



**Mémoire**

**présenté pour l'obtention du Master**

**Mention : Eau**

**Parcours : Eau et Société**

**Caractérisation écologique et mise en œuvre d'un  
monitoring hydrologique de la forêt de palétuviers de  
Mahahual (Quintana Roo, Mexique)**

**Yannis DE PEREYRAS**

**Année de soutenance : 2020**

**Organisme d'accueil : TAKATA Research Center**



## Remerciements :

Je tiens en premier lieu à remercier le centre Takata et l'équipe pédagogique de la faculté des sciences de Montpellier pour m'avoir permis de vivre cette expérience à la fois déterminante sur le plan professionnel et riche d'un point de vue personnel.

Je pense également à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce stage :

Mme Cassiopea Carrier Doneys, directrice du centre de recherche Takata, pour la confiance et la disponibilité accordées tout au long de ce stage. Je souhaite également la remercier plus personnellement pour son soutien et sa grande compréhension suite aux différentes situations que le Covid-19 a engendrées au cours de cette période de confinement.

Mme Juliana Acero, manager des projets de recherche à Takata pour son suivi toujours dynamique et son travail d'interprète parfois imposé par les différentes situations rencontrées. De plus, sa présence et sa bonne humeur constante ont permis de rendre plus agréables les nombreuses sorties en mangrove où la praticabilité et la chaleur tropicale étaient quelquefois éprouvantes.

Johanna Bonnefoy et Léo Crespo, stagiaires à Takata, pour le travail en collaboration, l'élargissement de la vision d'étude et les relectures de qualité.

Capucine Colcombet et Rodrigue Kankou pour leurs aides dans les derniers instants de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, mes parents pour leurs soutiens et confiances sans failles au cours de ces longues années d'étude.

# Résumé

Mahahual, petit village de pêcheurs situé à l'extrême Sud-Est de la péninsule du Yucatan (Mexique) projette de devenir une destination touristique de premier plan. Ce village connaît alors un développement urbain soutenu. Cette dynamique de développement territoriale menace actuellement un écosystème de grande valeur écologique : la mangrove.

Cette communauté locale se trouve au centre d'un débat antagoniste entre d'une part, une politique volontariste ciblant le développement touristique et d'autre part, une volonté de préservation de l'équilibre des écosystèmes. Ce développement des infrastructures urbaines a pour effet d'isoler hydrologiquement les forêts de mangrove. Ce phénomène engendre ce que nous avons appelé « une autonomie écologique forcée » fragilisant structurellement ses écosystèmes. Ce mécanisme écologique provoque notamment une augmentation des concentrations en salinité et en nutriments pouvant provoquer un recul notable de ce milieu naturel. Les services écosystémiques prodigués sont alors mis en danger. La population locale et le territoire littoral seront de ce fait de plus en plus exposés aux phénomènes climatiques.

En réponse à ce constat, l'association Takata initie le tout premier suivi écologique et hydrologique des mangroves de Mahahual. Ce monitoring écologique a pour but de restaurer l'équilibre hydrologique au sein de cet écosystème.

## Mots clés

#Rupture hydrologique, #Mangrove, #Mexique, #Développement touristique, # Palétuviers, #Monitoring écologique, #Echantillonnage hydrologique, #Mahahual, #Services écosystémiques côtiers, #Politiques publiques, #Eaux usées domestiques #initiative communautaire

# Abstract

Mahahual, a small fishing village located in the extreme southeast of the Yucatan Peninsula (Mexico), plans to become a major tourist destination. This village is experiencing strong urban development. This dynamic of territorial development is currently threatening an ecosystem of great ecological value: the mangrove forest.

This local community is at the center of a conflicting debate between, on the one hand, a voluntarist policy targeting tourism development and, on the other hand, a desire to preserve the balance of ecosystems. This development of urban infrastructures has the effect of hydrologically isolating the mangrove forests. This phenomenon gives rise to what we have called "forced ecological autonomy" structurally weakening its ecosystems. This ecological mechanism notably provokes an increase in salinity and nutrient concentrations that can cause a significant decline of this natural environment. The ecosystem services provided are then endangered. The local population and the coastal territory will therefore be increasingly exposed to climatic phenomena.

In response to this observation, the Takata association is initiating the very first ecological and hydrological monitoring of the mangroves of Mahahual. This monitoring aims to restore the hydrological balance within this ecosystem.

## Key words

#Hydrological Rupture, #Mangrove, #Mexico, #Tourism Development, #Ecological Monitoring, #Hydrological Sampling, #Mahahual, #Coastal Ecosystem Services, #Public Policy, #Domestic Sewage #Community Initiative

# Table des matières

Remerciements : .....	2
Résumé .....	3
Abstract .....	4
Table des matières .....	5
Avant-Propos .....	6
Glossaire .....	7
Table des figures : .....	1
Sigles et acronymes .....	2
Introduction.....	1
I - Présentation, contexte et problématisation du cas d'étude : .....	3
A - Présentation de la structure d'accueil .....	3
B - Contexte général et présentation de l'écosystème mangrove au Mexique.....	4
C - Contexte et problématique d'étude locale (Mahahual, Quintana Roo) .....	6
D - Objectifs d'étude.....	15
II - Méthodologie : .....	16
Introduction.....	16
Démarche méthodologique et problématiques : .....	16
A - Méthodologie pour la contextualisation d'enquête : .....	17
B - La stratégie d'enquête .....	22
III - Résultats : .....	33
A - Présentation globale des résultats : .....	33
B - Analyse des résultats : .....	36
Conclusion : .....	47
Bibliographie : .....	49
Annexe : .....	53

# Avant-Propos

Ce stage s'inscrit dans un des huit programmes de recherches entrepris par l'organisation non gouvernementale Takata Research Center. Mon expérience professionnelle a pris part au programme « Habitat Cartography » qui traite également de deux écosystèmes locaux fragilisés à Mahahual : l'herbier et le récif corallien. Le travail de suivi hydrologique qui m'a été attribué constitue la cinquième phase de ce programme.

Pour des besoins scientifiques, cette structure de recherche travaille aux côtés d'universités principalement situés sur la péninsule du Yucatan et collabore étroitement avec d'autres associations environnementales locales. Ces programmes de recherche sont actuellement auto-financés par Takata bien que des demandes de subventions aient été déposées auprès de fonds privés tels que : MAR FUNDS, Fond Nat Geo, Fondo Suez. Ces demandes de subventions demeurent en attente de réponses de la part de ces bailleurs de fonds.

## **Avertissement :**

AgroParisTech, Montpellier SupAgro, l'Université de Montpellier et Takata n'entendent donner aucune approbation ni improbation aux thèses et opinions émises dans ce rapport ; celles-ci doivent être considérées comme propres à leur auteur.

*J'atteste que ce mémoire est le résultat de mon travail personnel, qu'il cite entre guillemets et référence toutes les sources utilisées et qu'il ne contient pas de passages ayant déjà été utilisés intégralement dans un travail similaire.*

# Glossaire

**Vasière** : Une *vasière* est une zone humide côtière qui se forme lorsque les sédiments détritiques (argiles, limons ou sable) sont retravaillés par les marées. On les trouve dans des zones protégées et protégées telles que les baies, les bayous, les lagunes et les estuaires. Sur le plan géologique, les vasières peuvent être considérées comme des niveaux exposés de couches de boue résultant du dépôt de sédiments estuariens, d'argiles et de débris d'animaux marins.  
<https://www.aquaportail.com/definition-4510-vasiere.html>

**Ecosystème écotone** : En écologie, un *écotone* est un territoire écologique qui marque la frontière, une zone de transition entre deux écosystèmes ou paysages différents. Il est une frontière écologique d'un transect de végétation. Cette zone biogéographique est colonisée de ce fait par des organismes appartenant aux communautés voisines et par un certain nombre d'espèces ubiquistes. L'écotone est ainsi un milieu naturel situé à la limite de deux écosystèmes voisins et qui comporte des espèces appartenant aux deux biocénoses voisines en plus des espèces ubiquistes. Le terme est parfois également utilisé pour les zones de transition larges, par exemple, la steppe forestière avec des îles boisées intercalées entre forêt et steppe. Il induit la présence d'un écocline.  
<https://www.aquaportail.com/definition-3026-ecotone.html>

**Zone intertidale** : La *zone intertidale* est une zone de l'estran subissant les marées, souvent en zone de marnage de vive-eau. La zone va du niveau des basses marées au niveau des hautes marées de vives-eaux moyennes. La zone intertidale possède toutes les caractéristiques de la zone médiolittorale. Elle intervient dans la zone de balancement des marées des côtes littorales, recouverte à marée haute et découverte à marée basse, avec le replat de marée. Les zones intertidales s'assèchent deux fois en 24 heures à cause des marées et sont inondées deux fois.  
<https://www.aquaportail.com/definition-489-zone-intertidale.html>

**Eaux saumâtres** : Une *eau saumâtre* est une eau, ou un plan d'eau tel qu'une lagune saumâtre par exemple, dont la salinité est intermédiaire entre celle de l'eau douce et celle de l'eau de mer. La salinité est comprise entre 0,1% et 1%. Les variations de salinité y sont parfois grandes, fonctions des pluies. L'eau saumâtre se distingue de l'eau douce principalement par le fait qu'elle contient trop de sel (malgré sa salinité relativement faible) pour être potable pour l'homme. Par convention, les eaux saumâtres désignent toute les eaux salées dont la teneur en matières dissoutes est inférieure à celle de l'eau de mer, on y classe les eaux salées à concentration comprise entre 1 000 et 10 000 ppm, donc intermédiaire entre les eaux douces et les eaux salines. Techniquement, l'eau saumâtre contient entre 0,5 et 30 grammes de sel par litre.

<https://www.aquaportail.com/definition-7304-eau-saumatre.html>

**Mangrove** : « 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. » (Capdeville, 2018)

## Table des figures :

Figure 1 : Répartition spatiale des mangroves sur le territoire national mexicain (2015).....	5
Figure 2 : Répartition spatiale des mangroves à l'échelle régionale (2015) .....	6
Figure 3 : Quintana Roo et ses zones touristiques côtières (Mexique) Source : (Meyer-Arendt, 2009)	7
Figure 4 : Chronologie des principaux événements participant à la logique de conservation des mangroves au Mexique .....	9
Figure 5 : Première phase de destruction des mangroves de Tajamar (Cancún) .....	11
Figure 6 : Liste récapitulative des services écosystémiques des zones humides (Source : Rapport RAMSAR) .....	14
Figure 7 : Rizophora mangle ou "mangrove rouge" en zone intertidale.....	18
Figure 8 : Carte locale des éléments d'échantillonnage hydrologique .....	19
Figure 9 : Variation saisonnière de la salinité en milieu mangrove au Bangladesh (Wahid, Babel, & Bhuiyan, 2007).....	21
Figure 10 : Evolution saisonnière du milieu mangrove entre la période sèche (gauche) et la période humide (droite) .....	21
Figure 11 : Tableau de synthèse méthodologique des références scientifiques abordant l'enquête qualitative des masses d'eau.....	23
Figure 12 : Schéma de la construction d'un parcours d'échantillonnage typique .....	25
Figure 13 : Description schématique d'un quadrat type .....	26
Figure 14 : Cycle de l'azote dans le sol et l'eau .....	28
Figure 15 : Gammes de lecture des valeurs d'analyse du test physico-chimique.....	31
Figure 16 : L'appareil de mesure de la salinité et de la température à disposition .....	32
Figure 17 : Périodes d'acquisition des échantillons et contexte pluviométrique de l'enquête .....	33
Figure 18 : Répartition spatiale des échantillons hydrologiques obtenus au cours de l'enquête Avril-Juillet 2020 .....	34
Figure 19 : Derniers palétuviers de Mahahual encore implantés en zone intertidale.....	35
Figure 20 : Tableau récapitulatif des limites de tolérance par indicateurs physico-chimiques selon l'espèce de palétuvier .....	36
Figure 21 : Valeurs moyennes des indicateurs d'analyse par zones d'échantillonnage (A, B, C).....	37
Figure 22 : Variations altitudinales au sein des mangroves de Mahahual : zoom sur la zone du village et du port de croisière.....	38
Figure 23 : Prise aérienne du phénomène des "invasions" et du fractionnement des mangroves de Mahahual (Source : groupe facebook "Invasiones e inseguridad en Mahahual").....	38
Figure 24 : Forêt de mangrove impactée par l'ouragan Dean (2007). Paysage pris en zone C à proximité du cours d'eau du Rio Bermejo.....	39
Figure 25 : Schématisation du phénomène d'assèchement du Rio Bermejo et de ses impacts.....	40
Figure 26 : Amplitude des valeurs de salinité par zones d'échantillonnage .....	41
Figure 27 : Exposition de la corrélation entre taux de salinité et type de palétuvier .....	41
Figure 28 : Cartes des concentrations en (A) Ammoniaque NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , (B) Nitrate NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et (C) Nitrite NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> au sein des mangroves de Mahahual.....	42
Figure 29 : Distribution spatiale des espèces de palétuvier au sein de l'écosystème mangrove de Mahahual.....	44
Figure 30 : Fréquence des espèces de palétuvier par zones d'échantillonnage .....	45

# Sigles et acronymes

**AGGRA** : Gulf Rapid Reef Assessment

**CONABIO** : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

**CONAGUA** : Comisión Nacional del Agua

**CONAFOR** : Comisión Nacional Forestal

**EUD** : Eaux Usées Domestiques

**FGE** : Fiscalía General del Estado

**FORNATUR** : Fórum Nacional dos Secretários e Dirigentes Estaduais de Turismo

**GPS** : Global Positioning System

**INEGI**: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

**SEMARNAT** : Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

**SMMM** : Sistema de Monitoreo de los Manglares de México

**STEP** : STation d'ÉPuration des eaux usées

**TRI** : Tolerance Range Index

**ONG** : Organisation Non Gouvernemental

**PDU** : Plan de Desarrollo Urbano

# Introduction

Au cours de ces trente dernières années, le milieu humide côtier tropical mangrove a vu son extension mondiale diminuer de près de 20 %. En dépit d'un mouvement international prenant le sens d'une meilleure reconnaissance et préservation de cet écosystème, son taux annuel de déforestation (1 à 3 %) conserve aujourd'hui une dimension hautement préoccupante (Alongi, 2012). Pourtant, ses puissantes capacités de stabilisation des côtes, d'absorption de larges 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 délimiter notre objet d'étude, nous nous appuyons 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 travers ce premier tour d'horizon, cette définition met d'ores et déjà en exergue l'état de faiblesse écologique avancée dans laquelle se trouvent les mangroves de Mahahual. En effet, la mangrove de Mahahual s'est progressivement vu retirer toutes interactions directes avec la mer. En ce sens, sa fonction écotone est aujourd'hui grièvement mise en danger. 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. Cet isolement hydrologique est intervenu aussi bien au niveau de l'interface mer/mangrove qu'au sein de la mangrove elle-même. Le fractionnement de la mangrove en complexes forestiers indépendants a engendré ce que nous avons appelé une « *autonomisation écologique forcée* » fragilisant notablement l'écosystème global. En conséquence, des taux de salinité et de concentrations en azote élevés ont été identifiés au sein des mangroves. Malgré ce constat, les interventions des autorités publiques mexicaines en charge du respect de la protection des mangroves demeurent 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 hydrologique et écologique des mangroves de Mahahual. Ayant conscience de l'état de dégradation avancé des mangroves, l'ambition sous-tendant ce suivi hydrologique reste l'identification de zones fragilisées dans un but de conservation et de restauration de la circulation hydrologique. Afin de répliquer avec pertinence à cette problématique, trois sous-objectifs d'étude se sont logiquement dégagés : le premier objectif se doit de répondre aux exigences méthodologiques posées par un suivi hydrologique destiné à être opéré sur le long-terme. Le second portera sur l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus suite à la campagne d'échantillonnage. La proposition de mesures de conservation et de restauration hydrologique sur le territoire constituera notre sous-objectif final d'étude.

Plus concrètement, cette étude s'est spatialement limitée aux mangroves côtières de Mahahual et s'est étendue du mois de mars au mois d'août 2020. Cette investigation a finalement permis la collecte de 110 échantillons hydrologiques. Ces résultats fourniront les données de référence de notre base de données ou « *data 0* ». En effet, la base de données construite reste destinée à s'enrichir par les informations collectées au cours des campagnes à venir.

De surcroît, la mise en problématique de ce cas d'étude a principalement révélé d'importantes insuffisances à l'endroit du suivi scientifique de cet écosystème par les services publics environnementaux. Des incohérences voire de véritables concurrences entre les politiques publiques se sont dégagées à une échelle dépassant le seul cas des mangroves de Mahahual. Des difficultés d'intégration et de mise en application des politiques environnementales sur les réalités territoriales locales apparaissent également comme une cause commune au phénomène de recul des mangroves sur de nombreuses parties du territoire mexicain. Ainsi, au-delà de la démarche strictement scientifique visant à caractériser ce milieu naturel, ce programme de recherche se propose également d'entamer un dialogue avec les acteurs locaux sur les problématiques soulevées par les décisions politiques, sociales et économiques impactant l'intégrité de l'écosystème mangrove.

Afin d'aborder l'intégralité des points évoqués ci-dessus, ce mémoire suivra la structure ci-dessous :

- Nous exposerons dans un premier temps l'ensemble introductif de ce mémoire constitué par l'état de l'art du sujet global et la mise en problématique de notre cas d'étude. Cette partie aboutira sur une présentation plus détaillée des objectifs qui m'ont été fixés.
- Plus loin, nous nous concentrerons sur la construction méthodologique de notre monitoring en prenant soin de mettre en évidence les principales limites identifiées. Nous évaluerons notamment les limites engendrées par nos choix méthodologiques et par le matériel d'analyse à disposition.
- Pour finir, ce mémoire débouchera sur une analyse et interprétation des résultats obtenus en conservant comme trame de fond les effets de la rupture hydrologique sur le fonctionnement écologique de cet écosystème. Ces résultats seront systématiquement mis en perspective puis mis en discussion.

***Sujet de recherche : Caractérisation écologique et mise en œuvre d'un monitoring hydrologique de la forêt de palétuviers de Mahahual***

# I - Présentation, contexte et problématisation du cas d'étude

## A - Présentation de 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 d'encadrer 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.

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.



## B - Contexte général et présentation de l'écosystème mangrove au Mexique

En 1981, la superficie totale de la mangrove à échelle mondiale était de l'ordre de 100 000 km<sup>2</sup> avec les techniques de calcul de l'époque (Blasco, 1982). La réévaluation la plus récente (2014) nous alerte sur la réduction avancée de cette superficie pour atteindre aujourd'hui 81 000 à 84 000 km<sup>2</sup> (Hamilton et Casey, 2016). En une trentaine d'années, l'étendue de la mangrove mondiale s'est ainsi vue diminuée de près de 20 %. Les facteurs causant ce recul sont multiples et fortement dépendants des activités humaines en action sur les territoires où sont implantés ces écosystèmes côtiers. En Asie et en Afrique, l'aquaculture et plus précisément, la production en masse de crevettes ont engendré des dommages tout à fait considérables par le mécanisme de conversion des sols. Au Mexique, le dernier rapport de la CONABIO (2017) affirme qu'il s'agit davantage d'une conséquence induite par l'extension urbaine. Cette dynamique urbaine côtière se trouve régulièrement motivée par une politique publique de nature fortement volontariste visant la mise en valeur des littoraux. Sur la côte caribéenne de Mahahual, le recul préoccupant de la mangrove s'inscrit en tout point avec ce constat.

La distribution spatiale de la mangrove peut se concevoir variable, elle poursuit toutefois une constante climatique apportée par la ceinture intertropicale (30° N, 30° S) où elle rencontre les conditions stables et adéquates à son bon développement. L'on retrouve en effet sous ces latitudes, de faibles variations thermiques (moins de 10 °C) et un apport pluviométrique toujours conséquent au cours de l'année. Le paramètre géomorphologique est aussi un élément déterminant pour la colonisation des palétuviers sur les milieux côtiers. En ce sens, il existe une étroite relation entre les récifs coralliens et les mangroves sans que s'installe pour autant, une coexistence systématique. En effet, par la réduction des effets de houles et des vagues, les barrières coralliennes offrent les conditions hydrodynamiques optimales à la croissance des palétuviers notamment au cours de leur stade de fragilité le plus élevé (« propagule »). À partir de ce prérequis physique, l'on peut alors observer des forêts de mangroves d'une richesse remarquable au sein d'éléments côtiers « fermés » proposant des conditions d'accalmie identique. Généralement, ces éléments géomorphologiques sont : les golfes, baies, deltas et plus localement, les criques ou les anses. Définitivement, cet écosystème apparaît comme relativement sensible à son environnement direct. La mangrove se distingue finalement par deux particularités remarquables : elle se développe en zone intertidale (soumis aux régimes des marées) et est une espèce halorésistante ou halophyte (elle peut tolérer des taux de salinité élevés). Par sa nature écotone, elle dispose d'un rôle écologique décisif puisqu'elle joue le rôle de transition entre les écosystèmes marins et terrestres.

L'étude portée par Giri *et al.* (2011) précise que 75 % des mangroves du monde sont étendues sur une quinzaine de pays seulement dont 42 % en Asie, 20 % en Afrique et 15 % au sein des trois Amériques. Avec 775 555 hectares de mangrove en 2015 représentant 5 % de l'extension globale, le Mexique s'octroie la cinquième place mondiale en termes d'extension forestière (CONABIO, 2017). En outre, Feller & Sitnik (2014) mettent en relief l'importante disparité de la diversité des palétuviers entre la zone tropicale « occidentale » et « orientale ». En région « orientale », approximativement 40 espèces de palétuviers sont aujourd'hui reconnues tandis qu'en zone « occidentale », 8 espèces seulement sont répertoriées. Cet écart quantitatif découlerait selon (Blasco, 1982) d'un différentiel d'apport en eaux douces. L'approvisionnement substantiel et continu en eaux douces serait à l'origine des plus belles formations de mangrove. En ce sens, l'implantation des complexes de mangrove dans les zones deltaïques donne par exemple lieu à des écosystèmes d'une richesse remarquable. Le territoire mexicain ne bénéficiant pas par ailleurs, d'un réseau fluvial comparable à ceux d'Asie du Sud-Est (Figure 1). De plus, dans la partie tropicale caribéenne du Mexique, l'écart pluviométrique entre saison sèche et humide reste fortement marqué (voir annexe). Pour autant, sur le total des 8 espèces présentes en région « occidentale », 6 types de palétuviers sont tout de même rencontrés au Mexique.

Dans un souci de gestion de cette richesse écologique, la CONABIO, la CONAFLO, la CONAGUA, l'INE et le SEMARNAT sont les institutions publiques chargées du développement des

connaissances, de la mise en œuvre des suivis écologiques et de la préservation des mangroves. Dès 1994<sup>1</sup>, l'autorité fédérale mexicaine classe quatre de ces six espèces de mangroves en « protection spéciale » puis réévalue ce statut juridique en 2010<sup>2</sup> pour les incorporer aux « espèces menacées ». Cette évolution du degré de protection juridique des mangroves traduit bien l'accroissement des dégradations de cet écosystème à l'échelle nationale. Pour autant, l'impact bien réel des phénomènes climatiques sur la mangrove mexicaine ne saurait fonder qu'une explication partielle à cette décision juridique conservatrice. Cette décision devrait être davantage interprétée comme une forme de reconnaissance par l'autorité publique, d'une mise en danger excessive de cet écosystème par les activités anthropiques (aussi bien privées que publiques). Ainsi, la reconnaissance publique en 2010 des dégradations environnementales, pourrait laisser penser que les fondements d'une politique environnementale nationale cohérente s'est en partie instituée à cette période.



Figure 1 : Répartition spatiale des mangroves sur le territoire national mexicain (2015)

La cartographie ci-dessus permet d'étudier la répartition spatiale des mangroves à l'échelle nationale. On peut constater que l'écosystème prend aussi bien place sur la côte caribéenne que pacifique. Les formations les plus importantes sont toutefois circonscrites autour de la côte caribéenne au nord et à l'ouest de la péninsule du Yucatan, où ces dernières jouissent de la protection naturelle qu'offre le golfe du Mexique. Le long de l'état du Quintana Roo, serpente la deuxième plus grande barrière de corail au monde : le récif méso-américain (1000 km). L'on note ainsi un lien fort entre les zones de mangrove et ce récif qui poursuit sa progression jusqu'à la pointe sud de l'Amérique Centrale. Une importante interaction entre ces deux écosystèmes prend alors place pour en former un plus grand : l'écosystème côtier tropical. L'écosystème côtier tropical est un composé de trois milieux naturels : la mangrove, l'herbier et le récif corallien. L'hydrographie apparente sur cette carte (Figure 1) souligne enfin, l'absence de formations deltaïques notables sur la péninsule du Yucatan.

<sup>1</sup> NOM-059-ECOL-1994

<sup>2</sup> NOM-059-SEMARNAT-2010

Ce contexte général posé, nous expliciterons dans les parties suivantes, en quoi le phénomène écologique d'isolement hydrologique des mangroves de Mahahual est la résultante intrinsèque de décisions politiques et sociales. Cette démonstration s'inscrira par ailleurs, en accord avec l'approche méthodologique du master « Eau et Société » qui consiste à mettre systématiquement en lien : processus socio-économiques et gestion des hydrosystèmes.

### C - Contexte et problématique d'étude locale (Mahahual, Quintana Roo)



Figure 2 : Répartition spatiale des mangroves à l'échelle régionale (2015)

Situé au creux d'un triangle composé par trois pôles majeurs de conservation des écosystèmes côtiers, Mahahual apparaît comme le point tout désigné où se tiennent les logiques de *développement*. Encerclé au nord par la grande réserve de biosphère de Sian K'aan inscrite au patrimoine de l'UNESCO, au sud par l'aire de récif protégée de Xcalak et à l'est, par les atolls de Banco Chinchorro, Mahahual est environné par des espaces naturels d'une diversité remarquable (Figure 2). Pour autant, la mangrove de Mahahual constitue, dans une logique écosystémique globale, elle aussi, une zone de continuité écologique pour les trois pôles de conservation cités.

Passant d'une faible communauté de pêcheurs (1970) à une ville balnéaire en devenir, le développement urbain de Mahahual s'est fortement accéléré au cours de ces dernières années. Bien que Mahahual reste aujourd'hui une localité de taille très moyenne (1500 habitants), les projections urbaines et démographiques prescrites par le PDU (*Plan de Desarrollo Urbano*) apparaissent comme extrêmement ambitieuses. En effet, transformant son modèle économique autrefois basé sur la pêche et l'artisanat local, Mahahual s'est, depuis les années 1990, entièrement tournée vers le tourisme de masse et les services qui lui sont rattachés (taxis, centre de plongée, restauration, etc.). Ce virage économique a été majoritairement porté de concert par l'agence fédérale mexicaine chargée du développement touristique (FORNATUR) et par le gouvernement *estatal* du Quintana Roo (Meyer-

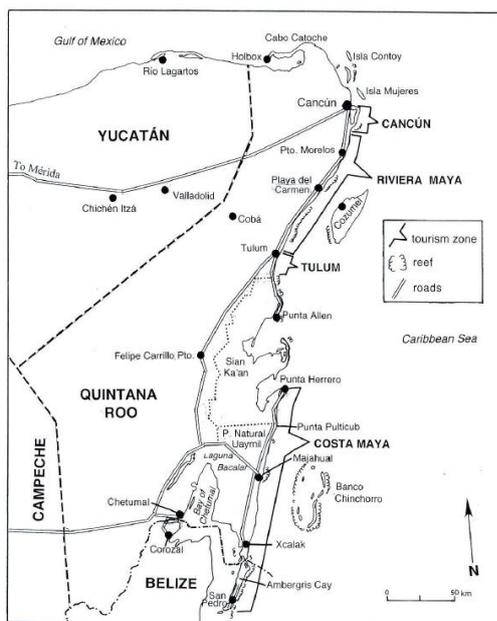


Figure 3 : Quintana Roo et ses zones touristiques côtières (Mexique) Source : (Meyer-Arendt, 2009)

Arendt, 2009). Cette politique commune s'est réunie au sein du projet de développement touristique régional : « Costa Maya ». Cette entreprise constitue en vérité, l'aboutissement d'une démarche volontariste de plus grande envergure visant la mise en valeur de la côte caribéenne de l'état du Quintana Roo (Figure 3) et par voie de conséquence, le renforcement et la stabilisation de son peuplement<sup>3</sup>. La planification territoriale de cette partie du Quintana Roo a été initiée dans les années 1970 par la création de la destination Cancún (130 habitants) qui forme maintenant une ville de près de 800 000 habitants. La dimension extrêmement ambitieuse du PDU de Mahahual apparaît donc comme la réponse locale inévitable au projet de développement touristique de la côte caribéenne du Quintana Roo portée par un consortium public multiniveaux : état fédéral et état fédéré (QR). Finalement, le poids (intérêts) du consortium public évoqué semble pesé sur la véritable marge de manœuvre de la petite localité de Mahahual.

Très rapidement le port de Mahahual ou « Puerto Costa Maya » a représenté la deuxième destination croisiériste du Mexique avec 10 à 12 bateaux de croisière par semaine en 2007 (Meyer-Arendt, 2009). L'essor autour de cette activité économique s'est accompagné localement d'importantes créations d'emploi. Sur ce point, la situation exceptionnelle du Covid-19 a révélé l'extrême fragilité du secteur touristique où des phases de licenciement massives se sont succédées.

Pour autant, « l'urgence » avec laquelle le PDU de Mahahual fixe ses objectifs aussi bien démographiques (+100 000 habitants en 2030) qu'infrastructuraux pose la question de la profondeur réelle des conclusions formulées par les études d'impacts environnementaux. En effet, à la suite d'un examen collectif conduit par Takata sur ce document local d'aménagement du territoire (PDU « Nuevo Mahahual »), il transparaît une intégration insuffisante des écosystèmes côtiers en général et des mangroves en particulier à ce mitage urbain. Cette extension produit alors des mécanismes socio-économiques impactant directement et indirectement l'état écologique des mangroves de Mahahual :

- Spéculation foncière forte en bordure littorale engendrant une « course » légale et illégale des terres « *invasións* » ;
- Privatisation accentuée de zones forestières de palétuviers (nouvelles délimitations) ;
- Développement du réseau routier afin d'améliorer la connectivité du mitage urbain ;
- Croissance démographique engendrant une augmentation de la production de matières polluantes (eaux grises, produits chimiques, déchets).

C'est à partir de ces premiers mécanismes concrets de pressions anthropiques que nous avons pu percevoir sur le territoire le phénomène d'isolement et de fractionnement hydrologique des mangroves. Les deux points suivants ont alors pour ambition de dégager les causes sus-jacentes à cette coexistence difficile entre l'urbain et le naturel. Dans un premier temps, nous conserverons cette dimension locale en exposant les importantes lacunes scientifiques (connaissances) spécifiques aux mangroves de Mahahual et ses implications. Ensuite, nous prendrons le recul nécessaire pour soumettre la problématique d'incohérence structurelle entre les politiques publiques économiques et

<sup>3</sup> Le territoire du Quintana Roo était qualifié par le géographe Clinton Edwards en 1969 de « Mexico's empty quarter » avant ce plan de développement touristique.

environnementales au Mexique. Enfin, nous verrons les répercussions directes de l'isolement hydrologique sur les services écosystémiques que prodigue naturellement la mangrove de Mahahual.

*La mangrove de Mahahual, un écosystème côtier particulièrement mal connu : des lacunes scientifiques motivées ?*

À l'heure actuelle, les institutions publiques chargées du développement des connaissances scientifiques telles que la CONABIO, la CONAFOR, la CONAGUA et plus indirectement, l'INEGI, n'ont constitué qu'une base d'information sommaire sur la biodiversité de ce territoire. En effet, seule la CONABIO propose à une fréquence de 5 ans et dans le cadre de son programme de monitoring d'échelle nationale « SMMM »<sup>4</sup>, une mise à jour cartographique régulière de l'extension spatiale de la mangrove de Mahahual. Ce SMMM nous donne également des précisions sur l'évolution de l'état de santé général des forêts de mangrove. Toutefois, ces informations qualitatives ont été dégagées à partir d'un traitement statistique et d'une interprétation cartographique sans avoir mené d'investigations directes sur le terrain. Les informations spatiales proposées par la CONABIO restent à ce jour et aux côtés d'une thèse (Hirales-Cota, 2009), les seules données exploitables sur la mangrove de Mahahual.

Ces inconsistances en termes de savoirs scientifiques locaux ont dû poser de sérieuses limites lors du processus d'intégration des écosystèmes côtiers à la planification urbaine du « Nuevo Mahahual ». En effet, bien que la précision des informations relatives à l'extension spatiale des mangroves de Mahahual (CONABIO) soit une donnée essentielle aux mesures d'intégration, une compréhension plus fine et complexe de cet écosystème reste une démarche scientifique tout à fait fondamentale. En ce sens, diverses études disciplinaires doivent être entreprises sur cet écosystème fragilisé afin d'y dégager par une synthèse interdisciplinaire, une vision de qualité exhaustive et pertinente. Pour exemple, l'avancée de notre analyse hydrologique a grandement souffert du manque de connaissances dans les domaines hydrogéologiques, pédologiques, topographiques, botaniques et biologiques (faune). Il n'y a tout simplement pas le matériel scientifique nécessaire pour définir judicieusement les zones de moindres impacts. Ainsi, il apparaît que les décisions relatives à la délimitation des zones de continuité écologique (et donc hydrologique) de la mangrove se sont faites en l'absence d'éléments scientifiques tangibles. C'est donc pour pallier ces lacunes particulières que Takata met en œuvre de manière indépendante, le monitoring écologique et hydrologique des mangroves de Mahahual. Il s'avère ici que la responsabilité de « l'expertise institutionnelle » en termes de production de savoirs s'est localement transférée vers une forme d'« expertise collective » émergente et engagée que l'on peut rattacher aux « savoirs militants ». Le monopole (institutionnel) de la production de connaissances scientifiques a donc été ici assurément bousculé (Lauchard & Simonet, 2009). C'est aussi en ce sens que l'on peut considérer que notre thématique de recherche qui, d'apparence profondément ancrée dans les sciences naturelles, rejoint finalement au travers de ces considérations sociologiques, le champ des problématiques humaines.

Ce constat met en relief l'écart entre d'une part, la puissante volonté publique qui se ressent dans l'entreprise de développement touristique de la zone, et de l'autre, l'attentisme scientifique concernant la production *vitale* de connaissances. Ainsi, nous pouvons nous questionner sur la nature de cette situation : est-elle de nature volontaire ou subie ? Doit-on y voir une volonté de minimisation des impacts écologiques de ce projet ? Simples priorités politiques et économiques ? Ou plutôt, des moyens humains et financiers insuffisants ? Une thématique de recherche qui se découvre peu à peu ? Le point suivant indique qu'il s'agirait bien davantage d'une combinaison complexe de ces facteurs.

---

<sup>4</sup> « Sistema de Monitoreo de los Manglares de México » : ce programme de suivi écologique centré sur l'écosystème mangrove a été initié en 2005 par la CONABIO aux côtés du ministère des Affaires maritimes (SEMAR). À partir d'images satellites historiques, le catalogue de données cartographiques a toutefois pu être entamé à partir des années 70/80.

Le problème de l'intégration des politiques environnementales au Mexique, une cause politique et sociale à l'origine de la fragilisation de la mangrove de Mahahual :

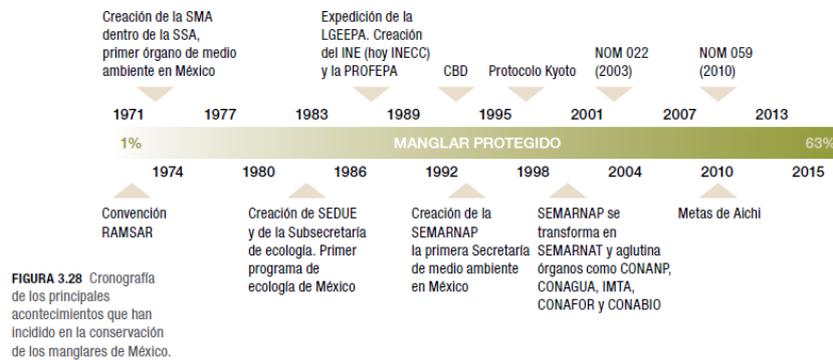


Figure 4 : Chronologie des principaux événements participant à la logique de conservation des mangroves au Mexique

Définies par décret (2010) comme espèces végétales menacées, les espèces de palétuviers de Mahahual revêtent aujourd'hui un intérêt écologique crucial pour la conservation de la biodiversité au Mexique. En ce sens, le dernier rapport RAMSAR sur l'état de santé des zones humides mondiales, alerte sur une situation écologique extrêmement préoccupante des mangroves en Amérique Centrale où 40 % des espèces sont directement menacées d'extinction (RAMSAR, 2018). Pour certains auteurs, ce constat préoccupant tient son origine à la généralisation de stratégies économiques de court-terme sur le littoral mexicain (Flores-Mejía, Aguirre Vallejo, Flores Hernández, & Guardado, 2010) et aux mauvaises intégrations et applications des politiques environnementales au niveau local (Brenner, 2018). De plus, les travaux de (Hernández Melchor et al., 2016) nous ont permis d'identifier une importante contradiction entre les lois et politiques publiques en faveur du « bien-être social » des citoyens mexicains et de celles relatives à la protection de l'environnement. En effet, l'incitation à l'installation de peuplement, les infrastructures hydrauliques et la promotion des activités agricoles ou touristiques peuvent figurer comme autant de mesures sociales pouvant impacter *in fine*, les espaces naturels si la coordination entre ces objectifs n'est pas pleinement pensée.

Afin d'exemple, le Mexique dispose d'une tradition politique volontariste à l'égard des zones rurales reculées où la privatisation des terres était soutenue par l'état fédéral afin d'en favoriser le peuplement. Cette politique de privatisation des terres s'adressait alors tout particulièrement aux producteurs du milieu agricole ou « *éjid*os ». De cette logique « pionnière », a découlé une importante parcellisation des terres. Cette dernière a été incitée par les autorités publiques mexicaines sans toujours faire l'objet d'une légalisation ou d'une simple note officielle après coup<sup>5</sup>. Ce mécanisme a été reproduit par la communauté de pêcheurs de Mahahual qui a été la première à investir cet espace littoral. Ces zones côtières composaient alors l'aire d'extension naturelle de la mangrove de Mahahual en son espace le plus fragile, l'interface terre-mer. La forêt de mangrove de Mahahual a donc dans un premier temps, connu un important recul vers les terres avant d'être fractionnée en autant de petites propriétés privées. Cette fine parcellisation a fortement participé à l'altération hydrologique que l'on peut constater aujourd'hui sur ce territoire. Il reste toutefois à noter qu'à la différence des cultures agricoles terrestres, les pêcheurs pionniers de Mahahual n'ont pas modifié aussi structurellement, la couverture originelle du sol même si du point de vue écosystémique, l'on peut juger que les impacts directs ont été proches. À ce propos, la Loi Nationale sur l'Eau ou « *Ley de Aguas Nacionales* » (2012), stipule qu'il est « *d'utilité publique de restaurer l'équilibre écologique lié à l'eau* » dans les zones humides détériorées par les activités anthropiques. Ainsi, il relève de la responsabilité de la Commission Nationale de l'Eau mexicaine (CONAGUA) de « *promouvoir et, le cas échéant, de prendre*

<sup>5</sup> D'importantes problématiques sont soulevées par ce point actuellement et des tensions ont lieu avec les autorités locales.

les actions et les mesures nécessaires pour réhabiliter ou restaurer, et établir un périmètre naturel d'entourage ou de protection de la zone humide, afin de préserver les conditions hydrologiques et l'écosystème » (titre 7, chapitre I, article 86 bis 1, section IV). Dans le cadre de la préservation des continuités écologiques, cette mesure de restauration peut être manœuvrée de concert avec une autre institution publique chargée des problématiques environnementales, le SEMARNAT<sup>6</sup>. Parmi les nombreuses compétences du SEMARNAT, cette institution de niveau fédéral se charge des études environnementales permettant de délivrer les autorisations des différents projets de construction ayant un impact sur les milieux naturels. Dans le cas d'une rupture écologique avérée, le SEMARNAT doit « élaborer et mettre en œuvre des programmes de restauration écologique pour la récupération et le rétablissement des conditions favorables au développement et à la continuité des processus naturels » (Hernández Melchor et al., 2016). Ainsi, au-delà de la nécessité de pallier un sévère manque de connaissances scientifiques locales, l'étude hydrologique initiée par Takata pourrait déclencher cette mesure légale si la détérioration du flux hydrologique de la mangrove de Mahahual se trouvait scientifiquement démontrée. La stratégie finale de ce projet pourrait ainsi se comprendre en la mobilisation d'une expertise par des agents publics compétents dans le domaine de la restauration hydrologique en signalant l'état hydrologique critique de cette forêt de mangrove.

Malgré ces observations (Hernández Melchor et al., 2016) et (Brenner, 2018) estiment que le cadre juridique actuel concernant la protection des mangroves demeure satisfaisant mais trop souvent supplanté par les intérêts socio-économiques. Au-delà de la problématique de coordination entre les institutions publiques et de la prépondérance des stratégies économiques, Brenner (2018) a identifié plusieurs freins réduisant l'intégration de politiques environnementales promouvant la protection des mangroves au Mexique :

- Malgré un pouvoir politique structuré de manière décentralisé, car de type fédéral<sup>7</sup>, l'influence du pouvoir central maintient un processus de décision encore fortement inscrit en verticalité. Ainsi, l'organisation centraliste des institutions publiques ignore les circonstances socio-environnementales locales ce qui affecte considérablement les politiques de conservation de l'environnement.
- « Les ambiguïtés des cadres juridiques concernant le régime foncier dans les zones de mangroves. »
- « L'inefficacité et la corruption des institutions publiques. »
- Un écart de budget devenu problématique entre les services publics environnementaux et économiques qui traduit *in fine*, une disparité importante dans la priorité et l'influence politique des différents services. Cette disparité produit un déséquilibre dans les rapports de force institutionnels où les services publics environnementaux peuvent par moment paraître inféodés aux services chargés de l'élaboration des stratégies économiques. Sur ce point, un rapide focus sur le cas des mangroves de Tajamar à Cancún (Figure 5) nous fournit un exemple parlant :

46 hectares de mangroves en bordure littorale de la ville balnéaire de Cancún ont été convertis en zones à urbaniser pour recevoir des projets immobiliers d'envergure. Cette forêt de mangrove abritait alors et au-delà des espèces de mangroves menacées, des espèces animales endémiques menacées d'extinction telles que le crocodile moreletti ou le crabe bleu. Ce projet porté par l'institution gouvernementale du FORNATUR chargée du développement touristique à l'échelle nationale avait alors reçu l'aval du Ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles (SEMARNAT) malgré d'évidents impacts écologiques. Ce projet a ravivé d'importantes tensions avec les associations locales

---

<sup>6</sup> Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

<sup>7</sup> Décomposé en entités administratives (États fédérés) disposant d'une certaine autonomie.

qui dénoncent un véritable « écocide ». La problématique de cette affaire repose sur la temporalité des autorisations de construction délivrées. En effet, ces autorisations sont intervenues un an avant l'entrée en vigueur de la « loi générale sur la faune » de 2007 qui aurait rendu illégal ce projet. Pour certains observateurs, ce projet témoigne à la fois d'un conflit d'intérêts et d'une impuissance constante des services environnementaux face aux intérêts touristiques particulièrement pesants dans la péninsule du Yucatan. Cette impuissance apparente serait symptomatique pour certains, d'une complicité tacite entre ces services d'état. Une plus grande étanchéité entre eux devrait donc être ciblée à l'avenir pour garantir la pleine indépendance des jugements tenus.



Figure 5 : Première phase de destruction des mangroves de Tamar (Cancún)

De retour sur notre zone d'étude, il a été constaté une dernière difficulté, l'application et le respect des lois environnementales sur le territoire. Cette dimension parfois occultée nécessite pourtant un corps de fonctionnaire en présence à échelle locale pour constater les infractions et les traduire si besoin, au niveau pénal. À Mahahual, le très faible effectif de police apparaît insuffisant pour couvrir l'ensemble de ces zones potentielles d'infractions. Il en découle de cette situation, un sentiment ambiant d'impunité face aux actions menant à une dégradation de l'écosystème et le constat d'une certaine inefficience des politiques environnementales portées par les institutions. Néanmoins, en ce début d'année 2020, la localité de Mahahual a vu s'installer un service judiciaire chargé de conduire et faire respecter « l'action publique ». En d'autres termes, la mission de ce dernier tient à faire respecter la loi et les politiques publiques sur le territoire mexicain. Ce service porte l'étiquette de « Fiscalía General del Estado » ou (FGE) et représente un service « déconcentré » du gouvernement fédéral mexicain au niveau de l'état du Quintana Roo. Leur présence s'est progressivement imposée suite aux évidentes dégradations qu'a subies la mangrove de Mahahual ces dernières années et plus particulièrement pour répondre au phénomène actuel des « *invasións* » où une enquête publique a été ouverte pour « crime contre l'environnement »<sup>8</sup>. La FGE se chargera donc de constater les infractions ou délits commis à l'encontre de la forêt de mangrove et renforcera ainsi, un contrôle local en franche perte de vitesse.

En ce sens et à l'appui du volume d'information dégagée par ce programme de recherche<sup>9</sup> centré sur l'écosystème mangrove, Takata initiera une collaboration à la demande de la FGE. Cette

<sup>8</sup> Voir : <https://www.lajornadamaya.mx/quintana-roo/2443/Investiga-la-FGE-delitos-ambientales-en-Mahahual>

<sup>9</sup> Cette étude de suivi écologique fait partie du programme de recherche « Cartographie des habitats côtiers »

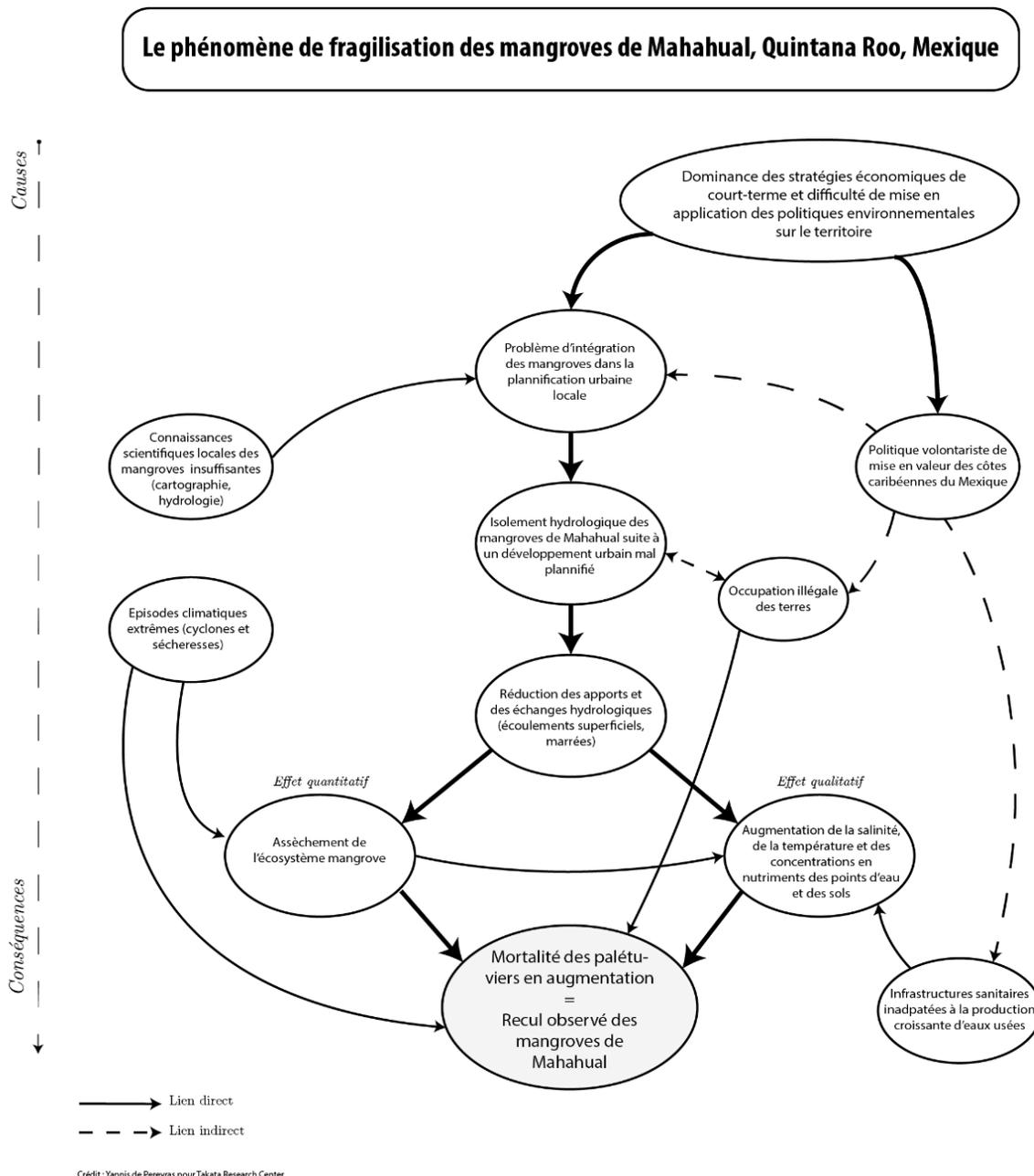
collaboration permettra d'apporter des éléments scientifiques jugés essentiels à l'enquête pénale en cours. Pour autant, Takata ne souhaite prendre aucune position sur ce phénomène des « *invasións* ». En effet, à l'instar de la problématique des *ejidos* précédemment développée, ce phénomène local des « *invasións* » matérialise territorialement, ce manque de coordination voire, de contradiction constatée entre les diverses politiques publiques entreprises. Sur ce point, des échanges tenus avec la population de ces zones d'occupation illégale de terres nous ont permis de nous renseigner davantage sur les causes de ce phénomène.

Enfin, une problématique sociale a fait surface sur notre zone d'étude. En effet, la population locale ne parvient pas toujours à identifier correctement certaines espèces de mangroves. Parce que la mangrove rouge est extrêmement reconnaissable (racines en échasses ou suspendues), les autres espèces restent parfois totalement méconnues. Un travail de sensibilisation environnementale auprès de la population locale en générale et des plus jeunes en particulier apparaît alors nécessaire pour remédier à cette situation. Afin d'affirmer ou infirmer cette observation empirique, nous avons proposés puis participé à la création d'un questionnaire quantitatif permettant d'évaluer globalement la connaissance dont dispose la population locale.

Pour conclure, à travers ces démonstrations, nous avons pu constater que la problématique environnementale d'isolement et de fractionnement hydrologique des mangroves de Mahahual émane de trois causes politico-sociales principales engagées en constante interaction. Le schéma ci-après se propose finalement de développer cette chaîne de cause à effet complexe et mise en action autour de notre problématique. Les causes politico-sociales évoquées sont donc les suivantes (par ordre hiérarchique) :

- *Politique* : Coordination et cohérence insuffisante entre les différentes politiques publiques. Large prédominance de l'économique sur l'environnemental (mise en concurrence institutionnelle). Problème d'intégration des politiques environnementales sur les territoires. Origine majoritairement verticale (top-down) des grandes orientations politiques et économiques.
- *Scientifique* : Connaissances scientifiques locales fortement lacunaires concernant la mangrove de Mahahual. Absence de suivis et d'entretiens par les institutions chargées de la protection de l'environnement.
- *Urbaine* : Problème d'intégration de l'environnement mangrove au sein de la planification urbaine locale. Extension du mitage urbain insuffisamment pensée engendrant des déconnexions hydrologiques multiples au sein du complexe forestier de palétuviers.

Synthèse sur les causes du recul des mangroves de Mahahual :



Les impacts de l'isolement et du fractionnement hydrologique sur les services écosystémiques :

La figure ci-dessous (Figure 6), tirée d'une étude portée par les équipes de la convention RAMSAR répertorie les principaux services écosystémiques fournis par la mangrove :

**Tableau 2.7**  
Liste récapitulative des services écosystémiques des zones humides

Importance relative des services écosystémiques de différents types d'écosystèmes de zones humides (sur la base d'avis d'experts et de l'évaluation des écosystèmes pour le Millénaire de 2005). Ces données représentent une moyenne mondiale ; il peut y avoir des écarts aux niveaux local et régional, et d'autres services jugés importants et au sujet desquels on dispose de suffisamment d'informations peuvent être ajoutés.

**H** Elevée  
**M** Moyenne  
**L** Faible  
? Inconnue  
na ne s'applique pas

Types de zones humides /Services	Zones humides Intérieures					Zones humides côtières / marines					Zones humides artificielles							
	Ruisseau	Lac	Tourbière	Marais / Marécage	Zone souterraine	Marais salant	Mangrove	Herbier	Récif corallien	Récife à bivalves	Lagon	Lit de vaseux	Réservoir	Rizière	Prairie humide	Site de traitement des eaux usées	Saline	Plan d'eau
<b>Services d'approvisionnement</b>																		
Aliments	H	H	H	H	na	H	H	M	M	M	M	L	M	H	H	L	H	H
Eau douce	H	H	L	M	H	L	na	na	na	na	L	na	M	na	na	L	na	Na
Fibres et combustibles	M	M	H	H	na	L	H	na	na	na	M	na	L	na	na	L	na	L
Produits biochimiques	L	?	?	L	?	L	L	?	L	?	?	L	?	na	?	?	L	?
Ressources génétiques	L	L	?	?	?	L	L	?	L	?	?	?	L	L	?	?	L	L
<b>Services de régulation</b>																		
Climat	L	H	H	H	L	H	H	H	M	L	L	na	M	L	L	na	L	na
Régimes hydrologiques	H	H	M	M	L	M	H	na	na	na	M	na	H	M	L	na	na	na
Lutte contre la pollution	H	M	M	H	M	H	H	L	L	na	M	?	L	L	L	na	na	na
Protection contre l'érosion	M	M	M	M	H	M	H	L	M	M	L	L	L	M	M	na	M	na
Réduction des risques naturels	M	H	M	H	na	H	H	M	H	M	M	L	L	L	L	na	M	na
<b>Services culturels</b>																		
Spirituels et d'inspiration	M	H	M	M	L	?	L	?	H	na	M	na	M	L	L	na	M	na
Loisirs	H	H	L	M	L	?	?	?	H	na	M	na	H	L	L	na	L	na
Esthétiques	M	M	L	M	L	M	M	na	H	na	M	na	H	M	M	na	M	na
Pédagogiques	H	H	M	M	L	L	L	L	L	L	L	L	H	L	L	L	M	L
<b>Services d'appui</b>																		
Biodiversité	H	H	H	H	H	M	M	L	H	M	M	L	M	M	M	L	M	L
Formation des sols	H	L	H	H	na	M	M	na	Na	na	na	na	L	M	L	L	L	na
Cycle des nutriments	H	L	H	H	L	M	M	L	M	na	M	L	L	M	L	H	L	L
Pollinisation	L	L	L	L	na	L	M	na	Na	na	?	?	L	L	L	M	L	na

Figure 6 : Liste récapitulative des services écosystémiques des zones humides (Source : Rapport RAMSAR)

Ce tableau récapitulatif met en avant le rôle décisif joué par l'écosystème mangrove vis-à-vis de l'ensemble des problématiques majeures qui nous sont aujourd'hui posées. Qu'il s'agisse des conséquences du réchauffement climatique ou des activités anthropiques polluantes, la mangrove apporte aux territoires impactés, une résilience remarquable.

Toutefois, le phénomène de fragilisation des mangroves de Mahahual a considérablement réduit la performance de certains services écosystémiques. À titre d'exemple, la mise en retrait de cet écosystème en direction des terres a eu un impact certain sur le service de protection contre l'érosion côtière. La rupture du lien entre la mangrove et la mer a également eu pour conséquence directe de supprimer un habitat naturel de reproduction de la population halieutique. De ce fait, la communauté de pêcheurs de Mahahual voit aujourd'hui ses zones piscicoles de plus en plus éloignées des côtes. De la même manière, les ruptures hydrologiques engendrées par l'aménagement du territoire ont structurellement affecté le fonctionnement du régime hydrologique local ainsi que le cycle des nutriments et plus particulièrement celui de l'azote. Toujours en lien avec l'interface littorale, la zone de balancement des marées dans laquelle se trouvait originellement la mangrove de Mahahual assurait le processus d'échange de nutriments entre la mangrove et le récif. Nous pouvons donc voir que les aménagements du territoire très locaux peuvent engendrer des impacts à une échelle bien plus large.

## D - Objectifs d'étude

***Proposer des mesures d'interventions pragmatiques en vue de restaurer et conserver les zones de connectivité hydrologique suite à la mise en œuvre d'un suivi hydrologique et écologique des mangroves de Mahahual.***

Pour accomplir cette requête, trois sous-objectifs successifs se sont progressivement dégagés. Puisque l'exercice consistait en la construction *ex nihilo* d'un programme de suivi hydrologique continu de la mangrove, le développement méthodologique a été une mission des plus consistante. Le traitement analytique des données n'a pu quant à lui, débiter qu'une fois la collecte sur terrain achevée. Le dernier objectif qui consistait en la proposition de mesures de restauration et de conservation de la connectivité hydrologique s'est finalement révélé difficilement réalisable sans accès à un catalogue de données microtopographiques et hydrogéologiques de qualité. En effet, sans ces informations complexes, la compréhension des flux hydrologiques en action au sein de cet écosystème reste limitée à un niveau insuffisant. Ainsi, les sous-objectifs évoqués sont les suivants :

### **1) Objectif méthodologique :**

**Développer des méthodologies, protocoles et outils (classeur, méthode d'échantillonnage, cartographie) pour la collecte et la gestion des données permettant un suivi continu de l'état des masses et points d'eau situés dans la forêt de palétuviers de Mahahual.**

### **2) Objectif analytique :**

**À partir des données obtenues, valider ou invalider les hypothèses (phases précédentes du projet mangrove) des phénomènes qui seraient à l'origine de la déforestation. Si invalidées, soumettre de nouvelles hypothèses le cas échéant. Cibler les zones humides en situation d'isolement hydrologique critique. Identifier les principaux foyers de pollution sur le territoire et leurs émetteurs et leurs types de polluants rejetés.**

*Rappel de l'hypothèse en question : « la construction mal planifiée de routes au travers des milieux humides de Mahahual a isolé des secteurs entiers du réseau hydrographique. »*

### **3) Objectif final d'action :**

**Proposer des mesures et sites d'interventions pragmatiques pour la conservation, réhabilitation ou restauration de la connectivité hydrique de la mangrove en lien avec les acteurs locaux du territoire (politiques, scientifiques, associatifs, etc.)**

## II - Méthodologie :

### Introduction

Nous l'avons vue en partie introductive, la rareté des études scientifiques entreprises et des informations qui en découlent, place aujourd'hui la mangrove de Mahahual comme un écosystème côtier particulièrement mal connu. Pour autant, cette mangrove connaît une rupture entamée de sa connectivité hydrologique et fait actuellement face à la menace d'un projet de développement urbain local de grande ampleur. De ce fait, Takata s'engage par ce programme, à proposer une réponse scientifique en initiant le tout premier monitoring hydrologique et écologique de cet écosystème fragilisé. L'intérêt de ce projet consiste principalement en la production d'une base de données scientifiques sur laquelle pourrait se construire un certain nombre d'actions locales (politiques, sociales). L'ambition réelle placée derrière cette enquête reste pour autant environnementale. En effet, il s'agira de fournir les outils et moyens permettant de comprendre davantage le comportement systémique de ce milieu et d'en identifier les principales menaces et évolutions potentielles. Ce monitoring hydrologique se concentrera donc essentiellement sur notre problématique d'étude centrale : *l'isolement et le fractionnement hydrologique*. Dans un premier temps, l'objectif sera d'identifier les effets de ce phénomène sur le milieu mangrove par l'observation de l'état de santé des palétuviers. Ensuite, nous proposerons une analyse plus approfondie au niveau de la composition physico-chimique des points d'eau. À partir des informations tirées de l'enquête terrain, l'examen permettra de cibler les zones de mangroves les plus vulnérables du fait de leur situation d'isolement hydrologique.

Nous pensons profondément que les évolutions les plus structurelles de l'isolement hydrologique se manifesteront sur le temps long. Par conséquent, cela implique que la méthodologie proposée soit **représentative et reproductible à long-terme**. Le caractère reproductible de cette méthode sera principalement garanti par la production et la validation d'un protocole d'échantillonnage qui servira de support méthodologique pour les futures campagnes. L'aspect représentatif de l'enquête dépendra quant à elle de la bonne mise en contexte des résultats obtenus et de choix méthodologiques adaptés. Pour ce faire, ce document emprunte la structuration suivante :

Dans un premier temps, cette méthodologie s'attachera à définir les termes essentiels à la compréhension de notre projet. Par la suite, elle présentera le contexte général et cadrera spatialement notre zone d'échantillonnage. Plus loin, seront développées les trois étapes majeures de notre stratégie d'échantillonnage. Ces trois grandes étapes constituent le cœur théorique de notre enquête terrain. Le premier palier se concentre sur la phase de collecte des échantillons. La seconde, sur l'observation écologique du milieu pour aboutir finalement à la troisième étape qui détaillera notre démarche pour l'analyse physico-chimique des échantillons recueillis. L'aboutissement de cette construction méthodologique doit se retrouver dans la lecture du protocole d'échantillonnage final. Cette méthodologie se propose ainsi de justifier toutes les décisions et étapes présentées dans ce protocole d'échantillonnage.

### Démarche méthodologique et problématiques :

Notre méthode d'enquête s'est appuyée sur un travail de recherche bibliographique et personnel divers. Les contraintes générales de notre milieu, associées aux particularités de notre territoire nous ont toutefois mené à une profonde adaptation des recommandations méthodologiques

générales. Afin de répondre à cette difficulté, l'étude de monitorings hydrologiques locaux nous a permis de disposer de références méthodologiques précieuses. Ces suivis écologiques de référence ont été majoritairement portés par des institutions publiques ou par des universités mexicaines de la péninsule du Yucatan. Ces éléments de comparaison ont finalement orienté et appuyé les ajustements méthodologiques imposés par notre territoire et par les moyens matériels et humains dont nous disposons. Les contraintes consubstantielles à notre étude étaient celles-ci :

#### Contraintes générales posées par le milieu mangrove :

- Pénétration difficile au sein de l'écosystème due à sa densité ;
- Circulation ralentie due à la forme (racines « échasses ») et à la fragilité (racines exposées - pneumatophores) du système racinaire, mais aussi liée à la nature du sol (boue, vase, etc.).

#### Difficultés liées à la situation locale :

- Mangroves déconnectées de la mer, milieu humide n'étant plus en état de submersion (milieu perpétuellement « à sec ») : pas de navigation possible ;
- Privatisation avancée de l'espace mangrove ;
- Insécurité liées à la présence d'importants enjeux économiques et fonciers ;
- Écosystème très peu visité induisant une rareté des voies de communication ;
- Moyens humains et matériels limités.

Les contraintes locales liées à la problématique sécuritaire et celle de privatisation des terres (souvent connectées) se sont avérées stratégiquement inévitables. À défaut, notre monitoring hydrologique a dû s'effectuer en prenant les précautions et autorisations nécessaires une fois sur le terrain d'enquête. Succinctement, les réponses méthodologiques majeures apportées aux difficultés de pénétration dans le milieu mangrove et aux moyens humains et matériels limités dont nous disposons ont été : 1) Un échantillonnage par points et par quadrats plutôt que par transect ; 2) Une dépendance assumée aux « opportunités de terrain » ; 3) Une analyse physico-chimique restreinte aux principaux éléments polluants identifiés au niveau local.

La justification et les limites de ces ajustements méthodologiques seront à retrouver dans la partie « B - La stratégie d'enquête ». Enfin, une attention particulière a été portée sur la « mise en contexte » de notre campagne hydrologique. La partie « contextualisation d'enquête », viendra présenter notre démarche consistant en la mise en lien systématique des résultats obtenus à leur contexte spatial, temporelle et climatique. Ces considérations seront développées ci-dessous.

### A - Méthodologie pour la contextualisation d'enquête :

#### **1) Qu'allons-nous échantillonner ?**

Toute proposition méthodologique scientifique s'appuie en premier lieu et avant tout chose sur une définition précise des termes et des objets qui sont à l'étude. Pour ce projet, des points ou masses d'eau permanentes ou temporaires seront échantillonnés au sein des forêts de palétuviers de Mahahual. Une première approche de la méthodologie nécessite donc de définir les termes de « mangrove » ou « forêt de palétuvier », et du type d'eau échantillonné. Dans un second temps, les représentations géographiques permettront de cadrer localement le projet de recherche et feront ressortir les premiers choix méthodologiques concernant les différentes zones d'échantillonnages sur le territoire.

Ainsi, selon Cormier-Salem (1999), le concept de mangrove reste sujet à de multiples interprétations. De ce fait, des caractéristiques plus sociales ou économiques sont attribuées aux mangroves par les disciplines composant les sciences humaines. D'autres se concentrent davantage sur les aspects plus physiques, climatiques et botaniques. Dans un premier temps, nous avons privilégié une définition plus géophysique que sociale afin de faciliter l'identification de ces dernières sur notre territoire. « *The term "mangrove" refers to an assemblage of tropical trees and shrubs that grows in the intertidal zone. [...] mangrove is a non-taxonomic term used to describe a diverse group of plants that are all adapted to a wet, saline habitat. Mangrove may typically refer to an individual species. Terms such as mangrove community, mangrove ecosystem, mangrove forest, mangrove swamp, and mangal are used interchangeably to describe the entire mangrove community.* » (Feller, 2014).

De cette définition nous retiendrons principalement la particularité « halophyte » ou « halophile » de cette communauté végétale comme principal discriminant entre un écosystème à mangrove et non-mangrove. Les espèces botaniques localement associées à la dénomination « mangrove » sont localement quatre espèces de palétuvier : Mangrove rouge (*Rizophora mangle*) (Figure 7), Mangrove blanche (*Laguncularia racemose*), Mangrove noire (*Avicennia germinans*) et Mangrove grise (*Conocarpus erectus*). Dans le cadre de notre étude, l'analyse d'échantillons d'eau superficielle sera privilégiée bien que la salinité d'un sol résulte d'un état de salinité plus significatif.

Maintenant que le milieu a été défini, il convient d'identifier la nature des eaux échantillonnées au cours de notre enquête. En effet, s'agit-il de masses d'eau ? de points d'eau ? ou encore de plans d'eau ? Cette caractérisation de l'objet d'étude peut avoir, au-delà de l'aspect purement descriptif, des propriétés hydrologiques et chimiques ayant par la suite des implications juridiques ou sociales spécifiques. Pour exemple, un ensemble lacustre et une mare côtière ne sont pas régis par le même cadre juridique ni même par une composition chimique comparable. Ce simple constat vient donc argumenter dans l'intérêt de cet exercice.

Ainsi, au cours des premières sorties terrain, nous avons pu rencontrer une grande diversité d'éléments hydrologiques. Tels, des mares et des eaux de surface permanentes et impermanentes (flaques) en milieu humide, des « micro-cenotes » ou encore des puits. Par ailleurs, nous avons émis l'hypothèse que certaines formations hydrologiques sur le territoire étaient le résultat de résurgences d'eaux souterraines et d'autres, de rejets d'eaux usées traitées ou non traitées. Visiblement, nous sommes donc en présence d'éléments aquatiques permanents et provisoires, superficiels et souterrains, naturels et artificiels. Cet ensemble hydrologique apparaît donc complexe par sa diversité. Bien que les micro-cenotes et les puits puissent être logiquement rattachés à des éléments hydrologiques souterrains, l'accessibilité directe à l'eau recherchée (aucune nécessité de matériels hydrogéologiques pour le prélèvement) peut nous autoriser à associer ces derniers aux eaux superficielles.



Figure 7 : *Rizophora mangle* ou "mangrove rouge" en zone intertidale

**Point d'eau :** « Un point d'eau est un point d'accès naturel (source) ou artificiel (forage, drain, puits...) aux eaux souterraines. » (SANDRE, Eau France)

<http://www.sandre.eaufrance.fr/definition/PTE/2.1/TypePointEau>

**Masse d'eau :** « Portion de cours d'eau, canal, aquifère, plan d'eau ou zone côtière homogène. Une masse d'eau de surface est une partie distincte et significative des eaux de surface, telles qu'un lac, un réservoir, une rivière, un fleuve ou un canal, une partie de rivière, de fleuve ou de canal, une eau de transition ou une portion d'eaux côtières. » (DCE, Union Européenne)

<http://www.glossaire-eau.fr/concept/masse-d%27eau>

**Plan d'eau :** « Les plans d'eau désignent une étendue d'eau douce continentale de surface, libre stagnante, d'origine naturelle ou anthropique, de profondeur variable. Ils peuvent posséder des caractéristiques de stratification thermique. Le terme plan d'eau recouvre un certain nombre de situations communément appelées lacs, retenues, étangs, gravières, carrières ou marais. Les définitions rattachées à ces différentes situations sont nombreuses et font souvent référence à des usages ». (SANDRE, Eau France)

<http://www.pole-zhi.org/plan-deau>

Nous pouvons constater ici qu'aucune des définitions précédemment citées ne correspondent à notre objet d'analyse. Une définition propre apparaît alors nécessaire. Ainsi, pour résumer, les éléments hydrologiques échantillonnés peuvent se prêter à la définition suivante : « *eaux superficielles de faibles étendues et de nature permanente ou temporaire* ». Toutefois, par facilité, nous nommerons ces éléments uniquement "**points hydrologiques**" ou "**points hydrologiques superficiels**" pour effectuer la distinction essentielle avec le travail d'un hydrogéologue. Dans cette définition, le caractère salé ou saumâtre de ces eaux est implicitement inclus à cette définition. Finalement, nous pouvons voir que cette définition comporte encore de nombreuses imprécisions et ne peut être réellement généralisée à l'ensemble des situations rencontrées. Néanmoins, cette dernière nous permettra *a minima*, de visualiser d'une manière globale l'objet qui est à l'étude dans ce projet de suivi de l'écosystème mangrove de Mahahual.

## 2) Précisions relatives au cadrage spatial de l'enquête

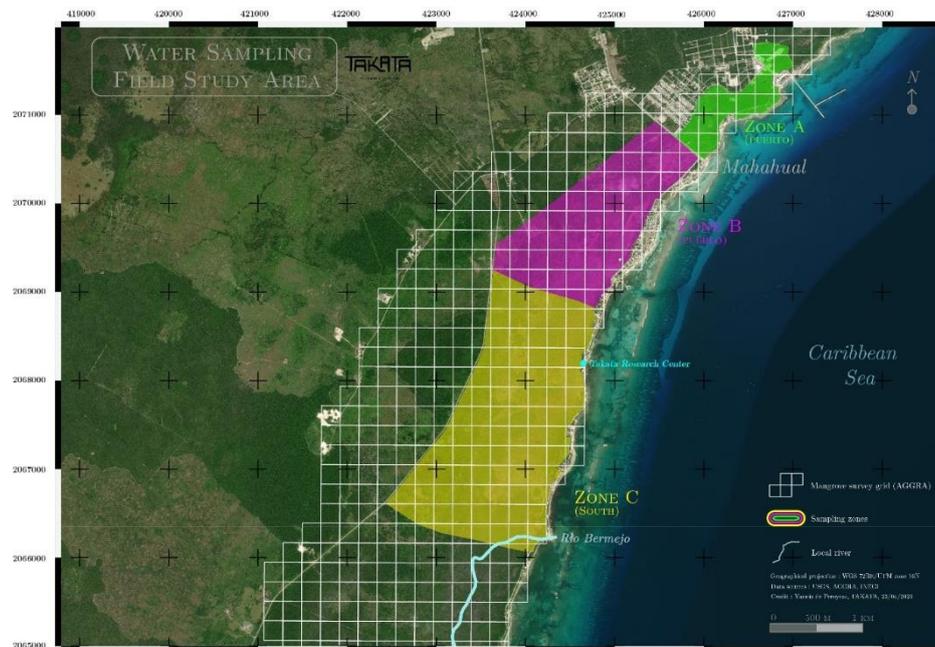


Figure 8 : Carte locale des éléments d'échantillonnage hydrologique

Maintenant que les objets d'étude ont été définis conceptuellement, nous nous concentrerons désormais sur le cadrage spatial ou les limites géographiques de l'étude. Ce cadrage (Figure 8) fait apparaître les trois zones d'échantillonnage déterminées avec l'équipe Takata à partir des zones d'extension des mangroves.

Au-delà de l'aspect purement organisationnel, l'éclatement de la zone d'étude en trois surfaces d'échantillonnages distinctes permet une étude comparative des valeurs de qualité de l'eau par zones. Ce zonage est également mieux adapté aux contextes (présence/non-présence de facteurs de stress) et aux dynamiques hydrologiques en vigueur sur le territoire. La zone A permettra par exemple de se concentrer sur l'influence du port et des rejets traités (STEP CAPA) par le quartier de Casitas. La zone B mettra en évidence, l'impact des eaux usées non traitées rejetées par les habitants et les infrastructures touristiques. Par ailleurs, notre présence sur la zone B nous permettra de surveiller l'évolution du phénomène d'« *invasión* » ou « occupation illégale des terres » et d'estimer son impact (direct et indirect) sur les mangroves. Finalement, la zone C, sans être totalement préservée des rejets domestiques, comporte un nombre bien inférieur de facteurs de stress. Cette dernière donnera donc l'occasion de mettre en opposition les zones sous dominance anthropique et cette zone naturelle de référence.

Pour finir, la présence de la grille AGGRA exposée sur cette carte (Figure 8) se justifie par la nécessité d'établir un repère d'enquête pratique lors des phases de terrain. Par ailleurs, elle aura une utilité certaine pour l'élaboration de la méthode d'échantillonnage dans le sens où cela nous servira d'appui géoréférencé. D'autre part, le cadre géographique du projet a été volontairement étendu au-delà des trois zones d'échantillonnage dans le but d'inclure l'étude du cours d'eau du Rio Bermejo. Ce cours d'eau fournit une véritable opportunité d'accès aux mangroves situées plus en retrait.

### **3) La problématique temporelle de l'enquête en milieu mangrove**

Un nombre plutôt limité de références scientifiques abordent la dimension temporelle d'une enquête en milieu mangrove. Toutefois, les principaux enjeux se tiennent autour des disparités climatiques (précipitation, température, évapotranspiration) parfois importantes se manifestant au cours des cycles naturels des saisons. Le modèle des saisons est en effet un paramètre climatique et temporel pouvant avoir un impact important sur les résultats de l'enquête et les observations faites du milieu naturel (Figure 10). Pour exemple, selon (Krauss *et al.*, 2006) 75% à 90% de la croissance radiale annuelle du tronc des mangroves subtropicales de Floride intervient au cours de la seule saison humide. *A contrario*, certaines forêts tropicales connaissent un rétrécissement du diamètre de leurs tiges durant les saisons sèches les plus extrêmes. Enfin, le pic de production des propagules permettant la régénération et la colonisation des mangroves semble prendre place au cours des mois les plus pluvieux (ici Mai-Juin). À partir d'une étude centrée sur l'évapotranspiration des communautés de mangroves en Floride, (Barr, DeLonge, & Fuentes, 2014) vont jusqu'à avancer que les mangroves se comportent comme des écosystèmes semi-arides en saison sèche alors qu'en saison humide elles se rapprochent davantage d'une forêt décidue de type feuillu. Plus simplement, c'est principalement l'évolution dans l'abondance et le taux de salinité des points d'eau qui impactera notre étude (Figure 9). Pour ces raisons, il serait préférable de confronter les valeurs obtenues au cours des saisons sèches avec des valeurs de saisons humides, ou inversement.

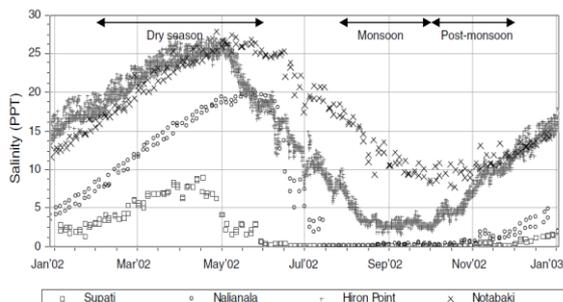


Figure 8 Salinity in the Sundarbans during 2002.

Figure 9 : Variation saisonnière de la salinité en milieu mangrove au Bangladesh (Wahid, Babel, & Bhuiyan, 2007)

En présence de mangroves soumises à un régime intertidal, les heures d'enquête doivent également faire l'objet d'une réflexion en amont. En effet, selon que l'on veuille faire débuter l'enquête en la situant à un niveau intertidal ou supratidal, les heures de terrain doivent respecter les horaires de marées. Jusqu'à présent, nous avons effectué les analyses de terrain en début de matinée jusqu'à la mi-journée (8h-13h). La matinée a été simplement privilégiée par souci de confort lié aux températures.

En outre, une remise en contexte (long-terme) de la campagne d'enquête mise en œuvre ou à venir est instructive puisqu'elle nous permettrait d'identifier si les conditions hydrologiques et climatiques du moment se situent dans des valeurs saisonnières dites « classiques ». En cas de conditions climatiques jugées exceptionnelles, l'intensité de l'épisode pourrait être un facteur influençant en dernière instance, les résultats recueillis. La contextualisation hydroclimatique d'une enquête peut être obtenue par analyse SPI (Standard Precipitation Index). Cette analyse porte uniquement sur les valeurs de précipitations (de minimum 30 ans de données) et permet d'identifier rapidement l'état de la situation hydrologique actuelle en comparaison des valeurs historiques locales. Pour exemple, la situation hydroclimatique vécue lors de la campagne de l'année 2020 correspondait en tous points à une sécheresse exceptionnelle (en termes d'intensité, non en termes de récurrence). Sur le terrain, cet état de stress environnemental s'est manifesté sur des paramètres divers tels que l'abondance, la salinité et potentiellement la concentration des composants chimiques dans les points d'eau. Finalement, la mise en contexte de la campagne d'enquête est un exercice indispensable si l'on veut comprendre les dynamiques en jeu sur ce territoire en forte évolution.



Figure 10 : Evolution saisonnière du milieu mangrove entre la période sèche (gauche) et la période humide (droite)

## B - La stratégie d'enquête

La stratégie d'enquête présentée ci-après, se construit autour de trois grands axes d'analyse qui constitueront les étapes essentielles à la production de résultats. Ces axes viendront expliciter et justifier les décisions méthodologiques de la phase de collecte de l'information sur le terrain, jusqu'à la phase finale de production et d'interprétations des données. Notre stratégie d'enquête s'appuiera donc sur les étapes suivantes :

1° *Les méthodes d'échantillonnage permettant la **collecte des données hydrologiques** sur le terrain.*

2° *Les points d'observations rendant possible une **analyse écologique globale** du milieu mangrove.*

3° *L'**analyse et l'interprétation physico-chimique** des échantillons d'eau prélevés.*

### **1) L'échantillonnage hydrologique sur terrain :**

#### *3.1 Introduction et comparaison des méthodes :*

Afin, de disposer de premiers repères, un appui bibliographique et méthodologique s'est avéré indispensable. Parmi l'ensemble des références scientifiques consultées, les quatre articles les plus pertinents ont été regroupés et synthétisés dans le tableau ci-dessous (Figure 11). Ce dernier nous permettra, en dernière instance, d'orienter et de justifier nos décisions méthodologiques. En revanche, nous tenons à préciser que l'ensemble de ces études prennent place en Asie où les mangroves sont constamment inondées et sujettes aux marées. *A contrario*, nous savons qu'une grande majorité des mangroves de Mahahual est, ou a été, déconnectée de toute dynamique intertidale. Sur ce point, aucune étude scientifique examinant des mangroves totalement indépendantes au régime intertidale n'a été identifiée à ce jour. Notre situation revêt donc en ce sens, un premier caractère exceptionnel. Si nous nous concentrons à nouveau sur la (Figure 11), nous pouvons constater que peu d'études ont manipulé la méthode d'échantillonnage par transect recommandée notamment par divers auteurs et organismes ((Environmental Protection (Water) Policy, 2018), (The Rufford Foundation, n.d.), (Philippoff & Cox, 2007), (Van Loon, Te Brake, Van Huijgevoort, & Dijkma, 2016)). Cette méthode nécessite en effet des moyens humains et matériels importants. Par ailleurs, en fonction de la densité du milieu et des moyens à disposition, de nombreuses études n'ont pu mettre en oeuvre cette méthode d'échantillonnage sur leur terrain. Seules (Xiao *et al.*, 2019) et (Win, Towprayoon, & Chidthaisong, 2019) sont parvenus à concrétiser cette méthode sur leur site d'étude. Toutefois, là encore, cette opération est à relativiser, car (Xiao *et al.*, 2019) n'ont su effectuer qu'un seul transect (perpendiculaire au trait de côte).

Article	Méthode d'échantillonnage	Indicateurs physico-chimiques analysés	Milieu(x) échantillonné(s)	Objet de l'étude
(S. Lotfinasabasl <i>et al.</i> , 2018)	Méthode d'échantillonnage <b>systématique-aléatoire</b> par <b>point</b> . 18 points ou «sites» échantillonnés.	pH, temperature, EC, TDS, DO, Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Cl <sup>-</sup> , COD, salinity, hardness, SAR, TOG, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> and PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Mangrove en zones intertidales et eaux maritimes.	Connaitre et établir une première référence sur l'état de santé actuel des points d'eau et identifier les sources et les types de contaminants
(Pawar, 2013)	Méthode d'échantillonnage <b>non-aléatoire</b> . Deux grands sites (criques), à l'intérieur : 3 <b>points</b> séparés d'1 km.	pH, temperature, salinity, turbidity, Dissolved oxygen (DO), Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ), Nitrite, Nitrate, Silicates.	Mangroves en zones intertidales.	Evaluer l'impact des rejets anthropiques sur la qualité de l'eau des écosystèmes mangroves.
(Wahid, Babel, & Bhuiyan, 2007)	Méthode d'échantillonnage <b>non-aléatoire</b> par <b>sites</b> de suivis déterminés.	Salinity, Organic Matter (BOD and COD), Oxygen availability, Nutrients (NH <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N and PO <sub>4</sub> -P), Heavy Metals (Cr, Pb and Hg), Oil and grease.	Mangroves en zones intertidales.	Comprendre le comportement hydrologique et les impacts écologiques imputables aux activités anthropiques de proximité
(Xiao <i>et al.</i> , 2019)	Méthode d'échantillonnage <b>semi-aléatoire</b> par <b>transect intertidal</b> .	Na <sup>+</sup> ,K <sup>+</sup> ,Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> ,SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> and Cl <sup>-</sup> ), dissolved inorganic phosphorous (DIP) and silicate (DSi), and heavy metals (Cu, Zn, As, Hg, Cd, Pb and Cr)	Mangroves en zones intertidales, eaux souterraines et eaux maritimes	Evaluer la qualité des eaux côtières et comprendre la dynamique des eaux souterraines au sein de mangroves subtropicales

Credit : Yannick de Pereyris

Figure 11 : Tableau de synthèse méthodologique des références scientifiques abordant l'enquête qualitative des masses d'eau

Ainsi, malgré la puissance analytique évidente qu'apporte cette méthode par transect, les caractéristiques intrinsèques au milieu mangrove (densité, étendu, peu fréquenté, etc.) semblent générer un frein majeur à sa mise en place. Il s'avère donc difficile pour nous de poursuivre des transects aléatoirement répartis ou déterminés en amont des enquêtes de terrain. Néanmoins, nous constatons que la dimension aléatoire des enquêtes est de plus en plus choisie dans les études récentes. Ainsi, il semblerait que nous devrions nous rapprocher davantage d'un modèle plus adaptatif, s'organisant autour « d'opportunités de terrain ». Ces « opportunités de terrains » pourraient être constituées de sentiers, de percées forestières, de cours d'eau ou encore de portions forestières de plus faible densité. Ces dernières nous permettraient une circulation plus simplifiée. De la même manière, un modèle par points d'échantillonnages aléatoirement distribués soulèverait des problématiques identiques. Ainsi, les difficultés récurrentes **d'accès à des points de coordonnées précis** (à n'importe quel endroit de la mangrove) ajoutées à une **cartographie approximative** ne nous permettent pas à l'heure actuelle de suivre un plan fiable d'échantillonnage de type tout aléatoire. Qu'il s'agisse de points ou de quadrat, « l'aléatoire systématique » serait inopérant pour notre étude malgré ses qualités reconnues de représentativité ((Environmental Protection (Water) Policy, 2018), (Thomas, Williams, & Sandilands, 2007)). De ce fait, à l'instar des études consultées précédemment (Figure 11), nous constatons que la théorie méthodologique promue pour l'enquête en milieu mangrove ne peut être appliquée indifféremment aux spécificités du territoire et aux moyens à disposition. Pour le moment, nous choisissons donc de nous écarter de la méthode d'échantillonnage par transect. Nous sommes alors contraints de nous orienter vers un modèle à la fois hybride et semi-aléatoire car de fait, adaptatif :

- **Hybride** car mobilisant deux formes d'enquête, par point simple et par quadrats lorsque cela est possible.
- **Adaptatif** (ou « in situ ») dans le sens où les lieux d'échantillonnages s'ajusteront aux contraintes du territoire. Nous exploiterons largement les « opportunités de terrain » évoquées plus haut afin de couvrir une zone d'étude maximale.

### 3.2 La méthode de collecte :

#### Par point :

Principalement, l'investigation terrain se fera par simple point d'échantillonnage. Ces points d'échantillons simples nous ont déjà permis d'avoir un nombre important de résultats ainsi qu'une couverture d'enquête satisfaisante. Après quatre mois de terrain, nous estimons que ces éléments sont suffisamment performants pour notre enquête puisqu'ils nous permettent d'analyser l'ensemble des indicateurs physico-chimiques choisis et de déterminer toutes informations relatives au milieu naturel. La distribution spatiale de ces points sur les différentes zones d'échantillonnages (Puerto, Pueblo, South) reste déterminée par l'accessibilité aux zones de mangroves. Il faut alors imaginer une relation étroite voire, une dépendance forte, entre la localisation du point d'échantillonnage et ce que nous avons appelé les « *opportunités de terrain* » (Figure 12). Par ailleurs, vu la rareté des « *points hydrologiques superficiels* » dans les mangroves de Mahahual (surtout en saison sèche), nous avons choisi de procéder à la **collecte systématique** des points d'eau rencontrés. Cette collecte systématique reste bien évidemment à réguler en fonction du nombre d'échantillons à disposition et au terrain restant à parcourir. Toutefois, ce type de démarche nous permet d'éviter des biais de subjectivité liés à la sélection ou à la non-sélection d'un point hydrologique selon des critères indéfinis en amont. Nous estimons donc important de conserver majoritairement (environ 80 %) la méthode d'enquête par « points d'échantillons simples ». En effet, celle-ci s'avère être simple en pratique tout en restant performante au regard de nos objectifs.

#### Par quadrat :

À la suite de cela, nous allons effectuer des quadrats en complément de ces points d'échantillons simples. D'ordinaire, cette unité d'échantillonnage (Figure 13) est elle-même associée aux transects. Toutefois, à la différence du transect, le quadrat est une méthode disposant d'une capacité d'adaptation au territoire plus avancée. En effet, le transect consiste avant tout, en un échantillonnage « forcé » dans le sens où il poursuit rigoureusement une ligne rectiligne au travers d'un milieu donné. Pour définir le quadrat, nous nous appuyerons sur la description ci-dessous : « *A quadrat is a frame, traditionally square, used in ecology and geography to isolate a standard unit of area for study of the distribution of an item over a large area.* » (Wikipedia). Cette méthode mobilise donc une logique de représentativité du territoire. L'on devrait ainsi pouvoir retrouver dans ces portions (carrés) de territoire, une représentation du territoire dans son ensemble. Cette unité d'échantillonnage nous fournira alors, de nombreuses informations descriptives supplémentaires (plus dynamiques). Par exemple : l'abondance des points hydrologiques, le type de point hydrologique (temporaire, permanent, souterrain ou superficiel, etc.), la variété d'espèces de mangrove sur le territoire et son espèce dominante. De plus, en procédant à un échantillonnage stratifié (par grandes zones, ex : Puerto, etc.) qui, répété au cours des deux grandes variations saisonnières (sèche, humide), nous permettra de disposer de comparatives très précieuses. Ceci nous autorisera par ailleurs, à quantifier et à comprendre davantage le phénomène de mutation saisonnière du territoire.

D'un point de vue pratique maintenant, la construction de cette méthode s'appuiera fortement sur la grille dite « AGGRA ». Cette dernière a fait l'objet d'une extension depuis la mer jusqu'à nos zones de mangrove. Nous allons maintenant expliquer la démarche :

Cette grille normalisée se compose d'un certain nombre de cellules. Ce nombre de cellules est déterminé dans notre cas, par la taille des zones d'échantillonnage préalablement construites. Concrètement, une cellule AGGRA consiste en un carré d'une largeur d'environ 220 m. Au sein de ces cellules géoréférencées et à la suite d'une rapide analyse cartographique, nous pourrions présélectionner celles considérées comme représentatives de la forêt de mangrove de Mahahual. Ensuite, au sein de cet ensemble de cellules présélectionnées, il serait possible de relever quelques

cellules au sein desquels nous tenterons de réaliser un ou plusieurs quadrats. En fonction des contraintes visibles sur le terrain, nous déterminerons quels sont les lieux propices où effectuer ce type d'échantillonnage.

D'une manière générale, le dimensionnement d'un quadrat semble être dépendant de l'objectif fixé, du domaine scientifique et de l'environnement naturel dans laquelle prend place l'étude. Ainsi, l'on retrouve dans les études botaniques, des quadrats de très faibles dimensions (1mx1m). En Australie, un guide méthodologique émanant d'une institution environnementale (Environmental Protection [Water] Policy, 2018) recommande pour le suivi écologique globale d'une forêt de mangrove, un quadrat de 50 m de largeur pour 10 m de longueur. Ce choix de dimensionnement permet de répondre à un objectif d'analyse précis qui est d'évaluer et de suivre la production annuelle de biomasse d'une forêt de mangrove. Ce type d'objectif nécessite une couverture d'enquête considérable. Nos conditions de recherches théoriques et pratiques semblent alors sensiblement différer de ces projets. Nous sommes donc contraints d'adapter ces recommandations à notre territoire et à nos objectifs. Ainsi, nos contraintes sont : *des quadrats à ajuster à une mangrove déconnectée de la mer, extrêmement dense et peu fréquentée*. Notre objectif de recherche est : *des quadrats permettant d'évaluer l'abondance de points hydrologiques superficiels, d'échantillonner ces points et de procéder in situ, à diverses observations écologiques*. Nous proposons dans ce cas, un quadrat simple de forme carrée et dont les côtés seraient larges de 10 mètres. Ce choix de dimensionnement s'est appuyé sur le rapport scientifique de (Elizondo *et al.*, 2011) qui ont entrepris une étude de caractérisation et de diagnostique écologique d'une zone de mangrove à Puerto Morelos (Quintana Roo). La proximité en termes de milieu environnemental, de pressions anthropiques et d'objectif de recherche, entre cette étude et la nôtre, nous autorise à faire ce rapprochement méthodologique. De plus, cette méthode nous permettra d'analyser l'ensemble des composantes écologiques voulues.

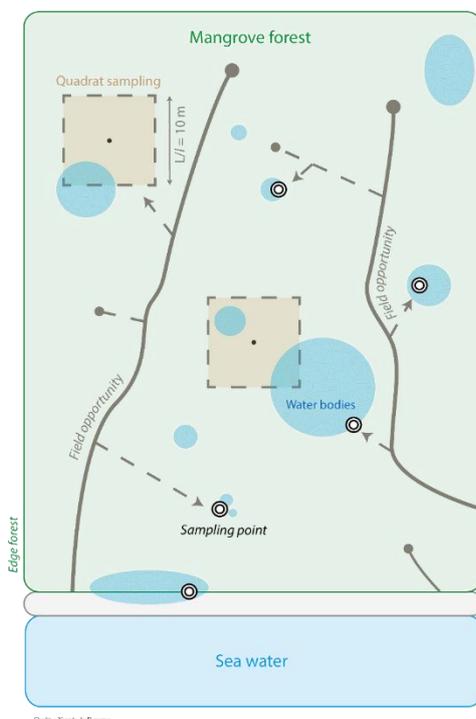


Figure 12 : Schéma de la construction d'un parcours d'échantillonnage typique

L'intérêt supplémentaire de ces méthodes repose sur la facilité et la rapidité d'application une fois sur le terrain. Le développement pas-à-pas de ces méthodes sera à retrouver dans la partie « protocole d'échantillonnage » présente en annexe. Toutefois, nous pouvons succinctement indiquer que l'échantillonnage par point ne nécessite rien d'autre que l'enregistrement du point GPS et d'un carnet où seront notés les observations écologiques ainsi que les résultats d'analyse de la salinité et de la température du point hydrologique en question. Concernant le quadrat, nous réutiliserons à l'identique ce processus auquel nous grefferons la construction d'un carré (Figure 13). Cette construction peut être simplement obtenue à l'aide de quatre bâtons, d'une ficelle et d'un repère métré. Le point central du quadrat à partir duquel se construira le carré d'échantillonnage est en tous points identique au point d'échantillon simple. Tout point d'eau situé au sein de cette aire d'échantillonnage devra faire l'objet d'une analyse. Enfin, dans le cas d'une situation où les quadrats sont irréalisables, nous maintiendrons un échantillonnage par simples points.

Pour conclure, cette méthodologie permettra l'analyse récurrente de mêmes points hydrologiques. Cette disposition aura pour effet d'atténuer la problématique centrale des variations saisonnières. De plus, l'enregistrement GPS des points nous permettra d'établir une cartographie des points hydrologiques au sein des mangroves. Cette dernière nous autorisera également à comparer la position des points d'eau d'une campagne à l'autre et peut-être, de déterminer ce qui tient du provisoire et du permanent. *In fine*, les éléments hydrologiques permanents pourraient nous donner les premiers renseignements concernant le fonctionnement hydrologique local (origine, écoulement, etc.). Notre base de données globale gagnera donc en solidité et représentativité chaque fois que de nouvelles données seront inscrites. Le succès de notre démarche tiendra donc en l'alimentation constante de données brutes.

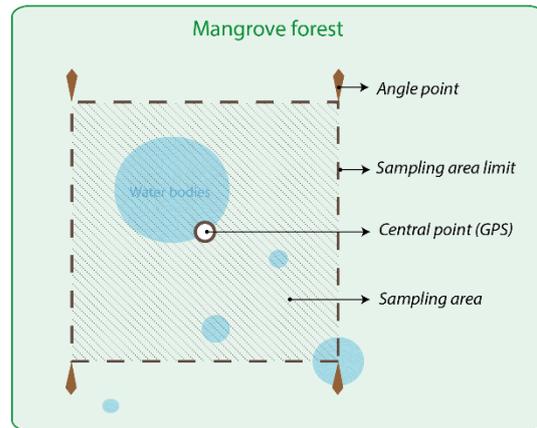


Figure 13 : Description schématique d'un quadrat type

### 3.3 Les limites méthodologiques :

Bien que cette méthode soit conçue en adéquation avec les particularités de notre projet, elle comporte des limites méthodologiques qu'il convient d'identifier en amont :

- 1) Une couverture d'échantillonnage peu homogène sur le territoire. Forte dépendance aux « opportunités de terrain ». Risque de déséquilibre entre d'un côté, un sur-échantillonnage des lisières et de l'autre, un sous-échantillonnage en intérieur de mangrove ;
- 2) Peu de possibilité de variante d'une année de campagne à l'autre. Une couverture d'enquête faible et se développant lentement sur le territoire.
- 3) Une enquête nécessitant des traitements indépendants entre les données obtenues par quadrat et celles par points. Le cas échéant, risque de perte d'information pour les quadrats.

*Enfin, nous pouvons qualifier ce modèle « d'apprenant ». En effet, ce dernier tendra à se solidifier à mesure d'expérimentations sur le terrain et des connaissances qui en découlent. La couverture d'échantillonnage aura ainsi tendance à s'étendre après chaque campagne et toutes ces campagnes viendront « léguer » des informations (points, quadrats, opportunités de terrain, site de pollution, etc.) aux enquêtes suivantes.*

### 2) L'observation écologique :

La collecte des points hydrologiques nous fournit une véritable opportunité afin de procéder à l'observation écologique du milieu. La présence sur le terrain peut en effet donner lieu à un suivi localisé et spécifique de la forêt de palétuvier. Il est toutefois possible d'effectuer ces points d'observations écologiques dès que des éléments remarquables de la biodiversité sont constatés (zone de transition mangrove/non mangrove, crabes, etc.). Ainsi, l'objectif principal de ces observations reste de fournir des informations complémentaires nous permettant de comprendre le milieu avec une plus grande exhaustivité et d'y entrevoir les évolutions probables. En ce sens, il s'agira ici de surveiller les éléments les plus symptomatiques d'une dégradation écologique de la mangrove. Afin de remplir cet objectif, les paramètres écologiques les plus pertinents ont été relevés à la suite d'un travail bibliographique. De ce fait, nous constatons que la plupart de ces indicateurs sont d'ordres botaniques, tandis que d'autres abordent davantage des préoccupations sédimentaires ou fauniques. Certains de ces paramètres font d'ores et déjà l'objet d'une analyse *in situ* tandis que d'autres sont des

recommandations à appliquer sur le terrain. Ces suggestions se sont toutefois progressivement avérées pertinentes à la suite de lectures et de réflexions post-terrain.

Il est néanmoins nécessaire de faire remarquer que la faiblesse de cet « exercice » réside dans sa nature strictement empirique. Pour autant, la plupart de ces indicateurs ne nécessitent rien d'autre qu'une observation soutenue. Du fait de la nature même de ces observations, les résultats obtenus seront donc plus d'ordre qualitatif que quantitatif. Effectivement, il s'agira plutôt de qualifier, de caractériser le milieu que de réellement le définir à travers des valeurs de mesures précises pour chaque élément le concernant. Pour donner un exemple, l'observation de crabe se résumera à la présence ou à la non-présence de terriers sur le point d'observation en question et non pas en la quantification exacte du nombre de terrier dans un espace aux dimensions définies en amont. Ainsi, bien que les méthodes quantitatives fournissent un nombre supérieur d'informations exploitables, elles nécessiteraient un temps d'enquête actuellement inenvisageable pour notre projet. Ainsi, afin de rester en phase avec nos objectifs d'enquête hydrologique, nous préférons conserver une méthode rapide et simple d'application. Malgré tout, l'observation écologique pourrait faire l'objet d'un projet de recherche à part entière afin de développer les connaissances générales de la mangrove de Mahahual.

Ainsi, par ordre d'importance, voici les éléments écologiques devant faire l'objet d'une observation approfondie :

- **Espèce(s) de palétuvier** (zones de transition) ;
- **État de santé général du palétuvier** (feuilles, marques de salinité, maladie, propagules, etc.) ;
- **Présence de mangrove juvénile** ;
- **Présence de terriers de crabe** ;
- **Le type de forêt de mangrove** (Pool, Snedaker, & Lugo, 1977) ;
- **Hauteur moyenne des palétuviers** ;
- **Recouvrement sédimentaire des racines.**

Certaines de ces observations semblent davantage participer à l'exercice de caractérisation du milieu (type de forêt, hauteur moyenne, type d'espèce) tandis que d'autres participeront essentiellement, à l'examen écologique de la mangrove. Ces éléments d'analyse comporteront une grande valeur lorsqu'ils feront l'objet d'une comparaison à long-terme. Enfin, ces résultats pourraient nous permettre de corroborer ou non, les conclusions tirées des analyses hydrologiques et de comprendre davantage comment se manifeste au niveau du palétuvier, l'effet d'une concentration anormale des divers paramètres physico-chimiques sélectionnés.

### **3) Analyse et interprétation physico-chimique des échantillons d'eau :**

#### **5.1 Etat des lieux de la pollution à Mahahual :**

En nous référant une nouvelle fois au tableau de la (Figure 11), nous allons désormais aborder les éléments physico-chimiques à analyser. Premièrement, il apparaît clairement que ces études disposent d'une multitude d'indicateurs d'analyse. Majoritairement, ces études cherchent à identifier les sources et les impacts des pollutions de type anthropique. Une fois les points de pollution identifiés, ils en déduisent les mécaniques de dispersion au sein des mangroves. Cette démarche pourrait être la nôtre. Pour ceci, ces études s'appuient sur une analyse chimique complète pouvant traduire tous les signes de pollution d'origine anthropique et d'en identifier le type exact (métaux lourds, eaux usées, marées noires, pollution diverse, etc.). S'agissant de notre étude, nous connaissons d'ores et déjà les principaux rejets susceptibles d'affecter la santé générale des mangroves. Il est à noter qu'aucune industrie hautement polluante n'est présente sur le territoire. Les principales pollutions sont donc

d'ordres domestiques et urbaines et d'ampleurs moyennes. En ce sens, nous pouvons nous attendre à ce que ces facteurs de stress écologiques progressent fortement aux vues du projet de développement urbain local (cf: Plan de Desarrollo Urbano). En effet, les eaux usées noires et grises (eaux usées domestiques) devraient suivre fidèlement la courbe de croissance démographique locale (en comptant le pic saisonnier touristique) et du taux de raccordement au réseau. L'évolution des modes de consommation pourra également influencer la quantité produite d'eau usée. L'augmentation du volume d'eaux pluviales polluées proviendrait quant à lui, de l'extension du phénomène d'artificialisation des sols. Cette dynamique étant elle-même, concomitante au phénomène d'extension urbaine. Ainsi nous pouvons dresser un premier tableau des polluants locaux à Mahahual : eaux usées non traitées, eaux usées traitées, écoulement des eaux pluviales transportant des polluants, lieux de dépôts d'ordures ménagères, lieux de dépôts de sargasses. Ainsi, *a contrario* des études consultées (Figure 11), notre zone d'étude se penche sur une variété de vecteur de pollution plus limitée. L'on peut alors s'attendre à un ensemble plus réduit d'indicateurs physico-chimiques à analyser.

Aujourd'hui, la totalité des eaux usées traitées de Mahahual a pour exutoire les mangroves. Ces rejets sont aujourd'hui traités selon un procédé intensif, par l'intermédiaire de deux stations d'épuration. Ces usines de traitement des eaux sont tenues par la société publique mexicaine "CAPA". L'usine principale est située en bordure Est de Casitas et a fait l'objet d'une modernisation début 2020. Un autre centre de traitement plus réduit collecte les eaux de la zone du "pueblo" de Mahahual.

Pour le moment, nous ne pouvons affirmer que ce volume d'effluent rejeté en milieu mangrove ait fait l'objet d'une étude de calibration. En outre, (Capdeville, 2018) nous informe que les stations d'épurations font généralement l'objet d'une rapide dégradation sous climats tropicaux. Pour autant, les procédés de traitement alternatif dits "extensifs" (filtres plantés, lagunage, filtre à sables, etc.) semblent être pour l'auteure, difficiles à installer pour une collectivité supérieure à 2000 habitants. Hors flux touristique, la population résidente de Mahahual est estimée à environ 2500 personnes.

## 5.2 Analyse des effets du cycle de l'azote en milieu mangrove:

Afin d'analyser l'impact de ces polluants, il nous est transmis en début de mission un kit d'analyse chimique. Ce kit comporte des solutions tests permettant de mesurer le pH (de 7,4 à 8,8), l'ammoniac (de 0 ppm à 8 ppm), le nitrite (de 0 ppm à 5 ppm) et enfin le nitrate (de 0 ppm à 160 ppm). Les trois derniers éléments évoqués sont au centre du cycle de l'azote ou « *nitrogen cycle* » en anglais. Ainsi, nous nous posons la question suivante : En quoi est-il important d'analyser ces éléments et donc le cycle de l'azote ?

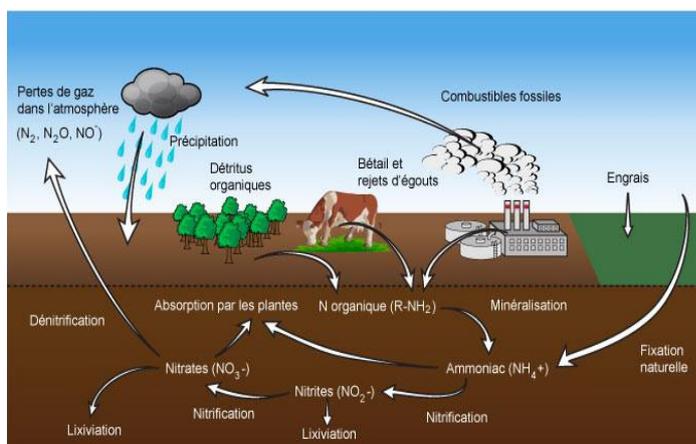


Figure 14 : Cycle de l'azote dans le sol et l'eau

« Le cycle de l'azote est un cycle biogéochimique qui décrit la succession des modifications subies par les différentes formes de l'azote (diazote, nitrate, nitrite, ammoniac, azote organique (protéines)). Dans les sols bien oxygénés, des bactéries transforment l'ammoniac en nitrite  $\text{NO}_2^-$ , puis en nitrates  $\text{NO}_3^-$ , au cours du processus de nitrification. [...] Les végétaux absorbent grâce à leurs racines les ions nitrate  $\text{NO}_3^-$  et, dans une moindre mesure, l'ammoniac présent dans le sol, et les incorporent dans

*les acides aminés et les protéines.» (ActuEnvironnement)*

Ici, les principales activités anthropiques locales productrices d'azote pourraient être l'agriculture intensive et les stations d'épuration. De récentes études sont alors menées en ce sens afin de « forcer » ou tout au moins, de soutenir la croissance des palétuviers par un rejet calibré des stations d'épuration. Dernièrement, l'on constate que les capacités bioremédiatrices des mangroves sont de plus en plus exploitées pour ce type de traitement. Toutefois, ces manœuvres comportent un risque important lorsque les concentrations en azote dans les sols et points d'eau sont en excès et mènent à un état d'eutrophisation des milieux aquatiques récepteurs. De plus, il est à prendre en compte que les sols sont en capacité de produire de l'ammonium de manière autonome, mais toutefois très variable (Balk, Laverman, Keuskamp, & Laanbroek, 2015). Sur le mécanisme qui est à l'œuvre, (Alongi, 2013) nous dit ceci : « *N availability depends on environmental factors such as salinity, temperature, soil fertility and geochemical redox reactions between dissolved organic and inorganic constituents in interstitial water.* ». (Alongi, 2013) insiste particulièrement sur l'importance de la connexion intertidale pour l'import et l'export naturel d'azote. Là encore, on peut voir que l'isolement hydrologique des mangroves peut mener à un profond déséquilibre de ces dynamiques écologiques en action.

Par conséquent, les prélèvements effectués pourront apporter les renseignements suivants :

- 1) Ces points sont-ils en connexions directes ou indirectes avec des vecteurs de rejets ? ;
- 2) Nous renseigne sur l'état de décomposition et donc du temps de résidence du polluant dans ce point d'eau ;
- 3) Les valeurs obtenues s'inscrivent-ils dans les limites de tolérance naturelle des mangroves ? ;
- 4) En cas de valeurs hautes au sein des trois éléments chimiques cela pourrait nous indiquer soit, un problème d'assimilation des milieux soit, d'un apport constant et surabondant.

Concernant ces observations, il sera important de toujours considérer ces valeurs en lien avec les espèces de mangroves et les types de forêts (fringe, bassin). Celles-ci disposent d'une tolérance en N variable (Alongi, 2013) (Reis Gonçalves, Nardoto Bielefeld, & Silva Oliveira, 2017). Une concentration anormale des valeurs d'Azote dans les points d'eau nous renseignent aussi indirectement sur un état nutritionnel excessif au niveau des sols. Enfin, sur les conséquences d'un excès d'azote, (Reis Gonçalves, Nardoto Bielefeld, & Silva Oliveira, 2017) nous affirment :

*« Nitrogen enrichment is therefore recognized as one of the major threats to conservation of natural ecosystems and maintenance of human activities. In terrestrial ecosystems, the excess of N favors biological invasions and modifies the competitive ability among species, resulting in changes of dominance patterns, and loss of plant and soil biota biodiversity (e.g., Bobbink et al. 2010; Bradley et al. 2010; Eisenhauer et al. 2012). Nitrogen enrichment in terrestrial ecosystems also has the potential to increase soil N mineralization rates, nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions to atmosphere, and nitrate (NO<sub>3</sub>-) losses to aquatic systems, modifying productivity patterns and increasing mortality. [...] Therefore, alterations in mangroves functioning as a consequence of N enrichment may affect not only the important ecosystem goods and services they provide to society but also affect surrounding ecosystems. ».*

Plus concrètement, l'étude portée par Capdeville (2018) nous fournit des renseignements précieux sur l'impact potentiel que peut engendrer des rejets d'eaux usées traitées sur le milieu récepteur mangrove. Pour les besoins de l'étude, il a été mis en comparaison deux espèces de palétuviers et deux communautés de crabes. Cette étude observationnelle a démontré qu'une exposition de long-terme (4,5 à 6,5 ans puis 9,5 ans) à des rejets équivalent à un quartier de 250 EqH, produisait les effets suivants :

1. Une progression franche des paramètres de croissance (diamètre, hauteur, surface foliaire, etc.) ainsi que de la productivité (litière) pour le palétuvier *C. Tagal*. De manière générale, il est constaté une augmentation de l'activité photosynthétique (> NDVI).
2. Une diminution de la densité d'arbres et augmentation de la mortalité pour le palétuvier *R. mucronata*.
3. Une diminution de la diversité de crabes par la migration d'une espèce de crabe dont les nouvelles conditions ne sont plus adéquates à son développement. Au bout de 9,5 ans de rejets, une baisse importante de la densité des terriers de crabes a été constatée dans les deux types de palétuviers.
4. Une stimulation des bactéries dénitrifiantes à travers l'augmentation de leur diversité, densité et activité. Proportions de carbone et d'azote plus élevées dans les sédiments impactés par les EUD alors que l'on observe au même moment, une baisse de la concentration en oxygène.

De la constatation de ces divers phénomènes, nous pouvons en tirer d'importantes leçons. Premièrement, le milieu engendre une réaction extrêmement complexe avec des effets à la fois positifs et négatifs sur divers niveaux d'analyse. Aussi, l'on constate qu'il n'y a, à aucun moment, de réponse homogène entre les différentes espèces. Cela nous confirme une nouvelle fois l'intérêt d'une analyse par type de palétuvier. On voit également que l'essor d'une espèce (palétuvier ou crabe) se fait mécaniquement au détriment d'une autre. L'on peut alors logiquement craindre une perte de la biodiversité sur les zones impactées voire, s'il s'agit de palétuvier, d'une véritable tendance au monospécifisme. Ainsi donc, la cause de ces phénomènes semble tenir dans l'évolution physique et chimique profonde que subies les sols et plus superficiellement, les points d'eau. En guise de conclusion et pour les besoins de notre étude, il serait plus pertinent et représentatif de prendre comme indicateur la perte de biodiversité plutôt que le recul net de la mangrove. D'après cette étude, il s'agit en effet du premier phénomène par lequel se manifeste l'impact des fortes concentrations en nutriments. La constatation sur le terrain de ce phénomène préfigurerait donc le recul de la mangrove.

### 5.3 Interprétation des valeurs de température et de salinité :

Pour finir, nous aborderons brièvement les mesures de salinité et de température des points d'eau. Ces éléments sont des indicateurs essentiels afin de déterminer si les conditions écologiques peuvent être interprétées comme anormales ou habituelles pour les mangroves. Ces deux paramètres seront analysés *in situ* au niveau des points et quadrats d'échantillonnage. Un instrument regroupant la mesure de ces deux paramètres est à disposition à Takata (Figure 16). Les données obtenues devront être directement reportées sur un carnet en lien avec le numéro du point échantillonné. Afin de situer les résultats, l'organisme USGS nous indique dans un court papier (2003), que la condition de salinité optimale pour la plupart des mangroves semble se situer entre 10 ppt et 20 ppt (eau saumâtre). Toutefois, des préférences taxinomiques sont relevées par de nombreuses études. Les valeurs de tolérance spécifiques seront présentées plus loin à la (Figure 20). Ainsi, nous savons que la salinité est un facteur écologique clé de la distribution des mangroves sur le territoire (Win, Towprayoon, & Chidthaisong, 2019). De plus, elle intervient également dans la sélection du type de palétuvier et affecte la production de propagule (entre 8 ppt et 15 ppt) (Feller & Sitnik, 2014). L'analyse de cet élément est donc au centre de notre recherche. La condition de salinité des points hydrologiques est toutefois complexe à interpréter, car elle est extrêmement réactive aux apports d'eau douce. Il est donc préférable d'éviter d'effectuer une enquête le lendemain d'une journée ou soirée pluvieuse. Aussi, il n'est pas rare de constater une forte volatilité des valeurs entre saison sèche et humide. Si l'on dispose de valeurs dans une seule saison, cela pourrait avoir pour conséquence d'affaiblir vivement la qualité de l'analyse. Nous proposons alors ceci : Afin de comprendre de manière exhaustive le mécanisme de salinité et de température, il serait intéressant d'analyser très régulièrement un même point d'eau. Nous disposerions alors d'une base de données pertinente pour observer finement le comportement des milieux aquatiques à l'échelle annuelle. Ceci nous permettra également de déterminer à quels moments les conditions sont adéquates ou inadéquates pour le développement

des mangroves. Toutefois, il devra être conservé à l'esprit que ces données ne représenteront que les conditions spécifiques de ce point d'échantillonnage précis.

Concernant la relation température-mangrove, peu d'informations ont été relevées pour le moment. Néanmoins, il a été ciblé par une synthèse bibliographique (Figure 20), une plage de température critique provoquant des dommages pour le palétuvier. Cette plage caractérise les températures moyennes comprises entre 40 °C et 55 °C comme valeurs "critiques" (Feller & Sitnik, 2014). De la même manière, des températures trop basses peuvent impacter négativement la santé générale d'un palétuvier. La mangrove apparaît donc comme un écosystème sensible, nécessitant des conditions relativement stables. En ce sens des investigations rapprochées seraient pertinentes en saison sèche et plus particulièrement encore, au cours d'épisodes de sécheresse. De plus, il est de première importance que la salinité et la température soient constamment placées en relation au vu du lien profond qu'entretiennent ces deux paramètres. La température dispose en effet d'une grande influence sur le processus de salinisation d'une masse d'eau par le biais du phénomène d'évaporation. Des températures extrêmes peuvent ainsi être à l'origine de conditions hypersalines. Ces conditions peuvent engendrer un état non adéquat pour le développement du palétuvier. Par ailleurs, la consommation d'oxygène est fortement dépendante de la température du milieu. Ainsi l'analyse commune des divers éléments présentés dans ce guide, pourrait avoir un fort impact sur l'état de santé de la mangrove.

#### 5.4 Les limites méthodologiques :

Pour conclure, nous dessinerons les grandes limites de notre analyse physico-chimique. Certaines sont des hypothèses, d'autres ont déjà été abordées et justifiées dans ce document :

- 1) Les intervalles d'analyse (Figure 15) peuvent sembler trop limités et notamment pour la solution pH qui ne tolère pas une solution d'eau acide. L'étude de (Marchand, 2007), vient justifier cette première observation. Au sein de son étude, (Marchand, 2007) établit des intervalles de tolérance pour chaque espèce de mangroves présentes sur sa zone d'étude. Pour la mangrove rouge (*Rizophora Mangle*) il identifie un intervalle de 4 à 7 sur l'échelle pH. La valeur moyenne de ses analyses pH aboutit finalement à une valeur acide de 6,3. Nous pouvons donc constater (Figure 15) que **les intervalles d'analyses proposées ne sont pas en adéquation avec les conditions d'acidité effectives en milieu mangrove**. Puisqu'il s'agit originellement d'un test pour aquarium, la problématique pourrait provenir de ce point ;



Figure 15 : Gammes de lecture des valeurs d'analyse du test physico-chimique

- 2) Ce point découle du premier. Toute valeur inférieure à l'intervalle d'analyse proposée est égale à la valeur la plus faible. L'inverse est aussi vrai pour les valeurs supérieures. **Les valeurs « hors cadre » sont donc perdues et faussées ;**
- 3) Ce test est uniquement destiné à l'analyse d'échantillon d'eau salée. Or, la concentration minimale à partir duquel le test considère notre échantillon d'eau comme « salé », nous est

inconnue. Ceci pourrait avoir un impact lors d'épisodes de fortes précipitations où les points hydrologiques sont proches d'une eau douce ;

- 4) Les concentrations des divers indicateurs physico-chimiques au sein des points d'eau superficiels sont extrêmement sensibles aux conditions pluviométriques du moment. L'on peut alors se poser la question de l'interprétation des résultats. **Les résultats obtenus en saison sèche devront toujours être confrontés à ceux des saisons humides, et inversement ;**
- 5) L'analyse du seul cycle de l'azote ne saurait répondre entièrement à l'ensemble des problématiques de pollutions rencontrées, bien qu'elle en couvre la grande majorité. Explorer le Phosphore et le Calcium.
- 6) **Il est difficile de fixer une échelle de tolérance des mangroves concernant l'Ammonium, le Nitrite et le Nitrate.** En effet, nous avons appris (Capdeville, 2018) que ces éléments azotés agissent sur le palétuvier davantage en "perturbateur" qu'en un élément altérant véritablement et directement la mangrove. Par ailleurs, ces échelles sont très diverses selon le type de palétuvier et cela rend donc impossible la comparaison aux valeurs obtenues lors des tests.
- 7) Quel est le degré de représentativité de nos résultats alors qu'ils prennent place au sein d'un contexte exceptionnel (sécheresse hydrologique, pandémie mondiale du covid-19) ?



Figure 16 : L'appareil de mesure de la salinité et de la température à disposition

### III - Résultats :

#### A - Présentation globale des résultats :

La campagne d'échantillonnage menée dans les mangroves de Mahahual a débuté le 10/04/2020 et s'est achevée le 24/07/2020. À travers ces trois mois d'enquête, **12** sorties terrain ont été nécessaires pour recueillir nos **110** échantillons d'eau. Plus de **60** heures ont été consacrées à cette investigation sur le terrain. Sur ces douze sorties terrain, **36** km ont été parcourus dans les mangroves soit environ 3 km pour chaque sortie.

Sur cette campagne d'échantillonnage, seule l'enquête par points a été opérée. Toutes nos sorties terrain ne nous ont pour autant pas permis de collecter systématiquement des échantillons d'eau. Ceci a été particulièrement le cas lors du premier mois d'enquête où la rareté des précipitations (Figure 17) nous a contraints à effectuer davantage de sorties. Un constat identique peut être tiré pour le mois de juillet où prend régulièrement place l'épisode de « *la canicula* », c'est-à-dire une augmentation des températures et une baisse plus ou moins forte des précipitations<sup>10</sup>. De plus, cette campagne est intervenue au cours de la phase de transition saisonnière et a donc engendré une importante disparité dans les valeurs d'analyse obtenues. Sur ce point, nous enregistrons un léger déséquilibre entre saison sèche et humide. En effet, les 2/3 de la base de données construite répertorient des valeurs obtenues en saison humide<sup>11</sup>. Ce déséquilibre vient apporter une première limite à notre analyse dans le sens où elle affectera nos résultats portant sur les effets de l'isolement hydrologique des mangroves. En effet, nous ne disposons pas à l'heure actuelle, de suffisamment de matériaux en période sèche pour dégager une analyse robuste sur les impacts des sécheresses sur les portions de mangrove les plus isolés hydrologiquement. Une certaine réserve devra donc être conservée lors de l'élaboration de nos conclusions. Des recherches complémentaires seront menées lors des prochaines campagnes afin de confirmer ou d'infirmer les propos avancés dans cette étude. En définitive, l'alimentation constante de cette base de données à des échelles spatiales et temporelles variées nous permettra incontestablement de renforcer la significativité de nos conclusions.

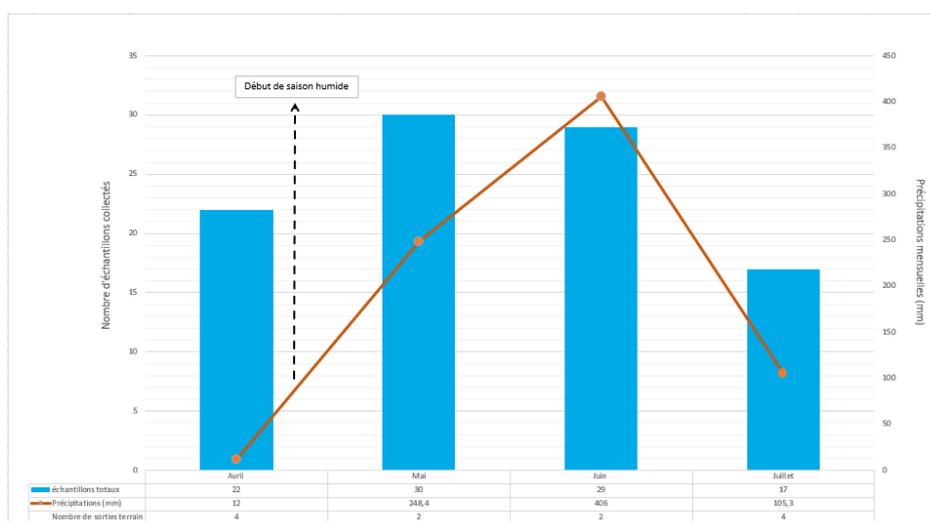


Figure 17 : Périodes d'acquisition des échantillons et contexte pluviométrique de l'enquête

<sup>10</sup> Les précipitations enregistrées au cours de ce mois de juillet 2020 sont toutefois supérieures à la moyenne mensuelle de ces 35 dernières années. Moyenne : 118 mm.

<sup>11</sup> Ce mois de juin 2020 a été le mois de juin le plus pluvieux de ces 35 dernières années dans le Quintana Roo.

En observant maintenant la répartition spatiale des points échantillonnés entre les trois zones d'échantillonnage (Figure 18) déterminées précédemment, l'on peut remarquer que la distribution reste fortement disparate. En effet, 40 échantillons ont été effectués pour la **zone A**, 32 pour la **zone B** et 15 seulement pour la **zone C**. Cette hétérogénéité spatiale de l'échantillonnage tient principalement aux spécificités de ces zones, aux nombres de sorties terrain réalisés et aux conjonctures climatiques en vigueur au moment de l'enquête. Pour exemple, le sol type sablo-limoneux associé à la destruction des palétuviers causée par l'ouragan Dean en zone C a installé des conditions particulièrement inadéquates (forte porosité du sol et absence de canopée) au maintien en surface et en durée de points hydrologiques.



Figure 18 : Répartition spatiale des échantillons hydrologiques obtenus au cours de l'enquête Avril-Juillet 2020

En nous concentrant une nouvelle fois sur la répartition des points hydrologiques échantillonnés (bleu clair) et les chemins d'enquête empruntés (pointillés rouges), nous ne pouvons que constater notre difficulté à pénétrer le cœur de l'écosystème (Figure 18). Comme il l'a été évoqué dans la construction méthodologique, nous sommes nettement dépendant des « opportunités de terrain » malgré des tentatives répétées d'atteindre de manière indépendante, ces espaces reculés. Ceci a engendré un véritable suréchantillonnage en lisière de forêt. Or, les lisières constituent l'aire de contact ou « l'interface privilégiée » avec le domaine anthropique et les diverses formes de pressions qu'il génère (déchets, dépôts de sargasses, rejets d'eaux usées et polluants, etc.). Le phénomène des « invasions » présent en zone B nous a néanmoins permis d'accéder plus régulièrement au cœur de l'écosystème par l'intermédiaire des nombreuses percées illégales. Ces percées à travers mangroves, offrent une communication discrète entre ces zones d'occupation illégale de terres et les activités socio-économiques du village de Mahahual.

L'enquête en interface littorale s'est avérée être d'une grande utilité puisqu'elle nous a permis de constater s'il persistait encore des mangroves en zones intertidales. Ce travail de terrain en lisière nous a ainsi permis d'attester la disparition des mangroves encore soumises aux régimes de marées

sur le territoire de Mahahual. En effet, seule une poignée de palétuviers immergés a survécu à proximité du quai de pêche du village (Figure 19). La photographie de ce paysage nous laisse par ailleurs entrevoir ce que fut l'extension originelle de cet écosystème aujourd'hui menacé.



Figure 19 : Derniers palétuviers de Mahahual encore implantés en zone intertidale

À ce propos, les estimations entreprises par (Aragón-Moreno, Islebe, Torrescano-Valle, & Arellano-Verdejo, 2018) datant l'implantation des premiers palétuviers dans cette partie du Mexique<sup>12</sup> au milieu de l'Holocène, met en perspective historique le constat du recul de la mangrove de Mahahual. En effet, le retrait considérable de la mangrove en direction du milieu terrestre présente un caractère historiquement inédit.

Finalement, nous pouvons parfois noter une importante proximité géographique des points hydrologiques collectés (Figure 18). Ces derniers constituent par moment des formes de concentrations de type « cluster » (cercles bleus). Ces concentrations hydrologiques pourraient tout autant être l'effet d'une remontée de nappe, d'un encaissement topographique ou encore d'un ensemble de conditions biophysiques localement favorables. Quoi qu'il en soit, ces éléments disposent d'une réelle valeur concernant notre objectif d'identification des zones hydrologiques à préserver. En ce sens, le retour sur terrain à plusieurs reprises au cours d'une année permettra de certifier ou non la nature pérenne de ces « clusters hydrologiques ».

Avant d'entrer définitivement dans la phase d'analyse des résultats, une introduction à ce qui constitue notre principal repère d'analyse s'impose. En effet, la construction d'un tableau synthétisant les échelles de tolérance de chaque espèce de palétuviers pour l'ensemble des indicateurs physico-chimiques étudiés ou « *Tolerance Range Index* » (TRI) (Figure 20) est apparue indispensable pour la phase d'interprétation de nos résultats. Ce tableau a été obtenu suite à un travail personnel de recherche bibliographique centré sur les indicateurs déterminant le développement des palétuviers (Blasco, 1982). La lecture approfondie de la thèse de (Capdeville, 2018), nous permet de justifier l'absence totale d'information concernant les trois éléments analysés du cycle de l'azote (Ammoniaque, Nitrate, Nitrite). D'après cette étude, les impacts des rejets des eaux usées provoquent une réaction complexe du milieu en engendrant des réponses positives et négatives selon l'espèce de palétuvier. Aujourd'hui, aucune limite de tolérance claire n'a donc pu être dégagée pour ces trois éléments chimiques.

<sup>12</sup> Partie sud de la péninsule du Yucatan.

	Tolerance Range Index				
	<i>Rizophora mangle</i>	<i>Avicennia germinans</i>	<i>Laguncularia racemosa</i>	<i>Conocarpus erectus</i>	Optimal range
Water temperature min (°C)	20°C <sub>1</sub>	19°C <sub>1</sub>	20°C <sub>1</sub>	10°C <sub>2</sub>	19 - 39°C
Water temperature max (°C)	40 - 50°C <sub>3</sub>	40 - 50°C <sub>3</sub>	40 - 50°C <sub>3</sub>	40 - 50°C <sub>3</sub>	19 - 39°C
Salinity level min (ppt)	0 <sub>1</sub>	0 <sub>1</sub>	0 <sub>1</sub>	0 <sub>2</sub>	10 - 20 ppt <sub>4</sub>
Salinity level max 1 (ppt)	90 <sub>1</sub>	65 <sub>1</sub>	42 <sub>1</sub>	20 <sub>2</sub>	10 - 20 ppt <sub>4</sub>
Salinity level max 2 (ppt)	65 <sub>5</sub>	90 <sub>5</sub>	unknown	unknown	10 - 20 ppt <sub>4</sub>
pH min 1	5,4 <sub>1</sub>	6 <sub>1</sub>	4,8 <sub>1</sub>	5 <sub>2</sub>	unknown
pH max 1	7 <sub>1</sub>	7 <sub>1</sub>	8,8 <sub>1</sub>	7,5 <sub>2</sub>	unknown
pH min 2	4 <sub>6</sub>	5,66 <sub>6</sub>	unknown	unknown	unknown
pH max 2	7 <sub>6</sub>	7 <sub>6</sub>	unknown	unknown	unknown
Average pH	6,3 <sub>6</sub>	6,5 <sub>6</sub>	unknown	unknown	unknown
Nitrate (ppm)	unknown	unknown	unknown	unknown	unknown
Nitrite (ppm)	unknown	unknown	unknown	unknown	unknown
Ammonia (ppm)	unknown	unknown	unknown	unknown	unknown

Sources : <sub>1</sub> Official website of the Conafor Institute (Mexico) ; <sub>2</sub> <http://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Conocarpus+erectus> ; <sub>3</sub> (Feller & Sitnik, 2014) ; <sub>4</sub> (USGS, 2003) ; (Blasco, 1984) ; <sub>5</sub> (« La Mangrove des Antilles », Conservatoire du littoral) ; <sub>6</sub> (Marchand, 2007) - Credit : Yannis de Pereyras for Takata Research Center

Figure 20 : Tableau récapitulatif des limites de tolérance par indicateurs physico-chimiques selon l'espèce de palétuvier

La construction d'un tel support synthétique a été stimulée par deux différentes motivations. La première est de type informationnel : fournir un outil simple et fiable encore non rencontré dans la littérature scientifique. La seconde est d'ordre analytique : déterminer si les conditions écologiques sont adéquates ou inadéquates au développement des palétuviers. C'est en ce sens que nous nous reporterons régulièrement aux valeurs présentées dans ce tableau, afin de garantir la pertinence de nos interprétations.

## B - Analyse des résultats :

L'investigation par zones d'échantillonnage débutant ci-après, présente l'intérêt majeur de pouvoir mesurer l'impact de leurs caractéristiques locales sur nos indicateurs d'analyse. En effet, ce zonage a été formé après avoir pris connaissance que des dynamiques diverses (hydrologique, anthropique, écologique) étaient en jeu à échelle plus fine sur Mahahual. L'on retrouve alors des « fonctions-types » propres à chacune de ces zones. Pour rappel, les particularités identifiées de ces espaces sont :

- **Zone (A) « Puerto »** : Forêt de palétuvier dense, peu ou pas de coupes de bois (propriété privée appartenant au port de croisière Costa Maya). Portion forestière fortement isolée hydrologiquement. Présence de la STEP de Mahahual en lisière de mangrove où l'ensemble des effluents d'eaux usées traitées est directement rejeté au sein de l'écosystème.
- **Zone (B) « Pueblo »** : La production d'eaux usées de cette zone est majoritairement traitée, néanmoins, rejets par la population locale et les infrastructures touristiques d'eaux grises non-traitées en lisière de mangrove. Centre commerçant de Mahahual. On dénote sur cet espace des lieux réservés au dépôt de sargasses. Zone où prend place le phénomène préoccupant des « invasions » ou « occupation illégale des terres ».
- **Zone (C) « South »** : Espace fortement impacté par l'ouragan Dean (2006). Zone très partiellement raccordée aux réseaux de traitement des eaux usées. Aire moins soumise aux activités anthropiques. Lit asséché du cours d'eau du Rio Bermejo à l'extrême sud de cette zone.

Ce zonage résulte donc d'une compréhension avant tout empirique du territoire. L'intérêt supplémentaire de cette analyse réside alors en sa capacité à confirmer ou infirmer cette conception préalable du territoire local. En dernière instance, elle nous offre des valeurs d'analyse comparative à une échelle pertinente.

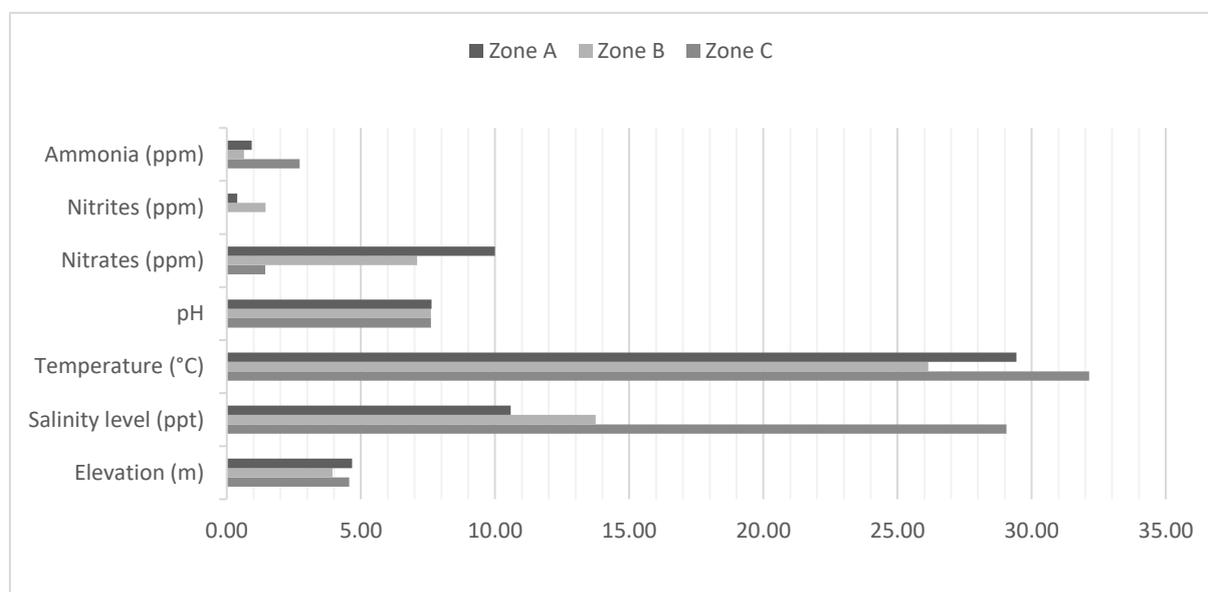


Figure 21 : Valeurs moyennes des indicateurs d'analyse par zones d'échantillonnage (A, B, C)

Les valeurs moyennes présentées sur le graphique ci-dessus (Figure 21), nous renseignent sur les éléments de divergence principaux de nos trois zones. À l'opposé, l'on constate une forte stabilité concernant le taux d'acidité des points hydrologiques rencontrés à travers les trois entités spatiales définies. En effet, ces dernières semblent s'accorder autour d'un pH de 7,63. Une rapide comparaison avec les valeurs de références du TRI (Figure 20) nous indique une basicité supérieure au seuil de tolérances naturelles de la mangrove rouge. Ce résultat doit toutefois faire l'objet d'une certaine critique du fait d'une limite liée au matériel d'analyse. Comme il l'a été annoncé en partie méthodologique, les intervalles d'analyse du kit ne correspondent pas aux intervalles de tolérance moyenne des palétuviers. Celles-ci proposent des valeurs pH de nature basique tandis que la mangrove se comporte davantage en un milieu où les sols développent des conditions d'acidités avancées. Pour cette raison, les résultats pH conserveront une dimension strictement anecdotique pour la suite de nos analyses.

D'après la (Figure 21), l'altitude apparaît également comme un paramètre relativement stable entre nos trois zones. Le niveau topographique moyen de ces différents espaces oscille en effet, entre 3,94 m (Zone B) et 4,68 m pour l'altitude moyenne la plus haute (Zone A). Ces altitudes moyennes nous paraissent assez élevées pour un écosystème originellement soumis aux marées. Par ailleurs, sur la côte de Mahahual, l'amplitude des marées est localement extrêmement faible. Cela peut s'expliquer par deux biais d'enquête simples : 1) une précision déficiente lors du processus de positionnement GPS de l'appareil, 2) un point GPS enregistré en lisière où les principaux aménagements du territoire (routes, résidences) sont implantés. Ces aménagements ont modifié structurellement la « mise en forme » du territoire et notamment les gradients de relief. Cela a donc introduit dans notre base de données de nombreuses valeurs d'altitudes extrêmes (plus de 9 mètres pour les zones A et B qui restent aussi les espaces les plus anthropisés). Malgré la précision insuffisante de nos données, les écarts altitudinaux conservent un puissant intérêt, car ils nous permettent *a minima* d'estimer le sens des écoulements superficiels.

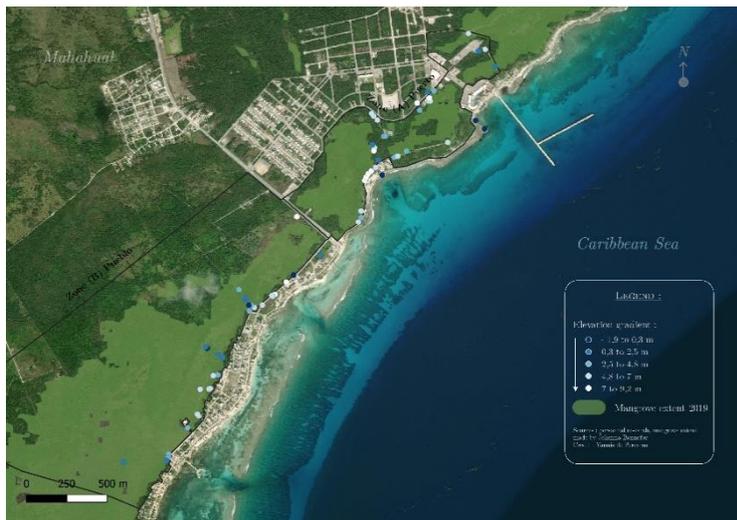


Figure 22 : Variations altitudinales au sein des mangroves de Mahahual : zoom sur la zone du village et du port de croisière

Ainsi, la cartographie des élévations (Figure 22) nous permet de dégager un « schéma topographique » récurrent sur les zones côtières urbanisées. Ce schéma simple consiste en une courbe partant d'un point d'élévation zéro ou « niveau de la mer » donnant suite à une montée franche correspondant aux aménagements littoraux (route principalement) pour au final entamer une descente progressive dans l'écosystème mangrove dont l'altitude est proche de celle de la mer. Sur cette représentation nous pouvons donc remarquer le rehaussement fréquent des lisières

sur ce territoire. C'est en ce sens que nous pouvons avancer que la construction urbaine mal planifiée a déclenché des ruptures hydrologiques entre la mangrove et sa connexion naturelle avec la mer, mais également au niveau de la mangrove elle-même. C'est à partir de ce constat que nous estimons qu'il serait davantage pertinent de parler « des mangroves de Mahahual » en lieu et place de « la mangrove de Mahahual ». Cette adaptation terminologique pourrait par ailleurs participer à la prise de conscience par l'ensemble des acteurs locaux de l'évolution écologique structurelle actuellement en action sur Mahahual.

À partir des éléments évoqués, l'on peut proposer que le fractionnement de la mangrove (Figure 23) déclenche sur le long-terme, un mécanisme « **d'autonomisation écologique forcée** ». Nous entendons par l'emploi du terme d'« **autonomie écologique** », le développement par une portion de forêt isolé de mangrove de ses propres conditions de survie écologique suite à l'arrêt de toutes interactions et dynamiques hydrologiques sur cet espace. Par l'expression « **forcée** » : le processus contraint d'adaptation. Ce phénomène de fractionnement hydrologique placerait de ce fait les portions forestières isolées en situation de grande vulnérabilité lors des périodes de sécheresse puisqu'aucun renouvellement hydrologique n'est assuré. Dès lors, la mangrove se détache peu à peu de l'« **inertie écosystémique** » qui la caractérise et qui lui garantissait par ailleurs, une résilience écologique remarquable. Sur cet aspect, le projet de développement urbain porté par le document de planification « PDU Nuevo Mahahual », prévoit l'extension du réseau routier local. De futurs axes devraient ainsi rejoindre le circuit littoral de Mahahual-Xcalak et engendrer de nouvelles entités forestières autonomes. Nous devons donc élargir notre compréhension de ce phénomène en élaborant une modélisation hydrologique à partir de données microtopographiques précises collectées sur le territoire. Cette modélisation nous permettra en dernière instance, d'identifier les reliefs étant à l'origine des ruptures hydrologiques au sein des mangroves de Mahahual.



Figure 23 : Prise aérienne du phénomène des "invasions" et du fractionnement des mangroves de Mahahual (Source : groupe facebook "Invasiones e inseguridad en Mahahual")

Nous allons maintenant procéder à l'examen des données de température collectées. L'on voit tout d'abord que les valeurs moyennes acquises (Figure 21) se situent toutes dans l'intervalle optimal indiqué par le TRI (Figure 20). Ces dernières évoluent tout de même entre 26 °C (zone B) et 32 °C (zone C). La température maximale enregistrée en zone C atteint même les 39 °C, ce qui nous pose la question de la progression de la valeur de cette donnée en période de sécheresse. Sur ce point, (Feller & Sitnik, 2014) nous indiquent qu'à partir de 40 °C, nous entrons dans la plage de température « critique » pouvant être à l'origine d'importants dommages pour le palétuvier. Les écarts de valeurs moyennes constatés peuvent s'expliquer principalement par la densité de la canopée, le type de forêt de mangrove, l'apport en eaux douces et la densité foliaire de l'arbre directement dépendant de l'état de santé des palétuviers. Ces derniers éléments influencent aussitôt l'exposition des points hydrologiques à l'ensoleillement. Du fait de ces conditions, la zone C présente une température moyenne supérieure aux deux zones restantes. La zone C a particulièrement subi les effets de l'ouragan Dean de 2006 où une large extension de mangrove a été entièrement détruite<sup>13</sup>. Afin de fournir une idée concrète de cet impact (Hirales-Cota, 2009) avance, à la suite d'un traitement cartographique, que 750 hectares ont été dévastés par les ouragans sur les localités de Mahahual et Xcalak. Notre présence sur le terrain nous a permis constater l'ampleur de cette catastrophe (Figure 24). Ce phénomène climatique a provoqué un véritable bouleversement paysager qui induit *in fine*, une altération dans le fonctionnement écologique de cette zone.



Figure 24 : Forêt de mangrove impactée par l'ouragan Dean (2007). Paysage pris en zone C à proximité du cours d'eau du Rio Bermejo

D'autre part, le cours d'eau du Rio Bermejo, vecteur majeur de la mise en dynamique hydrologique de cette zone, a vu son flux réduire jusqu'au quasi-assèchement. La mise à l'arrêt de ce vecteur essentiel de circulation hydrologique sur le territoire local peut être attribuée à une combinaison de facteurs. Tout d'abord, le facteur climatique intervient avec les effets induits du réchauffement (sécheresses plus fréquentes et plus longues) puis, la problématique récente posée par l'arrivée massive de sargasses sur la côte caribéenne du Mexique<sup>14</sup>, le dimensionnement inadapté de l'ouvrage hydraulique et enfin la non-intervention des services publics d'entretien des cours d'eau.

---

<sup>13</sup> Le temps de régénération total d'un palétuvier est d'ordinaire estimé à une trentaine d'années.

<sup>14</sup> Algues se formant dans les grands fleuves tels que le Mississippi et l'Amazone par l'excès d'azote dû à aux pratiques d'agriculture intensive. Une accumulation problématique (sanitaire, écologique et paysagère) sur les plages de la péninsule du Yucatan depuis le milieu des années 2010.

Le mécanisme de réduction de la circulation hydrologique du Rio Bermejo peut ainsi être compris et synthétisé comme suit :

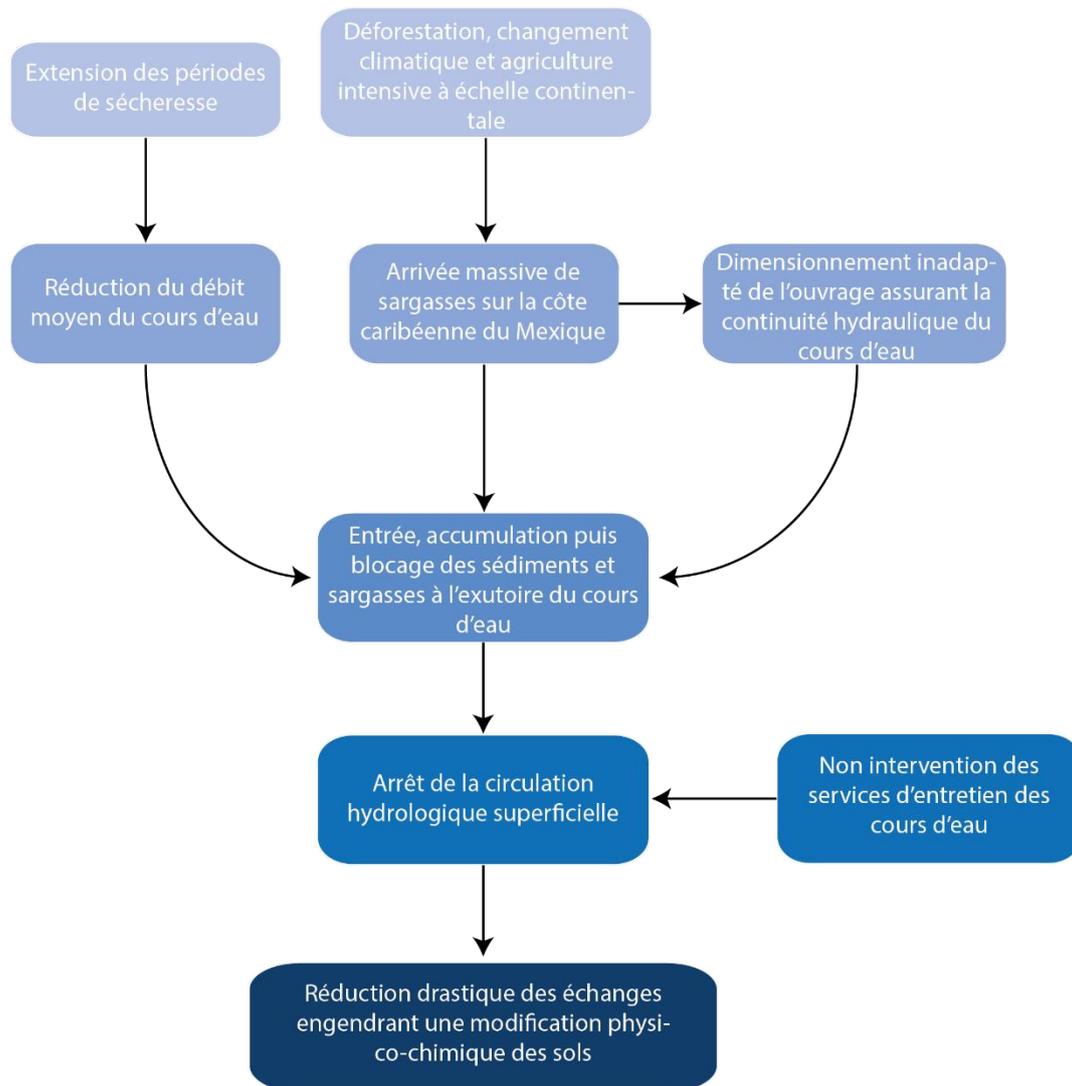


Figure 25 : Schématisation du phénomène d'assèchement du Rio Bermejo et de ses impacts

La réduction de l'écoulement de ce cours d'eau présuppose un fort impact sur les paramètres étudiés (pH, salinité, cycle de l'azote, etc.). Les échanges en nutriments, les apports en eaux douces et l'oxygénation des sols en sont extrêmement restreints. « *Voilà pourquoi toute modification du régime hydrique, même très en amont d'une mangrove, entraîne inéluctablement de profondes modifications dans son fonctionnement, dans sa productivité et peut conduire à la disparition de l'écosystème.* » (Blasco, 1982). Cela a pour conséquence finale d'altérer la composition physico-chimique des sols puis des masses d'eau. Pour témoigner de cette dégradation écologique, les populations locales nous ont alertés sur une augmentation de la mortalité de la faune halieutique à l'exutoire du cours d'eau. Mortalité que nous avons pu constater une fois sur place. Cependant, puisque nous ne disposons pas de valeurs antérieures de référence, nous ne sommes aujourd'hui pas en capacité d'apprécier avec justesse l'amplitude de cette évolution environnementale.

Cette réponse dynamique du milieu a eu un impact similaire sur l'indicateur de salinité des points hydrologiques échantillonnés. Effectivement, le graphique présentant les valeurs moyennes de salinité par zones d'échantillonnage (Figure 21) met en évidence un écart entamé entre la zone C et

les zones restantes. La salinité moyenne des points hydrologiques de cette zone présente en effet, des valeurs au minimum deux fois supérieures à celles des zones A et B. Les valeurs moyennes de salinité par zones sont : A = 10,59 ppt; B = 13,75 ppt ; C = 29,07 ppt. Le taux de salinité maximal enregistré sur la zone C rejoint même la salinité moyenne de l'eau de mer soit, 35 ppt.

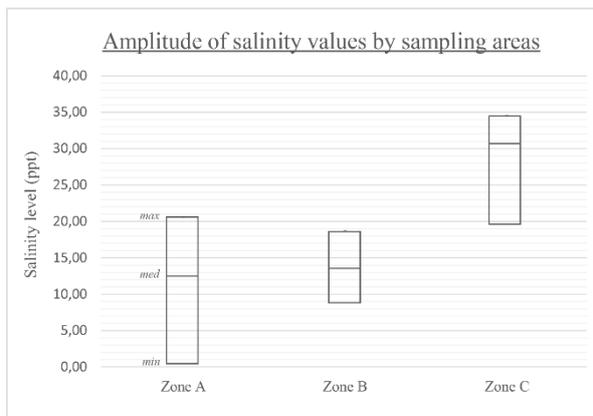


Figure 26 : Amplitude des valeurs de salinité par zones d'échantillonnage

sur les variations annuelles de la salinité dans une forêt de mangroves au Bangladesh, montre des tendances se distinguant fortement des nôtres. En effet, les données exposées dans cette étude indiquent une salinité proche de 0 à 5 ppt en période de mousson (saison humide équivalente) et un pic de salinité autour de 25 ppt en saison sèche. Ainsi, sans affirmer pour autant que les taux de salinité de cette zone sont anormalement hauts, ils nous présentent toutefois un espace en évolution dont un suivi rapproché s'impose.

Finalement, une amplitude importante entre les valeurs minimales et maximales de salinité semble particulièrement en action au sein de la zone A ou Puerto (Figure 26). Celle-ci traduit bien la diversité de ce territoire où les forêts tropicales sèches s'entremêlent naturellement aux arbres à palétuviers (3 espèces de palétuviers présents). Par ailleurs, c'est au sein de cette zone que l'on a pu constater la plus grande colonie de mangroves grises. Une rapide projection cartographique (Figure 27) vient confirmer le lien étroit existant entre la distribution spatiale de cette espèce de palétuvier (points gris) et les points de concentration de salinité les plus élevés (cercles concentriques rouges). La tolérance en salinité de ces espèces ne permet pas en effet, leurs implantations dans les zones où l'on dénote une abondance régulière. À l'inverse, les mangroves rouges (*Rizophora mangle*) et mangroves blanches (*Laguncularia racemosa*) poursuivent sur cet espace, leurs croissances et développements sans difficulté. Comme l'ont avancé (Blasco, 1982) et (Feller & Sitnik, 2014), la salinité se comporte bien comme un élément déterminant la distribution spatiale de la mangrove. En ce sens, une augmentation globale de la salinité sur ce territoire pourrait faire évoluer la localisation et voire même, en réduire la diversité des espèces de palétuviers à Mahahual.



Figure 27 : Exposition de la corrélation entre taux de salinité et type de palétuvier

Enfin, nous tenons à prévenir le lecteur sur le caractère incomplet de notre base d'information. En effet, la base de données construite pour les indicateurs de salinité et de température (46 valeurs) ne nous permet pas, à l'heure actuelle, de procéder à une extrapolation fiable pour les zones indiquées. Il s'agit donc ici d'une analyse se basant sur de premiers résultats. La poursuite de ce suivi écologique s'avère encore une fois, tout à fait indispensable pour renforcer la crédibilité des conclusions dégagées à partir de ces analyses. Toutefois, la mise en surface de ces premières tendances satisfait en majorité les hypothèses formulées en amont.

Afin de clore l'étude des valeurs moyennes par zones d'échantillonnages, nous finirons sur une cartographie permettant de répondre à notre objectif consistant à identifier les principaux centres de pollution sur le territoire :

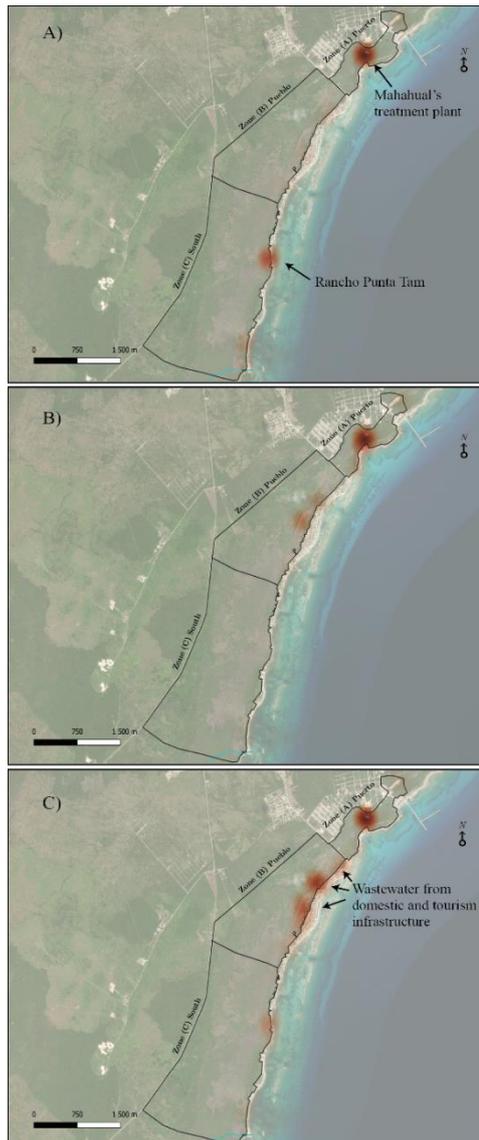


Figure 28 : Cartes des concentrations en (A) Ammoniaque  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ , (B) Nitrate  $\text{NO}_3^-$  et (C) Nitrite  $\text{NO}_2^-$  au sein des mangroves de Mahahual

Ces cartographies (Figure 28) révèlent plusieurs origines de pollution, certaines se confirmant au travers des trois prismes correspondant aux trois éléments chimiques analysés, d'autre intervenant davantage à titre d'exception. Parmi les points de contamination de nature récurrente, la STEP publique de Mahahual (zone A, nord) et son rejet d'effluents en milieu mangrove apparaît comme une source majeure d'apports en nutriments azotés. Cette pollution doit être mise en perspective avec la croissance urbaine programmée qui devrait donner lieu à une augmentation soutenue des volumes d'eaux usées traitées puis rejetées dans cette portion de territoire. Une étude de calibration des rejets

voire de déplacement de l'exutoire doit être entreprise par la société de gestion de ce centre de traitement (CAPA) afin de proposer une solution pérenne à cette situation qui deviendra très sûrement problématique dans un avenir proche. En effet, d'après les observations de Capdeville (2018) l'exposition des mangroves à un apport excessif et continu de nutriments types « eaux grises » pourrait sérieusement réduire la diversité d'espèces de palétuviers et de crabes<sup>15</sup> sur l'aire impactée. L'enjeu est donc ici écologique à travers la préservation de la biodiversité de la mangrove locale. Par la suite, cette biodiversité spécifique dispose d'une influence considérable à un niveau de biodiversité plus large sur le territoire. Par ailleurs, la situation d'isolement hydrologique de la zone A (connexion mer/terre rompue, et fractionnement hydrologique avec la continuité de l'écosystème dû à l'axe routier) ne permet pas d'assurer la circulation et l'échange de cette quantité de nutriments. Ces nutriments se trouveront alors dans un état de « stagnation » problématique engendrant des disparités importantes au sein de cet ensemble forestier. Les stigmates liés à cette exposition excessive ne semblent toutefois se concrétiser véritablement que sur le long-terme. Pour autant, une coopération auprès du service public de régie des eaux (CAPA) sur cette situation pourrait dès à présent, s'avérer hautement utile pour le devenir de l'écosystème. Sur cette problématique, le centre de recherche de Takata s'est tout récemment rapproché de cet acteur afin de recueillir un panel d'informations générales sur la gestion des eaux usées de Mahahual, son évolution probable, et son impact sur les secteurs de mangroves. Il a ainsi été adressé un questionnaire<sup>16</sup> à destination d'un représentant disposant de compétences techniques au sein de ce service. À l'heure actuelle, aucune réponse n'a été obtenue par l'ONG Takata.

Le second noyau de pollution majeur semble prendre place en zone B et correspond aux rejets domestiques et touristiques d'eaux usées non traitées. Cette pollution concerne tout particulièrement les éléments chimiques de nitrite et nitrate. Ces derniers équivalent aux ultimes stades de décomposition du cycle de l'azote dans le sol. Sur cette zone, nous avons pris connaissance d'un raccordement incomplet au système de traitement unitaire engendrant deux mécanismes palliatifs : majoritairement, la population locale acquiert de manière autonome, un système de traitement des eaux usées. Dans le cas contraire, ces acteurs locaux procèdent aux rejets directs en lisière de mangrove. À partir de cette observation, l'on peut constater que la totalité des concentrations majeures en polluant est située à cette interface « milieu anthropique-milieu naturel ». Bien que l'on ne dispose pas d'informations appuyant concrètement cette hypothèse, la décomposition des sargasses entreposées en des points de dépôts regroupés sur cette partie de territoire pourrait avoir une influence supplémentaire sur ces quantités élevées en nutriments.

Finalement, la zone C laisse entrevoir une surprenante zone de pollution au niveau du « rancho Punta Tam » où des résidences et installations touristiques de faibles accueils prennent position. Au-delà de l'évidente source de contamination par eaux usées, un entretien avec les gérants de ces structures serait instructif afin de dégager les origines exactes de cette concentration en polluants. Par ailleurs, nous ne sommes toujours pas en capacité d'affirmer le raccordement total de cette partie du territoire au système local de traitement des eaux usées.

Suite aux positionnements géographiques des points de pollution majeurs de ce territoire, nous sommes aujourd'hui en capacité d'organiser un suivi localisé dans l'objectif d'observer les impacts de ces éléments sur le complexe mangrove. Nous saurons constater, caractériser et mesurer les changements induits par ces émissions. Il sera également d'une utilité scientifique décisive de reconduire ce suivi afin de noter si ces zones de pollutions (en dehors de la STEP de Mahahual) se vérifient à des échelles temporelles diverses.

---

<sup>15</sup> Les crabes sont une espèce dite « ingénieur » dans le sens où elle modifie et équilibre directement son environnement. Le crabe agit principalement sur le déplacement des propagules, la consommation de matières organiques et l'oxygénation des sols (Capdeville, 2018).

<sup>16</sup> Ce questionnaire sera consultable dans la partie annexe.

Pour conclure cette analyse des résultats, nous terminerons sur une production cartographique spatialisant la répartition des différentes espèces de palétuviers sur le territoire de Mahahual (Figure 29). Cette dernière production participera à la démarche de caractérisation écologique des mangroves de Mahahual. Pour autant, cet élément dépasse la simple fonction informative, car il nous permet une mise en interprétation pertinente. Nous l'avons vu, la distribution spatiale des espèces de palétuviers répond et reste décidée par les conditions physico-chimiques des sols et points hydrologiques. Ainsi, comme il l'a été observé en (Figure 27), nous avons pu constater le caractère déterminant de la salinité comme facteur de répartition des palétuviers gris (*Conocarpus erectus*). Par extension, l'absence de mangrove grise signifie que les taux de salinité de ce territoire sont régulièrement (en termes temporels et spatiaux) supérieurs à 20 ppt (Figure 20). Cette mise en interprétation peut-être finalement reproduit pour une grande diversité d'indicateurs physico-chimiques identifiés par la recherche scientifique comme déterminants.

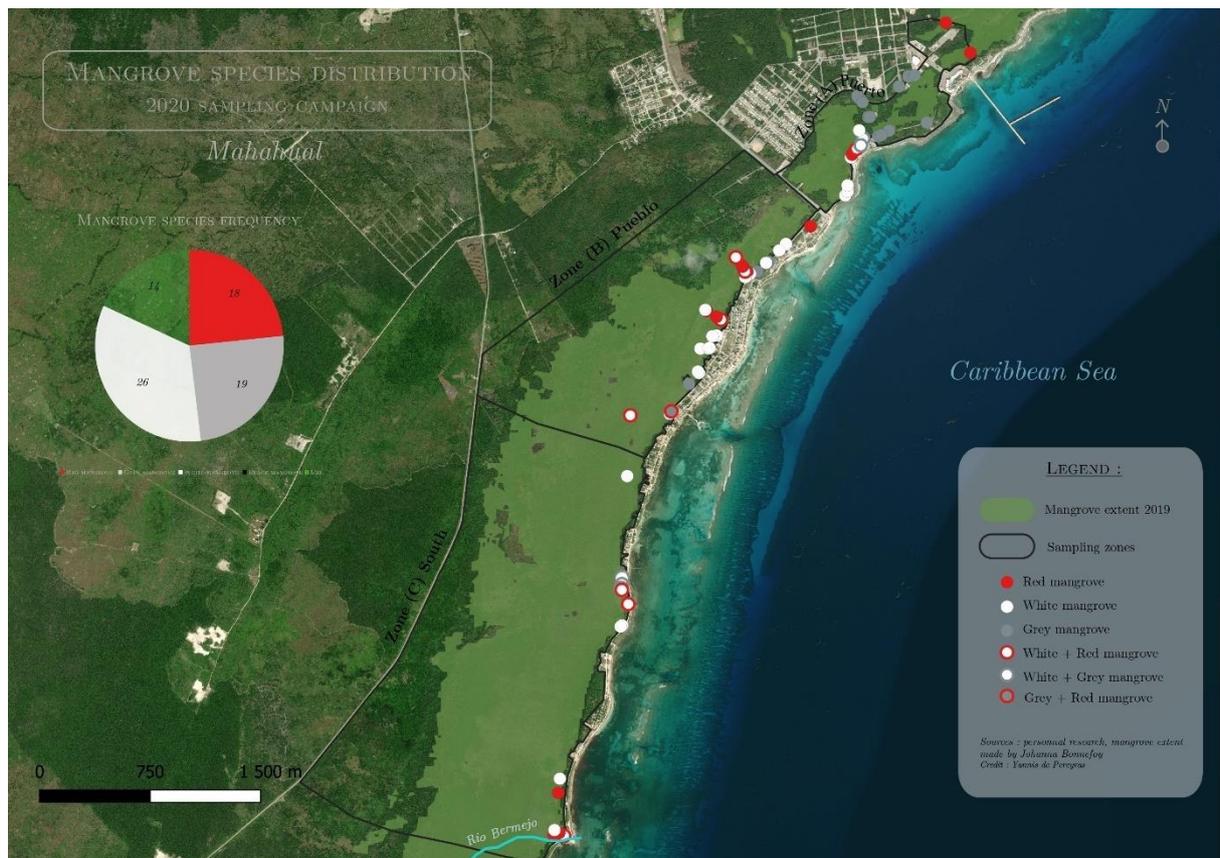


Figure 29 : Distribution spatiale des espèces de palétuvier au sein de l'écosystème mangrove de Mahahual

L'analyse statistique révèle qu'en majorité, la mangrove blanche (*Laguncularia racemosa*) a été l'espèce de palétuvier la plus observée au cours de nos investigations avec 34 % de fréquence. S'en suit la mangrove grise (*Conocarpus erectus*) et rouge (*Rizophora mangle*) avec respectivement 25 % et 23 %. 18 % sont finalement octroyés à une végétation mixte de palétuviers. Au cours de notre enquête, il ne nous a été donné d'observer qu'un seul palétuvier noir (*Avicennia germinans*) localisé en lisière de zone C. Toutefois, ce point ne constituait pas un point de collecte hydrologique, de ce fait, ces informations n'ont pas été liées à un point géolocalisé. Une étude sur la rareté de cette espèce de palétuvier serait intéressante afin de déterminer si ce phénomène est à attribuer à des conditions physico-chimiques originellement inadéquates à son développement ou bien si cette rareté tient davantage à une altération écologique structurelle du milieu rendant inapte son renouvellement naturel.

À titre d'approfondissement, le tableau ci-dessous (Figure 30) répertorie les fréquences observées des espèces de mangroves à l'échelle des zones d'échantillonnage :

	Mangrove species frequency by sampling areas		
	Zone A (puerto)	Zone B (pueblo)	Zone C (south)
<i>Rizophora mangle</i>	19%	18%	21%
<i>Laguncularia racemosa</i>	11%	45%	43%
<i>Conocarpus erectus</i>	30%	15%	0%
Mix	6%	15%	36%
Non mangrove	34%	6%	0%
<b>n total</b>	<b>47</b>	<b>33</b>	<b>14</b>

Figure 30 : Fréquence des espèces de palétuvier par zones d'échantillonnage

Comme il l'a été abordé plus tôt, il persiste en zone A un véritable entremêlement entre la forêt de mangrove et la forêt tropicale sèche. Cela explicite la part majoritaire de « non-mangrove » retrouvée sur cet espace. Encore une fois, la faible salinité justifie la dominance de la mangrove grise (*Conocarpus erectus*) et de la végétation « non-mangrove » dans cette partie de l'écosystème. Ces deux types de végétations représentent à eux seuls, 64 % de la végétation totale des mangroves dans cette zone nord. Contrairement aux zones B et C où elle est dominante, peu de mangroves blanches (*Laguncularia racemosa*) ont été étudiées au sein de cet espace. Toutefois, l'on remarque une répartition quasiment égale des mangroves rouges (*Rizophora mangle*) entre les différents zones d'échantillonnages, ces dernières ont par ailleurs été régulièrement repérées à proximité de masses d'eau les plus étendues. On peut enfin constater que la salinité particulièrement élevée de la zone C induit une diminution importante de la diversité botanique. En effet, ces conditions locales ont eu pour conséquences de rendre exclusivement possible le développement de l'arbre palétuvier. Cette zone de mangrove constitue donc l'ensemble forestier le plus homogène des trois zones étudiées. Pour revenir à la distribution spatiale de ces espèces, on peut voir que la mangrove grise reste de manière intrinsèque, une végétation de bordure (et chemins) contrairement aux autres espèces de mangroves qui peuvent évoluer aussi bien en lisière qu'au cœur des forêts. En outre, on observe une cohabitation récurrente entre les mangroves blanches et rouges sur ce territoire.

Pour conclure, l'objectif final consistant en la proposition de mesures concrètes d'action (restauration, conservation) ne peut être qu'imparfaitement répondu. En effet, l'absence totale de données microtopographiques et hydrogéologiques ne permet pas de constituer une étude hydrologique de qualité suffisante. De plus, les résultats obtenus ne traduisent ici que les conditions écologiques retrouvées entre le mois d'avril à juillet. L'extension de ce suivi jusqu'à l'atteinte d'une couverture de données d'une période au moins annuelle, apparaît incontournable. Au cours de ce stage de recherche, il a été fait le choix de privilégier l'étude de l'isolement hydrologique superficiel (entre terre et mer, mais aussi le fractionnement au sein de l'écosystème lui-même). Cependant, le développement urbain conduisant à l'artificialisation des sols peut aussi bien être la cause d'un isolement de niveau hydrogéologique. Le phénomène d'artificialisation des sols pourrait en effet étanchéifier les points de remontées des eaux souterraines. Cette problématique physique pourrait être la cause d'une suppression des échanges hydrologiques naturels entre le milieu souterrain et

superficiel. Ceci impactera également le sens des écoulements gravitaires en réduisant fortement l'infiltration de l'eau dans les sols. Cet impact hypothétique pourrait faire l'objet d'une future étude hydrogéologique menée par Takata ou toute autre organisation présentant les compétences requises.

Malgré ces lacunes en termes de données scientifiques locales, certaines zones des mangroves de Mahahual restent à favoriser pour des opérations de rétablissement des connexions hydrologiques :

- 1) La situation écologique observée et appuyée par les valeurs obtenues au niveau du Rio Bermejo nous amène à considérer cette zone de mangrove comme prioritaire. La réduction des flux de ce cours d'eau côtier a en effet profondément restreint les apports d'eaux douces pour les palétuviers. Les valeurs élevées de salinité et de température constatées sur le terrain en saison humide annoncent une condition écologique préoccupante lors des périodes de sécheresse. Des opérations d'entretien du Rio Bermejo seraient dans un premier temps, bénéfiques pour le rétablissement de sa circulation hydrologique.
- 2) La surexposition des mangroves de la zone Nord (A) aux effluents d'eaux usées de la station d'épuration communale (STAP CAPA) apparaît également comme un espace naturel en difficulté. L'augmentation certaine de la production d'eaux usées à Mahahual fragilisera davantage cette portion de mangroves isolée. Un travail en collaboration aux côtés de la CAPA s'avérera indispensable afin d'étudier les possibilités de conciliation (calibrage des effluents ? Répartition des points de rejets sur le territoire communal ? etc.) entre ce type d'activité anthropique et la conservation de l'écosystème côtier.
- 3) Pour finir, le rétablissement de la connexion naturelle entre la mangrove et la mer nous semble aujourd'hui extrêmement complexe du fait de la présence continue de la route littorale. Toutefois, l'accentuation du phénomène d'érosion côtière donnera potentiellement lieu à une relocalisation des infrastructures routières et des habitations. À l'image des décisions politiques mises en œuvre dans les pays occidentaux, les infrastructures implantées sur le littoral et menacées par l'érosion pourraient faire l'objet d'un « recul stratégique » suite à un processus de « recomposition territoriale ». Dans ce cas de figure, le rétablissement de ce lien naturel pourrait devenir envisageable. Pour autant, l'orientation des décisions politiques et économiques actuelles ne nous laisse effectivement pas espérer une réalisation de ce type d'action. Indépendamment des décisions politiques prises, la consultation de l'ensemble des parties prenantes devra nécessairement être opérée afin de mettre en relief les différents intérêts locaux autour de cette question.

## Conclusion :

La mise en œuvre de ce monitoring hydrologique nous a finalement permis de constituer une première base de données qui s'est révélée fiable, exploitable et consultable pour tous les acteurs locaux souhaitant s'informer sur l'état de santé générale des mangroves de Mahahual. Ainsi, l'objectif consistant à entamer une caractérisation et un suivi écologique de cet écosystème a été rempli. L'intérêt de cette base de données tient également à la valeur « témoin » dont elle dispose. En effet, toute évolution de cet écosystème pourra désormais être évaluée et mise en comparaison. Cette fonction se révèle particulièrement opportune au moment où un développement urbain local d'envergure est en projet.

Des limites et faiblesses liées à la temporalité de notre collecte de données ont toutefois pu être identifiées. En effet, la surreprésentation de valeurs obtenues en saison humide ne nous permet que partiellement d'estimer l'impact réel de l'isolement hydrologique sur le milieu. Une augmentation conséquente de la valeur des paramètres analysés est en effet attendue lors des périodes de sécheresse annuelle. Ainsi, une reproduction de cette campagne d'échantillonnage en saison sèche nous apparaît scientifiquement incontournable afin d'atteindre une compréhension plus profonde de ce phénomène. En outre, le matériel de test pH s'est avéré inadéquat, ce qui a finalement conduit à la perte nette des résultats car de fait, inexploitable. L'acquisition d'un test pH dont les échelles d'analyse correspondraient davantage aux conditions d'acidités habituellement en présence dans le milieu mangrove se révèle aujourd'hui absolument indispensable.

Pour autant, des résultats pertinents ont pu être dégagés à partir des données recueillies. Ainsi, nous avons pu cibler les principaux centres de pollutions sur le territoire et les portions de forêts de palétuviers les plus réactifs au mécanisme d'isolement hydrologique. Les zones sensibles devront faire l'objet d'une investigation additionnelle afin de déterminer s'il serait nécessaire d'opérer des mesures concrètes de restauration hydrologique. Le mécanisme d'isolement hydrologique semble particulièrement agir sur les concentrations en salinité et en nutriments. Un constat identique a pu être tiré concernant la température des corps d'eau où l'arrêt des flux n'offre plus le renouvellement en eaux douces et la mise en circulation des éléments. Une première cartographie des espèces de palétuviers sur le territoire a parallèlement fait ressortir le caractère discriminant du paramètre de salinité sur l'organisation spatiale.

Par ailleurs, les diverses investigations effectuées au cours de ce stage de recherche m'ont permis de préciser la chaîne des causes à effets. Si l'hypothèse de l'impact du développement urbain mal planifié sur la connectivité hydrologique s'est vérifiée, ce phénomène ne paraît pour autant plus être la cause originelle de la dégradation écologique des mangroves de Mahahual. L'autorité et la primauté des grandes orientations politiques et économiques replacent de ce fait notre hypothèse de sa position de cause à celle de conséquence voire de « répercussion systémique ». Il apparaît aujourd'hui alors difficile d'imaginer le devenir de cette mangrove aux vues des menaces dont elle doit faire face. En ce sens, l'érosion côtière, l'exposition accrue aux ouragans et la réduction remarquable de la faune halieutique sont autant de signaux confirmant la dynamique de fragilisation des mangroves. Cette situation est dans un premier temps, extrêmement préoccupante pour le futur de la communauté locale de Mahahual vu la perte progressive de ces services écosystémiques fondamentaux. En réponse, le réinvestissement sur ce territoire des services publics chargés de la

protection de l'environnement serait tout à fait salubre. Des opérations d'entretiens du cours d'eau du Rio Bermejo et la construction de lieux réservés aux dépôts de sargasses seraient par exemple, des actions locales simples et de grandes utilités.

Finalement, ce cas d'étude m'a permis de réaffirmer l'importance d'une mise en relation systématique entre d'une part, une grille d'analyse en sciences humaines et d'autre part, une expertise en sciences naturelles. Ainsi, la formation de master Eau et Société s'inscrit pleinement dans cette démarche et m'a permis d'aborder un sujet d'étude complexe sous de nombreux angles d'analyses.

## Bibliographie :

- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2013). Cycling and Global Fluxes of Nitrogen in Mangroves. *Global Environmental Research*, (17), 173–182.
- Aragón-Moreno, A. A., Islebe, G. A., Torrescano-Valle, N., & Arellano-Verdejo, J. (2018). Middle and late Holocene mangrove dynamics of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 85(May), 307–311. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.015>
- Balk, M., Laverman, A. M., Keuskamp, J. A., & Laanbroek, H. J. (2015). Nitrate ammonification in mangrove soils : a hidden source of nitrite ? *Frontiers in Microbiology*, 6(166), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00166>
- Barr, J. G., DeLonge, M. S., & Fuentes, J. D. (2014). Seasonal evapotranspiration patterns in mangrove forests. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 119(10), 14. <https://doi.org/10.1002/2014JD021606>
- Blasco, F. (1982). Écosystèmes mangroves : fonctionnement, utilité, évolution. *Oceanologica Acta*, 225–230.
- Brenner, L. (2018). Los impactos ambientales de las políticas públicas en los manglares de Chiapas, México. *Gestión y Política Pública*, 27(1), 237–267. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=131440660&lang=es&site=ehost-live>
- Capdeville, C. (2018). *Évaluation des capacités de résistance et de résilience de l'écosystème mangrove en réponse à des apports d'eaux usées domestiques prétraitées.*
- Cárdenas, N. Y., Joyce, K. E., & Maier, S. W. (2017). Monitoring mangrove forests : Are we taking full advantage of technology ? *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 63(April), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.07.004>
- Carrillo, P. (2016). *Urbanización , turismo y problemas ambientales en Mahahual. 2.*
- Clough, B. (2013). *Continuing the journey amongst mangroves.*
- CONABIO. (2017). *Manglares de Mexico : actualizacion y exploracion de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980-2015.*
- Cormier-Salem, M.-C. (1999). La mangrove : de l'imaginaire aux pratiques. In *Rivières du Sud : Sociétés et mangroves ouest-africaines* (pp. 381–394). <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.4974>
- Coutino, A., Stastna, M., & Reinhardt, E. G. (2020). Interaction of mangrove surface coverage and groundwater inputs on the temperature and water level near Tulum, Quintana Roo, Mexico :

- Observations and modelling. *Journal of Hydrology*, 583(January), 11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124566>
- Elizondo, C., Macias, E., Miguel Angel, C. S., Arana, H. H., Villalobos, D., & Lopez Adame, H. (2011). *Estudio de Caracterización y Diagnóstico del Área de Manglares y Humedales de Puerto Morelos*. Environmental Protection (Water) Policy. (2018). *Monitoring mangrove forest health*.
- Ewel, K. C., Twilley, R. R., & Jin Eong, O. (1998). Different Kinds of Mangrove Forests Provide Different Goods and Services. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7, 83–94. <https://doi.org/10.2307/2997700>
- Feller, I. C., & Sitnik, M. (1996). Mangrove Ecosystems. In *MANGROVE ECOLOGY : A Manual for a Field Course* (p. 21).
- Feller, I. C., & Sitnik, M. (2014). *Mangrove ecology workshop manual*. (November).
- Flores-Mejía, M. A., Aguirre Vallejo, A., Flores Hernández, M., & Guardado, G. (2010). El impacto que produce el sector turismo en los manglares de las costas mexicanas. *ContactoS*, (77), 33–38.
- Hernández Melchor, G. I., Sol Sánchez, Á., Ruíz Rosado, O., & Valdez Hernández, J. I. (2016). Controversias legislativas en la protección del ecosistema manglar: el caso Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (14), 15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i14.455>
- Hirales-Cota, M. (2009). *Cambios de cobertura y servicios ambientales de manglar de franja en la zona costera Mahahual-Xcalak*. El Colegio de la Frontera Sur.
- Hirales-Cota, M., Espinoza-avalos, J., Schmook, B., & Ruiz-luna, A. (2010). Drivers of mangrove deforestation in Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, southeast Mexico. *Ciencias Marinas*, 36(2), 147–159.
- Hu, L., Li, W., & Xu, B. (2018). Monitoring mangrove forest change in China from 1990 to 2015 using Landsat-derived spectral-temporal variability metrics. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 73(19), 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.04.001>
- Kjerfve, B. (1990). *Manual for Investigation of Hydrological Processes in Mangrove Ecosystems* (pp. 29–68). pp. 29–68.
- Krauss, K. W., Keeland, B. D., Allen, J. A., Ewel, K. C., & Johnson, D. J. (2006). Effects of season, rainfall, and hydrogeomorphic setting on mangrove tree growth in Micronesia. *Biotropica*, 39(2), 161–170. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00259.x>
- Lewis, R. R., Milbrandt, E. C., Brown, B., Krauss, K. W., Rovai, A. S., Beever, J. W., & Flynn, L. L. (2016). Stress in mangrove forests: Early detection and preemptive rehabilitation are essential for future successful worldwide mangrove forest management. *Marine Pollution Bulletin*, 109(2), 764–771. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.006>
- Lochard, Y. & Simonet, M. (2009). 23. Les experts associatifs, entre savoirs profanes, militants et professionnels. Dans : Didier Demazière éd., *Sociologie des groupes professionnels: Acquis récents et nouveaux défis* (pp. 274-284). Paris: La Découverte.

- Lotfinasbasl, S., Gunale, V. R., & Khosroshahi, M. (2018). Acta Ecologica Sinica Applying geographic information systems and remote sensing for water quality assessment of mangrove forest. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.06.017>
- Marchand, C. (2007). Relations entre les caractéristiques physico-chimiques du substrat et la nature des palétuviers - Implications sur la répartition spatiale des espèces -. *IRD*, 10.
- Meyer-Arendt, K. J. (2009). The Costa Maya: Evolution of a Touristic Landscape. *Études Caribéennes*, (13–14), 15. <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.3867>
- Morett-Sánchez, C., & Cosío-Ruiz, C. (2017). Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 14, 125–152. <https://doi.org/10.1016/j.urolonc.2008.05.009>
- Naidoo, G. (1990). Effects of nitrate, ammonium and salinity on growth of the mangrove *Bruguiera gymnorrhiza* (L.) Lam. *Aquatic Botany*, 38, 209–219.
- Organisation météorologique mondiale. (2012). *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé*. Retrieved from [http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO\\_standardized\\_precipitation\\_index\\_user\\_guide\\_fr\\_2012.pdf](http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_fr_2012.pdf)
- Pawar, P. R. (2013). Monitoring of impact of anthropogenic inputs on water quality of mangrove ecosystem of Uran , Navi Mumbai , west coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, 75, 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.06.045>
- Perry, E., & Socki, R. (2003). *Hydrogeology of the Yucatán Peninsula*.
- Philippoff, J., & Cox, E. (2007). *Measuring Abundance: Transects and Quadrats*.
- Pool, D. J., Snedaker, S. C., & Lugo, A. E. (1977). Structure of Mangrove Forests in Florida, Puerto Rico, Mexico and Costa Rica. *Biotropica*, 9(3), 195–212.
- RAMSAR. (2018). *Perspectives mondiales des zones humides*.
- Reis Gonçalves, C., Nardoto Bielefeld, G., & Silva Oliveira, R. (2017). Global overview on nitrogen dynamics in mangroves and consequences of increasing nitrogen availability for these systems. *Plant and Soil*, (410), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3123-7>
- Rivera-Monroy, V. H., Shing, Y. L., Kristensen, E., & Twilley, R. R. (2017). *Mangrove Ecosystems : A Global Biogeographic Perspective*.
- Schumacher, M., Durán-Díaz, P., Kurjenoja, A. K., Gutiérrez-Juárez, E., & González-Rivas, D. A. (2019). Evolution and collapse of Ejidos in Mexico-To what extent is communal land used for urban development? *Land*, 8(146), 21. <https://doi.org/10.3390/land8100146>
- Taureau, F., Robin, M., & Debaine, F. (2015). *Guide méthodologique pour la cartographie des mangroves de l'Outre-mer français*.
- The Rufford Foundation. (n.d.). *Mangrove Regeneration Survey Protocol - a field manual* -.

- Thomas, L., Williams, R., & Sandilands, D. (2007). Designing line transect surveys for complex survey regions. *Journal of Cetacean Research and Management*, 9(1), 1–21. Retrieved from [http://www.iwcoffice.org/\\_documents/sci\\_com/SC58docs/SC-58-IA16.pdf](http://www.iwcoffice.org/_documents/sci_com/SC58docs/SC-58-IA16.pdf)
- USGS. (2003). *Effects of Hydrology on Red Mangrove Recruits*.
- Van Loon, A. F., Dijkma, R., & van Mensvoort, M. E. F. (2007). Hydrological classification in mangrove areas: A case study in Can Gio, Vietnam. *Aquatic Botany*, 87(1), 80–82. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.02.001>
- Van Loon, A. F., Te Brake, B., Van Huijgevoort, M. H. J., & Dijkma, R. (2016). Hydrological classification, a practical tool for mangrove restoration. *PLoS ONE*, 11(3), 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150302>
- Wahid, S. M., Babel, M. S., & Bhuiyan, A. R. (2007). Hydrologic monitoring and analysis in the Sundarbans mangrove ecosystem, Bangladesh. *Journal of Hydrology*, 332(3–4), 381–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.07.016>
- Win, S., Towprayoon, S., & Chidthaisong, A. (2019). Adaptation of mangrove trees to different salinity areas in the Ayeyarwaddy Delta Coastal Zone, Myanmar. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 228(November 2018). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106389>
- Xiao, K., Li, H., Shananan, M., Zhang, X., Wang, X., Zhang, Y., ... Liu, H. (2019). Coastal water quality assessment and groundwater transport in a subtropical mangrove swamp in Daya Bay, China. *Science of the Total Environment*, 646, 1419–1432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.394>

## Annexe :

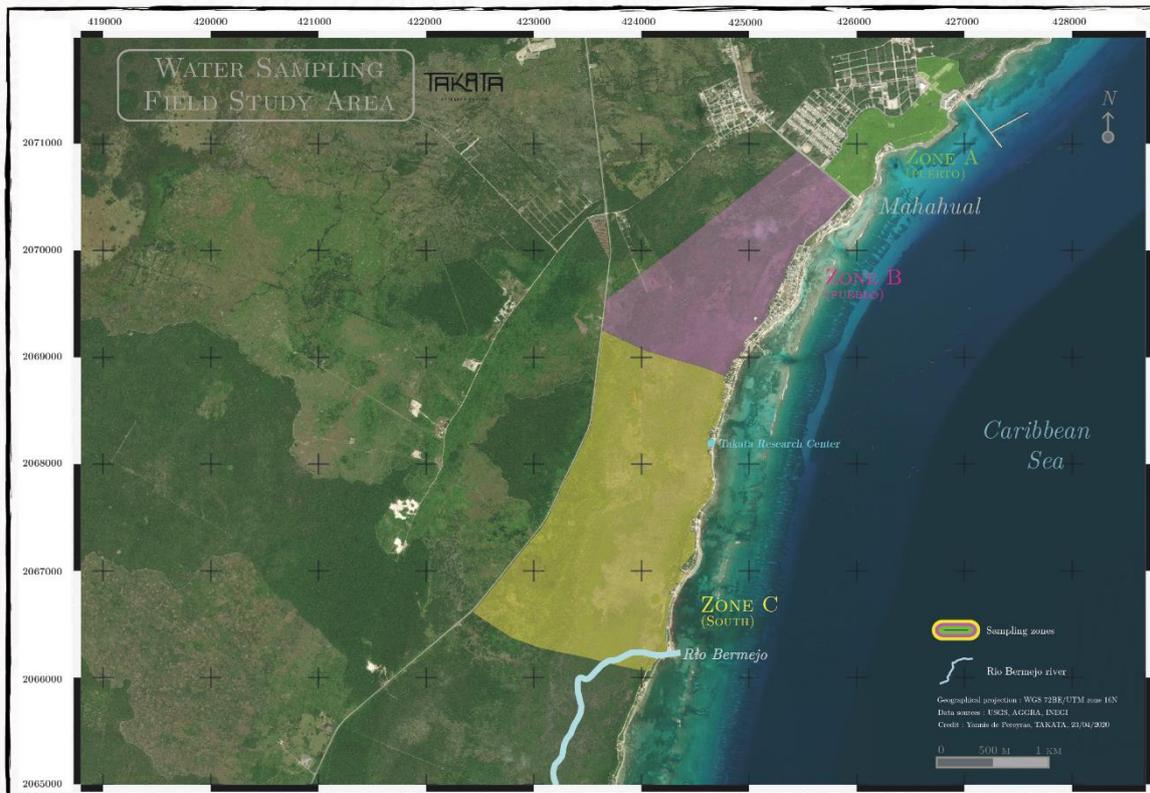


### Protocole d'échantillonnage hydrologique pour le milieu mangrove

#### Objectifs généraux de l'enquête :

Construire une méthodologie d'échantillonnage de long-terme permettant d'initier le tout premier suivi écologique des masses d'eau présentes au sein des mangroves de Mahahual. Quantifier l'impact du phénomène d'isolement hydrologique par l'analyse sur le terrain de paramètres prédéterminés. Développer les outils permettant de comprendre davantage le comportement écologique de la mangrove et son évolution probable.

#### Zone d'étude :



## Matériel nécessaire :

### *Matériel commun à tous types d'échantillonnage :*

- 1° GPS Garmin
- 2° Appareil de mesure de la salinité et de la température ;
- 3° Kit d'analyse du cycle de l'azote + pH ; 
- 4° Boite contenant 25 tubes à échantillon ;
- 5° Perche pour faciliter la collecte des échantillons d'eau ;
- 6° Appareil photo ;
- 7° Bottes, gants, machette et kit de premier secours ;
- 8° Carnet de terrain pour la prise de note ;
- 9° Eau déminéralisée ;
- 10° Tenue appropriée pour la marche en mangrove (moustiques et boues).

### *Pour la réalisation spécifique du quadrat :*

- 1° Quatre bâtons, une longue ficelle et un repère métré
- 2° Boussole

 Analyse à effectuer chez soi

## La collecte des échantillons par points :

**Étape A (préparation) :** Avant toute sortie terrain, il convient de s'assurer que l'ensemble de l'équipement soit opérationnel. Il s'agira donc de vérifier en amont :

- la propreté des tubes à échantillons ;
- la batterie restante du GPS et de l'appareil de salinité (voir si besoin de calibration) ;
- les conditions météo : ne pas organiser de sortie le jour ou la veille de fortes précipitations ;

**Étape B (début d'enquête) :** En amont de l'enquête, il sera nécessaire de planifier collectivement la zone de mangrove à enquêter. Ainsi, à partir du point de rendez-vous fixé, allumer le GPS pour faire débuter l'enregistrement automatique du tracé. Ce tracé restera actif du moment que l'appareil est maintenu allumé. L'exploration de la zone d'étude se fait en débutant par le longement des zones de lisières. Pénétrer l'écosystème dès que des «opportunités de terrain» (sentiers, cours d'eau, percées forestières, zones de moindre densité) se présentent.

**Étape C (collecte de l'échantillon d'eau) :** Quand un «point hydrologique» est rencontré, procéder à sa collecte en prenant en compte le nombre de tubes à échantillon restant. Premièrement, enregistrez la position géographique du point échantillonné sur le GPS et attribuez-y un numéro qui sera reporté sur le carnet. Afin d'éviter toute confusion, préciser qu'il s'agit ici d'un échantillon d'eau. Avant collecte, enfiler des gants pour vous prémunir de tous produits chimiques ou bactéries potentiellement en présence dans les masses d'eau. Sélectionner maintenant dans l'ordre, un échantillon et procéder à la collecte de l'eau à l'aide de la perche. Lors de la collecte, remplir entièrement le tube à échantillon et limiter au maximum la présence de matières en suspension. Replacer directement l'échantillon dans la boîte à la place attribuée. Procéder ensuite à la mesure de la salinité et de la température sur le point hydrologique et patienter jusqu'à ce que l'appareil parvienne à la stabilisation d'une valeur (1 à 2 minutes). Concernant la valeur de salinité, toujours prendre gare à l'unité dans laquelle elle s'exprime (ppt ou ppm). Pour finir, nettoyer les sondes de l'appareil après chaque usage avec un tissu et reporter directement les valeurs dans le carnet de terrain à l'emplacement du point numéroté.

### **Étape D (observation écologique) :**

Maintenant que la collecte et l'analyse centrée sur le point hydrologique sont effectuées, procéder désormais aux observations écologiques plus générales du milieu (voir les paramètres écologiques et botaniques présentés dans le guide). Ces observations doivent être réalisées pour chaque point hydrologique échantillonné, toutefois, d'autres points d'observations écologiques peuvent apparaître pertinents lorsque des zones de mangrove présentent des éléments remarquables (zone de transition, crabes, dégradation particulière, etc.). Dans ce cas, reproduire la procédure d'enregistrement d'un point GPS en spécifiant qu'il s'agit cette fois d'un point d'observation. Quoi qu'il en soit, reporter directement les observations dans votre carnet. Pour finir, réaliser quelques clichés du lieu échantillonné avant départ. En cas de doute, l'analyse postérieure des clichés permettra de répondre aux interrogations persistantes. Par ailleurs, une organisation rigoureuse est conseillée afin de relier facilement les clichés au numéro du point GPS correspondant. Reprendre à nouveau la phase d'exploration de la zone d'étude et répéter cette étape pour le prochain point de collecte ou d'observation écologique.

*Attention : le numéro du point GPS choisi et le numéro du tube à échantillon sont rarement identiques*

### **Étape E (fin d'enquête et analyse physico-chimique) :**

Une fois la sortie de terrain achevée, éteindre le GPS pour couper l'enregistrement du tracé. Placer les instruments dans une boîte hermétique et retirer les piles après usage afin de ralentir le processus de corrosion. Procéder ensuite à l'analyse physico-chimique des échantillons sous les 24h à l'aide du kit d'analyse fournie. Effectuer les manipulations en respectant les consignes indiquées et en étant toujours équipé de gants. Entre chaque analyse chimique, il est important que le tube à essai soit systématiquement nettoyé à l'eau déminéralisée puis entièrement vidé et rincé. Effectuer un entretien identique pour les tubes à échantillons à la fin de leurs utilisations.

### **Collecte et analyse par quadrat :**

Afin de réaliser un échantillonnage par quadrat, une longue ficelle, cinq bâtons, une boussole et un repère métré vous seront nécessaires. Une fois l'identification d'un lieu propice à cette forme d'enquête, enregistrer au centre de l'aire voulue, le point GPS qui constituera le point central de votre quadrat. Planter un premier bâton au lieu de l'enregistrement du point GPS afin de marquer le point central. Prenez et placez les quatre derniers bâtons à 7 mètres du point central en orientant chacun d'entre eux en direction des quatre points cardinaux (N, S, E, W). Le suivi de ces points cardinaux nous permettra de garantir la forme de l'aire d'échantillonnage voulue (carré). Délimiter votre aire d'échantillonnage à l'aide de la ficelle ou de tout objet similaire. Une fois le quadrat construit, analyser une seule fois tous les points hydrologiques observés en réalisant l'échantillonnage comme explicité dans l'**étape C**. Opérer ensuite les observations écologiques supplémentaires suivantes : l'abondance des points hydrologiques, la variété d'espèces et celle dominante. Afin d'identifier l'espèce dominante, il suffira de décompter le nombre de paléuviers de chaque espèce puis de les exprimer en pourcentage. Terminer cet échantillonnage quadrat en répétant l'**étape E**. L'inscription des données obtenues par cette forme d'échantillon doit faire l'objet d'un traitement spécifique. Traitement que vous pourrez retrouver dans le fichier Excel attaché, à la feuille «Data\_quadrat».

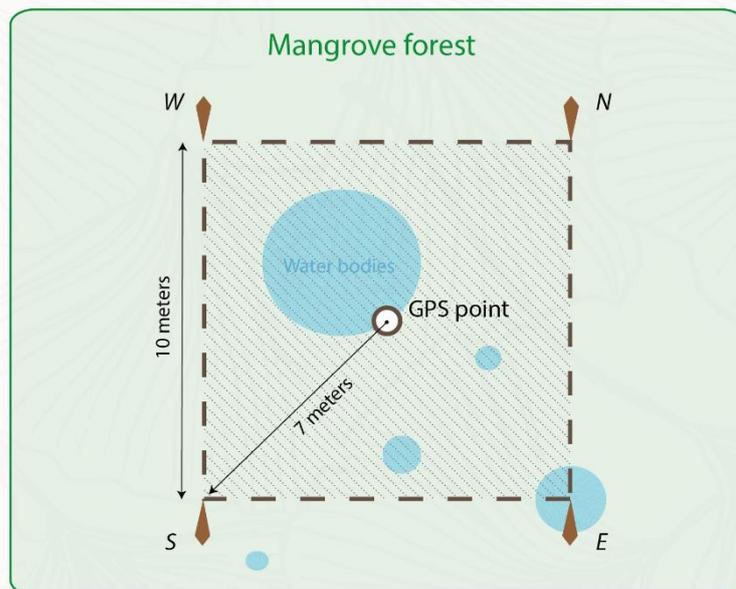


Figure 1 : Schéma descriptif de la construction d'un quadrat type

#### **Gestion des données obtenues :**

Inscrire l'ensemble des données de qualité de l'eau et des observations écologiques dans le fichier Excel de gestion des données «water\_analysis.xlsx» qui sera transmis au nouveau titulaire du projet. Une partie consacrée aux aides et instructions viendra faciliter la prise en main de ce fichier.

**Guide d'identification des palétuviers de Mahahual**

***Rizophora Mangle* (mangrove rouge) :**



***Laguncularia Racemosa* (mangrove blanche) :**



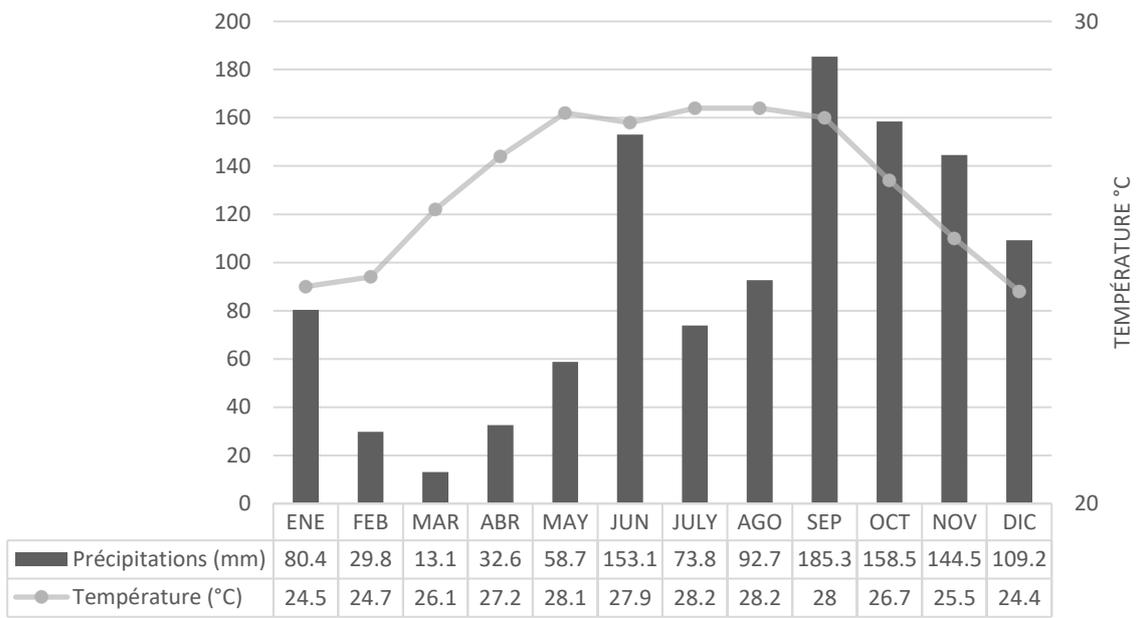
***Conocarpus Erectus* (mangrove grise) :**



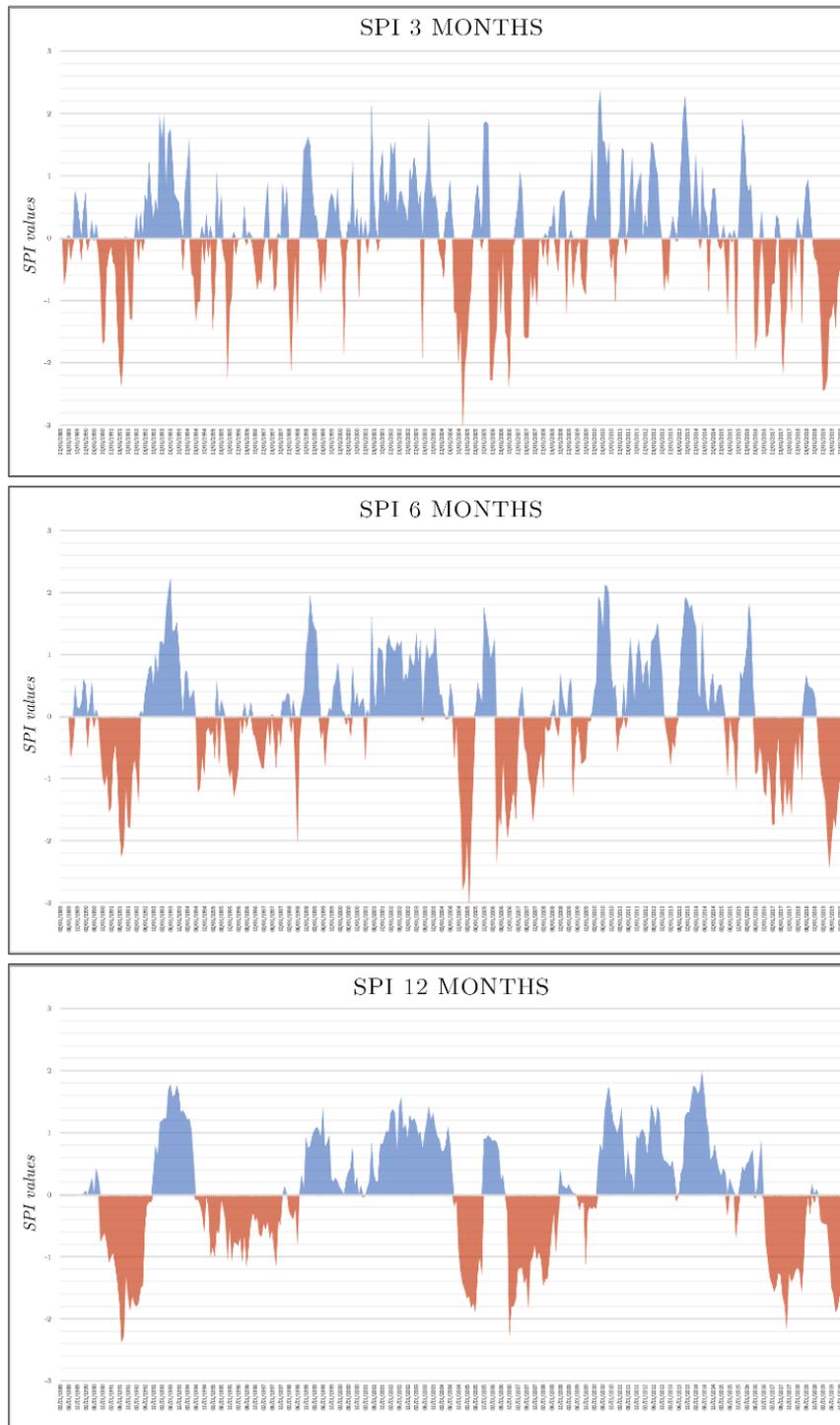
***Avicennia Germinans* (mangrove noire) :**



Climatogramme (1951-2010), Xcalak, Quintana Roo



## Standard Precipitation Index (SPI) of Quintana Roo (Mexico) from mensual rainfalls (1989-2019)



Data source : mensual rainfall SMN CONAGUA (Quintana Roo) - SPI data made with SPI Generator software.  
Credit : Yannis de Pereyas