

Johanna Bonnefoy

# Cartographie des écosystèmes côtiers de Mahahual au Mexique

-

Rapport de stage de  
2ème année

Période de stage du 30 mars au  
7 août 2020

Diplôme d'ingénieur agronome

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE AGRONO-  
MIQUE DE TOULOUSE

Avenue de l'Agrobiopole, BP32607, Auzeville  
Tolosane – 31326 Castanet-Tolosan





## Remerciements

Je souhaiterais en premier lieu remercier Cassiopea Doneys, Juliana Acero et toute l'équipe de Takata, pour m'avoir permis de travailler sur un sujet qui me tenait à cœur depuis longtemps, dans un cadre positif et propice à l'enrichissement professionnel et personnel. L'autonomie qu'ils m'ont laissée, la confiance qu'ils m'ont accordée et la gentillesse dont à fait preuve l'équipe m'a permis de faire avancer le projet et de livrer un travail qui, je l'espère, sera complet et utile pour la suite des travaux de Takata.

Mes seconds remerciements vont à l'ENSAT, qui donne à ses élèves une grande liberté dans le choix de leur stage de deuxième année, et grâce à qui j'ai pu concrétiser ce projet.

Enfin, je souhaite remercier Yannis de Pereyras et Léo Crespo, mes collaborateurs sur ce programme, pour avoir contribué à créer une atmosphère de travail chaleureuse et professionnelle, qui nous a permis à chacun de donner le meilleur de nous-même et de s'entraider constamment.

J'ai également une pensée profonde pour ma famille, et tout particulièrement pour mes parents, pour leur soutien sans failles et les sacrifices qu'ils ont dû parfois faire pour me permettre d'avancer dans une voie professionnelle qui me correspond.



## Table des figures

### Images et cartes

Figure 1 : Localisation de Mahahual et répartition spatiale des mangroves au niveau national.....	2
Figure 2 : Localisation de Mahahual et répartition spatiale des mangroves au niveau régional.....	2
Figure 3 : Localisation des zones d'études pour la cartographie des forêts de mangroves.....	10
Figure 4 : Raster virtuel obtenu avec les bandes 6 et 7 du satellite Landsat 8, rendu en couleurs à bandes multiples.....	13
Figure 5 : Résultat de la classification réalisée pour mettre en évidence les forêts de mangrove.....	14
Figure 6 : Représentation de l'emprise de la zone de prises illégales de terres.....	17
Figure 7 : Représentation des différents chemins frayés dans la mangrove, en lien probable avec les invasions.....	17
Figure 8 : Méthodes de bornage des chemins frayés dans la mangrove, observées sur le terrain.....	18
Figure 9 : Comparaison de la cartographie des forêts de mangrove réalisée lors de ce stage avec le zonage des mangroves présenté dans le PDU.....	18
Figure 10 : Carte interactive réalisée en phase IV du programme.....	20
Figure 11 : Carte interactive réalisée durant la phase actuelle, destinée au personnel de Takata («Map_Intern_july2020»).....	23

### Tables

Table 1 : Désignations des bandes spectrales du satellite Landsat 8, en particulier les bandes SWIR et panchromatique.....	11
Table 2 : Matrice de confusion associée à la classification réalisée.....	14

## Table des sigles

AGRRA : Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PDU : Plan de développement urbain

ROI : Region of Interest

SIG : Systèmes d'Information Géographique

SWIR : Short Wave Infrared



## Table des matières

Abstract.....	1
INTRODUCTION.....	3
I. Enjeux et objectifs de stage.....	6
1. La structure d'accueil.....	6
2. Le programme de cartographie des habitats côtiers.....	7
3. Les objectifs du stage.....	8
III. Validation de la cartographie des mangroves.....	9
1. Matériel et méthodes.....	
2. Résultats.....	13
IV. Étude des prises illégales de terres.....	16
1. Matériel et méthodes.....	16
2. Résultats.....	17
V. Mise à jour de la carte interactive.....	20
1. Matériel et méthodes.....	20
2. Résultats.....	21
VI. Retour sur expérience.....	24
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	25
Table des figures.....	27
Table des sigles.....	27
Bibliographie.....	28
Annexe 1 : Discrétisation mangrove/non-mangrove réalisée en phase IV du projet.....	29
Annexe 2 : Comparaison des sites d'études avec le raster virtuel obtenu et le résultat de la classification réalisée en phase V.....	30
Annexe 3 : Questionnaire réalisé par l'équipe collaboratrice venant compléter l'étude sur les prises illégales de terres.....	31
Annexe 4 : Visualisation de la map interne 2020 avec grilles AGRRA terrestre et marine.....	37



## Abstract

Mahahual is a village of about 1500 permanent inhabitants, located on the shores of the Caribbean Sea, in the state of Quintana Roo in eastern Mexico. A small fishing village until 50 years ago, Mahahual then attracted many tourists because of the presence of the Mesoamerican Coral Reef a few meters from the coast. But on land, the village is also surrounded by diverse natural habitats rich in biodiversity, such as mangrove forests, tropical forests and wetlands. Over the last 25 years, the strong and rapid urbanization of the area has notably led to the destruction of several hectares of forest and the progressive death of the reef. But this urbanization is only the first step in what is now the urban development plan for the city of Mahahual, under discussion since 2005, to make it a privileged tourist destination on the Caribbean coast of Mexico. In particular, the village is today facing a phenomenon of illegal invasions of certain forest lands, which are razed and then watched over by groups of individuals, in place of future building zones. Takata Research Center is an NGO based in Mahahual, whose goal is to study the impact of the massive tourist development of the area on the natural habitats present and to raise the awareness of the local population to environmental issues, in an attempt to reconcile urban development and conservation of natural spaces. This internship constituted phase V of the coastal ecosystem mapping program, carried out by Takata. The three main objectives of this training course were firstly to validate the mapping of the mangrove forests of Mahahual carried out during the previous phase of the project, using a drone. This mapping is important because mangroves are protected ecosystems in Mexico, so having a precise mapping of their extent allows us to verify that they remain untouched by the urban development plan, or if necessary, to have precise data to expose to developers to ask them to modify the urban project. The second objective was to study the phenomenon of land invasions, in order to understand the ins and outs of the phenomenon, so as to be able to anticipate and try to prevent or reduce the destruction of mangrove forests present on the urban development plan's right-of-way. The third and final objective of this training course was to update the interactive map available on the Takata website, which shows the extent of the different natural habitats in the area, as well as all the non-confidential data collected on the different programs of the center by the trainees and scientific collaborators, these data being centralized in an Excel file organized by grid according to the AGRRR protocol. Concerning the first objective, the mapping of mangroves carried out during the previous phase of the project lacked precision for our objectives. An illustrated methodology had been carried out at the beginning of the current training course in order to carry out a new mapping with the help of a UAV. However, in view of the global pandemic context and the machine and financial costs for the implementation of such a method, it was then decided to carry out a new mapping of mangrove forests using a supervised classification on the SWIR bands of the Landsat 8 satellite on an image of January 28, 2019. This method gave us good results, with an overall accuracy of 95.6%. The layer obtained could be added to the interactive map of the website. Concerning the land invasion phenomenon, our field studies and the data collected from the population allowed us to understand that the invaded lands were well delineated and corresponded to the projections of the 200x and 2018 urban development plan. Part of the mangrove forest is affected by this phenomenon, on private land. We were able to gather more information on this area in particular, which was set out in a confidential report submitted to the research center. Furthermore, the comparison of the mapping carried out using the supervised classification with the new version of the urban development plan released in August 2020, allowed us to see that an area of mangrove had been classified as tropical forest, which gives developers the possibility to build on this area. As the PDU is open to public consultation, we communicated this to the local authorities, the project's promoters, in order to try to convince them to reconsider the project in this area. Finally, the work of updating the interactive map available on the Takata website has led to the creation of two maps, one «internal», gathering all the data collected on the different programs, and a second one intended for online publication, gathering only the data accessible to the public. This map having an awareness objective, we also added data that we considered useful to the public, such as the prohibited fishing zone, or, for each habitat studied, a short text describing the habitat.



**Figure 1 : Localisation de Mahahual et répartition spatiale des mangroves au niveau national**

Source : Yannis de Pereyras



**Figure 2 : Localisation de Mahahual et répartition spatiale des mangroves au niveau national**

Source : Yannis de Pereyras

## INTRODUCTION

Au cours de ces trente dernières années, le milieu humide côtier tropical mangrove a vu son extension mondiale réduire de près de 20 %. En dépit d'un mouvement international prenant le sens d'une meilleure reconnaissance et conservation de cet écosystème, son taux annuel de déforestation (1 à 3 %) conserve aujourd'hui une dimension extrêmement préoccupante (Alongi, 2012). Pourtant, ses puissantes capacités de stabilisation des côtes, d'absorption de grandes quantités de CO<sub>2</sub> ou encore de réduction des impacts des épisodes climatiques extrêmes (tsunami, ouragans, montée du niveau de la mer) placent cet écosystème comme un élément tout à fait précieux au regard des enjeux posés par le changement climatique. Dans l'extrême sud-est du Mexique, au sein de l'état du Quintana Roo, la localité de Mahahual a enregistré un taux de recul annuel de sa mangrove de l'ordre de 0,95 % entre 1995 et 2007. Aujourd'hui, cette ancienne communauté de pêcheurs est au centre d'un projet touristique dont l'envergure menace le fonctionnement écologique des zones de mangroves présentes sur ce territoire.

Afin de définir notre objet d'étude, nous nous appuyerons sur la définition de la mangrove élaborée par (Capdeville, 2018) : « Les mangroves sont des forêts de vasières uniques, considérées comme des écosystèmes écotones, permettant le lien entre les milieux terrestres et marins. Situées dans la zone de balancement des marées, la zone intertidale, elles sont colonisées par des arbres spécifiques, les palétuviers, capables de croître en présence d'eau douce et/ou d'eau de mer. Les végétaux constituant la mangrove sont caractérisés par une forte tolérance aux eaux salées et saumâtres. ». À Mahahual, la mangrove s'est progressivement vue retirer toute interaction directe avec la mer. L'analyse des résultats obtenus nous a confirmé que le développement du réseau routier constitue la cause principale de l'isolement hydrologique par une modification structurelle de la topographie locale. Cela a également engendré le fractionnement de la mangrove en complexes forestiers indépendants, fragilisant notablement l'écosystème global. Cette fragilisation est actuellement renforcée par l'urbanisation rapide du village, qui a des conséquences directes et indirectes sur les habitats naturels, en particulier la pollution de leurs sols du fait de la mauvaise gestion des eaux usées, et la fragmentation des habitats. Depuis 2015, un phénomène de destruction de certaines aires naturelles derrière le village prend également de l'ampleur, car certains individus et groupes voient dans le plan de développement urbain une opportunité d'investissement foncier, et cherchent alors à acquérir des terres idéalement situées. Malgré ce constat, les interventions des autorités publiques mexicaines en charge du respect de la protection des mangroves restent extrêmement limitées. À Mahahual, ce contexte défavorable a motivé la prise d'initiative locale et associative. L'ONG Takata Research Center s'est ainsi portée volontaire afin d'initier le tout premier suivi des mangroves de Mahahual. Ayant conscience de l'état de dégradation avancé des mangroves, l'objectif sous-tendant ce suivi reste l'identification de zones problématiques dans un but de conservation et de restauration de l'habitat mangrove, qui est placé sous statut protégé au Mexique. Afin de répondre avec pertinence à cette problématique, trois sous-objectifs d'étude se sont logiquement dégagés pour cette cinquième phase du programme de cartographie porté par Takata : le premier est de disposer d'une cartographie précise des forêts de mangroves du village afin de pouvoir évaluer l'évolution spatiale de ces habitats dans le temps. Le second sera de porter un premier regard sur les impacts actuels et futurs du phénomène des invasions de terres sur les forêts de mangroves, afin de pouvoir prévenir ce phénomène dans les années à venir. L'actualisation des données géographiques partagées avec la communauté en vue de leur sensibilisation constituera notre sous-objectif final d'étude.

Afin d'aborder l'ensemble des points évoqués ci-dessus, nous présenterons dans un pre-

mier temps la structure d'accueil ainsi que les motivations derrière le programme de cartographie des écosystèmes côtiers. Cette partie débouchera ensuite sur une présentation plus détaillée des objectifs qui m'ont été fixés. Puis nous nous concentrerons sur la validation de la cartographie des forêts de mangrove réalisée en phase IV, et nous évaluerons les limites engendrées par nos choix méthodologiques et par le matériel d'analyse à disposition. Ensuite, nous présenterons les principaux aspects de notre étude sur les prises illégales de terres, qui a donné lieu au cours du stage à un rapport à part entière. Nous relaterons dans le présent rapport la démarche intellectuelle que nous avons suivie afin de tenter de répondre à notre problématique de base pour cette mission, à savoir «les mangroves sont-elles mises en danger par le phénomène croissant des invasions de terres à Mahahual ?». Pour finir, nous terminerons ce rapport en exposant nos travaux sur la mise à jour de la carte interactive présente sur le site internet de Takata, qui a pour objectifs principaux la centralisation des données recueillies sur les différents programmes, ainsi que le partage de ces informations à la communauté, dans un objectif de sensibilisation.



## II. Enjeux et objectifs de stage

### 1. La structure d'accueil

Takata Experience est une ONG fondée en 2016 par une équipe de scientifiques plongeurs, dont Cassiopea Doneys, biologiste marin, et directrice du centre. La structure est divisée en deux branches : le centre de plongée, et le centre de recherche (Takata Research Center). La volonté des fondateurs de créer la structure est née du constat de l'impact du tourisme sur les habitats naturels de Mahahual, et du manque d'actions concrètes du gouvernement. L'équipe de Takata s'est alors fixé comme objectif principal de ramener l'environnement au centre des activités humaines, tout en ayant un impact positif sur la communauté locale de Mahahual.

Le centre de recherche est d'abord né avec l'objectif de veiller à la protection du récif à travers l'étude des coraux, cependant l'évidente interrelation entre le récif et les habitats côtiers (en particulier la mangrove et l'herbier) a mené l'équipe à étudier également ces écosystèmes, en vue de leur conservation. Aujourd'hui, le centre de recherche est spécialisé en écologie marine, gestion durable des zones côtières et sensibilisation du public, et se donne pour mission de protéger la biodiversité marine au travers de la sensibilisation, de la recherche scientifique et de la conservation. Ses actions sont menées en collaboration la plus étroite possible avec la population locale et le gouvernement mexicain. Le personnel du centre de recherche se compose de 4 coordinateurs, qualifiés en écologie, gestion de l'environnement et conservation de la faune. Nous avons personnellement été encadrés par Juliana Acero, manager de projet sur les écosystèmes côtiers et marins. Leur mission est de superviser les nombreux stagiaires et bénévoles sur les différents programmes portés par Takata. Ceux-ci s'articulent autour de 4 domaines d'intervention qui sont la conservation de la faune et des écosystèmes en danger de disparition, restauration d'écosystèmes clés, ainsi que la conscientisation sociale et environnementale. Ces programmes sont au nombre de 8 : certification Eco-Mahahual, recyclage, suivi du récif, restauration des coraux, conservation des tortues, sensibilisation environnementale, cartographie des habitats, et perception sociale.

Les stagiaires et bénévoles qui travaillent sur ces différents programmes constituent une aide précieuse car le centre de recherche est actuellement entièrement financé grâce au centre de plongée et aux dons. Une demande de financement a été lancée auprès des autorités de l'état du Quintana Roo, afin d'investir dans du matériel dont le centre aurait besoin pour approfondir ou développer certaines de leurs recherches (mesures physico-chimiques de l'eau, drone pour survoler les mangroves qui sont difficilement accessibles au sol), mais cette demande n'a pas encore abouti.

## 2. Le programme de cartographie des habitats côtiers

Le projet de cartographie des habitats est né en 2017 de la volonté de prendre en compte le rôle de la mangrove dans le maintien de la santé du récif, et a comme vocation première de centraliser et analyser efficacement la grande diversité de facteurs influençant l'environnement côtier, dans le but de mieux le comprendre et de mieux le gérer. Ce programme est supervisé par Andrés Larrea, anthropologue et collaborateur scientifique de Takata Research Center, et peut être intégré par tout stagiaire ou volontaire disposant d'une formation en sciences environnementales et maîtrisant les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

Les données nécessaires sont d'abord collectées par télédétection via des images satellites et/ou récoltées sur le terrain, par des campagnes d'études scientifiques ou socio-économiques (en interrogeant la population par exemple). Parmi les données que le centre cherche à récolter, on peut citer par exemple la nature et la répartition des différents habitats côtiers, les sites de pêche ou de plongée, l'emprise des infrastructures urbaines. Ces données sont ensuite traitées et analysées via un logiciel de SIG, le plus souvent QGIS, qui est très complet et gratuit. Les résultats sont alors centralisés sur des cartes, créées également avec QGIS.

Le programme de cartographie mené par Takata est indispensable puisque qu'il constitue un appui pour les autres programmes du centre : les habitats et sites d'études sont utilisés notamment sur les programmes de suivi du récif, de conservation des tortues marines, ou encore de conservation des coraux. Les cartes permettent d'évaluer la situation générale du récif ainsi que les conditions de la biodiversité au sein de chaque site étudié tout en simplifiant l'analyse des pressions anthropiques. Le programme est aussi utile dans l'autre sens car il permet de centraliser les informations récoltées sur chaque programme. Pour cela, l'un des pans principaux de ce programme est d'améliorer et d'actualiser régulièrement la carte web interactive disponible sur le site internet de Takata. Il s'agit d'un outil de vulgarisation scientifique qui expose les conditions d'une variété de sites d'étude afin de transmettre les résultats des recherches à la communauté locale et internationale. C'est un outil puissant qui vient appuyer la volonté de Takata de sensibiliser la communauté à la protection de l'environnement et aux risques du tourisme de masse.

Après quatre premières phases correspondant successivement aux phases de télédétection de la zone, d'implémentation du protocole AGRRA, d'hydrographie et zonage de la forêt de mangrove, et de zonage de la forêt de mangrove en lien avec le PDU de Mahahual, ce stage constitue la phase V du projet. Celle-ci est également centrée sur l'étude de la mangrove, comme nous l'expliquerons dans la partie suivante.

Depuis sa naissance, ce programme a déjà permis de cartographier 12 km de côte. Les images satellites ont permis dans un premier temps de cartographier le récif jusqu'à 10m de profondeur. Des plongées de cartographie régulières permettent de cartographier les zones sous 10m de profondeur, et la cartographie des mangroves de Mahahual est plus que jamais nécessaire, alors que le plan de développement urbain menace plusieurs dizaines d'hectares de mangroves au cours des 30 prochaines années. Nos tâches dans ce programme sont directement reliées à cette problématique, comme nous allons maintenant l'expliquer.

### 3. Les objectifs du stage

La démographie croissante de Mahahual et la rapide anthropisation de la zone ont eu comme conséquence l'obsolescence prématurée des systèmes d'acheminement et de traitement des eaux usées du village. Les dernières analyses des eaux de la lagune et du récif ont montré qu'une part non négligeable des eaux usées (et notamment des eaux noires) étaient rejetées dans le milieu et perturbait l'équilibre physico-chimique du récif. De plus, cette même anthropisation ainsi que le Plan de Développement Urbain en discussion depuis 2005 à Mahahual ont déjà détruit pas moins de 57 hectares en un an, et menacent encore d'importantes surfaces. Les problèmes de destruction des mangroves liées aux prises illégales de terres que connaît Mahahual sont les prémices frappants de ce que pourraient connaître ces habitats naturels dans les années à venir.

En conséquences, les objectifs qui nous ont été assignés pour cette phase de projet en début de stage sont les suivants:

- Collecte et analyse d'échantillons d'eau de récif pour créer une base de données cartographique de la qualité de l'eau (nitrates, nitrites et phosphates).
- Valider les résultats de la cartographie de l'habitat des mangroves (phase IV du projet) avec suivi des transects, dans le but d'obtenir une étendue précise des zones de mangroves et vérifier leur bonne préservation.
- Poursuivre le développement de l'outil de carte Web interactive (outil de la communication scientifique), et la mettre à jour en y ajoutant les derniers résultats récoltés sur les différents programmes.

Cependant, la situation exceptionnelle avec l'apparition du coronavirus a entraîné une suppression des sorties en mer, et des difficultés d'interactions avec la population locale, ainsi qu'avec les autorités administratives. En conséquence, les objectifs ont été revus et adaptés à la situation que nous vivions, et les réels objectifs ont été les suivants :

- Valider les résultats de la cartographie de l'habitat des mangroves (phase IV du projet) avec des transects, dans le but d'obtenir une étendue précise des zones de mangroves et vérifier leur bonne préservation.
- Confronter l'étendue des invasions avec l'étendue des forêts de mangroves afin de déterminer si les mangroves sont menacées par ces invasions, et tenter de comprendre les mécanismes derrière ces prises illégales de terres afin d'émettre des hypothèses sur l'avenir des mangroves de Mahahual.
- Poursuivre le développement de l'outil de carte Web interactive (outil de la communication scientifique), et la mettre à jour en y ajoutant les derniers résultats récoltés sur les différents programmes.

Nous présenterons donc dans le présent rapport les éléments méthodologiques importants et les principaux résultats de la mission de cartographie des forêts de mangroves, puis de l'étude du phénomène des prises illégales de terres, avant d'aborder la mission de développement de la carte web interactive.

## III. Validation de la cartographie des mangroves

### 1. Matériel et méthodes

#### a. Présentation de l'objectif

Les mangroves sont un écosystème essentiel à la vie du récif, c'est pourquoi le programme de cartographie que nous menons se concentre aujourd'hui particulièrement sur ce type de forêt. Par ailleurs, les mangroves du Mexique sont protégés notamment par la loi NOM-022-SERMANAT 2003 et par l'article 60 TER de la Loi Générale sur la Vie Sauvage, qui interdit toute action ou œuvre qui modifierait l'intégralité du fonctionnement de la zone de mangroves, ou qui provoquerait des changements dans les caractéristiques ou les services écologiques prodigués, à moins que celle-ci ne constitue une œuvre de conservation, d'investigation ou de restauration. Aujourd'hui, le plan de développement urbain prévoit une très forte urbanisation de la zone, et il est important pour nous de vérifier que les mangroves ne seront pas sacrifiées au profit d'infrastructures touristiques. C'est pourquoi il nous est important d'avoir une cartographie précise des zones de mangroves, pour pouvoir la comparer avec celle exposée dans le PDU, et avec les zones destinées à l'urbanisation. Lors de la phase IV du projet de cartographie, une première discrétisation (disponible en annexe 1) des forêts en "mangrove" et "non-mangrove" avait déjà été réalisée sur une image satellite multispectrale Landsat 8 de 30 mètres de résolution, en utilisant comme critères de discrétisation un calcul de NDVI et la limite d'altitude de 7 mètres au dessus du niveau de la mer comme limite maximum de présence des mangroves. Ces critères avaient été fixés d'après un raisonnement basé sur des ressources bibliographiques, des études de terrain et une interprétation photographique. Notre objectif initial était donc de vérifier cette zonation en réalisant des transects de vérification à l'aide d'un drone. une méthodologie illustrée a été créée à cet effet durant cette phase V du projet, et est disponible sur le drive du programme de cartographie, ou sur demande. Cependant durant nos enquêtes de terrain, nous nous sommes aperçus que certaines zones étaient classifiées comme mangroves dans la discrétisation réalisée en phase IV, alors qu'il s'agissait dans la réalité de zones de forêt tropicale. Les critères de discrétisation cités ci-dessus ont pu ne pas être idéaux pour différencier les zones de mangroves et celles recouvertes d'un autre type de végétation. Nous avons donc estimé plus précis de réaliser un nouvelle discrétisation à l'aide d'une autre méthode, afin d'obtenir une cartographie la plus proche possible de la zonation réelle.

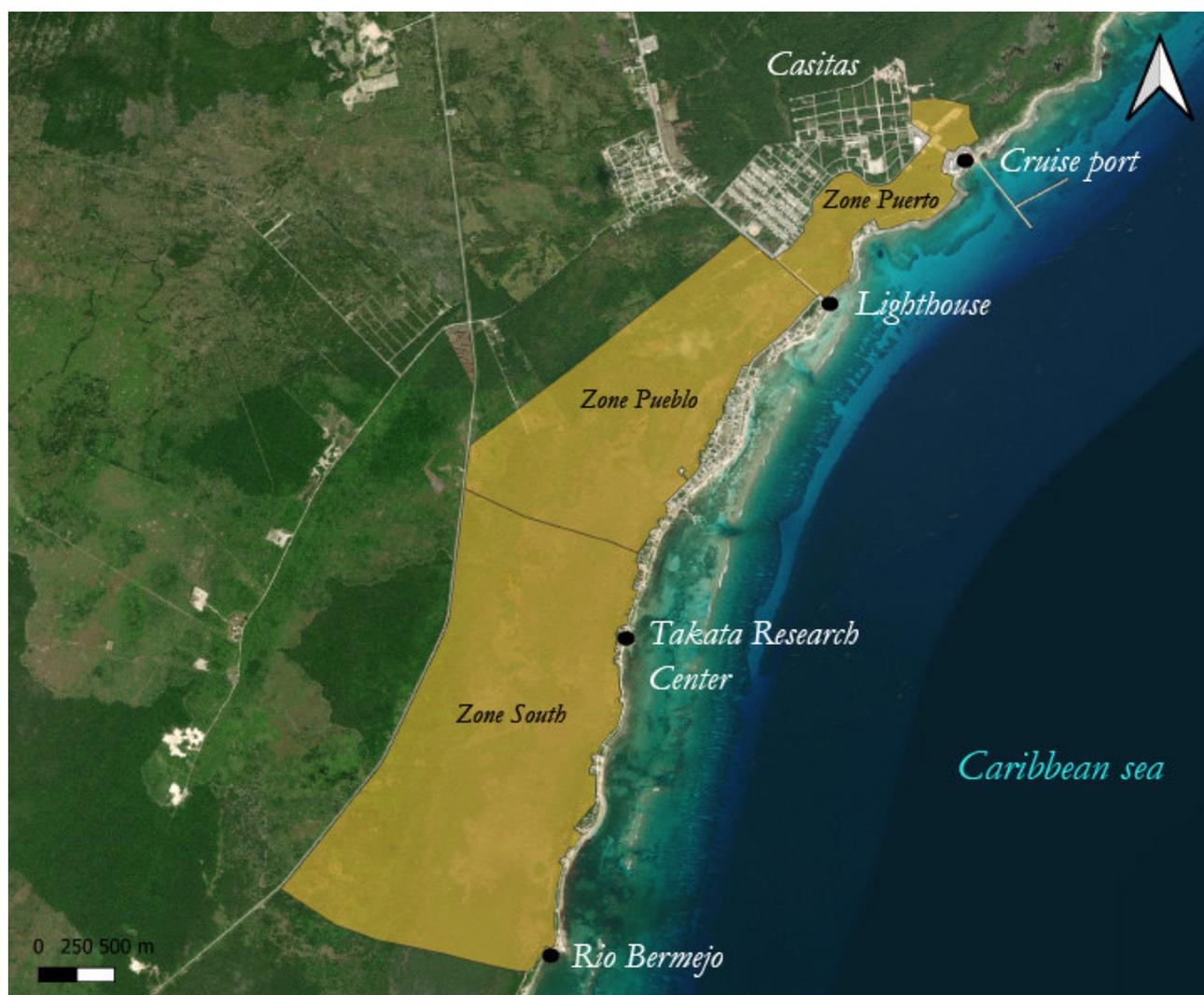
La première étape pour l'exécution d'une nouvelle méthode de détermination des aires de mangroves a donc été d'étudier la littérature scientifique. Nos recherches nous ont permis de comprendre que les feuilles des palétuviers composant les forêts de mangroves contiennent significativement plus d'eau que les feuilles des arbres composant les autres types de forêts que l'on trouve à Mahahual (forêts tropicales, palmeraie, prairie et marais). Cette donnée essentielle a induit un raisonnement autour des bandes SWIR du satellite. En effet, la bande Moyen Infrarouge est sensible à l'humidité du milieu : une bande d'absorption hydrique est centrée sur 1,9  $\mu\text{m}$  et traduit, en cas de diminution de réflectance, le contenu des feuilles en eau (Taureau, F., & Robin, M. (2015), en ligne).

#### b. Description des données

##### a. Zones d'étude

Pour ce faire, une zone d'étude a été délimitée (figure 3) parallèlement au littoral, allant du port de croisière *Costa Maya* au Nord (Voir *Cruise port* sur la figure 3), au cours d'eau *Rio Bermejo*

au Sud. L'emprise délimitée correspondant aux zones les plus menacées par le plan de développement urbain, et composées essentiellement de mangroves. Cette zone d'étude se divise en trois sous-unités : la première, la zone *Puerto* (*Port* en français), est encadrée par le port de croisière et la plus grande avenue du village, menant au phare (voir *Lighthouse* sur la figure 3), l'avenue *El Cafetal-Mahahual*. Perpendiculairement au littoral, celle-ci est contenue entre le lotissement *Casitas* et la mer, ce qui en fait une zone physiquement isolée des autres. La zone *Pueblo* (*Village* en français), est la zone se situant derrière le village historique de Mahahual, correspondant encore aujourd'hui au centre-ville touristique, et à la partie du littoral la plus urbanisée. Cette zone est la plus touchée par les pressions foncières et les invasions de terres. Enfin, la zone *South* (*Sud* en français), correspond à la zone la plus sauvage, et la moins impactée par les activités humaines à l'heure actuelle.



**Figure 3 : Localisation des zones d'études pour la cartographie des forêts de mangroves**

Source : élaboration personnelle

### b. Données satellites

Pour mener à bien cette mission, nous avons choisi d'utiliser les images du satellite héliosynchrone Landsat 8, qui sont disponibles gratuitement sur le site Earth Explorer (USGS, en ligne), et souvent utilisées dans les domaines des sciences et de l'agriculture. Ce satellite a été lancé en février 2013 par la NASA, et couvre la terre tous les 16 jours, en capturant des scènes de 185 km x 180 km. Il s'agit d'un satellite multispectral, composé de huit bandes spectrales de résolution 30 mètres, d'un canal panchromatique de résolution 15 mètres et de deux bandes thermiques, de résolution 60 mètres (USGS, en ligne). Les informations radiométriques de ces bandes sont données dans la table

2 ci-dessous. Nous prêterons une attention particulière ici au canal panchromatique, et aux bandes 6 et 7, correspondant au proche infrarouge (*Short-Wave Infrared* en anglais, ou SWIR).

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)  Launched February 11, 2013	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

**Table 1 : Désignations des bandes spectrales du satellite Landsat 8, en particulier les bandes SWIR et panchromatique**

Source : USGS, en ligne

Ce satellite, de moyenne résolution, est adéquat pour ce type de mission, dans laquelle il s'agit de déterminer la présence ou non de mangroves. En effet, pour discerner les mangroves des autres types de végétation, sans nécessairement discerner les types de mangroves, il n'est pas recommandé d'avoir recours à des images de très haute résolution, qui présentent des artefacts nuisant à la qualité de la classification (Taureau (2017), en ligne). L'utilisation d'images de moyenne résolution suffit, et celles-ci ont un volume moindre, ce qui facilite leur traitement. Nous verrons dans la partie suivante la méthode employée afin d'améliorer la résolution de l'image utilisée tout en conservant une résolution moyenne, adaptée à la mission.

Concernant le jeu d'images, nous avons appliqué notre méthode (une fois celle-ci testée et jugée satisfaisante) sur quatre images correspondant à quatre dates espacées dans l'année : Octobre (fin de saison humide, début de saison sèche), Janvier (milieu de saison sèche), Avril (fin de saison sèche, début de saison humide), et Juillet (milieu de saison humide). L'image offrant la meilleure précision de la méthode a été retenue et sera présentée dans la partie *Résultats* de ce rapport.

## c. Protocole de pré-traitement

### a. Les images satellites

Notre première opération de pré-traitement a été la création d'un raster virtuel avec les bandes SWIR (bandes 6 et 7) du satellite Landsat 8. Cette manipulation permet d'assembler les images obtenues dans les bandes spectrales 6 et 7 afin de créer un seul fichier raster sur lequel travailler, correspondant à une image composite des deux bandes originales. L'algorithme de rééchantillonnage utilisé est l'algorithme du plus proche voisin, particulièrement adaptée aux données discrètes et destinées à une classification d'utilisation des sols, puisque cet algorithme ne modifie pas les données en entrée et ne crée pas de nouvelles valeurs (ESRI, en ligne).

Nous avons ensuite appliqué un processus de fusion entre la bande panchromatique haute résolution et le raster virtuel précédemment créé, afin d'obtenir une seule image en couleurs, de résolution 15 mètres, à l'aide de l'opération Pansharping de la bibliothèque GDAL. En effet, la résolution de 30 mètres est la meilleure que nous puissions obtenir gratuitement pour le satellite Landsat 8. Il s'agit d'une résolution moyenne, qui est la gamme adaptée pour notre objectif, cependant une résolution de 15 mètres représente un meilleur choix, puisque l'on reste dans une résolution moyenne, tout en augmentant le niveau de détail de l'image, et donc la précision de la classification obtenue. Là encore nous avons utilisé l'algorithme du plus proche voisin. L'algorithme de fusion disponible avec cette commande est l'algorithme de Brovey.

Les opérations précédentes ainsi que les opérations de traitement appliquées ensuite ont été testées sur les images brutes et sur les images auxquelles nous avons appliqué des corrections radiométriques et géométriques. N'ayant pas observé de différences dans l'analyse, ni dans la précision finale de la classification, ce sont les images brutes qui ont été utilisées.

### b. Réalisation des régions d'intérêt

Pour mettre en œuvre une classification pixel supervisée, il a donc fallu avoir un nombre suffisant d'observations de terrain de reconnaissance des zones de mangrove ou de non mangrove, afin de créer les zones de référence, que nous appelons les régions d'intérêts. Nous avons réalisé en tout dix études de terrain, et pas moins de quatre-vingt-dix-neuf points d'échantillonnage. Ces études étaient principalement destinées à réaliser des échantillons d'eau (partie réalisée par le second stagiaire), mais nous avons également récolté des données botaniques. Les sorties de terrain se déroulaient de la façon suivante : nous marchions le long des zones d'études en observant toujours le type de végétation. Nous entrons dans la zone chaque fois que l'accessibilité le permettait (les mangroves sont des formations très denses et peu accessibles). Nous marquons les points GPS pour chaque point d'échantillonnage d'eau, pour chaque point d'intérêt, et pour marquer et délimiter les zones de mangroves. Les forêts de mangroves rencontrées étaient monospécifiques, ainsi les zones de transition entre forêt tropicale et mangrove, et entre types de mangroves est très nette sur le terrain. Le passage d'un type de mangrove à un autre était noté dans les rapports de terrain mais n'a pas été jugée nécessaire pour la classification. Nos points GPS nous permettaient alors de définir des aires de mangrove ou non mangrove sur les images satellites. Ces observations étaient reportées sur QGIS sous forme de points, à partir desquels nous dessinions ensuite des polygones, que nous classions en mangroves, ou en non-mangrove, et qui constituaient donc les polygones d'entraînement de l'algorithme. Pour plus de précision dans la classification, nous avons également classifié indépendamment les infrastructures, la lagune, le récif et l'océan, qui avaient des signatures spectrales différentes. Les polygones d'entraînement ont donc été réalisés seulement sur des aires dont nous avons pu vérifier la nature sur le terrain. Le choix du nombre final de polygones d'entraînement a été fixé par une analyse des signatures spectrales des polygones réalisés, via le plugin SCP, après fusion des polygones représentant les mêmes classes pour obtenir un valeur spectrale moyenne. Nous sommes donc partis de 27 ROI pour arriver finalement à 6 classes de distance spectrale significative (Infrastructures, Mangrove, Non-mangrove, Lagune, Récif, Océan), ayant servi de base pour notre classification.

### c. Traitement

Concernant les possibilités de programme pour réaliser la classification, nous avons choisi le plugin Dzetsaka qui est le plus simple à paramétrer, et qui donnait les meilleurs résultats lors des tests. Nous avons utilisé un algorithme Support Vector Machine, un algorithme souvent employé dans la classification de la couverture du sol, avec des résultats très satisfaisants pour cette utilisation.

### d. Post-traitement

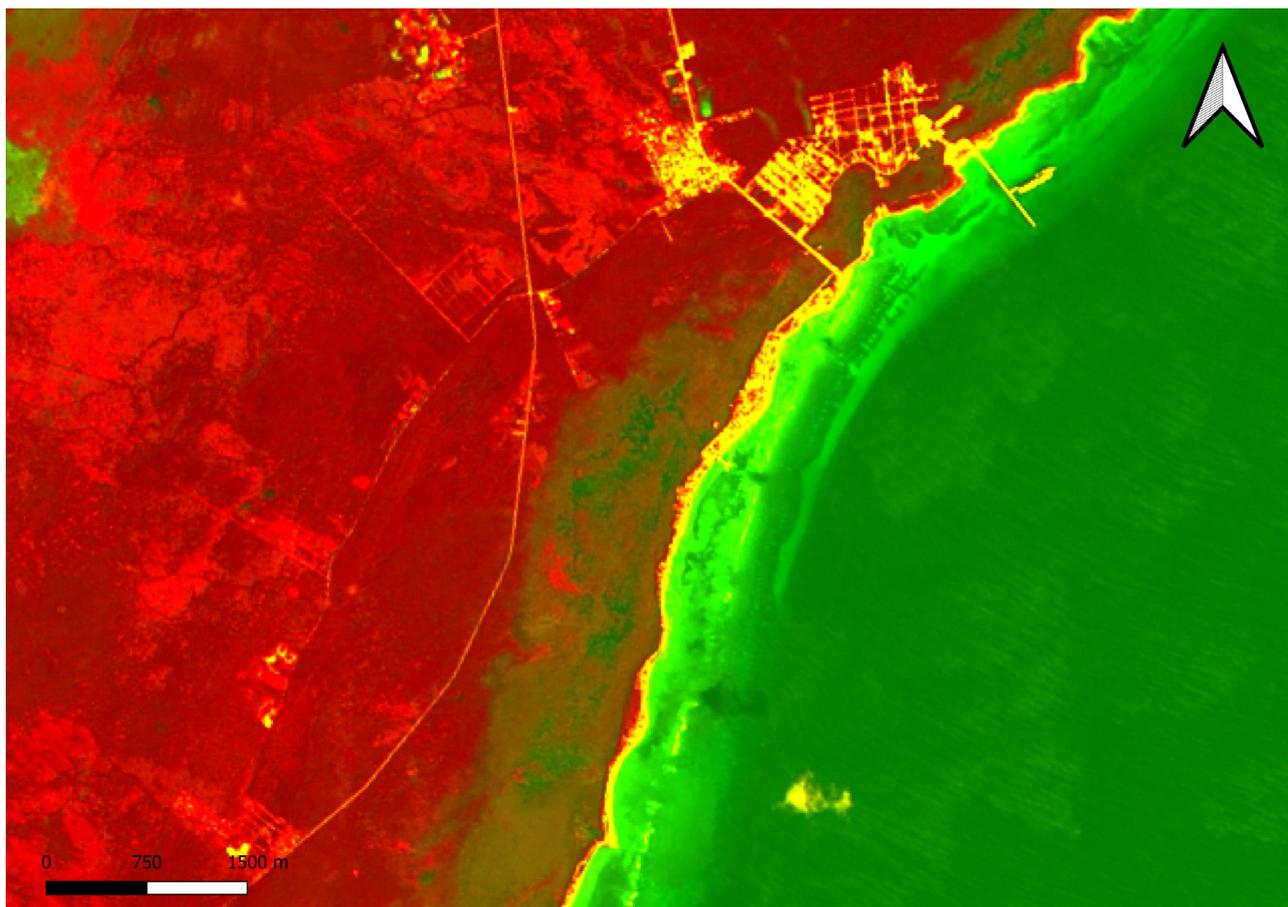
Le plugin Dzetsaka offre la possibilité de générer une matrice de confiance et une carte de confiance associée à la classification. Le script donne également le taux d'accord global de la classification (*Overall Accuracy*), ainsi que le coefficient Kappa associé à la classification. Ces indices donnent une idée sur la différence entre les pixels ayant servi d'entraînement et le résultat final. En particulier, le coefficient Kappa montre le taux d'erreur qui ont été évitées par rapport à une classification aléatoire (Girard et Girard, 1999). C'est sur tous ces éléments que nous nous sommes basés pour déterminer la précision de notre classification, et répéter au besoin les étapes précédentes jusqu'à obtenir le résultat de classification le plus satisfaisant possible.

## 2. Résultats

### a. Pré-traitement

C'est l'image du 28 janvier 2019 qui nous a donné la meilleure précision lors de l'application de la classification. C'est donc celle-ci que nous avons retenue pour le reste de la mission. Les images de 2020 autour de cette date présentaient trop de nuages et n'ont pas pu être utilisées.

La figure suivante montre le raster virtuel créé à partir des bandes 6 et 7 de l'image satellite multi-spectrale après fusion avec la bande panchromatique afin d'obtenir une résolution de 15 mètres, permettant une meilleure délimitation des forêts de mangroves



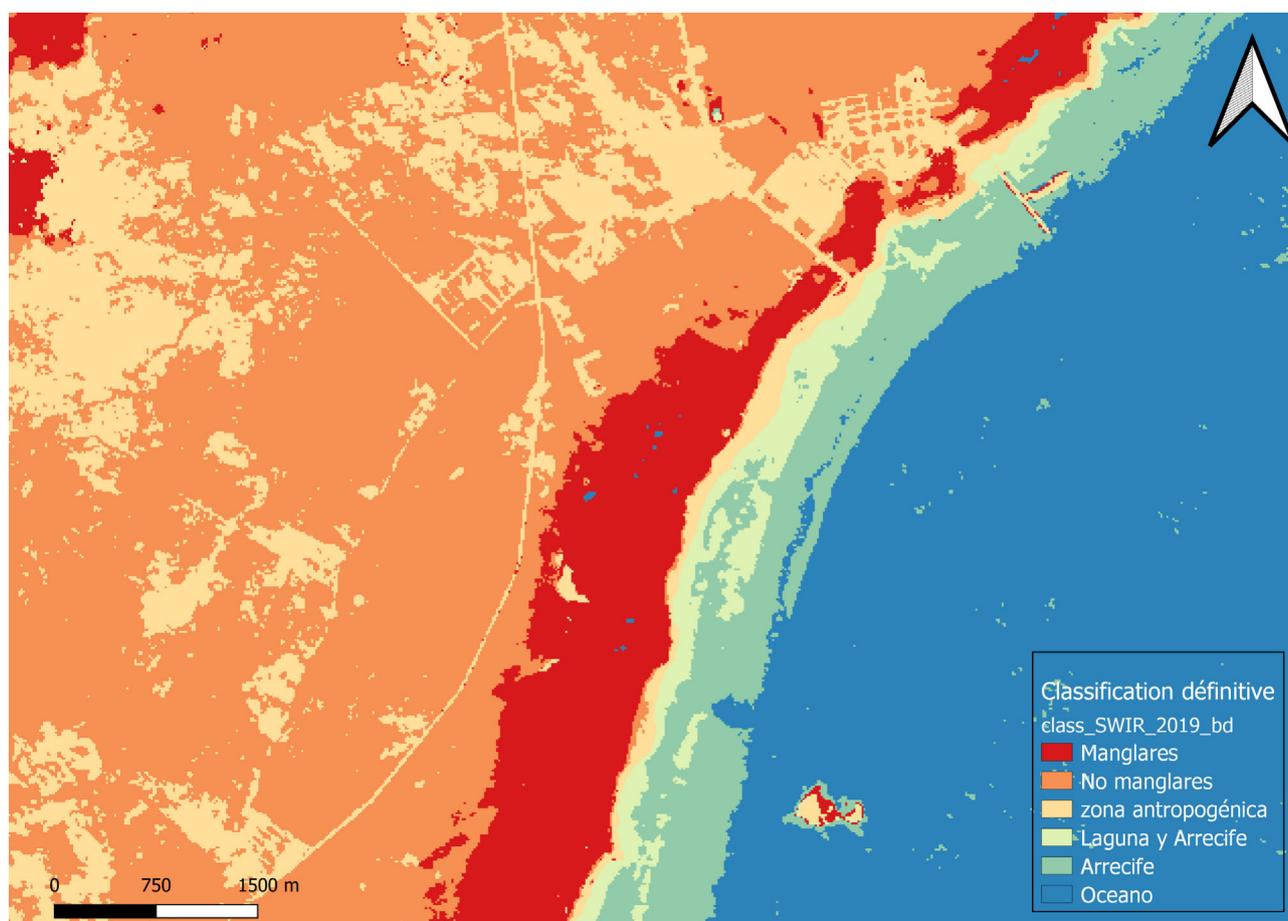
**Figure 4 : Raster virtuel obtenu avec les bandes 6 et 7 du satellite Landsat 8**

Source : élaboration personnelle via QGIS

Cette image a été obtenue en sélectionnant un rendu en couleurs à bandes multiples, en choisissant la bande 1 (grise) comme bande rouge et la bande 2 comme bande verte, afin de maximiser la différence de signature spectrale entre les pixels composant chaque classe, et en particulier les mangroves et les autres types de végétation. On voit nettement une large frange de végétation ressortant en vert le long de la côte, correspondant aux forêts de mangroves, alors que les zones apparaissant en rouge correspondent aux autres types de végétation. Cette distinction peut être vérifiée par la superposition de nos points d'observation sur le terrain avec cette carte, dont le résultat est montré en annexe 2 pour chaque zone d'étude (Puerto, Pueblo et South).

### b. Traitement

Après la création des polygones d'entraînement et l'application de la classification via le plugin Dzetsaka, la cartographie des zones de mangroves obtenue est la suivante :



**Figure 5 : Résultat de la classification réalisée pour mettre en évidence les forêts de mangrove**

Source : élaboration personnelle via QGIS

### c. Post-Traitement

Après plusieurs tests pour améliorer la précision des polygones d'entraînement, et donc de la classification, nous sommes arrivés à un taux d'accord global de 98,5% annoncé par la messagerie du plugin (*Overall Accuracy*), avec un Kappa de 0,979, en utilisant 50% des pixels pour la classification et les 50% restant pour le calcul statistique de la précision de la classification. Notre matrice de confusion, quant à elle, annonce une précision globale de 95,55%, et est présentée dans la figure suivante.

Table 2 : Matrice de confusion associée à la classification réalisée		Prédictions							Total	Pourcentage de précision
		Mangrove	Non-mangrove	Zone anthropique	Lagune et récif	Récif	Océan			
Références	Mangrove	58	5	0	0	0	0	63	92,06%	
	Non-mangrove	6	35	2	0	0	0	43	81,40%	
	Zone anthropique	0	2	429	0	0	0	431	99,54%	
	Lagune et récif	0	0	0	55	0	0	55	100%	
	Récif	0	0	0	0	189	0	189	100%	
	Océan	0	0	0	0	0	240	240	100%	
	Total	64	42	431	55	189	240	1021		
	Pourcentage de précision	90,63%	83,33%	99,54%	100%	100%	100%		95,55%	

Source : élaboration personnelle

En conclusion, l'utilisation des bandes SWIR puis d'une classification pixel supervisée avec de classifier les forêts de mangroves est une méthode satisfaisante, qui semble donner de meilleurs résultats que l'utilisation d'un NDVI et du critère d'altitude utilisé en phase IV du projet de cartographie. La classification obtenue convient à notre objectif initial, et ne semble pas présenter de variations ou d'incertitudes majeures en comparaison à nos observations de terrain. Si la prochaine phase du projet le permet, il serait possible de vérifier la classification effectuée à l'aide de transects effectués à l'aide d'un drone, pour les zones plus difficile d'accès, que nous n'avons pas pu vérifier sur le terrain. Cela permettrait encore d'estimer statistiquement la précision de la classification effectuée.

Dans les prochaines phases du projet, il serait intéressant d'effectuer un suivi régulier de l'évolution spatiale des zones de mangroves. Pour cela, il sera nécessaire de répéter cette classification régulièrement, par exemple tous les deux ans, afin d'identifier les changements et de comprendre les effets de l'anthropisation rapide de la zone sur l'étendue des mangroves. Pour cela, la méthodologie mise en place lors de ce présent stage pourra être répétée, en veillant à appliquer cette méthode sur une image satellite de la même période (fin janvier, soit milieu de saison sèche), car la proportion d'eau dans les feuilles peut varier au cours de l'année et donc modifier les valeurs de réflectance. On notera qu'aucune correction de réflectance n'a été effectuée sur l'image utilisée ici, car cela n'augmentait pas la précision de la classification. Cette correction aurait peut-être été nécessaire si les mangroves avaient été encore connectée à la zone intertidale (connexion rompue en 1960 avec la construction de la route bétonnée le long du littoral). La présence d'un sol plus humide par endroits nous laisse penser que des réseaux d'eaux douces souterraines ou connexions souterraines avec la mer sont encore présentes par endroits, ce qui peut engendrer des différences de réflectance en télédétection, mais ces zones ont été vérifiées sur le terrain. En cas de nécessité d'appliquer des corrections sur la future image utilisée, il sera important de le prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

A noter aussi que cette classification a été réalisée sur une image de 2019 car les images de janvier 2020 donnaient une valeur de précision moindre à la classification. La future campagne de cartographie des mangroves devra donc être effectuée en 2021. Notons que la présence d'un nuage sur la mer, en bas de l'image, peut modifier les valeurs obtenues dans la matrice de confusion, mais ne semble pas modifier la précision de la classification, puisque celle-ci est identique lorsque nous la réalisons sur l'image tronquée.

Enfin, nos observations de terrain nous ont amenés à formuler certaines hypothèses, qui pourront être prises en compte dans les futures phases de projet. Notamment, nous avons remarqué qu'au sein des forêts de mangroves, les sols étaient parfois très secs, et parfois saturés en eau, souvent salée. Il serait intéressant d'obtenir de plus amples informations sur la nature du réseau hydrologique souterrain et des connexions souterraines avec la mer, le long du littoral de Mahahual. Ces études devront déboucher sur une compréhension des effets de ces composantes sur la survie et la répartition spatiale des types de mangroves (voir les résultats de Yannis de Pereyras sur la partie hydrologie pour de plus amples informations). Par ailleurs, nous disposons d'assez peu d'informations sur la biologie des sols de mangroves à Mahahual, et il semble notamment que les terriers de crabes aient un effet non négligeable sur la présence de pneumatophores chez certaines espèces de palétuviers. Des études pédologiques sur la micro et la macrofaune du sol pourraient être à envisager. Une troisième piste d'étude porterait sur la nature des forêts de mangroves blanches situées dans la zone *Pueblo*. En effet, depuis le passage de l'Ouragan Dean il y a 12 ans, celles-ci ont conservé une taille particulièrement basse et sont très peu denses. Il serait intéressant de comprendre les causes de ce phénomène et leur lien potentiel avec la rupture de la continuité hydrologique.

## IV. Étude des prises illégales de terres

### 1. Matériel et méthodes

#### a. Présentation de l'objectif

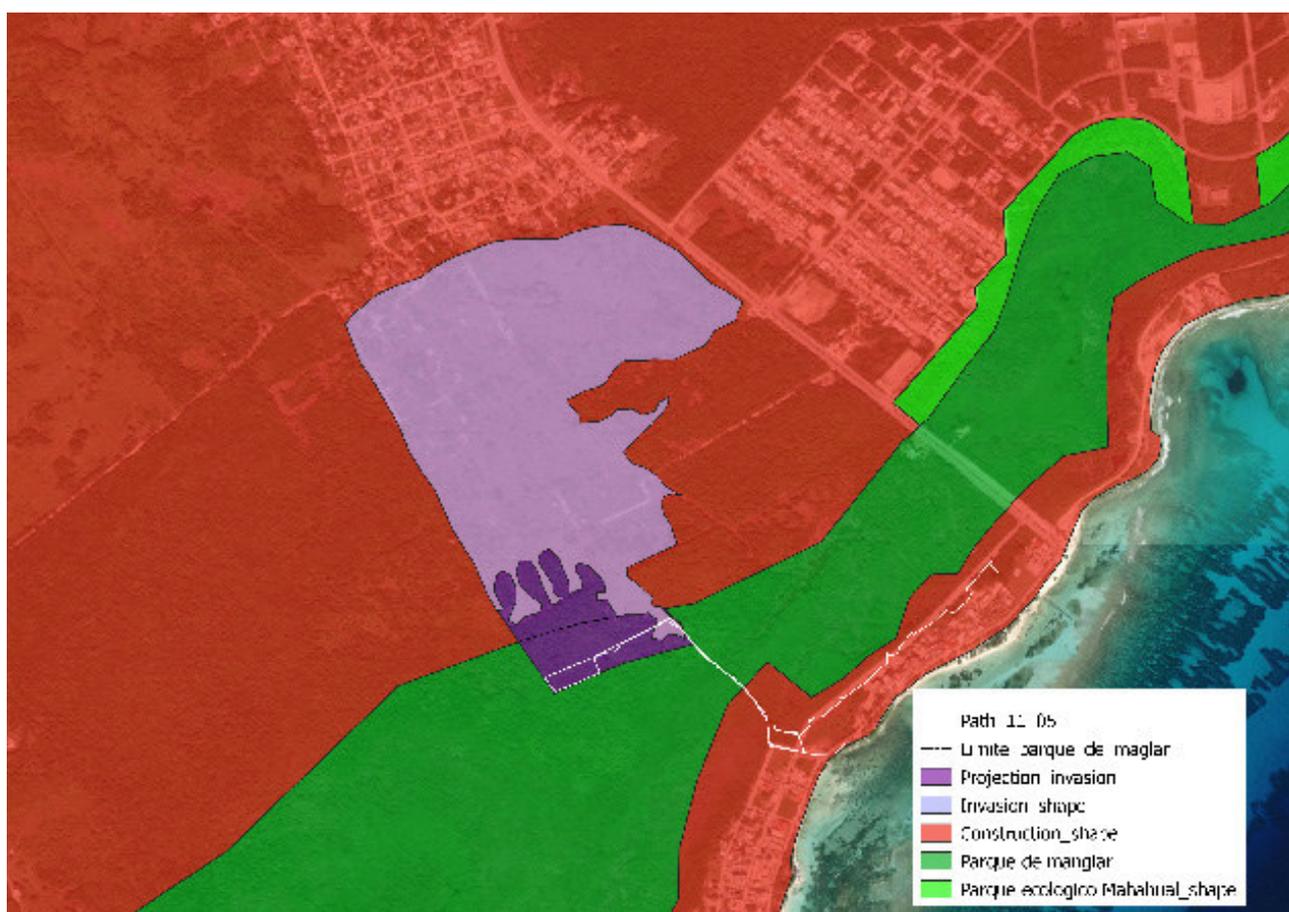
Une première proposition du PDU a été publiée en 2005 et modifiée pour la première fois en 2008, mais celle-ci a été remise en cause par la communauté, appuyée par l'étude du PDU réalisée par l'équipe de Takata, car jugée comme trop destructeur pour l'environnement. Une seconde proposition a été lancée en 2018, mais suite au changement de gouvernement, aucun des deux plans n'avait été validé définitivement. En juillet 2020, une nouvelle proposition a été publiée pour consultation publique. Depuis environ 5 ans, Mahahual fait face à un phénomène d'invasions sur certains espaces de forêt proches des routes et de la mer : un ou plusieurs groupes, initialement mal identifiés, déforêtent de larges aires boisées pour y construire des habitations. Ce phénomène a été rapidement identifié comme lié à la spéculation foncière du fait de la présence d'un plan d'urbanisme sur le village de Mahahual : les terrains placés comme constructibles sont vus comme une aubaine pour les investisseurs. Cependant, nous n'avons pas plus d'informations sur ce phénomène. Il n'a pas été question de s'immiscer dans ce trafic, ni de tenter de l'arrêter, au vu des risques que nous pourrions courir. Cependant, il est important de préciser que les mangroves du Mexique sont des habitats protégés par la loi NOM-022-SERMANAT 2003 et par l'article 60 TER de la Loi Générale sur la Vie Sauvage. En tant que centre de recherche pour la conservation du littoral, nos objectifs principaux étaient de comprendre si les zones de mangroves étaient déboisées par ces groupes, et d'évaluer la tendance future de ce phénomène : les zones de mangroves seront-elles en danger dans le futur ? Les zones déboisées sur lesquelles les groupes construisent suivront-elles les zones anthropiques du PDU, ou s'agit-il d'une destruction plus anarchique, basée sur une spéculation foncière à bien plus long terme et plus incertaine ? Les groupes responsables des invasions ont-ils eux même un poids sur la modification du PDU ?

#### b. Description des données

Pour répondre à ces questions, nous avons commencé par cartographier la zone d'invasions afin d'avoir une idée précise de son emprise. Puis nous nous sommes appuyés principalement sur des observations de terrain, au cours desquelles nous cherchions à identifier la végétation initialement présente sur les zones d'invasions, mais aussi à comprendre comment les zones à envahir étaient décidées et délimitées. Ces études ont été accompagnées d'un travail bibliographique sur l'historique du développement des autres villes touristiques de la Costa Maya (côte caribéenne du Mexique) à partir des années 1970, en particulier Cancùn puis Playa del Carmen, au Nord de la péninsule du Yucatán. De plus, une équipe de volontaires de Takata est actuellement en train de mener une enquête auprès des habitants de Mahahual, à l'aide d'un questionnaire, et a déjà pu récolter de nombreuses informations informelles en allant à la rencontre de la communauté locale. L'idée est d'évaluer les connaissances de la communauté sur la composition et l'importance des forêts de mangroves, mais aussi de comprendre les motivations derrière le phénomène et l'avenir de ces zones d'invasion. Le questionnaire est fourni en annexe 3 de ce rapport. Les résultats seront publiés par le centre prochainement. Par ailleurs, un rapport final regroupant nos observations et interprétations sur ce phénomène d'invasion a également été fourni en livrable au centre de recherche.

## 2. Résultats

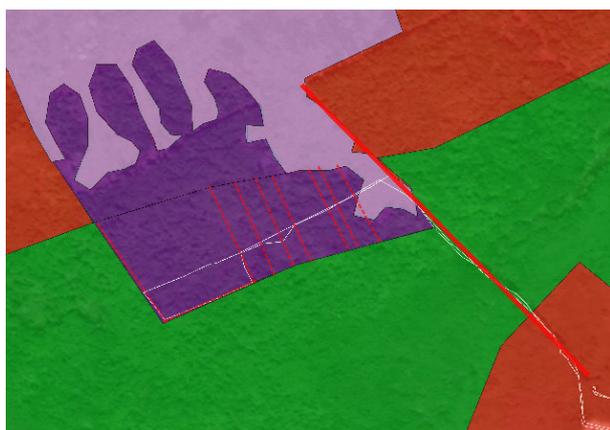
L'emprise des invasions est visible en violet sur la figure 6. Lorsque nous comparons celle-ci avec le PDU 2018, on constate que toutes les constructions actuellement présentes dans les zones d'invasions se situent en zone constructible sur le PDU (visible en rouge sur la carte suivante). Cependant nous avons classé une petite surface du Parc de Mangroves en «invasions», visible également sur la carte suivante (zone en violet clair sur fond vert), car lors de nos études de terrain nous avons découvert à cet endroit une palmeraie naturelle qui semble avoir été déforestée et incendiée dans la continuité des invasions déjà présentes.



**Figure 6 : Représentation de l'emprise de la zone de prises illégales de terres**

Source : Léo Crespo, données récoltées lors des phases de terrain

Par ailleurs, toujours dans cette même zone, nous avons également découvert de nombreux chemins frayés dans la mangrove, rectilignes et d'espacement souvent régulier, dont la localisation exacte est montrée sur la figure ci dessous (lignes rouges).



**Figure 7 : Représentation des différents chemins frayés dans la mangrove, en lien probable avec les invasions**

Source : Léo Crespo, données récoltées lors des phases de terrain

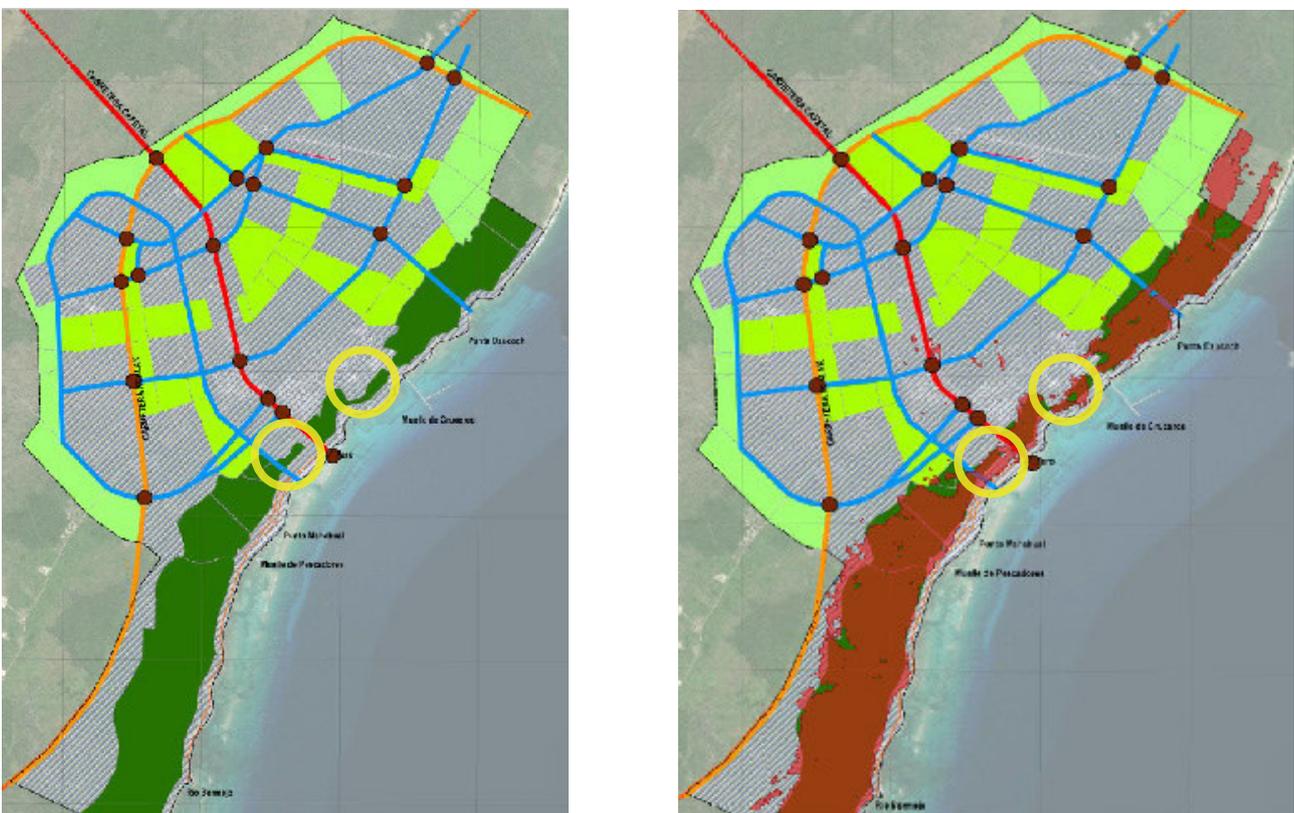
Comme on peut le voir, ces chemins sont assez nombreux près de la zone des invasions, mais d'autres chemins ont également été frayés le long du littoral, et ceux-ci semblent être indépendants du groupe des invasions précédemment mentionnées. Ces voies sont fréquemment bornées à l'aide de barbelés, piquets et peinture rouge ou d'objets de couleur (gobelets rouges, bouteilles, ..), tel qu'on peut le voir sur images suivantes :



**Figure 8 : Méthodes de bornage des chemins frayés dans la mangrove, observées sur le terrain**

Source : Léo Crespo, données récoltées lors des phases de terrain

Ces caractéristiques nous font penser que ces chemins ont été frayés selon un modèle, qui logiquement serait le dernier PDU sorti avant la création de ces chemins, donc 2018 (bien que celui-ci n'ait jamais été approuvé). Cependant les chemins des invasions empiètent clairement dans le Parc de Mangrove du PDU 2018, où il ne doit normalement pas y avoir de constructions selon le PDU. Il est important de préciser que dans le PDU 2020, le parc de mangroves est étrangement réduit sur cette partie (voir cercles jaunes sur la figure 9), et le terrain est classé en privé (nos études sur cette partie sont confidentielles, nous ne pouvons pas les divulguer dans ce rapport), tel qu'on peut le voir sur la carte suivante, alors que notre classification (partie II) donne bien une forêt de mangroves à cet endroit-là (visible à droite ci-dessous).



**Figure 9 : Comparaison de la cartographie des forêts de mangrove réalisée lors de ce stage avec le zonage des mangroves présenté dans le PDU**

Source : Plans issus du PDU, cartographie des mangroves obtenue par classification (voir partie II du présent rapport)

Certains arrangements politiques dont nous n'avons pas connaissance peuvent être à l'œuvre ici. Ceci, couplé au fait qu'il est difficile de dater la création de ces chemins et de savoir si ceux-ci sont encore en construction, nous amène à nous demander si ces chemins n'ont pas commencé à être construits dans le Parc de Mangrove pour des raisons diverses, et n'ont pas aujourd'hui été abandonnés, car figurant justement dans une zone où on ne peut officiellement construire. La présence d'un barbelé délimitant le Parc de Mangrove de la zone constructible à cet endroit va dans le sens de cette hypothèse. Par ailleurs, les autres chemins le long du littoral se situent bien en zone constructible, mais il est important de préciser qu'ici nous étions tout le temps en présence de forêts de mangroves. Celles-ci disparaissent donc dans le projet d'urbanisation.

Ces chemins portaient souvent de terrains privés. Pour certains, ce sont les propriétaires qui vivent sur le terrain, pour d'autres ce sont des habitants qui sont payés par les propriétaires pour garder le terrain, alors que les propriétaires vivent dans une autre ville. Nous ne savions jamais avec certitude qui avait frayé le chemin, mais si ce n'était pas le propriétaire du terrain, il était évident qu'il fallait au moins l'accord de celui-ci pour commencer le chemin sur son terrain (bien que le chemin ne se situait peut-être pas toujours lui-même sur un terrain privé), ainsi le phénomène semble connu et organisé, lui aussi. Lorsque nous emprunions ces chemins, ils ne menaient nulle part en particulier, mais s'arrêtent souvent à la limite du Parc de Mangrove. Par ailleurs, bien que le bois semblait être utilisé pour la construction ou la cuisine, il n'y aurait pas de logique à frayer des chemins aussi longs et rectilignes seulement pour récupérer du bois. Notre hypothèse est donc que ces chemins peuvent servir de délimitation d'une parcelle à l'autre, et d'une zone constructible.

Finalement, une seconde partie dans la zone Nord entre l'usine de traitement des eaux et le port de croisière a été classée dans le PDU comme végétation secondaire de mangrove, réduisant la aussi la surface du Parc de Mangrove, à un endroit où nous avons bien observé des palétuviers sur le terrain.

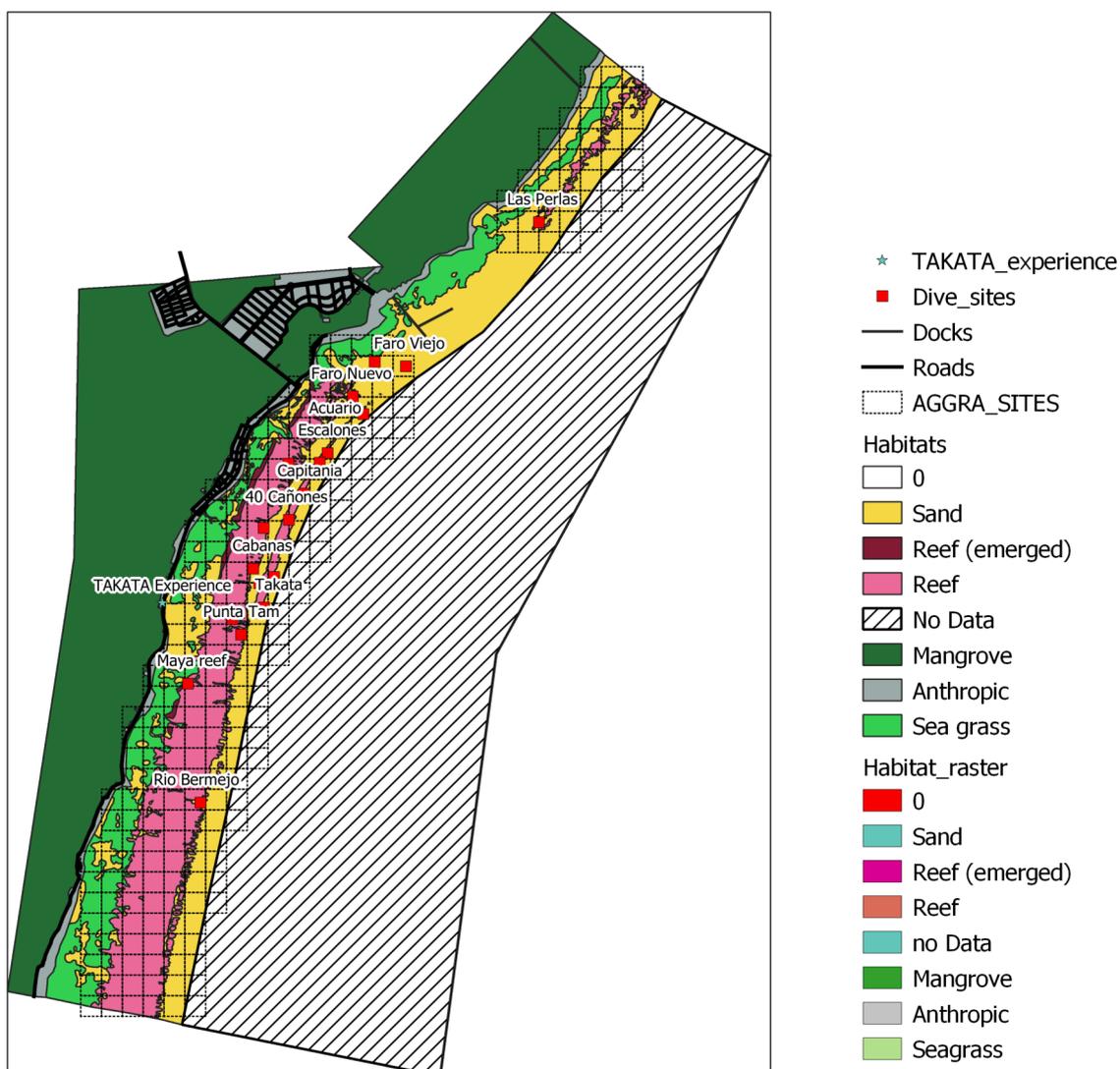
Ainsi notre cartographie des forêts de mangroves expliquée dans la partie III a été essentielle ici pour comparer les données du PDU avec nos données. Nous pensons aujourd'hui que les zones d'invasions suivent les délimitations du PDU, et que les zones indiquées comme mangroves dans le PDU 2020 ne seront pas détruites, sauf pour la création de chemins non bétonnés (selon le PDU). Cependant, le changement d'occupation du sol entre les invasions et le littoral, et dans la zone Nord, réduisant la surface du Parc de Mangrove à ces endroits, est plus inquiétant. Cependant, certaines personnes semblent avoir un poids décisif dans les orientations du PDU, ce qui rend incertain l'avenir de celui-ci, et donc des forêts de mangroves sur les terrain conflictuels.

## V. Mise à jour de la carte interactive

### 1. Matériel et méthodes

#### a. Présentation de l'objectif

La phase précédente du projet de cartographie a donné lieu à la création via le logiciel QGIS d'une carte web interactive présentée en figure 10, publiée sur le site internet de Takata, ayant pour but de centraliser les informations récoltées sur les habitats naturels de Mahahual, et de mettre ces informations à la libre consultation des habitants, dans un objectif de sensibilisation à la protection de l'environnement. Cette carte web est reliée à un fichier Excel servant de base de donnée, dans lequel sont entrées toutes les données récoltées sur les habitats naturels par les différents programmes de Takata. Le fichier Excel est conçu pour recueillir les données selon un quadrillage AGGRA, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment, qui est un protocole universel d'étude des coraux et herbiers marins. Ce protocole a été suivi par le centre de recherche et cela se traduit en cartographie par une grille de quadras de 200 m x 200 m, numérotés.



**Figure 10 : Carte interactive réalisée en phase IV du programme**

Source : Victor Basly, Camille Mulatero, Programme de Cartographie des Ecosystèmes Côtiers, phase IV

L'objectif de la phase actuelle était alors de mettre à jour le fichier Excel avec les données qui n'y avaient pas encore été inscrites, puis de mettre à jour ces données sur la carte en ligne.

## b. Description des données

En ce qui concerne la mise à jour de la carte, toute la carte a été créée avec le logiciel QGIS, qui est libre d'accès et très complet pour cette utilisation. Le plugin QGIS2WEB, normalement utilisé pour mettre en ligne des cartes créées avec QGIS, n'avait pas été utilisé en phase IV car trop lent, et n'a pas été utilisé non plus pour cette phase, pour les mêmes raisons. Pour cette phase, comme pour la précédente, nous avons utilisé le programme en ligne Google My Map, permettant de charger les couches souhaitées sur internet et d'insérer ensuite la carte sur le site internet. Cette solution était la plus adaptée à notre cas, car ce programme est libre d'accès et permet de stocker la carte en ligne, ce qui est très intéressant pour un fichier lourd comme le nôtre. Cependant les fonctionnalités de Google My Map sont plus limitées que celles de QGIS, et le rendu de la carte est souvent dénaturé.

## 2. Résultats

### a. Mise à jour de la base de données

La première étape pour la mise à jour du Excel consistait d'abord à mettre à jour les données dans les feuilles déjà existantes, chaque feuille correspondant à un programme de suivi (corail, poissons, tortues, ..). Nous avons ensuite complété ces informations en ajoutant à ce fichier Excel trois programmes qui n'y figuraient pas encore : Macrofaune du récif, Macrofaune de l'herbier, et Mangrove. Ces derniers items permettent au centre de recherche d'avoir un suivi complet des habitats naturels de Mahahual, dans l'espace et dans le temps. Concernant le programme de suivi des mangroves, et celui des tortues (qui n'avait pas encore de données), il a été nécessaire de créer une nouvelle grille AGRRA terrestre. Cette grille correspond au quadrillage des zones d'études, selon le protocole AGRRA, qui était déjà mis en place par le centre sur les habitats marins (herbier, lagune, récif), mais non sur les habitats terrestres (plage, mangrove, autre végétation). Globalement cette étape de mise à jour de la base de données a pris finalement beaucoup de temps, car il a été question de réviser les rapports rédigés au cours de la dernière année, et parfois de recontacter les volontaires afin d'obtenir certaines explications sur les données, ou de retrouver des données manquantes. Afin d'optimiser le temps passé sur cette partie, il serait intéressant d'effectuer une mise à jour plus régulière de la base de données. Il est difficilement envisageable que chaque volontaire entre ses propres données dans le Excel, car n'ayant pas tous les mêmes formations, cela pourrait conduire à de nombreuses erreurs de remplissage, difficiles à rattraper. Néanmoins il serait intéressant que le prochain volontaire du programme de cartographie, qui est la personne formée à utiliser la base de données, prenne un temps avec chaque volontaire des autres programmes pour entrer leurs données, afin de gagner du temps et d'éviter des erreurs.

### b. Mise à jour de la carte interactive

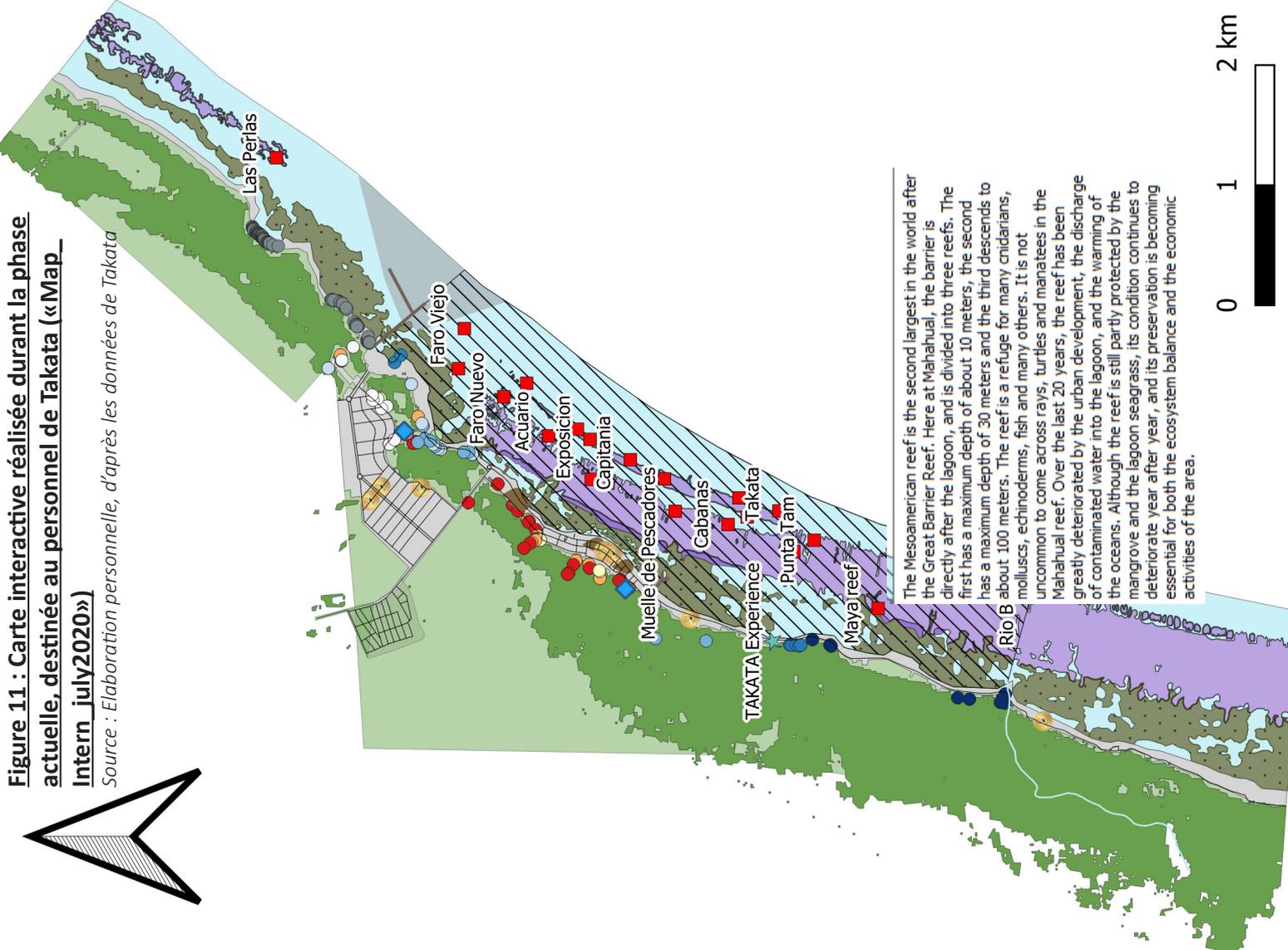
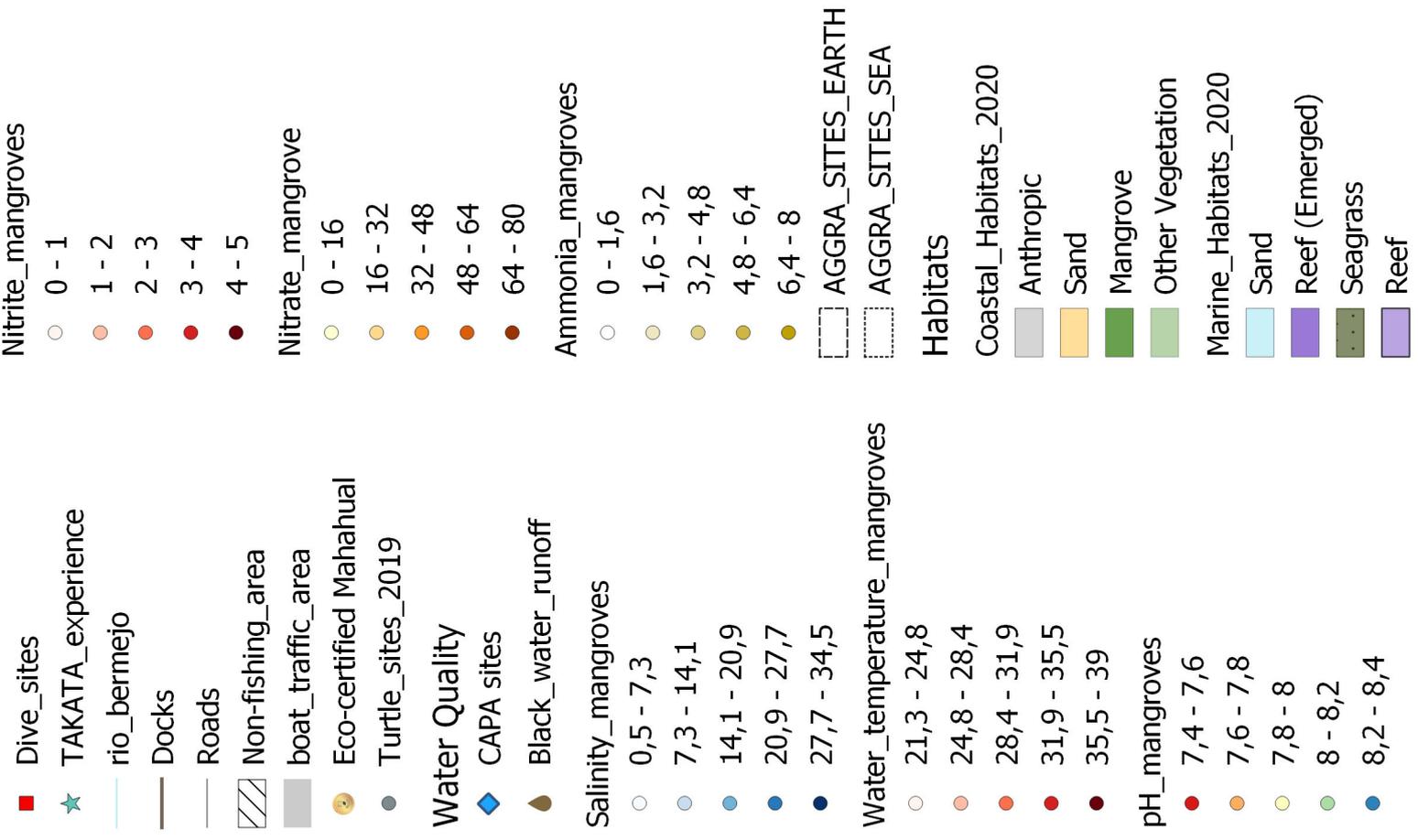
Pour ce qui est des données à ajouter, après discussion avec nos superviseurs sur ce projet, il a été décidé d'ajouter à cette carte, en plus de la mise à jour via le Excel, des informations jugées utiles à transmettre aux habitants de Mahahual, encore une fois dans une perspective de sensibilisation et de promotion des pratiques respectueuses de l'environnement. Il s'agissait notamment de faire figurer sur la carte la zone de pêche interdite, ou encore de faire apparaître pour chaque habitat naturel un court texte descriptif. L'étendue de la forêt de mangrove cartographiée pendant ce stage (voir III.) a également été intégrée. Par ailleurs, nous disposons également pour certains

programmes, de données sensibles, que nous ne souhaitons pas divulguer à la communauté, comme les plages sur lesquelles les tortues viennent pondre, ou encore les noms des restaurants ou hôtels rejetant leurs eaux usées dans le milieu naturel. Cependant ces données sont essentielles pour les stagiaires de Takata, qui doivent connaître les résultats des phases précédentes du projet sur lequel ils travaillent. Il a donc été décidé de dupliquer cette carte, et de créer alors une carte «Map\_Intern\_july2020», disponible sur le drive correspondant à cette phase, mise à disposition seulement des stagiaires de Takata, comportant des informations «confidentielles», et une carte «Webmap\_july2020», disponible sur le site internet de Takata. Chacune de ces cartes devra cependant être mise à jour, lorsque de nouveaux résultats seront obtenus, en entrant bien toutes les données dont on dispose dans la map interne, et en sélectionnant les données que nous souhaitons divulguer à la communauté, sur la webmap. Enfin, une fois la webmap définitive rendue, il a été décidé en concertation avec nos superviseurs, que cette carte ne remplacerait finalement pas la carte réalisée en phase IV et qui figure actuellement sur le site de Takata sous le nom «Web Map interactive», mais qu'elle apparaîtrait sur une nouvelle page, en tant que «Webmap d'interprétation», comportant des données plus techniques et moins généralistes, et qui permettrait de mieux comprendre les effets de l'urbanisation sur la santé du milieu naturel à Mahahual. Pour accompagner cette carte d'interprétation sur le site internet, une légende a également été créée au format Powerpoint (et chargée sur le site au format jpeg), car la lecture des données via Google My Map empêche une compréhension rapide et instinctive. La version finale de la map interne regroupant toutes les informations, créée via QGIS est présentée en page suivante. Sur cette image, concernant les points d'analyse de la qualité de l'eau, seuls la salinité et le pH sont visible, car toutes les mesures se faisant sur les mêmes points, ceux-ci se superposent sur la carte. A noter que, ces données n'étant pas facile à interpréter sous forme de points avec gradient de couleur, les zones de pollution ont plutôt été représentées sous forme de «points de chaleur» sur la map destinée au site internet. La map est également disponible et téléchargeable au format QGIS sur le drive du programme de cartographie. La version avec les grilles AGRRA, plus lourde visuellement, est présentée en annexe 4. La version en ligne créée sous Google My Maps sera disponible prochainement sur le site internet de Takata, dans l'onglet «webmap d'interprétation».

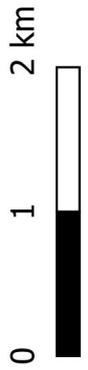
Ainsi, il s'agissait dans cette partie du stage de mettre à jour la base de données et la carte web interactive, qui est l'outil de communication scientifique de Takata, destinée à apporter des connaissances à la communauté locale et à les sensibiliser sur l'importance des écosystèmes côtiers. La mise à jour du Excel a parfois soulevé certains problèmes de logistique, que nous avons finalement résolu en collaborant avec les volontaires des différents projets. Ce Excel a également été alimenté de nouvelles feuilles, destinées à stocker de nouvelles données, avec l'idée d'effectuer un suivi plus exhaustif des habitats naturels que nous rencontrons sur la commune de Mahahual. Concernant la mise à jour de la carte interactive, il s'agissait initialement de mettre à jour la carte existante. Néanmoins, disposant de certaines informations sensibles que nous ne souhaitons pas partager au public, et au vu des nouvelles données ajoutées, il a finalement été décidé de créer une carte «interne», destinée au personnel de Takata et à leurs collaborateurs, qui contient toutes les informations spatiales dont nous disposons, et qui centralise de manière simple et intégrative les données d'analyse sur les habitats naturels. Une carte plus simplifiée, à destination de la sensibilisation du public, a été créée et sera visible sur le site internet de Takata sous le nom de «webmap d'interprétation». La carte «interne» apparaît aujourd'hui comme un outil de grande importance pour la continuité des projets de Takata, au vu de la quantité de plus en plus importante de données collectées, car elle permet de les centraliser et de les lire facilement pas tous les volontaires. Concernant la création de la webmap d'interprétation, il s'agira dans les mois à venir de vérifier si celle-ci s'utilise bien, ou si elle fait double emploi avec la carte déjà présente. Le volontaire chargé du programme de cartographie devra gérer la mise à jour de ces différents supports.

**Figure 11 : Carte interactive réalisée durant la phase actuelle, destinée au personnel de Takata («Map\_Intern\_july2020»)**

Source : Elaboration personnelle, d'après les données de Takata



The Mesoamerican reef is the second largest in the world after the Great Barrier Reef. Here at Mahahual, the barrier is directly after the lagoon, and is divided into three reefs. The first has a maximum depth of about 10 meters, the second has a maximum depth of 30 meters and the third descends to about 100 meters. The reef is a refuge for many cnidarians, molluscs, echinoderms, fish and many others. It is not uncommon to come across rays, turtles and manatees in the Mahahual reef. Over the last 20 years, the reef has been greatly deteriorated by the urban development, the discharge of contaminated water into the lagoon, and the warming of the oceans. Although the reef is still partly protected by the mangrove and the lagoon seagrass, its condition continues to deteriorate year after year, and its preservation is becoming essential for both the ecosystem balance and the economic activities of the area.



## VI. Retour sur expérience

Ce stage de cinq mois au sein du programme de cartographie des écosystèmes côtiers de Mahahual a été l'occasion de travailler sur un sujet qui me tient très à cœur : la conservation des espaces naturels en lien avec les problématiques liées développement urbain. J'ai eu l'occasion de mieux appréhender les différents facteurs qui influencent le maintien ou la destruction des espaces naturels et l'équilibre des écosystèmes lorsque l'on parle d'anthropisation, notamment les facteurs directs, tels que l'emprise spatiale du projet urbain, mais aussi les facteurs indirects, tels la bonne gestion des eaux usées ou encore la prise en compte des intérêts des acteurs du développement urbain. Notamment il a été pour moi important de ne pas négliger ni juger la nécessité des populations locales de trouver un moyen de vivre décemment, dans un contexte où certaines personnes plus aisées, et dans le cas de Mahahual, les investisseurs venus d'autres parties du Mexique ou du monde, ont plus de facilité à influencer le développement urbain. Dans ce contexte, il a été de notre devoir de comprendre que la conservation des mangroves n'était pas toujours une priorité pour les habitants qui, en particulier dans le contexte du covid, n'avaient déjà plus toujours de quoi subvenir à leurs besoins vitaux.

Sur ce programme, l'équipe de Takata nous a laissé une grande liberté quand à la méthodologie employée pour remplir nos objectifs, l'organisation du travail, ou encore la présentation des résultats obtenus, au point que chacun de nous s'est vu agir en chargé de projet durant son stage. Bien qu'un appui scientifique supplémentaire aurait parfois été souhaité afin de gagner en efficacité et d'avoir un œil extérieur critique sur nos résultats (les réunions téléphoniques avec notre superviseur Andrés Larrea ayant été difficiles à planifier du fait du contexte mondial), ce parti pris s'est avéré être un point positif, car chacun de nous a pu nettement gagner en autonomie, en capacité d'organisation et en confiance en soi. L'équipe de Takata s'est montrée satisfaite de nos rendus intermédiaires et nous a assurés que des suivis plus réguliers ne leur avaient pas paru nécessaires.

Par ailleurs, ce stage m'a permis de faire un point sur mes connaissances scientifiques, et de mettre en application de nombreux concepts vus durant la formation d'ingénieur, à l'ENSAT et en Erasmus à l'étranger, tels que les connaissances sur les végétaux, sur les écosystèmes et la manière de les gérer, les méthodes de management, ou encore les cours de SIG ou de programmation informatique. Je suis également réjouie et motivée d'avoir pu observer que, bien que le dialogue avec les acteurs privés et publiques est parfois difficile, nos résultats seront partagés sur le site internet du centre de recherche afin de sensibiliser la population, et appuieront les arguments que le centre exposera aux autorités locales pour tenter d'améliorer l'aspect environnemental du PDU, les premiers résultats étant déjà visibles sur la version de 2020. Il reste encore évidemment de nombreuses connaissances à acquérir, ce qui est le cas durant toute la vie d'un ingénieur, néanmoins, si à mon arrivée à l'ENSAT, l'intégration en milieu professionnel me paraissait encore lointaine et incertaine, je me sens à présent sur la bonne voie pour mettre en pratique les savoirs, savoir-faires et savoir-être acquis durant ce stage, ainsi que durant les stages précédents, afin de fournir à l'avenir un travail pertinent dans un cadre professionnel.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En conclusion, ce stage au sein du programme de cartographie des écosystèmes côtiers de Mahahual tentait de répondre à un objectif principal de caractérisation de l'écosystème mangrove de Mahahual, dans le but d'apporter des arguments aux politiques publiques pour favoriser sa bonne gestion. Dans cette optique, trois sous-objectifs constituaient les lignes directrices de cette quatrième phase du programme, remplis par trois missions principales : la première était la validation des résultats de la cartographie de l'habitat des mangroves (phase IV du projet) avec des transects, dans le but d'obtenir une étendue précise des zones de mangroves et vérifier leur bonne préservation. La seconde mission était de confronter l'étendue des invasions avec l'étendue des forêts de mangroves afin de déterminer si les mangroves sont menacées par ces invasions, et tenter de comprendre les mécanismes derrière ces prises illégales de terres afin d'émettre des hypothèses sur l'avenir des mangroves de Mahahual. Finalement, la dernière mission se portait sur la poursuite du développement de l'outil de carte Web interactive.

La mission de validation de la cartographie des mangroves a débuté par la rédaction d'une méthodologie illustrée pour la réalisation des transects à l'aide d'un drone (disponible sur demande), mais nos premières observations de terrain nous ont permis de comprendre que la cartographie réalisée ne semblait pas assez précise pour notre objectif. Nous avons alors pris la décision de réaliser une nouvelle cartographie des forêts de mangroves, à l'aide d'une classification supervisée basée sur un raster virtuel créé à partir des bandes SWIR du satellite Landsat 8. Les polygones d'entraînement ont été dessinés à partir des identifications botaniques de mangroves ou non mangroves sur le terrain. Nous avons obtenu pour cette classification une précision globale de 95,55% ce qui est satisfaisant. Au vu de l'urbanisation très rapide de la zone, il paraît aujourd'hui important d'opérer un suivi régulier de l'évolution spatiale de ces aires de mangroves. La même méthode pourra être appliquée, en prenant en compte les limites et les possibilités d'amélioration de celle-ci. Notre objectif d'obtention d'une cartographie précise des forêts de mangrove comme base de nos études est donc rempli. Par ailleurs, nos observations de terrain ont apporté à notre équipe un certain nombre de questions et d'hypothèses, qui pourront être prises en compte dans les futures phases de projet.

Ensuite, concernant l'étude sur les prises illégales de terres, nos observations et nos études nous ont amenés à penser que les zones d'invasions suivent les délimitations du PDU, et que les zones indiquées comme mangroves dans le PDU 2020 ne seront pas détruites, sauf pour la création de chemins non bétonnés (selon le PDU). Cependant, le changement d'occupation du sol entre les invasions et le littoral, et dans la zone Nord, réduisant la surface du Parc de Mangrove à ces endroits, est plus inquiétant. Des questionnements persistent encore sur ce phénomène, notamment car certaines personnes semblent avoir un poids décisif dans les orientations du PDU, ce qui rend incertain l'avenir de celui-ci, et donc des forêts de mangroves sur les terrain conflictuels.

Enfin, il s'agissait dans la dernière partie du stage de mettre à jour la base de données et la carte web interactive, qui est l'outil de communication scientifique de Takata, destinée à apporter des connaissances à la communauté locale et à les sensibiliser sur l'importance des écosystèmes côtiers. Le fichier Excel étant un outil nouveau pour le centre de recherche, il pourra faire l'objet d'améliorations dans son contenu et dans sa logistique, afin de faciliter son emploi. Néanmoins, les modifications apportées durant cette phase de projet ont déjà permis une amélioration dans l'exhaustivité des données recensées sur cette base. Concernant la mise à jour de la carte interactive,

la nouvelle carte «interne», destinée au personnel de Takata et à leurs collaborateurs, permet une centralisation et une analyse plus facile de toutes les données spatiales récoltées sur les différents programmes. C'est un outil qui devra faire l'objet de mises à jour régulières et devra être mis à disposition des différents programmes, pour fonctionner correctement. Enfin, la carte plus simplifiée, à destination de la sensibilisation du public, a elle aussi été alimentée de données jugées utiles pour prendre en compte la conservation des habitats côtiers dans toutes leurs dimensions. Google My Maps est un outil facile d'utilisation mais assez limité. La prochaine amélioration majeure de cette carte, pourra être la modification du support de mise en ligne, afin d'obtenir en sortie une carte non seulement facile, mais aussi agréable à lire pour le public.

Finalement, d'un point de vue personnel et pédagogique, cette expérience fut enrichissante en de nombreux points, puisqu'elle m'a permis de saisir concrètement le lien entre gestion des espaces naturels et anthropisation, appuyé par la réalité du terrain. La mise en pratique des connaissances et des savoir-faires et savoir-être acquis durant la formation à l'ENSAT ainsi que durant mes précédents stages, m'a permis d'ancrer ceux-ci un peu plus précisément, tout en apportant ma pierre à l'édifice sur la protection des espaces naturels en lien avec un projet de grande ampleur soulevant de nombreuses problématiques.

Hormis les connaissances scientifiques acquises sur le fonctionnement des mangroves et leurs interactions avec les autres écosystèmes côtiers, ces trois missions nous ont également permis de mettre en évidence un manque cruel d'action de la part des politiques publiques locales et nationales quant à la conservation des écosystèmes mangroves du Mexique, et même certains conflits d'usage, les acteurs publics étant les moteurs du développement urbain à Mahahual. L'urbanisation croissante, la fragmentation de l'habitat mangrove, la rupture de la connectivité hydrologique avec la zone intertidale, la mauvaise gestion des eaux usées, sont autant de facteurs menant indéniablement vers une fragilisation de ces habitats, ce que l'on constate déjà avec la perte importante de la faune terrestre, mais aussi de la faune de la lagune, de l'herbier et du récif (liées directement au bon fonctionnement de la mangrove) ces cinquante dernières années. Le développement urbain de Mahahual semble aujourd'hui suivre le même chemin que la ville de Cancun dans les années 1970, qui fait aujourd'hui face aux conséquences économiques et sociales de la destruction massive des habitats naturels liées à son urbanisation. Ces erreurs passées peuvent aujourd'hui servir de pistes de réflexion pour du village de Mahahual un exemple de nouveau tourisme respectueux de son environnement.

## Table des figures

### Images et cartes

Figure 1 : Localisation de Mahahual et répartition spatiale des mangroves au niveau national.....	2
Figure 2 : Localisation de Mahahual et répartition spatiale des mangroves au niveau régional.....	2
Figure 3 : Localisation des zones d'études pour la cartographie des forêts de mangroves.....	10
Figure 4 : Raster virtuel obtenu avec les bandes 6 et 7 du satellite Landsat 8, rendu en couleurs à bandes multiples.....	13
Figure 5 : Résultat de la classification réalisée pour mettre en évidence les forêts de mangrove.....	14
Figure 6 : Représentation de l'emprise de la zone de prises illégales de terres.....	17
Figure 7 : Représentation des différents chemins frayés dans la mangrove, en lien probable avec les invasions.....	17
Figure 8 : Méthodes de bornage des chemins frayés dans la mangrove, observées sur le terrain.....	18
Figure 9 : Comparaison de la cartographie des forêts de mangrove réalisée lors de ce stage avec le zonage des mangroves présenté dans le PDU.....	18
Figure 10 : Carte interactive réalisée en phase IV du programme.....	20
Figure 11 : Carte interactive réalisée durant la phase actuelle, destinée au personnel de Takata («Map_Intern_july2020»).....	23

### Tables

Table 1 : Désignations des bandes spectrales du satellite Landsat 8, en particulier les bandes SWIR et panchromatique.....	11
Table 2 : Matrice de confusion associée à la classification réalisée.....	14

## Table des sigles

AGRRA : Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PDU : Plan de développement urbain

ROI : Region of Interest

SIG : Systèmes d'Information Géographique

SWIR : Short Wave Infrared

## Bibliographie

Note : seuls les ouvrages utilisés pour la rédaction du présent rapport sont inscrits ici. La bibliographie des différents livrables (Méthodologie de l'utilisation d'un drone pour la validation de la cartographie des mangroves de Mahahual, Classification des mangroves de Mahahual, Rapport sur les prises illégales de terres, Webmap interactive) n'a pas été citée ici.

USGS, Earth Explorer [en ligne], consulté le 2 octobre 2020, disponible sur <https://earthexplorer.usgs.gov/>

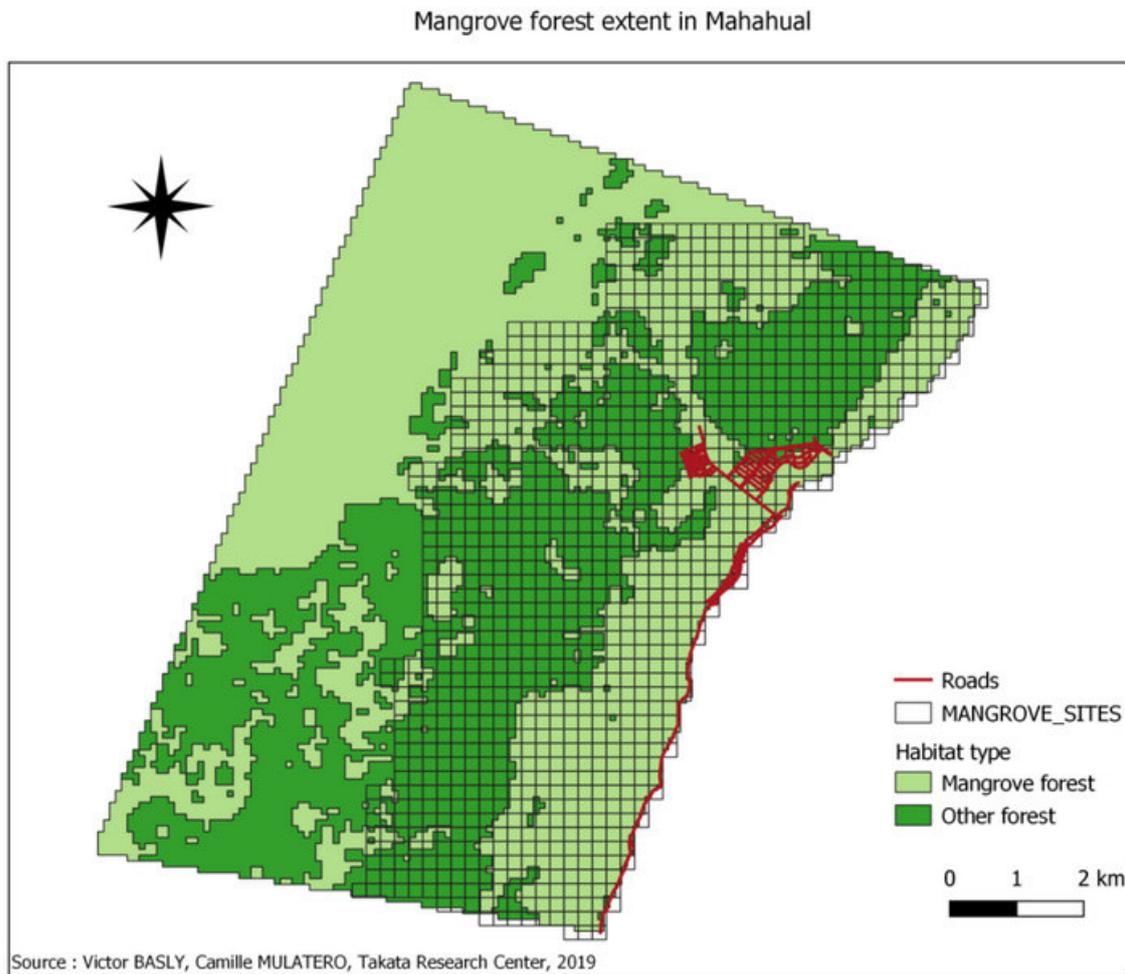
USGS, Missions Landsat, Landsat 8 [en ligne], consulté le 2 octobre 2020, disponible sur [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con)

ESRI, Méthodes de rééchantillonnage [en ligne], 2016, consulté le 2 octobre 2020, disponible sur <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/environments/resampling-method.htm>

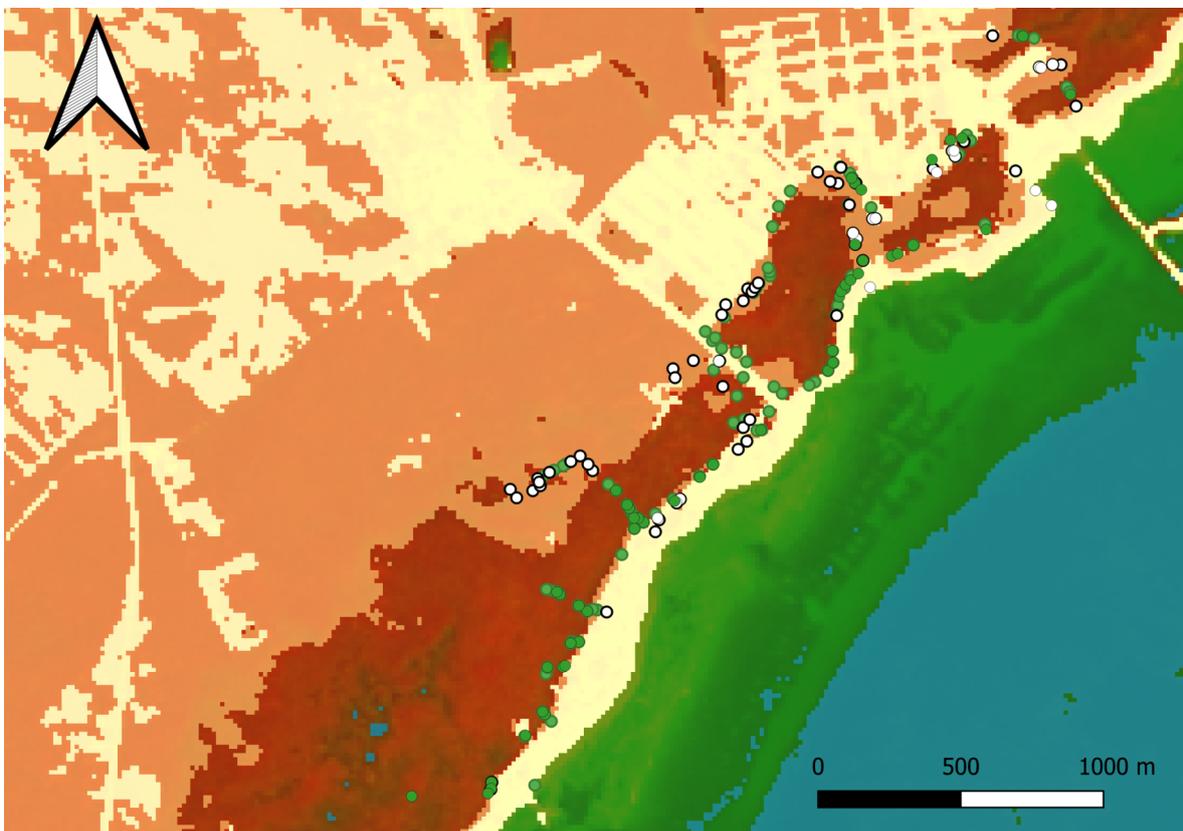
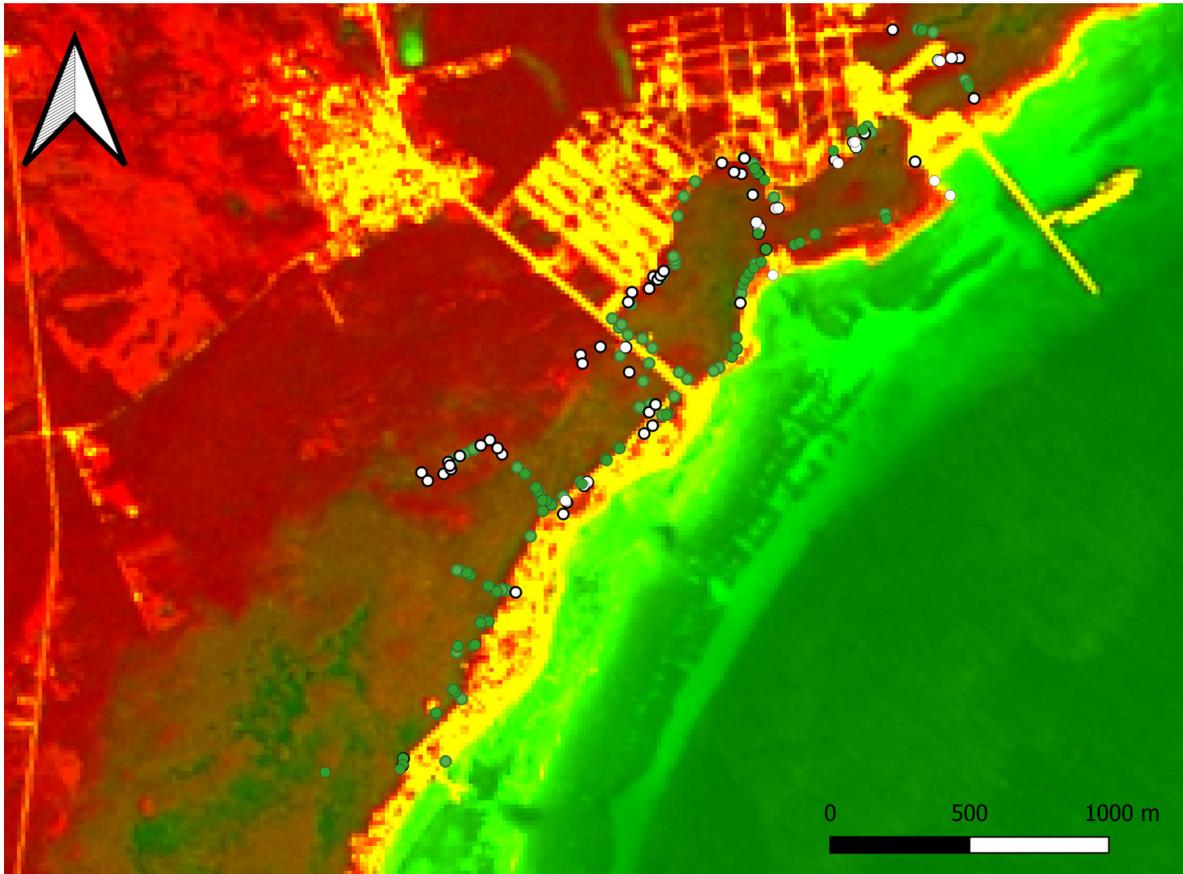
Taureau, F., Robin, M., and Debaine, F. (2015a). Guide méthodologique pour la cartographie des mangroves de l'Outre-mer français (IFRECOR).

Florent Taureau. Cartographie harmonisée des mangroves de l'Outre-mer français. Sciences de l'environnement. Université de Nantes (UNAM), 2017. Français. <tel-01698117>

## Annexe 1 : Discrétisation mangrove/non-mangrove réalisée en phase IV du projet



## Annexe 2 : Comparaison des sites d'études avec le raster virtuel obtenu et le résultat de la classification réalisée en phase V



## Annexe 3 : Questionnaire réalisé par l'équipe collaboratrice venant compléter l'étude sur les prises illégales de terres

### Mahahual Mangrove Questionnaire :

*The main purpose of this free and anonymous questionnaire is to collect your observations on the evolution and fate of the Mahahual mangroves. Through this short questionnaire, we would like to know about the uses and relationships you have with this natural environment and at the same time, appreciate the general knowledge you have about this environment. The final objective is to identify here the problems that the Mahahual mangroves may face and to propose collective, concrete and local solutions/actions to our competent political institutions.*

*A short paragraph on the mangrove habitat project and the missions Takata has set for itself.*

#### Order of questions to be redefined :

- 1) Have you ever heard of the mangroves which are part of Mahahual ?
- 2) If you had to define the mangrove by a term, what would it be?  
.....
- 3) Esthetically, how would you define the mangrove ?
  - Not aesthetic
  - Unsightly
  - Quite aesthetic
  - Very aesthetic
- 4) Since living in Mahahual do you think that the general state of the mangroves has been...:
  - Improved
  - Stabilized
  - Slightly degraded
  - Heavily degraded
- 5) In case of an observed decline, which mangrove area would be most affected in your opinion?
  - Casitas/cruise port
  - Pueblo
  - South of Mahahual/Xcalak Road
  - Carretera 55
  - Other (specify)
- 6) Generally speaking, what importance would you give to Mahahual's mangroves:
  - Very strong
  - Strong
  - Average
  - Low

- Very low

Because: environment, economy, hygiene, aesthetics

7) Prioritize (1 = Very important, 6 = Not very important) the following orientations or actions to be carried out in the municipality of Mahahual :

- Economic and tourism development
- Diversification of Mahahual's economic model
- Local fishing
- The preservation of coastal ecosystems
- The development of sanitary infrastructures (wastewater, waste management)
- The fight against illegal actions (specify which ones: .....)

8) According to you, a better protection of the Mahahual mangroves could be achieved by :

- Better integration of mangroves in local urban planning (roads, hotels and housing)
- The inscription of the Mahahual mangroves as a protected natural site
- Better management of waste and other discharges
- Other : .....

9) What personal use do you give to mangroves? Multiple categories can be chosen.

Direct/without consumption: Recreational, espiritual, wellbeing, research

Direct/consumption: fisheries, agriculture, hunting, other natural resources (wood, soil, rocks)

Indirect: water purification and pest control

Other : .....

10) How often? and which category?

- Strong (+ 4 times/month)
- Occasional (0 and 4 times/month)
- Very rarely (a few times a year)
- Never

11) In your opinion, what is the most common collective use of mangroves in Mahahual?

- Disposal and deposit of household waste
- Observation of fauna and flora
- Fishing/Hunting/Gathering
- Recovery of materials (wood, stones)

12) Are you aware of the risks related to the degradation of the mangrove ecosystem?

- Yes
- No

13) According to you, the work to raise awareness on the protection of mangroves is :

- Important
- Pretty important
- Unimportant
- Not important.

14) In the future, how do you imagine the evolution of Mahahual's mangroves?

- Negative
- Unchanged
- Positive

If the answer is "negative" or "positive", what would be the extent of this change?

- Very strong
- Forte
- Average
- Low
- Very low

15) In your opinion, does the PDU (Plan de Desarrollo Urbano) of Mahahual reconcile urban development and mangrove protection?

- Yes
- No

16) Among the roles played naturally by the mangroves, select the proposals that seem to you to be correct. Mangroves can :

- Protect against hurricanes and other extreme weather events
- Dry up water courses and water points
- Absorb and purify all human waste naturally
- Serve as a natural refuge for local flora and fauna (especially fish renewal)
- Provide free natural resources (animal and non-animal)
- Treat a limited amount of wastewater
- Stabilize coastlines (beaches)
- Provide limited supply of natural resources
- Salinize soils

17) Among the previously selected roles, rank the natural roles played by the Mahahual mangroves in order of importance:

**Put here a short text selecting the main services played (scientifically proven) by the mangroves that could be interesting for the population of Mahahual. This indirectly highlights the usefulness of mangroves from an economic, social, environmental and security (natural disasters) point of view.**

Los SE se definen como aquellos bienes y servicios, tangibles e intangibles, que se obtienen de la naturaleza para beneficio del ser humano (Valdez y Luna, 2012), entre los que se encuentran los servicios de provisión (p. ej., madera y pescado), regulación (p. ej., purificación de agua), sustento (p.

ej., procesos ecológicos básicos como los ciclos de nitrógeno) y valores estéticos, espirituales y culturales (p. ej., belleza escénica y turismo) (Balvanera y Cotler, 2009; García-Frapolli y Toledo, 2008). Los SE son esenciales para la sociedad, sin embargo, muchas veces son poco visibles o se consideran gratuitos e infinitos. Esto se debe a que, por lo general, no se intercambian directamente en los mercados, son parte de procesos complejos de provisión de bienes y/o generan valores espirituales que típicamente no se consideran en términos monetarios.

18) After learning about the natural roles played by the Mahahual mangroves, you would say that the importance of this environment is :

- Very strong
- Strong
- Average
- Low
- Very low

19) Are there any observations or remarks that you would like to let us know that you could not express through this questionnaire?

- ..... .. (free response)
- 

19) Do you know how much money it cost to mexican citizen to lose a hectare of mangrove?

One hectare of mangrove in Mexico is estimated to cost between 60.000 and 100.000 usd yearly. This is due to ecosystem services such as filtration of water, hurricane protection and fish production (Vargas-Parada., 2016). In Cozumel, it was estimated that 1 hectare of mangrove was worth \$22.562 MEX or \$1242 usd per year, for providing ecosystem services such as forestry, recreation, carbon sequestration and not use (EcoValor, 2017).

- Example of ecosystem services of mangroves in Mahahual.  
Water filtration: filtration of sewage water after being processed at the sewage system plant, in Casitas.

Questions about the profile :

Fill in the following information (statistics) :

- Have you been living in Mahahual since? (years or months)
- In which district do you live ? (casitas, 55, pueblo)
- Gender
- Age
- Profession (1. Civil servant, 2. Own business, 3. Private employee, 4. Labourer 5. Student, 6. Retired , 7. Other : please specify)
- What is your level of education ? (none,primary, secondary, technical diploma, bachelor degree, master degree,...)
- Family situation (number of member of your household)

Is your home connected to the wastewater collection and treatment system (CAPA)?

- Yes
- No

Organization of the questionnaire in 3 points :

- Perception
- Usage
- Awareness/Evolution
- **Economic?**

### Entrevistas con los pescadores :

Perfil :

- sexo
- edad
- profession
- situacion familiar
- lugar de residencia

Pesca :

- Cómo empezó a pescar ? Porque ?
  - Que pesca ? especies principales y talla.
  - Técnicas de pesca (material)
  - Pesca pez leon ?
  - Conoce las leyes de la pesca ?
  - Que piensa que la influencia de los turistas sobre la pesca?

Medio ambiente :

- Cual es su definición de la naturaleza ?
- Cual es su definición del medio ambiente ?

- Como ven el medio ambiente aca en Mahahual ?
- Como la pesca influencia al medio ambiente marino ?
- El impacto de los turistas sobre el medio ambiente ?

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScWxxOYuNIqWhxkn3J6TOMKddoKmYBNG8xiqhlawT-BS-3avA/viewform>

Annexe 4 : Visualisation de la map interne 2020 avec grilles AGRRA terrestre et marine

