



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (2022-2023)

Rapport final

BRGM/RP-73581-FR

Version 1 du 12 avril 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Bouvier C.

Vérificateur :

Nom : Thibault Laigre

Fonction : Ingénieur littoral

Date : 05/04/2024

Signature :

Approbateur :

Nom : Benoit Vittecoq

Fonction : Directeur Régional Martinique

Date : 24/04/2024

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bouvier C. 2024. Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (2022-2023). Rapport final V1. BRGM/RP-73581-FR, 8 p.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

Au cours de la dernière décennie, les littoraux de la Martinique et plus généralement de l'ensemble de la Caraïbe ont vu arriver de grandes quantités de sargasses. Ces événements records en matière de prolifération d'algues et d'échouage ont véritablement débuté en 2011 et se poursuivent aujourd'hui avec des concentrations importantes détectées à partir d'images satellites. Ces échouages massifs d'algues sargasses affectent le littoral de la Martinique et plus largement de la Caraïbe avec des impacts importants sur les populations, les écosystèmes côtiers et les activités pouvant être exercées à proximité.

Dans le cadre du plan départemental de prévention et de lutte contre les sargasses, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de la transition écologique (ADEME) et La Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DEAL), ont mis en place depuis 2018 un réseau de suivi par caméras autonomes en Martinique. Son objectif est d'améliorer la connaissance et la compréhension des phénomènes d'échouages de sargasses et de leurs impacts sur le littoral.

La maintenance du suivi des échouages de sargasses a été assurée pendant les 12 derniers mois, entre janvier 2023 et janvier 2024, sur six sites d'études localisés sur les façades Atlantique (4) et sud-Caraïbe (1) de la Martinique. Au cours de cette période, le système de suivi a connu très peu de dysfonctionnement avec moins de 10 % d'échec en moyenne dans l'acquisition des images. Entre janvier 2019 et janvier 2024, plus de 86 400 images ont été capturées sur l'ensemble des six sites étudiés.

Une chaîne de traitement des images permettant la détection automatique des algues et une estimation de leurs surfaces a été appliquée, montrant des résultats satisfaisants sur cinq sites. Sur ces derniers, les chroniques des surfaces échouées comprennent la date d'acquisition, la quantité de sargasses détectées en pixels ou en mètres carrés, la proportion de sargasses sur l'image correspondante et la précision de la détection. Ces chroniques peuvent être mises à disposition, les futurs utilisateurs de ce jeu de données sont encouragés à utiliser la donnée surfacique lorsque la qualité de la détection est jugée satisfaisante ou excellente (précision 2 et 3 respectivement).

Si un suivi local et en temps réel du phénomène sargasse est important pour définir les interventions pouvant être réalisées sur site (e.g. organisation des ramassages), la capitalisation de l'information via l'estimation des quantités échouées est indispensable pour surveiller l'évolution du phénomène, mieux qualifier les impacts, définir des stratégies de gestion adaptées, valider ou améliorer les modèles de prévisions et mieux caractériser l'effet des sargasses sur les évolutions du trait de côte.

Ainsi, la mise à disposition de ces nouvelles données auprès des différents acteurs de la thématique aura des retombées importantes dans une perspective de recherche et de développement. La Martinique apparaît alors aujourd'hui comme une zone pilote où les innovations méthodologiques mises au point dans le cadre de ce travail peuvent être transférables vers d'autres territoires.

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. Contexte.....	7
1.2. Objectifs	8
2. Présentation des sites suivis	9
2.1. Introduction	9
2.2. Les sites suivis	11
2.2.1. <i>La baie du bourg du Marigot</i>	11
2.2.2. <i>La plage du bourg de Sainte-Marie</i>	11
2.2.3. <i>Baie Cayol (le Robert)</i>	12
2.2.4. <i>Frégate est (le François)</i>	12
2.2.5. <i>Petite anse Macabou (le Vauclin)</i>	13
2.2.6. <i>La Baie du Diamant</i>	13
2.3. Performance du suivi.....	14
2.3.1. <i>Suivi et maintenance sur les 12 derniers mois</i>	14
2.3.2. <i>Suivi et maintenance depuis 2019</i>	15
3. Les algorithmes de traitement des images	16
3.1. Géoréférencement des images	16
3.2. Détection du trait de côte	17
3.3. Détection des sargasses	19
3.4. Conception du bulletin mensuel en période d'échouage.....	20
3.5. Données complémentaires.....	21
3.5.1. <i>Conditions météorologiques</i>	21
3.5.2. <i>Régime de marée et caractéristique des vagues</i>	21
4. Résultats	22
5. Conclusion	29
6. Références.....	31

Liste des figures

Figure 1 : photographie capturée par le dispositif de suivi ©SolarCam illustrant un échouage de sargasses le 13 juin 2021 sur le secteur sud de la plage de Petite anse Macabou (commune du Vauclin).....	7
Figure 2 : présentation du dispositif de suivi ©Solarcam (https://www.solarcam.fr) à gauche et installation sur le site de Grande anse Macabou au Vauclin (2018-2020) à droite.....	10
Figure 3 : localisation des sites équipés d'un dispositif ©Solarcam avec en rouge les sites instrumentés dans le cadre du suivi des échouages de sargasses et en jaune ceux gérés par l'observatoire Olimar (www.observatoire-olimar.fr).....	10
Figure 4 : localisation du dispositif et prise de vue au bourg du Marigot.....	11
Figure 5 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du bourg de Sainte-Marie.	12
Figure 6 : localisation du dispositif et prise de vue au Robert sur le site de la Baie Cayol.	12
Figure 7 : localisation du dispositif et prise de vue au François sur le site de Frégate Est.....	13
Figure 8 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Petite anse Macabou au Vauclin.	13
Figure 9 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Dizac au Diamant.	14
Figure 10 : performance du suivi par imagerie photo sur les six sites équipés en nombre de photos capturées par jour et par site depuis le début de la présente convention (entre janvier 2023 et janvier 2024). Les étoiles rouges illustrent les interventions de maintenance réalisées sur site.	14
Figure 11 : évolution temporelle du nombre d'images capturées pour chaque site (en cumul) et par jour depuis la mise en place du suivi.....	15
Figure 12 : photo aérienne de la plage de Duck (Caroline du Nord, États-Unis) montrant la transformation d'une image oblique (coordonnées u, v) en image plane (coordonnées X, Y, Z). (b, c) Rectification d'une image à partir de points de référence connus. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en juin 2017.	16
Figure 13 : les différentes étapes de la détection automatique de la position du trait de côte (points rouge) sur la plage du nord du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image rectifiée où sont superposées chacun des transects. Au centre, image rectifiée dans l'espace couleur RmB à partir de laquelle l'analyse est réalisée. A droite, distribution bimodale et seuil de détection associée.	18
Figure 14 : résultat de la détection automatique de la position du trait de côte (trait noir) sur la plage du bourg à Sainte-Marie. La position des différents transects ainsi que la distance latérale associée (dans l'axe parallèle à la côte) sont superposées sur l'image.....	18
Figure 15 : a) image brute capturée à Petite Anse Macabou au Vauclin le 29 mars 2023. Un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt. b) Classification automatique de l'image par l'algorithme.	20

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Depuis une dizaine d'années des échouages massifs de sargasses ont touché les littoraux de la Caraïbe avec d'importantes répercussions écologiques, économiques et sanitaires (Alleyne et al., 2023; Bouvier, 2022; Civallero et al., 2021; Moisan et al., 2021; Wang et al., 2019). Ces échouages proviennent majoritairement d'une nouvelle zone de prolifération connue sous le nom de région de recirculation équatoriale nord (NERR), située entre le courant équatorial sud et le contre-courant équatorial nord et qui s'étend de l'Afrique à l'Amérique du Sud (Alleyne et al., 2023). Deux espèces principales (*Sargassum fluitans* et *Sargassum natans*) ont été identifiées et se déplacent sous l'effet du vent et des courants de surface grâce à leur capacité de flottaison (Wang et al., 2019).

Les nappes de sargasses constituent des écosystèmes diversifiés qui varient à la fois en termes de biodiversité et d'attributs biochimiques mais qui peuvent poser de sérieux problèmes lorsqu'elles viennent s'échouer sur les côtes (répercussions écologiques, économiques et sanitaires). En Martinique, les communes situées le long de la façade Atlantique et de la façade sud-Caraïbe sont particulièrement exposées. Un suivi local des échouages de sargasses est donc indispensable pour assurer une veille en temps réel et pour permettre l'archivage de l'information afin de définir des stratégies de gestion plus adaptées.

Dans le cadre du plan départemental de prévention et de lutte contre les sargasses, le BRGM, en partenariat avec l'ADEME et la DEAL, a mis en place en 2018 un réseau de suivi par caméras autonomes. Son objectif est d'améliorer la connaissance et la compréhension des échouages de sargasses afin de mieux évaluer leurs impacts sur le littoral (Bouvier, 2022; Bouvier et al., 2020). Dans l'état des connaissances actuelles, ce type de dispositif est l'un des seuls permettant d'obtenir un suivi quantitatif à l'échelle locale (1 m – 1 km) en temps réel et en continu (Figure 1).



Figure 1 : photographie capturée par le dispositif de suivi ©SolarCam illustrant un échouage de sargasses le 13 juin 2021 sur le secteur sud de la plage de Petite anse Macabou (commune du Vauclin).

Si un suivi local et en temps réel du phénomène sargasse est important pour définir les interventions pouvant être réalisées sur site (e.g. organisation des ramassages), la capitalisation de l'information via l'estimation des quantités échouées est indispensable pour surveiller l'évolution du phénomène, mieux qualifier les impacts, définir des stratégies de gestion adaptées, valider ou améliorer les modèles de prévisions et mieux qualifier l'effet des sargasses sur les évolutions du trait de côte. Ainsi, la mise à disposition des données auprès des différents acteurs de la thématique aura des retombées importantes dans une perspective de recherche & développement. La Martinique apparaît alors aujourd'hui avec la Guadeloupe comme des sites pilotes où les innovations méthodologiques mises au point dans le cadre de ce travail pourraient être transférables sur d'autres territoires.

1.2. OBJECTIFS

Ce projet s'inscrit dans la mesure 3 du plan national de prévention et de lutte contre les sargasses 2022-2025 et sa déclinaison territoriale en Martinique.

L'objectif général de ce projet est de maintenir le dispositif de suivi par imagerie mis en place depuis 2018 et de poursuivre les développements méthodologiques, notamment les algorithmes de détection automatique, afin de disposer d'observations uniques en continu sur les principaux sites soumis aux échouages de sargasses.

Il est ainsi prévu dans cette nouvelle convention de maintenir les observations pendant un an (décembre 2022 - décembre 2023) sur six sites (dont quatre sites existants). La chaîne de traitement des images est appliquée sur chaque site et de nouveaux développements ont été également proposés afin de fournir des éléments d'information actualisés sur la situation des échouages aux autorités (e.g. bulletins d'informations en période d'échouage).

Ce rapport s'attache à présenter les différents sites instrumentés dans le cadre de ce projet et détaille le suivi réalisé depuis 2018 et poursuivi dans cette troisième phase au cours des années 2022 et 2023. Les développements effectués sont décrits par la suite de ce document, notamment concernant la détection automatique des algues sur les sites équipés. Enfin, ce rapport présente et analyse les jeux de données disponibles sur chacun des sites étudiés.

2. Présentation des sites suivis

2.1. INTRODUCTION

La dynamique des échouages de sargasses fait intervenir un grand nombre de processus physiques et biologiques agissant sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. La méthode de suivi adoptée doit alors permettre de couvrir l'ensemble de ces échelles. Les techniques les plus utilisées pour la détection des sargasses sont associées à l'imagerie. Les instruments peuvent être embarqués sur des satellites, ou plus localement sur des véhicules aéroportés (avion, hélicoptère, drone). Si les nouveaux systèmes d'observation par satellites disposent d'une résolution de l'ordre du mètre, ces techniques sont typiquement associées à des fréquences d'acquisition plus basses (Vos et al., 2019) et restent largement dépendantes de la couverture nuageuse. Un suivi à haute fréquence est alors encore difficile à appréhender. Au contraire, un système de suivi par caméras fixes apparaît totalement en accord avec la problématique des échouages de sargasses. Les systèmes fixés de manière « permanente » (plusieurs mois ou années) permettent d'obtenir des informations à haute fréquence (jusqu'à plusieurs Hz) sur de longues durées (années) pour des échelles spatiales allant du mètre au kilomètre (e.g Bouvier et al., 2017; Holman and Stanley, 2007; Lippmann and Holman, 1989).

La sélection du dispositif a été réalisée à partir de l'analyse de l'efficacité de plusieurs caméras autonomes déployées en Corse dans le cadre d'un projet de suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte (Belon et al., 2017). D'après ce retour d'expérience, le choix de la caméra s'est porté sur ©SolarCam en raison de son faible coût, sa fiabilité et sa simplicité d'utilisation (Figure 2). L'acquisition des images est réalisée à intervalles réguliers selon une fréquence déterminée par l'utilisateur. La fréquence des prises de vue peut varier entre 1 photo/15min et 1 photo/heure avec une résolution entre 8 et 12 mégapixels pour une taille d'environ 1 100 ko par image. Le contrôle de la caméra peut s'effectuer entièrement à distance à l'aide de commandes SMS dédiées et sur la page internet du constructeur. Une fois la caméra activée, les images sont transférées via la 3G ou 4G vers un serveur ftp (*File Transfer Protocol*). Elles sont ensuite archivées sur un serveur du BRGM. Il est également possible de visualiser en temps réel les images à partir de la page internet dédiée avec accès restreint. Le dispositif est actuellement configuré pour acquérir au minimum une image toutes les heures entre 7h00 et 17h00, ce qui représente 11 images par jour et par site.

L'installation des ©SolarCam a été réalisée de préférence sur des sites « naturels » (arbres, poteaux déjà en place) ou avec l'accord des propriétaires sur des parcelles privées. Le positionnement du matériel a été un élément primordial à prendre en compte lors du choix des sites pouvant être équipées. Entre autre, les contraintes de hauteur, stabilité, sécurité, orientation, couverture 3G, et d'accessibilité sont autant d'éléments essentiels pour optimiser le bon fonctionnement de l'appareil et la qualité des données. A noter que le réseau de suivi doit au maximum privilégier des observations sur une longue durée plutôt qu'une reconfiguration site par site trop fréquente.

Ainsi, la maintenance a été assurée pendant l'année 2023 sur les sites de la baie du bourg du Marigot (1) ; la plage au nord du bourg de Sainte-Marie (2) ; la baie Cayol (3) au Robert ; Frégate Est (4) au François ; Petite Anse Macabou (5) au Vauclin et Morne Larcher (6) au Diamant (Figure 3).

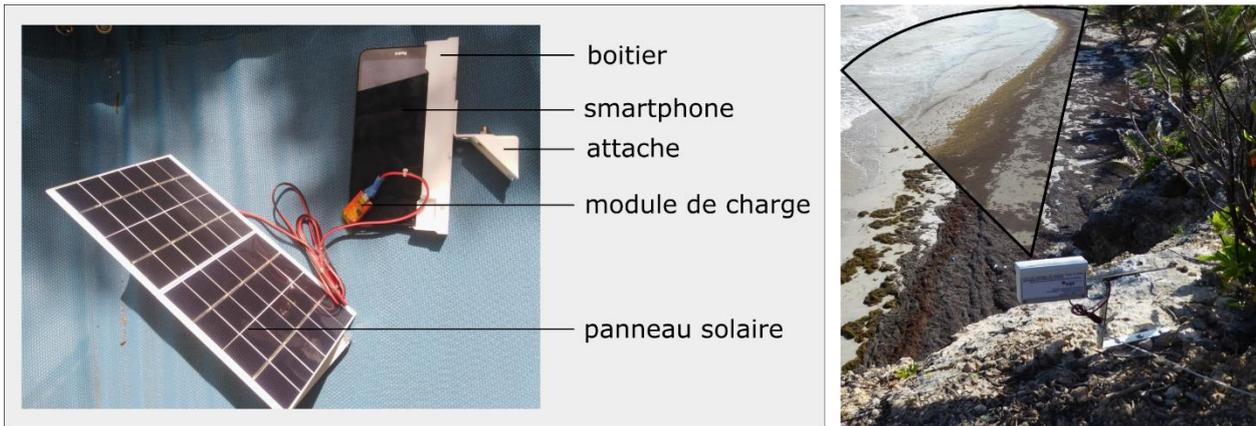


Figure 2 : présentation du dispositif de suivi ©Solarcam (<https://www.solarcam.fr>) à gauche et installation sur le site de Grande anse Macabou au Vauclin (2018-2020) à droite.

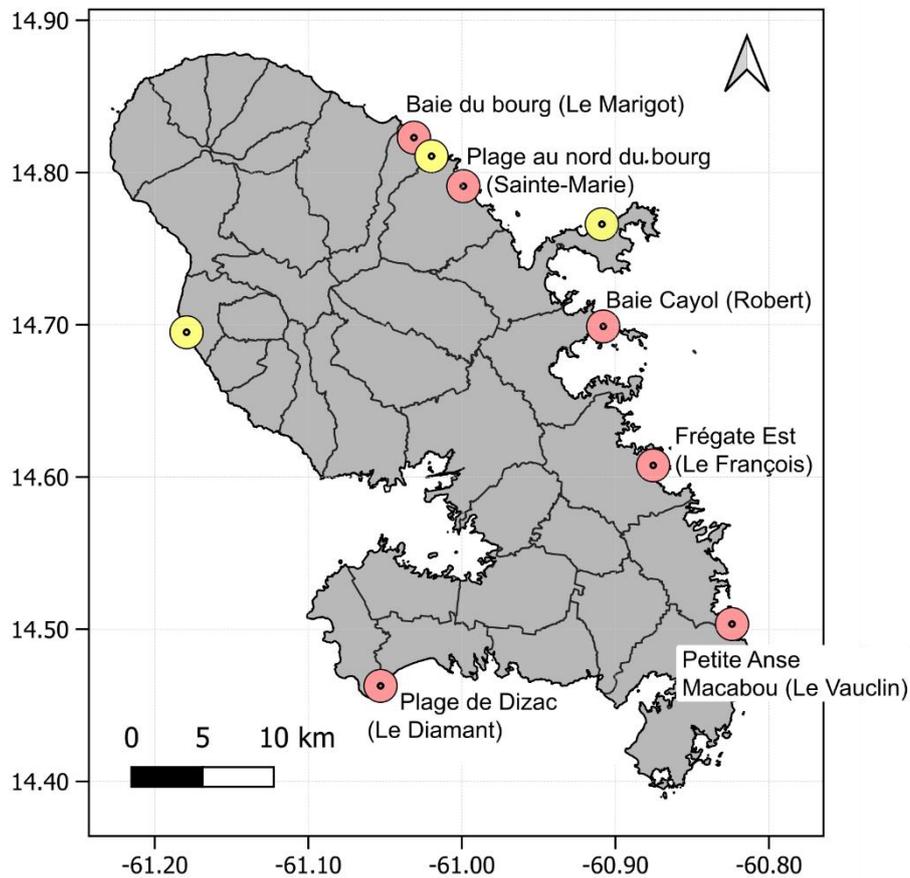


Figure 3 : localisation des sites équipés d'un dispositif ©Solarcam avec en rouge les sites instrumentés dans le cadre du suivi des échouages de sargasses et en jaune ceux gérés par l'observatoire Olimar (www.observatoire-olimar.fr).

2.2. LES SITES SUIVIS

2.2.1. La baie du bourg du Marigot

Le site de suivi au bourg du Marigot correspond à un fond de baie relativement étroit (~ 250 m de large), orienté vers l'est et donc relativement exposé aux vagues générées par les alizés (Figure 4). Le secteur nord de la baie présente deux ouvrages portuaires d'une centaine de mètre de long ouvrant vers un chenal d'une vingtaine de mètre de large qui assure les entrées et les sorties du port (~ 2500 m²). Le secteur sud de la baie n'est pas protégé par des ouvrages et reste largement exposé aux échouages de sargasses.

Le dispositif a été déployé en septembre 2018 sur un poteau en bois à une hauteur d'environ 11 m (ngm¹). La caméra a été installée au sud de la baie de Fonds d'Or et se situe à proximité immédiate de la mer (Figure 4).

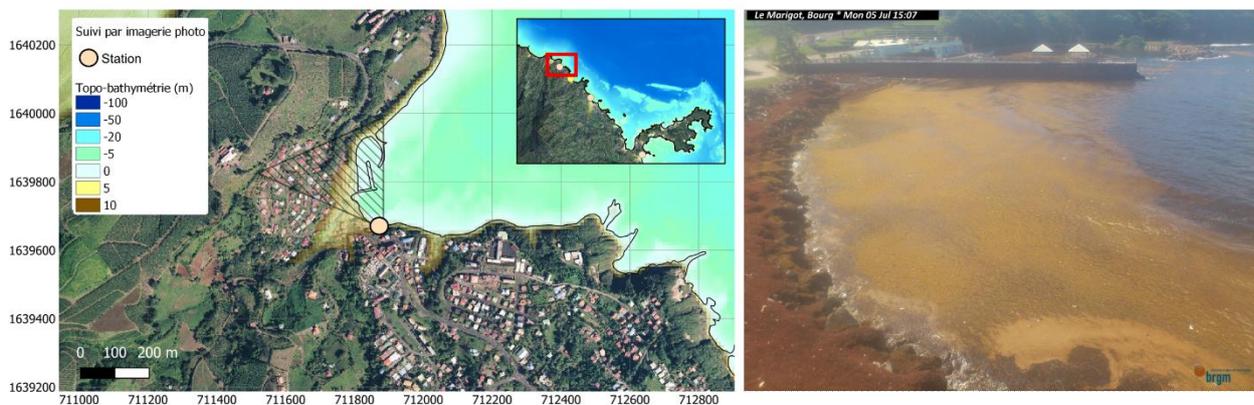


Figure 4 : localisation du dispositif et prise de vue au bourg du Marigot.

2.2.2. La plage du bourg de Sainte-Marie

La plage du bourg est située sur la commune de Sainte-Marie (Figure 5) et s'étend sur environ 1 km de long. La cellule sédimentaire est délimitée par un cap rocheux au nord-ouest sur le quartier de petit bourg et des enrochements au sud-est localisés à proximité du tombolo qui relie parfois l'îlet Sainte-Marie à la côte. La plage est essentiellement composée de sables fins d'origine volcanique et reste exposée à un climat de vague énergétique. Des sargasses échouées sont fréquemment présentes sur la plage.

Le dispositif a été installé en octobre 2018, sur un arbre situé en bordure d'un escarpement au nord de la plage à environ 30 m (ngm). La position et l'angle de vue du dispositif sont optimaux pour le suivi des échouages de sargasses. Néanmoins, de par son orientation, les images capturées peuvent être occasionnellement floues à cause des embruns. Par ailleurs, la plage peut devenir très étroite selon la saison rendant alors difficile l'identification des sargasses sur le haut de plage plus ou moins masquées par la végétation.

¹ ngm : nivellement général de la Martinique (niveau moyen de la mer à Fort-de-France)



Figure 5 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du bourg de Sainte-Marie.

2.2.3. Baie Cayol (le Robert)

Située sur la commune du Robert, cette baie de plus de 1500 m de long est délimitée par deux pointes rocheuses. Sur ce secteur, la côte est abritée par la présence de hauts fonds situés à quelques centaines de mètres du rivage. Le site est équipé d'un barrage de plusieurs kilomètres, composé de cubes en plastique et de filets afin de bloquer l'arrivage des algues à la côte.

Le dispositif de suivi a été installé au sud-est de la baie sur un poteau à une hauteur d'environ 19 m (ngm) en février 2023. Orienté vers le nord-ouest, l'appareil offre une vue plongeante sur la baie et permet de suivre l'action du barrage flottant mis en place (Figure 6).

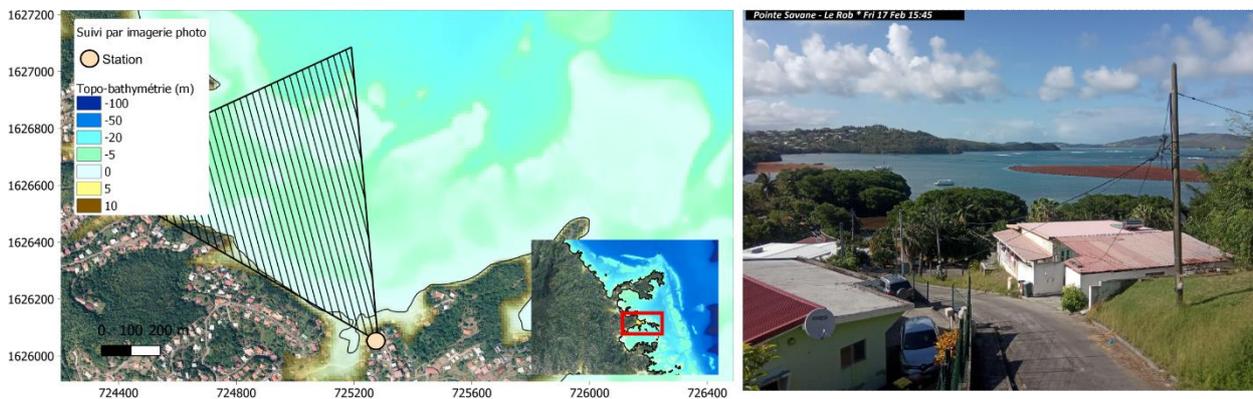


Figure 6 : localisation du dispositif et prise de vue au Robert sur le site de la Baie Cayol.

2.2.4. Frégate est (le François)

Le site suivi à Frégate est au François correspond à un fond de baie relativement étroit (~ 250 m de large), orienté vers l'est et bien abrité des vagues par les îlets ou hauts fonds situés quelques centaines de mètres plus au large. Cette cellule sédimentaire est centrée sur une ravine qui se jette en mer. Le secteur est équipé d'un barrage flottant installé quelques dizaines de mètres au large pour bloquer les échouages à la côte.

Le dispositif a été mis en place depuis octobre 2018 chez un riverain au sud de la baie à environ 12 m (ngm). La prise de vue offre une vue globale et dégagée sur le fond de baie (Figure 7).

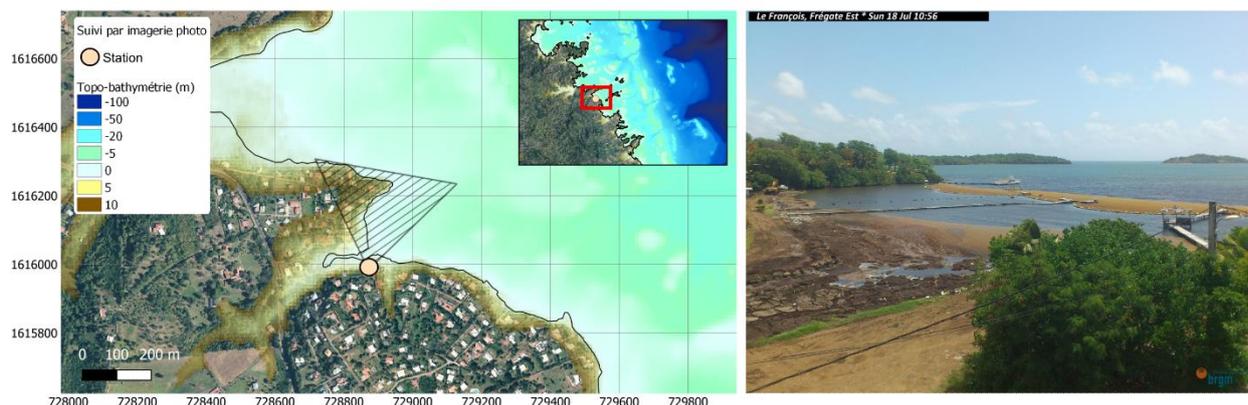


Figure 7 : localisation du dispositif et prise de vue au François sur le site de Frégate Est.

2.2.5. Petite anse Macabou (le Vauclin)

La plage de Petite anse Macabou est située sur la commune du Vauclin et s'étend sur environ 600 m de long. La cellule sédimentaire est délimitée par des falaises rocheuses. La plage est essentiellement composée de sables fins et reste exposée à un climat de vague assez énergétique par rapport aux autres sites étudiés. Des sargasses échouées sont très fréquemment présentes sur la plage.

La cellule sédimentaire voisine appelée Grande anse Macabou fait l'objet d'un suivi par imagerie photo depuis octobre 2018. Le dispositif avait été initialement installé en bordure de falaise, surplombant la plage au nord (Bouvier et al., 2020). Suite à un acte de vandalisme en août 2020, le dispositif a dû être repositionné au sommet d'un morne plus au sud, à quelques centaines de mètres de la zone d'intérêt (Bouvier, 2022). Aujourd'hui, le dispositif est installé sur un arbre à une hauteur d'environ 8.5 m et permet de suivre plus localement la dynamique des échouages sur la plage de petite anse Macabou (Figure 8).

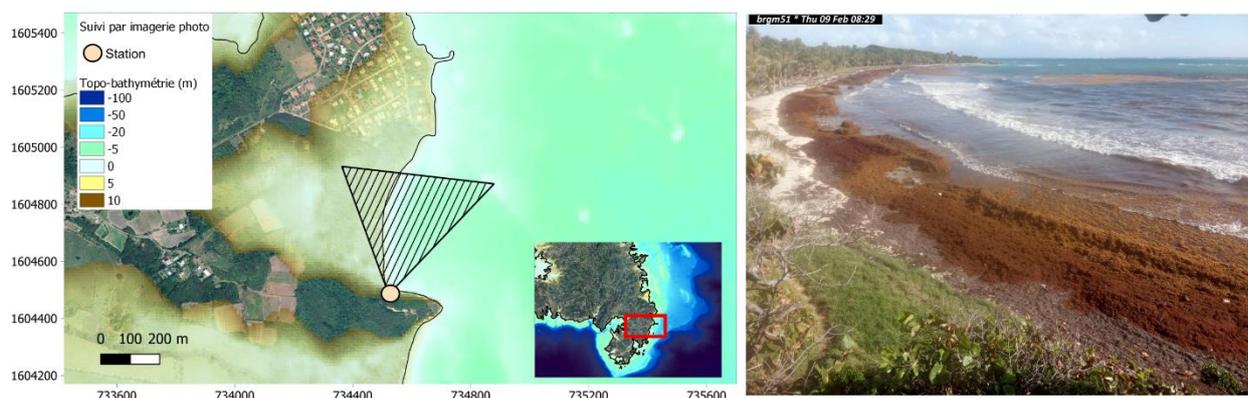


Figure 8 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Petite anse Macabou au Vauclin.

2.2.6. La Baie du Diamant

La baie du Diamant est située au sud-ouest de la Martinique et comprend l'anse Cafard sur son extrémité est et la plage de Dizac sur le reste de la baie (Figure 9). Cette plage s'étend sur plus de 3 km de long et s'impose comme l'une des cellules sédimentaires les plus étendues de l'île. La plage est délimitée par une côte rocheuse à l'est (Pointe du Marigot) et des enrochements à l'ouest qui la sépare de l'anse Cafard.

Le dispositif de suivi a été mis en place depuis août 2019 en bordure de falaise sur le Morne Larcher à une hauteur de 355 m (ngm). La prise de vue surplombe ainsi la baie du Diamant et permet de suivre les arrivages de sargasses sur la plage de l'anse Cafard et sur la partie sud-ouest de la plage de Dizac.



Figure 9 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Dizac au Diamant.

2.3. PERFORMANCE DU SUIVI

2.3.1. Suivi et maintenance sur les 12 derniers mois

Dans le cadre de ce projet, la maintenance du dispositif a été assurée pendant les 12 derniers mois, entre janvier 2023 et janvier 2024, sur les six sites présentés section 2.2. Au cours de cette période, le système de suivi a connu quelques disfonctionnement sur certains sites mais présente globalement des taux d'échecs (aucune image capturée pendant toute une journée, Figure 10) très bas dans l'acquisition des images (4 % en moyenne). Le suivi proposé a permis de collecter plus de 21 400 images au cours de l'année.

Avec environ 20 % d'échec, la plage de Petite anse Macabou et l'anse Dizac sont ceux qui ont connus le plus de difficultés sur ces 12 derniers mois (Figure 10). Pour ces deux sites, le suivi a été ponctué de quelques coupures liées à des problèmes de connexion sur le réseau mobile et des interruptions plus longue liés à l'usure prématurée des panneaux solaires (parfois plus d'un mois sans image) ayant conduit au remplacement des appareils. Le site de la Baie Cayol reste celui qui a connu le moins de difficultés avec aucun échec sur les 12 derniers mois.

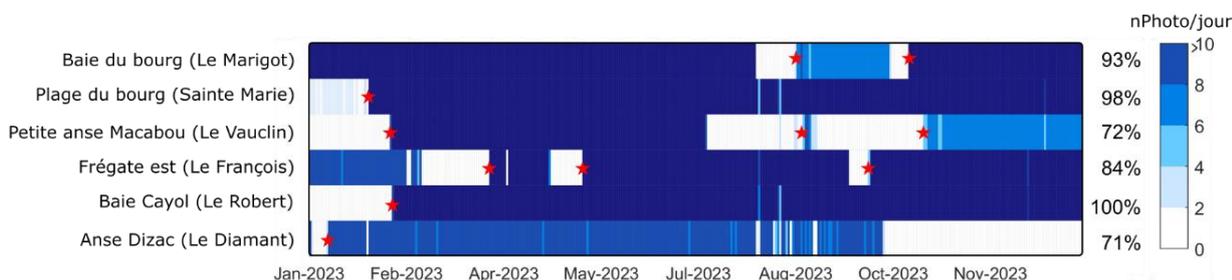


Figure 10 : performance du suivi par imagerie photo sur les six sites équipés en nombre de photos capturées par jour et par site depuis le début de la présente convention (entre janvier 2023 et janvier 2024). Les étoiles rouges illustrent les interventions de maintenance réalisées sur site.

2.3.2. Suivi et maintenance depuis 2019

Dans le cadre des deux dernières conventions relatives au suivi des échouages de sargasses (Bouvier, 2022; Bouvier et al., 2020), la maintenance du dispositif a permis d'acquérir des images sur certains sites depuis octobre 2018 (Figure 11). Au total sur les 6 secteurs qui ont été suivi en 2023, plus de 88 000 images ont pu être capturées et sont aujourd'hui stockées sur le serveur du BRGM (soit plus de 80 giga-octets).

Malgré quelques dysfonctionnements, notamment en novembre 2018 sur plusieurs sites (panne générale sur une quinzaine de jour), le réseau de suivi est resté opérationnel avec moins de 14 % d'échec dans l'acquisition des images.

Chaque année, le réseau de suivi capture en moyenne plus de 4 000 images par site avec des minima et maxima pouvant aller de 1 000 images (installation en cours d'année ou configuration sur site avec une acquisition moins fréquente) à plus de 7 000 images (e.g. le site de Frégate est qui est resté opérationnel à raison d'une photo toutes les trente minutes entre janvier et décembre 2021).

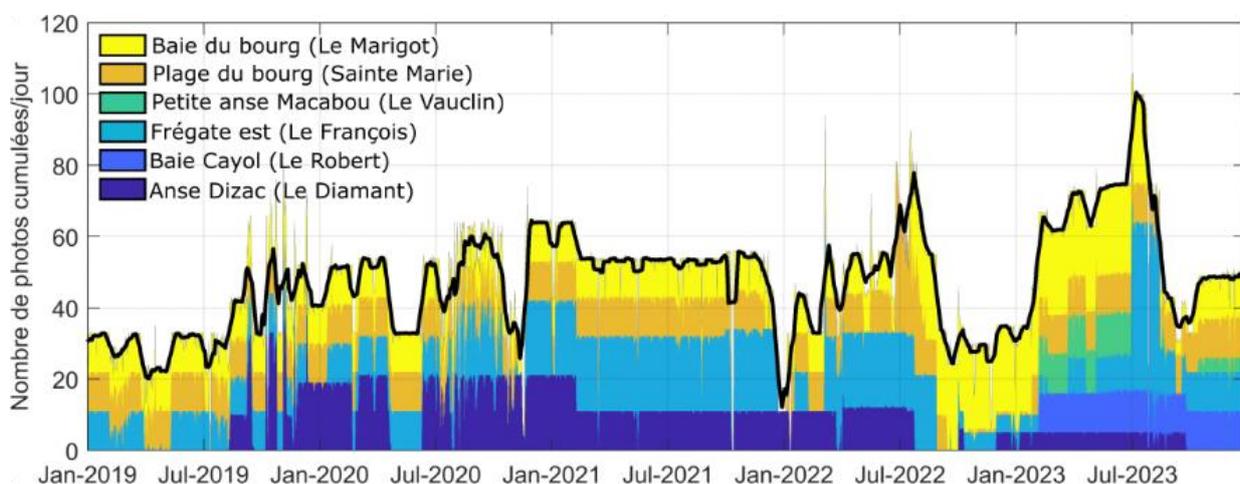


Figure 11 : évolution temporelle du nombre d'images capturées pour chaque site (en cumul) et par jour depuis la mise en place du suivi.

3. Les algorithmes de traitement des images

Afin de réaliser des observations quantitatives à partir des images du réseau de suivi, différents algorithmes de traitement ont été développés, notamment dans le cadre de la première convention relative au suivi des échouages de sargasses (Bouvier et al., 2020). Ces traitements visent au géoréférencement des images (section 3.1) ainsi qu'à la détection des sargasses (section 3.2) et du trait de côte (section 3.3). Les algorithmes développés ont déjà été décrits dans les précédents rapports et sont brièvement présentés dans les sections suivantes.

3.1. GEOREFERENCEMENT DES IMAGES

La quantification de données physiques requiert un géoréférencement des images. Cela revient à déterminer la relation entre les coordonnées pixels de l'image (u, v) et la position X, Y, Z de chacun d'entre eux dans un repère géographique réel (Figure 12). La relation entre l'image et les coordonnées géographiques réelles peut être obtenue en connaissant la position (X_0, Y_0, Z_0), la distance focale D_f et l'orientation (tilt, azimuth et roll) de la caméra. Ces angles sont déterminés en utilisant plusieurs points de références dont les coordonnées sur l'image (en pixels) et réelles (en mètres) sont connues (gcp1 à gcp5, Figure 12).

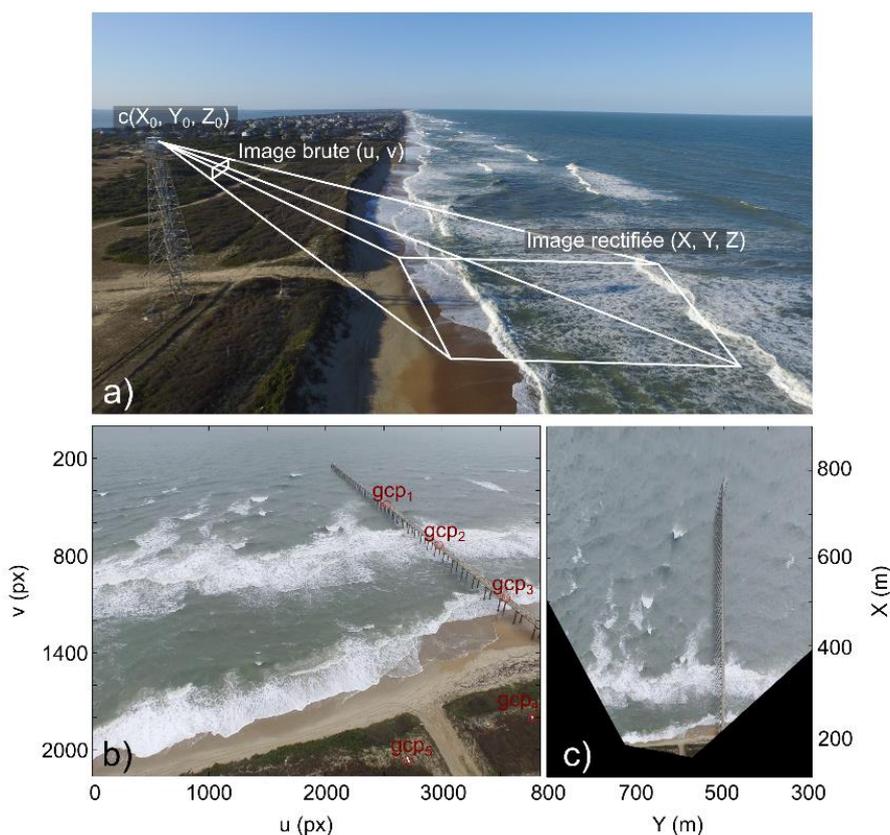


Figure 12 : photo aérienne de la plage de Duck (Caroline du Nord, États-Unis) montrant la transformation d'une image oblique (coordonnées u, v) en image plane (coordonnées X, Y, Z). (b, c) Rectification d'une image à partir de points de référence connus. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en juin 2017.

La rectification de l'image bidimensionnelle (u, v) en coordonnées tridimensionnelles X, Y, Z implique une sous-détermination du système. Ce problème est généralement résolu en attribuant une altitude verticale Z connue, typiquement la hauteur du plan d'eau (Holland et al., 1997).

Sur la plupart des sites d'étude, il est généralement admis que les angles de vue des caméras peuvent varier plus ou moins dans le temps pour différentes raisons. Un décalage même faible de l'orientation de la caméra peut entraîner des erreurs de géoréférencement post-acquisition de l'ordre de la centaine de mètres (Bouvier et al., 2019). De ce fait, de nombreuses images nécessitent une rectification spécifique calculée après la prise de vue qui requiert l'identification d'objets dans le champ de la caméra (bâtiment, route, digue) dont la localisation est connue. Lorsque l'image ne contient pas ce genre de repère, ce qui est courant sur le littoral, un géoréférencement précis est alors impossible.

Une fois géo-référencées, les images permettent d'obtenir une zone de suivi continue sur plusieurs centaines de mètres. La résolution d'un pixel peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres dans les zones les plus éloignées de la caméra.

3.2. DETECTION DU TRAIT DE COTE

La détection du trait de côte (ici défini comme la zone du jet de rive) est réalisée en utilisant les images géo-référencées capturées par le dispositif de suivi installé sur la plage du bourg de Sainte-Marie. La détection du trait de côte peut être manuelle ou semi-automatique et s'effectue de façon plus ou moins robuste ou complexe. Basé sur les derniers travaux (Harley et al., 2019), un nouvel algorithme de détection du trait de côte a été mis en place.

Pour amorcer l'algorithme de détection du trait de côte, un ensemble de transects transversaux espacés tous les 2 à 10 m (en fonction des sites) le long de la côte et couvrant à la fois la plage et la zone mouillée est d'abord défini (Figure 13, à gauche). Pour chaque image géo-rectifiée, les pixels sont échantillonnés le long de ces transects dans l'espace couleur RmB (*Red minus Blue*) pour créer une distribution bimodale comprenant le sable sec et la surface de l'eau (Figure 13, à droite). L'espace RmB est obtenu en soustrayant les canaux rouges aux canaux bleus à partir de l'image initiale (Figure 13, au centre). Ces deux canaux de couleur présentent souvent les contrastes les plus distincts entre le sable sec et la surface de l'eau (Harley et al., 2019). Le seuil de détection est ensuite défini entre les deux pics locaux de cette distribution bimodale (Figure 13, à droite). Le trait de côte correspond à l'extraction du seuil détecté sur chacun des transects.

Le trait de côte identifié correspond à la zone du jet de rive dont l'extension et la position transversale dépend des conditions de vagues et de surcote (Figure 14). Il est donc obligatoire de se référer à des conditions hydrodynamiques semblables pour décrire son évolution. Typiquement il est préférable de restreindre l'analyse à des conditions de vagues et de vent peu énergétiques pour limiter les erreurs associées à la surcote et au jet de rive (Stockdon et al., 2006). De la même façon il est impératif de réaliser le suivi du trait de côte pour des hauteurs de marée similaires. Les écarts verticaux du niveau d'eau au cours d'une période de suivi sont une source de variabilité de la position horizontale du jet de rive selon la pente de la plage et entraînent une erreur sur la position du trait de côte. La résolution transversale de l'image redressée est enfin ajoutée comme source d'erreur affectant l'identification du trait de côte.

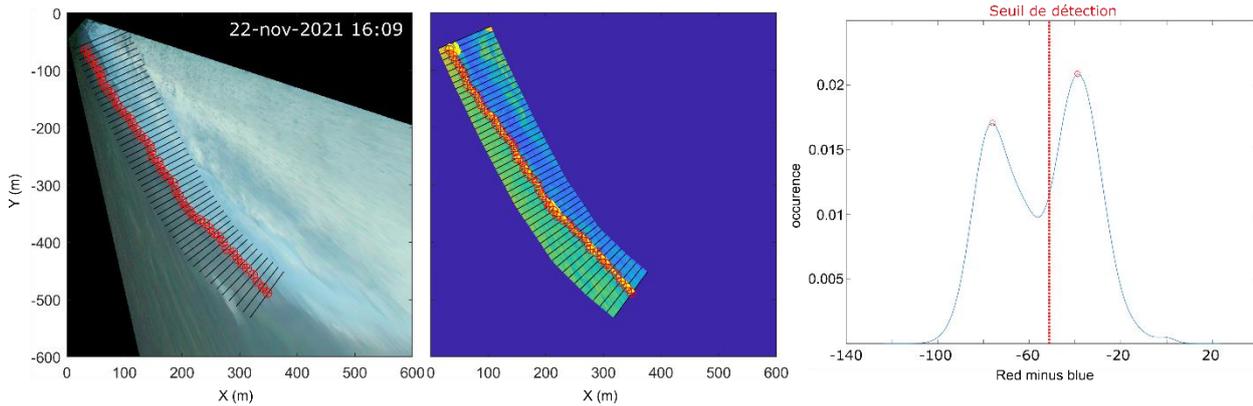


Figure 13 : les différentes étapes de la détection automatique de la position du trait de côte (points rouge) sur la plage du nord du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image rectifiée où sont superposées chacun des transects. Au centre, image rectifiée dans l'espace couleur RmB à partir de laquelle l'analyse est réalisée. A droite, distribution bimodale et seuil de détection associée.



Figure 14 : résultat de la détection automatique de la position du trait de côte (trait noir) sur la plage du bourg à Sainte-Marie. La position des différents transects ainsi que la distance latérale associée (dans l'axe parallèle à la côte) sont superposées sur l'image.

Les images traitées dans cette étude ont été choisies en fonction des conditions hydrodynamiques (hauteur significative des vagues inférieures < 1.5 m) et météorologiques (vent faible), ce qui suppose une erreur verticale inférieure à 0.30 m (Stockdon et al., 2006). En ajoutant la variation du niveau d'eau due à la marée (~ 0.30 m pour les images sélectionnées), et considérant une pente de plage α à 6 %, on peut estimer une erreur sur la position du trait de côte entre ± 2 m et ± 5 m selon les précautions prises par l'opérateur. Si l'on ajoute la résolution transversale de l'image redressée (< 2 m au niveau du trait de côte), l'erreur maximale estimée se situe entre ± 3 m et ± 6 m et reste inférieure aux mouvements associés à l'évolution du trait de côte à l'échelle événementielle, saisonnière ou pluriannuelle sur les plages les plus dynamiques.

3.3. DETECTION DES SARGASSES

Afin de détecter automatiquement les sargasses sur les images, un algorithme de segmentation par région d'intérêt (sémantique) a été utilisé (Valentini and Balouin, 2020). Cette méthode est particulièrement employée ces dernières années en traitement d'image pour diverses applications tels que la conduite autonome, l'imagerie médicale, les contrôles industriels ou l'imagerie satellite.

Tout d'abord, afin d'entraîner le modèle de classification, l'opérateur doit étiqueter manuellement quelques images afin de fournir une base d'exemple à l'algorithme des différentes catégories de couleurs ou de formes à classer. Cette étape est reproduite sur une dizaine d'images considérées comme représentatives des conditions observées sur le site en termes de luminosité ou de condition météorologique. Cet étiquetage manuel est représenté sur la Figure 15 et consiste donc à discrétiser visuellement les différentes classes d'intérêt directement sur l'image (eau, sargasses, végétation, bâti, sable).

L'objectif de l'algorithme est ensuite d'utiliser ce modèle défini par l'opérateur afin de détecter automatiquement les différentes classes sur les futures images à traiter en fonction de l'information contenue dans les pixels (couleur, contraste, luminosité, teinte, saturation ou texture). Ainsi, le modèle de segmentation sémantique est appliqué pour découper automatiquement les images selon les différentes classes d'intérêt (eau, végétation, sable, sargasses, ciel, écume, bâti). Le processus complet peut être subdivisé en trois étapes principales décrites ci-après (Valentini and Balouin, 2020) :

- une analyse CNN (*Convolutional Neural Network*), utilisant le réseau *MobileNet-V2* (Sandler et al., 2018), qui propose une première classification de l'image en la subdivisant en différents groupes de pixel. C'est l'étape la plus chronophage nécessitant plusieurs minutes de calcul par image. L'analyse est appliquée sur une zone d'intérêt préalablement déterminée ;
- un raffinement CRF (*Conditional Random Fields*) utilisé pour apporter plus de précisions aux résultats (Krähenbühl et al., n.d.). C'est une méthode statistique cherchant à modéliser la probabilité d'appartenance à une classe à l'intérieur d'un groupe de pixel ;
- une découpe *Superpixel* pour améliorer les résultats de la segmentation. Ce procédé peut être appliqué à différentes étapes de la segmentation. La découpe *Superpixel* consiste à regrouper des pixels dont les paramètres sont proches.

Pour terminer, la phase suivante consiste à calculer les surfaces de sargasses échouées. À partir des résultats de la segmentation sémantique, les pixels identifiés comme appartenant à la classe « sargasse » sont extraits. La solution de géo-rectification est ensuite appliquée sur l'image et permet de convertir le nombre de pixels appartenant à la catégorie « sargasse » en coordonnées géographiques et ainsi d'obtenir la surface de sargasses détectée en mètres carrés.

Sur les sites où les algorithmes de détection automatique montrent de moins bon résultats, une représentation visuelle de type *timestack* le long d'un profil transversal extrait à partir des images d'archives permet d'obtenir une information quantitative et un suivi du phénomène. Les "images" *timestack* correspondent à une série temporelle d'une ligne de pixels qui décrit l'évolution à plus ou moins haute fréquence (ici généralement une image par jour) de la surface de l'eau. Cette ligne de pixel est prédéterminée avant l'acquisition et peut être orientée perpendiculairement à la plage.

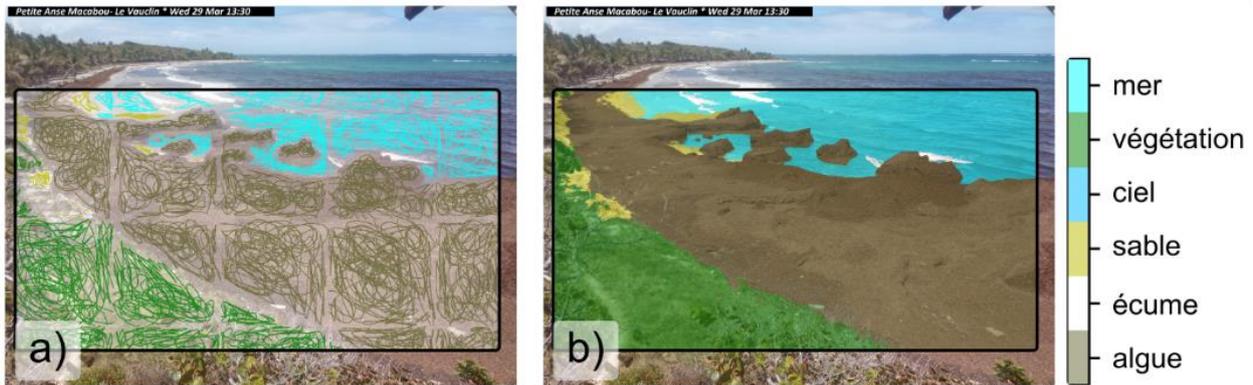


Figure 15 : a) image brute capturée à Petite Anse Macabou au Vauclin le 29 mars 2023. Un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt. b) Classification automatique de l'image par l'algorithme.

3.4. CONCEPTION DU BULLETIN MENSUEL EN PERIODE D'ECHOUAGE

Les algorithmes développés ont par la suite été testés et optimisés pour garantir leurs capacités à détecter et à calculer automatiquement les surfaces de sargasses. Ainsi les images traitées ont été analysées par un opérateur afin de contrôler la qualité des détections (netteté et luminosité d'une image variant avec l'heure de la journée ou la météo). A partir des jeux de données validés par l'opérateur, des bulletins d'informations peuvent être édités rapidement de façon semi-automatique en période d'échouage intense. La représentation des observations est adaptée selon les enjeux identifiés sur chaque site et les chroniques des surfaces échouées peuvent être également mises à disposition sur demande.

3.5. DONNEES COMPLEMENTAIRES

Afin d'enrichir les analyses, le contexte météorologique et hydrodynamique de la Martinique est brièvement introduit ci-dessous. Cette section permet aussi de présenter les différents instruments de mesure utilisés en parallèle des outils ou algorithmes déjà décrits plus haut.

3.5.1. Conditions météorologiques

La Martinique connaît un climat tropical, chaud et humide, présentant une saison sèche, le carême (de février à mai) et une saison humide, l'hivernage (de juillet à novembre). Ces conditions climatiques sont directement liées aux positions respectives de l'anticyclone des Açores et de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT). La Martinique est soumise aux alizés toute l'année. En provenance constante de l'est à l'est-sud-est, ces vents soufflent en moyenne à une vitesse de 7 m/s (soit 25 km/h).

3.5.2. Régime de marée et caractéristique des vagues

Les marées en Martinique sont d'amplitude microtidale avec un marnage moyen de 45 cm (SHOM, 2020) et une amplitude de marée aux équinoxes qui peut atteindre 90 cm. Les marées sont de type semi-diurne à inégalités diurnes avec deux pleines mers et deux basses mers par jour où les hauteurs d'eau sont différentes. Plusieurs points de mesures sont disponibles autour de la Martinique et notamment sur la commune du Robert (<https://data.shom.fr>).

En Martinique, trois régimes de houle peuvent être rencontrés. La houle d'est à est-nord-est dite d'alizés (1) est très fréquente mais peu énergique (période inférieure à 10 sec). Entre septembre et avril ce régime de vagues est plutôt orienté est-nord-est tandis qu'il bascule plus franchement à l'est entre mai et août. La houle de nord à nord-nord-est (2) est peu fréquente (une dizaine d'occurrences par an entre les mois d'octobre et mars) et plus énergétique, généralement engendrée par des dépressions au nord de l'Atlantique. (3) La houle cyclonique est occasionnelle mais très énergique (période supérieure à 10 sec). Elle est susceptible de toucher tous les secteurs côtiers de l'île. Il existe autour de la Martinique plusieurs houlographes du réseau Candhis (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ : <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>). Une bouée houlographe est mouillée au nord de la Martinique dans le secteur de Basse Pointe dont les caractéristiques des vagues sont mesurées en temps réel à une fréquence horaire.

4. Résultats

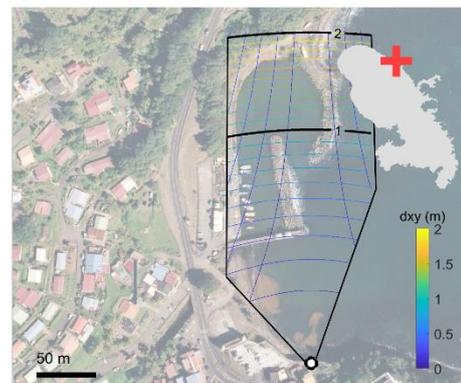
Dans ce chapitre, les résultats obtenus sont décrits de manière synthétique pour chacun des sites suivis. Les analyses réalisées prennent en compte à la fois les nouvelles données collectées au cours de l'année 2023 mais aussi les données plus anciennes lorsque celles-ci sont disponibles.

Sur chacun des sites étudiés, nous rappelons au lecteur la localisation du dispositif de suivi et l'emprise de vue associée, la résolution des images obtenues (après géoréférencement), le nombre de photographies traitées par les différents algorithmes et enfin une évaluation de la qualité des résultats obtenus.

Une analyse mensuelle des quantités de sargasses détectées est par la suite présentée sur la plupart des sites étudiés et permet de réaliser un bilan comparatif sur l'année 2023. Les analyses exposées sont accompagnées par la description des principaux événements marquants enregistrés au cours de l'année. Enfin, un bilan est réalisé et permet de mieux comprendre le fonctionnement de chacun des sites suivis.

Suivi des échouages de sargasse (2022-2023)

Site n°1 : Baie du bourg (le Marigot)



Localisation du dispositif et résolution de l'image en mètre (dxy). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

1- Le dispositif de suivi

Installé sur un poteau électrique en bois à une altitude d'environ 11 m (ngm), les images capturées offrent une vue plongeante sur la baie.

Le modèle de détection automatique parvient à estimer avec une bonne précision la quantité de sargasses présente à la surface de l'eau sur une superficie d'environ 7 000 m². A noter que les sargasses pouvant être présentes dans le port ne sont pas prises en compte dans le calcul des surfaces.

Les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit ~cinq images par jour) :

- Plus de 6 300 images traitées entre janvier 2020 et janvier 2024 ;
- 92 % des détections réalisées montrent des résultats satisfaisants ;
- Les détections approximatives ont été retirées des analyses présentées ci-dessous ;

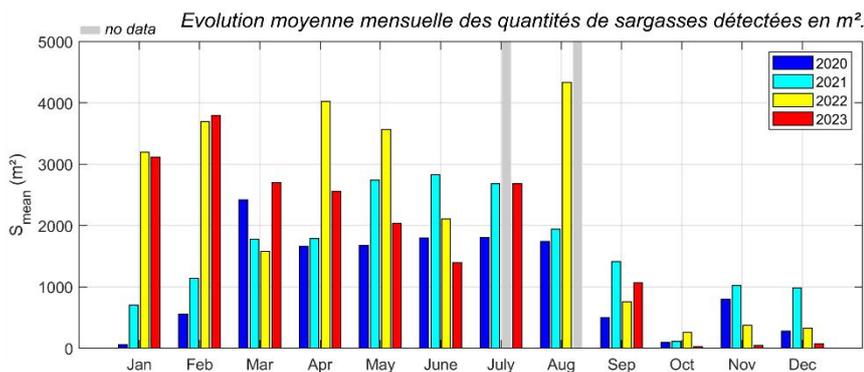
NB : la résolution de l'image géo-rectifiée devient insuffisante pour un suivi précis dans la zone du port. Le jeu de données disponible sur ce site est donc représentatif du fond de la baie mais ne permet pas d'avoir d'estimations précises dans le port.

2- Quantité de sargasses détectées (2020-2023)

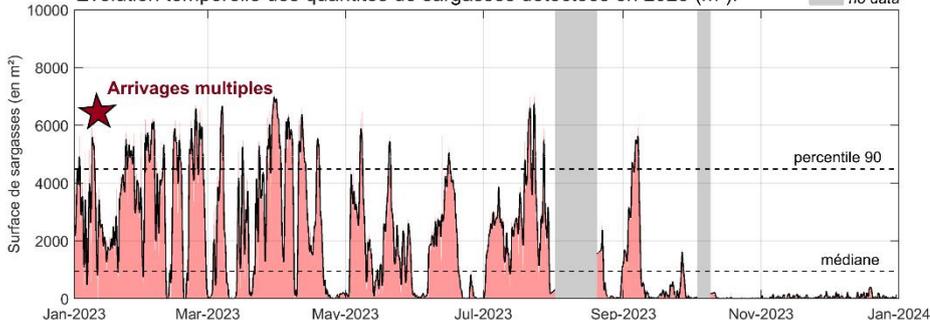
Entre janvier 2020 et janvier 2024, le site fut exposé à un grand nombre d'arrivages de sargasses :

- Plus de 14 évènements par an où les surfaces détectées excèdent 2 000 m² ;
- Une variabilité saisonnière importante ; avec des arrivages fréquents entre janvier et août... entre 1 500 et 2 500 m²/mois en moyenne des arrivages moins fréquents de septembre à janvier
- En 2023, le site fut globalement bien exposé des quantités légèrement au dessus de la moyenne

NB : Les barres grises remplacent les barres colorées lorsque la quantité de données est insuffisante (couverture minimale fixée à 15 j/mois)



Evolution temporelle des quantités de sargasses détectées en 2023 (m²).



19-feb-2023 12:15



S ~ 6 000 m²

22-feb-2023 15:15



Fortes vagues (H_s ~ 2 m)
et renouvellement de la masse d'eau

01-mar-2023 06:44

3- Evènement(s) marquant(s) sur l'année 2023

L'analyse des observations sur 2023 montre que la baie a été occupée avec une occurrence d'un jour sur deux par une surface de sargasses estimée à plus de 800 m²

Les plus gros arrivages enregistrés ont eu lieu de manière récurrente entre janvier et septembre.

Au cours de cette période, la surface de sargasses peut atteindre plus de 5 000 m².

Les nappes en provenance du large (secteur est-nord-est) se propagent vers la côte le long de l'ouvrage portuaire et s'accablent en surface dans le fond de la baie.

Lorsque les nappes sont importantes, les algues peuvent aussi atteindre la zone du port et stagnent en général plusieurs jours ou plusieurs semaines dans la baie.

4- Bilan - fonctionnement du site

Avec une surface occupée environ égale à 1 700 m² en moyenne, le site est très exposé aux nouveaux arrivages.

Lorsque les nappes sont suffisamment importantes, les algues peuvent aussi atteindre la zone du port, en particulier pour un vent de secteur sud-sud-est, rendant difficile voir impossible les sorties en mer.

Les houles énergétiques (H_s > 2 m) en provenance du secteur est-nord-est favorisent le renouvellement de la masse d'eau.

Au contraire, lorsque les conditions en mer sont plus calmes, au bout de quelques jours, les nappes de sargasses coulent en profondeur sur les premiers mètres. Par la suite, elles peuvent être progressivement évacuées en dehors de la baie par les courants.

Suivi des échouages de sargasse (2022-2023)

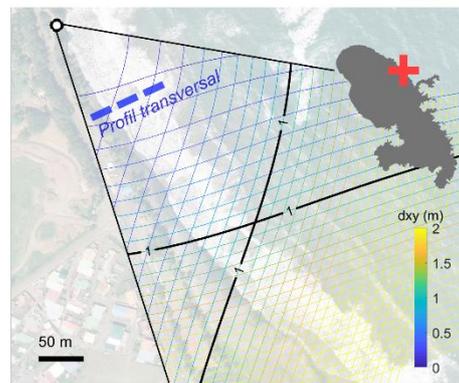
Site n°2 : Plage du bourg de Sainte-Marie

1- Le dispositif de suivi

Installé sur un arbre à environ 30 m (ngm), le dispositif de suivi offre une vue plongeante sur la plage. A proximité du dispositif, la résolution de l'image peut varier entre 0.1 et 2 m en fonction de la distance. Sur ce site, le sable de couleur sombre auquel s'ajoute l'ombre des arbres situés en arrière plage rendent la détection des sargasses échouées plus délicates. Si la qualité de la détection ne permet pas d'obtenir de façon précise la surface de sargasses présente, une représentation visuelle de type (*timestack*) le long du profil transversal (trait bleu) extrait à partir des images d'archives permet d'obtenir un suivi du phénomène. Ce type de représentation a donc été choisie entre janvier 2022 et janvier 2024.

- L'angle de vue peut varier et une correction de la solution de géo-rectification est souvent indispensable ;
- Plus de 300 images analysées entre janvier 2020 et janvier 2024 ;

NB : la représentation visuelle (*timestack*) des arrivages de sargasses est réalisée à partir des images d'archives géorectifiées dont les pixels ont été extraits le long d'un profil transversal (cf. trait bleu illustré sur la figure ci-contre).



Localisation du dispositif et résolution de l'image en mètre (dxy). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

2- Quantité de sargasses détectées (2020-2023)

Entre janvier 2020 et janvier 2024, le site fut exposé à un grand nombre d'arrivages de sargasses :

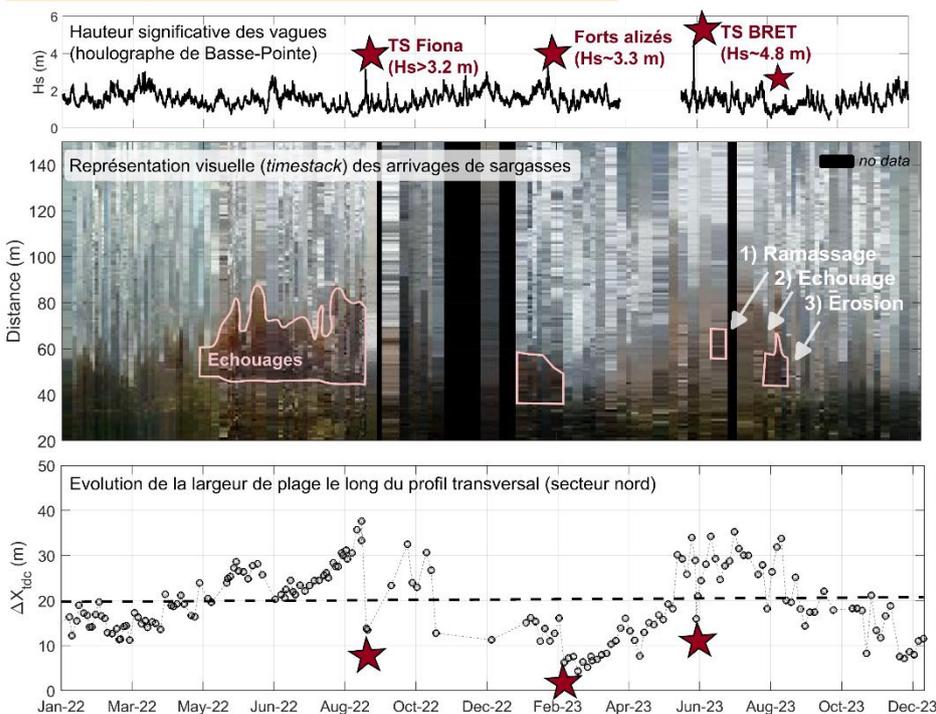
- Plus de 5 événements par an en moyenne ;
 - où les surfaces détectées excèdent 4 000 m² ;
- Une variabilité saisonnière importante :
 - avec des arrivages fréquents entre mars et août... entre 1 000 et 3 000 m²/mois en moyenne ;
 - des arrivages moins fréquents de septembre à janvier ;
- En 2023, le site fut globalement moins exposé :
 - des quantités bien en dessous de la moyenne ;
 - des échouages moins importants qu'en 2021 ou 2022 ;
 - les sargasses sont remobilisées par la mer lors d'épisode de fortes vagues.

3- Evènement(s) marquant(s) sur l'année 2023

Selon les épisodes, la quantité de sargasses échouées sur la plage a pu atteindre plus de 3 000 m² au cours de l'année. Par exemple, entre le 15 et le 17 août, soit seulement une semaine après la réalisation d'un ramassage mécanique des algues (1), un nouvel arrivage est détecté (2).

Quelques semaines plus tard, au début du mois de septembre, plusieurs épisodes de forte houle entraînent la submersion temporaire d'une partie de la plage et la remobilisation des algues par la mer. Ce type d'évènement provoque une diminution significative de la largeur de plage et de la surface de sargasses échouées (3).

L'évolution de la largeur de plage se traduit par une variabilité significative de la position du trait de côte à l'échelle saisonnière où l'on observe systématiquement un recul important entre septembre et janvier. Les observations montrent que la dynamique sédimentaire est avant tout contrôlée par les vagues sur la plage de Sainte-Marie.



4- Bilan - fonctionnement du site

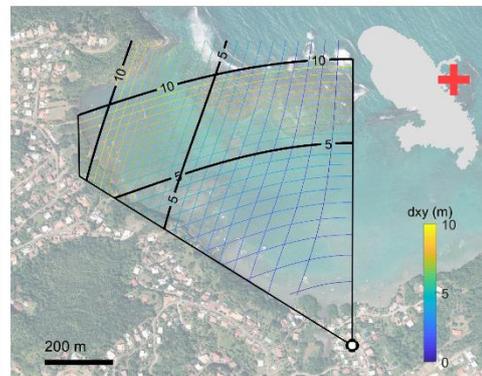
Les algues dérivent généralement sur le secteur nord de la cellule sédimentaire.

Suite à un nouvel arrivage, la quantité de sargasses échouée sur la plage reste généralement importante sur une durée de plusieurs semaines pour décroître de façon plus ou moins rapide selon si elles sont ramassées ou si elles sont remaniées et transportées vers d'autres secteurs par la mer.

Les effets induits par la présence d'algues sur la dynamique du trait de côte et en particulier sur l'atténuation de l'érosion restent limités lorsque la quantité de sargasses échouées ne permet pas la formation d'une banquette suffisamment compacte et homogène pouvant résister à l'assaut des vagues.

Suivi des échouages de sargasse (2023)

Site n°3 : Baie Cayol (le Robert)



Localisation du dispositif et résolution de l'image en mètre (dxy). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

1- Le dispositif de suivi

Installé depuis février 2023 sur un poteau à environ 19 m (ngm), les images capturées offrent une vue plongeante sur la baie où un barrage de plusieurs kilomètres de long a été mis en place. Alors qu'il est difficile de distinguer de façon automatique les sargasses à la côte à cause du manque de visibilité (e.g. couvert végétal, résolution), la détection des algues est réalisée avec une bonne précision au niveau du barrage sur la première moitié de la baie, lorsque la résolution de l'image reste supérieure à 5 m. Les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit ~cinq images par jour) :

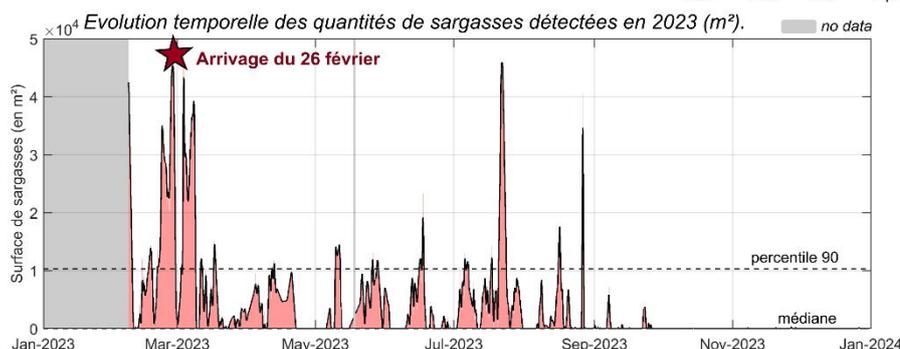
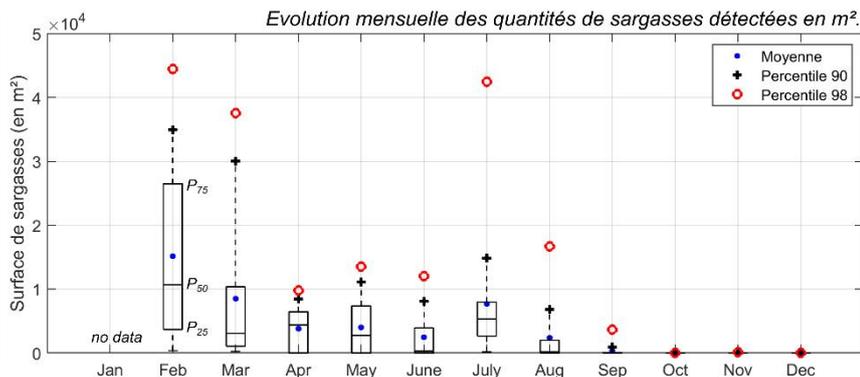
- 1780 images traitées entre février 2023 et janvier 2024 ;
- 76 % des détections réalisées montrent des résultats satisfaisants ;
- Les détections approximatives ont été retirées des analyses présentées ci-dessous ;

NB : le calcul des surfaces n'est pas réalisé à la côte ou au niveau de des extrémités du barrage (secteurs non visibles). Les quantités de sargasses peuvent alors être largement sous-estimées (> 50 % sur les arrivages majeurs).

2- Quantité de sargasses détectées (2023)

Au cours de l'année 2023, le site fut exposé à de nombreuses séquences d'arrivage de sargasses :

- Environ une dizaine d'évènements en 11 mois où les surfaces détectées excèdent 10 000 m² ;
- Une variabilité saisonnière importante ; avec des arrivages fréquents entre février et août... entre 4 000 et 15 000 m²/mois en moyenne des arrivages moins fréquents de septembre à décembre
- Le site a été particulièrement touché par des arrivages pendant le mois de février avec en moyenne une surface détectée de 15 000 m² à proximité du barrage.



3- Evènement(s) marquant(s) sur l'année 2023

Les plus gros arrivages enregistrés sont ceux du 26 février et du 21 juillet 2023 où la surface de sargasses détectée atteint environ 50 000 m², soit plus de 100 000 m² sur l'ensemble de la baie selon nos estimations (les calculs ne sont pas réalisés au niveau des extrémités du barrage). Suite à ce type d'évènement, sur plusieurs jours, l'inspection détaillée des images met en évidence la sédimentation des algues au niveau du barrage et leurs propagations vers la côte pendant les jours qui suivent.

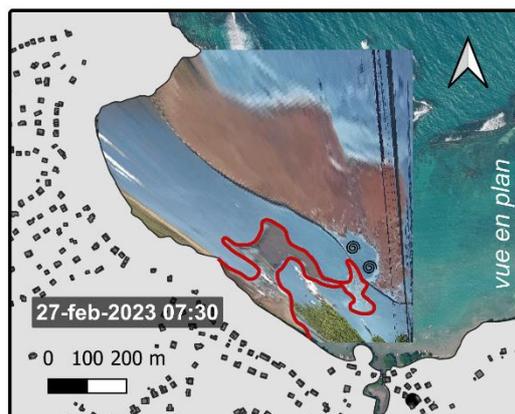
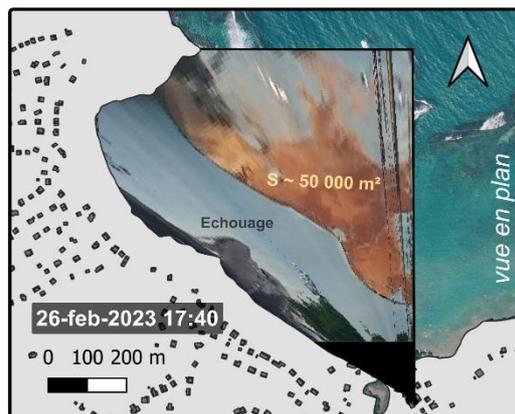
Dans un intervalle de temps relativement court, une grande partie (> 20 %) des algues qui s'étaient accumulées contre le barrage parviennent à se propager dans la colonne d'eau pour finalement venir s'échouer dans le fond de la baie.

4- Bilan - fonctionnement du site

Avec une nappe de sargasses qui peut atteindre occasionnellement plus de 100 000 m² contre le barrage, le site est très exposé aux nouveaux arrivages.

En provenance du secteur nord-est, les sargasses dérivent en surface et sont efficacement captées par le barrage. Toutefois les observations montrent qu'une quantité non négligeable d'algues parvient à atteindre la côte en se propageant dans la colonne d'eau. Par la suite, une quantité importante de ces algues se retrouve à proximité du rivage (secteur sud-est de la baie).

L'analyse montre que le barrage est largement sollicité avec des arrivages parfois conséquents où des nappes de plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés viennent buter contre l'ouvrage. Une analyse de terrain plus poussée en période d'arrivage permettrait de mieux comprendre les processus en jeu au niveau de la structure.



Suivi des échouages de sargasse (2022-2023)

Site n°4 : Frégate Est (le François)

1- Le dispositif de suivi

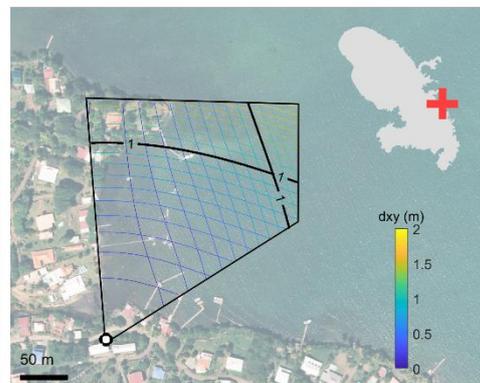
Installé chez un particulier à environ 12 m (ngm), les images capturées offrent une vue sur le fond de baie et plus particulièrement sur le barrage flottant mis en place.

Alors qu'il est très difficile de distinguer de façon automatique les sargasses échouées à la côte à cause des faibles différences de couleurs, la détection des algues est réalisée avec une bonne précision au niveau du barrage.

Les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit ~cinq images par jour) :

- Plus de 6 000 images traitées entre janvier 2020 et janvier 2024 ;
- 89 % des détections réalisées montrent des résultats satisfaisants ;
- Les détections approximatives ont été retirées des analyses présentées ci-dessous ;

NB : le calcul des surfaces n'est pas réalisé au niveau de l'extrémité sud du barrage (secteur non visible).
Les quantités de sargasses peuvent alors être légèrement sous-estimées (< 20 %).



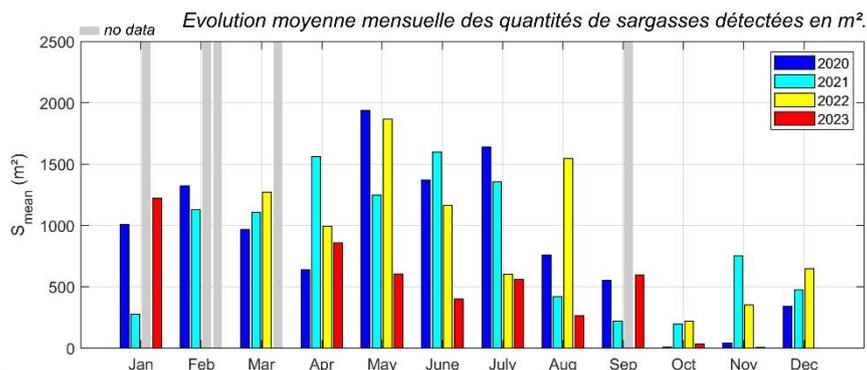
Localisation du dispositif et résolution de l'image en mètre (dxy). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

2- Quantité de sargasses détectées (2020-2023)

Entre janvier 2020 et janvier 2024, le site fut exposé à un grand nombre d'arrivages de sargasses :

- Plus de 50 évènements en 48 mois
- où les surfaces détectées excèdent 1 000 m² ;
- Une variabilité saisonnière importante ;
- avec des arrivages fréquents entre février et août... entre 1 000 et 2 000 m²/mois en moyenne
- des arrivages moins fréquents de septembre à janvier (x 3)
- En 2023, le site fut globalement moins exposé
- diminution de 30 % par rapport aux années précédentes

NB : Les barres grises remplacent les barres colorées lorsque la quantité de données est insuffisante (couverture minimale fixée à 15 j/mois)



Evolution temporelle des quantités de sargasses détectées en 2023 (m²).



3- Evènement(s) marquant(s) sur l'année 2023

Les plus gros arrivages enregistrés sont ceux du 30 janvier au 1^{er} février 2023 où la surface de sargasses atteint plus de 7 000 m².

Suite à cet épisode, sur plusieurs jours, on observe la diminution progressive de la surface de sargasses présente contre l'ouvrage. L'inspection détaillée des images met en évidence la sédimentation des algues au niveau du barrage et leurs propagations vers la côte pendant les jours qui suivent.

Dans un intervalle de temps estimé à environ 10 jours, une grande partie (> 50 %) des algues qui s'étaient accumulées contre le barrage se retrouvent échouées dans le fond de baie.



4- Bilan - fonctionnement du site

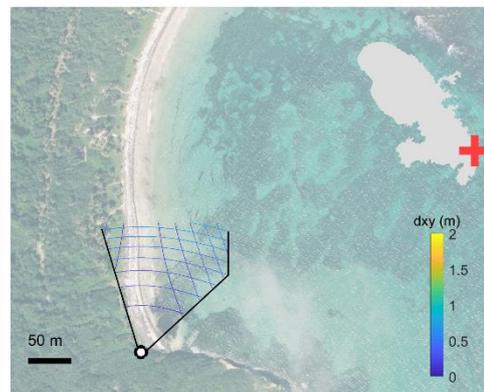
Avec une surface occupée environ égale à 800 m² en moyenne, le site est très exposé aux nouveaux arrivages.

En provenance du secteur est, les sargasses dérivent en surface et parviennent à être effectivement captées par le barrage pendant quelques jours jusqu'à finalement parvenir à la côte en se propageant dans la colonne d'eau. Par la suite, une quantité importante de ces algues se retrouve à l'embouchure de la ravine située à l'extrémité sud du fond de baie, limitant alors parfois les rejets qui en découle.

L'analyse montre que le barrage est occupé à raison d'un jour sur deux par une surface de plus de 300 m² d'algues. Au cours de la période de suivi, on note plusieurs pics où la surface de sargasses détectée sur le secteur du barrage excède 5 000 m².

Suivi des échouages de sargasse (2023)

Site n°5 : Petite anse Macabou (le Vauclin)



Localisation du dispositif et résolution de l'image en mètre (dxy). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

1- Le dispositif de suivi

Installé depuis février 2023 sur un arbre à environ 8.5 m (ngm), les images capturées offrent une vue sur la première moitié sud de la plage de Petite anse Macabou. Ce secteur a été déjà instrumenté au cours des précédentes années (e.g. plage de Grande Anse Macabou suivie entre 2020 et 2022).

La détection des algues est réalisée avec une bonne précision à proximité de la caméra et se dégrade en fonction de la distance au dispositif, lorsque la résolution de l'image devient supérieure à 1 m.

Les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit ~cinq images par jour) :

- 1010 images traitées entre février 2023 et janvier 2024 ;
- 77 % des détections réalisées montrent des résultats satisfaisants ;
- Les détections approximatives ont été retirées des analyses présentées ci-dessous ;

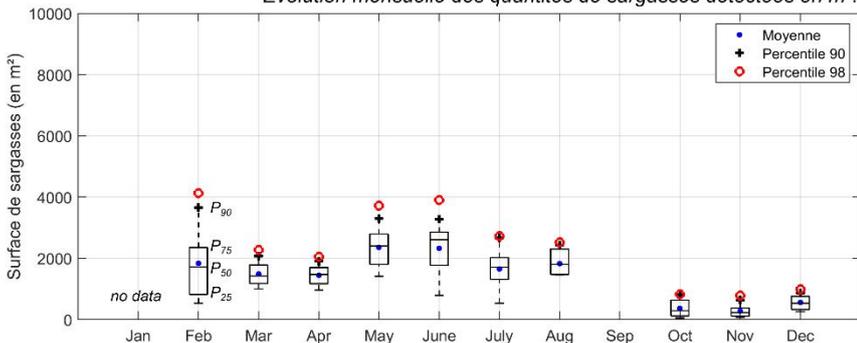
NB : le calcul des surfaces n'est pas réalisé sur les parties centrales et nord de la plage (secteurs trop éloignés du dispositif). Les quantités de sargasses peuvent alors être largement sous-estimées (> 50 % sur les arrivages majeurs).

2- Quantité de sargasses détectées (2023)

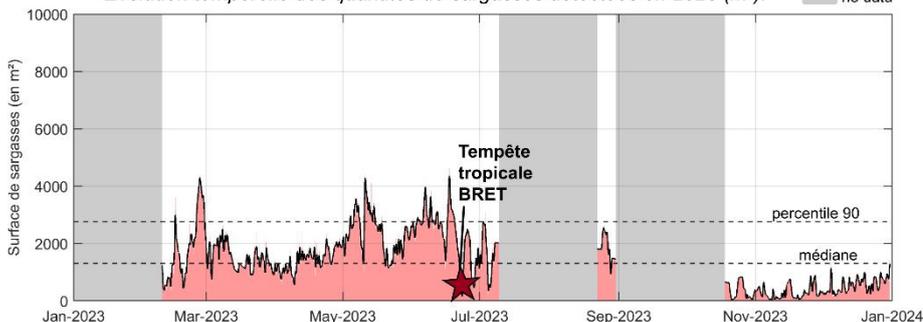
Au cours de l'année 2023, des algues sont visibles en continue échouées sur la plage :

- sous la forme d'une banquette plus ou moins compacte où les surfaces détectées excèdent 1 000 m² ;
- Une certaine variabilité saisonnière ;
- avec des arrivages fréquents entre février et août... entre 1 500 et 2 500 m²/mois en moyenne
- des arrivages moins fréquents de septembre à décembre
- Le site a été particulièrement touché par des arrivages pendant les mois de mai et de juin avec en moyenne une surface détectée de plus de 2 500 m² sur le secteur sud de la plage.

Evolution mensuelle des quantités de sargasses détectées en m².



Evolution temporelle des quantités de sargasses détectées en 2023 (m²).



3- Evènement(s) marquant(s) sur l'année 2023

Les plus gros arrivages enregistrés sont ceux du 10 mai et du 6 juin 2023 où la surface de sargasses détectée atteint environ 4 000 m², soit plus de 10 000 m² sur l'ensemble de la plage (e.g. les calculs ne sont pas réalisés sur la seconde moitié nord de la cellule).

De par sa proximité avec le centre du système cyclonique, la plage fut très exposée au cours de la tempête tropicale BRET du 22 juin. Les images disponibles montrent que les niveaux d'eau atteignent des valeurs supérieures à la normale dans la soirée. Le jet de rive s'étend jusqu'à la limite de végétation située sur l'arrière plage et la banquette de sargasse initialement présente est remobilisée temporairement par la mer. Suite au passage de la tempête tropicale, les algues parviennent à s'échouer de nouveau en grande quantité à la côte.

4- Bilan - fonctionnement du site

Avec une banquette de sargasses présente en continue sur la plage, cette cellule sédimentaire est très exposée aux nouveaux arrivages.

En provenance du secteur est, les sargasses sont poussées vers la côte par les alizés et dérivent majoritairement vers le secteur sud de la cellule sédimentaire pour finalement venir s'échouer sur la plage. La banquette de sargasses qui se forme devient alors souvent très compacte, rendant difficile la remobilisation naturelle des algues par la mer (e.g. jet de rive).

Malgré la présence d'algues sous la forme d'une banquette relativement compacte avant le passage de la tempête tropicale BRET, les observations décrivent la submersion de l'arrière plage pendant le pic de l'évènement et une forte érosion ayant entraînée un recul de la position du trait de côte. De par la présence de sargasses, il reste difficile d'estimer précisément ce recul.

Suivi des échouages de sargasse (2022-2023)

Site n°6 : Anse Dizac (le Diamant)

1- Le dispositif de suivi

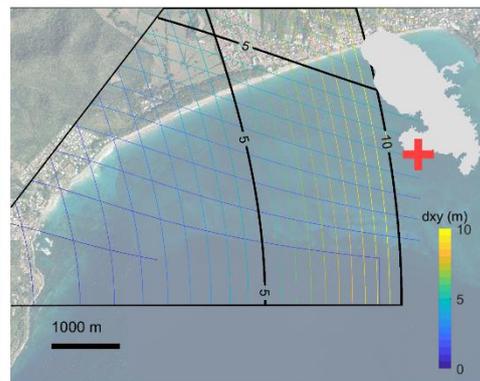
Installé en bordure de falaise sur le Morne Larcher 355 m (ngm), les images capturées offrent une vue sur la baie du Diamant (3500 m de long sur 1500 m de large).

La banquette de sargasses parfois présente sur la plage reste difficile à détecter automatiquement à cause de la résolution des pixels de l'image. En revanche la détection automatique des nappes de sargasses arrivant à proximité de la côte avant l'échouage est souvent bien réalisée.

Les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit ~cinq images par jour) :

- Plus de 5 800 images traitées entre janvier 2020 et janvier 2024 ;
- 91 % des détections réalisées montrent des résultats satisfaisants ;
- Les détections approximatives ont été retirées des analyses présentées ci-dessous ;

NB : parmi l'ensemble des images analysées, les variations de quantité de sargasses (jusqu'à 2 000 m²) correspondant à l'interprétation inexacte de certaines portions de l'image ne doivent pas être interprétées comme de réelles évolutions.



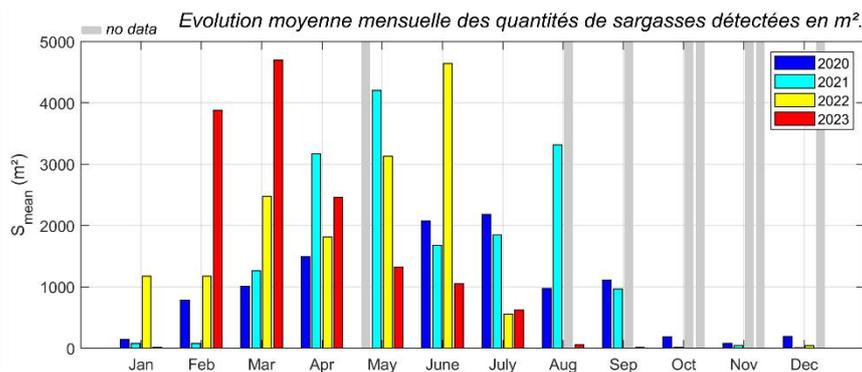
Localisation du dispositif et résolution de l'image en mètre (dxy). Fond de carte : BD ORTHO® 2017.

2- Quantité de sargasses détectées (2020-2023)

Entre janvier 2020 et janvier 2024, le site fut exposé à un grand nombre d'arrivages de sargasses :

- Plus de 25 évènements en 48 mois
- où les surfaces détectées excèdent 5 000 m² ;
- Une variabilité saisonnière importante ;
- avec des arrivages fréquents entre février et août... entre 1 000 et 4 000 m²/mois en moyenne
- des arrivages moins fréquents de septembre à janvier (x 3)
- En 2023, le site fut globalement bien exposé
- pas de variation significative par rapport aux années précédentes. Les arrivages ont eu lieu plus tôt dans l'année.

NB : Les barres grises remplacent les barres colorées lorsque la quantité de données est insuffisante (couverture minimale fixée à 15 j/mois)



Evolution temporelle des quantités de sargasses détectées en 2023 (m²).



3- Evènement(s) marquant(s) sur l'année 2023

Les plus gros arrivages enregistrés sont ceux du 1^{er} mars 2023 où la surface de sargasses détectée en moyenne au cours de la journée atteint plus de 40 000 m².

Au cours de cette journée, les nappes de sargasses en provenance du secteur est-sud-est dérivent progressivement vers la côte et plus particulièrement vers le secteur sud de la baie du Diamant, poussées par les vents d'est. Au cours de la journée, les algues viennent s'échouer par paquets ou stagnent sur une zone proche de la côte.

Le même type de processus a été observé pendant la période de suivi au cours des journées du 21 mars, 28 avril mai et du 13 juin 2023. Pendant les jours qui suivent ces évènements, les algues s'accumulent à la côte, formant une banquette d'algues dont l'épaisseur est variable.

4- Bilan - fonctionnement du site

Avec une surface de sargasse détectée occasionnellement supérieure à 40 000 m², le site peut être très exposé aux nouveaux arrivages.

En provenance du secteur est, les sargasses dérivent en surface et se propagent en direction de l'extrémité sud de la baie. L'analyse des observations montre que les nappes viennent principalement s'échouer sur l'anse Cafard. La banquette formée sur la plage peut alors se maintenir pendant plusieurs semaines jusqu'au ramassage éventuel des algues.

Aussi, les mesures du profil de plage réalisées sur le site d'anse Cafard montrent un recul significatif du trait de côte sur plusieurs mètres depuis la mise en place du suivi topographique en 2017 (www.observatoire-olimar.fr). Ce phénomène d'érosion résulte d'un affaissement global du profil de plage et pourrait être la conséquence du ramassage mécanique des algues.



5. Conclusion

L'observation et le partage de l'information

Entre janvier 2019 et janvier 2024, plus de 86 400 images ont été capturées sur six sites exposés aux arrivages de sargasses, répartis sur les façades Atlantique et sud-Caraïbe de la Martinique. Les images collectées au cours de ces dernières années permettent de suivre à une échelle locale en temps réel et en continu les arrivages et les échouages de sargasses sur chacun des sites suivis. Les images sont stockées sur le serveur du BRGM et peuvent être mises à disposition sur demande.

Une chaîne de traitement des images permettant la détection automatique des algues sargasses et une estimation de leurs surfaces a été appliquée, montrant des résultats satisfaisants sur cinq sites. Sur ces derniers, les chroniques des surfaces échouées comprennent la date d'acquisition, la quantité de sargasses détectées en pixel ou en mètres carrés, la proportion de sargasses sur l'image correspondante et la précision de la détection. Les futurs utilisateurs de ce jeu de données sont encouragés à utiliser la donnée surfacique lorsque la qualité de la détection est jugée satisfaisante ou excellente (précision 2 et 3 respectivement). Sur les sites où les algorithmes de détection automatique montrent de moins bon résultats, une représentation visuelle de type (*timestack*) le long d'un profil transversal extrait à partir des images d'archives permet d'obtenir une information quantitative et un suivi du phénomène.

Les résultats obtenus montrent une nouvelle fois sur les années 2022 et 2023 une variabilité saisonnière significative où la période située entre février et août correspond à celle où les arrivages de sargasses sont les plus fréquents. En effet, la zone océanique de l'Atlantique Nord tropical reçoit des quantités relativement importantes de nutriments provenant de différentes sources au cours de cette période forçant les sargasses à s'accumuler sous la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et à dériver vers la Martinique et plus généralement les Petites Antilles (Skloris et al., 2022).

Si la réalisation d'un bilan comparatif à l'échelle interannuelle reste encore difficile (seulement 4 ans de données pour les sites les plus anciens), les quantités de sargasses échouées ou visibles à proximité des sites suivis au cours de l'année 2023 semblent en légère diminution par rapport à celles observées depuis la mise en place du dispositif.

Les effets des algues sur la dynamique du trait de côte

Les résultats obtenus montrent que les effets induits par la présence d'algues sur la dynamique du trait de côte et en particulier sur l'atténuation de l'érosion restent limités lorsque la quantité de sargasses échouées ne permet pas la formation d'une banquette suffisamment compacte et homogène pouvant résister à l'assaut des vagues.

Sur certains sites, on observe un phénomène d'érosion important qui semble être provoqué par un affaissement global du profil de plage et qui pourrait être la conséquence du ramassage mécanique des algues échouées. Si le ramassage des algues reste parfois indispensable, cette méthode est aussi connue pour entraîner une diminution du stock sédimentaire avec le prélèvement simultané de sables et de sargasses. Certaines pratiques nécessitent alors un meilleur cadrage où le ramassage manuel est à privilégier.

Conclusion générale

Les observations associées à ce dispositif innovant offrent des perspectives particulièrement intéressantes pour la définition et l'adaptation des stratégies de gestion des échouages (organisation d'un ramassage adéquat, dimensionnement des engins de collecte, suivi de l'efficacité d'un barrage). De plus, la capitalisation de l'information via l'estimation des quantités échouées est indispensable pour surveiller l'évolution du phénomène et mieux qualifier les impacts associés ou pour valider ou améliorer les modèles de prévisions. Aussi, la mise à disposition de ces nouvelles données auprès des différents acteurs de la thématique offre de nombreuses possibilités pour une meilleure compréhension du phénomène.

6. Références

- Alleyne, K.S.T., Johnson, D., Neat, F., Oxenford, H.A., Vallès, H., 2023. Seasonal variation in morphotype composition of pelagic Sargassum influx events is linked to oceanic origin. *Scientific Reports* 13, 3753. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30969-2>
- Belon, R., Laigre, T., Chevet, T., 2017. Suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte en Haute-Corse. Rapport final. (No. BRGM/RP-67632-FR).
- Bouvier, C., 2022. Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (2020 - 2022) (No. BRGM/RP-72256-FR). BRGM.
- Bouvier, C., Balouin, Y., Castelle, B., 2017. Video monitoring of sandbar-shoreline response to an offshore submerged structure at a microtidal beach. *Geomorphology* 295, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.017>
- Bouvier, C., Balouin, Y., Castelle, B., Holman, R., 2019. Modelling camera viewing angle deviation to improve nearshore video monitoring. *Coastal Engineering* 147, 99–106.
- Bouvier, C., De Cathelineau, T., Valentini, N., 2020. Suivi de la dynamique des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Développement et application des algorithmes (No. RP-69651-FR).
- Civallero, E., Seux, B., Chapron, S., 2021. Étude de l'impact environnemental des sites d'épandage de sargasses en Guadeloupe - Rapport final (No. BRGM/RP-70520-FR). GUADELOUPE - (971).
- Harley, M.D., Kinsela, M.A., Sánchez-García, E., Vos, K., 2019. Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images. *Coastal Engineering*.
- Holman, R.A., Stanley, J., 2007. The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.01.003>
- Krähenbühl, P., processing, V.K.-A. in neural information, 2011, undefined, n.d. Efficient inference in fully connected crfs with gaussian edge potentials. papers.nips.cc.
- Lippmann, T.C., Holman, R.A., 1989. Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research* 94, 995. <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p00995>
- Moisan, M., Delahaye, T., Laigre, T., Valentini, N., 2021. Suivi des échouages de sargasse et de l'évolution du trait de côte par caméra autonome en Guadeloupe : analyse des résultats et bilan des observations - Rapport final (No. BRGM/RP-71295-FR). GUADELOUPE - (971).
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., Chen, L.-C., 2018. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks.
- SHOM, 2020. Références Altimétriques Maritimes.

- Skliris, N., Marsh, R., Appeaning Addo, K., Oxenford, H., 2022. Physical drivers of pelagic *Sargassum* bloom interannual variability in the Central West Atlantic over 2010–2020. *Ocean Dynamics* 72, 383–404.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger, A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Valentini, N., Balouin, Y., 2020. Assessment of a smartphone-based camera system for coastal image segmentation and sargassum monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 23.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B.B., Mitchum, G., Lapointe, B., Montoya, J.P., 2019. The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science* 365, 83–87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale de Martinique

4 lot. Miramar – Route Pointe des nègres

97200 Fort-de-France

Tél. : 05 96 71 17 70

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm