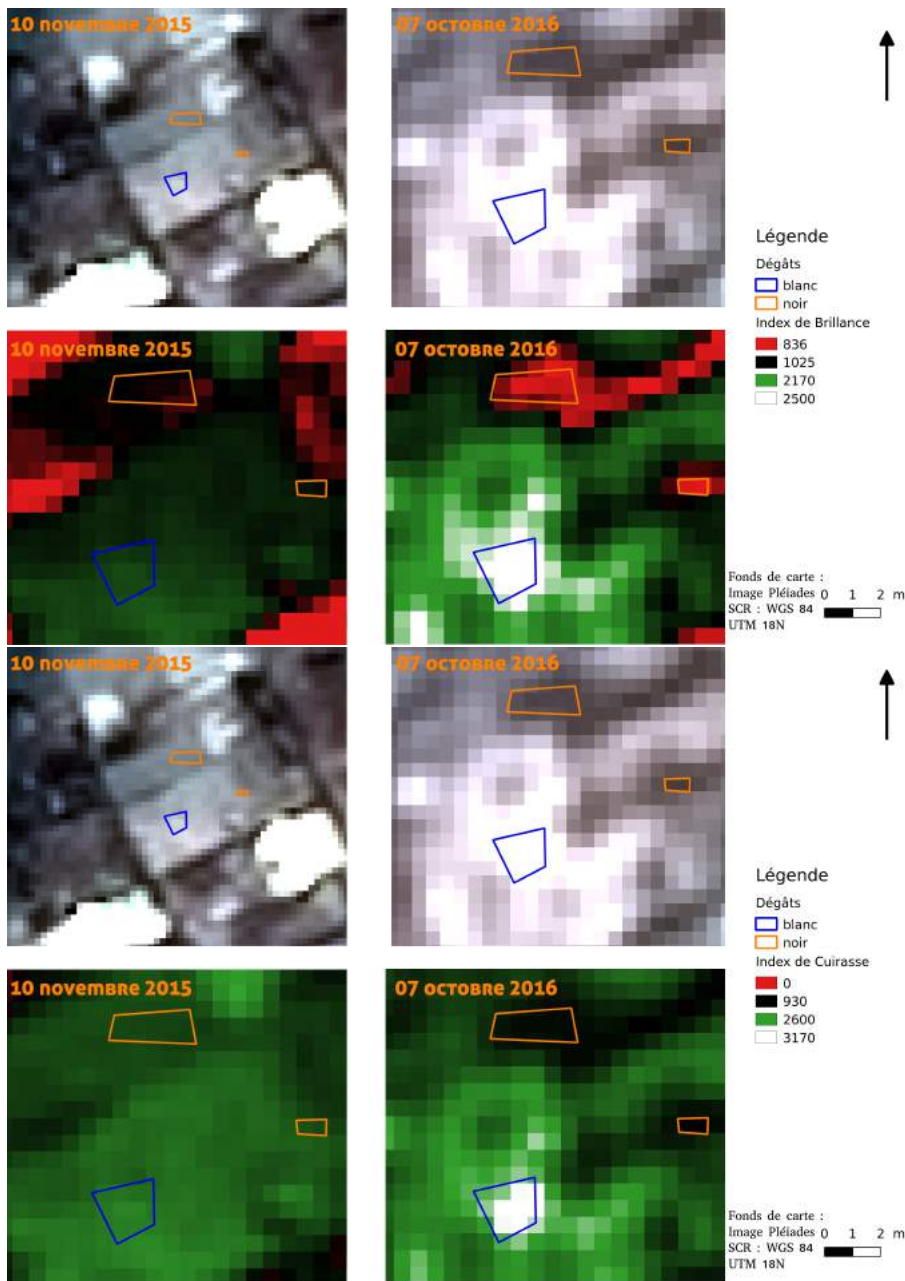


FIGURE 4.14 – Habitat Précaire : dégâts identifiés (Indice de brillance et cuirasse)

facteurs abiotiques comme la topographie, le type de sol ou les précipitations sont également à considérer. D'après (Negrón-Juárez *et al.* 2014), la topographie joue un rôle non négligeable dans les impacts, modifiant la vitesse du vent et sa direction (Negrón-Juárez *et al.* 2014) Les zones pentues très exposées à un vent changeant subissent les plus lourds dégâts. De la même façon, les forêts d'altitude et les arbres à feuilles persistantes, subissent de plus gros dommages que les arbres feuillus (Hu et Smith 2018). L'utilisation de modèles numériques de terrain pour analyser les zones d'études s'avère primordial pour évaluer l'impact supposé de la topographie dans les résultats observés, même si les dommages liés sont à chercher également au type d'espèce végétale qui peuplent ces espaces. L'importance des études de terrain par un suivi

temporel et spatial des impacts et de la reprise végétale, de même que la connaissance des occupations de sol sont déterminants pour mieux comprendre les interactions des écosystèmes, évaluer et quantifier les enjeux liés aux ouragans et prédire les risques futurs (Frolking *et al.* 2009).

À travers les différentes zones d'études y compris les prioritaires, il s'agissait de comparer ces milieux de vie et leurs occupations de sol pour en évaluer le comportement face à l'ouragan. La situation géographique des lieux d'études amène quelques réflexions. Les zones de rivières sont souvent fortement impactées à cause de la structure d'organisation des arbres entre eux (forêt ouverte), du type d'espèces qui s'y trouve mais également de l'instabilité et des changements de direction du vent dans ces espaces [Boose *et al.* (1994);(Powell *et al.* 1995)].

D'autre part, la distance à l'ouragan et plus particulièrement à l'œil est à considérer. Les vents les plus violents circulent dans le mur de l'ouragan, et les zones les plus éloignées sont susceptibles d'être moins impactées (Hu et Smith 2018).

L'usage de l'indice NDVI au sein de la télédétection facilite l'évaluation des impacts. Dans cette étude, cette évaluation montre une baisse de l'indice de manière globale. Cependant, cette baisse pour autant qu'elle existe ne peut se suffire à elle-même. Les causes des variations dans les impacts ne sauraient faire oublier une des limites de l'indice NDVI, dans les zones forestières. La canopée dense favorise sa saturation, la réflectance dans la bande rouge baissant fortement. Selon (Wang et Xu 2009), cela conduit à une mauvaise évaluation des dégâts mineurs dans les forêts très denses. L'usage d'indices tel que le RVI, ratio du proche infrarouge sur le rouge ou l'utilisation des bandes spectrales infrarouge court (SWIR) existantes dans Sentinel-2 dans l'indice NDII par exemple s'avère intéressant puisqu'ils permettent de distinguer des phénomènes d'impacts avec beaucoup plus de sensibilité (Wang *et al.* 2010 ; Wagner *et al.* 2012). Cette méconnaissance des occupations de sol rend ainsi l'évaluation « orpheline » puisqu'il est alors difficile d'avancer des hypothèses pour expliquer les variations d'évolution et leurs déterminants.

Haïti dispose d'un climat tropical, avec des précipitations presque toute l'année, un rayonnement solaire abondant, des alizés qui ventilent la température de l'air, tout ceci favorisant une activité biologique dynamique. La perturbation périodique par des catastrophes naturelles rend ces écosystèmes plus sensibles (Lugo *et al.* 2000). La résilience des différents types de forêts dépend en premier lieu de la taille des dommages infligés, comme le souligne (Vogt *et al.* 2012) pour les mangroves. Ces dommages vont contribuer à la modification de l'écosystème, qui va prendre différents états au fur et à mesure du temps. Le deuxième élément concerne la structure

végétative avant l'ouragan, puisque qu'à long terme, c'est sensiblement la même structure qui va réapparaître (Alongi 2008). Les chercheurs (Imbert et Portecop 2008) dans leur étude des forêts guadeloupéennes ont montré qu'en 12 ans, le nombre des espèces était resté sensiblement identique même si certaines espèces ont disparu et d'autres les ont remplacés. Au cours de cette période, les plantes invasives ou arbustives ont occupé l'espace de façon temporaire (2 ans), ce qui a permis la restauration de la litière et la croissance des plantes et leur mort (2 ans en plus) avant de retourner au type de végétation d'avant ouragan (nombre d'années indéterminé). L'ouragan qui est passé sur cette île a favorisé la richesse qualitative des espèces plus que la quantité d'espèces.

Du point de vue de l'urbain, les résultats apparaissent difficiles à appréhender. Les techniques utilisées n'ont pas permis de déterminer ou de définir des seuils de détection des impacts adéquats.

La classification Kmeans est fonctionnelle pré-ouragan, mais post-ouragan, la difficulté de classification augmente, à cause de la variété des occupations de sol, qui sont éparées et mal définies. La méconnaissance détaillée des structures urbanistiques apporte une difficulté supplémentaire de catégorisation de ces impacts.

L'utilisation d'indices tel que la cuirasse ou la brillance, chacun pour analyser certaines occupations de sol de façon plus spécifique, ne s'est pas révélé concluant sur tous les points. Les indices donnent des variations très importantes des dégâts, quelque soit le type de zone urbaine. Par contre, le type de dégât a une amplitude plus restreinte. L'utilisation de la classification orientée objet permettrait d'examiner les possibilités d'autres méthodes pour affiner les résultats (Alwis Pitts et So 2017). Par ailleurs, l'écart entre l'ouragan et la date de l'image satellite (3 jours) a permis aux populations victimes de commencer les réparations.

Par ailleurs, l'écart important entre les deux images (1 an) pour l'étude diachronique rend les éventuelles conclusions difficiles à appréhender sauf à considérer l'usage de la photo-interprétation comme méthode de classification principale (Alwis Pitts et So 2017).

4.4 Pertinence des résultats pour l'actualisation du Diagnostic territorial

Le diagnostic territorial porte un éclairage sur le territoire du Grand Sud. En tant qu'outil au service des acteurs du territoire, son actualisation permettra de suivre le développement de

cette région dans un souci de développement durable et inclusif pour les différentes populations et l'environnement, en prenant en compte les modifications apportées sur le territoire par les acteurs comme par l'espace géographique. L'étude menée ici tend à apporter sa pierre à l'édifice, en proposant des pistes de réflexion et de recherches, susceptibles d'être suivies par des actions concrètes qui visent une reconstruction durable, entre l'urbanisation galopante et le besoin de protection des espaces naturels.

Les résultats vont dans le même sens que le CNIGS (2017) qui a conclu à la reprise de la végétation de manière globale. Cependant plus que les résultats, il est important de comprendre les enjeux et les conséquences du passage de cet ouragan sur le devenir de cette région. Les différentes occupations réagissent chacune différemment au passage de cette catastrophe, il est donc important de s'assurer de l'évolution de ces occupations de sol et notamment la biodiversité et résilience, qui se met en place.

Le DTGS n'étudie pas l'impact de l'ouragan sur l'urbain. Il n'évalue pas non plus la reprise selon l'occupation du sol. La présente étude permet donc de compléter le DTGS.

4.5 Préconisations pour le suivi territorial post-ouragan

Cette étude permet de contribuer aux besoins d'information nécessaires pour assurer un suivi post-ouragan. Ce suivi fait appel à de nombreuses technologies et données, qui pour ne pas disparaître doivent s'accompagner d'actions mises en œuvre par les acteurs pour assurer une continuité des actions.

La mise en place d'équipes dédiées à ce type d'intervention, qui devrait s'accompagner de la mise en place de systèmes d'information et de renforcement de capacité des équipes de ces catastrophes s'avère nécessaire d'autant que le pays est confronté régulièrement à ce type de catastrophes. Il en est de même pour l'utilisation de données exogènes, par exemple la cartographie OpenStreetMap, qui doit se faire en concertation avec les contributeurs, afin d'améliorer la carte de façon plus durable, et permettre une réutilisation efficace de ces technologies et outils.

D'autre part, l'utilisation d'images radar permettrait de produire différents produits d'information complémentaires aux analyses issues d'images optiques, le radar n'étant pas sensible aux nuages. De même l'utilisation de l'imagerie Pléiades sur des zones végétales permettrait d'affiner les résultats observés par Sentinel 2.

L'analyse de la végétation comme de l'urbain ne pourra être complète et précise sans données de terrain. Il est nécessaire de mettre en place des sites d'études sur le long terme, pour analyser les causes et conséquences du passage de l'ouragan, ce qui permettrait par la suite de mieux comprendre les interactions qui se jouent entre espèces dans la recolonisation des espaces frappés. L'établissement de ces sites devrait s'accompagner de la création d'un observatoire, qui compilerait données de terrain, télédétection et systèmes d'information, et pourrait servir pour d'autres recherches.

Sur la végétation proprement dite, il est urgent de référencer « la cartographie des différents types de forêts (pinèdes naturelles, forêts sèches, mangroves, plantations) et les différents systèmes agroforestiers en fonction des différentes classes de couvert arboré », afin de pouvoir constituer un inventaire forestier national qui puisse servir dans le suivi post-ouragan (Bloesch 2016).

Pour finir, pour chaque catastrophe devrait être mis en place un système d'information avec toutes les données essentielles et leurs métadonnées, et faciliter les rencontres des acteurs intéressés par cette dynamique.

4.6 Perspectives

L'étude menée ici pourrait être approfondie tant au niveau du suivi de la végétation que du suivi des zones urbaines par des études ultérieures. En ce qui concerne la végétation, les études doivent intervenir à différentes échelles et pas de temps. Par exemple, une analyse plus précise des différentes occupations de sols, notamment les différentes espèces d'arbres sur une durée plus longue, en fonction de la topographie permettrait de renforcer les connaissances sur la résilience et l'évolution de la biodiversité. Au niveau de l'urbain, il est souhaitable de développer des activités de suivi de l'évolution de l'urbanisation et des types d'habitats existants, dans une perspective d'affiner notamment les coûts économiques réels des impacts. D'une manière générale, le recours à d'autres indices permettraient de confronter la pertinence et la justesse des impacts cartographiés avec les indices sélectionnés dans cette étude. Ce travail devrait servir d'une manière générale au développement de synergies et de réflexions sur le sujet entre les acteurs haïtiens et internationaux.

Conclusion

L'homme a toujours voulu connaître son environnement et son territoire afin de le contrôler et d'en assurer sa pérennité. Dans l'Antiquité, l'armée en était un des premiers utilisateurs au service d'une puissance publique, de conquête de nouveaux territoires et de contrôle a posteriori de ces territoires. De nos jours, l'armée reste toujours un acteur à part entière dans le développement et l'utilisation de ces technologies. D'après Union of Concerned Scientists (UCS), plus de 20 % des presque 2000 satellites référencés concerne en partie ou en totalité l'armée (Anon 2018). La mise à disposition de ces technologies a permis au public et en particulier aux chercheurs d'ouvrir au fur et à mesure de nouveaux champs de recherches.

En prenant appui sur le diagnostic territorial du grand sud, cette étude permet de renforcer les connaissances sur la région du Grand Sud, tant du point de la végétation que de l'urbain, plus particulièrement de la ville de Jérémie. Là où le diagnostic donne un aperçu général de la situation, cette étude par le recours à la télédétection apporte un éclairage plus précis sur les interactions qui se jouent entre les acteurs et l'espace géographique, que les interactions soient démultipliées et subies, par le passage de l'ouragan où qu'elles soient produites par ces acteurs.

Du point de vue de l'urbain, l'étude par le recours à des images Pléiades entre la situation pré et post-ouragan s'est révélée difficile à appréhender, à cause de la difficulté à identifier les impacts du bâti en dehors de la photo-interprétation. La sélection de certaines zones urbaines, avec des types d'habitats identifiés ou le recours à des indices qui font appel à des bandes différentes n'a pas facilité cette détection. Le DTGS n'étudie pas non plus l'impact de l'ouragan sur l'urbain. Là encore, notre travail ouvre une fenêtre sur ce domaine.

Au sujet de la végétation, les résultats à partir du traitement d'images Sentinel 2, avec deux dates pré ouragan et deux dates post ouragan se sont révélés prometteurs. Par contre, la méconnaissance des occupations de sol et de la topographie n'a pas permis de décrire avec précision les impacts et les raisons pour lesquelles certaines zones ont été plus impactées que d'autres. Dans le diagnostic post Matthew du CNIGS, la reprise n'a pas été évaluée selon le

type d'occupation de sol. Or, cette considération est importante pour décider des interventions à entreprendre pour stimuler la reprise. Ce travail apporte donc une contribution à ce niveau. Certes, cet aspect mérite un approfondissement qui n'entre pas dans le cadre du stage.

La télédétection vient en appui de ces besoins de compréhension du territoire toujours plus grand, et son utilisation amène de nouvelles interrogations et nouveaux défis, qu'il faut savoir analyser et interpréter. Cette étude permet d'apporter de nouvelles connaissances dans le sillon du diagnostic territorial. Ce dernier, enrichi, pourra servir pour renforcer la compréhension des enjeux qui rythment l'interaction entre les acteurs et l'espace géographique.

Chapitre 5

Annexes

5.1 images d'origine

5.2 Déroulement du stage

Le stage s'est déroulé sur un ordinateur Intel Xeon, avec 32 Gb de mémoire, une carte graphique AMD 2 Go et Linux comme système d'exploitation. Le langage de programmation OpenSource R et son interface graphique Rstudio ont été utilisés pour réaliser l'ensemble des traitements d'analyse d'images de même que la création des graphiques de visualisation des résultats. Le mémoire a été écrit sous RMarkdown avec le package bookdown. Certains travaux ont nécessité l'utilisation de logiciels cartographiques tels que Qgis ou la suite Orfeo Toolbox du CNES pour réaliser des traitements sur les images ou leur photo-interprétation.

Le stage s'est déroulé sur une période de six mois, avec différentes étapes (Figure 5.3) qui se sont chevauchées :

1. l'étude bibliographique, étape principale divisée en plusieurs sous-étapes a permis de dresser un état des lieux de la télédétection, adaptée à notre sujet d'étude. La lecture de nombreux articles ont permis de déterminer différentes méthodes applicables pour traiter notre sujet. Compte tenu des contraintes temporelles et techniques, il a fallu faire des choix judicieux. À partir de cette étude, les activités de réalisation du stage, de recherches des données, traitement puis analyse et interprétation ont pu être réalisées. En effet, la méthodologie de travail n'a été rendue possible qu'après détermination des principales méthodes de traitement à appliquer, en fonction des images disponibles.



FIGURE 5.1 – Images Pléiades utilisées pour la classification de l'urbain

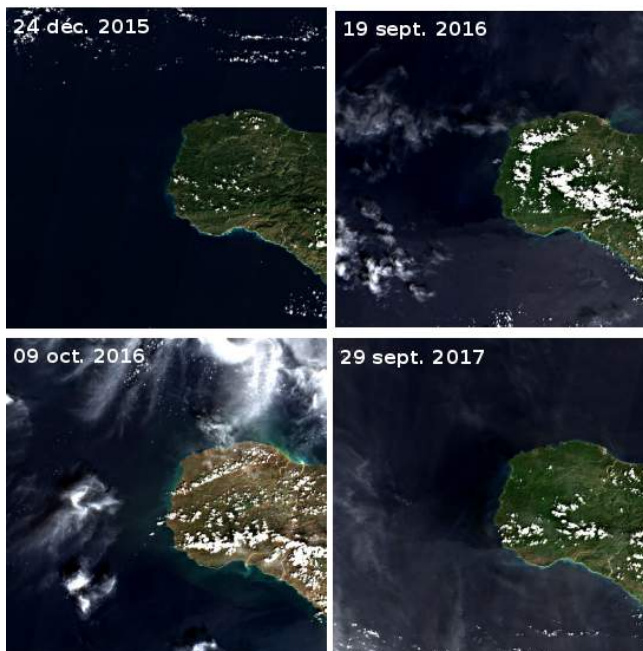


FIGURE 5.2 – Images Sentinel pour le suivi de la végétation

2. l'étape de traitement et d'analyse des données a nécessité de nombreux essais, qui ont conduit à des analyses et interprétations, qui se sont répétées, afin d'arriver à des résultats probants. L'usage de la classification Kmeans a nécessité de nombreux tests pour arriver à des interprétations acceptables, même si il reste à l'heure actuelle certaines interrogations.
3. la rédaction du document final en même temps que la réalisation des les traitements, analyse et interprétation des résultats ont permis de nourrir le dialogue et synthétiser les résultats trouvés.

Activités	1 ^{er} Mois	2 ^e Mois	3e Mois	4e Mois	5e Mois	6e Mois
Étude bibliographique						
État de l'art et plan détaillé des activités à entreprendre						
Détermination de la méthodologie de travail						
Recherche, collecte et archivage des données de l'étude (images et autres données)						
Traitement et analyse des données						
Interprétation et mise en forme des résultats						
Rédaction du document final						

FIGURE 5.3 – Plan de travail de la réalisation de l'étude

Chapitre 6

Bibliographie

ALLEN B.P., R.R. SHARITZ ET P.C. GOEBEL, 2005, « Twelve years post-hurricane liana dynamics in an old-growth southeastern floodplain forest », *Forest Ecology and Management*, 218, (1-3) : 259-269.

ALONGI D.M., 2008, « Mangrove forests : Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76, (1) : 1-13.

ALWIS PITTS D.A. DE ET E. SO, 2017, « Enhanced change detection index for disaster response, recovery assessment and monitoring of buildings and critical facilities—A case study for Muzaffarabad, Pakistan », *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63 : 167-177.

ANON, 2015, *Population totale de 18 ans et plus*. IHSI.

ANON, 2016, *Evaluation rapide des dommages et des pertes occasionnés par l'ouragan Matthew et éléments de réflexion pour le relèvement et la reconstruction*. Ministère de l'Économie et des Finances, 113pp.

ANON, 2017, *Diagnostic territorial du Grand-Sud*. Port-au-Prince, CNIGS.

ANON, 2018, « UCS Satellite Database »,

BALDRIDGE A., S. HOOK, C. GROVE ET G. RIVERA, 2009, « The ASTER spectral library version 2.0 », *Remote Sensing of Environment*, 113, (4) : 711-715.

BENFIELD A., 2017, *Hurricane Matthew Event Recap Report*.

BERNARDIN E.A., 1999, « La planification régionale en Haïti », *Cybergeo*.

BLOESCH D.U., 2016, « Possibilités de valorisation de produits forestiers et nécessité de

réhabilitation des écosystèmes après l'ouragan Matthew en Haïti », 32.

BOISSEZON H.D. ET C. DUBOIS, 2014, « Les données de télédétection dans la gestion des risques et des désastres en Haïti : la difficile rencontre entre expertise exogène et savoirs locaux », *CIST2014 - Fronts et frontières des sciences du territoire* : 7.

BOOSE E.R., D.R. FOSTER ET M. FLUET, 1994, « Hurricane Impacts to Tropical and Temperate Forest Landscapes », *Ecological Monographs*, 64, (4) : 369-400.

BROKAW N.V.L. ET L.R. WALKER, 1991, « Summary of the Effects of Caribbean Hurricanes on Vegetation », *Biotropica*, 23, (4) : 442.

CANNIZZO Z.J. ET B.D. GRIFFEN, 2018, « Habitat-specific impacts of Hurricane Matthew on a range-expanding species », *Hydrobiologia*, 809, (1) : 79-89.

CEOS ROOT, 2016, « CEOS Recovery Observatory Oversight Team (ROOT) Preliminary Draft for Discussion and Consultation Recovery Observatory Operations Plan Haiti Hurricane Matthew Recovery »,

COMMUNE DE JÉRÉMIE, 2016, *PLAN DE RELEVEMENT POST-CYCLONE*.

COMMUNE DE JÉRÉMIE, 2017, « Plan de Réduction des Risques Naturels en zone Urbaine »,

ELIANA KAMPF, MARY L . DURYEA, EDWARD F . GILMAN ET ASTRID DELGADO, 2007, « Assessing Hurricane-Damaged Trees and Deciding What to Do », *University of Florida*, (117).

FROLKING S., M.W. PALACE, D.B. CLARK, J.Q. CHAMBERS, H.H. SHUGART ET G.C. HURTT, 2009, « Forest disturbance and recovery : A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure : REMOTE SENSING OF FOREST DISTURBANCE », *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*, 114, (G2) : n/a-n/a.

GRÜNEWALD F., B. RENAUDIN, C. RAILLON, H. MAURY, J. GADREY ET K. HETTRICH, 2010, *CARTOGRAPHIE DES RISQUES NON INTENTIONNELS FUTURS*. URD, 96pp.

GUHA-SAPIR D.G.S., 2018, « EM-DAT : The Emergency Events Database »,

HU T. ET R. SMITH, 2018, « The Impact of Hurricane Maria on the Vegetation of Dominica and Puerto Rico Using Multispectral Remote Sensing », *Remote Sensing*, 10, (6) : 827.

IMBERT D. ET J. PORTECOP, 2008, « Hurricane disturbance and forest resilience : Assessing

structural vs. functional changes in a Caribbean dry forest », *Forest Ecology and Management*, 255, (8-9) : 3494-3501.

KINGFIELD D.M. ET K.M. DE BEURS, 2017, « Landsat Identification of Tornado Damage by Land Cover and an Evaluation of Damage Recovery in Forests », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56, (4) : 965-987.

LANDY CYPRIEN S., 2016, « Etude de l'évolution spatio-temporelle de la mangrove en Haïti par imagerie satellitaire et réflexion sur la mise au point d'indicateurs de dynamique. »,

LORENZO ORIOLI, 2012, « ANALYSE ET ETUDE DU CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DU PARC NATIONALE DE MACAYA - HAITI »,

LUGO A.E., C.S. ROGERS ET S.W. NIXON, 2000, « Hurricanes, Coral Reefs and Rainforests : Resistance, Ruin and Recovery in the Caribbean », *AMBIO : A Journal of the Human Environment*, 29, (2) : 106-114.

MONIQUE TERRIER, JEAN-PHILIPPE RANÇON, DIDIER BERTIL, FRÉDÉRIC CHÊNE, JEAN-FRANÇOIS DESPRATS, SOPHIE LECACHEUX, SYLVESTRE LE ROY, PHILIPPE STOLLSTEINER, OLIVIER BOUC ET MARC RAYNAL, 2017, *Atlas des menaces naturelles en Haïti*. BRGM, 114pp.

NEGRÓN-JUÁREZ R., D.B. BAKER, J.Q. CHAMBERS, G.C. HURTT ET S. GOOSEM, 2014, « Multi-scale sensitivity of Landsat and MODIS to forest disturbance associated with tropical cyclones », *Remote Sensing of Environment*, 140 : 679-689.

POWELL M.D., S.H. HOUSTON, M. FL ET I. ARES, 1995, « Real-time Damage Assessment in Hurricanes », 3.

RATHFON D., R. DAVIDSON, J. BEVINGTON, A. VICINI ET A. HILL, 2013, « Quantitative assessment of post-disaster housing recovery : a case study of Punta Gorda, Florida, after Hurricane Charley », *Disasters*, 37, (2) : 333-355.

STANTURF J.A., S.L. GOODRICK ET K.W. OUTCALT, 2007, « Disturbance and coastal forests : A strategic approach to forest management in hurricane impact zones », *Forest Ecology and Management*, 250, (1-2) : 119-135.

STEWART S.R., 2017, *Hurricane Matthew*. National Hurricane Center.

SYLVIE LARDON ET VINCENT PIVETEAU, 2005, « Méthodologie de diagnostic pour le projet de territoire : une approche par les modèles spatiaux », 80/2 : 75-90.

VOGT J., A. SKÓRA, I.C. FELLER, C. PIOUS, G. COLDREN ET U. BERGER, 2012,

« Investigating the role of impoundment and forest structure on the resistance and resilience of mangrove forests to hurricanes », *Aquatic Botany*, 97, (1) : 24-29.

WAGNER M.A., S.W. MYINT ET R.S. CERVENY, 2012, « Geospatial Assessment of Recovery Rates Following a Tornado Disaster », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, (11) : 4313-4322.

WANG F. ET Y. XU, 2009, « Comparison of remote sensing change detection techniques for assessing hurricane damage to forests », *Environmental monitoring and assessment*, 162 : 311-26.

WANG W., J.J. QU, X. HAO, Y. LIU ET J.A. STANTURF, 2010, « Post-hurricane forest damage assessment using satellite remote sensing », *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, (1) : 122-132.

ZENG H., T. LU, H. JENKINS, R. NEGRÓN-JUÁREZ ET J. XU, 2016, « Assessing Earthquake-Induced Tree Mortality in Temperate Forest Ecosystems : A Case Study from Wenchuan, China », *Remote Sensing*, 8 : 252.

ZHANG X., Y. WANG, H. JIANG ET X. WANG, 2013, « Remote-sensing assessment of forest damage by Typhoon Saomai and its related factors at landscape scale », *International Journal of Remote Sensing*, 34, (21) : 7874-7886.

ZIAD AL ACHKAR, ISAAC L. BAKER ET NATHANIEL A. RAYMOND, 2012, « Imagery Interpretation Guide : Assessing Wind Disaster Damage to Structures Harvard Humanitarian Initiative »,