



Conservatoire
du littoral

Evaluation de l'état de santé des mangroves de Martinique

Phase 3 : Mise en œuvre des descripteurs et cartographie de l'état de santé des mangroves



Rapport Final mis à jour 2021

Novembre 2021

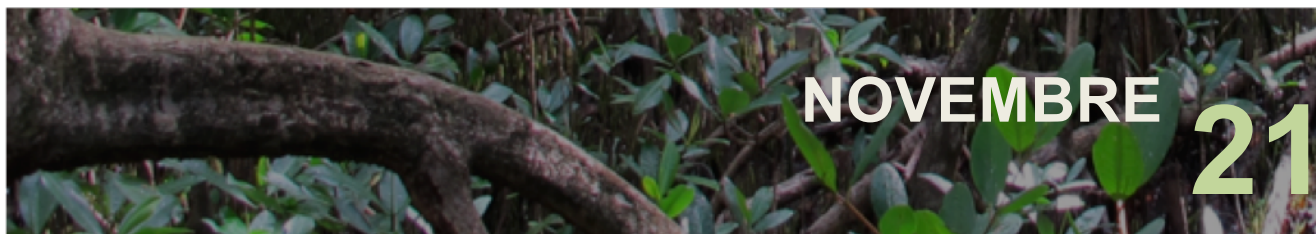
Référence dossier IM : 1702_07



BirdWatching
Martinique



partenaires scientifiques



Étude pour le compte de :



**Conservatoire
du littoral**

Conservatoire du littoral – Délégation Outre-mer

Cité Guillard, 97100 Basse Terre

Tél : 05 90 81 59 52

Contact : Marie-Aurore Adrover

ma.adrover@conservatoire-du-littoral.fr

Rapport à citer sous la forme :

Impact Mer, Géodesis, BirdWatching Martinique, Université des Antilles, MIO, LEMAR, ECOLAB 2021. Evaluation de l'état de santé des mangroves de Martinique - Phase 3 : Mise en œuvre des descripteurs et cartographie de l'état de santé des mangroves. Rapport pour : Conservatoire du littoral, 69 pp (hors annexes).

Rédaction :

Jonathan MIGEOT

Olivier GAQUIERE

Cartographie :

Jonathan MIGEOT

Camille NGUYEN THI

Contrôle qualité :

Guillaume TOLLU

Coordination générale :

Christophe YVON

Terrain :

Jonathan MIGEOT

Camille NGUYEN THI

Paul-Alexis CUZANGE

Remerciements :

Camille NGUYEN THI, stagiaire de l'école d'ingénieur Montpellier SupAgro en 2019



20 rue Karukera

97200 Fort-de-France

Tel : 05 96 63 31 35

Siret : 534 347 836 00023

cyvon@impact-mer.fr

Contrôle qualité

1702_07 – Evaluation de l'état de santé des mangroves de Martinique						
Phase 3 : Mise en œuvre des descripteurs et cartographie de l'état de santé des mangroves						
V2	Rapport final de Phase 3 – Mise à jour 2021	Jonathan MIGEOT	Paul-Alexis CUZANGE	16/11/2021	Marie-Aurore ADROVER Conservatoire du littoral	17/11/2021
Version	Description	Rédaction	Vérifié	Date	Destinataires	Date d'envoi

Sommaire

<i>PRÉAMBULE</i>	6
<i>A. INTRODUCTION</i>	7
1 Objectifs généraux et spécifiques de l'étude	7
2 Rappel des conclusions de la phase 2	7
3 Objectifs de la phase 3	8
<i>B. MÉTHODOLOGIE</i>	9
1 Acquisition des données	9
1.1 Sélection des sites de mangrove	9
1.2 Acquisition des données issues de la bibliographie et de la cartographie (Ind_Cont et I_PresBC)	10
1.3 Acquisition des données issues du travail de terrain (Ind_Comp et I_PresT)	11
2 Télédétection (Géodesis)	14
2.1 Vers une généralisation des traitements mis au point en phase 2	14
2.1.1 Objectifs de la phase 3	14
2.1.2 Outils et langages	14
2.2 Description de la méthodologie	14
2.2.1 Sélection des images satellitaires et téléchargement	15
2.2.2 Prétraitements sur les images	15
2.2.3 Note sur la réalisation d'une image composite multi-dates	15
2.2.4 Calcul des indices de végétation et des descripteurs biophysiques	15
2.2.5 Calcul de statistiques	15
2.2.6 Génération des couches SIG et du projet QGIS	16
3 Méthode de calcul de l'indicateur	17
3.1 Proposition finale : l'indicateur de pression Ind_Pres	17
3.2 Calcul de l'indice de pression calculé à partir de la bibliographie et du SIG I_PresBC	18
3.2.1 Indice Bassin versant (I_BvBC)	18
3.2.2 Indice Arrière mangrove (I_AmBC)	18
3.2.3 Indice Milieu marin adjacent (I_MmaBC)	19
3.2.4 Calcul de l'indice composite de pression calculé à partir de la bibliographie et du SIG (I_PresBC)	20
3.3 Calcul de l'indice de pression calculé à partir des expertises de terrain I_PresT	22
3.3.1 Contenu de l'analyse de terrain	22
3.3.2 Indice Arrière mangrove calculé à partir des expertises de terrain (I_AmT)	22
3.3.3 Indice Présence de sargasses en excès basé sur l'expertise de terrain (I_SargT)	23
3.3.4 Calcul de l'indice composite de pression calculé à partir des expertises de terrain (I_PresT)	23
3.4 Calcul de l'indicateur de pression Ind_Pres	24
<i>C. RÉSULTATS</i>	25
1 Valeur de l'indicateur de pression (Ind_Pres) pour les 62 sites d'étude	25
2 Analyse et cartographie des résultats par grands ensembles géographiques	27
2.1 Ensemble de la Martinique	27
2.2 Ensemble Atlantique nord	29
2.2.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres	29
2.2.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Atlantique nord	31

2.3 Ensemble Atlantique	32
2.3.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres	32
2.3.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Atlantique	35
2.4 Ensemble Sud Caraïbes	36
2.4.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres	36
2.4.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Sud Caraïbes	39
2.5 Ensemble Baie de Fort-de-France	39
2.5.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres	39
2.5.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Baie de Fort-de-France	43
D. DISCUSSION	45
1 Bilan de l'état de santé des mangroves de Martinique	45
1.1 L'omniprésence des macrodéchets	45
1.2 La problématique des sargasses	48
1.3 Les pollutions liquides	51
1.4 Des mangroves aux nombreux usages	53
1.4.1 La pêche aux crabes	53
1.4.2 La chasse	54
1.4.3 L'apiculture	55
1.4.4 L'élevage	56
1.4.5 Les pontons et abris pour bateaux	57
1.5 Des continuités écologiques rompues	58
1.6 Une note d'espoir ?	61
2 Améliorations de la méthodologie, limites et perspectives	62
2.1 L'indicateur de pression Ind_Pres	62
2.1.1 Composante 1 : l'indice de pression basé sur l'analyse bibliographique et cartographique I_PresBC	62
2.1.2 Composante 2 : l'indice de pression basé sur l'expertise de terrain I_PresT	63
2.1.3 Vers l'obtention d'un indicateur d'état ?	63
2.2 Limites de l'indicateur	64
2.3 Télédétection	64
2.4 Perspectives : application sur les autres territoires d'Outre-mer	67
E. CONCLUSION GÉNÉRALE	68
ANNEXES	70
Annexe 1 Feuilles de relevé terrain	71
Annexe 2 Proposition initiale : l'indicateur de contexte Ind_Cont et l'indicateur par composante Ind_Comp	73
Annexe 3 Tableau récapitulatif des valeurs de référence et des seuils d'écart (LCC et LAI)	82
Annexe 4 Dépendances Python et plugins QGIS	84
Annexe 5 Chaîne de traitement Sentinel 2 : Manuel utilisateur	85

Liste des figures

Figure 1. Schéma de synthèse de l'indicateur composite de « l'état de santé » des mangroves.....	7
Figure 2. Répartition des mangroves sélectionnées pour la phase 3 et leur répartition en entités géographiques.....	10
Figure 3. Exemple de la délimitation d'un bassin versant et de sa décomposition en trois catégories : milieu naturel en vert, milieu artificialisé en rouge et milieu agricole en bleu ; ici la mangrove (en jaune) de la Baie des Mulets sur la commune du Vauclin.....	11
Figure 4. Comptage des trous de crabe dans des placettes sur sol nu et sous couvert de Palétuviers rouges (en haut) ; carotte de sédiment et écotone de mangrove (en bas).....	12
Figure 5. <i>Workflow</i> des traitements mis en œuvre ; dans le cas où il y a plusieurs images à traiter, le téléchargement est réalisé parallèlement aux traitements	16
Figure 6. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de Martinique ; fond de carte IGN Scan25.....	28
Figure 7. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de l'Atlantique nord (Le Robert et La Trinité) ;.....	30
Figure 8. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de l'Atlantique (le François, le Vauclin, le Marin, et Sainte-Anne) ; * site expérimental de phase 2.....	33
Figure 9. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves du Sud Caraïbes (Sainte-Anne, Le Marin, Rivière-Pilote, Sainte-Luce et Le Diamant) ; * site expérimental de phase 2	37
Figure 10. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de la Baie de Fort-de-France (Trois-Ilets, Rivière-Salée, Ducos et Le Lamentin)	40
Figure 11. Illustration de la quantité et variété innombrable de macrodéchets présents dans la mangrove de Martinique ; déchets déposés à partir de l'arrière mangrove.....	46
Figure 12. Illustration de la quantité et variété innombrable de macrodéchets flottants présents dans la mangrove de Martinique ; déchets arrivés dans la mangrove par la mer et parfois lors des crues des ravinées	47
Figure 13. Dépôt de grandes quantités de sargasses (et de déchets) dans la mangrove après défrichement de l'arrière mangrove, mangrove de la Marina du Robert	48
Figure 14. Accumulations de sargasses en décomposition entraînant de la mortalité chez les palétuviers, l'impact est plus ou moins important selon les sites : Massy Massy en haut à gauche, Dostaly en haut à droite et anse Trabaud en bas.....	48
Figure 15. Présence des sargasses dans les mangroves de Martinique et zones où l'accumulation a entraîné de la mortalité de palétuviers.....	49
Figure 16. Accumulation de sargasses sur la frange littorale peut entrainer de la mortalité chez les palétuviers situés en arrière ; ici la Baie de Sans Souci	50
Figure 17. Crabes Violonistes (Cémafot) à gauche et limicoles à droite se nourrissant sur les sargasses en décomposition.....	50
Figure 18. Exemple d'apport de pollutions liquides : labour et projection de billes d'engrais en limite de mangrove en haut à gauche et différents types d'eaux usées rejetés en mangrove.....	52
Figure 19. Les trois principales espèces de crabes pêchées dans les mangroves de Martinique et leurs techniques de pêche : Crabe de terre pêché avec des ratières, Mantou pêché à la main et Cirique pêché au casier appâté ou à l'épuisette	53
Figure 20. Exemples de défrichements et aménagements des zones de chasse dans la mangrove de Martinique	54
Figure 21. Différents types de poste de chasse et un égrainoir (en haut à droite)	55
Figure 22. De très nombreux ruchers de différentes tailles et plus ou moins entretenus sont présents en arrière mangrove, en particulier dans la Baie de Génipa ; les ruchers sont parfois installés sur des remblais de déchets (en bas à gauche) ; un tronc de Palétuvier noir découpé à la tronçonneuse pour récupérer un essaim d'abeilles installé dans le tronc creux (en bas à droite).....	56
Figure 23. Mangroves pâturées par des bovins, Massy Massy au Vauclin à gauche et la Baie du Simon au François à droite	56
Figure 24. Élevages de porcs dans la mangrove ; canal Cocotte, Ducos, à gauche et Trou Terre, Le Robert, à droite.....	57
Figure 25. Pontons privés très nombreux sur les communes du Robert, du François et du Vauclin ; la mangrove a été défrichée pour accéder à la mer	57

Figure 26. Amarrage des bateaux directement dans la mangrove dans les trous à cyclone, ici la Baie de Saintpée au Robert à gauche, et abandon d'un voilier attaché à la mangrove dans la Baie de Pointe Caillou sur la commune de Sainte-Anne	58
Figure 27. Ponton flottant du Village de la Poterie aux Trois Ilets	58
Figure 28. Deux mangroves de la côte Atlantique dans un contexte urbain : Trou Terre au Robert à gauche et Rivière Desroses au François à droite.....	59
Figure 29. Les grandes cultures situées en limite de mangroves (absence de boisement terrestre) participent à l'isolement écologique des mangroves : bananeraies, canne à sucre et vastes pâturages	59
Figure 30. Deux exemples de continuité écologique entre la mangrove et le milieu forestier terrestre : Baie du Trésor à Trinité en haut et Cul-de-Sac Ferré au Marin en bas	60
Figure 31. Contexte de la mangrove de Trou Manuel au Marin	60
Figure 32. Principaux responsables de l'isolement écologique des mangroves de la Baie de Fort-de-France : les grandes cultures et les zones industrielles implantées en limite voir carrément dans la mangrove	61
Figure 33. Représentation cartographique des teneurs en chlorophylle des feuilles (LCC en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) de palétuvier par classe issue du traitement automatisé d'images satellite Sentinel 2 (valeurs références en vert) ; ici la mangrove de la Baie de Génipa	65
Figure 34. Représentation cartographique des teneurs en chlorophylle des feuilles (LCC en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) de palétuvier par classes issue du traitement automatisé d'images satellite Sentinel 2 (valeurs références en vert) ; ici la mangrove de Belfond sur la commune de Sainte-Anne.....	65
Figure 35. Représentation cartographique des teneurs en chlorophylle des feuilles (LCC en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) de palétuvier issue du traitement automatisé d'images satellite Sentinel 2 ; ici la mangrove de la baie de Génipa	66

Liste des tableaux

Tableau 1. Dénomination des sites d'étude et date des expertises de terrain	13
Tableau 2. Exemple du calcul de l'indice de pression I_PresBC basé sur l'étude bibliographique et cartographique, ici le site de la Cohé du Lamentin.....	21
Tableau 3. Exemple du calcul de l'indice de pression basé sur les expertises de terrain I_PresT, ici le site de la Cohé du Lamentin	24
Tableau 4. Valeurs des indices des descripteurs et de l'indicateur composite du niveau des pressions qui s'exercent sur les mangroves de Martinique Ind_Pres pour les 62 sites ; l'échelle de couleur correspond aux niveaux de pressions ; niveau de pression très élevé Ind_Pres=5 ; élevé=4 ; moyen=3 ; faible=2 ; très faible=1	26
Tableau 5. Répartition des sites de mangrove (%) de Martinique en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite	29
Tableau 6. Répartition des sites de mangrove (%) les plus au nord de la façade Atlantique nord (communes de Trinité et du Robert) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite	32
Tableau 7. Répartition des sites de mangrove (%) les plus au nord de la façade Atlantique (communes du François, du Vauclin, du Marin et de Sainte-Anne) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite	35
Tableau 8. Répartition des sites de mangrove (%) du Sud Caraïbes (communes de Sainte-Anne, du Marin, de Rivière-Pilote, de Sainte-Luce et du Diamant) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite.....	39
Tableau 9. Répartition des sites de mangrove (%) du Sud Caraïbes (communes des Trois-Ilets, de Rivière-Salée, de Ducos et du Lamentin) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite	43
Tableau 10. Exemple du calcul de l'indicateur de contexte Ind_Cont pour le site de la Cohé du Lamentin.....	77
Tableau 11. Exemple de calcul de l'indicateur par composante Ind_Comp pour le site de la Cohé du Lamentin	81

Préambule

Le Conservatoire du littoral, l'Office de l'eau de Martinique, l'Office Français de la Biodiversité, la DEAL Martinique et le Pôle Relais Zones Humides Tropicales cherchent à mettre au point une méthode d'évaluation de l'état de santé des mangroves de Martinique.

Ils ont confié cette étude à un groupement mandaté par Impact Mer et réunissant les équipes d'Impact Mer, de Géodesis, de BirdWatching Martinique ainsi que des experts associés de l'Université des Antilles, du *Mediterranean Institute of Oceanography* (MIO), d'Ecolab et du Laboratoire d'Environnement Marin (LEMAR).

Le déroulement général de l'étude était prévu en 3 phases :

- Phase 1 : Définition d'un protocole de test de descripteurs de l'état de santé des mangroves
- Phase 2 : Test du protocole sur des sites pilotes
- Phase 3 : Généralisation de la méthode à l'échelle des mangroves de la Martinique.

Ce rapport constitue la finalisation de la troisième et dernière phase de l'étude d'évaluation de l'état de santé des mangroves de Martinique.

Une première version du rapport de phase 3 a été livrée en mai 2020.

Le présent rapport est une nouvelle version modifiée selon le souhait de l'OFB qui a souhaité réorienter l'indicateur de l'état de santé des mangroves uniquement sur le paramètre « pressions ».

A. Introduction

1 Objectifs généraux et spécifiques de l'étude

L'étude d'évaluation de l'état de santé des mangroves de Martinique vise à :

- développer une méthode concrète et facilement reproductible permettant d'évaluer l'état de santé des zones de mangroves ;
- évaluer l'état de santé de l'ensemble des mangroves de la Martinique.

Plus spécifiquement l'étude est divisée en trois phases :

- **Phase 1** : définitions et liste de descripteurs (*effectué, rapport phase 1*)
 - poser le cadre théorique définissant un écosystème de mangrove en « bonne santé »,
 - lister les descripteurs de l'écosystème pouvant permettre de caractériser cet état et de le distinguer d'un état de « mauvaise santé »,
 - sélectionner des sites pilotes ;
- **Phase 2** : tests des descripteurs et définition de la méthode d'évaluation d'état (*effectué, rapport phase 2*)
 - mesurer dans les sites pilotes les paramètres et descripteurs permettant d'évaluer l'état de santé des mangroves,
 - sélectionner les paramètres les plus pertinents,
 - définir des valeurs de référence,
 - mettre au point un indicateur composite de l'état de santé des mangroves ;
- **Phase 3** : Généraliser la méthode d'évaluation de l'état et le protocole terrain sur l'ensemble des mangroves de la Martinique (*effectué, présent rapport*).

2 Rappel des conclusions de la phase 2

Un important effort d'inventaire a été réalisé au cours de la phase 2 afin de tester un maximum de paramètres du « contexte » (artificialisation du bassin versant, activités industrielles...) mais aussi des différentes composantes de la mangrove (végétation, faune terrestre, avifaune, faune du sol...).

Un vaste jeu de données a ainsi été rassemblé. Leur analyse a permis de sélectionner une dizaine de paramètres pour la création d'un indicateur composite sur l'« état de santé » des mangroves.

Un indicateur à deux facettes a alors été proposé : un indicateur composite du contexte qui entoure le site de mangrove étudié (Ind_Cont) basé sur les niveaux de pression et un indicateur composite par composante de la mangrove (Ind_Comp) basé sur l'état écologique de la mangrove étudiée.

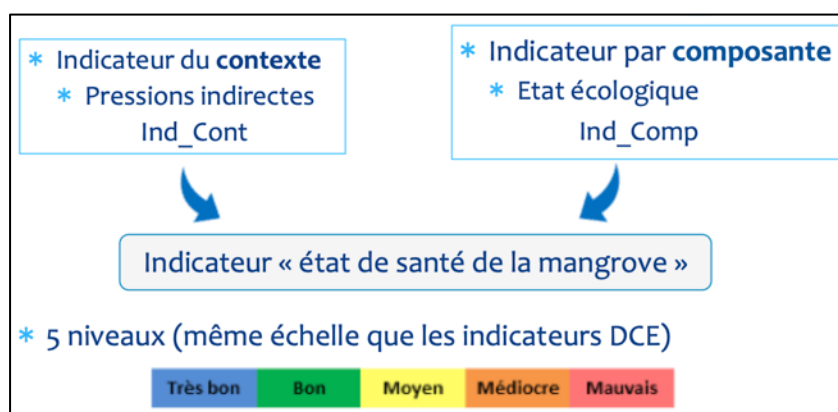


Figure 1. Schéma de synthèse de l'indicateur composite de « l'état de santé » des mangroves

Plusieurs méthodes de calcul de ces indicateurs ont été proposées, en particulier pour l'indicateur par composante. Le comité de pilotage qui s'est réuni le 04 avril 2019 a validé la méthode dite alternative proposée par Impact Mer incluant l'indicateur de pression, apprécié par SIG et bibliographie, et un indicateur d'état, apprécié sur le terrain et par télédétection.

À la suite du Copil final programmé en septembre 2020, l'OFB a missionné Impact Mer pour une ultime modification des indicateurs et dont l'objectif était de se concentrer sur un indicateur unique basé sur les pressions Ind_Pres.

3 Objectifs de la phase 3

L'objectif principal de la phase 3 est de mettre en œuvre l'indicateur composite mis au point lors de la phase de test (phase 2) sur l'ensemble des mangroves de Martinique afin d'obtenir une cartographie de leur état de santé.

Les objectifs spécifiques de la troisième phase sont de

- sélectionner une cinquantaine de sites de mangrove représentatifs des mangroves de Martinique
- y appliquer la méthode mise au point en phase 2 pour calculer l'indicateur de contexte (Ind_Cont) et l'indicateur par composante (Ind_Comp) traduisant « l'état de santé » des mangroves
- améliorer le protocole proposé en fin de phase 2 grâce à la mise en œuvre sur un maximum de site pour fournir un indicateur opérationnel (Ind_Pres)
- réaliser une cartographie générale de « l'état de santé » des mangroves de Martinique.

Les indicateurs mis au point au cours de la première version du rapport de phase 3 (Ind_Cont et Ind_Comp) sont présentés à titre indicatif pour illustrer le cheminement vers l'obtention de l'indicateur unique basé sur les pressions (Ind_Pres) et retenu par le CoPil.

B. Méthodologie

1 Acquisition des données

L'acquisition des données nécessaires au calcul des indicateurs mis au point en phase 2 (Ind_Cont et Ind_Comp) a été réalisée à partir de trois techniques complémentaires :

- bibliographie et analyses SIG (Ind_Cont)
- traitement d'images satellites (Ind_Comp)
- travail de terrain (Ind_Cont et Ind_Comp).

Suite à la dernière mise à jour de l'étude avec la mise au point de l'indicateur de pression Ind_Pres issu de la fusion de certains éléments des deux indicateurs précédemment cités (cf. 3.1), l'acquisition des données nécessaires au calcul de l'indicateur Ind_Pres a été réalisée à partir de :

- l'analyse de la bibliographie et du SIG (I_PresBC)
- le travail de terrain (I_PresT).

1.1 Sélection des sites de mangrove

L'inventaire des zones humides de la Martinique (Impact Mer, 2015) a recensé plus de 450 massifs de mangrove. Il s'agit en réalité de 450 polygones SIG de mangrove. Une analyse de ces derniers nous a permis de faire ressortir l'ensemble des sites de mangroves de Martinique.

Aussi, de la même manière que la DCE sur les milieux marins qui s'appuie sur un réseau de sites représentatifs des masses d'eau de Martinique afin d'évaluer leur qualité, nous avons développé la méthodologie et les protocoles retenus en phase 2 via une approche typologique sur les massifs de mangrove qui sont représentatifs de la diversité des situations en Martinique.

La sélection des sites représentatifs a été réalisée en fonction

- du type de mangrove
 - secteur géographique
 - géomorphologie de la mangrove
 - situation hydrologique de la mangrove
 - facies de végétation
 - ampleur des impacts du cyclone Dean (Cirad *et al.* 2010)
- de la vulnérabilité et des pressions
 - utilisation des données d'évolution de l'occupation des sols dans une zone tampon (Impact Mer, 2009)
 - utilisation des données de pressions par bassin versant relevées par l'ODE Martinique : Etat des connaissances et des pressions du district hydrographique de la Martinique
 - disponibilité d'espace en arrière mangrove (possibilité de migration de l'écosystème face à l'élévation du niveau de la mer)
- de l'accessibilité des sites.

Si la délimitation des mangroves de type colluvionnaire est facilement réalisable à partir des travaux antérieurs, une analyse basée sur l'uniformité écologique et géographique a été réalisée afin de délimiter au plus juste des entités de mangroves dans la baie de Fort-de-France.

Sur la base des critères précédemment décrits, une sélection de 68 sites de mangrove a été proposée au comité de pilotage (57 prioritaires et 11 optionnels). Ces sites ont été regroupés selon des sous ensembles géographiques (Figure 2).

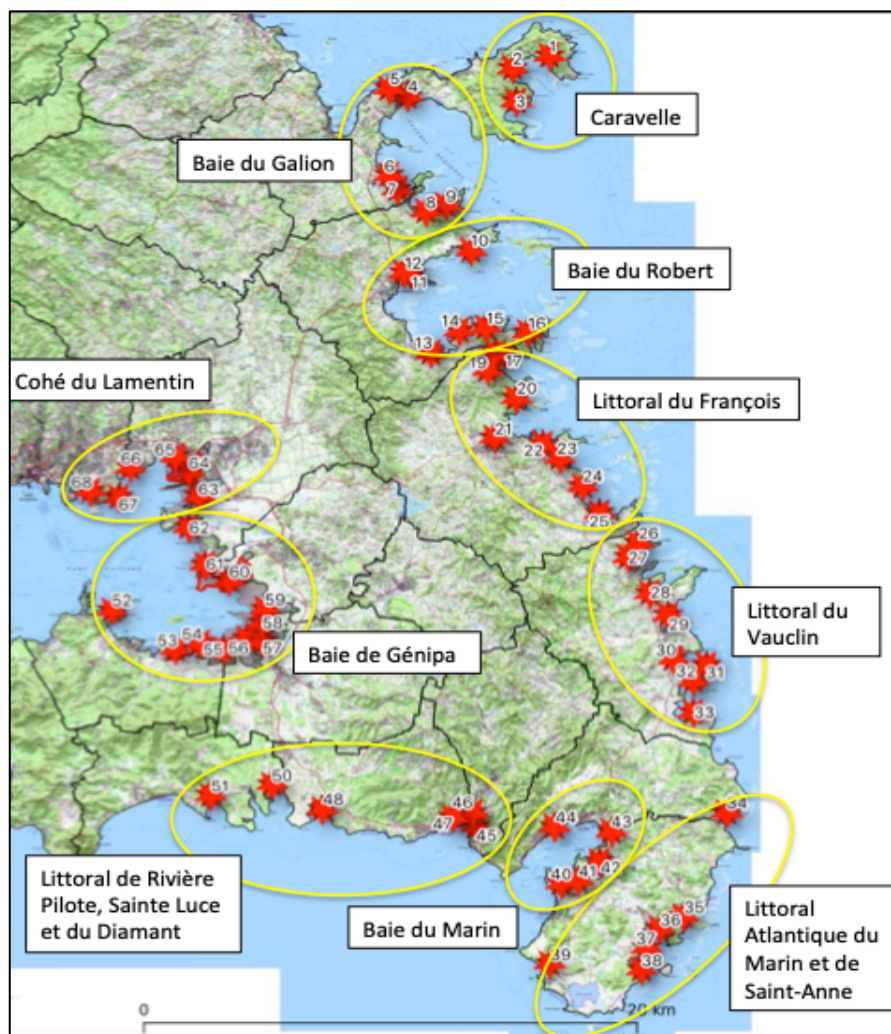


Figure 2. Répartition des mangroves sélectionnées pour la phase 3 et leur répartition en entités géographiques

Au final **59 sites** de mangrove ont fait l'objet d'une expertise de terrain pour le calcul de l'indicateur par composante (Ind_Comp) ce qui représente 1 878 ha **soit 85 % de la surface des mangroves de Martinique**. Le calcul de l'indicateur de contexte (Ind_Cont) a été réalisé pour **3 sites supplémentaires (62 sites au total)** ce qui représente **87 % de la surface des mangroves de Martinique**.

Le calcul de l'indicateur de pression Ind_Pres issue de la fusion de certains éléments des deux précédents indicateurs a été réalisé pour **62 sites** concernant la portion de l'indicateur basé sur la bibliographie et le SIG (I_PresBC) et **59 sites** pour sa version complète comprenant l'indice I_PresBC et l'indice terrain I_PresT. **Ind_Pres a donc été calculé dans sa version complète pour 1 878 ha soit 85 % de la surface des mangroves de Martinique.**

1.2 Acquisition des données issues de la bibliographie et de la cartographie (Ind_Cont et I_PresBC)

L'indicateur de contexte mis au point en phase 2 nécessite un important travail de SIG à l'échelle des bassins versants. Ainsi tous les bassins versants des 62 mangroves étudiées ont été délimités et divisés en trois catégories (milieu naturel, agricole et artificialisé) afin de mesurer la surface de chacune d'elles (Figure 3).

Les bassins versants ont été délimités et analysés à partir des données SIG suivantes :

- MNT Litto3D
- Ortho 2010 et 2017
- Scan 25
- BD_CARTHAGE

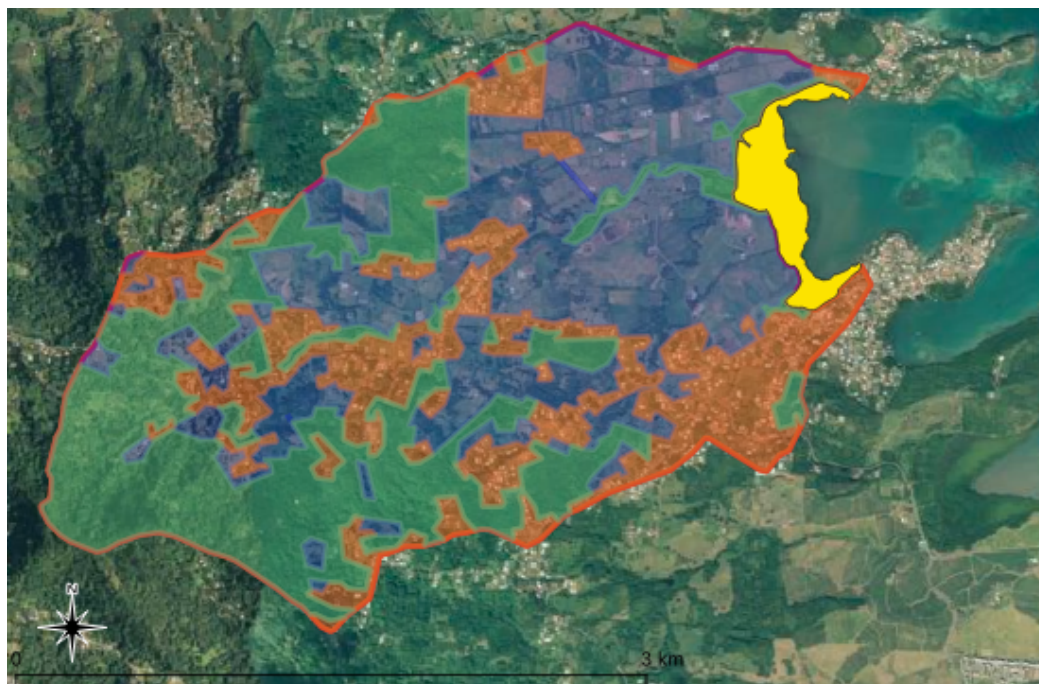


Figure 3. Exemple de la délimitation d'un bassin versant et de sa décomposition en trois catégories : milieu naturel en vert, milieu artificialisé en rouge et milieu agricole en bleu ; ici la mangrove (en jaune) de la Baie des Mulets sur la commune du Vauclin

Le calcul de l'indicateur de contexte et de l'indice I_{PresBC} nécessite également des notations en fonction de divers types de pressions (agriculture industrielle, rejets STEU, industrie...) pour le bassin versant, l'arrière mangrove, la frange littorale et le milieu marin adjacent (cf. Phase 2). Ces notations ont été réalisées à partir de l'analyse SIG du Scan 25 IGN et de l'orthophotographie 2017. Pour une meilleure précision, ces notations **ont été affinées par des observations de terrain réalisées lors des expertises pour la mesure de l'indicateur par composante, lorsque cela était possible, en particulier pour l'arrière mangrove et la frange littorale.**

La présence de rejets d'assainissement a été appréciée grâce aux données SIG disponibles sur le site de l'Observatoire de l'Eau de Martinique (<http://www.observatoire-eau-martinique.fr/>) qui localise les différents types d'assainissements collectifs. L'assainissement non collectif n'est pas pris en compte en raison de l'absence de données.

Les données d'accrétion ou de régression des massifs de mangrove sont issues de l'étude « Evolution spatiale des mangroves de Martinique depuis 1951 » réalisé par Impact Mer pour la DEAL en 2011.

1.3 Acquisition des données issues du travail de terrain (Ind_Comp et I_{PresT})

L'expertise de terrain a constitué un travail d'ampleur avec pas moins de **59 sites de mangrove** prospectés (soit 85% de la surface des mangroves de Martinique) afin d'analyser leur état et relever plusieurs paramètres permettant de calculer les indicateurs de santé mis au point en phase 2.

Les inventaires de terrain ont débuté le 02 mai 2019 pour s'achever le 16 décembre 2019 (Tableau 1). Ainsi, **30 jours de terrain** dont un jour en bateau (afin d'analyser et photographier l'ensemble de la frange littorale de la Baie de Fort-de-France) ont été nécessaires pour couvrir les 59 sites.

Les expertises de terrain ont débuté par les mangroves de la partie nord est de la Martinique (Presqu'île de la Caravelle), puis ont concerné la façade Atlantique, le sud Caraïbes et enfin la Baie de Fort-de-France.

MÉTHODOLOGIE

Sur le terrain, deux personnes ont été mobilisées de mai à juillet (un expert Impact Mer et une stagiaire ingénieure). De juillet à décembre l'expert Impact Mer était seul sur le terrain à l'exception de la sortie en bateau où deux experts Impact Mer étaient présents.

Sur chaque site **l'arrière mangrove a été parcourue à pied** dans la mesure du possible. De nombreux paramètres permettant de calculer les indicateurs ont été relevés. Ces paramètres ont été notés sur une fiche de terrain (Annexe 1).

Ainsi chaque site prospecté a été décrit et une trace du parcours a été enregistrée par un GPS. Des points GPS ont également été relevés pour localiser les observations intéressantes.

Un protocole particulier a été appliqué pour la mesure de la densité de trous de crabes. Deux placettes de 2m x 2m ont été positionnées sur chaque site approprié pour les mangroves colluvionnaires :

- une sur sol nu à proximité de la bordure de tanne - Palétuvier rouge,
- une sous les palétuviers rouges à une dizaine de mètres à l'intérieur.

Les parcelles ont été géolocalisées, photographiées et plusieurs mesures ont été réalisées :

- comptage du nombre de gros trous ($D \geq 3\text{cm}$),
- comptage des petits trous ($D < 3\text{cm}$),
- carottage du sédiment,
- mesure de la salinité de l'eau de surface.

L'ensemble des paramètres a été rassemblé sur une feuille terrain spécifique (Annexe 1).



Figure 4. Comptage des trous de crabe dans des placettes sur sol nu et sous couvert de Palétuviers rouges (en haut) ; carotte de sédiment et écotone de mangrove (en bas)

Tableau 1. Dénomination des sites d'étude et date des expertises de terrain

Num Site	Lieu	Sous-Ensemble	Ensemble	Date terrain
1	Baie du Trésor*	Caravelle	Atlantique Nord	02/05/19
2	Baie du Trésor Ouest	Caravelle	Atlantique Nord	02/05/19
3	Pointe Ferrée	Caravelle	Atlantique Nord	02/05/19
4	Anse Belune	Baie du Galion	Atlantique Nord	06/05/19
5	Fonds Cérémaux	Baie du Galion	Atlantique Nord	06/05/19
6	Baie du Galion	Baie du Galion	Atlantique Nord	06/05/19
7	Baie du Galion pointe Jean-claude	Baie du Galion	Atlantique Nord	14/05/19
8	Baie du petit Galion Sud	Baie du Galion	Atlantique Nord	14/05/19
9	Baie du petit Galion SudEst	Baie du Galion	Atlantique Nord	14/05/19
10	Baie du petit Galion Est	Baie du Galion	Atlantique Nord	14/05/19
11	Pointe Melon	Baie du Robert	Atlantique Nord	16/05/19
12	Trou terre	Baie du Robert	Atlantique Nord	16/05/19
13	Marina du Robert	Baie du Robert	Atlantique Nord	20/05/19
14	Pointe Royale	Baie du Robert	Atlantique Nord	20/05/19
16	Baie de Saintpée	Baie du Robert	Atlantique Nord	20/05/19
18	Mansarde Rancée Nord	Littoral du Francois	Atlantique	23/05/19
19	Mansarde Rancée Sud	Littoral du Francois	Atlantique	23/05/19
20	Baie Thalemont	Littoral du Francois	Atlantique	23/05/19
21	Rivière Desroses	Littoral du Francois	Atlantique	05/06/19
22	Trou Monnerot	Littoral du Francois	Atlantique	05/06/19
24	Dostaly nord	Littoral du Francois	Atlantique	05/06/19
25	Baie du Simon Sud	Littoral du Francois	Atlantique	25/06/19
26	Pointe des Sables	Littoral du Vauclin	Atlantique	25/06/19
27	Baie Sans Souci	Littoral du Vauclin	Atlantique	27/06/19
28	Cul de sac Petite Grenade	Littoral du Vauclin	Atlantique	27/06/19
29	Baie du Vauclin	Littoral du Vauclin	Atlantique	02/07/19
30	Baie Massy Massy	Littoral du Vauclin	Atlantique	02/07/19
32	Cul de sac Pacquemar Nord	Littoral du Vauclin	Atlantique	11/07/19
33	Cul de sac Pacquemar Sud	Littoral du Vauclin	Atlantique	23/07/19
34	Cul de sac Ferré Nord	Littoral Atlantique du Marin et de Sainte-Anne	Atlantique	23/07/19
36	Baie des Anglais Nord	Littoral Atlantique du Marin et de Sainte-Anne	Atlantique	18/09/19
38N	Anse Trabaud Est	Littoral Atlantique du Marin et de Sainte-Anne	Atlantique	25/09/19
38S	Anse Trabaud Ouest	Littoral Atlantique du Marin et de Sainte-Anne	Atlantique	18/09/19
39	Anse Meunier	Littoral Atlantique du Marin et de Sainte-Anne	Sud Caraïbes	25/09/19
40	Pointe Marin*	Baie du Marin	Sud Caraïbes	29/10/19
42	Pointe Cailloux	Baie du Marin	Sud Caraïbes	29/10/19
43S	Le Marin Est canal O'Neil Sud	Baie du Marin	Sud Caraïbes	04/11/19
43N	Le Marin Est canal O'Neil Nord	Baie du Marin	Sud Caraïbes	04/11/19
44	Le Marin Ouest Radier Trou Manoel	Baie du Marin	Sud Caraïbes	04/11/19
45	Pointe Figuier Poirier	Littoral de Rivière Pilote, Sainte-Luce et du Diamant	Sud Caraïbes	06/11/19
46	Pointe Fusette Rivière Pilote Nord	Littoral de Rivière Pilote, Sainte-Luce et du Diamant	Sud Caraïbes	06/11/19
47	Baie trou au Diable	Littoral de Rivière Pilote, Sainte-Luce et du Diamant	Sud Caraïbes	06/11/19
48	Anse Trois Rivières	Littoral de Rivière Pilote, Sainte-Luce et du Diamant	Sud Caraïbes	12/11/19
49	Fond Manoel Anse du Céron	Littoral de Rivière Pilote, Sainte-Luce et du Diamant	Sud Caraïbes	12/11/19
50	O'Mullan La Cherry Marigot du Diamant	Littoral de Rivière Pilote, Sainte-Luce et du Diamant	Sud Caraïbes	19/11/19
51	Pointe Bois d'Inde (option)	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	N/A
52	Pointe Vatable (option)	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	N/A
53	Village de la Poterie	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	19/11/19
54	Four à Chaud Ouest La Pointe	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	21/11/19
55	Four à Chaud est Rivière Salée gauche	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	02/12/19
56S	La Fayette Rivière Salée droite amont	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	02/12/19
56N	Rivière Salée Nord droite amont	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	04/12/19
57	Rivière Salée droite aval canal Petit Bourg	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	04/12/19
58S	Rivière La Manche Sud Génipa	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	04/12/19
58N	Rivière La Manche Nord Cocotte Sud	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	09/12/19
59	Pointe Merle*	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	09/12/19
60	Pointe Croix Bigot Alesso	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	09/12/19
61	Aéroport Sud Carrère	Baie de Génipa	Baie de Fort-de-France	09/12/19
62	Aéroport Nord Port Cohé Gaigneron	Cohé du Lamentin	Baie de Fort-de-France	11/12/19
63	Cohé Lamentin Pointe Cohe*	Cohé du Lamentin	Baie de Fort-de-France	11/12/19
64	ZI Mangles	Cohé du Lamentin	Baie de Fort-de-France	16/12/19
65	ZI Jambette (option)	Cohé du Lamentin	Baie de Fort-de-France	N/A

2 Télédétection (Géodesis)

2.1 Vers une généralisation des traitements mis au point en phase 2

Les travaux réalisés durant la phase 2 ont montré que **la méthode d'inversion des paramètres biophysiques LCC (Leaf Chlorophyll Content) et LAI (Leaf Area Index)** à partir d'images Sentinel-2 est généralisable sur l'ensemble de la Martinique. Rappelons que le calcul du LCC s'appuie sur un modèle de régression linéaire entraîné avec les échantillons terrain, alors que le LAI est issu d'un calcul direct avec un algorithme ad hoc (voir justifications dans le rapport de phase 2).

2.1.1 Objectifs de la phase 3

L'objectif de cette phase est d'implémenter une chaîne de traitements prenant en entrée une (des) images(s) Sentinel-2 ainsi qu'une couche vectorielle des sites de mangroves (polygones), et produisant en sortie une **cartographie des descripteurs LCC et LAI** des différents sites, ainsi qu'un indicateur permettant de visualiser les écarts aux valeurs de référence attendues. Rappelons que ces valeurs de référence ont été obtenues durant les campagnes de terrain de la phase 2 (Annexe 3).

Afin d'enrichir cet outil d'aide à la décision, les artefacts suivants seront également générés :

- la mise en évidence des zones non exploitables dues à la couverture nuageuse ainsi que le pourcentage de nuages et d'ombres associées ;
- le pourcentage de sols nus ;
- des statistiques des paramètres LCC et LAI et des classes de sols.

Un processus de traitement automatisé des images sentinel-2 a ainsi été développé afin d'obtenir pour les mangroves étudiées

- une cartographie des écarts de teneur en chlorophylle des palétuviers par rapport aux valeurs références des sites les moins perturbés
- une cartographie de la teneur en chlorophylle des feuilles de palétuviers
- une cartographie de l'estimation du LAI.

Ce programme est accompagné d'une **notice d'utilisation** (Annexe 5).

Les paragraphes ci-dessous décrivent le processus de développement.

2.1.2 Outils et langages

La chaîne tourne sous **Linux**. Des essais ont été réalisés sous Windows mais les difficultés à installer certaines librairies Python ont conduit à abandonner cette voie. Les outils et langages utilisés dans la chaîne sont les suivants :

- logiciel Snap 7.0 : utilisé à la fois pour la mise au point des traitements et la chaîne automatisée, via l'outil GPT (Graph Processor Tool) ;
- logiciel Sen2Cor 2.8 : utilisé pour la correction atmosphérique des images Sentinel-2 et la détection des nuages et de certaines classes de sols ;
- QGIS 3.4 : version LTR (*Long Term Release*) du logiciel SIG Open source. L'installation de certains plugins sera préconisée pour une meilleure expérience utilisateur (Annexe 4) ;
- langage Python 3 : utilisé dans la plupart des outils, pour l'exécution de la chaîne et pour les traitements spécifiques post-traitements (statistiques, etc). Les dépendances Python requises (Annexe 4) sont installées automatiquement par le script d'installation (voir manuel d'utilisation, Annexe 5).

2.2 Description de la méthodologie

Voici les principales étapes de traitement qui seront exécutées par la chaîne :

- étape préliminaire : sélection assistée des images Sentinel-2 ;
- téléchargement des images sur le poste de travail ;
- pré-traitements sur les images : correction atmosphérique et passage de la réflectance TOA (*Top Of Atmosphere*) à BOA (réflectance sol) ;

- calcul des indices de végétation utiles, sur un masque correspondant aux polygones de mangroves (IZH 2015) ;
- calcul des descripteurs : LCC et LAI, après un masquage des zones non exploitables (nuages, etc...) ;
- post-traitements : calcul de certaines statistiques pour chaque site ;
- traitement SIG : calcul des écarts par rapport aux valeurs de référence retenues et génération d'une cartographie finale.

Les détails des différentes étapes et de leur implémentation sont décrits ci-après.

2.2.1 Sélection des images satellitaires et téléchargement

Cette étape est semi-automatique dans la mesure où le choix final de l'image (ou des images) à traiter revient à l'utilisateur.

En effet, le pourcentage de la couverture nuageuse globale de l'image n'est pas forcément représentatif de la couverture nuageuse sur la Martinique et *a fortiori* sur les sites de mangroves. Seul l'opérateur pourra *in fine* estimer la qualité d'une image. Un script de recherche d'images est donc fourni sur une période donnée, afin de pouvoir sélectionner les images utilisées en entrée de la chaîne de traitements. Ces images seront ensuite téléchargées automatiquement en amont des traitements.

2.2.2 Prétraitements sur les images

Dans la mesure où des descripteurs biophysiques sont inversés à partir d'images satellitaires, il est primordial que ces images subissent une correction atmosphérique afin de travailler avec des **réflectances sol** (ou « Bottom Of Atmosphere »). Les images ainsi corrigées (niveau L2A) comportent également un masque de nuages ainsi qu'une classification des sols, qui nous permet de mettre en évidence les zones de sol nu. Ce traitement de correction atmosphérique est réalisé avec le logiciel Sen2Cor et exécuté automatiquement.

Durant la phase 2, le téléchargement direct des images L2A à partir du service Theia (<https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/search?collection=SENTINEL2>) avait été écarté pour les raisons suivantes :

- poids important d'une archive (3 fois plus lourde qu'une image L1C),
- valeurs de réflectance aberrantes sur certaines zones.

2.2.3 Note sur la réalisation d'une image composite multi-dates

Durant la phase 2, il avait été envisagé de construire une image composite de niveau L3A afin de minimiser la couverture nuageuse. Des essais ont été effectués avec le logiciel Sen2three mais ils n'ont malheureusement pas donné les résultats escomptés.

Une 2^e piste est le téléchargement direct d'une image L3A depuis Theia. Ce service est nouvellement opérationnel et il est possible que d'ici fin 2020, des images mises à jour mensuellement soient disponibles pour la Martinique. Cela pourrait être considéré dans le cadre de perspectives d'évolutions.

2.2.4 Calcul des indices de végétation et des descripteurs biophysiques

Pour chaque image corrigée, les traitements suivants ont été mis en œuvre à l'aide de l'outil *GPT* du logiciel *Snap* :

- application d'un masque à partir des polygones des sites de mangroves ;
- calcul des indices S2REP et NDVIre1, utilisés par le modèle de prédiction du LCC ;
- calcul du LCC avec l'équation du modèle ;
- calcul du LAI avec un algorithme spécifique ;
- application d'un masque de validité pour les classes « vegetation » et « unclassified » (correspondant à des zones de sols nus). Ce traitement permet en outre d'éliminer les zones nuageuses inexploitables.

2.2.5 Calcul de statistiques

Afin d'enrichir les informations cartographiques, certaines statistiques sont calculées pour chaque site de mangrove :

- statistiques sur le descripteur LCC : min, max, moyenne, déviation standard et percentile 90. Ces statistiques ne prennent pas en compte les zones ennuagées ;

- statistiques sur le descripteur LAI : moyenne, et déviation standard ;
- pourcentage de végétation, sol nu, zones nuageuses et ombres associées. Ces pourcentages sont calculés à partir de la classification de sols générée en sortie du traitement de correction ATM.

2.2.6 Génération des couches SIG et du projet QGIS

Cette étape consiste à générer un projet QGIS et toutes les couches utiles, à partir d'un modèle de projet. Il contient un groupe de couches géographiques par date traitée (1 image = 1 groupe) et permet de visualiser le résultat cartographique final.

Les couches suivantes sont présentes dans chaque groupe :

- couches de polygones des sites de mangroves alluvionnaires et colluvionnaires. Les informations statistiques calculées à l'étape précédente seront ajoutées comme attributs de chaque polygone ;
- images des descripteurs LCC et LAI, colorisées en dégradé de vert ;
- écarts aux valeurs de référence du descripteur LCC, pour les mangroves alluvionnaires et pour les mangroves colluvionnaires. Un intervalle nominal est défini autour des références et 2 autres intervalles sont définis pour les valeurs inférieures et supérieures (Annexe 3). Les pixels sont colorisés avec un code couleur pour chaque intervalle ;
- classification de sols avec les classes « sol nu », nuages, ombres, invalide et eau. La classe végétation (objet de l'étude et donc majoritaire) est présente mais transparente ;
- image de fond Sentinel-2 : combinaison des bandes dans le visible de chaque image d'entrée. Non sélectionnée par défaut, elle peut servir à des fins de validation et pour voir la réalité du terrain à la date de prise de vue. Afin de superposer l'image aux résultats, on peut jouer sur sa transparence.

Le diagramme ci-dessous présente une vue globale de l'ensemble des traitements.

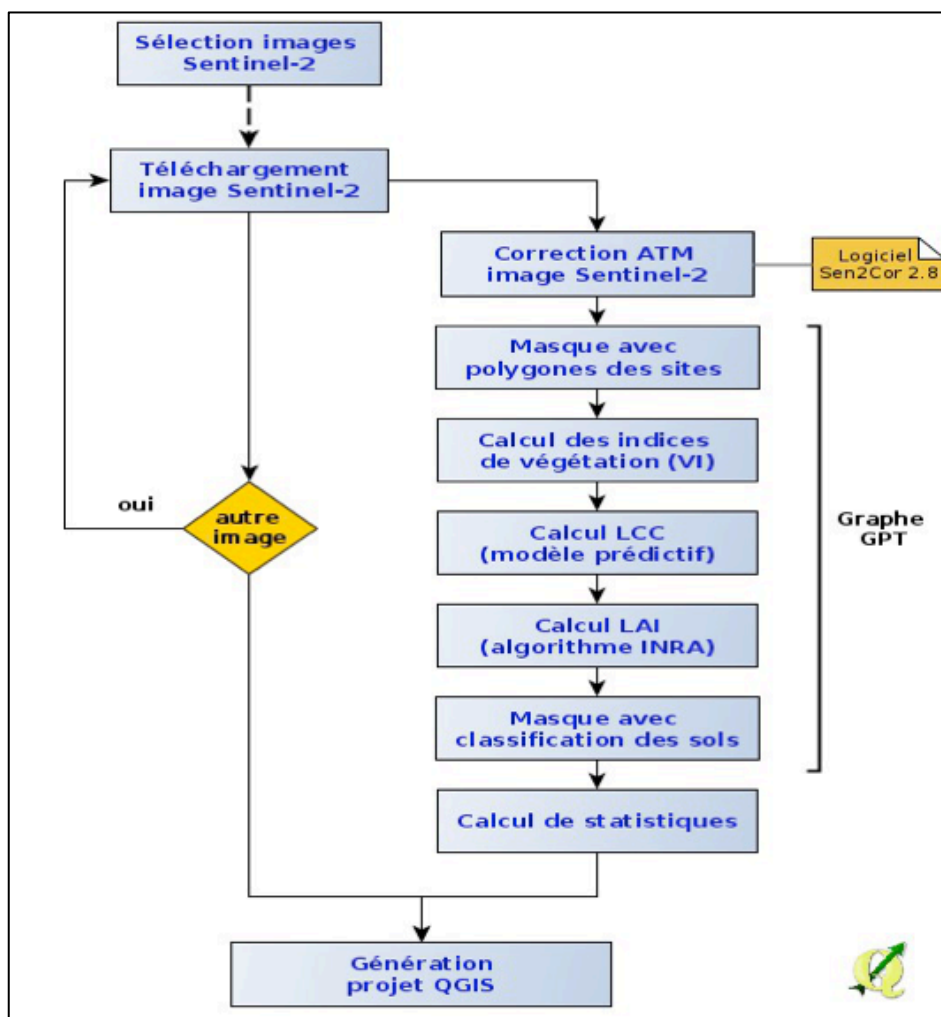


Figure 5. Workflow des traitements mis en œuvre ; dans le cas où il y a plusieurs images à traiter, le téléchargement est réalisé parallèlement aux traitements

3 Méthode de calcul de l'indicateur

La méthode de calcul de l'indicateur de pression Ind_Pres mis au point au cours de ce travail est présentée ci-dessous.

Le calcul des indicateurs Ind_Cont et Ind_Comp sont présentés en annexe (Annexe 2) pour illustrer le cheminement qui a conduit au résultat final. En effet, c'est l'indicateur de pression Ind_Pres, qui est issu de la fusion de certains éléments provenant des deux précédant indicateurs, qui sera conservé pour la suite de l'étude et qui pourra être appliqué aux autres mangroves des territoires d'Outre-mer.

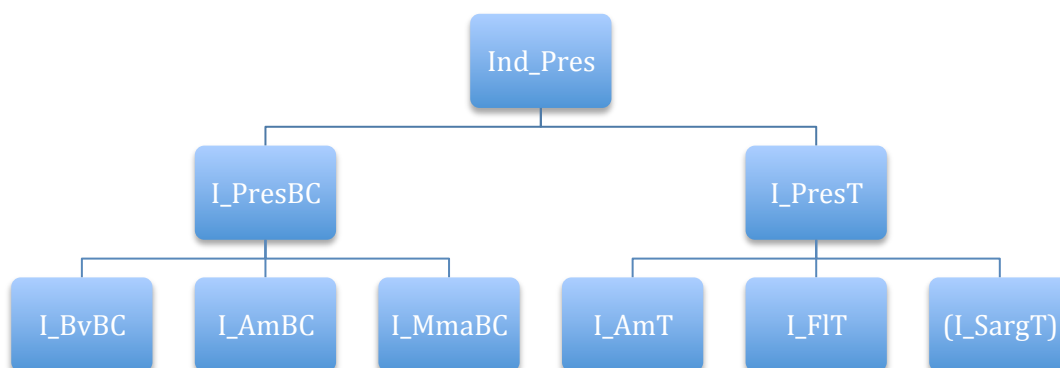
3.1 Proposition finale : l'indicateur de pression Ind_Pres

À la suite de la mise au point des deux indicateurs précédemment présentés (3.2) et au regard du peu de descripteurs disponibles pour calculer Ind_Comp, l'OFB a souhaité, à l'issue de la restitution de la phase 3, une réorientation du présent travail vers un indicateur basé uniquement sur les pressions.

Nous proposons ainsi ci-après un indicateur basé uniquement sur les pressions subies par les mangroves de Martinique : Ind_Pres. Il est issu de descripteurs provenant de Ind_Cont et Ind_Comp.

L'indicateur de pression Ind_Pres est calculé à partir de deux composantes :

- une composante Pression calculée à partir de **l'analyse Bibliographique et Cartographique (SIG)** : I_PresBC
 - calculée à partir des indices Bassin versant (I_BvBC), Arrière mangrove (I_AmBC) et Milieu marin adjacent (I_MmaBC)
- une composante Pression calculée à partir des **expertises de Terrain** : I_PresT
 - calculée à partir des indices Arrière mangrove (I_AmT) et Frange littorale (I_FIT) ainsi que Sargasse (I_SargT) lorsqu'elles sont présentes en excès.



Les formules de calcul de chaque indice et de l'indicateur sont présentées ci-dessous.

Les formules retenues sont placées dans un encadré vert.

3.2 Calcul de l'indice de pression calculé à partir de la bibliographie et du SIG I_PresBC

3.2.1 Indice Bassin versant (I_BvBC)

Le descripteur « bassin versant » (Biblio Carto) apporte de nombreux éléments d'analyse concernant l'état de la zone de mangrove située en aval. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser le bassin versant sont quantitatifs en ce qui concerne la surface et l'occupation du sol et qualitatifs pour les pressions générales.

Ils peuvent être appréciés par SIG.

La formule de calcul de l'indice bassin versant (I_BvBC) proposée est basée sur une combinaison des scores des différents paramètres :

- un score / 10 attribué à la proportion de surface agricole $S_Sagri = \%Agri / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de surface artificialisée $S_Sart = \%Art / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de surface exploitée (somme de la proportion de surface artificialisée et de la proportion de surface agricole) $S_Sexp = (\%Art + \%Agri) / 10$;
- un score / 10 attribué aux pressions générales présentes sur le bassin versant. Cet indice (S_Pg) viendrait renforcer (ou non) le poids des zones exploitées suivant le type d'activités présentes. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux trois catégories suivantes :
 - présence de STEU (station d'épuration) ;
 - présence d'industries (décharge, casse auto, usine ...) ;
 - présence d'agriculture industrielle (grandes cultures comme la canne ou la banane par ex.).

L'indice est alors calculé en faisant la somme des trois multipliée par 10/9 pour le ramener à une note sur 10.

Pour les quatre paramètres, plus l'indice est proche de 10, plus le niveau de pression est élevé.

L'hydrologie (cf Phase 2) est notée comme un facteur explicatif, elle n'est pas intégrée à l'indice I_BvBC et pourra être consultée le cas échéant pour améliorer la compréhension du fonctionnement du bassin versant.

Le calcul de l'indice composite « bassin versant » peut alors se faire en calculant la moyenne de ces quatre paramètres. Un coefficient a été attribué à un ou plusieurs indices afin de leur donner plus ou moins de poids.

Ainsi, suite à l'élargissement du calcul de l'indicateur à 62 sites, plus d'importance a été donnée aux surfaces exploitées (S_Sexp) et aux pressions générales (S_pg) pour le calcul de l'indice du bassin versant I_BvBC.

$$I_BvBC = \frac{(S_Sagri + S_Sart + (S_Sexp \times 2) + (S_Pg \times 1,5))}{5,5}$$

3.2.2 Indice Arrière mangrove (I_AmBC)

Le descripteur « arrière mangrove » (Biblio Carto) renseigne sur les activités qui impactent directement la mangrove et sur son évolution en limite amont. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser l'arrière mangrove sont quantitatifs en ce qui concerne l'occupation du sol du linéaire d'arrière mangrove et qualitatifs pour la topographie directe, les milieux connexes, la dynamique d'érosion et les pressions générales.

Ils peuvent être appréciés par SIG.

La formule de calcul de l'indice arrière mangrove (I_AmBC) proposé est basée sur une combinaison des scores des différents paramètres :

- un score / 10 attribué à la proportion de linéaire agricole $S_Lagri = \%Agri / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de linéaire artificialisée $S_Lart = \%Art / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de linéaire exploité (somme de la proportion de linéaire artificialisé et de la proportion de linéaire agricole) $S_Lexp = (\%Art + \%Agri) / 10$;
- un score / 10 attribué aux pressions générales présentes en arrière mangrove (S_Pg). Cet indice vient renforcer (ou non) le poids des zones exploitées suivant le type d'activités présentes. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux trois catégories suivantes :

- présence de rejets directs de STEP (station d'épuration) ;
- présence de rejets directs de pollutions industrielles (décharge, casse auto, usine ...) ;
- présence d'agriculture industrielle (grandes cultures comme la canne ou la banane par ex.).

L'indice est alors calculé en faisant la somme des cinq multipliée par 10/9 pour le ramener à une note sur 10.

- un score / 10 à 3 valeurs pour la dynamique d'accrétion ou d'érosion de la mangrove depuis 1951 (S_Es). 0 correspond à un état stable de la mangrove, 5 à un état d'accrétion (crédite du score car signe de déséquilibre du fait d'apports terrigènes trop importants) et 10 à un état d'érosion (déséquilibre encore plus important du fait d'une dynamique affaiblie de l'arrière mangrove).

Pour les cinq paramètres, plus l'indice est proche de 10 plus le niveau de pression est potentiellement élevé.

La topographie directe, la proportion de zones dépourvues de végétation et les milieux connexes sont notés comme facteurs explicatifs qui pourront être consultés le cas échéant pour améliorer la compréhension du fonctionnement de l'arrière mangrove.

Le calcul de l'indice composite « arrière mangrove » peut alors se faire en calculant la moyenne de ces cinq paramètres. Un coefficient pourrait être attribué à un ou plusieurs indices afin de leur donner plus ou moins de poids.

Ainsi, comme pour l'indice du bassin versant, plus d'importance a été donnée aux linéaires exploités (S_Sexp) et aux pressions générales (S_Pg).

$$I_AmBC = \frac{(S_Lagri + S_Lart + (S_Lexp \times 2) + (S_Pg \times 2) + S_Es)}{7}$$

3.2.3 Indice Milieu marin adjacent (I_MmaBC)

Le descripteur « milieu marin adjacent » (Biblio Carto) renseigne sur les activités qui peuvent impacter la mangrove sur sa partie aval. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser le milieu marin adjacent de la mangrove sont qualitatifs.

Ils peuvent être appréciés par SIG.

L'indice « milieu marin adjacent » (I_Mma) est calculé par une combinaison des scores des différents paramètres :

- un score / 10 attribué aux pressions générales observées sur le milieu marin adjacent (S_Pg). Cet indice vient renforcer (ou non) le poids des zones exploitées suivant le type d'activités présentes. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux quatre catégories suivantes :
 - présence d'activités portuaires ;
 - présence d'activités nautiques ;
 - présence d'industries sur les littoraux à proximité (décharge, raffinerie...) ;
 - présence d'apports terrigènes importants (embouchures de cours d'eau majeurs).

L'indice est alors calculé en faisant la somme des trois multipliée par 0,83 pour le ramener à une note sur 10.

- un score / 10 sur la qualité des masses d'eau (S_Qme) issue des rapports DCE de l'Office de l'Eau Martinique. L'état écologique des masses d'eau est noté selon cinq critères (mauvais 5, médiocre 4, moyen 3, bon 2 et très bon 1). Les valeurs sont alors multipliées par deux pour avoir un score / 10.

Pour les deux paramètres, plus l'indice est proche de 10 plus le niveau de pression est potentiellement élevé.

La géomorphologie de la baie (cf Phase 2) est notée comme facteur explicatif qui pourra être consulté le cas échéant pour améliorer la compréhension du fonctionnement du milieu marin adjacent. Des travaux récents réalisés par le BRGM sur l'hydromorphologie côtière de la Martinique dans le cadre de la DCE pourront peut-être apporter des informations à valoriser dans le cadre du présent indicateur.

L'indice composite « milieu marin adjacent » est calculé en faisant la moyenne de ces deux paramètres :

$$I_MmaBC = \frac{(S_Pg + S_Qme)}{2}$$

3.2.4 Calcul de l'indice composite de pression calculé à partir de la bibliographie et du SIG (I_PresBC)

L'indice de pression basé sur l'étude bibliographique et cartographique est calculé à partir de la combinaison des trois descripteurs présentés ci-dessus. Un coefficient est appliqué à certains indices dont l'influence peut être considérée comme plus importante.

Voici le calcul proposé pour une note / 5, 5 correspondant au niveau maximal de pression et avec un coefficient de 1,5 pour le bassin versant et de 2 pour l'arrière mangrove :

$$I_PresBC = \frac{((I_Bv \times 1,5) + (I_Am \times 2) + (I_Mma))}{4,5}$$

La valeur de l'indice de pression basé sur l'analyse bibliographique et cartographique, une note / 5, permet de qualifier les pressions suivant les cinq critères à savoir un niveau de pression sur la mangrove :

• Très élevé I_PresBC = 5	5
• Élevé I_PresBC = 4	4
• Moyen I_PresBC = 3	3
• Faible I_PresBC = 2	2
• Très faible I_PresBC = 1	1

Lorsque la valeur de l'indice dépasse la valeur limite d'une catégorie, **la valeur de l'indice est toujours arrondie à la valeur supérieure**. Par ex. : valeur calculée de I_PresBC = 3,6 alors la valeur de I_PresBC indice sera de 4 (Tableau 2).

Le Tableau 2 présente un exemple de calcul de l'indice de pression basé sur la bibliographie et la cartographie I_PresBC pour le site de la Cohé du Lamentin, site référence de la phase 2. L'indicateur est calculé à partir de l'indice des pressions du bassin versant (I_BvBC), des pressions de l'arrière mangrove (I_AmBC) et de l'indice de pression du milieu marin adjacent (I_MmaBC) selon la formule présentée précédemment.

La valeur de l'indice est arrondie au niveau supérieur afin de définir le niveau de pression auquel est exposé le site selon l'analyse bibliographique et cartographique. Dans ce cas l'indice révèle un **niveau de pression élevé** (valeur = 4) auquel est exposée la mangrove de la Cohé du Lamentin.

Tableau 2. Exemple du calcul de l'indice de pression I_PresBC basé sur l'étude bibliographique et cartographique, ici le site de la Cohé du Lamentin

Site	I_PresBC (/5) Valeur	I_PresBC (/5) Calculé	Descripteurs - nom	Descripteurs valeur (/10)	Indice - nom	Indice - valeur (/10)	Sous indice - nom	Sous indice - valeur (0,1,2,3)
Cohé du Lamentin (63)	4	3,6	Bassin versant I_BvBC	6,2	S_Sagri	2,2		
					S_Sart	4,8		
					S_Sexp	7,0		
					S_pg	8,9	STEU Décharge	3
							Industrie	3
							AgrilIndus	2
			Arrière mangrove I_AmBC	7,6	S_Lagri	0,0		
					S_Lart	10,0		
					S_Lexp	10,0		
					S_pg	6,7	STEU Décharge	3
							Industrie	3
							AgrilIndus	0
					S_es	10		
			Milieu marin adjacent I_MmaBC	8,0	S_pg	10,0	Activités portuaires	3
							Activités nautiques	3
							Industrie	3
							Apports terrigènes	3
					S_qme	6		

Légende :

S_Sagri : Score surface agriculture

S_Sart : Score surface artificialisée

S_Sexp : Score surface exploitée

S_pg : Score pression générale

S_Lagri : Score linéaire agriculture

S_Lart : Score linéaire artificialisé

S_Lexp : Score linéaire exploité

S_pg : Score pression générale

S_es : Score évolution surfacique

S_qme : Score qualité de la masse d'eau

3.3 Calcul de l'indice de pression calculé à partir des expertises de terrain I_PresT

3.3.1 Contenu de l'analyse de terrain

L'analyse de terrain se cantonne à **la périphérie du site** : parcours à pied de l'arrière mangrove et observation de la frange littorale depuis un point de vue ou une embarcation.

Il s'agit alors :

- de vérifier les observations réalisées par SIG (arrière mangrove et, le cas échéant, sur le front de mer) ;
- d'évaluer la présence de macrodéchets (**macro-polluants**) ;
- de mesurer les activités de chasse et de pêche le cas échéant ;
- d'analyser l'alimentation en eau et de déceler la présence ou non d'une modification du fonctionnement hydrologique de la zone (**perturbation de l'écosystème en place**)
- d'évaluer la présence de sargasses (**saturation**).

3.3.2 Indice Arrière mangrove calculé à partir des expertises de terrain (I_AmT)

Le descripteur « arrière mangrove » renseigne sur les activités qui impactent directement la mangrove et sur son évolution en limite amont. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser l'arrière mangrove sont qualitatifs sur la base d'une note entre 0 et 3.

Ils doivent être appréciés par la réalisation d'expertises de terrain en parcourant l'arrière mangrove à pied.

La formule de calcul de l'indice arrière mangrove (I_AmT) proposé est basée sur :

- un score / 10 attribué aux pressions générales observées en arrière mangrove. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux trois catégories suivantes :
 - présence de macrodéchets ;
 - présence de perturbations hydrauliques ;
 - présence d'activités de chasse et/ou de pêche (dont crabes).

L'indice est alors calculé en faisant la somme des trois multipliée par 10/9 pour le ramener à une note sur 10.

Plus l'indice est proche de 10 plus le niveau de pression est potentiellement élevé.

La topographie directe, la proportion de zones dépourvues de végétation et les milieux connexes sont notés comme facteurs explicatifs qui pourront être consultés le cas échéant pour améliorer la compréhension du fonctionnement de l'arrière mangrove.

Indice Frange littorale calculé à partir des expertises de terrain (I_FIT)

Le descripteur « frange littorale » renseigne sur les activités qui impactent directement la mangrove et sur son évolution en limite aval. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser la frange littorale de la mangrove sont qualitatifs sur la base d'une note comprise entre 0 et 3.

Ils doivent être appréciés par la réalisation d'expertises de terrain en observant la frange littorale depuis un point de vue ou en la parcourant en bateau ou kayak.

La formule de calcul de l'indice « frange littorale » (I_FIT) proposée est basée sur un score issu des pressions observées sur site :

- un score / 10 attribué aux pressions observées sur la frange littorale. Cet indice est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux trois catégories suivantes :
 - S_Md : présence de macrodéchets flottants ou déposés / enchevêtrés dans les racines de la frange ;
 - S_Def : présence de défrichement (ex : ponton sauvage) ;
 - S_Pec : présence de signes d'activité de pêche.

L'indice est alors calculé en faisant la somme des trois multipliée par 10/9 pour le ramener à une note sur 10.

Plus il est proche de 10 plus le niveau de pression est élevé.

$$I_FIT = (S_Md + S_Def + S_Pec) \times (10/9)$$

3.3.3 Indice Présence de sargasses en excès basé sur l'expertise de terrain (I_SargT)

Outre les indices présentés précédemment, un indice concernant la présence de sargasses (I_SargT) peut être ajouté dans certains cas extrêmes. L'impact des sargasses sur la mangrove est mal connu, du moins en faible à moyenne quantité. Nous proposons donc de prendre en compte leur présence **uniquement lorsqu'ellesaturent la mangrove** et ainsi peuvent perturber fortement l'écosystème jusqu'à provoquer de la mortalité chez les palétuviers.

La présence des sargasses a été relevée par l'attribution de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3).

Leur présence doit être appréciée par la réalisation d'expertises de terrain en observant la frange littorale depuis un point de vue ou en la parcourant en bateau ou kayak.

I_SargT sera donc pris en compte dans le calcul de l'indice de pression terrain uniquement si son score atteint la valeur maximale de 3.

Dans ce cas :

$$I_SargT = 10$$

3.3.4 Calcul de l'indice composite de pression calculé à partir des expertises de terrain (I_PresT)

L'indice de pression basé sur les expertises de terrain est calculé à partir de la combinaison des deux ou trois descripteurs présentés ci-dessus. Un coefficient est appliqué à certains indices dont l'influence peut être considérée comme plus importante.

Voici le calcul proposé pour une note / 5, 5 correspondant au niveau maximal de pression et avec un coefficient de 1,5 pour le bassin versant et de 2 pour l'arrière mangrove :

Si **absence** de sargasses en excès :

$$I_PresT = \frac{((I_AmT \times 2) + (I_FIT))}{3} / 2$$

Si **présence** de sargasses en excès :

$$I_PresT = \frac{((I_AmT \times 2) + (I_FIT) + 10)}{4} / 2$$

La valeur de l'indice de pression basé sur les expertises de terrain, une note / 5, permet de qualifier les pressions suivant les cinq critères à savoir un niveau de pression sur la mangrove :

• Très élevé I_PresT = 5	5
• Élevé I_PresT = 4	4
• Moyen I_PresT = 3	3
• Faible I_PresT = 2	2
• Très faible I_PresT = 1	1

Lorsque la valeur de l'indice dépasse la valeur limite d'une catégorie, **la valeur de l'indice est toujours arrondie à la valeur supérieure**. Par ex. : valeur calculée de I_PresT = 4,3 alors la valeur de I_PresT indice sera de 5 (Tableau 3).

Le Tableau 3 présente un exemple de calcul de l'indice de pression basé sur les expertises de terrain I_PresT pour le site de la Cohé du Lamentin, site référence de la phase 2. L'indicateur est calculé à partir de l'indice des pressions de l'arrière mangrove (I_AmT) et de l'indice de pression de la frange littorale (I_FIT) selon la formule présentée précédemment. En cas de présence excessive de sargasse, I_SargT est ajouté au calcul.

La valeur de l'indice est arrondie au niveau supérieur afin de définir le niveau de pression auquel est exposé le site selon les expertises de terrain. Dans ce cas l'indice révèle un **niveau de pression très élevé** (valeur = 5) auquel est exposée la mangrove de la Cohé du Lamentin.

Tableau 3. Exemple du calcul de l'indice de pression basé sur les expertises de terrain I_PresT, ici le site de la Cohé du Lamentin

Site	I_PresT (/5) Valeur	I_PresT (/5) Calculé	Descripteurs - nom	Descripteurs - valeur (/10)	Indice - nom	Indice - valeur (/10)	Sous indice - nom	Sous indice - valeur (0,1,2,3)
Cohé du Lamentin (63)	5	4,3	Arrière mangrove I_AmT	10,0	S_pg	10,0	Macrodechets	3
							Perturbations hydrauliques	3
							Chasse/Pêche	3
			Frange littorale I_FIT	5,6	S_pg	5,6	Macrodechets flottants	2
							Défrichement	2
							Pêche	1
			I_SargT	-	-	-	-	-

S_pg : Score pression générale

3.4 Calcul de l'indicateur de pression Ind_Pres

L'indicateur de pression (Ind_Pres) qui traduit le niveau de pression qui s'exerce sur les mangroves est calculé à partir de la moyenne des deux indices précédemment calculés I_PresBC et I_PresT :

$$\text{Ind_Pres} = \frac{(\text{I_PresBC} + \text{I_PresT})}{2}$$

La valeur de l'indicateur de pression basé sur la combinaison des évaluations bibliographiques/cartographiques et de terrain, une note / 5, permet de qualifier les pressions suivant les cinq critères à savoir un niveau de pression sur la mangrove :

• Très élevé Ind_Pres = 5	5
• Élevé Ind_Pres = 4	4
• Moyen Ind_Pres = 3	3
• Faible Ind_Pres = 2	2
• Très faible Ind_Pres = 1	1

Lorsque la valeur de l'indicateur dépasse la valeur limite d'une catégorie, **la valeur de l'indicateur est toujours arrondie à la valeur supérieure.**

Par exemple pour le site de la Cohé du Lamentin pris en exemple précédemment :

- $\text{Ind_Pres} = (4 + 5) / 2 = 4,5$
- **Ind_Pres = 5**

C'est la valeur de l'indicateur Ind_Pres, traduisant le niveau de pression qui s'exerce sur les mangroves à partir des pressions mesurées à grande échelle par la bibliographie et la cartographie complétées par les pressions observées sur le terrain, qui sera présentée dans la partie résultats pour chacune des mangroves analysées.

C. Résultats

1 Valeur de l'indicateur de pression (Ind_Pres) pour les 62 sites d'étude

Un tableur Excel a été préparé afin de calculer automatiquement la valeur de l'indicateur à partir des valeurs des différents paramètres.

La valeur de l'indicateur de pression et les valeurs des différents indices descripteurs pour les 62 sites d'étude sont présentées dans le

Tableau 4. Celui-ci permet d'obtenir un aperçu du niveau et du type de pression subi par chaque site de mangrove.

Le détail des indices permet d'identifier le ou les indices qui influencent la valeur finale de l'indicateur de pression. En d'autres termes, cela permet de voir d'où viennent les pressions les plus importantes.

Une analyse plus fine, en remontant au calcul des différents indices, est possible en accédant au tableur de calcul contenant les données sources. Par exemple, si la pression importante vient de l'arrière mangrove, cela permet d'identifier quelle en est l'origine.

RÉSULTATS

Tableau 4. Valeurs des indices des descripteurs et de l'indicateur composite du niveau des pressions qui s'exercent sur les mangroves de Martinique Ind_Pres pour les 62 sites ; l'échelle de couleur correspond aux niveaux de pressions ; niveau de pression très élevé Ind_Pres=5 ; élevé=4 ; moyen=3 ; faible=2 ; très faible=1

Num Site	Lieu	Ensemble	I_Bv BC	I_Am BC	I_Mma BC	I_Pres BC	I_Am T	I_Fl T	I_Sarg T	I_Pres T	Ind_Pres
1	Baie du Trésor*	Atlantique Nord	0,01	0,71	3,00	1	2,22	1,11	N/A	1	1
2	Baie du Trésor Ouest	Atlantique Nord	0,03	0,00	3,00	1	3,33	3,33	N/A	2	2
3	Pointe Ferrée	Atlantique Nord	0,08	0,00	3,83	1	6,67	3,33	N/A	3	2
4	Anse Belune	Atlantique Nord	5,27	5,43	5,49	3	7,78	4,44	N/A	4	4
5	Fonds Cérémaux	Atlantique Nord	3,68	3,76	3,42	2	7,78	4,44	N/A	4	3
6	Baie du Galion	Atlantique Nord	6,61	5,02	5,91	3	7,78	6,66	N/A	4	4
7	Baie du Galion pointe Jean-Claude	Atlantique Nord	5,73	5,65	5,91	3	6,67	5,55	N/A	4	4
8	Baie du petit Galion Sud	Atlantique Nord	3,60	4,44	4,66	3	6,67	5,55	N/A	4	4
9	Baie du petit Galion Sud-Est	Atlantique Nord	1,32	1,43	4,66	2	7,78	3,33	N/A	4	3
10	Baie du petit Galion Est	Atlantique Nord	0,31	0,00	5,08	1	3,33	4,44	N/A	2	2
11	Pointe Melon	Atlantique Nord	2,90	3,23	5,49	2	7,78	2,22	N/A	3	3
12	Trou terre	Atlantique Nord	6,50	7,62	7,15	4	7,78	3,33	N/A	4	4
13	Marina du Robert	Atlantique Nord	5,39	6,43	7,57	4	8,89	5,55	N/A	4	4
14	Pointe Royale	Atlantique Nord	5,50	3,54	5,08	3	6,67	5,55	N/A	4	4
16	Baie de Saintpée	Atlantique Nord	0,93	0,32	5,49	1	3,33	6,66	N/A	3	2
18	Mansarde Rancée Nord	Atlantique	3,11	4,03	4,25	2	7,78	3,33	N/A	4	3
19	Mansarde Rancée Sud	Atlantique	6,43	6,19	5,49	4	7,78	2,78	10	4	4
20	Baie Thalemont	Atlantique	1,22	1,08	4,25	1	2,22	1,67	10	3	2
21	Rivière Desroses	Atlantique	5,75	7,13	N/A	4	8,89	N/A	N/A	5	5
22	Trou Monnerot	Atlantique	1,69	1,16	5,08	2	4,44	2,78	10	4	3
24	Dostaly nord	Atlantique	5,73	2,64	5,08	3	3,33	4,44	N/A	2	3
25	Baie du Simon Sud	Atlantique	5,32	6,19	6,32	3	5,56	5,55	N/A	3	3
26	Pointe des Sables	Atlantique	5,73	6,03	5,08	3	6,67	3,33	N/A	3	3
27	Baie Sans Souci	Atlantique	5,67	5,15	5,91	3	6,67	3,33	10	4	4
28	Cul de sac Petite Grenade	Atlantique	4,99	3,83	4,66	3	4,44	4,44	N/A	3	3
29	Baie du Vauclin	Atlantique	4,92	5,88	5,91	3	8,89	3,89	10	5	4
30	Baie Massy Massy	Atlantique	4,75	4,21	4,25	3	5,56	1,11	10	3	3
32	Cul de sac Pacquemar Nord	Atlantique	4,52	5,60	4,25	3	6,67	4,44	N/A	3	3
33	Cul de sac Pacquemar Sud	Atlantique	2,99	2,06	3,83	2	4,44	5,55	N/A	3	3
34	Cul de sac Ferré Nord	Atlantique	2,49	0,84	4,25	2	4,44	3,33	N/A	3	3
36	Baie des Anglais Nord	Atlantique	3,17	1,23	4,66	2	5,56	6,66	N/A	3	3
38N	Anse Trabaud Est	Atlantique	2,38	2,78	3,83	2	5,56	3,33	10	4	3
38S	Anse Trabaud Ouest	Atlantique	2,38	0,12	3,42	1	6,67	4,44	N/A	3	2
39	Anse Meunier	Sud Caraïbes	3,73	2,52	2,83	2	8,89	5,55	N/A	4	3
40	Pointe Marin*	Sud Caraïbes	4,82	5,38	7,32	3	8,89	7,77	N/A	5	4
42	Pointe Cailloux	Sud Caraïbes	3,94	0,66	7,32	2	6,67	4,44	N/A	3	3
43N	Le Marin Est canal O'Neil Nord	Sud Caraïbes	4,83	6,98	8,57	4	8,89	3,33	N/A	4	4
43S	Le Marin Est canal O'Neil Sud	Sud Caraïbes	3,92	4,75	8,57	3	7,78	5,55	N/A	4	4
44	Le Marin Ouest Radier Trou Manoel	Sud Caraïbes	2,00	2,76	8,57	2	8,89	5,55	N/A	4	3
45	Pointe Figuier Poirier	Sud Caraïbes	1,63	4,05	7,74	3	7,78	6,66	N/A	4	4
46	Pointe Fusette Rivière Pilote Nord	Sud Caraïbes	4,44	0,28	N/A	2	4,44	4,44	N/A	3	3
47	Baie trou au Diable	Sud Caraïbes	1,61	1,43	6,49	2	5,56	3,33	N/A	3	3
48	Anse Trois Rivières	Sud Caraïbes	5,25	4,54	7,32	3	8,89	5,55	N/A	4	4
49	Fond Manoel Anse du Céron	Sud Caraïbes	4,91	6,08	2,83	3	7,78	4,44	N/A	4	4
50	O'Mullan La Cherry Marigot du Diamant	Sud Caraïbes	1,68	3,15	3,66	2	7,78	5,55	N/A	4	3
51	Pointe Bois d'Inde (Pas de terrain)	Baie de Fort-de-France	1,01	0,09	5,49	1	N/A	N/A	N/A	N/A	1
52	Pointe Vatable (Pas de terrain)	Baie de Fort-de-France	2,67	4,04	6,74	3	N/A	N/A	N/A	N/A	3
53	Village de la Poterie	Baie de Fort-de-France	5,73	6,98	5,08	4	6,67	2,22	N/A	3	4
54	Four à Chaud Ouest La Pointe	Baie de Fort-de-France	3,31	5,27	4,66	3	6,67	2,22	N/A	3	3
55	Four à Chaud est Rivière Salée gauche	Baie de Fort-de-France	5,68	2,49	4,66	3	6,67	4,44	N/A	3	3
56N	Rivière Salée Nord droite amont	Baie de Fort-de-France	6,71	5,80	N/A	4	6,67	N/A	N/A	4	4
56S	La Fayette Rivière Salée droite amont	Baie de Fort-de-France	4,90	2,67	N/A	2	6,67	N/A	N/A	4	3
57	Rivière Salée droite aval canal Petit Bourg	Baie de Fort-de-France	5,81	6,67	4,66	3	6,67	2,22	N/A	3	3
58N	Rivière La Manche Nord Cocotte Sud	Baie de Fort-de-France	7,08	6,67	5,49	4	7,78	3,33	N/A	4	4
58S	Rivière La Manche Sud Génipa	Baie de Fort-de-France	7,38	7,22	5,08	4	8,89	2,22	N/A	4	4
59	Pointe Merle*	Baie de Fort-de-France	6,66	7,30	5,49	4	7,78	4,44	N/A	4	4
60	Pointe Croix Bigot Alesso	Baie de Fort-de-France	4,19	5,63	5,49	3	6,67	2,22	N/A	3	3
61	Aéroport Sud Carrère	Baie de Fort-de-France	5,77	6,27	7,15	4	8,89	3,33	N/A	4	4
62	Aéroport Nord Port Cohé Gaigneron	Baie de Fort-de-France	8,20	6,59	7,98	4	8,89	4,44	N/A	4	4
63	Cohé Lamentin Pointe Cohe*	Baie de Fort-de-France	6,23	7,62	7,98	4	10,00	5,55	N/A	5	5
64	ZI Mangles	Baie de Fort-de-France	7,31	7,62	7,98	4	8,89	2,22	N/A	4	4
65	ZI Jambette (Pas de terrain)	Baie de Fort-de-France	7,27	8,00	7,98	4	N/A	N/A	N/A	N/A	4

2 Analyse et cartographie des résultats par grands ensembles géographiques

Les résultats obtenus pour l'indicateur de pression sont présentés sur des cartes à différentes échelles :

- l'ensemble de la Martinique
- l'ensemble Atlantique Nord
- l'ensemble Atlantique
- l'ensemble Sud Caraïbes
- l'ensemble Baie de Fort-de-France.

2.1 Ensemble de la Martinique

L'indicateur de pression **Ind_Pres** traduisant le niveau de pression est présenté sur la Figure 6 pour l'ensemble de la Martinique.

Les mangroves soumises à un niveau de pression moins élevé sont situées au nord de la Martinique, au niveau de la presqu'île de la Caravelle sur la commune de la Trinité, et à l'extrême sud de l'île sur la commune de Sainte-Anne. Il s'agit des zones de mangroves qui sont les plus protégées des zones habitées, des activités industrielles et agricoles intensives.

Les mangroves exposées aux plus forts niveaux de pressions se situent en aval des zones urbanisées qui cumulent un fort taux d'artificialisation du sol (dont habitations) et d'activités industrielles.

Seules deux mangroves apparaissent avec un niveau de pression très faible, la Baie du Trésor sur la presqu'île de la Caravelle à Trinité au nord et la mangrove de la Pointe Bois d'Inde sur la commune des Trois-Ilets, ce dernier n'ayant pas fait l'objet d'une expertise de terrain.

Deux sites présentent un niveau de pression très élevé, la mangrove devenue captive de Rivière Desroses sur la commune du François et la mangrove de la Cohé du Lamentin sur la commune du Lamentin.

La plupart des sites ont un niveau de pression moyen à élevé, en particulier dans la baie de Fort-de-France.

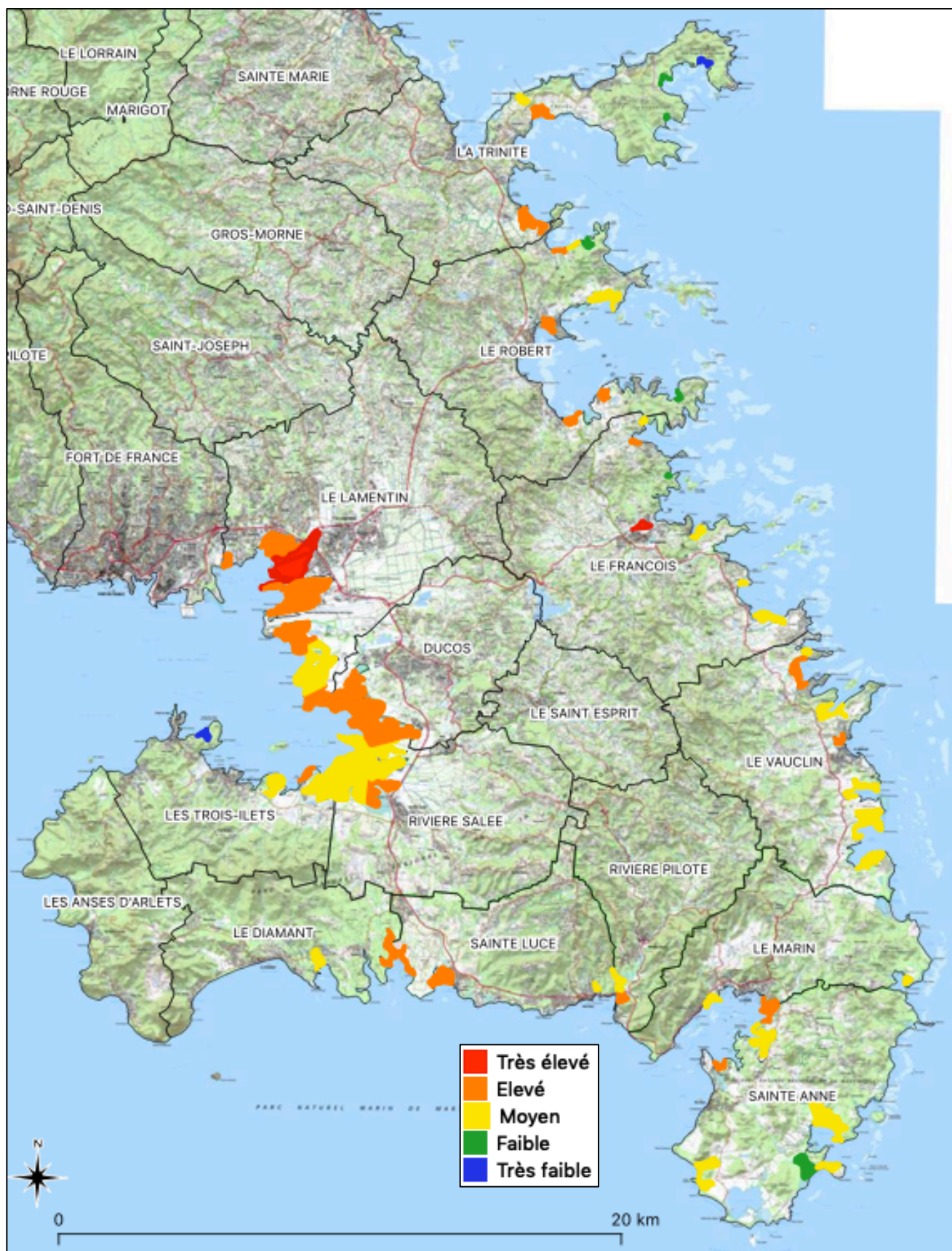


Figure 6. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de Martinique ; fond de carte IGN Scan25

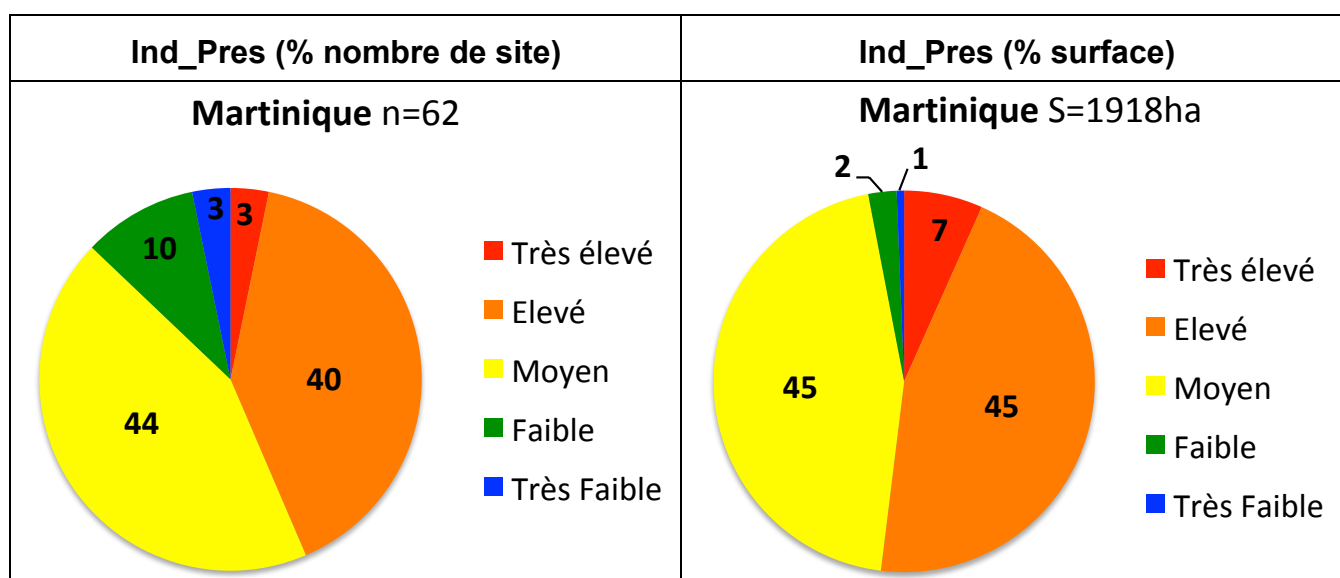
RÉSULTATS

Le Tableau 5 présente les résultats obtenus pour Ind_Pres à l'échelle de la Martinique en fonction du nombre de site et de la superficie (ha).

En nombre de site (84%) et davantage encore en superficie (90%), le niveau de pression sur les mangroves de Martinique est moyen à élevé.

Ainsi seulement 3% des surfaces (13% des sites) de mangroves de Martinique sont soumises à de faibles à très faibles niveaux de pressions tandis que 45% sont soumises à un niveau de pression élevé (21% des sites) et 7% très élevé (3% des sites).

Tableau 5. Répartition des sites de mangrove (%) de Martinique en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite



2.2 Ensemble Atlantique nord

2.2.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres

La Figure 7 présente la valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les communes de La Trinité et du Robert.

Commune de La Trinité

Les mangroves de l'extrémité de la Caravelle ont un niveau de pression très faible à faible tandis qu'il est élevé à l'intérieur de la Baie du Galion. Le niveau de pression est moyen pour Fonds Cérémaux.

Une pression importante provient notamment de l'agriculture intensive pour Anse Bélune et Fonds Cérémaux à laquelle s'ajoutent les pressions issues du vaste bassin versant du Galion (activités industrielles, grandes cultures et habitations) pour les deux sites de mangrove de la Baie du Galion.

Les mangroves de Baie du Trésor ouest et de Pointe Ferrée ont un niveau de pression un peu plus élevée que celui du site de la Baie du Trésor (site expérimental de phase 2) en raison de la présence de très nombreux macrodéchets, en particulier sur le site de la Pointe Ferrée.

La mangrove de Fonds Cérémaux possède un niveau de pression moyen en raison de la présence d'une ancienne décharge et d'une croissance très importante des palétuviers qui peut être attribuée en partie à la présence d'engrais, provenant des champs de cannes alentours, qui sont recueillis par la mangrove située en fond de cuvette.

À l'intérieur de la Baie du Galion, les mangroves ont un niveau de pression élevé, en particulier au niveau de la mangrove de la Baie du Galion qui se situe à l'embouchure de la rivière du Galion (pollution de l'eau) mais qui recueille également des sargasses, des macrodéchets et qui est en grande partie défrichée par une vaste zone de chasse.

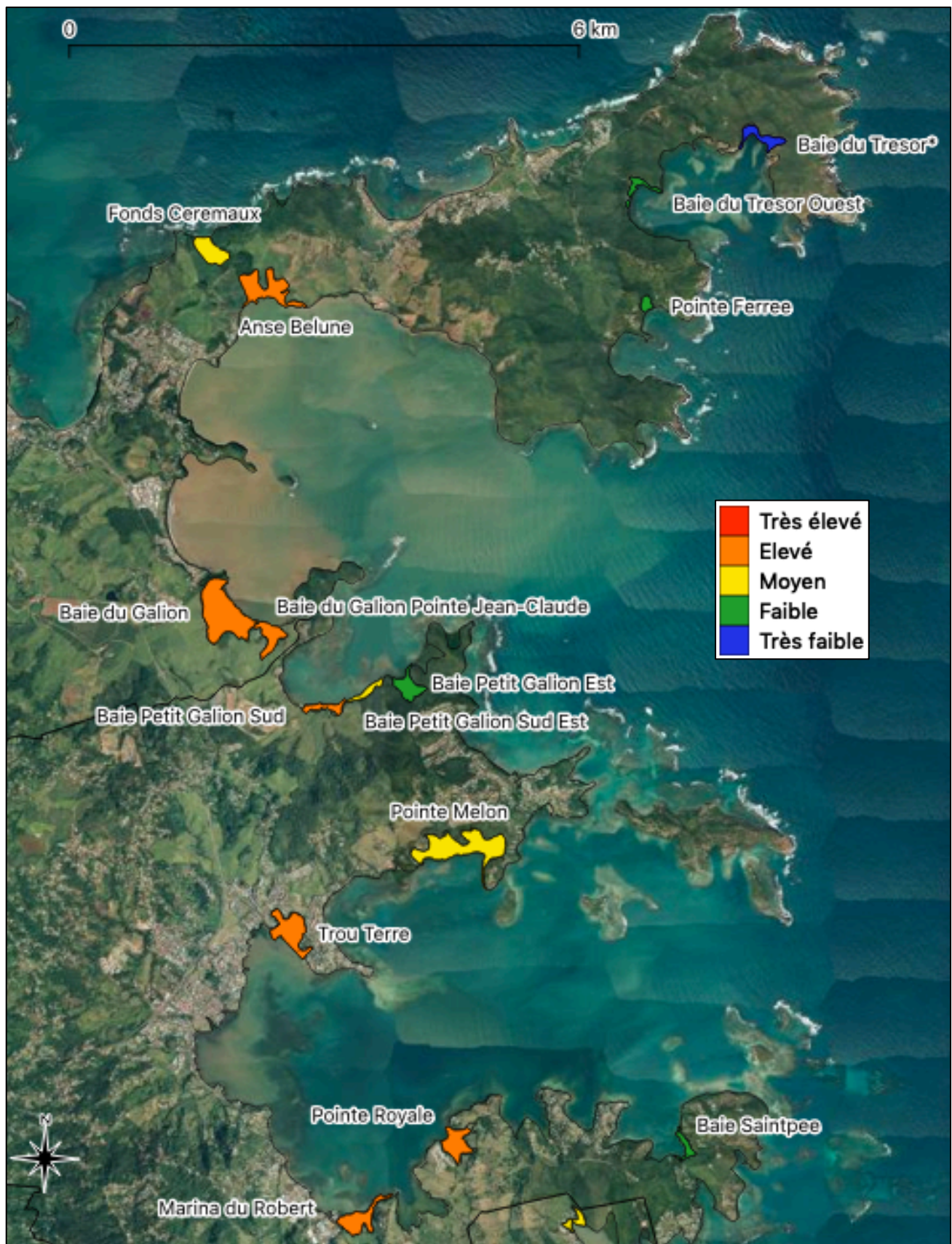


Figure 7. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de l'Atlantique nord (Le Robert et La Trinité) ;
* site expérimental de phase 2

RÉSULTATS

L'Anse Bélune possède un niveau de pression élevé. Une mortalité importante a été induite par le passage du cyclone Dean en 2007. La mangrove ne s'est toujours pas régénérée à ce jour.

Les causes sont multiples : apports de sédiments importants en provenance des champs de cannes qui sont labourés jusqu'au bord de la mangrove, élagage régulier par des chasseurs (zone de chasse) mais aussi en raison de variations importantes de la circulation de l'eau dues à la gestion du site.

En effet, une entrée d'eau marine est présente à l'est de la mangrove de l'Anse Bélune. Cette entrée était autrefois entretenue afin de permettre des entrées régulières d'eau marine. Aujourd'hui elle est colonisée par des Palétuviers rouge et laisse passer moins d'eau. La conjonction de ces phénomènes provoque une évolution de la structure de la mangrove. Moins d'eau marine entre dans la mangrove et l'apport sédimentaire est très important. Il en résulte un changement des conditions écologiques avec notamment des périodes de sécheresse plus intenses qui modifient le peuplement. Se rajoute l'effet des élagages répétés des chasseurs.

L'ouverture permanente de l'entrée d'eau était artificielle et donc, la structure de la mangrove anciennement présente également artificielle. L'amélioration de la qualité écologique du site passerait par un changement des pratiques agricoles des champs alentours (à minima respecter une bande boisée de 20 m entre les labours et la mangrove par exemple) afin de limiter l'apport de sédiments et laisser en parallèle évoluer l'ouverture vers la mer naturellement. Il faut également cesser de couper systématiquement la régénération. Si un retour de la mangrove à Palétuvier rouge comme du temps où l'ouverture était entretenue est souhaité, il faut également limiter l'érosion (et le défrichement) et faire un choix de gestion en maintenant ouverte artificiellement l'embouchure (ce qui a un coût).

Commune du Robert

Le niveau de pression est plutôt faible sur les mangroves du nord de son territoire et élevé au sud, dans la baie du Robert.

Le niveau de pression est plus faible pour les mangroves aux petits bassins versants majoritairement boisés (Baie de Petit Galion est, Pointe Melon ou encore la Baie de Saintpée).

Le niveau de pression est plus élevé pour les mangroves ayant un bassin versant plus vaste (urbanisation, agriculture intensive), d'autant plus qu'elles se situent dans des contextes immédiats urbains denses comme la mangrove de Trou Terre ou à proximité d'activités industrielles comme la mangrove de la Marina du Robert.

La mangrove de Trou Terre est particulièrement dégradée en raison de sa situation urbaine. Elle reçoit ainsi des eaux usées, du remblai, des macrodéchets, de l'élevage de porcs et des eaux de faibles qualités provenant de l'embouchure de la ravine Gaschette.

La mangrove de la marina du Robert est également dégradée en raison de très nombreux macrodéchets issus notamment de l'abandon d'un ancien quartier et du défrichement de l'arrière mangrove où ont été déposées d'importantes quantités de sargasses en putréfaction.

Les mangroves de Petit Galion sud et sud-est ont un niveau de pression élevé et moyen principalement en raison du grand nombre de macrodéchets présents et, en particulier pour la mangrove de Petit Galion sud, des perturbations de son fonctionnement hydrologique.

La mangrove de Pointe Melon possède un niveau de pression moyen en raison d'une importante quantité de macrodéchets en provenance de la terre (remblais, déchets en tout genre) mais aussi de la mer (déchets plastiques flottants). De plus, deux zones de chasse y sont présentes avec d'importants défrichements (récents).

La mangrove de la Pointe Royale reçoit les eaux usées des immeubles situés à proximité ainsi que de nombreux déchets. Elle est également fréquentée par des chasseurs.

La mangrove de la Baie de Saintpée possède un niveau de pression moyen malgré un indice de pression biblio carto très bas. Les principales pressions s'exercent sur la frange littorale avec de très nombreux pontons « sauvages » qui sont présents. Beaucoup de bateaux sont également amarrés directement à la mangrove en période cyclonique en raison des caractéristiques de la baie très abritée (trou à cyclone).

2.2.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Atlantique nord

Dans l'ensemble les mangroves situées vers les extrémités des pointes, aux petits bassins versants majoritairement boisés, sont plutôt préservées tandis que celles situées en fond de baies, souvent à proximité de l'urbanisation, des grandes cultures et des embouchures sont largement dégradées.

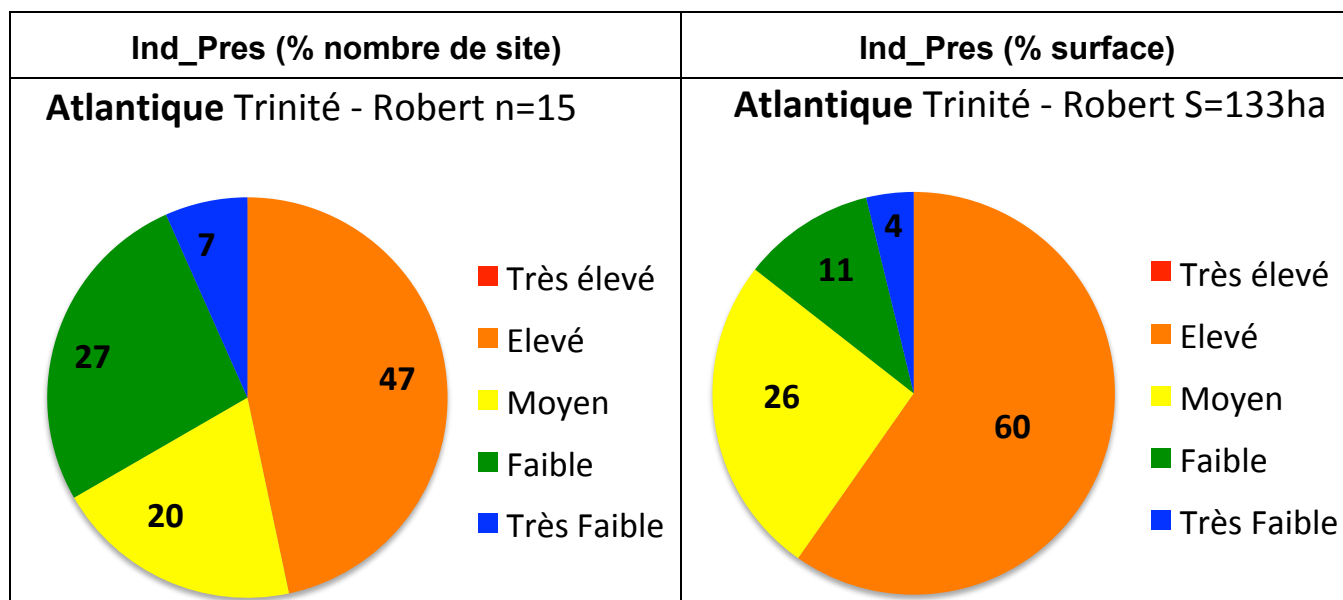
Le Tableau 6 présente la répartition des sites de mangrove selon leur niveau de pression à l'échelle de l'ensemble Atlantique nord en nombre de site et en superficie (ha).

RÉSULTATS

À l'échelle de l'ensemble « Atlantique nord », **15%** de la surface des mangroves (34% des sites) subissent un **niveau de pression faible à très faible**, ce qui est **prés de cinq fois supérieur à la moyenne de Martinique** (prés de trois fois en nombre de site).

60% de la surface des mangroves de l'ensemble Atlantique nord (47% des sites) **ont un niveau de pression élevé ce qui est plus important que la proportion à l'échelle de la Martinique.**

Tableau 6. Répartition des sites de mangrove (%) les plus au nord de la façade Atlantique nord (communes de Trinité et du Robert) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite



2.3 Ensemble Atlantique

2.3.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres

La Figure 8 présente la valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour la façade Atlantique des communes du François, du Vauclin, du Marin et de Sainte-Anne.

L'ensemble des communes de l'Atlantiques est exposé aux arrivages de sargasses. Si toutes les mangroves ne semblent pas envahies, certaines mangroves de fond de baie et au vent sont sévèrement touchées par de la mortalité des palétuviers et donc une dégradation de l'écosystème qu'ils structurent.

Commune du François

Les mangroves de la commune du François ont un niveau de pression le plus souvent moyen à proximité des zones de grandes cultures à élevé (voire très élevé) à proximités des zones urbanisées qui cumulent l'agriculture intensive du bassin versant (en particulier la culture de la banane) et la forte population (eaux usées) comme les mangroves de Mansarde Rancée sud et de la Rivière Desroses.

Les sargasses sont présentes en grande quantité, ainsi que les macrodéchets qui les accompagnent, dans les mangroves de Mansarde Rancée sud, de la Baie de Thalémont (terrain militaire) et de Trou Monnerot.

Les mangroves de Mansarde Rancée sud et de Rivière Desroses sont les plus touchées. Ces deux sites reçoivent d'importantes quantités d'eaux usées plus ou moins bien traitées (origine assainissement et agricole) et de macrodéchets. À ces points communs s'ajoutent d'importantes perturbations hydrologiques et du remblai (déchetterie) pour le site de Desroses qui possède ainsi le niveau maximum de l'indicateur de pression ainsi qu'une accumulation de sargasses en décomposition pour Mansarde Rancée sud.

La mangrove de Mansarde Rancée nord possède un niveau de pression moyen principalement en raison de la présence de nombreux macrodéchets, de rejets issus de l'urbanisation périphérique et de la présence d'une petite zone de chasse entretenue.



Figure 8. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de l'Atlantique (le François, le Vauclin, le Marin, et Sainte-Anne) ; * site expérimental de phase 2

La mangrove de la Baie de Thalémont est un terrain militaire. Elle serait en bon état si elle n'était pas saturée de sargasses en putréfaction et le siège d'un parcours d'entraînement des militaires.

La mangrove de Trou Monnerot possède un niveau d'indice de pression biblio carto faible. Elle est cependant impactée à ses deux extrémités par de l'urbanisation. Le point de dégradation principal se trouve en fond de

RÉSULTATS

baie avec une accumulation de sargasses en putréfaction accompagnée par de nombreux macrodéchets ce qui lui donne au final un niveau moyen pour l'indicateur de pression.

La mangrove de Dostaly nord est plutôt en bon état. Elle est cependant classée avec un niveau moyen de pression en raison de la présence de macrodéchets, de l'écoulement d'une STEU en provenant d'un quartier résidentiel en développement et de la présence d'une clôture qui traverse la mangrove. Sa croissance semble également se différencier de celle de la référence. De l'autre côté de baie, à côté du stade de foot, une accumulation de sargasses en putréfaction provoque une importante mortalité des palétuviers.

Les mangroves de la Baie du Simon recueillent, en plus des écoulements d'un vaste bassin versant cultivé en banane, l'influence de la distillerie du Simon. Elle possède un niveau moyen pour l'indicateur de pression. Cependant, **d'importants rejets semblent être effectués directement dans la mangrove** en arrière de la distillerie. Un peu plus au sud, une grande zone de mangrove est utilisée comme pâturage ce qui détériore la mangrove et l'empêche de se régénérer.

Commune du Vauclin

Les mangroves de la commune du Vauclin ont un niveau de pression moyen à élevé.

Comme pour les mangroves de la commune du François, celles du Vauclin ont un niveau de pression le plus souvent moyen à proximité des zones de grandes cultures à élevé à proximité des zones urbanisées qui cumulent l'agriculture intensive du bassin versant et la forte population (eaux usées) comme la mangrove de la Baie du Vauclin.

Au nord du bourg du Vauclin les mangroves de la Pointe des Sables et du Cul de Sac Petite Grenade ont un niveau de pression moyen. Les principales pressions proviennent de l'urbanisation qui entoure la mangrove de la Pointe des Sables et qui est très dense au sud de la Baie de Sans Souci. La culture de la banane sur les bassins versant est également une source de pression.

Plus au sud, le niveau moyen de pression pour les mangroves de la baie de Massy Massy et du Cul de Sac de Pacquemar nord s'explique notamment par leur isolement écologique par rapport au bassin versant en raison de la présence de pâturages étendus à la totalité de leur périmètre.

Les mangroves les plus touchées par les sargasses sont celles des Baies de Sans Soucis, du Vauclin et de Massy Massy.

La mangrove la plus dégradée est celle de la baie du Vauclin qui cumule d'importantes quantités de macrodéchets, une zone de chasse aménagée, beaucoup de sargasses sur la plage (ramassées et/ou étalées régulièrement) et des apports d'eaux usées.

La mangrove de la Pointe des Sables a un niveau de pression moyen principalement à cause des nombreux macrodéchets et de son isolement écologique.

La vaste mangrove de la Baie de Sans Souci possède un niveau de pression élevé. Cette mangrove est en bon état localement et très impactée à d'autres endroits. Elle reçoit de nombreuses eaux usées et déchets dans sa partie sud. Elle est également impactée par des accumulations de sargasses en putréfaction qui provoquent de la mortalité des palétuviers. Une vaste zone de chasse aménagée est également présente dans sa partie nord.

La mangrove de la Baie de Massy Massy, possédant un niveau de pression moyen, est divisée en deux entités. La première en fond de baie est impactée par les sargasses en décomposition. La seconde partie qui couvre le nord de la baie est elle plutôt en bon état à l'exception de la mangrove à Palétuvier noir qui est pâturée par un grand troupeau de bovins. Cela provoque le piétinement et le « broutage » des plantules et petits individus de Palétuviers noir freinant la dynamique naturelle de fermeture du couvert.

La mangrove du Cul de Sac de Pacquemar nord possède un niveau de pression moyen. Cette vaste mangrove est plutôt en bon état. Cependant l'embouchure de la ravine a été fortement modifiée et un troupeau de bétail piétine et broute régulièrement les Palétuviers noirs sur sa bordure nord-est. De plus, une très vaste zone de chasse entretenue (nombreux défrichements) est présente.

Les mangroves du Cul-de-Sac de Pacquemar sud et du Cul-de-Sac de Petite Grenade possèdent un niveau de pression moyen. La mangrove du Cul-de-Sac de Pacquemar sud est longée en grande partie par de la forêt sèche ce qui lui apporte une bonne continuité écologique. Une zone de chasse aux multiples défrichements est cependant présente, surtout sur sa partie est.

Commune du Marin

La façade Atlantique du Marin ne compte qu'une seule mangrove étudiée. Son niveau de pression est moyen principalement en raison des macrodéchets et de la fréquentation de ses tannes par des véhicules.

Concernant les sargasses, une importante accumulation en putréfaction qui a entraîné de la mortalité des palétuviers est observable en face du site étudié, en fond de baie.

Commune de Sainte-Anne

La façade Atlantique de Sainte-Anne est relativement isolée de l'urbanisation et de l'agriculture intensive. Les trois mangroves inventoriées ont ainsi un niveau de pression faible à moyen.

Excepté la présence d'une grande zone de chasse, la mangrove de la baie des Anglais est plutôt en bon état. Les contacts avec les zones boisées environnantes sont multiples ce qui assure une bonne continuité écologique. Quelques activités touristiques sont présentes sur la plage de la pointe sud où des braconniers d'oursins blancs ont été croisés.

La mangrove de l'anse Trabaud a été divisée en deux sous unités de part et d'autre du chemin d'accès à la plage. Naturellement, cette mangrove devrait être d'un seul tenant. Elle est cependant coupée en deux (isolement hydrologique) par le chemin d'accès à la plage. **Un rétablissement de la circulation de l'eau entre les deux côtés serait souhaitable pour restaurer son fonctionnement hydrologique.**

La partie est de l'anse Trabaud, qui donne sur la Baie des Anglais, **reçoit une très grande quantité de sargasses**, et de macrodéchets qui les accompagne, qui sont piégés par le vent et les courants qui empêchent leur retour vers la mer. Ces sargasses se décomposent et entraînent une importante mortalité des palétuviers.

2.3.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Atlantique

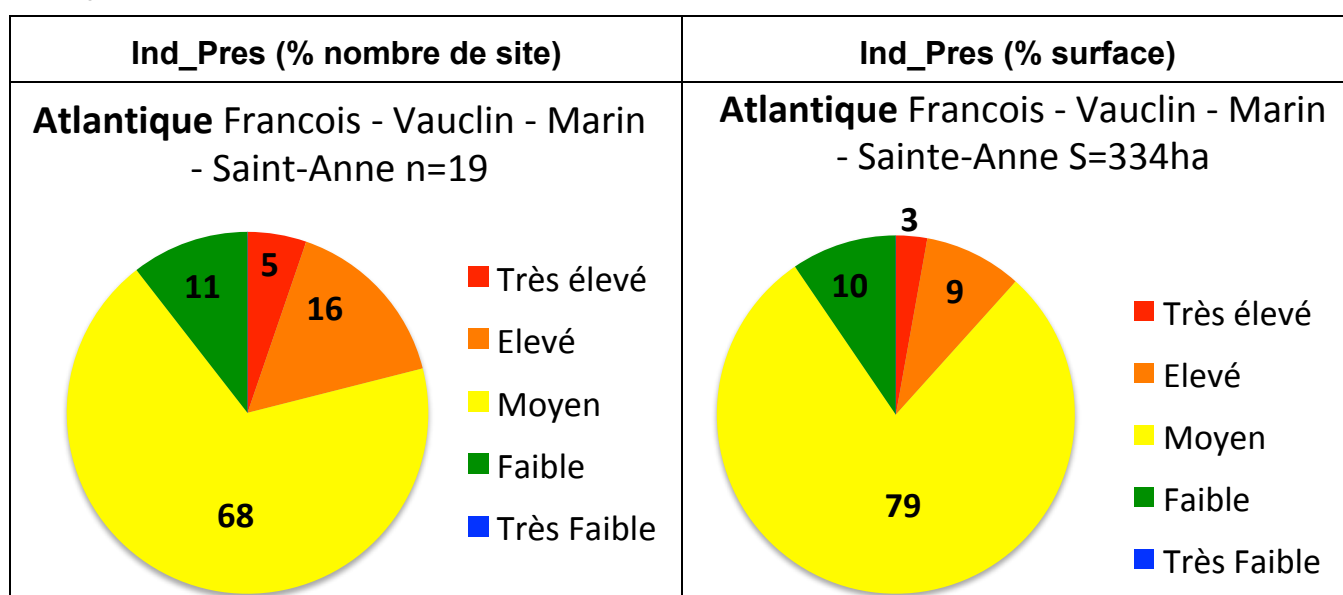
Dans l'ensemble, plus on descend vers le sud Atlantique, moins le niveau de pression est élevé (moins d'urbanisation et de grandes cultures) et par conséquent, plus le niveau de pression est faible et plus l'état de conservation des mangroves est bon. Localement, la présence de sargasses en putréfaction et la présence de zones de chasse entretenues, parfois très vastes, peuvent nuancer cette tendance.

Le Tableau 7 présente la répartition des sites de mangrove selon leur niveau de pression à l'échelle de l'ensemble Atlantique en nombre de site et en superficie (ha).

À l'échelle de l'ensemble « Atlantique », **10% de la surface des mangroves subissent un niveau de pression faible**, ce qui est près **de cinq fois supérieur à la moyenne de Martinique**. Cependant, en nombre de sites (11%) cette proportion est assez proche de celle de l'ensemble de la Martinique.

Seulement 12% de la surface des mangroves (21% des sites) de la façade Atlantique montre un niveau de pression élevé ce qui est bien plus faible qu'à l'échelle de la Martinique (52%).

Tableau 7. Répartition des sites de mangrove (%) les plus au nord de la façade Atlantique (communes du François, du Vauclin, du Marin et de Sainte-Anne) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite



2.4 Ensemble Sud Caraïbes

2.4.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres

La Figure 9 présente la valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour l'ensemble Sud Caraïbes qui rassemble les communes de Sainte-Anne, du Marin, de Rivière-Pilote, de Sainte-Luce et du Diamant.

Sainte-Anne

Quatre sites de mangrove ont été étudiés sur la façade Caraïbes de Sainte-Anne.

Deux sites de mangroves ont un niveau de pression élevé, Canal O'Neill sud et Pointe Marin (Belfond), et deux dans un état moyen, Pointe Cailloux et Anse Meunier.

La mangrove de l'anse Meunier, malgré un niveau de pression biblio carto faible, apparaît cependant avec un niveau moyen de l'indicateur de pression en raison des très importantes perturbations de son fonctionnement hydrologique, de nombreux macrodéchets (forte fréquentation de la plage et arrière plage) et de la présence d'une zone de chasse. En effet, cette mangrove s'est réimplantée à la suite de l'arrêt de l'exploitation du sel. Il reste aujourd'hui les anciennes infrastructures qui perturbent la circulation de l'eau dans la mangrove ainsi que le canal qui la relie à l'étang des Salines. Ce dernier, est en constante évolution du fait de l'absence d'entretien. Un choix doit être fait (ouverture et entretien ou abandon du canal) pour pérenniser le retour de la mangrove et assurer une stabilité de son fonctionnement hydrologique. Il en est de même avec le cordon sableux de l'exutoire qui a souvent été artificiellement ouvert mais qui, en réalité, ne doit céder naturellement que quelques fois dans l'année, lors de fortes précipitations (et/ou fortes houles). Comme pour le canal, c'est un choix de gestion qui doit être fait et qui doit être respecté à long terme si l'on souhaite maintenir un écosystème « stable ».

La mangrove de la Pointe Marin, aussi appelée Belfond et au niveau de pression élevé, a servi de référence en phase 2. Elle connaît trois principales dégradations : du remblais qui continue actuellement sur la partie amont, un rejet d'eaux usées issues de la STEU directement dans la partie est du site, qui provoque notamment une croissance anormalement forte des palétuviers rouges, et un très grand nombre de macrodéchets.

La mangrove de Canal O'Neill sud possède également un niveau de pression élevé. De nombreux bateaux à l'ancre (et épaves) et une importante perturbation de son fonctionnement hydrologique y sont présents. La partie nord de la mangrove de Canal O'Neill sud possède de nombreux déchets apportés par les crues de la rivière Mastor.

La mangrove de Pointe Cailloux possède un niveau de pression moyen. Des macrodéchets, de nombreux bateaux à l'ancre (et épaves) et des perturbations du fonctionnement hydrologique ont été constatés sur le site. La partie nord de la mangrove de la Pointe Cailloux abrite une zone de chasse.

Le Marin

Les deux mangroves étudiées de la commune du Marin subissent un niveau de pression moyen à élevé.

Les pressions proviennent principalement de l'urbanisation environnante et de l'activité portuaire très intense dans la baie.

Deux petits sites de mangroves sont également présents de part et d'autre de la zone de carénage. L'un des deux, coincé entre l'urbanisation et l'ouest de la zone de carénage devait être étudié mais son accès a été impossible (Trou Manoel est). Il semble actuellement subir un niveau de pression très important entre le défrichement et les rejets de la zone industrielle.

La mangrove qui recouvre le nord du Canal O'Neill, possédant un niveau de pression élevé, est largement remblayée, que ce soit à proximité de la route ou au niveau du stade de foot. Elle abrite également un squat et de nombreux macrodéchets. La circulation de l'eau y est perturbée notamment (en plus des remblais) par les vestiges d'une digue sur laquelle repose un ancien chemin de fer.

La mangrove de Trou Manoel, possédant un niveau de pression moyen, est en aval d'une ravine dont la qualité des eaux est douteuse. Son embouchure a largement été remaniée. Le site possède de très nombreux macrodéchets, notamment sur sa frange littorale qui reçoit les déchets flottants provenant de la zone portuaire et qui sont poussés par le vent. La mangrove, et particulier la zone de Palétuvier noir est utilisée comme pâturage pour les bovins. Ils consomment les feuilles de Palétuvier noir et empêchent leur régénération ainsi que la colonisation naturelle de la tanne située en arrière.

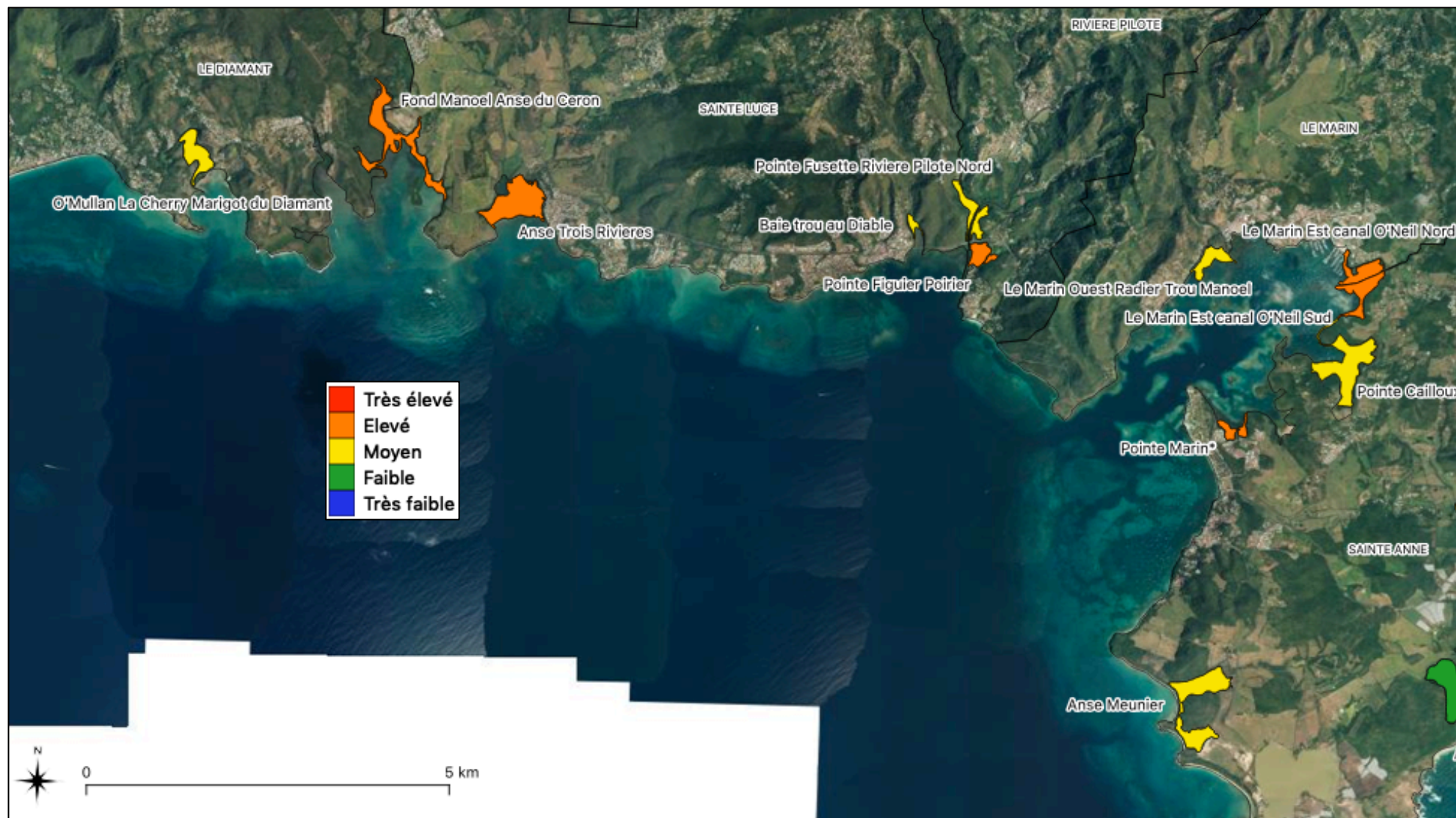


Figure 9. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves du Sud Caraïbes (Sainte-Anne, Le Marin, Rivière-Pilote, Sainte-Luce et Le Diamant) ;* site expérimental de phase 2

Rivière-Pilote

Deux sites de mangrove ont été étudiés en rive droite de la Rivière-Pilote : la partie aval au niveau de la pointe Figuier et la partie amont, au dessus de la route nationale. Ces deux portions formaient un ensemble qui a été divisé en deux par la route.

La mangrove de la Pointe Figuier, située à proximité de l'embouchure de la rivière Pilote, possède un niveau de pression élevé en raison des nombreuses perturbations de son fonctionnement hydrologique qu'elle subit, notamment au niveau des routes, mais aussi de la présence du port (et des activités associées) et de nombreux rejets et macrodéchets. Un hangar se trouve en bordure de mangrove et de route, au nord du site. De nombreux déchets, dont de l'huile de vidange et des batteries usagées, sont jetés directement dans la mangrove depuis cette propriété.

La portion située en amont de la route nationale, possédant un niveau de pression moyen, est moins dégradée. Elle reçoit cependant des macrodéchets charriés par la rivière et les écoulements des eaux pluviales en provenance de la route. La croissance de la mangrove semble vigoureuse sur cette partie à plus faible salinité.

Sainte-Luce

Les quatre principaux sites de mangrove de la commune ont été expertisés. Les deux mangroves situées à l'est du bourg ont un niveau de pression moyen tandis que les deux situées à l'ouest ont un niveau de pression élevé.

La portion de mangrove située sur la rive droite de la Rivière Pilote possède un niveau de pression moyen en raison principalement des macrodéchets charriés par la rivière et les écoulements des eaux pluviales en provenance de la route. Une ancienne canalisation d'eau abandonnée est présente en bord de falaise ainsi qu'au milieu de la mangrove. La croissance de la mangrove semble vigoureuse sur cette partie à plus faible salinité.

La mangrove de la baie de Trou à Diable possède également un niveau de pression moyen principalement en raison d'importantes perturbations du fonctionnement hydrologique et de la présence de très nombreux macrodéchets charriés par la rivière.

La mangrove de Trois Rivières, qui possède un niveau de pression élevé, se situe en aval d'un important bassin versant habité, cultivé en canne à sucre et est largement aménagée (port, zone de chasse...). Des aménagements portuaires mais surtout la présence de très nombreux macrodéchets et une zone de chasse aménagée sont les pressions observées sur le site. La partie amont, en aval de la rhumerie Trois Rivières est fortement remaniée avec la présence de canaux et bassins artificiels.

La mangrove de Fond Manoel est à cheval sur les communes de Sainte-Luce et du Diamant. Les deux principales sources de pression situées en amont sont le site de « traitement » des VHU et « l'ancienne » décharge de Céron. Située en limite de la décharge de Céron, la mangrove de Fond Manoel possède un niveau de pression élevé. Directement en aval (et sous le vent) de la décharge, de nombreux macrodéchets et lixiviats sont présents. La mangrove possède également une large zone d'étang bois sec parsemée de cadavres d'arbres qui trahissent la présence ancienne d'une mangrove boisée haute. Cette mangrove a disparue suite à une conjonction de plusieurs facteurs : exploitation de deux carrières sur le lit de la ravine, développement de la décharge et importants dégâts suite au passage du cyclone Dean sur cette mangrove fragilisée. Actuellement la recolonisation naturelle est en cours mais elle est freinée par des personnes qui élaguent systématiquement la régénération des palétuviers (principalement des Palétuviers blancs). Il s'agit probablement de chasseurs qui veulent maintenir la zone en vasière (des aménagements sommaires sont présents : postes de chasses avec cartouches au sol, passages en bois au dessus de la ravine...).

Le Diamant

La commune du Diamant compte deux sites étudiés dans cette étude, Fond Manoel qu'elle partage avec Sainte-Luce et qui a été évoquée plus haut et le site de O'Mullan La Cherry. Ce dernier, située à l'embouchure de la ravine Fond Placide, possède un niveau de pression moyen.

Elle est plutôt dans un bon état sur sa partie aval. En revanche, plus en amont une large zone semble avoir été détruite en partie par le passage du cyclone Dean. De très nombreux macrodéchets sont présents apportés par la ravine et aussi par la route nationale en contrebas de laquelle se retrouvent divers déchets : batteries usagées, épaves... Phénomène original pour les mangroves de Martinique : la limite sud-est de la mangrove est constituée par une falaise.

2.4.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Sud Caraïbes

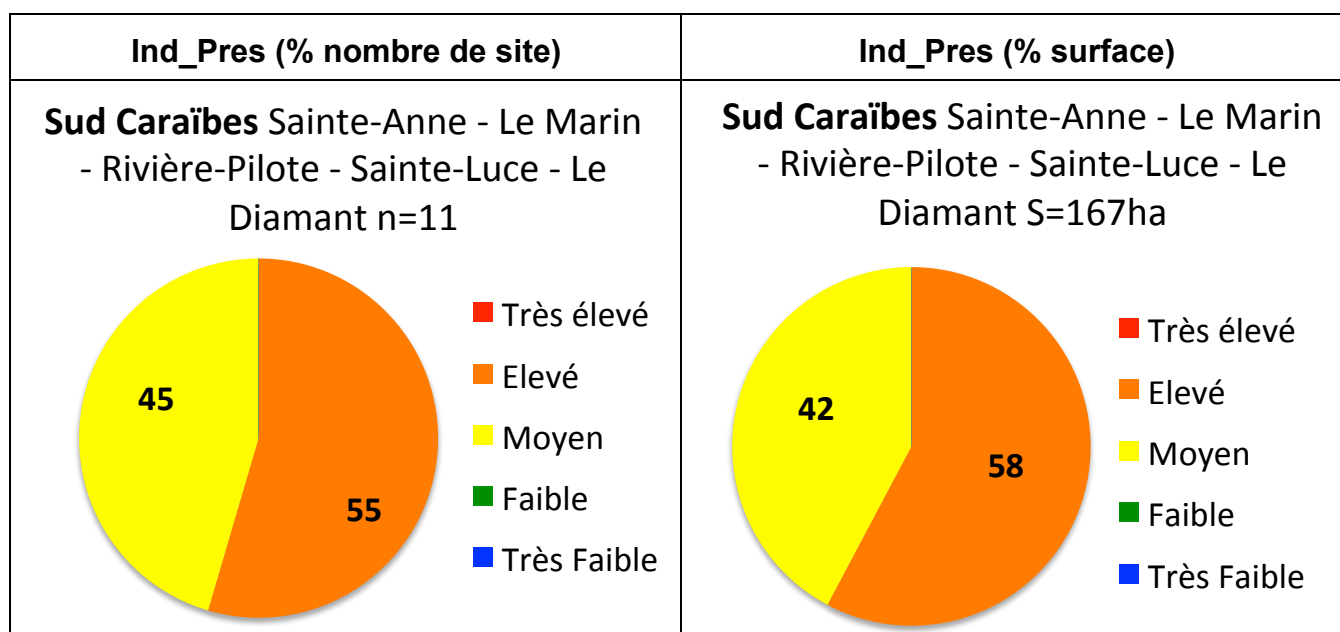
De manière générale, les mangroves de l'ensemble Sud Caraïbes sont souvent situées à proximité de zones habitées et d'activités industrielles, à l'exception de l'Anse Meunier. Cette proximité avec des zones fortement peuplées en fait des sites très sollicités.

Le Tableau 8 présente la répartition des sites de mangrove selon leur niveau de pression à l'échelle de l'ensemble Sud Caraïbes en nombre de site et en superficie (ha).

À l'échelle de l'ensemble sud Caraïbes, l'ensemble des sites ont un niveau d'indicateur de pression moyen à élevé. **58% de la surface des mangroves subissent ainsi un niveau de pression élevé**, ce qui est plus élevé que la moyenne de Martinique (45%).

Aucun site n'a un faible niveau de pression.

Tableau 8. Répartition des sites de mangrove (%) du Sud Caraïbes (communes de Sainte-Anne, du Marin, de Rivière-Pilote, de Sainte-Luce et du Diamant) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite



2.5 Ensemble Baie de Fort-de-France

2.5.1 Bilan par commune de l'indicateur de pression Ind_Pres

Contrairement aux précédentes mangroves, il s'agit ici dans la plupart des cas de mangroves alluvionnaires à l'exception des deux mangroves plutôt de type colluvionnaire qui n'ont pas fait l'objet d'une expertise de terrain (mangrove de la Pointe Bois d'Inde et dans une moindre mesure, la mangrove de la Pointe Vatable).

La géographie de la baie de Fort-de-France protège la frange littorale de ses mangroves de l'arrivée de sargasses et de la plupart des déchets marins flottants poussés par le vent d'est et les courants vers l'extérieur de la baie.

La Figure 10 présente la valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour l'ensemble des mangroves de la Baie de Fort-de-France qui rassemble les communes des Trois-Ilets, de Rivière-Salée, de Ducos et du Lamentin.

Trois-Ilets

La commune des Trois-Ilets se situe au sud-ouest de la baie. Les bassins versants y sont moins vastes et plus secs que le reste de la baie. Quatre sites de mangroves ont été étudiés pour l'indice de pression biblio carto et deux expertisés sur le terrain.

Le niveau de pression est très faible pour la mangrove de pointe Bois d'Inde protégée par un petit bassin versant boisé.

RÉSULTATS

Deux sites ont été fait l'objet d'une expertise de terrain sur la commune : la mangrove du Village de la Poterie et celle de Four à Chaud ouest.

La mangrove du Village de la Poterie, qui subit la pression des activités de carrière et du développement des activités économiques de la zone, possède un niveau de pression élevé en raison des remaniements liés à l'exploitation de la carrière qui perturbe le fonctionnement hydrologique mais aussi par les développements de bâtiments qui empiètent sur la mangrove. Plusieurs percées à travers la mangrove sont également présentes, notamment pour l'installation d'un ponton flottant. Une zone de chasse occupe les zones anciennement exploitées par la carrière.

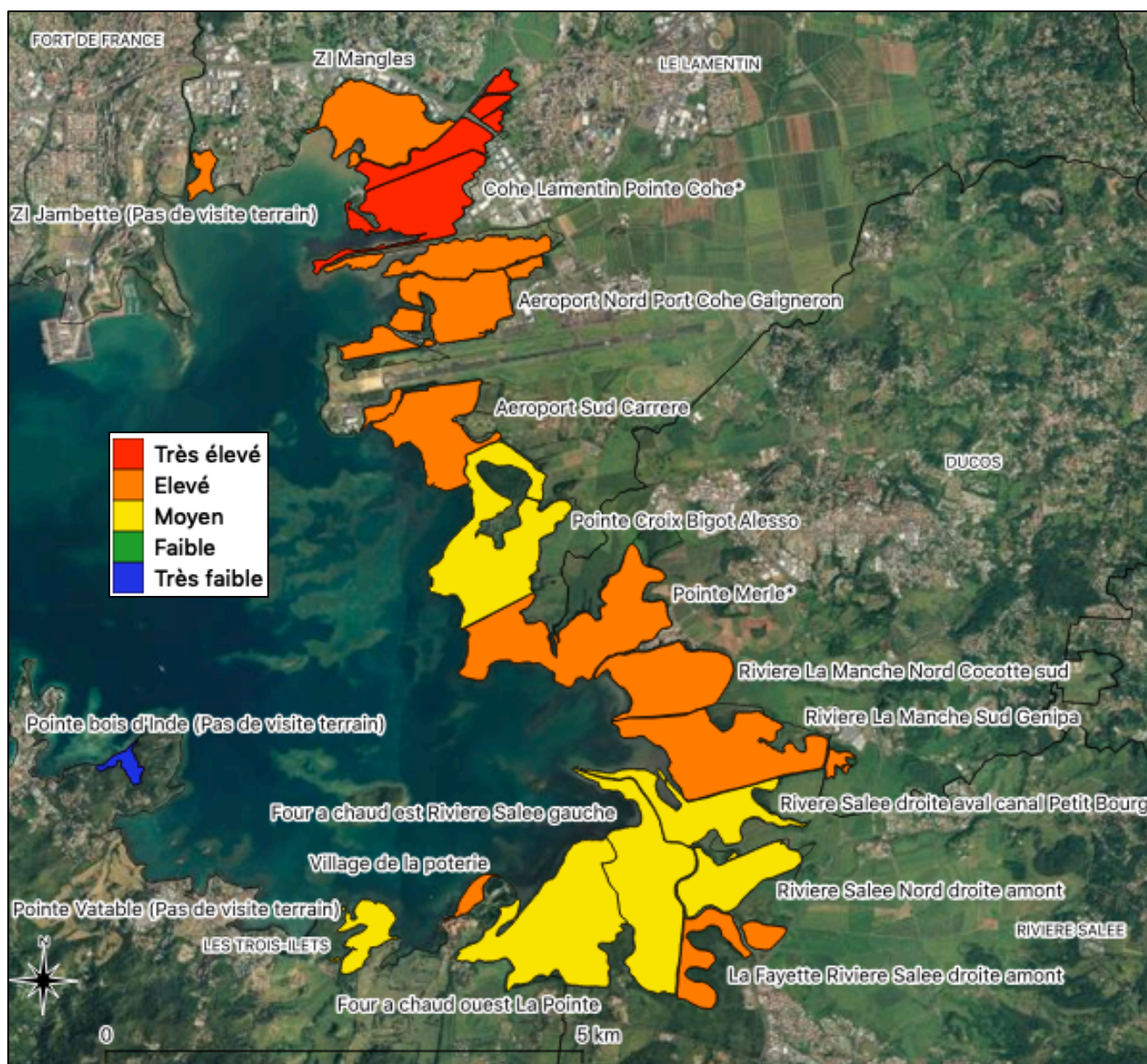


Figure 10. Valeur de l'indicateur de pression Ind_Pres pour les mangroves de la Baie de Fort-de-France (Trois-Ilets, Rivière-Salée, Ducos et Le Lamentin)

Les pressions de la mangrove de Four à Chaud ouest - La Pointe proviennent quand à elles de l'arrière mangrove qui est largement remaniée pour la culture de la canne à sucre et l'élevage. Cette mangrove, la plus étendue de la commune, possède un niveau de pression moyen. Si assez peu de macrodéchets sont présents par rapport à d'autres sites, la mangrove est impactée par des modifications anciennes de son fonctionnement hydrologique. En effet, de nombreux canaux artificiels qui drainent l'arrière mangrove sont présents. Une digue est également présente en limite extérieure. Elle est le support d'une ancienne voie de chemin de fer abandonnée. Cette vaste digue, qui s'étend du Village de la Poterie jusqu'à Rivière Salée, est perméable uniquement au passage des canaux qui drainent l'eau des prairies et cultures amont vers la mangrove. La mangrove, s'est adaptée à cette situation et présente des peuplements de palétuviers remarquables.

RÉSULTATS

Cependant, cette digue perturbe le fonctionnement du bassin versant et ralentie l'évacuation de l'eau vers la mangrove lors des fortes pluies. L'eau est alors concentrée au niveau des canaux artificiels ce qui augmente l'érosion du sol et provoque des goulets d'étranglement qui peuvent accélérer la vitesse de l'eau localement. Au lieu d'être diffus, l'écoulement est concentré. Outre la culture de la canne à sucre, une intense activité apicole est présente sur le site.

Rivière-Salée

L'ensemble des mangroves de la commune est compris dans l'étude, soit quatre sites voir cinq si on ajoute le site de Four à Chaud ouest qui est à cheval sur la commune de Trois-Ilets.

Les mangroves de la commune ont un niveau de pression moyen à élevé. La majeure partie des pressions provient du bassin versant (activités agricoles industrielles, forte population, eaux usées...).

La mangrove de Rivière Salée nord possède à un niveau de pression élevé en raison des pressions de l'arrière mangrove qui s'ajoutent à celles du bassin versant.

Toutes les mangroves de la commune sont le siège d'une activité apicole soutenue.

L'action de l'ancienne digue décrite pour le site de Four à Chaud ouest (commune de Trois-Ilets) se poursuit sur la mangrove de Four à Chaud est - Rivière Salée gauche.

L'arrière mangrove du site de la Fayette est le siège de jardins créoles et de pâturages. Le relief semble protéger la mangrove située en aval.

La mangrove située au nord en amont de la Rivière Salée est assez dégradée en raison de la présence d'une activité agricole soutenue en arrière mangrove, canne à sucre au nord et élevage au sud. Le fonctionnement hydrologique de la zone est aussi perturbé par la canalisation de la rivière Salée et les différents drains installés au niveau des champs.

La mangrove située au nord de la Rivière Salée, en aval du canal de Petit Bourg est dans la même situation que la précédente avec d'avantage de macrodéchets notamment au bout de la piste menant au canal de Petit Bourg.

Ducos

Comme pour Rivière Salée, l'ensemble des mangroves qui jouxtent la commune est compris dans l'étude et possèdent un niveau de pression élevé. Le site de la Pointe Merle à par ailleurs servi de référence au cours de la phase 2.

L'origine du niveau de pression élevé provient des bassins versants et de l'arrière mangrove. Les bassins versant qui sont très peuplés (eaux usées et hydrocarbures notamment) et qui sont exploités pour la canne à sucre. Concernant l'arrière mangrove, elle est très impactée, que ce soit par la zone industrielle de Génipa, le quartier Canal Cocotte, la culture intensive de la canne à sucre où par la présence de larges zones de chasse aménagées.

La mangrove de la Pointe Merle est partagée entre la commune de Ducos et celle du Lamentin. L'origine principale des pressions se situe également sur le bassin versant mais surtout sur le sud-est de l'arrière mangrove, entre le canal Cocotte et la prison. En effet, cette partie de l'arrière mangrove est le siège d'une agriculture intensive de la canne et reçoit les eaux usées de la zone d'activité de Champigny. Bien que l'arrière mangrove de la seconde partie de cette mangrove ne soit pas boisée, le niveau de pression y est tout de même moins important en raison de la présence d'un élevage extensif de bovins et non d'une zone d'activités.

La mangrove de Rivière la Manche Sud Génipa est notamment fortement impactée par la zone industrielle de Génipa qui empiète sur sa partie amont. De nombreuses eaux usées s'écoulent de cette zone industrielle dans la mangrove. Beaucoup de macrodéchets y sont également présents. De plus, les parties de l'arrière mangrove qui ne sont pas occupées par la zone industrielle sont le siège de deux vastes zones de chasse. La circulation de l'eau au sein de ces dernières est modifiée afin de créer des étendues d'eau artificielles et ainsi attirer les oiseaux.

La mangrove de Cocotte sud est dans l'ensemble plutôt en bon état à l'exception de la zone d'arrière mangrove située en limite du quartier Cocotte et qui se poursuit par un chemin de terre. À ces endroits, l'arrière mangrove est le siège de relargages d'eaux usées et de nombreux macrodéchets. Les dépôts sauvages de déchets sont nombreux le long du chemin de terre qui longe l'arrière mangrove.

La portion de la mangrove de Pointe Merle, comprise entre le canal Cocotte et la prison située dans la zone d'activité de Champigny, est la plus atteinte. Au niveau du quartier Cocotte de nombreux déchets (notamment liés aux activités nautiques et portuaires) et eaux usées partent directement dans la mangrove. La partie située au nord du quartier Cocotte est marquée par la présence d'une piste surélevée qui perturbe la circulation de l'eau entre la zone de champs et la mangrove. De très nombreux déchets sont aussi présents entre le stade de football et la fin de la piste où se trouve une propriété jonchée de déchets et VHU. La partie nord a largement

RÉSULTATS

souffert lors du passage du cyclone Dean. La mangrove y est actuellement en reconstruction sous un épais tapis de lianes.

La partie d'arrière mangrove de la Pointe Merle, occupée par un élevage bovin, au lieu-dit Château d'Alesseau, correspond à l'ancien lit de la Rivière Lézarde dont l'ancien tracé constitue toujours la limite entre les communes de Ducos et du Lamentin. Cette zone est le témoin des profondes modifications hydrologiques qu'a subies l'arrière mangrove (et de la mangrove attenante) dans les années 1930 avec la déviation de la rivière Lézarde. La structure de la mangrove qui est présente aujourd'hui est le résultat de l'adaptation de cette formation à la modification très importante de la circulation de l'eau dans la zone.

Le Lamentin

L'ensemble des mangroves du Lamentin est concerné par l'indicateur de pression. Les pressions en provenance du milieu marin adjacent sont croissantes plus on va vers le nord de la commune.

Les deux mangroves situées au sud de l'aéroport restent relativement isolées. Elles sont concernées principalement par des pressions agricoles et d'occupation de l'arrière mangrove et du bassin versant.

La mangrove de Croix Bigot, qui possède un niveau de pression moyen, reste en assez bon état, les modifications anciennes de son hydrologie (déviation de la Lézarde) mises à part. Cependant l'absence de boisements en arrière mangrove et la présence d'une zone de chasse, siège de défrichements importants, en son cœur impactent l'état de cette mangrove.

La mangrove du sud de l'aéroport possède un niveau de pression élevé notamment en raison de la modification de son fonctionnement hydrologique entraînée par les nombreux aménagements situés en arrière mangrove dont l'aéroport. Un stand de tir occupe et bloque l'accès à l'arrière mangrove.

La mangrove Nord aéroport Port Cohé Gaigneron est subie un niveau de pression élevé que ce soit en provenance du bassin versant, de l'arrière mangrove ou du milieu marin adjacent. En effet cette zone de mangrove est délimitée par la rivière Lézarde canalisée au nord, la rocade à l'est et l'aéroport au sud. Elle est également le siège de la marina de Port Cohé en cours de réhabilitation. Son bassin versant est largement peuplé et occupé par de l'agriculture intensive (canne à sucre + banane). Elle subit de très importants remaniements de son fonctionnement hydrologique par la présence de l'aéroport et de la canalisation de la rivière Lézarde notamment. Beaucoup de macrodéchets et liquides usagés (huile de vidange...) sont présents autour de la marina de Port Cohé. De plus, cette portion de mangrove est parcourue par trois zones de chasse aménagées aux défrichements récents.

Au nord de la Rivière Lézarde, la mangrove de la Cohé du Lamentin (site référence de phase 2) et la mangrove de la zone industrielle des Mangles sont toutes deux « coincées » entre des zones très urbanisées et industrialisées (notamment ZI des Mangles et de la Lézarde) et un milieu marin adjacent très sollicité. Leur bassin versant est également source de fortes pressions (urbanisation, eaux usées et agriculture industrielle). La mangrove de la Cohé du Lamentin abrite aussi la base nautique du morne Cabrit.

La mangrove de la Cohé de Lamentin possède le niveau de pression maximum. L'arrière mangrove est occupée par la vaste zone industrielle de la Lézarde qui rassemble de nombreuses activités polluantes (casse auto, traitement des eaux, usine à béton...). Une très grande quantité de macrodéchets est présente en arrière mangrove et même plusieurs dizaines de mètres à l'intérieure de la mangrove, notamment au niveau de la casse auto et en bordure de la route qui mène au morne Cabri. Il en est de même au niveau du quartier Vieux Pont, en amont de la rocade.

Par ailleurs, la route qui mène au morne Cabri constitue une importante perturbation de la circulation de l'eau au sein de la mangrove sous forme d'une digue. Au niveau de la base nautique, de nombreux bateaux sont directement amarrés dans la mangrove, certains abandonnés. Enfin, le sud de ce massif de mangrove est occupé par une zone de chasse où les défrichements de la mangrove sont importants pour éviter sa progression et ainsi éviter la fermeture de la vasière.

La mangrove située en aval de la zone industrielle des Mangles possède un niveau de pression élevé. De très nombreux macrodéchets sont présents dans la mangrove. Ils sont charriés en particulier par les écoulements des eaux pluviales de la zone industrielle qui se jettent directement dans la mangrove.

De plus, cette mangrove recueille une quantité très importante d'eaux usées, plus ou moins traitées selon les cas. Ainsi, on peut citer les rejets très importants (très gros débit) de la STEU d'Acajou (située derrière la Galéria) qui partent dans la mangrove en arrière du magasin Darty ou encore un poste de refoulement non fonctionnel qui déborde directement dans la mangrove au niveau de l'entrée ouest de la zone industrielle. A ceci s'ajoutent les rejets des eaux usées des diverses entreprises. Tous ces apports d'eau douce dans la mangrove, en plus des polluants, entraîne une modification de la salinité de la mangrove. Un rapide coup d'œil sur les photos aériennes des dernières années (2006 - 2010 - 2017) suffit pour constater le recul et la dégradation des mangroves de la ZI des Mangles, en particulier dans l'axe de l'écoulement issu de la STEU d'Acajou. Cette mangrove a certes été impactée comme beaucoup d'autre par le cyclone Dean mais son

RÉSULTATS

dépérissement actuel est très probablement dû à ces importants apports artificiels d'eau douce qui modifient le milieu.

Ces observations sont également valables pour la partie ouest du massif, en face de l'actuel magasin Décathlon où un recul de la mangrove est observable.

La zone la plus dégradée de la mangrove des Mangles fait l'objet de programmes de restauration (plantations) menés par l'ONF (financement compensation : Cacem et CTM).

La mangrove de la Jambette, qui n'a pas fait l'objet d'expertise de terrain, possède également un niveau de pression élevé. En plus des caractéristiques citées pour les deux mangroves précédentes, elle est « coincée » entre l'ancienne décharge de la Trompeuse et la raffinerie (Sara).

2.5.2 Bilan du niveau de pression que subissent les mangroves de l'ensemble Baie de Fort-de-France

Les mangroves de la Baie de Fort-de-France représentent 66% de la surface des mangroves inventoriées en Martinique au cours de cette étude et 60% de la surface totale des mangroves de Martinique. Leur poids dans le bilan à l'échelle de l'île est donc important.

Dans l'ensemble, la mangrove subie un niveau de pression moindre au sud de la Baie de Fort-de-France, dans la Baie de Génipa. La partie nord, la Baie de la Cohé du Lamentin, est plus impactée.

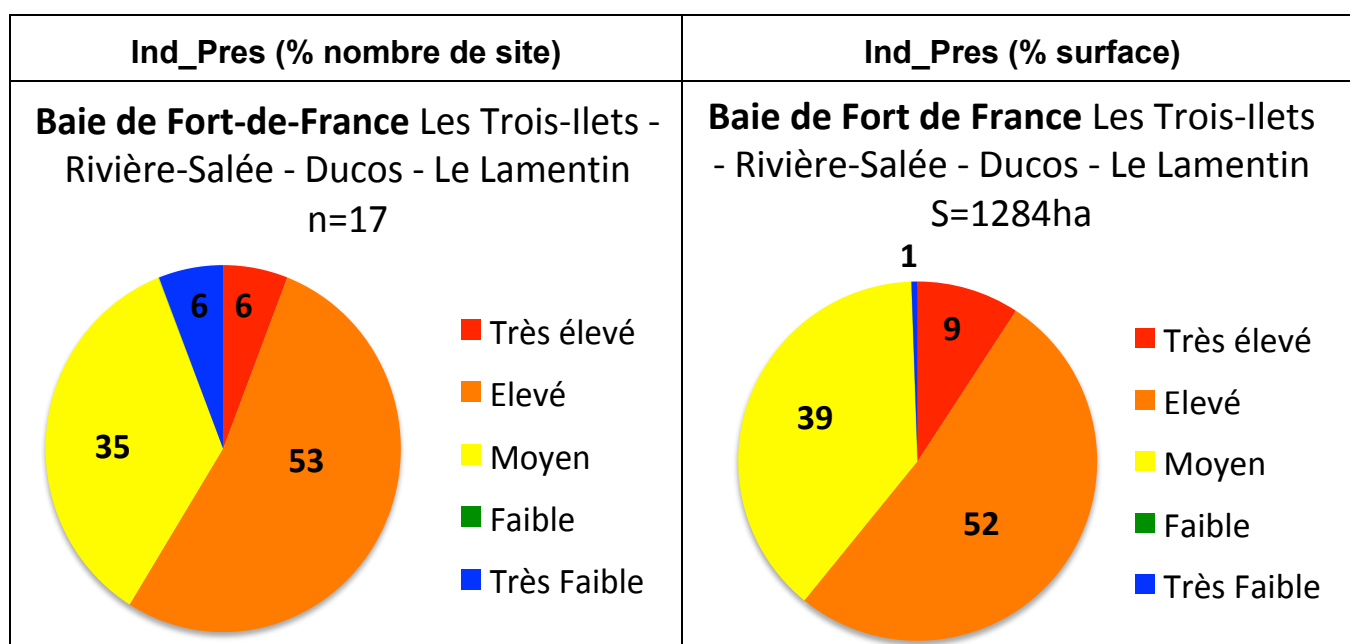
Une des caractéristiques marquante des mangroves du nord de la baie est leur isolement écologique par rapport à leurs bassins versants respectifs avec **l'absence totale de corridor écologique**. Ces mangroves sont véritablement des îlots de végétation complètement coupée des milieux naturels de l'amont par une dense urbanisation. Les rares zones non urbanisées sont occupées par de l'agriculture industrielle. Cet isolement est renforcé par l'absence de ripisylve le long des parties aval des cours d'eau, en particulier le long de la rivière Lézarde.

Dans la partie sud de la baie, il en est de même, **aucune mangrove n'est en contact direct avec une formation boisée de terre ferme**. L'effet est légèrement moins important qu'au nord puisque la barrière est principalement faite de cultures de canne à sucre et non de zones industrielles.

Une autre particularité de la baie est la présence d'une intense activité apicole dans la mangrove, en particulier sur la partie sud de la baie. Un vaste rucher est même présent en arrière de la casse auto de la Lézarde, dans la mangrove à Palétuviers noirs.

Le Tableau 9 présente la répartition des sites de mangrove selon leur niveau de pression à l'échelle de la Baie de Fort-de-France en nombre de site et en superficie (ha).

Tableau 9. Répartition des sites de mangrove (%) du Sud Caraïbes (communes des Trois-Îlets, de Rivière-Salée, de Ducos et du Lamentin) en fonction de la valeur de leur indicateur de pression Ind_Pres suivant le nombre de site à gauche et suivant les surfaces (ha) à droite



RÉSULTATS

À l'échelle de la Baie de Fort-de-France, seulement **1% de la surface et 6% des sites de mangrove subissent un niveau de pression faible** ce qui est nettement inférieur à la moyenne de l'ensemble de la Martinique.

52% de la surface des mangroves (53% des sites) de la Baie de Fort-de-France ont **un niveau de pression élevé et 9% de sa surface possède un niveau de pression très élevé** (6% des sites). Ces valeurs sont plus élevées que celles à l'échelle de la Martinique.

D. Discussion

1 Bilan de l'état de santé des mangroves de Martinique

Ce travail a permis d'évaluer le niveau de pression que subissent ces écosystèmes aux multiples services écosystémiques. L'état de santé des mangroves de Martinique a pu être appréhendé grâce aux nombreuses expertises de terrain. Cinquante neuf sites de mangroves, les plus vastes, mais aussi les plus représentatifs de la diversité morphologique des mangroves de Martinique ont été expertisés tandis que les pressions en provenance des bassins versants et du milieu marin adjacent ont été étudiées sur soixante deux sites.

Cette vue d'ensemble a permis de mettre en évidence un écosystème pris en tenaille entre le développement de l'urbanisation, des activités industrielles et des grandes cultures en amont et les pressions venues du milieu marin adjacent proche (ex : activités portuaires) et lointain (ex : sargasses, une partie des déchets flottants...). Ce milieu original qui fait la transition entre les milieux terrestre et marin se retrouve donc au centre de très nombreuses pressions auxquelles s'ajoute la pression foncière qui convoite les zones planes, rares à l'échelle de l'île.

Les nombreuses techniques testées au cours de la phase 2 dans le but de définir des descripteurs pertinents de l'état de santé biologique des mangroves ont montrées la complexité de mettre en évidence des paramètres facilement mesurables et peu coûteux ayant un sens au regard de la grande diversité des faciès de la mangrove de Martinique. Aussi, les indicateurs ont finalement été développés à partir des pressions exercées sur le milieu et des observations réalisées *in situ*.

1.1 L'omniprésence des macrodéchets

L'impression globale qui ressort suite à la visite des 59 sites de mangrove est une présence très importante des déchets en tout genre dans les mangroves. En effet, que ce soit dans les mangroves alluvionnaires de la Baie de Fort-de-France ou colluvionnaires de la côte Atlantique et du Sud Caraïbes, les macrodéchets sont omniprésents et souvent en grande quantité (Figure 11).

Ces déchets, qui proviennent essentiellement de l'amont, ont plusieurs origines :

- remblais de l'arrière mangrove avec des gravas, des ordures ménagères, des carcasses de voiture, du verre ...
- des dépôts sauvages de déchets de tout type (électroménager, véhicules, restes d'animaux, gravas, plastiques, batteries usagée ...
- les déchets flottants charriés par les ravines et rivières, en particulier lors des périodes de crues
- les écoulements des eaux pluviales en provenance des surfaces artificialisées (routes et zones d'activités en particulier) qui charrient tout ce qui est jeté sur la voie publique
- des activités de chasse et de pêche (dans une moindre mesure)





Figure 11. Illustration de la quantité et variété innombrable de macrodéchets présents dans la mangrove de Martinique ; déchets déposés à partir de l'arrière mangrove

En plus des apports venus de l'amont, les mangroves exposées au vent et courants entrants sont également impactées par des apports parfois massifs de déchets flottants (Figure 12).

La côte Atlantique est concernée dans son ensemble par ce phénomène tandis qu'il est plus localisé (ex : Baie du Marin) pour les ensembles sud Caraïbes et Baie de Fort-de-France en raison de leur exposition géographique. Ces déchets proviennent de la Martinique mais aussi d'autres régions. Ils sont composés en grande partie de plastiques : bouteilles, bidons, cordages, filets de pêche et de divers fragments plus ou moins gros. Ces déchets sont apportés par la mer et restent coincés dans les racines des palétuviers.

La proximité avec l'urbanisation accroît souvent la quantité de déchets déposée au niveau de l'arrière mangrove mais aussi l'apport des déchets par la mer. En effet, de nombreux déchets flottants proviennent de Martinique et sont par conséquent jetés à la mer volontairement ou non (vent) localement.



Figure 12. Illustration de la quantité et variété innombrable de macrodéchets flottants présents dans la mangrove de Martinique ; déchets arrivés dans la mangrove par la mer et parfois lors des crues des ravines

La mangrove est depuis longtemps considérée par certains comme un endroit plutôt malsain et propice au comblement et autres dépôts de déchets. Cette perception change doucement. Si beaucoup des déchets et remblais sont assez anciens de nombreux dépôts sauvages sont très récents. Le réflexe de se débarrasser des encombrants dans la mangrove reste encore d'actualité.

Pour preuve, le cas de la mangrove de la Marina du Robert dont l'arrière mangrove a été défrichée au bulldozer pour y déposer des quantités très importantes de sargasses en putréfaction (Figure 13). Outre la destruction de l'arrière mangrove, la mangrove a été utilisée une fois de plus pour se débarrasser d'un déchet dont on ne savait que faire au risque de détruire un écosystème et les services écosystémiques qu'il apporte. Ce vieux réflexe est donc encore bien présent en Martinique. Il en est de même pour l'évacuation des eaux usées en arrière des zones d'activités, souvent peu ou non traitées.



Figure 13. Dépôt de grandes quantités de sargasses (et de déchets) dans la mangrove après défrichement de l'arrière mangrove, mangrove de la Marina du Robert

1.2 La problématique des sargasses

Certaines mangroves de la côte Atlantique et, dans une moindre mesure, certaines mangroves du sud caraïbes, sont concernées par des arrivages massifs de sargasses en provenance du large accompagnées par une importante quantité de déchets plastiques.

Dans le fond de certaines baies, les sargasses se retrouvent piégées et s'accumulent, parfois dans la mangrove. Lorsque les accumulations sont trop importantes, la décomposition des sargasses entraîne une asphyxie du milieu accompagnée du dégagement de gaz soufré (H_2S). La mangrove, du moins la partie arborée, qui peut tolérer suivant les espèces de palétuvier un manque important d'oxygène dans le sol et l'eau résiste assez bien aux sargasses tant que l'accumulation n'est pas trop importante. Dans certains cas l'accumulation de sargasses est si importante que leur décomposition entraîne de la mortalité chez les palétuviers (Figure 14). La faune associée à ces écosystèmes est aussi certainement très impactée.



Figure 14. Accumulations de sargasses en décomposition entraînant de la mortalité chez les palétuviers, l'impact est plus ou moins important selon les sites : Massy Massy en haut à gauche, Dostaly en haut à droite et anse Trabaud en bas

DISCUSSION

La Figure 15 indique le niveau de présence des sargasses sur les sites d'études et les zones présentant des cumuls responsables de la mortalité des palétuviers.

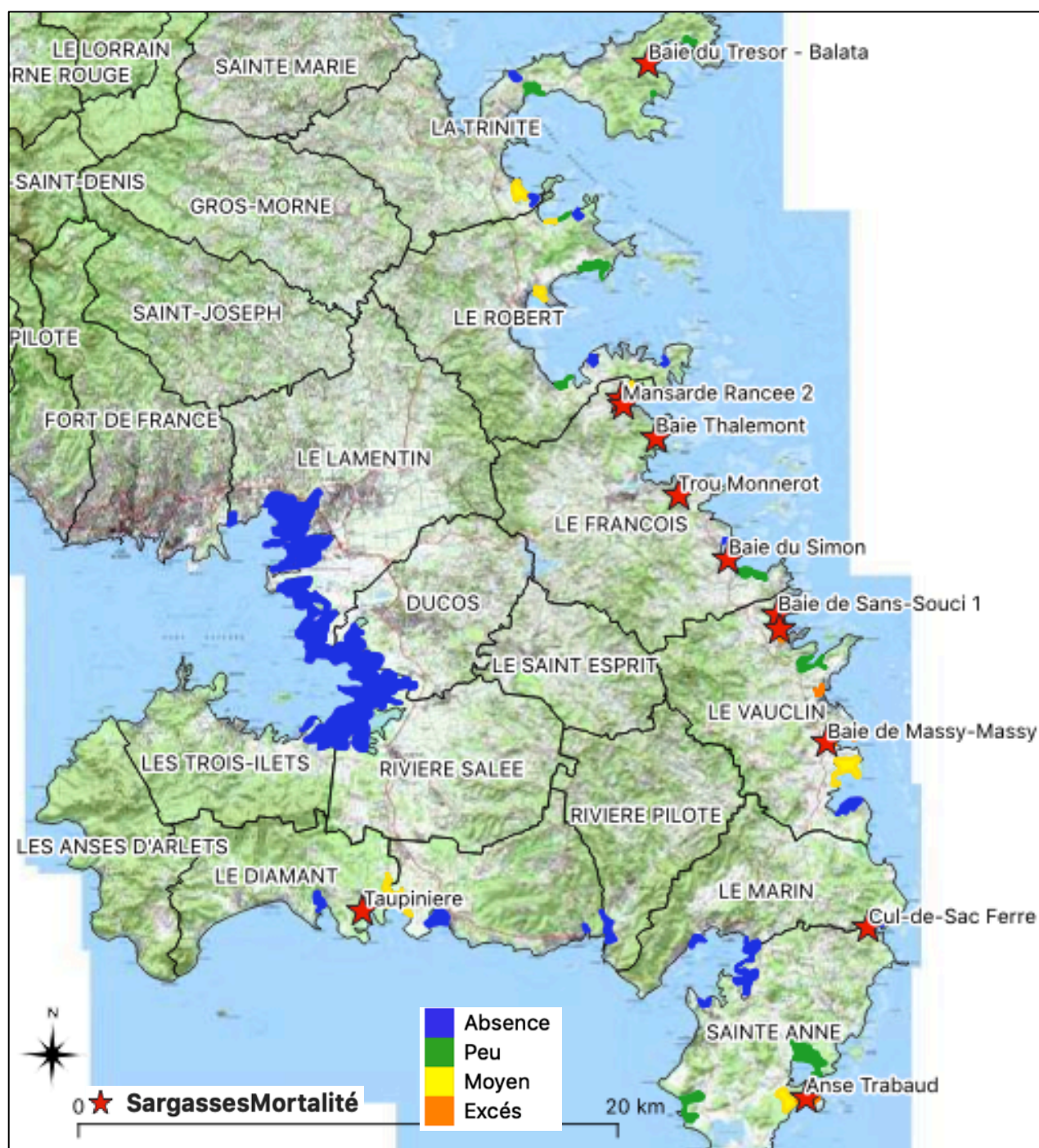


Figure 15. Présence des sargasses dans les mangroves de Martinique et zones où l'accumulation a entraîné de la mortalité de palétuviers

La mortalité concerne parfois le premier rideau de Palétuviers rouges (Figure 14) mais dans certains cas, c'est en arrière de cette frange littorale que se trouve la mortalité (Figure 16). L'apport d'eau marine semble empêcher la mort de la frange littorale de palétuviers. Cependant les sargasses s'accumulent en arrière de ces premières lignes boisées et s'y décomposent. Ces zones sont beaucoup moins oxygénées par l'eau de mer ce qui entraîne de la mortalité parmi les palétuviers, en particulier lorsqu'il est constitué de Palétuviers blancs (ex : Baie de Sans Souci au Vauclin).



Figure 16. Accumulation de sargasses sur la frange littorale peut entraîner de la mortalité chez les palétuviers situés en arrière ; ici la Baie de Sans Souci

Si de nombreuses espèces animales semblent impactées par cette décomposition, certaines espèces comme les crabes Violonistes (*Uca sp.*) ou les oiseaux limicoles semblent s'en accommoder (Figure 17).



Figure 17. Crabes Violonistes (Cémafot) à gauche et limicoles à droite se nourrissant sur les sargasses en décomposition

Hors des zones d'accumulations importantes, les sargasses apportent des nutriments qui peuvent stimuler la croissance des palétuviers. L'apport de nutriment peut aussi déséquilibrer le fonctionnement des mangroves les plus oligotrophes (pauvre en nutriments). En particulier la vie sous-marine qui vit entre les racines des palétuviers (épibiontes, herbiers...). Cet apport important de nutriments favorise la croissance des algues au détriment des autres organismes.

1.3 Les pollutions liquides

Les apports de polluants via les eaux usées plus ou moins traitées et les eaux pluviales issues du ruissèlement des zones urbanisées (hydrocarbures notamment) ou en grandes cultures (engrais et pesticides) dans les mangroves sont encore aujourd'hui très présents.

La mise au point d'indicateurs biologique devait permettre de déceler ces pollutions et de les intégrer à l'indicateur composite de santé des mangroves. Parmi les différents paramètres biologiques testés en phase 2, deux ont été retenus pour ce compartiment : la croissance des palétuvier et la densité de trous de crabes. L'application du protocole aux 59 sites de mangroves pour les crabes et 63 sites pour la croissance des arbres a permis de vérifier l'utilité de l'étude des anomalies de croissance des palétuviers mais n'a pas permis de mettre en évidence une relation significative entre le nombre de trou de crabes et la qualité physicochimique du milieu.

En effet, la diversité des sites, tant dans l'espace (types de mangroves) que dans le temps (saisons) accompagnée de l'évolution saisonnière du comportement des crabes peu expliquer l'échec de ce protocole dont les résultats n'ont pas été concluants. Cela dit, les crabes peuvent rester potentiellement de bons indicateurs de pollution mais cela demande davantage d'études plus pointues sur la biologie des différentes espèces de crabes de mangrove. Par ailleurs, la bibliographie étudiée aux phases 1 et 2 de la présente étude, indique des tendances d'évolution (peu nettes) de la densité de trou de crabe en fonction de la quantité de polluants. Les tendances ont été observées en étudiant l'évolution d'un même site sur un temps long. Or, le principe de notre étude était de comparer les mesures des différents sites avec les résultats des sites références. Dans le cas des crabes cela ne semble donc pas concluant. Il faudrait réaliser le suivi de l'évolution du nombre de trou de crabe dans des conditions environnementales très similaires avec des niveaux de pollution différents. Il pourrait même être nécessaire de réaliser l'expérience dans des conditions contrôlées *in vitro* compte tenu de la variabilité très importante des sites.

L'étude de la teneur en chlorophylle des feuilles de palétuvier par télédétection permet de couvrir des surfaces importantes. Le travail réalisé en partenariat avec Géodesis, met en évidence les zones où la croissance des palétuviers (à travers la teneur en chlorophylle des feuilles) peut être considérée comme anormale par rapport aux valeurs références (supérieures ou inférieures). Les images obtenues **permettent de localiser** des zones où la croissance des palétuviers semble anormalement faible ou forte. **Une vérification terrain s'impose alors pour valider la présence éventuelle d'une pollution et d'en identifier l'origine.**

Une anomalie de croissance, qu'elle soit beaucoup plus importante ou beaucoup plus faible que la valeur de référence peut avoir diverses origines :

- perturbation récente de l'alimentation en eau de la mangrove (ex : excès des apports d'eau douce, assèchement par drainage ...)
- apport d'eaux usées riche en nutriments (ex : rejets STEU)
- apport d'engrais issus de l'agriculture intensive
- apport de pesticides
- apport de polluants chimiques
- ...

Outre cet outil de localisation des perturbations, l'étude des variations spatiales de la croissance des palétuviers a été intégrée à l'indicateur par composante qui traduit l'état des mangroves *in situ*. Plus l'écart est important par rapport aux valeurs références et plus l'importance du paramètre croissance des palétuviers influence la valeur de l'indicateur dans le but de faire ressortir notamment l'effet des pollutions microscopiques difficilement visibles sur le terrain.

Certaines observations de terrain permettent de déceler l'existence potentielle de pollutions microscopiques et de renforcer les suspicions de problèmes détectés par télédétection mais aussi de renseigner des zones où rien n'aurait été vu par télédétection.

Ainsi, la présence de billes d'engrais en limite de mangrove, de ruissellement d'eau nauséabonde ou de couleurs douteuses (ex : blanchâtre, grisâtre etc) doivent être relevés pour en identifier la source et la toxicité potentielle (Figure 18). Dans certains cas des analyses devront être pratiquées.



Figure 18. Exemple d'apport de pollutions liquides : labour et projection de billes d'engrais en limite de mangrove en haut à gauche et différents types d'eaux usées rejetés en mangrove

1.4 Des mangroves aux nombreux usages

Outre son usage illégal comme décharge, la mangrove fait l'objet de nombreux usages par les martiniquais. Ainsi, même dans les endroits les plus reculés, la mangrove est source d'extractivisme.

1.4.1 La pêche aux crabes

L'activité la plus répandue est la pêche des crabes qui couvre les divers compartiments de la mangrove (Figure 19) :

- le crabe de Terre (*Cardisoma guanhumi*) est capturé à l'aide de piège à crabes (ratières) dans les parties les moins immergées de la mangrove et en arrière mangrove
- le crabe Mantou (*Ucides cordatus*) présent dans la mangrove et les vasières est capturé à la main au fond de leur trou
- le crabe Cirique (*Callinectes sp.*) présent dans les zones inondées, notamment la frange littorale, est capturé à l'aide de casiers appâtés ou d'une épuisette.



Figure 19. Les trois principales espèces de crabes pêchées dans les mangroves de Martinique et leurs techniques de pêche : Crabe de terre pêché avec des ratières, Mantou pêché à la main et Cirique pêché au casier appâté ou à l'épuisette

La pêche du Crabe de terre est réglementée avec une taille minimum et une période de pêche qui s'étend du 15 février au 15 juillet. La période de forte pêche se situe avant les fêtes de Pâques où il est consommé en Matoutou.

Lors de nos expertises de terrain, de très nombreux pêcheurs de crabes ont été rencontrés et des pièges à crabes sont présents dans l'ensemble des mangroves visitées. Bien que quelques rares pièges à crabes puissent être observés dans la réserve naturelle de la Caravelle, l'effet réserve semble fonctionner avec une densité et une diversité de crabes beaucoup plus importante que sur les autres sites (observations personnelles).

Si de nombreux pièges à crabes abandonnés sont présents dans la mangrove, cette pratique reste assez peu impactant tant que la réglementation est respectée (taille des captures notamment). L'activité peut néanmoins être la source de quelques macrodéchets lorsque les ratières abandonnées sont en plastique ou que les pêcheurs marquent leur chemin à l'aide de déchets plastiques.

Les crabes Mantous sont capturés à main nue ou gantée directement dans la vase. Les pêcheurs de Mantou explorent des zones de mangroves qui peuvent paraître isolées et difficiles d'accès comme la frange littorale des mangroves de la Baie de Fort-de-France où les ramasseurs sont déposés et récupérés par bateau.

Enfin les crabes Ciriques sont capturés dans les zones d'eau libre entre les bosquets de mangrove ou le long de la frange littorale à l'aide de nasses ou à l'épuisette autour d'appâts (souvent du poulet congelé).

Quelque soit l'espèce de crabe visée, ils sont pêchés dans toutes les mangroves de l'île, que la zone soit interdite à la pêche ou non. Or ces crustacés sont connus pour concentrer les polluants et on peut donc se

poser la question de la contamination des consommateurs de crabes souvent pêchés dans des zones très polluées.

1.4.2 La chasse

Une seconde activité, très développée, est la chasse. Elle est exercée à des intensités diverses, sur 47 sites sur 59 expertisés soit **80% des sites**.

Si la chasse est présente aussi sur l'île voisine de la Guadeloupe, les aménagements de zones humides réalisés dans le but de chasser sont une particularité martiniquaise. De grandes zones sont ainsi privatisées et aménagées, au minimum en défrichant la mangrove avec parfois l'utilisation d'un bulldozer pour réaliser du terrassement et des bassins (Figure 20).



Figure 20. Exemples de défrichements et aménagements des zones de chasse dans la mangrove de Martinique

Des postes de chasse sont alors positionnés tout autour des points d'eau où viennent se reposer principalement des oiseaux migrateurs (Figure 21).

Dans les zones de chasse les plus développées, des bâtiments en taule et/ou conteneur sont présents afin d'accueillir les chasseurs. Souvent, de nombreux déchets sont présents pour fabriquer des pontons de fortune afin de traverser les vasières (pneus, palettes ...).



Figure 21. Différents types de poste de chasse et un égrainoir (en haut à droite)

Outre la pression exercée sur la faune, cette activité, telle qu'elle est actuellement pratiquée, empêche la dynamique naturelle de la mangrove et la fermeture de l'arrière mangrove. De plus, l'activité telle qu'elle est menée dans les zones humides de Martinique maintient une artificialisation de la mangrove et de l'arrière mangrove.

1.4.3 L'apiculture

La mangrove est également un lieu prisé pour l'apiculture en Martinique. Une importante activité apicole est ainsi présente à proximité de la plupart des mangroves à Palétuvier noir (Figure 22). La zone la plus densément exploitée est la Baie de Fort-de-France où de très nombreux ruchers sont présents.

Ils sont installés le plus souvent en limite de mangrove, dans la zone de transition peuplée souvent de Campêche et de Palétuvier noir. Des déchets plastiques sont parfois présents sur les vieux ruchers abandonnés.

De nombreux essaims d'abeilles sauvages, ou du moins échappés des ruches, ont été observés dans les troncs creux des plus gros Palétuviers, souvent du Palétuvier noir.



Figure 22. De très nombreux ruchers de différentes tailles et plus ou moins entretenus sont présents en arrière mangrove, en particulier dans la Baie de Génipa ; les ruchers sont parfois installés sur des remblais de déchets (en bas à gauche) ; un tronc de Palétuvier noir découpé à la tronçonneuse pour récupérer un essaim d'abeilles installé dans le tronc creux (en bas à droite)

1.4.4 L'élevage

Plusieurs mangroves, en particulier dans les peuplements de Palétuvier noir, sont utilisées comme pâturages (Baie du Simon au François et Trou Manoël au Marin par exemple). Les formations de Palétuvier noir sont plus accessibles pour le bétail (sol plus ferme et moins d'obstacles) et leur feuillage leur est appétent, probablement en raison de la sécrétion de sel au revers de leurs feuilles.

Dans ces zones, les bovins piétinent le sol et empêchent le développement de la mangrove en réduisant les Palétuviers noirs à l'état de bonzaï (Figure 23).



Figure 23. Mangroves pâturées par des bovins, Massy Massy au Vauclin à gauche et la Baie du Simon au François à droite

DISCUSSION

Les mangroves situées à proximité des habitations abritent également des élevages de porcs dont les lisiers sont évacués directement dans la mangrove (Figure 24).



Figure 24. Élevages de porcs dans la mangrove ; canal Cocotte, Ducos, à gauche et Trou Terre, Le Robert, à droite

1.4.5 Les pontons et abris pour bateaux

Enfin, concernant la frange littorale, de nombreux pontons privés sont présents dans plusieurs mangroves, en particulier entre la Pointe la Rose au Robert et le Vauclin. Pour la plupart, ces pontons sauvages donnent accès à des bateaux, souvent à moteur, appartenant à des particuliers. Certains, moins nombreux, donnent accès à des yoles de pêche.

Des percées sont réalisées à travers la mangrove (défrichement) pour atteindre la mer. Dans certains cas une cale de mise à l'eau en béton est même présente ainsi qu'un lift, système électrique de mise hors d'eau du bateau (Figure 25).



Figure 25. Pontons privés très nombreux sur les communes du Robert, du François et du Vauclin ; la mangrove a été défrichée pour accéder à la mer

Dans les parties abritées des mangroves dites « Trou à cyclone », de nombreux bateaux sont au mouillage ou amarrés directement à la mangrove. Ils se concentrent principalement en saison cyclonique mais certains restent à l'année et finissent parfois par être abandonnés (Figure 26).



Figure 26. Amarrage des bateaux directement dans la mangrove dans les trous à cyclone, ici la Baie de Saintpée au Robert à gauche, et abandon d'un voilier attaché à la mangrove dans la Baie de Pointe Caillou sur la commune de Sainte-Anne

Dans certains cas des pontons flottants sont installés pour des activités touristiques (kayak, excursions organisées ...) comme au Village de la Poterie à Trois-Ilets (Figure 27) ou pour la pêche professionnelle.



Figure 27. Ponton flottant du Village de la Poterie aux Trois Ilets

1.5 Des continuités écologiques rompues

Un des marqueurs importants afin d'évaluer le bon état des écosystèmes est leur interconnection nécessaire afin d'assurer la continuité écologique. Les zones permettant ces connexions sont appelées légalement trames vertes (végétation) et bleue (cours d'eau, mer). Elles permettent aux espèces animales et végétales de circuler entre les différents milieux naturels (réservoirs biologiques) afin notamment d'éviter les isolements génétiques entre populations.

Or, si on analyse l'ensemble des mangroves à l'échelle de la Martinique on s'aperçoit que leur isolement vis à vis des formations boisées terrestres est très important, en particulier pour les mangroves de la Baie de Fort-de-France (mais pas seulement).

Sur la façade Atlantique les mangroves les plus isolées sont celles qui se trouvent dans un contexte urbain comme au Robert, au François ou au Vauclin (Figure 28).



Figure 28. Deux mangroves de la côte Atlantique dans un contexte urbain : Trou Terre au Robert à gauche et Rivière Desroses au François à droite

D'autres sont également isolées par le déboisement de l'arrière mangrove pour l'agriculture (culture de la canne à sucre, de la banane mais aussi de vastes pâturages herbacés) qui coupe la liaison avec les zones boisées de l'amont (Figure 29). La plupart du temps, même les ravines sont déboisées.



Figure 29. Les grandes cultures situées en limite de mangroves (absence de boisement terrestre) participent à l'isolement écologique des mangroves : bananeraies, canne à sucre et vastes pâturages

Les mangroves de la pointe de la Caravelle et du sud de la côte Atlantique (communes du Marin et de Sainte-Anne) ont le continuum boisé le mieux conservé (Figure 30).



Figure 30. Deux exemples de continuité écologique entre la mangrove et le milieu forestier terrestre : Baie du Trésor à Trinité en haut et Cul-de-Sac Ferré au Marin en bas

Concernant le sud Caraïbes, les mangroves de la Baie du Marin et de Trois Rivières sont les plus isolées des forêts sèches qui recouvrent les mornes alentours (Figure 31).



Figure 31. Contexte de la mangrove de Trou Manuel au Marin

Enfin, la situation la plus préoccupante concerne les mangroves de la Baie de Fort-de-France qui sont toutes isolées des formations boisées terrestres :

- au sud de l'aéroport en raison de la présence de vastes zones agricoles puis de l'urbanisation ;
- au nord de l'aéroport, c'est principalement une urbanisation très dense qui jouxte directement la mangrove (Figure 32).



Figure 32. Principaux responsables de l'isolement écologique des mangroves de la Baie de Fort-de-France : les grande cultures et les zones industrielles implantées en limite voir carrément dans la mangrove

Il apparaît primordial de rétablir les continuités écologiques entre les mangroves et les formations boisées terrestres à l'échelle de la Martinique, et en particulier de la Baie de Fort-de-France. Une première action serait à minima de favoriser le retour et le maintien d'une ripisylve d'une largeur raisonnable le long des cours d'eau afin qu'elles puissent assurer un minimum de connexion entre les milieux naturels de l'amont et de l'aval.

1.6 Une note d'espoir ?

Les mangroves de Martinique sont donc soumises à de nombreuses pressions anthropiques qui engendrent de multiples dégradations. Cependant, certaines mangroves sont tout de même classées en bon état, notamment grâce à la présence d'espaces protégés comme la Réserve Naturelle de la Caravelle mais pas seulement. Un projet de création d'une Réserve Naturelle dans la Baie de Génipa est par ailleurs en cours de réalisation. Il devrait concerner principalement la mangrove.

Les mangroves sont depuis très longtemps et toujours aujourd'hui sources d'extractivisme pour la population martiniquaise. De nombreuses personnes vivent au contact régulier de celle-ci et en apprécient les richesses.

D'autre part, dans le contexte actuel des effets du changement climatique, les mangroves, qui jouent un rôle crucial dans la protection des populations face aux événements climatiques violents, sont prises en étau. D'un côté le niveau de la mer qui augmente et de l'autre l'urbanisation et l'agriculture intensive qui l'empêche de reculer dans les terres. Une prise de conscience semble germer dans la population au regard du caractère précieux de ces écosystèmes patrimoniaux. Cependant, le monde économique actuel ne semble pas avoir pris la mesure de la situation et les limites des mangroves sont sans cesse rognées.

Enfin, une grande partie des macrodéchets d'origine terrestre paraît assez ancienne et le réflexe de jeter les ordures dans la mangrove, bien que toujours présent, semblerait légèrement diminuer. En revanche, les observations de déchets flottants en provenance de la mer sont toujours plus nombreuses.

2 Améliorations de la méthodologie, limites et perspectives

La mise au point d'un indicateur composite de l'état de santé des mangroves facilement mesurable et reproductible, notamment dans les autres territoires d'Outremer était un objectif ambitieux.

Une double approche a été initialement proposée : un indicateur de contexte basé sur les pressions amont et aval qui s'exercent sur la mangrove (Ind_Cont) et un indicateur d'état basé sur les différentes composantes de la mangrove (Ind_Comp). Le premier est calculable à distance par un travail SIG et de bibliographie tandis que le second nécessite une visite de terrain et un traitement d'images satellite. Ce dernier point a été rendu accessible par le développement d'un protocole d'automatisation du traitement des images satellites par notre partenaire Géodesis. Ces deux indicateurs sont à interpréter conjointement.

L'amélioration, les limites et les perspectives de ces deux indicateurs sont présentées dans la première version du présent rapport remis au Conservatoire du littoral en mai 2020 et ne sont pas traitées ici. Se rapprocher du Conservatoire du littoral pour les consulter.

Une analyse de ces deux indicateurs réalisée à posteriori et alimentée par la difficulté de mettre au point des indicateurs « d'état de santé » mesurables facilement pour calculer l'indicateur par composante, a conduit à proposer une synthèse basée uniquement sur les pressions.

L'indicateur de pression Ind_Pres ainsi proposé reflète les pressions I_PresBC qui s'exercent sur les mangroves à grande échelle (bassin versant, arrière mangrove et milieu marin adjacent) complété par des observations des pressions présentes sur le terrain I_PresT (perturbations de l'hydrologie, pollutions-macrodéchets et activités).

2.1 L'indicateur de pression Ind_Pres

L'indicateur de pression mis au point reflète assez bien la réalité. Cependant il pourrait toujours être amélioré.

Pour cela sa formule pourrait être retravaillée en apportant plus d'importance à l'une ou l'autre des composantes. Le choix a été fait ici de faire la moyenne des deux.

Un autre axe d'amélioration possible est l'enrichissement et la mise à jour des deux composantes I_PresBC et I_PresT.

2.1.1 Composante 1 : l'indice de pression basé sur l'analyse bibliographique et cartographique I_PresBC

La composante pression calculée par bibliographie et cartographie (I_PresBC) permet d'identifier les sources de pressions qui peuvent impacter directement la santé des mangroves et **ainsi cibler les leviers qui peuvent être activés pour atteindre un meilleur état écologique.**

Dans certains cas cela peut être des pressions directes sur la frange littorale ou l'arrière mangrove mais dans d'autres, la source des pressions peut être beaucoup plus lointaine comme sur les activités du bassin versant ou du milieu adjacent.

L'indice de pression (I_PresBC) est relativement robuste et donne une image assez proche de la réalité en 2020. Il pourrait être actualisé et perfectionné à intervalle de temps régulier, en fonction de l'évolution du contexte. Un pas de temps de 5 ans paraît suffisant compte tenu de l'envergure des changements nécessaires à l'amélioration du contexte (ex : évolution des pratiques culturelles, amélioration de l'assainissement).

Une autre possibilité serait sa mise à jour régulière avec une correction des différents indices « au fil de l'eau », lorsqu'une nouvelle analyse est disponible (ex : DCE) ou que des évolutions majeures sont réalisées comme par exemple des travaux d'amélioration de l'assainissement ou de restauration de l'arrière mangrove réalisés localement, la création d'une réserve naturelle, l'abandon d'une zone de chasse, le nettoyage d'une mangrove...

Il appartient au gestionnaire, en fonction de ses moyens et de son organisation, de choisir l'une ou l'autre méthode d'actualisation. Afin de pouvoir comparer l'évolution à l'échelle de la Martinique il sera important d'actualiser l'étude pour tous les sites ou, à défaut de bien préciser la date d'actualisation des différents sites.

2.1.2 Composante 2 : l'indice de pression basé sur l'expertise de terrain I_PresT

L'indice de pression basé sur les expertises de terrain I_PresT reflète bien la réalité du terrain. Il s'appuie sur les observations réalisées au niveau de l'arrière mangrove parcourue à pied et de la frange littorale observée depuis un point de vue ou d'une embarcation.

Afin de rester dans le postulat de base de l'étude « méthode facile à réaliser et peu coûteuse » seul des observations simples ont été retenues (perturbations de l'hydrologie, présence de macrodéchets et activités). Cette composante pourrait être affinée en ajoutant par exemple des analyses de la qualité de l'eau et des sédiments. Ces analyses ont un coût certain qui varie en fonction du nombre et du type de polluants qui sont recherchés.

Néanmoins, des protocoles simplifiés pourraient à l'avenir être mis en place pour rechercher des polluants ciblés (hydrocarbures, pesticides, eaux usées ...) présents en excès avec des tests réalisés *in situ*. Ces tests qui pourraient s'apparenter à des tests colorimétriques (ex : test pH...), mettraient en évidence certains polluants présents au-delà d'un seuil. Cela permettrait de voir rapidement si on dépasse le seuil sans pour autant réaliser un dosage précis qui pourrait être réalisé, le cas échéant, plus tard.

D'autre part, le caractère qualitatif des appréciations des dégradations (échelle de 0 à 3) induit la possibilité de différences d'appréciations suivant l'opérateur qui la réalise. Ce dernier point est toujours à avoir en tête, en particulier lorsqu'on observe des résultats surprenants.

2.1.3 Vers l'obtention d'un indicateur d'état ?

Initialement de nombreux paramètres biologiques ont été envisagés comme indicateurs de la santé des divers compartiments de la mangrove.

La complexité et la variabilité de l'écologie des composantes de la mangrove n'ont pas permis de mettre au point, au cours de l'étude, de méthode simple, facile à interpréter et peu coûteuse pour chacune d'entre elles.

Après de multiples tests à l'échelle de quatre sites expérimentaux, l'étude de la croissance des arbres à travers la mesure des teneurs en chlorophylle des feuilles ainsi que la densité de trous de crabes ont été retenus. L'application aux 59 sites a conduit à l'élimination, pour le moment, du paramètre densité de trous de crabe. Des études supplémentaires ciblées sont nécessaires pour éventuellement trouver des paramètres généralisables.

L'indicateur par composante Ind_Comp a par conséquent été réorienté en fin de phase 2 et ne contient pas que des indicateurs biologiques. Il s'est apparenté à un diagnostic de terrain permettant d'évaluer les perturbations visibles déterminantes pour la santé de l'écosystème mangrove (déchets, écoulements suspects, modification du fonctionnement hydrologique...) accompagné par un indice de croissance des palétuviers. Ce dernier étant calculé à partir des écarts en teneur en chlorophylle des feuilles de palétuviers mesurés par télédétection par rapport à des valeurs références mesurées en phase 2.

Pour calculer l'indice de croissance des palétuviers, des valeurs de référence ont été utilisées. Ces valeurs de croissance « normale » ont été obtenues sur deux sites de mangroves considérés comme les moins perturbés des deux grands types de mangrove (colluvionnaires et alluvionnaires) présents en Martinique. Si la référence mangrove colluvionnaire, le site de la Baie du Trésor peut effectivement être considéré comme peu perturbé, ce n'est pas le cas du site de Pointe Merle qui est situé dans le contexte perturbé de la Baie de Fort-de-France. Il est néanmoins l'un des moins perturbés de la baie. Les valeurs de référence sont donc à remettre dans leur contexte pour leur interprétation au sein de l'indicateur par composante.

La réflexion menée à posteriori nous a conduit à suspendre le calcul de Ind_Comp par manque d'éléments biologiques facilement appréciables et peu coûteux traduisant l'état de santé de la mangrove et cela malgré l'important effort expérimental qui a été réalisé au cours de ce travail.

Au regard de ce qui a pu être expérimenté au cours de cette étude, il sera très compliqué, en particulier sans études scientifiques approfondies, d'ajouter un paramètre biologique significatif appréciable par des techniques simples et peu coûteuses ne nécessitant pas d'expertise poussée.

L'obtention d'un indicateur d'état pour les mangroves, qui n'existe pas à l'échelle internationale, peut cependant rester un objectif qui demande encore de nombreux travaux de recherches.

Le travail sur la croissance réalisé en collaboration avec Géodesis reste cependant pertinent. L'étude de la croissance des palétuviers par télédétection peut être utilisée conjointement avec l'indicateur Ind_Pres pour localiser des zones à anomalie de croissance. Ces anomalies pourront par la suite être vérifiées sur le terrain afin d'en identifier la source.

2.2 Limites de l'indicateur

Les indicateurs sont un outil précieux pour le gestionnaire. L'indicateur composite développé au cours de cette étude permet de mettre en évidence les pressions qui s'exercent sur les mangroves et ainsi donner une indication sur l'état de santé qui en résulte. Cependant cet outil a des limites et ne devra pas être considéré comme la seule « vérité » concernant l'état des mangroves et les pressions qu'elles subissent. Les indicateurs devront toujours être replacés dans leur contexte. Ils donnent une indication mais seule l'analyse de terrain détaillée pourra être catégorique.

Une des limites de ces indicateurs concerne la disponibilité des données en entrée: moins les relevés et les données sources sont précis, moins ils seront efficaces.

Concernant la composante biblio carto I_PresBC de l'indicateur de pression Ind_Pres par exemple, il a été conçu avec en entrée le maximum de données disponibles pour la Martinique. Il pourra donc être moins efficace pour des territoires ne possédant pas la même richesse en études (ex : DCE, évolution surfacique des mangroves, inventaires, délimitation de l'occupation du sol des bassins versants ...) ou plus précis si le nombre et la qualité des informations en entrée est plus important.

De plus, certaines variables qualitatives (ex : quantité de STEU sur le bassin versant, niveau des perturbations hydrologiques...) sont appréciées par des échelle d'intensité de 0 à 3. Si l'objectivité maximum est souhaitée, il est toujours possible que des différences d'appréciations existent entre les opérateurs.

La grande variabilité des structures de végétation que peut prendre la mangrove de Martinique, parfois au sein même d'un même massif de mangrove, a entraîné la simplification ou à l'abandon de plusieurs paramètres (ex : biomasse, croissance ...) afin de les intégrer à un indicateur permettant de qualifier l'ensemble d'une mangrove. Essayer d'affiner l'indicateur en fonction des différents types de mangroves pourra être une des pistes d'amélioration, mais il est impératif pour cela de disposer d'une typologie précise des mangroves de Martinique.

Enfin, concernant la composante terrain I_PresT de l'indicateur de pression Ind_Pres, ne couvre pas l'ensemble des massifs de mangrove mais se concentre principalement sur l'arrière mangrove, choix tout à fait justifié par ailleurs (Cf. rapport phase 2). Il faudra donc rester prudent quand à son interprétation sur l'ensemble du massif. Il faut cependant noter que l'indice de croissance des palétuviers apprécié par télédétection et qui peut être interprété conjointement avec Ind_Pres, concerne l'ensemble du massif.

2.3 Télédétection

La télédétection est déterminante pour analyser de grandes surfaces. La méthodologie mise au point permet de détecter les anomalies de croissance des palétuviers.

L'interprétation des cartes produites nécessite cependant un minimum de connaissance du terrain, en particulier du type de peuplement. En effet, les Palétuviers rouges (*Rhizophora mangle*) possèdent des teneurs en chlorophylle dans les feuilles généralement inférieures à celles du Palétuvier blanc (*Laguncularia racemosa*) et encore plus du Palétuvier noir (*Avicennia germinans*). Les valeurs de références ont été obtenues à partir de mesures réalisées sur les trois espèces, proportionnellement à leur présence sur les quatre sites de référence. Les cartes obtenues grâce au protocole automatisé de traitement d'images satellites doivent ainsi être interprétées au regard des espèces dominantes de chaque peuplement et du type de structure du peuplement.

Ainsi, les grands ensembles de mangrove basse à Palétuvier rouge, qui se développent sur des sols très pauvres ont des croissances très faibles et ressortent donc en rouge ou orange sur les cartes, ce qui est parfaitement normal (Figure 33). En revanche des Palétuviers rouges qui ressortent avec des valeurs de teneur en chlorophylle des feuilles bien supérieures aux valeurs références indiquent très certainement un apport en fertilisant anormal (eaux usées, engrais etc).

Actuellement, nous ne disposons pas d'une carte précise décrivant la structure de la mangrove et les espèces dominantes à l'échelle de l'île. Une tentative a été réalisée pour la Baie de Fort-de-France par télédétection dans le cadre du projet Caribsat en 2011 (Caribsat Action 5 2011). Les résultats ne sont pas précis et parfois erronés. Une vérification terrain reste donc indispensable lorsqu'on ne connaît pas bien le site qui pose question, notamment dans les zones difficilement accessibles.

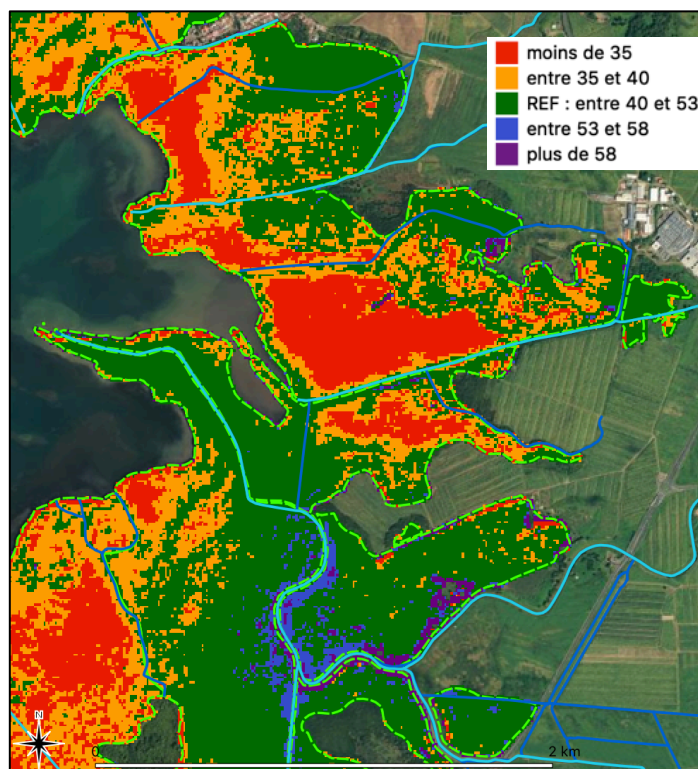


Figure 33. Représentation cartographique des teneurs en chlorophylle des feuilles (LCC en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) de palétuvier par classe issue du traitement automatisé d'images satellite Sentinel 2 (valeurs références en vert) ; ici la mangrove de la Baie de Génipa

Un autre exemple concret concerne le site de Belfond à la Pointe Marin sur la commune de Sainte-Anne (Figure 34). Des taux de chlorophylle très supérieurs aux valeurs de références dans trois zones distinctes sont observables : à l'extrémité nord-ouest du massif, au sud-ouest et dans la partie est. Hors il ne s'agit pas des mêmes espèces qui dominent dans les trois zones.

Du Palétuvier rouge dans la partie nord-ouest et la partie est et du Palétuvier noir dans la partie sud-ouest. La teneur en chlorophylle du Palétuvier noir étant généralement plus élevée que celle du rouge, il y a nettement une très forte croissance des Palétuviers rouges. Sur le terrain c'est effectivement ce qui a été constaté au regard de l'architecture des arbres. L'explication provient d'un important apport de nutriments en provenance de la STEU de Belfond située en limite amont concernant la partie est et en raison de l'embouchure d'une ravine chargée en eaux usées qui draine un quartier résidentiel pour la partie nord ouest.

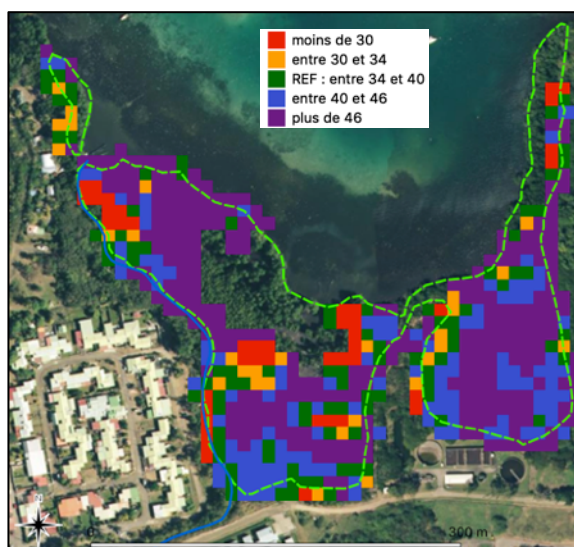


Figure 34. Représentation cartographique des teneurs en chlorophylle des feuilles (LCC en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) de palétuvier par classes issue du traitement automatisé d'images satellite Sentinel 2 (valeurs références en vert) ; ici la mangrove de Belfond sur la commune de Sainte-Anne

DISCUSSION

Le protocole mis en place permet également de représenter la teneur en chlorophylle des feuilles de palétuvier sur l'ensemble des sites sans faire référence aux valeurs de référence (Figure 35).

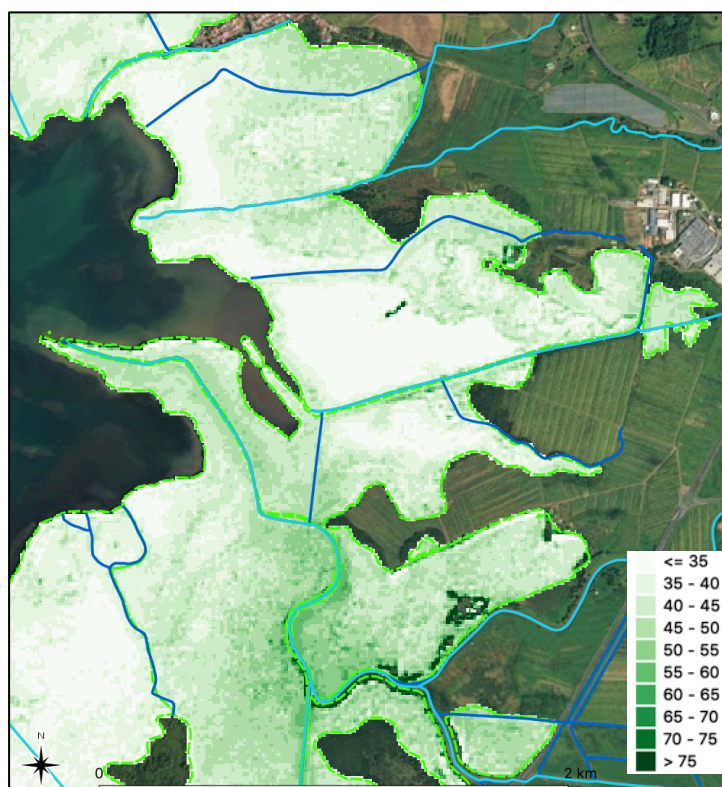


Figure 35. Représentation cartographique des teneurs en chlorophylle des feuilles (LCC en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) de palétuvier issue du traitement automatisé d'images satellite Sentinel 2 ; ici la mangrove de la baie de Génipa

Le traitement des images Sentinel 2 (de résolution 20*20m) connaît quelques erreurs et incertitudes du calcul de LCC (Leaf Chlorophyll Content, teneur en chlorophylle) inhérentes à tout traitement d'imagerie satellitaire :

- erreurs de géolocalisation (1 pixel en moyenne) : les résultats en bordure de site doivent être considérés avec prudence. De la même manière, les résultats sur les très petits sites (moins qu'un demi hectare) sont sujets à caution ;
- incertitudes du traitement de correction ATM (atmosphérique) : de manière générale, les nuages opaques sont correctement détectés. Une incertitude plus importante peut apparaître avec les nuages partiellement opaques et les cirrus. Ainsi, certaines zones sont classées en sol nu alors qu'elles sont majoritairement nuageuses. Par ailleurs les ombres dues aux nuages sont mal détectées et les résultats à proximité de ces derniers sont donc sujets à caution ;
- saisonnalité : le modèle de LCC a été entraîné à partir d'échantillons collectés en saison sèche (mesures de teneur en Chlorophylle des feuilles *in situ*). Il a donc a priori une validité moindre sur une image capturée en saison humide ;
- de par sa nature statistique, le modèle possède un degré d'incertitude non nul. Les valeurs de LCC calculées sont donc une approximation de la réalité.

Le protocole innovant mis en place pourrait être amélioré dans le futur à l'aide de travaux complémentaires. Voici quelques pistes d'amélioration :

- utilisation d'images Sentinel de niveau L3A avec une couverture nuageuse minimum sur le sud de la Martinique. Cela permettrait aussi de minimiser les erreurs dues aux nuages ;
- amélioration du modèle de LCC : collecte d'un nombre d'échantillon (mesures de teneur en chlorophylle des feuilles *in situ*) plus importants ainsi que d'échantillons en saison des pluies. Cela permettrait d'avoir des valeurs de référence pour les deux périodes météo de la Martinique, et de construire un modèle « bi-saisonnal » ;
- génération d'un modèle plus performant grâce aux techniques d'apprentissage profond (réseaux de neurones) ;
- utilisation de l'imagerie Radar pour la modélisation du LAI ou de la biomasse (futur satellite BIOMASS).

La télédétection est en constante évolution de même que l'accès à des données gratuites pour des résolutions de plus en plus précises. Ces techniques ouvrent donc des perspectives intéressantes pour la télésurveillance de la « santé » des mangroves, en particulier quand elle recouvre d'immenses surfaces comme en Guyane.

2.4 Perspectives : application sur les autres territoires d'Outre-mer

Un des objectifs de ce travail était de mettre au point une méthode d'évaluation de « l'état de santé » des mangroves applicable en Martinique mais aussi dans les autres territoires d'Outre-mer possédant des mangroves.

Certains descripteurs potentiels comme la présence d'épibiontes ou encore la densité de poissons ont ainsi été abandonnée à l'issue de la phase 1 afin de pouvoir utiliser la méthode dans les zones où l'eau est trouble comme en Guyane ou dans les estuaires des principaux cours d'eau de certaines îles.

L'indicateur de pression Ind_Pres mis au point est donc applicable aux différents territoires. Il sera plus ou moins précis suivant le niveau d'information disponible pour le calcul de l'indice biblio carto I_PresBC. La partie terrain (I_PresT) peut être appliquée à l'identique hormis peut être en Guyane en raison des surfaces très importantes. Dans ce cas, l'expertise terrain de l'arrière mangrove ne pourra pas être réalisée sur l'ensemble du linéaire mais sur des portions d'échantillons.

Des adaptations au contexte local sont cependant nécessaires concernant les caractères biologiques, (non compris dans Ind_Pres) notamment en Guyane où l'écologie des mangroves côtières est très différente de celles des îles. Ainsi, l'analyse par télédétection de la teneur en chlorophylle des feuilles, qui peut être utilisé conjointement avec Ind_Pres, est particulièrement concernée par les adaptations à effectuer. En effet, il sera nécessaire de calculer des valeurs de références en fonction des conditions écologiques locales et des différentes espèces de palétuvier présentes.

Dans un premier temps, les valeurs de référence pourraient être conservées pour l'application du protocole d'analyse de la croissance par télédétection en Guadeloupe, située à 190 km au nord, dont l'écologie des mangroves se rapproche de celle de Martinique.

Pour les autres territoires, il sera nécessaire de prendre *a minima* des valeurs de teneur en chlorophylle de référence en provenance de la bibliographie, lorsque ces données existent, ou, idéalement d'effectuer des mesures *in situ*. Ces valeurs serviront à calibrer le modèle mais aussi de référence pour comparer les sites entre eux et localiser les anomalies de croissance.

E. Conclusion générale

L'évaluation de l'état de santé des mangroves de Martinique par la mise au point d'un indicateur performant pouvant être calculé de manière simple, peu coûteuse et reproductible dans l'ensemble des territoires d'Outre-mer était un objectif ambitieux. La réalisation de l'étude en trois phases distinctes sur plus de trois ans et demi a permis de remplir en grande partie cet objectif.

Ainsi, le travail bibliographique réalisé en Phase 1 a fait ressortir que de nombreuses initiatives d'évaluation de l'état de santé des mangroves existent dans le monde. Chaque initiative a mis en place son propre protocole en fonction de ses besoins en termes de gestion des écosystèmes et en fonction des caractéristiques des mangroves de son territoire. Dans la plupart des méthodes mises au point, une seule composante de la mangrove est considérée : la strate arborée.

Au vu de la complexité de l'écosystème mangrove et de la faible sensibilité des paramètres descripteurs de la strate arborée, il a semblé plus pertinent de pousser plus loin la précision d'évaluation de la santé des mangroves en incluant des paramètres et descripteurs d'autres composantes (microfaune du sol et du sédiment, macrofaune du sol, avifaune, régénération forestière, etc.).

Certaines références (dont quelques unes locales) ont permis de cibler une liste restreinte d'une quarantaine de paramètres et descripteurs à tester sur le terrain se focalisant sur une grande partie des composantes de l'écosystème.

Une analyse du territoire a permis d'identifier et de caractériser quelques sites pilotes potentiels sur lesquels il aurait été pertinent de tester cette liste restreinte de paramètres et de descripteurs. Quatre sites pilotes ont finalement été retenus par le comité de pilotage, deux sites de mangrove alluvionnaire (Cohé du Lamentin et Pointe Merle) et deux sites de mangrove colluvionnaire (Baie du Trésor et Belfond). Dans les deux cas, un site était plutôt en bon état et l'autre plus dégradé.

En Phase 2, un important effort d'inventaire a été réalisé afin de tester un maximum de paramètres du contexte mais aussi des différentes composantes de la mangrove (végétation, faune terrestre, avifaune, faune du sol...). Il a permis d'obtenir un vaste jeu de données dont l'analyse a rendu possible la sélection d'une dizaine de paramètres pour la création d'un indicateur composite sur l'« état de santé » des mangroves.

Un indicateur à deux facettes a alors été proposé : un indicateur du contexte (Ind_Cont) qui entoure le site de mangrove étudié (bassin versant, arrière mangrove, frange littorale et milieu marin adjacent) basé sur les niveaux de pression et un indicateur par composante de la mangrove (Ind_Comp) basé sur l'état écologique de la mangrove étudiée.

Plusieurs méthodes de calcul de ces indicateurs ont été proposées, en particulier pour l'indicateur par composante. Le comité de pilotage a alors validé les deux indicateurs et la méthode de calcul à mettre en application au cours de la Phase 3.

La Phase 3 a consisté à sélectionner une soixantaine de sites de mangrove à l'échelle de la Martinique et d'y appliquer la méthode mise au point pour calculer l'indicateur composite de « l'état de santé » des mangroves.

Ainsi, l'indicateur de contexte (Ind_Cont) qui traduit le niveau de pression a été calculé pour 62 sites, soit 87% de la surface des mangroves de Martinique, tandis que 59 sites, soit 85% de la surface des mangroves de Martinique, ont été parcourus sur le terrain pour calculer l'indicateur par composante (Ind_Comp) traduisant l'état des mangroves. Cela a permis d'aboutir *in fine* à une amélioration du protocole proposé en fin de phase 2 pour fournir un indicateur opérationnel et obtenir une cartographie de « l'état de santé » des mangroves de Martinique.

Ce travail a été réorienté par l'OFB à la suite de la réunion de restitution vers un indicateur basé uniquement sur les pressions. Un nouvel indicateur, Ind_Pres, a alors été mis au point. Il est basé à la fois sur les pressions à grande échelle du contexte mesurées par un travail bibliographique et cartographique et à la fois sur les pressions locales observées sur le terrain. Il est composé par une synthèse de plusieurs paramètres issus des indicateurs Ind_Cont et Ind_Comp précédemment mis au point.

Ind_Pres a été calculé pour 62 sites, soit 87% de la surface des mangroves de Martinique.

Une analyse des résultats a été proposée à l'échelle de l'ensemble de la Martinique, des grands ensembles géographiques, des communes et des zones de mangrove. Une réflexion a également été menée sur les limites de cet indicateur ainsi que sur son devenir, son amélioration et son application aux autres territoires d'Outre-mer possédant des mangroves.

Le niveau de pression que subissent les mangroves de Martinique et une analyse de l'état de santé de ces écosystèmes aux multiples services écosystémiques ont donc été appréhendés au cours de ce travail.

CONCLUSION GÉNÉRALE

À l'échelle de la Martinique, les principaux résultats indiquent pour l'indicateur de pression Ind_Pres que

- seulement 3% des surfaces de mangroves sont soumises à un niveau de pression faible à très faible (13% des sites) ;
- près de la moitié des surfaces de mangroves (45%) sont soumises à un niveau de pression élevé (40% des sites) ;
- 7% des surfaces de mangroves sont soumises à un niveau de pression très élevé (3% des sites).

Les mangroves de Martinique sont ainsi soumises à d'importantes pressions sur presque tout le territoire. Les macrodéchets, qu'ils arrivent par la terre ou par la mer, sont omniprésents.

Les mangroves situées à proximité des zones industrielles, agricoles et des grandes zones d'urbanisation sont encore trop souvent utilisées pour se débarrasser des déchets, qu'ils soient solides ou liquides (eaux usées, engrais, pesticides, hydrocarbures...).

Le développement des infrastructures et de l'agriculture industrielle de la Martinique a conduit à une rupture des continuités écologiques et à un isolement quasiment généralisé des mangroves vis à vis des écosystèmes boisés terrestres.

Certaines rares mangroves sont encore relativement préservées comme les mangroves de la Presqu'île de la Caravelle ou du sud Atlantique. Cependant, comme l'ensemble des mangroves, elles font face à l'afflux constant de déchets flottants mais aussi, pour certaines mangroves de fond de baie exposées au vent, à des afflux massifs de sargasses qui provoquent localement des dépérissements.

Le territoire Martiniquais possède néanmoins encore de vastes surfaces de mangrove, notamment dans la Baie de Fort-de-France, aux fortes capacités d'adaptation et de résilience. Il est donc toujours possible d'agir afin d'améliorer leur état de santé.

Outre les nombreuses pressions anthropiques directes, les effets du changement climatique seront de plus en plus intenses (montée du niveau marin, érosion, cyclones...). Les pressions climatiques subies par la Martinique et ses mangroves vont donc s'amplifier dans les années à venir. Un bon état est nécessaire pour que les mangroves jouent leur rôle de protection naturelle face aux événements climatiques violents. Dans ce contexte, les enjeux autour des mangroves sont extrêmement forts tant en terme de biodiversité qu'en terme d'économie.

Le présent diagnostic des mangroves de Martinique doit maintenant être utilisé par les gestionnaires pour continuer d'alerter la population sur l'importance des mangroves et leur état de santé afin d'élargir la prise de conscience. Mais, surtout, **ce travail doit permettre de mener des actions concrètes** donnant la possibilité aux mangroves de retrouver un état écologique satisfaisant. Bon état qui permettra aux mangroves et aux écosystèmes connexes (ex : récifs) d'assurer leurs nombreux services écosystémiques à la population martiniquaise.

– FIN –

Annexes

Annexe 1 Feuilles de relevé terrain

CONTEXTE / COMPOSANTE DECHET

Site :

Date :

Observateur :

Description :

Heure début		
Climat		
Perturbation hydrologique (0, 1, 2, 3)		
Arrière mangrove (0, 1, 2, 3)	déchets	
	chasse	
	pêche	
	autres	
	rmq	
Frange littorale (0, 1, 2, 3)	déchets	
	sargasse	
	défrichement	
	pêche	
	autres	
Mangrove (0, 1, 2, 3)	déchets	
	rmq	

PLACETTES

Site :

Remarques :

Nom scientifique	Nom vernaculaire / habitat	Observations
Goniopsis cruentata	Sur et sous P. rouge	
Aratus pisonii	Sur racines et troncs P. rouge	
Ucidus cordatus	Mantou, Sol vase	
Uca rapax	Crabe violoniste, Sol vase	
Sesarma ricordi	Bord d'estran	
Sesarma curacaoense	Bord d'estran	
Geograpsus lividus	Bord d'estran	
Cardisoma guanhumi	Crabe de terre , arriere mangrove	
Gecarcinus lateralis	Touloulou, arriere plage	
Callinectes sp	Cirique, eau	
Autres		

Placette	Heure début	Climat	GPS	Esp dominante	Type de végétation	Salinité (g/l)	Type de sol	H nappe (cm)	Nombre terriers		Remarques
									Petit (< 3cm)	Gros (≥ 3cm)	

Annexe 2 Proposition initiale : l'indicateur de contexte Ind_Cont et l'indicateur par composante Ind_Comp

1. Valeurs de référence

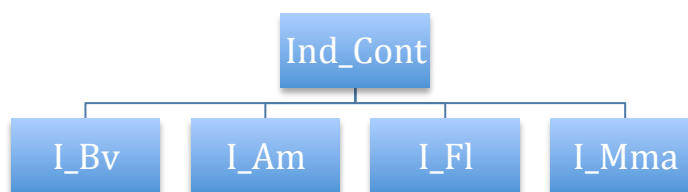
Pour chacun des paramètres et descripteurs sélectionnés, il était prévu initialement de définir leurs « valeurs de référence » et autres « valeurs seuils » (par exemple des « valeurs de déclassement ») afin de qualifier l'état de la mangrove à la suite des expérimentations de phase 2. Ces « valeurs de référence » ont été définies principalement sur la base des données de terrain acquises dans le cadre de cette étude sur les sites les moins perturbés. **Il s'agit de valeurs de référence différentes pour les mangroves de type alluvionnaire et colluvionnaire.**

Dans certains cas comme pour la télédétection, les valeurs mesurées sur le terrain sur les sites soumis au niveaux de pression les plus faibles au cours de la phase 2 ont été utilisées comme référence pour interpréter les images satellites au cours de la phase 3.

2. Proposition initiale : l'indicateur de contexte Ind_Cont et l'indicateur par composante Ind_Comp

2.1. Calcul de l'indicateur de contexte Ind_Cont : présentation des améliorations apportées suite à la phase 3

Pour rappel, l'indicateur composite de contexte Ind_Cont traduisant le niveau de pression subi par les massifs de mangrove est calculé à partir de quatre indices :



Les formules de calcul de chaque indice et de l'indicateur mis au point en phase 2 ainsi que leurs améliorations apportées au cours de la phase 3 sont présentées ci-dessous. **Les formules retenues sont placées dans un encadré vert.**

Indice Bassin versant (I_Bv)

Le descripteur « bassin versant » apporte de nombreux éléments d'analyse concernant l'état de la zone de mangrove située en aval. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser le bassin versant sont quantitatifs en ce qui concerne la surface et l'occupation du sol et qualitatifs pour les pressions générales. **Ils peuvent être appréciés par SIG.**

La formule de calcul de l'indice bassin versant (I_Bv) proposée est basée sur une combinaison des scores des différents paramètres :

- un score / 10 attribué à la proportion de surface agricole $S_{\text{Sagri}} = \% \text{Agri} / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de surface artificialisée $S_{\text{Sart}} = \% \text{Art} / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de surface exploitée (somme de la proportion de surface artificialisée et de la proportion de surface agricole) $S_{\text{Sexp}} = (\% \text{Art} + \% \text{Agri}) / 10$;
- un score / 10 attribué aux pressions générales observées sur le bassin versant. Cet indice (S_{Pg}) viendrait renforcer (ou non) le poids des zones exploitées suivant le type d'activités présentes. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux quatre catégories suivantes :
 - présence de STEU (station d'épuration) ;
 - présence d'industries (décharge, casse auto, usine ...) ;
 - présence d'agriculture industrielle (grandes cultures comme la canne ou la banane par ex.).

L'indice est alors calculé en faisant la somme des trois multipliée par 1,11 pour le ramener à une note sur 10.

Pour les quatre paramètres, plus l'indice est proche de 10, plus le niveau de pression est potentiellement élevé.

L'hydrologie (cf Phase 2) est notée comme un facteur explicatif, elle n'est pas intégrée à l'indice I_Bv et pourra être consultée le cas échéant pour améliorer la compréhension du fonctionnement du bassin versant.

V1 (Phase 2)

Le calcul de l'indice composite « bassin versant » peut alors se faire en calculant la moyenne de ces quatre paramètres. Un coefficient pourrait être attribué à un ou plusieurs indices afin de leur donner plus ou moins de poids.

$$I_{Bv} = \frac{(S_{Sagri} + S_{Sart} + S_{Sexp} + S_{Pg})}{4}$$

V2 (Phase 3)

Suite à l'élargissement du calcul de l'indicateur à 62 sites, plus d'importance a été donnée aux surfaces exploitées (S_Sexp) et aux pressions générales (S_pg) pour le calcul de l'indice du bassin versant I_Bv

$$I_{Bv} = \frac{(S_{Sagri} + S_{Sart} + (S_{Sexp} \times 2) + (S_{Pg} \times 1,5))}{5,5}$$

Indice Arrière mangrove (I_Am)

Le descripteur « arrière mangrove » renseigne sur les activités qui impactent directement la mangrove et sur son évolution en limite amont. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser l'arrière mangrove sont quantitatifs en ce qui concerne l'occupation du sol du linéaire d'arrière mangrove et qualitatifs pour la topographie directe, les milieux connexes, la dynamique d'érosion et les pressions générales. **Ils peuvent être appréciés par SIG et vérifiés / enrichis par la visite sur le terrain.**

La formule de calcul de l'indice arrière mangrove (I_Am) proposé est basée sur une combinaison des scores des différents paramètres :

- un score / 10 attribué à la proportion de linéaire agricole $S_{Lagri} = \%Agri / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de linéaire artificialisée $S_{Lart} = \%Art / 10$;
- un score / 10 attribué à la proportion de linéaire exploité (somme de la proportion de linéaire artificialisé et de la proportion de linéaire agricole) $S_{Lexp} = (\%Art + \%Agri) / 10$;
- un score / 10 attribué aux pressions générales observées en arrière mangrove (S_Pg). Cet indice vient renforcer (ou non) le poids des zones exploitées suivant le type d'activités présentes. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux cinq catégories suivantes :
 - présence de macrodéchets ;
 - présence de rejets directs de STEP (station d'épuration) ;
 - présence de rejets directs de pollutions industrielles (décharge, casse auto, usine ...) ;
 - présence d'agriculture industrielle (grandes cultures comme la canne à sucre ou la banane par ex.) ;
 - présence d'activités de chasse et/ou de pêche (dont crabes).

L'indice est alors calculé en faisant la somme des cinq multipliée par 0,66 pour le ramener à une note sur 10.

- un score / 10 à 3 valeurs pour la dynamique d'accrétion ou d'érosion de la mangrove depuis 1951 (S_Es). 0 correspond à un état stable de la mangrove, 5 à un état d'accrétion (crédité du score car signe de déséquilibre du fait d'apports terrigènes trop importants) et 10 à un état d'érosion (déséquilibre encore plus important du fait d'une dynamique affaiblie de l'arrière mangrove).

Pour les cinq paramètres, plus l'indice est proche de 10 plus le niveau de pression est potentiellement élevé.

La topographie directe, la proportion de zones dépourvues de végétation et les milieux connexes sont notés comme facteurs explicatifs qui pourront être consultés le cas échéant pour améliorer la compréhension du fonctionnement de l'arrière mangrove.

V1 (Phase 2)

Le calcul de l'indice composite « arrière mangrove » peut alors se faire en calculant la moyenne de ces cinq paramètres. Un coefficient pourrait être attribué à un ou plusieurs indices afin de leur donner plus ou moins de poids.

$$I_{Am} = \frac{(S_{Lagri} + S_{Lart} + S_{Lexp} + S_{Pg} + S_{Es})}{5}$$

V2 (Phase 3)

Comme pour l'indice du bassin versant, une importance plus élevée a été donnée aux linéaires exploités (S_{Sexp}) et aux pressions générales (S_{Pg})

$$I_{Am} = \frac{(S_{Lagri} + S_{Lart} + (S_{Lexp} \times 2) + (S_{Pg} \times 2) + S_{Es})}{7}$$

Indice Frange littorale (I_{FI})

Le descripteur « frange littorale » renseigne sur les activités qui impactent directement la mangrove et sur son évolution en limite aval. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser la frange littorale de la mangrove sont qualitatifs. **Ils peuvent être appréciés par SIG et vérifiés/enrichis par la visite sur le terrain.**

La formule de calcul de l'indice « frange littorale » (I_{FI}) proposé est basée sur une combinaison des scores des différents paramètres :

- un score / 10 à 3 valeurs pour la dynamique d'accrétion ou d'érosion de la mangrove depuis 1951 (S_{Es}). 0 correspond à un état stable de la mangrove, 5 à un état d'accrétion (on considère que l'accrétion de la mangrove est également un signe de pression mais dans une moindre mesure que son érosion) et 10 à un état d'érosion ;
- un score / 10 attribué aux pressions générales observées sur la frange littorale (S_{Pg}). Cet indice vient renforcer (ou non) le poids des zones exploitées suivant le type d'activités présentes. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux trois catégories suivantes :
 - présence de macrodéchets flottants ou déposés / enchevêtrés dans les racines de la frange;
 - présence de défrichement (ex : ponton sauvage) ;
 - présence de signes d'activité de pêche.

L'indice est alors calculé en faisant la somme des trois multipliée par 1,11 pour le ramener à une note sur 10.

Pour les deux paramètres, plus l'indice est proche de 10 plus le niveau de pression est potentiellement élevé.

Le calcul de l'indice composite « frange littorale » peut alors se faire en calculant la moyenne de ces trois paramètres.

V1 (Phase 2)

$$I_{FI} = \frac{S_{Es} + S_{Pg}}{2}$$

Indice Milieu marin adjacent (I_{Mma})

Le descripteur « milieu marin adjacent » renseigne sur les activités qui peuvent impacter la mangrove sur sa partie aval. Les paramètres sélectionnés permettant de caractériser le milieu marin adjacent de la mangrove sont qualitatifs. **Ils peuvent être appréciés par SIG.**

L'indice « milieu marin adjacent » (I_{Mma}) est calculé par une combinaison des scores des différents paramètres :

- un score / 10 attribué aux pressions générales observées sur le milieu marin adjacent (S_Pg). Cet indice vient renforcer (ou non) le poids des zones exploitées suivant le type d'activités présentes. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués aux quatre catégories suivantes :
 - présence d'activités portuaires ;
 - présence d'activités nautiques ;
 - présence d'industries sur les littoraux à proximité (décharge, raffinerie...) ;
 - présence d'apports terrigènes importants (embouchures de cours d'eau majeurs).
 L'indice est alors calculé en faisant la somme des trois multipliée par 0,83 pour le ramener à une note sur 10.
- un score / 10 sur la qualité des masses d'eau (S_Qme) issue des rapports DCE de l'Office de l'Eau Martinique. L'état écologique des masses d'eau est noté selon cinq critères (mauvais 5, médiocre 4, moyen 3, bon 2 et très bon 1). Les valeurs sont alors multipliées par deux pour avoir un score / 10.

Pour les deux paramètres, plus l'indice est proche de 10 plus le niveau de pression est potentiellement élevé.

La géomorphologie de la baie (cf Phase 2) est notée comme facteur explicatif qui pourra être consulté le cas échéant pour améliorer la compréhension du fonctionnement du milieu marin adjacent. Des travaux récents réalisés par le BRGM sur l'hydromorphologie côtière de la Martinique dans le cadre de la DCE pourront peut-être apporter des informations à valoriser dans le cadre du présent indicateur.

L'indice composite « milieu marin adjacent » est calculé en faisant la moyenne de ces deux paramètres :

V1 (Phase 2)

$$I_{Mma} = \frac{S_{Pg} + S_{Qme}}{2}$$

Calcul de l'indicateur composite du contexte (Ind_Cont)

L'indicateur composite du contexte est calculé à partir de la combinaison des quatre indices des descripteurs présentés ci-dessus. Un coefficient est appliqué à certains indices dont l'influence peut être considérée comme plus importante.

V1 (Phase 2)

Voici le calcul proposé pour une note / 10, **10 correspondant au niveau maximal de pression** et avec un coefficient de 1,5 pour le bassin versant et de 2 pour l'arrière mangrove :

$$Ind_Cont = \frac{(I_{Bv} \times 1,5) + (I_{Am} \times 2) + (I_{FI}) + (I_{Mma})}{5,5}$$

La valeur de l'indicateur de contexte peut être ramenée à une note / 5 permettant de qualifier le contexte suivant les cinq critères à savoir un niveau de pression sur la mangrove :

- Très élevé Ind_Cont = 5
- Elevé Ind_Cont = 4
- Moyen Ind_Cont = 3
- Faible Ind_Cont = 2
- Très faible Ind_Cont = 1



Lorsque la valeur de l'indicateur dépasse la valeur limite d'une catégorie, **la valeur de l'indicateur est toujours arrondie à la valeur supérieure**. Par ex. : valeur calculée de Ind_Cont = 3,3 alors la valeur de Ind_Cont indicateur sera de 4 (Tableau 10).

Le Tableau 10 présente un exemple de calcul de l'indicateur de contexte Ind_Cont pour le site de la Cohé du Lamentin, site référence de la phase 2. L'indicateur est calculé à partir de l'indice des pressions du bassin

versant (I_Bv), des pressions de l'arrière mangrove (I_Am), de l'indice de pression de la frange littorale (I_Fl) et de l'indice de pression du milieu marin adjacent (I_Mma) selon la formule présentée précédemment.

La valeur de l'indicateur est arrondie au niveau supérieur afin de définir le niveau de pression auquel est exposé le site. Dans ce cas l'indicateur révèle un **niveau de pression élevé** (valeur = 4) auquel est exposée la mangrove de la Cohé du Lamentin.

Tableau 10. Exemple du calcul de l'indicateur de contexte Ind_Cont pour le site de la Cohé du Lamentin

Site	Ind_Cont (/5) Valeur	Ind_Cont (/5) Calculé	Descripteurs - nom	Descripteurs - valeur (/10)	Indice - nom	Indice - valeur (/10)	Sous indice - nom		Sous indice - valeur (0,1,2,3)
Cohé du Lamentin	4	3,3	Bassin versant I_Bv	6,2	S_Sagri	2,2			
					S_Sart	4,8			
					S_Sexp	7,0			
					S_pg	8,9	STEU Décharge		3
							Industrie		3
							AgrilIndus		2
			Arrière mangrove I_Am	8,0	S_Lagri	0,0			
					S_Lart	10,0			
					S_Lexp	10,0			
					S_pg	7,9	Macrodechets		3
							STEU Décharge		3
							Industrie		3
							AgrilIndus		0
							Chasse/peche		3
					S_es	10			
			Frange littorale I_Fl	2,8	S_es	0			
					S_pg	5,6	Macrodechets flottants		2
							Défrichement		2
							Pêche		1
			Milieu marin adjacent I_Mma	8,0	S_pg	9,96	Activités portuaires		3
							Activités nautiques		3
							Industrie		3
							Apports terrigènes		3
					S_qme	6			

Légende :

S_Sagri : Score surface agriculture
 S_Sart : Score surface artificialisée
 S_Sexp : Score surface exploitée
 S_pg : Score pression générale
 S_Lagri : Score linéaire agriculture

S_Lart : Score linéaire artificialisé
 S_Lexp : Score linéaire exploité
 S_pg : Score pression générale
 S_es : Score évolution surfacique
 S_qme : Score qualité de la masse d'eau

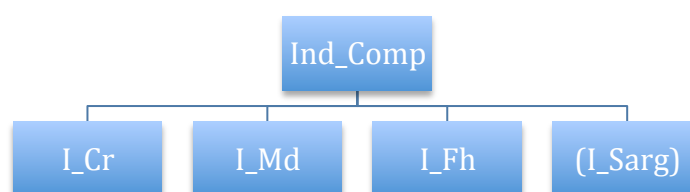
2.2. Calcul de l'indicateur par composante Ind_Comp : présentation des améliorations apportées suite à la phase 3

Contenu de l'analyse de terrain

L'analyse de terrain se cantonne à la périphérie du site. Il s'agit alors :

- de vérifier les observations réalisées par SIG (arrière mangrove et, le cas échéant, sur le front de mer) ;
- d'évaluer la présence de macrodéchets (**macro-polluants**) ;
- d'analyser l'alimentation en eau et de déceler la présence ou non d'une modification du fonctionnement hydrologique de la zone (**perturbation de l'écosystème en place**) ;
- d'évaluer la présence de sargasses (**saturation**).

Pour rappel, l'indicateur composite par composante Ind_Comp traduisant « l'état de santé » des massifs de mangrove est donc calculé à partir d'un indice de croissance des palétuviers (I_Cr) accompagné d'un indice portant sur la présence de macrodéchets (I_Md) en bordure intérieure de mangrove, d'un indice sur les perturbations du fonctionnement hydrologique du site (I_Fh) et d'un indice traduisant la présence d'un excès de sargasses (I_Sarg).



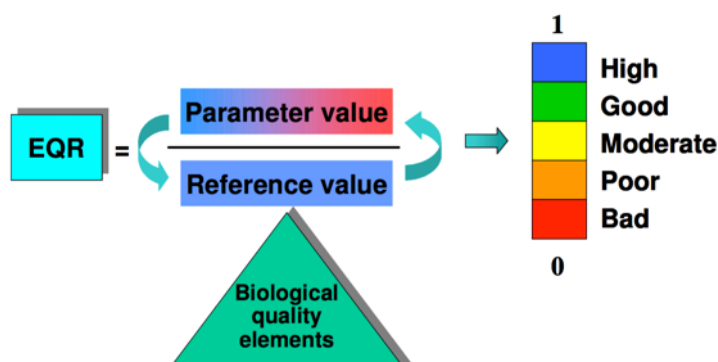
Indice Croissance des palétuviers (I_Cr)

Le descripteur « croissance » est abordé uniquement par la télédétection. Comme cela a été démontré en phase 2, l'utilisation des indices de chlorophylle issus du traitement des images Sentinel-2 devrait permettre de déceler des anomalies de croissance des palétuviers (très forte ou faible croissance) à l'échelle de toutes les mangroves de Martinique. Il s'agit d'étudier des images prises à des dates proches de celles analysées pour les sites expérimentaux avec une très faible nébulosité. La principale nuance est dans la résolution des images qui rendent complexe l'analyse des très petites surfaces de mangrove.

Ce traitement peut être utilisé de deux manières :

- cibler les zones où il semble y avoir un problème de croissance puis vérifier sur le terrain ;
- fournir un indice sur la « qualité » de la croissance des palétuviers à intégrer dans l'indicateur composite de « l'état de santé » de la mangrove.

Les paramètres écologiques quantitatifs permettant de calculer l'indicateur par composante devaient être évalués selon la méthode des EQR (Ratio de Qualité Écologique) (Wouter van de Bund & Angelo G. Solimini, 2007). Cette méthode consiste à diviser la valeur du paramètre par la valeur de référence pour aboutir à une échelle de 0 à 1 :



Initialement plusieurs descripteurs écologiques étaient envisagés. À l'issue de la phase 2, seule la croissance des palétuviers a été retenue. C'est donc le seul paramètre qui est évalué selon la méthode des EQR. Si, à

l'avenir, d'autres paramètres biologiques devaient intégrer l'indicateur, ils pourront être évalués par cette méthode.

Le calcul de cet indice (I_Cr) a été réalisé à partir des valeurs de référence obtenues par les expérimentations de terrain qui ont servi à calibrer le modèle. Les valeurs moyennes de teneur en chlorophylle (Chl_Moy) de chaque site ont été calculées par traitement d'image. Ce calcul est facilité grâce à la mise en place d'une procédure automatisée de traitement des images Sentinel-2 par notre partenaire Géodesis (cf. B. 2).

Les valeurs mesurées sur les différents sites peuvent être supérieures ou inférieures à la référence ce qui se répercute sur les valeurs d'EQR qui peuvent dépasser 1. Il s'agit alors de s'intéresser à l'écart au dessus ou en dessous de la valeur de référence (EQR=1). Dans les deux cas cela peut indiquer un dysfonctionnement éventuel. Par exemple, une concentration en chlorophylle très importante ou anormalement faible. Dans les cas où la valeur d'EQR dépasse la valeur 2 (ce qui correspond à ce que la valeur mesurée sur un site soit plus de deux fois supérieure à la référence), on considérera que le seuil limite est dépassé ce qui correspondra à une valeur d'indice I_Cr = 0.

V1 (Phase 2)

S_Moy = Score pour la moyenne de la teneur en chlorophylle d'un site divisée par la valeur de chlorophylle de référence. **Cette valeur de référence mesurée en phase 2 est différente pour les mangroves colluvionnaires ou alluvionnaires.**

$$S_Moy = Chl_Moy / Chl_Ref$$

Ce qui est intéressant ici c'est la variation autour de la valeur de référence. On calcule donc sa valeur absolue que l'on retranche à 1, la valeur maximale de l'EQR.

$$I_Cr = 1 - ValABS (S_Moy - 1)$$

V2 (Phase 3)

Les variations de S_Moy sont assez faibles. Afin de donner plus de poids aux écarts, ils sont multipliés par 1,5.

$$I_Cr = 1 - (ValABS (S_Moy - 1) \times 1,5)$$

Indice Structure de la population de crabes (I_Spc)

En phase 2, il a été envisagé d'utiliser le descripteur « structure de la population de crabes » à travers trois paramètres quantitatifs : la densité d'individus (S_Dind), la densité de trous (S_Dtrou) et la diversité spécifique (S_Div). L'étude des crabes devait permettre d'avoir une indication sur les micropolluants présents sur les sites, en particulier sur les effluents de STEU.

Au cours de la phase 3, la densité des trous de crabe (gros et petits) a été étudiée sur l'ensemble des sites de mangrove de la façade Atlantique et du sud Caraïbes. Aucune tendance permettant de différencier les sites en fonction de leur état n'a pu être mise en évidence.

La thèse de M. Herteman (2010) a mis en évidence une corrélation forte entre le nombre de trous et le nombre de crabes à Mayotte. Deux thèses réalisées sur les crabes de mangrove de Mayotte (Theuerkauff, 2018 et Capdeville, 2018) mettaient en évidence une diminution du nombre de trous lorsque la mangrove reçoit beaucoup d'eaux usées. Cependant aucune relation n'a pu être mise en évidence en Martinique entre la densité de trous et la présence d'eaux usées que ce soit dans la présente étude ou celle réalisée par Aquasearch (2018).

Plusieurs paramètres rendent également complexe l'interprétation des résultats sur les trous de crabe en particulier sur l'aspect saisonnier du comportement des crabes qui varie en fonction des variations du niveau d'eau dans la mangrove. La période d'inventaire s'est étendue d'avril à décembre oscillant ainsi entre saison sèche et saison humide.

La densité de trous de crabe n'est donc pas retenue pour intégrer l'indicateur composite.

Indice Macro déchets (I_Md)

Concernant les macrodéchets (I_Md), la méthode à reprendre se situe dans le chapitre sur l'indice arrière mangrove de l'indicateur de contexte à savoir un score attribué à la présence de macrodéchets observés en bordure et/ou dans la mangrove. Il est calculé sur la base de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3) attribués à la présence de macrodéchets.

Afin d'être combiné aux deux autres, l'indice est ramené à une échelle entre 0 et 1 et sa valeur inversée pour obtenir une valeur d'indice élevée pour une mangrove pauvre en déchets :

$$I_Md = 1 - (\text{score}/3)$$

Indice Fonctionnement hydrologique (I_Fh)

Concernant le fonctionnement hydrologique (I_Fh), la même méthode que pour les macrodéchets est appliquée : un score de 0 à 3 (absence de perturbation 0, perturbation faible 1, perturbation moyenne 2 et perturbation forte 3).

Afin d'être combiné aux deux autres, l'indice est ramené à une échelle entre 0 et 1 et sa valeur inversée pour obtenir une valeur d'indice élevée pour une mangrove pauvre en déchets :

$$I_Fh = 1 - (\text{score}/3)$$

Indice Présence de sargasses en excès (I_Sarg)

Outre les indices présentés précédemment, un indice concernant la présence de sargasses (I_Sarg) a été ajouté à l'indicateur par composante en phase 3. L'impact des sargasses sur la mangrove est mal connu, du moins en faible à moyenne quantité. Nous proposons donc de prendre en compte leur présence **uniquement lorsqu'elles saturent la mangrove** et ainsi peuvent perturber fortement l'écosystème jusqu'à provoquer de la mortalité chez les palétuviers.

Sur le terrain leur présence a été relevée par l'attribution de scores de 0 à 3 (absence 0, faible 1, moyenne 2 et forte présence 3).

I_Sarg sera donc pris en compte dans le calcul de l'indicateur uniquement si son score atteint la valeur maximale de 3.

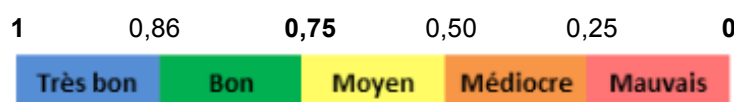
Dans ce cas :

$$I_Sarg = 0$$

Calcul de l'indicateur composite par composante (Ind_Comp)

L'indicateur composite « d'état de santé » issu de l'étude par composante est calculé à partir de différentes combinaisons des indices issus des quatre descripteurs présentés ci-dessus (macrodéchets, perturbations du fonctionnement hydrologique, croissance, excès de sargasses). Un coefficient est appliqué à certains indices dont l'influence peut être considérée comme plus importante.

La lecture du calcul de l'indicateur est basée sur l'échelle à cinq niveaux du bon état écologique de la DCE. Les valeurs entre 0 et 0,24 indiquent un mauvais état écologique, entre 0,25 et 0,49 un état médiocre, entre 0,50 et 0,74 un état moyen, entre 0,75 et 0,85 un bon état et un très bon état entre 0,86 et 1 ; **la valeur seuil limite inférieure du bon état étant 0,75.**



L'indicateur de « santé » des mangroves par composante (Ind_Comp) peut être calculé selon la formule :

V1 (Phase 2)

$$\text{Ind_Comp} = \frac{(I_Md + I_Fh + (I_Cr \times 1,5) + (I_Spc \times 1,5))}{5}$$

Un coefficient de 1,5 est utilisé pour renforcer l'effet des paramètres de mesure du vivant. Sa pondération pourra être revue par la suite.

V2 (Phase 3)

La seconde version de la formule prend en compte la très forte présence de sargasses. L'indice des crabes (I_Spc) n'est plus présent car les résultats des analyses n'ont pas été concluants.

Si **présence de sargasses** en excès (mort de palétuviers)

$$\text{Ind_Comp} = \frac{(I_Md + I_Fh + I_Sarg + (I_Cr \times 1,5))}{4,5}$$

Si **absence de sargasses** en excès

$$\text{Ind_Comp} = \frac{(I_Md + I_Fh + (I_Cr \times 1,5))}{3,5}$$

Le Tableau 11 présente un exemple de calcul de l'indicateur par composante Ind_Comp pour le site de la Cohé du Lamentin, site référence de la phase 2.

L'indicateur est calculé à partir de l'indice de macrodéchets (I_Md), des perturbations du fonctionnement hydrologique (I_Fh) et de l'indice de croissance (I_Cr) selon la formule présentée précédemment.

La présence de sargasse n'est pas prise en compte car elles ne sont pas présentes sur le site. Pour rappel, les sargasses entrent en compte dans l'indicateur **seulement si elles sont en excès sur le site**.

La valeur de l'indicateur est arrondie au niveau inférieur afin de définir l'état du site. Dans ce cas l'indicateur révèle un état **médiocre** (valeurs entre 0,25 et 0,49) de la mangrove de la Cohé du Lamentin.

Tableau 11. Exemple de calcul de l'indicateur par composante Ind_Comp pour le site de la Cohé du Lamentin

Site	Ind_Comp Alt (/1) Valeur	Ind_Comp Alt (/1) Calculé	Descripteurs - nom	Descripteurs - valeur (/1)	Indice - nom	Indice - valeur valeur (EQR)	Indice - valeur (0,1,2,3)
Cohé du Lamentin	0,30	0,31	Macrodéchets I_Md	0,00	Macrodechets	-	3
			Perturbation du fonctionnement hydraulique I_Fh	0,00	Perturbation du fonctionnement hydraulique	-	3
			Présence de sargasses I_Sarg	N/A	Sargasse	-	0
			Croissance I_Cr	0,71	S_MOY	0,8	-

Légende : S_MOY: Score EQR de la teneur en chlorophylle

Annexe 3 Tableau récapitulatif des valeurs de référence et des seuils d'écart (LCC et LAI)

Les valeurs de référence sont utilisées comme étalons de la « bonne santé » des mangroves. Afin de prendre en compte les 2 principaux types de mangroves représentatives de la Martinique (alluvionnaires et colluvionnaires), 2 jeux de valeurs de référence sont retenus :

- des valeurs de LCC et LAI pour les mangroves alluvionnaires (côte Caraïbes), tirées du site pilote de la Pointe Merle
- des valeurs de LCC et LAI pour les mangroves colluvionnaires (côte Atlantique et littoral sud), tirées du site pilote de la baie du trésor

	Site 1	Site 3	Site 2	Site 4
Nombre d'espèces	3	3	3	1
Moyenne LCC (terrain)	56	44	46	39
Moyenne tLAI (terrain)	1,3	1	1,6	1,4
Moyenne LAI direct	2,5	2,8	3	2,3

Site 1 (Cohé du Lamentin)

LAI terrain	espèce	LCC terrain	LAI (calculé)
Min.: 0.860	A.germinans:3	Min. : 35.3	Min. :1.817
1st Qu.: 1.100	L.racemosa :0	1st Qu.: 48.5	1st Qu.:2.422
☞ Median :1.320	Mixte (2sp) :0	☞ Median :55.7	☞ Median :2.455
☞ Mean : 1.192	Mixte (3sp) :3	☞ Mean : 55.9	☞ Mean :2.558
☞ 3rd Qu.: 1.320	R. mangle :3	☞ 3rd Qu.: 60.2	☞ 3rd Qu.:2.868
☞ Max. : 1.460		☞ Max. : 78.7	☞ Max. :3.165

Site 3 (Pointe Marin)

LAI terrain	espèce	LCC terrain	☞ LAI (direct)
Min. :0.62	A.germinans:2	Min. :39.80	☞ Min. :1.230
1st Qu.:0.86	L.racemosa :1	1st Qu.:41.80	☞ 1st Qu.:2.000
☞ Median :1.03	Mixte (2sp) :0	☞ Median :43.70	☞ Median :3.114
☞ Mean :0.98	Mixte (3sp) :0	☞ Mean :44.69	☞ Mean :2.760
☞ 3rd Qu.:1.11	R. mangle :6	☞ 3rd Qu.:45.60	☞ 3rd Qu.:3.517
☞ Max. :1.23		☞ Max. :52.60	Max. :3.764

Site 2 (Pointe Merle) : utilisé pour les valeurs de référence des mangroves alluvionnaires

LAI terrain	espèce	LCC terrain	LAI (direct)
Min. :1.030	A.germinans:3	Min. :35.90	Min. :2.351
1st Qu.:1.230	L. racemosa:0	1st Qu.:39.35	1st Qu.:2.585
Median :1.650	Mixte(2sp):1	Median :46.20	Median :2.987
Mean :1.545	Mixte (3sp) :1 R. mangle :6	Mean :46.75	Mean :3.026
3rd Qu.:1.785		3rd Qu.:53.90	3rd Qu.:3.392
Max. :2.050		Max. :58.50	Max. :3.793

Site 4 (Baie du Trésor) : utilisé pour les valeurs de référence des mangroves colluvionnaires

LAI terrain	espèce	LCC terrain	LAI (direct)
Min. :0.860	A.germinans:0	Min. :30.70	Min. :2.071
1st Qu.:1.020	L.racemosa :0	1st Qu.:34.70	1st Qu.:2.132
Median :1.440	Mixte (2sp) :0	Median :38.80	Median :2.283
Mean :1.313	Mixte (3sp) :0	Mean :38.04	Mean :2.281
3rd Qu.:1.610	R. mangle :9	3rd Qu.:39.40	3rd Qu.:2.379
Max. :1.680		Max. :46.60	Max. :2.590

Annexe 4 Dépendances Python et plugins QGIS

Les bibliothèques Python suivantes sont utilisées pour les traitements :

- GDAL : librairie commune pour les traitements géospatiaux
- Sentinelsat : sélection téléchargement des images
- Geopandas et Rasterstats : pour le calcul des statistiques
- QGIS : pour la génération du projet et la manipulation des couches

Les plugins QGIS suivants sont utilisés :

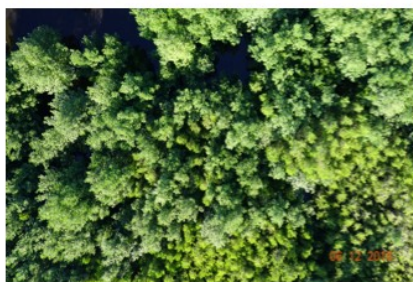
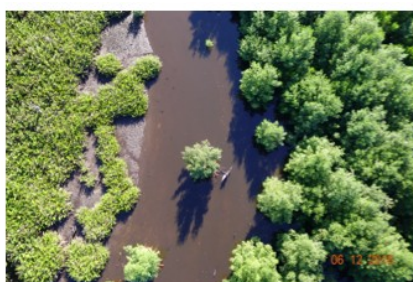
- Value tool : permet d'afficher les valeurs des pixels d'une couche raster

Annexe 5 Chaîne de traitement Sentinel 2 : Manuel utilisateur

EMANG Phase 3 - Chaîne de traitement Sentinel 2



pour le Conservatoire du littoral



Manuel utilisateur

Sommaire

A Préambule.....	3
A.1 Objet du document.....	3
A.2 Objectif de la chaîne de traitement.....	3
A.3 Structure du document.....	3
B Installation.....	4
B.1 Installation de Debian 9.....	4
B.2 Installation de la chaîne.....	4
C Exécution de la chaîne.....	5
C.1 Création d'un compte sur Copernicus Hub.....	5
C.2 Sélection des images.....	5
C.3 Traitement des images.....	5
D Cartographie.....	6
D.1 Description du projet QGIS.....	6
D.2 Styles des couches.....	6

A PRÉAMBULE

A.1 Objet du document

Ce document constitue **le manuel utilisateur** de la chaîne de traitement d'images Sentinel-2 développée dans le cadre de la phase 3 du projet Emang. Cette chaîne produit une des composantes de l'indicateur composite d'état de santé des mangroves de Martinique.

A.2 Objectif de la chaîne de traitement

La chaîne de traitement implémentée est une application des résultats produits en phase 2 du projet. Elle permet d'automatiser la production d'une cartographie des descripteurs **LAI** et **LCC** sur l'ensemble des sites de mangroves. Elle comporte 2 étapes :

1. la **sélection assistée** des images d'entrée Sentinel-2
2. le **traitement automatique** sur ces images.

La 2^e étape produit un projet QGIS contenant l'ensemble des couches géographiques utiles à l'analyse cartographique d'un opérateur du CDL.

A.3 Structure du document

Le présent manuel est décomposé de la manière suivante :

- ✓ Le §B « [Installation de la chaîne](#) » : décrit la procédure d'installation de la chaîne et des logiciels prérequis sur un système Linux (Debian 9);
- ✓ Le §C « [Utilisation de la chaîne](#) » est un guide pour l'exécution de la chaîne de traitements ;
- ✓ Le §D « [Cartographie](#) » présente le projet QGIS généré et les couches de données ;

B INSTALLATION

La cible d'installation de la chaîne et des logiciels utilisés est un système **Linux 64 bits**. Nous préconisons l'installation de **Debian 9** sur un PC (tour ou portable) possédant les caractéristiques minimales suivantes :

- RAM : 16 Go
- Un processeur 64 bits Intel i5 ou **i7** de génération récente
- 100 Go d'espace disque. Un disque SSD est recommandé.

B.1 Installation de Debian 9

Pour préparer une clé USB bootable avec une image Debian 9, suivez les étapes suivantes :

- Chargez le site <https://cdimage.debian.org/cdimage/archive/9.11.0/amd64/iso-cd/>
- Téléchargez le fichier « debian-9.11.0-amd64-xfce-CD-1.iso »
- Créez la clé USB bootable avec l'utilitaire « Rufus » (<https://rufus.ie/>)
- Assurez-vous que le BIOS du PC cible est configuré pour booter sur clé USB

Ensuite, suivez la procédure d'installation et indiquez les informations suivantes quand demandées :

- Mot de passe administrateur (root) : **emang**
- Création utilisateur : **emang**
- mot de passe utilisateur : **emang**

Une fois Debian 9 installé et rebooté en ayant pris soin de retirer la clé USB :

- S'identifier avec le compte **emang** créé à l'installation
- Lancer le gestionnaire de fichiers
- A partir d'une clé USB, copier l'archive « **chaîne-sentinel.zip** » dans le répertoire **/home/emang/** (dossier personnel de l'utilisateur)
- dézipper l'archive : clic droit puis « *extraire ici* »
 - vous devez voir 2 sous-répertoires (install et chaîne-sentinel) et 2 fichiers (install.sh et pre-install.sh)
- faire un clic droit dans une zone libre (sans sélectionner d'élément), puis cliquer sur « Ouvrir un terminal ici » : agrandissez la fenêtre de terminal pour plus de confort
- taper la commande **pwd** dans le terminal : vous devez voir apparaître : **/home/emang/**
- taper la commande **ls** : vous devez voir apparaître une liste avec les 2 sous-répertoires et les 2 fichiers

B.2 Installation de la chaîne

La chaîne de traitements est installée grâce à des scripts, afin d'automatiser les opérations au maximum. A chaque fois que vous taperez une commande, elle devra être suivie par la touche « Entrée ». Voici les étapes d'installation, à dérouler à partir du terminal :

- tapez la commande **chmod u+x pre-install.sh** (respectez les espaces)
- tapez la commande **./pre-install.sh** : quand un mot de passe est demandé, tapez **emang**
- tapez ensuite la commande **./install.sh** : un ensemble d'opérations vont se dérouler automatiquement¹.

¹ Si un mot de passe vous est demandé pendant l'exécution du script, tapez **emang**

- Lors de l'installation de SNAP, vous devrez interagir avec une fenêtre graphique. Cliquez sur suivant sans modifier les valeurs et options proposées par défaut. A la dernière étape, décochez « Run SNAP Desktop » afin d'éviter que SNAP ne se lance.
- Après la fin du script, tapez la commande suivante : **source .bashrc**
- Bravo, vous êtes prêt à exécuter votre 1^{er} traitement !

C EXÉCUTION DE LA CHAÎNE

La chaîne est exécutée à partir d'un terminal. Les commandes suivantes sont des prérequis à chaque exécution :

- **workon emang** : le prompt de commande doit changer et commencer par (**emang**)
- **cd chaine-sentinel**

C.1 Création d'un compte sur Copernicus Hub

Afin d'avoir accès aux images S2, vous devez créer un compte sur le site <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/self-registration>. L'identifiant et le mot de passe vous seront demandés lors de l'accès à la prévisualisation des images sélectionnées.

Note : le site <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/> est très intéressant pour repérer les images à faible couverture nuageuse pour une date donnée.

C.2 Sélection des images

La 1^{ere} étape du traitement est la sélection des images Sentinel-2. Elle est réalisée avec le script python « **search_images.py** » et vous permet de sélectionner la ou les images sur une période temporelle donnée. Pour plus de facilité, ouvrez une fenêtre de navigateur à côté du terminal. Voici les instructions pour réaliser cette sélection :

- Tapez la commande **python search_images.py -h**
 - vous voyez s'afficher l'aide à l'utilisation
- Par exemple, tapez **python search_images.py 01-05-2020 31-05-2020**
- Si le script trouve des images, il propose de les sélectionner ('o' pour retenir une sélection)
- Ouvrez le fichier « **results.html** » en parallèle dans le navigateur pour prévisualiser les images (le fichier se trouve dans « dossier personnel/chaine-sentinel »)
- Faites votre sélection en fonction de la couverture nuageuse des images
- A la fin du processus, le fichier « **products_id.txt** » aura été généré et contient les ID des images qui seront téléchargées et traitées.
- En cas de mauvaise sélection, vous pouvez relancer ce script pour générer le fichier à nouveau

Note 1 : privilégiez les images de la meilleure qualité, quitte à augmenter la période temporelle

Note 2 : ne prenez que les images entières (non coupées)

C.3 Traitement des images

La phase de traitement utilise le fichier « **products_id.txt** » pour télécharger les images et les traiter. Pour lancer le traitement, tapez la commande **./launch_chaine.sh**.

Selon le nombre d'images à traiter, le traitement peut prendre 30 mn à 1 h.

A la fin du traitement, vous devez avoir les éléments suivants dans le répertoire **sig** :

- Autant de sous-répertoires que d'images traitées. Ces sous-répertoires sont nommés en fonction de la date de l'image
- un fichier « **carto-mangroves-aaaammjj.qgs** » contenant les couches cartographiques générées. Ce fichier est consultable sur QGIS.

Note : si un traitement est relancé avec d'autres images, un nouveau projet QGIS est généré avec les images supplémentaires.

D CARTOGRAPHIE

Le projet généré est ouvert avec le logiciel QGIS 3.4. Afin d'améliorer l'expérience utilisateur, les actions suivantes sont préconisées :

- Installation du plugin « **Value tool** », permettant de visualiser les valeurs de pixels des couches rasters au passage de la souris
- Activation des infobulles

D.1 Description du projet QGIS

Le projet généré contient différentes couches de données et 1 ou plusieurs groupes correspondant aux images Sentinel traitées. Un seul groupe à la fois doit être sélectionné. Un groupe contient les couches suivantes :

- **SitesMangrovesColluv_out** : polygones des sites de la côte au vent (mangroves colluvionnaires) et des sites de la côte Sud. Quand la couche est sélectionnée, un passage de la souris sur un site fait apparaître une infobulle avec un résumé des caractéristiques du site et des statistiques
- **SitesMangrovesAlluv_out** : idem pour les sites de la côte Caraïbes (mangroves alluvionnaires) et de 3 sites de la côte Sud
- **Descripteur LCC** : valeurs de LCC inversées à partir des indices de végétation
- **Descripteur LAI** : valeurs de LAI calculées à partir de l'algorithme « Biophysical processor » de l'INRA (disponible sur Snap)
- **LCC: écarts Ref Colluv** : écarts des valeurs de LCC par rapport aux valeurs de référence du site pilote de la baie du Trésor. 5 intervalles sont représentés avec l'intervalle central autour de la moyenne correspondant à une valeur « normale ».
- **LCC: écarts Ref Alluv** : idem pour les mangroves alluvionnaires avec les références du site pilote de la pointe Merle
- **Classes de sols** : couche générée par le traitement de correction atmosphérique et permettant de mettre en évidence les sols nus et les zones nuageuses, pour lesquelles le calcul LAI et LCC est non valide. La classe de végétation est affichée en transparence afin de ne pas interférer avec les autres couches
- **Image Sentinel2** : composition 3 bandes de l'image d'entrée du traitement.

D.2 Styles des couches

Des styles QGIS sont automatiquement appliqués aux différentes couches. Ces fichiers de styles se trouvent dans le répertoire sig et peuvent être modifiés au besoin² :

- **stl_classif.qml** : style appliqué à la couche de classes de sols

² Attention à sauvegarder le fichier original pour pouvoir le restaurer si nécessaire

- **stl_contours_sites_tooltip.qml** : style appliqué aux couches vectorielles des polygones de mangroves.
- **stl_lcc.qml** et **stl_lai.qml** : styles appliqués aux rasters des valeurs LCC et LAI
- **stl_lcc_intervalles_alluv.qml** et **stl_lcc_intervalles_colluv.qml** : styles appliqués aux couches de rasters des écarts aux références

L'image ci-dessous illustre un exemple du projet QGIS généré avec affichage de l'infobulle du site « 346-2012 » classé PRN.

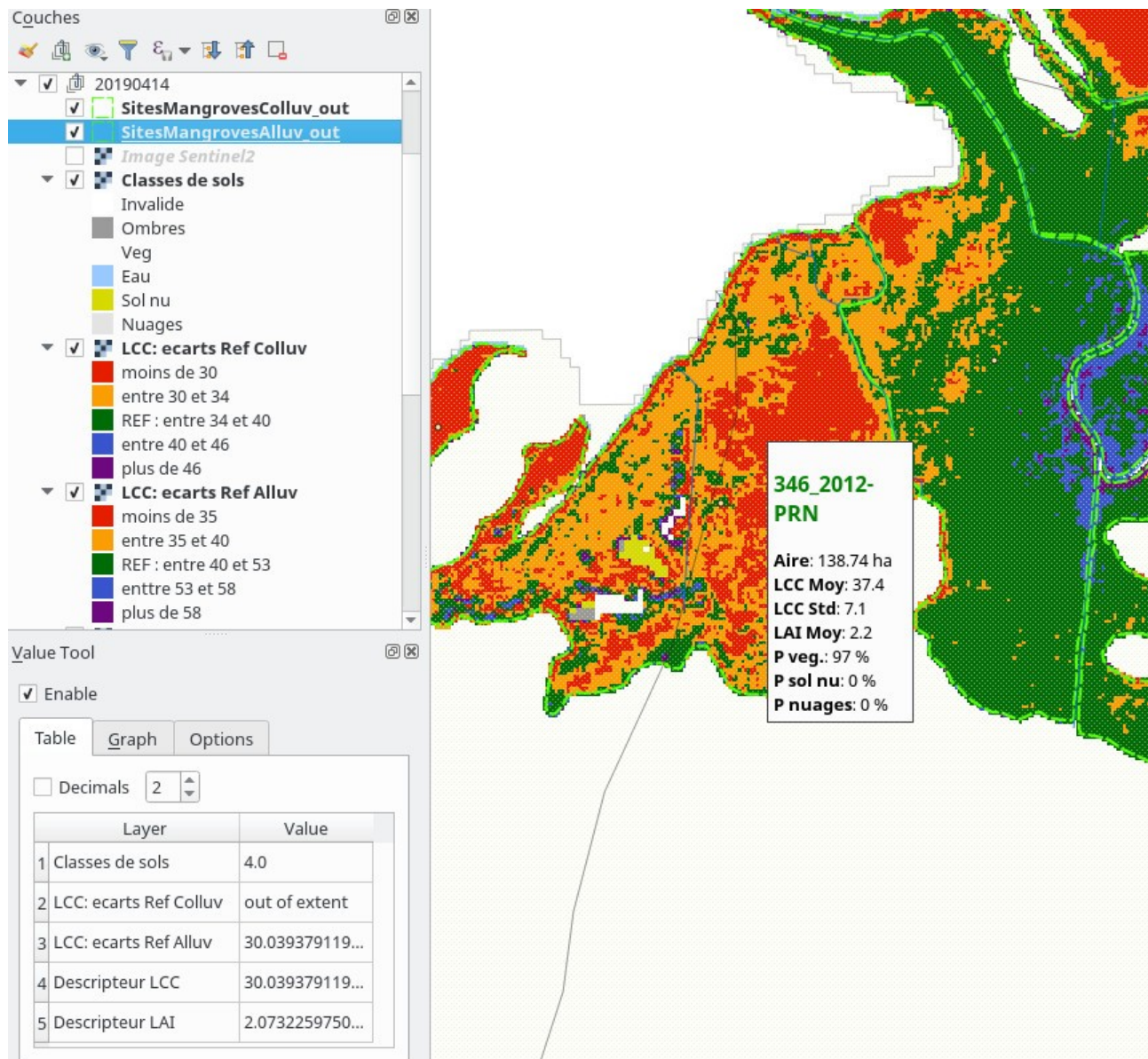


Figure 1: exemple d'un site avec une valeur de LCC moyenne faible par rapport à la normale. On voit en bas à gauche les valeurs de LAI et LCC des pixels. A droite du site sélectionné, on voit un site avec des valeurs de LCC nominales.