



**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 (2020 - 2022)

Rapport final

**BRGM/RP-72256-FR**

Version 1 du 7 novembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

**Bouvier Clement**

<b>Vérificateur :</b>	
Nom :	Longueville F.
Fonction :	Ingénieur géologue
Date :	07/11/2022
Signature :	

<b>Approbateur :</b>	
Nom :	Vittecoq B.
Fonction :	Directeur régional
Date :	08/11/2022
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](mailto: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/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



**Mots clés : Littoral, Sargasse, Trait de côte, Dynamique sédimentaire, Réseau de suivi photographique.**

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

**Bouvier Clement** (2022) – Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (2020 - 2022). Rapport final V1. BRGM/RP-72256-FR, 66 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-20/01/2022

## Synthèse

Depuis 2011, des 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.

### ***Le réseau de suivi***

La maintenance du suivi des échouages de sargasses a été assurée pendant les 28 derniers mois, entre juin 2020 et octobre 2022, sur sept sites d'études localisés sur les façades Atlantique (5) et sud-Caraïbe (2) de la Martinique. Au cours de cette période, le système de suivi a connu très peu de dysfonctionnement avec moins de 8 % d'échec en moyenne dans l'acquisition des images. Dans le cadre de la première convention relative au suivi des échouages de sargasses (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020), une première phase de maintenance avait permis d'acquérir des images sur les sites suivis depuis octobre 2018. Au cours des 47 derniers mois (octobre 2018 à octobre 2022), plus de 123 000 images ont pu être capturées et sont aujourd'hui stockées sur le serveur du BRGM (soit plus de 100 giga-octets). Chaque année, le réseau de suivi capture en moyenne plus de 4000 images par site.

### ***Efficacité des algorithmes de détection***

Par ailleurs, une chaîne de traitement des images permettant la détection automatique des sargasses et une estimation de leurs surfaces a été développée sur six sites. La qualité des résultats obtenus est satisfaisante à excellente pour quatre d'entre eux (~ 70 %). Sur ces secteurs, moins de 10 % des calculs réalisés sur les images ne sont pas exploitables directement en tant que surface de sargasses (où la qualité de la détection varie de moyenne à mauvaise). Les futurs utilisateurs de ce jeu de données sont encouragés à exploiter la quantité surfacique lorsque la qualité de la détection est jugée satisfaisante ou excellente (indicateur de précision > 1). Sur les sites où les algorithmes de détection automatique montrent de moins bon résultats, un autre type de représentation (extraction des pixels de l'image le long d'un profil transversal) permet malgré tout d'obtenir une information quantitative et un réel suivi du phénomène. Cette méthode permet de suivre l'évolution de l'extension de la nappe de sargasses à proximité de la côte au cours du temps.

### ***Dynamique des échouages***

En plus d'une grande disparité des quantités de sargasses présentes au cours du temps sur les différents sites étudiés, les analyses réalisées mettent également en évidence une dynamique très variée des mécanismes naturels d'arrivages ou de remaniement des algues échouées. Plusieurs facteurs peuvent alors expliquer la variabilité des surfaces de sargasses à proximité des côtes. Les nouveaux arrivages de sargasses s'étalent généralement sur un à plusieurs jours et sont à l'origine d'une forte augmentation des surfaces de sargasses présentes sur site. En fonction du site étudié et de la séquence analysée, la superficie de sargasses peut alors atteindre

plus de 5 000 m<sup>2</sup>. Les algues dérivent généralement vers la côte selon les courants jusqu'à atteindre une zone moins dynamique (e.g. fond de baie, zone portuaire) ou venir s'échouer sur la plage. Des épisodes ponctuels de fortes houles peuvent ensuite remobiliser les sargasses à la côte et se traduisent généralement par une diminution des surfaces à l'échelle d'un évènement (un à plusieurs jours). Au contraire, lorsque les conditions de vagues restent modérées, le tassement ou l'enfouissement progressif des sargasses échouées peut être observé sur plusieurs semaines. Par ailleurs, en lien avec les interventions de collecte réalisées sur les plages, des facteurs anthropiques viennent bouleverser la variabilité des surfaces échouées.

Néanmoins, les résultats obtenus montrent systématiquement une variabilité saisonnière significative où la période située entre février et août correspond à celle où les arrivages de sargasses sont les plus fréquents (facteur 3). Cette variabilité apparaît nettement sur les épisodes d'échouages massifs où la majorité des événements les plus importants sont capturés entre mars et août.

### ***Impact des échouages sur la dynamique du trait de côte***

Sur la plage de Sainte-Marie, la variabilité de la position du trait de côte est étroitement reliée aux conditions de vagues où entre le mois de septembre et le mois de mars elles proviennent majoritairement du secteur est-nord-est, orientant le transport sédimentaire vers le sud le long de la façade Atlantique. Au contraire, entre avril et juillet, les vagues proviennent généralement du quart est à est-sud-est orientant le transport sédimentaire vers le nord.

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. La répétition des situations de fortes vagues avec ou sans la présence de sargasses pourra nous apporter des informations complémentaires dans le futur et venir confirmer ce résultat.

Sur le site de l'anse Cafard, 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 certain cadrage où le ramassage manuel est à privilégier.

### ***Conclusion et perspectives***

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 pourraient être transférables vers d'autres territoires.

## Sommaire

1. Introduction.....	11
1.1. Contexte .....	11
1.2. Objectifs.....	13
2. Présentation des sites suivis .....	14
2.1. Introduction .....	14
2.2. Les sites suivis.....	16
2.2.1. <i>La baie du bourg du Marigot</i> .....	16
2.2.2. <i>La plage du bourg de Sainte-Marie</i> .....	16
2.2.3. <i>Cité du Bac (la Trinité)</i> .....	17
2.2.4. <i>Frégate est (le François)</i> .....	17
2.2.5. <i>Grande anse Macabou (le Vauclin)</i> .....	18
2.2.6. <i>Anse Cafard (le Diamant)</i> .....	18
2.2.7. <i>La Baie du Diamant</i> .....	19
2.3. Performance du suivi .....	20
2.3.1. <i>Suivi et maintenance sur les 28 derniers mois</i> .....	20
2.3.2. <i>Suivi et maintenance depuis 2018</i> .....	20
3. Les algorithmes de traitement des images.....	22
3.1. Géoréférencement des images .....	22
3.2. Détection du trait de côte.....	23
3.3. Détection des sargasses .....	25
3.4. Conception du sytème d'alerte .....	26
3.5. Données complémentaires.....	28
3.5.1. <i>Conditions météorologiques</i> .....	28
3.5.2. <i>Régime de marée et caractéristique des vagues</i> .....	28
4. Résultats.....	29
4.1. La baie du bourg du Marigot.....	29
4.1.1. <i>Géoréférencement des images</i> .....	29
4.1.2. <i>Détection des sargasses et jeu de données disponible</i> .....	30
4.1.3. <i>Analyse des résultats</i> .....	32
4.2. La plage du bourg de Sainte-Marie .....	35
4.2.1. <i>Géoréférencement des images</i> .....	35
4.2.2. <i>Détection des sargasses et jeu de données disponible</i> .....	35
4.2.3. <i>Analyse des résultats</i> .....	38
4.3. Cité du Bac (la Trinité).....	42
4.3.1. <i>Géoréférencement des images</i> .....	42
4.3.2. <i>Détection des sargasses</i> .....	42
4.3.3. <i>Analyse des résultats</i> .....	43
4.4. Frégate Est (Le François).....	45
4.4.1. <i>Géoréférencement des images</i> .....	45
4.4.2. <i>Détection des sargasses et jeu de données disponible</i> .....	45
4.4.3. <i>Analyse des résultats</i> .....	46
4.5. Grande anse Macabou (le Vauclin).....	50
4.5.1. <i>Géoréférencement des images</i> .....	50
4.5.2. <i>Détection des sargasses</i> .....	50
4.5.3. <i>Analyse des résultats</i> .....	51
4.6. La baie du Diamant .....	53
4.6.1. <i>Géoréférencement des images</i> .....	53
4.6.2. <i>Détection des sargasses</i> .....	53
4.6.3. <i>Analyse des résultats</i> .....	55
5. Conclusion.....	59
6. Références .....	62

## Liste des figures

- Figure 1 : a) évolution temporelle de la couverture spatiale (km<sup>2</sup>) de sargasses dans la mer des Caraïbes et la zone Atlantique équatoriale (moyenne mensuelle). b) Densité moyenne (%) de sargasses pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre sur la période 2011-2017. Illustration extraite de Wang et al., 2019. .... 11
- Figure 2 : photographie capturée par le dispositif de suivi ©SolarCam illustrant l'arrivée de sargasses par le secteur sud-est le 13 juin 2021 à la mi-journée sur la commune du Diamant. 12
- Figure 3 : 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..... 15
- Figure 4 : localisation des sites équipés d'un dispositif ©Solarcam avec en rose les sites instrumentés dans le cadre du suivi des échouages de sargasses et en jaune les plages de l'observatoire OLIMAR ([www.observatoire-olimar.fr](http://www.observatoire-olimar.fr))..... 15
- Figure 5 : localisation du dispositif et prise de vue au bourg du Marigot..... 16
- Figure 6 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du bourg de Sainte-Marie. .... 17
- Figure 7 : localisation du dispositif et prise de vue à la Trinité sur le site de Cité de Bac..... 17
- Figure 8 : localisation du dispositif et prise de vue au François sur le site de Frégate Est..... 18
- Figure 9 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Grande anse Macabou au Vauclin..... 18
- Figure 10 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de anse Cafard au Diamant. . 19
- Figure 11 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Dizac au Diamant. .... 19
- Figure 12 : performance du suivi par imagerie photo sur les sept sites équipés en nombre de photos capturées par jour et par site depuis le début de la présente convention (entre juin 2020 et octobre 2022)..... 20
- Figure 13 : performance du suivi par imagerie photo sur les sept sites équipés depuis 2018. a) Evolution temporelle du nombre d'images capturées pour chaque site (en cumul) et par jour depuis la mise en place du suivi. b) Histogramme représentant le nombre d'images capturées par année et pour chaque site, depuis 2017. Les diagrammes en boîte annuels illustrent l'ensemble de la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) calculée pour l'intégralité des images collectées, tandis que la moyenne est représentée par les ronds noirs. .... 21
- Figure 14 : 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 gcps connues. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en juin 2017. 23
- Figure 15 : 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. .... 24
- Figure 16 : 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..... 24
- Figure 17 : a) image brute capturée à Grande Anse Macabou au Vauclin le 08 décembre 2019. Un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt. b) Classification automatique de l'image par l'algorithme. .... 26

Figure 18 : exemple de mail envoyé pour une alerte déclenchée sur le site du bourg du Marigot le 06 novembre 2021. La surface de sargasses estimée par l’algorithme atteint plus de 2300 m<sup>2</sup>. ..... 27

Figure 19 : (à gauche) Diagramme directionnel en fréquence des hauteurs significatives de vagues ( $H_s$ ) à la station Basse-Pointe entre janvier 2016 et mai 2022. (à droite) Moyenne mensuelle des directions (°) de vagues. .... 28

Figure 20 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la baie du bourg du Marigot. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 19 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l’image ; en rouge (en vert) dans l’axe longitudinal (transversal), respectivement..... 29

Figure 21 : création du modèle de détection sur le site du Marigot. A gauche, Images brutes capturées dans la baie du Marigot ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l’image selon les différentes classes d’intérêt ; à droite, classification automatique de l’image par l’algorithme..... 30

Figure 22 : détection automatique de la superficie de sargasses  $S(u,v)$  dans la baie du bourg du Marigot à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021. (u,v) sont les coordonnées de l’image en pixels ..... 31

Figure 23: Evolution temporelle de la quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site du Marigot entre janvier 2020 et septembre 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98..... 32

Figure 24 : (panneaux supérieurs) séquence illustrant un arrivage massif de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur le site du bourg du Marigot. La surface de sargasses détectée dépasse 11 000 m<sup>2</sup> le 24 février 2022. (Panneaux inférieurs) séquence illustrant la coulée des sargasses et leurs évacuations progressives vers le large. La surface de sargasses estimée par l’algorithme réduit en quelques jours de plus de 4000 m<sup>2</sup>. .... 33

Figure 25 : image drone capturée suite à un arrivage massif de sargasses le 20 août 2020. La surface de sargasses détectées excède 6 000 m<sup>2</sup> avec une quantité importante présente dans le port contre 4 000 m<sup>2</sup> à partir des caméras sur la même date. Crédit photo : Bertrand Delapierre. .... 33

Figure 26 : Diagramme en boîte mensuelle des quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectés sur le site du Marigot (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 33 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des événements les plus importantes (percentile 98). ..... 34

Figure 27 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la plage du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 19 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l’image ; en rouge (en vert) dans l’axe longitudinal (transversal), respectivement..... 35

Figure 28 : création du modèle de détection sur le site de Sainte-Marie. A gauche, Images brutes capturées; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l’image selon les différentes classes d’intérêt ; à droite, classification automatique de l’image par l’algorithme... 36

Figure 29 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  sur la plage du bourg de Sainte-Marie à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021. .... 37

Figure 30 : Evolution temporelle de la quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site de Sainte-Marie entre janvier 2020 et mai 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du

signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98. ....	38
Figure 31 : Ramassage des sargasses entre le 20 aout et le 02 septembre 2019 sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie.....	39
Figure 32 : (panneaux supérieurs) séquence illustrant un arrivage massif de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur la plage de Sainte-Marie. La surface de sargasses détectée dépasse 7 500 m <sup>2</sup> le 4 juin 2021. (Panneaux inférieurs) séquence illustrant le tassement et le remaniement des sargasses et leurs évacuations progressives vers le large. La surface de sargasses estimée par l’algorithme réduit en quelques semaines de plus de 3000 m <sup>2</sup> . ....	39
Figure 33 : Diagramme en boîte mensuelle des quantité (m <sup>2</sup> ) de sargasses détectés sur le site de Sainte-Marie (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 29 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des évènements les plus importantes (percentile 98).....	40
Figure 34 : Evolution moyenne de la plage à Sainte-Marie (secteur Nord) entre janvier 2020 et mai 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours).....	41
Figure 35 : Représentation visuelle (timestack) de l’évolution de la position du trait de côte et de la banquette de sargasses le long d’un profil (trait blanc en pointillé) extrait à partir des images d’archives à un pas de temps horaire suite au passage de l’ouragan Fiona. Les courbes noires et bleues situées sur le panneau en haut à droite présentent respectivement l’évolution de la hauteur significative des vagues (houlographe à Basse-Pointe) et des niveaux d’eau (marégraphe au Robert) au cours de l’évènement. ....	41
Figure 36 : création du modèle de détection sur le site de la Trinité. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Cité du Bac ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l’image selon les différentes classes d’intérêt ; à droite, classification automatique de l’image par l’algorithme. ....	42
Figure 37 : détection automatique des sargasses S(u,v) sur la plage de Cité du bac (La Trinité) à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.....	43
Figure 38 : Représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses le long d’un profil transversal sur Cité du Bac (trait bleu, Figure 39) extrait à partir des images d’archives à un pas de temps horaire en 2020 (en haut), 2021 (au centre) et 2022 (en bas).....	44
Figure 39 : séquence illustrant un arrivage de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur la plage de Cité du Bac le 15 mai 2022. Le trait bleu représente la ligne de pixel utilisé pour l’obtention du timestack (Figure 38). ....	44
Figure 40 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur le site de Frégate Est au François. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visé de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 4 janvier 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l’image ; en rouge (en vert) dans l’axe longitudinal (transversal), respectivement. ....	45
Figure 41 : création du modèle de détection sur le site du François. A gauche, Images brutes capturées sur le barrage à Frégate Est ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l’image selon les différentes classes d’intérêt ; à droite, classification automatique de l’image par l’algorithme. ....	46
Figure 42 : détection automatique des sargasses S(u,v) sur le barrage de Frégate Est au François à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.....	47

Figure 43 : Evolution temporelle de la quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site de Frégate entre janvier 2020 et septembre 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98..... 48

Figure 44 : Représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses sur le long du profil transversal (trait pointillé blanc) extrait à partir des images d’archives à un pas de temps horaire. .... 49

Figure 45 : Diagramme en boîte mensuelle des quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectés sur le site de Frégate (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 33 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des évènements les plus importantes (percentile 98)..... 49

Figure 46 : création du modèle de détection sur le site du Vauclin. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Grande anse Macabou ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l’image selon les différentes classes d’intérêt ; à droite, classification automatique de l’image par l’algorithme. .... 50

Figure 47 : détection automatique des sargasses S(u,v) à proximité de la plage de Grande anse Macabou à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021..... 51

Figure 48 : Représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses le long d’un profil transversal sur Macabou (trait bleu, Figure 49) extrait à partir des images d’archives à un pas de temps horaire en 2021 (en haut) et 2022 (en bas)..... 52

Figure 49 : séquence illustrant un arrivage de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur la plage de Grand Macabou le 19 mai 2022. Le trait bleu représente la ligne de pixel utilisé pour l’obtention du timestack (Figure 48) et la flèche rouge illustre la localisation de la nappe en surface. .... 52

Figure 50 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la plage de Dizac. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 22 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l’image ; en rouge (en vert) dans l’axe longitudinal (transversal), respectivement. .... 53

Figure 51 : création du modèle de détection sur le site du Diamant. A gauche, Images brutes capturées sur depuis le Morne Larcher ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l’image selon les différentes classes d’intérêt ; à droite, classification automatique de l’image par l’algorithme..... 54

Figure 52 : détection automatique des sargasses S(u,v) à proximité de la plage de Dizac depuis le Morne Larcher à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021 et 2022. .... 55

Figure 53 : Evolution temporelle de la quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site du Morne Larcher entre janvier 2020 et septembre 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98. .... 56

Figure 54 : dérive de nappes de sargasses vers la côte au Diamant le 3 juin 2022. A gauche, image brute capturée par le dispositif de suivi sur le site du Morne Larcher. A droite, image géo-rectifiée illustrant les arrivages des nappes en provenance du secteur est-sud-est. Au cours de la journée, une surface de plus de 60 000 m<sup>2</sup> a été détectée. .... 56

Figure 55 : séquence illustrant l'arrivage d'algues sur l'anse Cafard et la formation d'une banquette quelques jours plus tard (spirale noire). Les algues qui n'ont pas pu atteindre la plage dérivent généralement vers le sud jusqu'à être évacuées de la baie..... 57

Figure 56 : Diagramme en boîte mensuelle des quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectés sur la baie du Diamant (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 33 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des évènements les plus importantes (percentile 98). ..... 57

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

Depuis une dizaine d'années des échouages particulièrement massifs de sargasses ont touché les côtes des Antilles avec d'importantes répercussions écologiques, économiques et sanitaires (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020; Wang et al., 2019). Les sargasses impliquées dans ces échouages sont des algues brunes pélagiques qui se développent en pleine mer et se déplacent sous l'effet des courants de surface grâce à leur capacité de flottaison. Les communes situées le long de la façade Atlantique et de la façade sud-Caraïbe de la Martinique sont particulièrement exposées.

En relation avec ces échouages, la présence de ces algues est observée à travers l'Océan Atlantique Central depuis 2011, dans une zone située nettement plus au sud que la Mer des Sargasses historique (Figure 1). Depuis, leur abondance ne cesse de croître dans la zone équatoriale de l'Atlantique et la mer des Caraïbes, désormais souvent appelée « nouvelle mer des sargasses » (Wang et al., 2019). Les causes de la prolifération de ces algues restent encore incertaines et complexes mais plusieurs facteurs ont été identifiés comme l'apport massif de nutriments par l'Amazone ou les remontées d'eaux profondes (upwelling<sup>1</sup>) à proximité de la côte Ouest Africaine en lien avec la modification des courants océaniques (Wang et al., 2019).

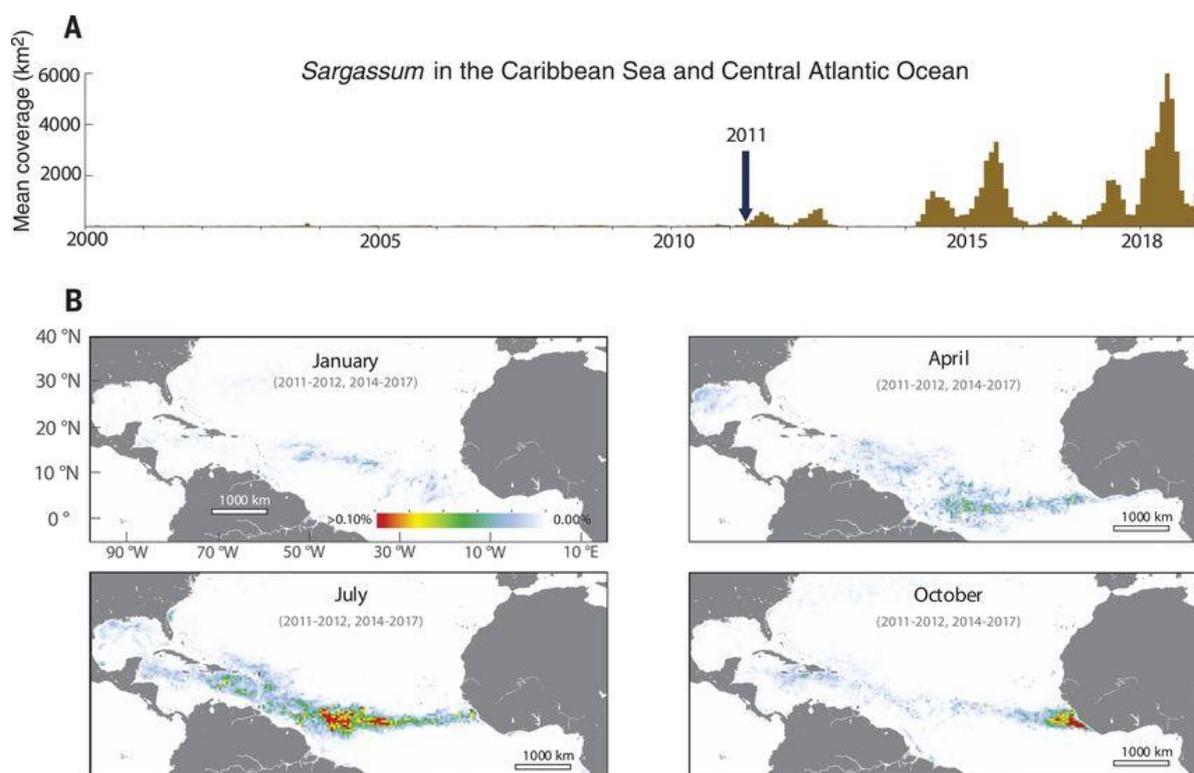


Figure 1 : a) évolution temporelle de la couverture spatiale (km<sup>2</sup>) de sargasses dans la mer des Caraïbes et la zone Atlantique équatoriale (moyenne mensuelle). b) Densité moyenne (%) de sargasses pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre sur la période 2011-2017. Illustration extraite de Wang et al., 2019.

<sup>1</sup> ngm : Phénomène de remontée des eaux de fond



*Figure 2 : photographie capturée par le dispositif de suivi ©SolarCam illustrant l'arrivée de sargasses par le secteur sud-est le 13 juin 2021 à la mi-journée sur la commune du Diamant.*

Un suivi local du phénomène est donc primordial pour la mise en place d'un dispositif de gestion efficace sur le littoral de la Martinique. Afin d'améliorer la connaissance et la compréhension des échouages de sargasses et leur impact sur les systèmes côtiers, le BRGM, l'Agence de la transition écologique (ADEME) et La Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DEAL) ont souhaité développer, dans le cadre du Plan Sargasses, des outils d'observation visant à mieux suivre et gérer le littoral martiniquais (Figure 2).

Le réseau de suivi mis en place est opérationnel depuis décembre 2018 et permet de couvrir les principales façades exposées aux échouages. Parmi les 15 sites suivis entre 2018 et 2020, neuf correspondaient à des littoraux urbanisés (fond de baie ou port) et six à des plages sableuses (rapport BRGM/RP-69071-FR, 2019). La chaîne de traitement des images a été développée, testée et validée sur trois sites pilotes : la baie du bourg du Marigot, la plage au nord du bourg de Sainte-Marie et la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020). L'algorithme développé est capable de détecter de façon fidèle la présence de sargasses lorsque la visibilité sur site est suffisante.

Le suivi réalisé entre 2018 et 2020 a permis un appui qualitatif en temps réel pour la validation des prévisions d'échouages et pour l'organisation des ramassages (Figure 2) ainsi que la communication d'une information quantitative en temps réel sous la forme d'une alerte ou de chroniques d'échouages. En 2020, le BRGM, l'ADEME et la DEAL ont décidé de renouveler le partenariat et de poursuivre le suivi des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais ainsi que les développements associés.

## 1.2. OBJECTIFS

L'objectif général de cette nouvelle phase (juin 2020 - septembre 2022) est d'assurer l'acquisition d'images en continu sur sept sites pendant la durée du projet et de poursuivre les développements méthodologiques afin de disposer d'observations en continu sur les principaux sites soumis aux échouages et d'améliorer la connaissance vis-à-vis des interactions possibles avec l'évolution de la dynamique sédimentaire.

Les objectifs spécifiques de ce projet sont les suivants :

- maintenir le dispositif de suivi en continu par imagerie photo sur sept plages ou sites ;
- poursuivre le développement des algorithmes semi-automatisés de détection et de calcul de surface d'échouage de sargasses ;
- appliquer les algorithmes de détection des sargasses échouées et lorsque c'est possible (sur les plages) de détection du trait de côte sur 3 sites supplémentaires définis parmi les sept sites suivis ;
- optimiser et alimenter la chaîne d'alerte avec les sites supplémentaires étudiés.

Ce rapport s'attache à présenter les sites équipés du dispositif et détaille le suivi déjà réalisé depuis 2018 en exposant les images disponibles sur les années 2020 et 2022 (extrait du rapport intermédiaire BRGM/RP-71396-FR, 2021). 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 les outils associés 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 & Stanley, 2007; Lippmann & 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 (rapport BRGM/RP-66351-FR, 2016). D'après ce retour d'expérience, le choix de la caméra s'est porté sur ©SolarCam en raison de son faible coût (environ 600 €, hors forfait téléphonique), sa fiabilité et sa simplicité d'utilisation. 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/min 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/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 déroulement du projet. 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 les 28 derniers mois sur les sites de la baie du bourg du Marigot (1) ; la plage au nord du bourg de Sainte-Marie (2) ; Cité du bac à la Trinité (3) ; Frégate Est au François (4) ; Grande Anse Macabou au Vauclin (5) ; Anse Cafard (6) et (7) la baie du Diamant (Figure 4). Les autres sites suivis par le BRGM au cours de la première convention de partenariat (2018-2020 ; rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020) ont été confiés pour la plupart à Madininair (<https://www.madininair.fr>) et ne font plus l'objet de la présente convention (2020-2022).

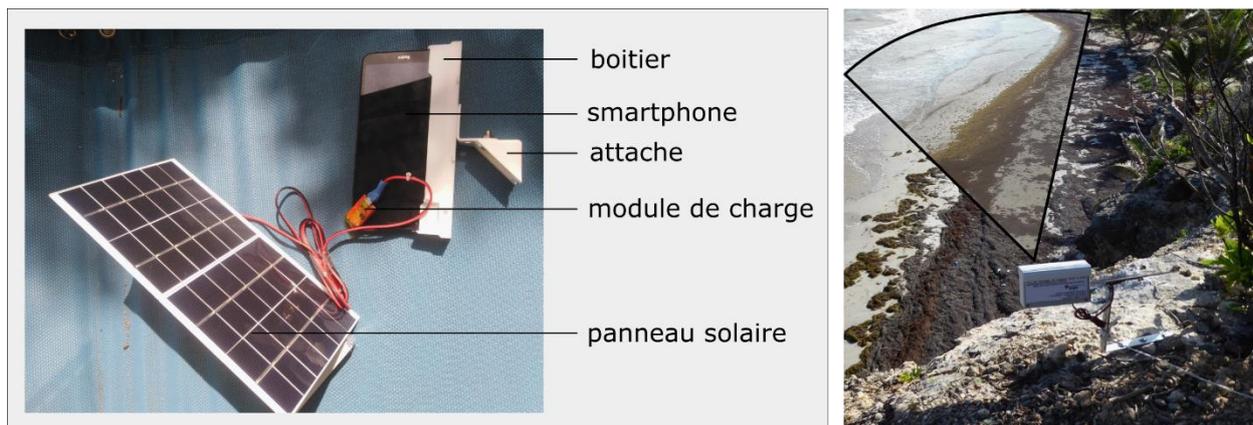


Figure 3 : présentation du dispositif de suivi ©Solarcam (<https://www.solarcam.fr>) à gauche et installation sur le site de Grande anse Macabou au Vauclin (2018-2020) à droite.

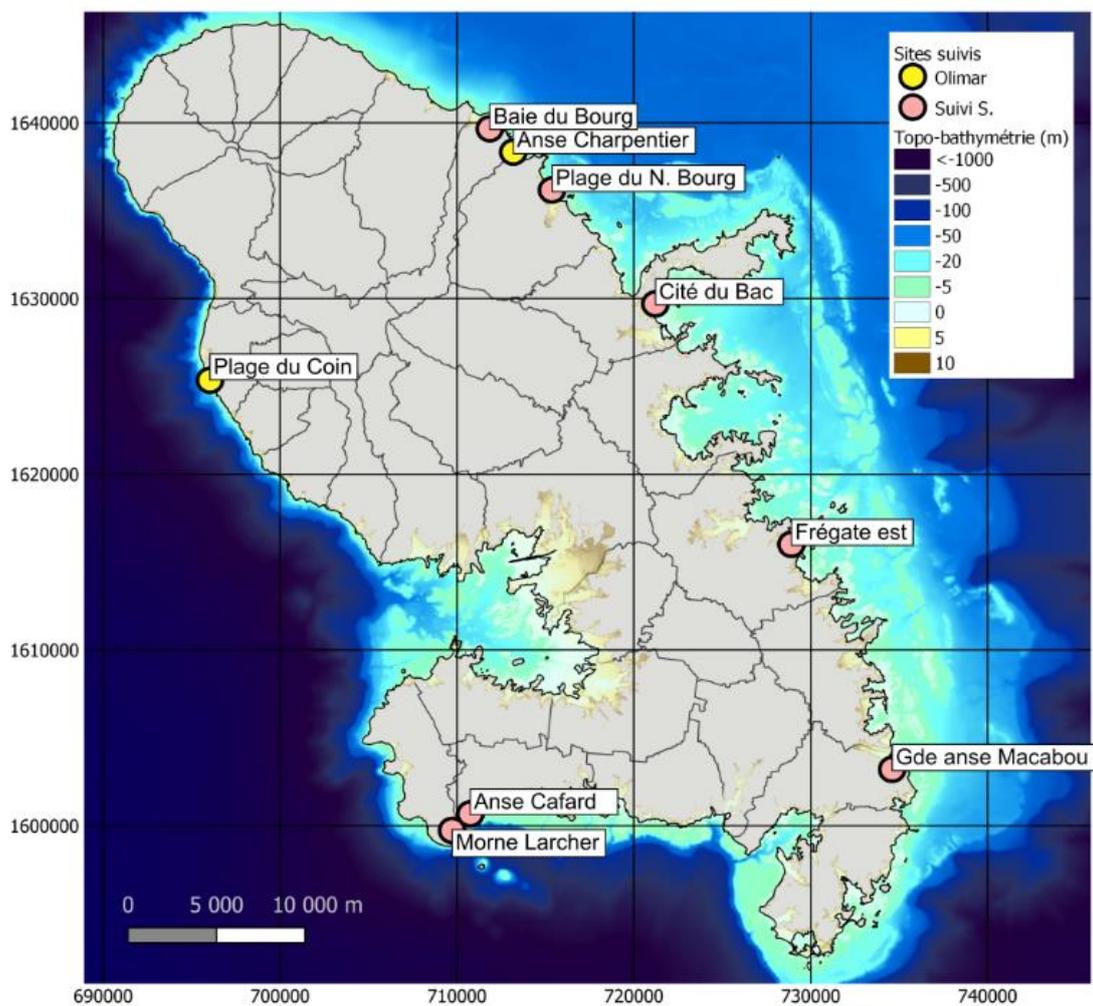


Figure 4 : localisation des sites équipés d'un dispositif ©Solarcam avec en rose les sites instrumentés dans le cadre du suivi des échouages de sargasses et en jaune les plages de l'observatoire OLIMAR ([www.observatoire-olimar.fr](http://www.observatoire-olimar.fr)).

## 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. Le secteur nord de la baie abrite quelques bateaux grâce à 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 m<sup>2</sup>). Le secteur sud de la baie n'est pas protégé par des ouvrages et reste largement exposé aux échouages de sargasses (Illustration 5).

Le dispositif a été déployé en septembre 2018 sur un poteau en bois à une hauteur d'environ 11 m (ngm<sup>2</sup>). La caméra a été installée au sud de la baie de Fonds d'Or et se situe à proximité immédiate de la mer (Illustration 5).



Figure 5 : 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 6) 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.

<sup>2</sup> ngm : nivellement général de la Martinique (niveau moyen de la mer à Fort-de-France)



Figure 6 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du bourg de Sainte-Marie.

### 2.2.3. Cité du Bac (la Trinité)

La plage de Cité du Bac est située sur la commune de la Trinité au sud de la presqu'île de la Caravelle (Figure 7). Cette cellule sédimentaire s'étend sur environ 1 km de long, délimitée par une côte rocheuse au nord (Pointe Desmarinières) et des enrochements au sud. Orientée vers le nord-est, la plage est bien abritée par l'extrémité sud de la presqu'île de la Caravelle et plus localement par la pointe Marcussy. La plage est occasionnellement sujette aux échouages de sargasses.

Le dispositif a été installé au nord de la baie sur un poteau à une hauteur d'environ 30 m (ngm) en juin 2019. Orienté vers le sud, l'appareil offre une vue plongeante sur la plage.

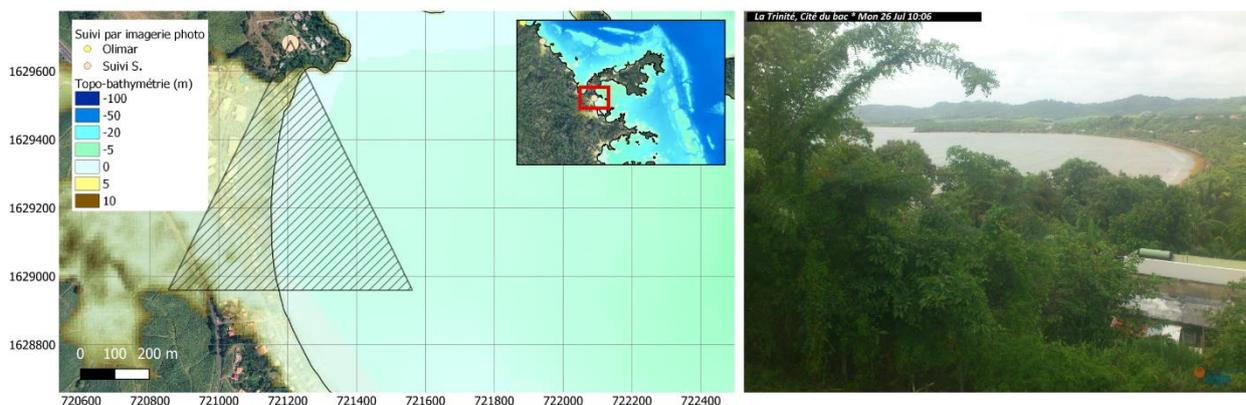


Figure 7 : localisation du dispositif et prise de vue à la Trinité sur le site de Cité de Bac.

### 2.2.4. Frégate est (le François)

Le site de suivi de 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 sur le quartier Frégate est 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.

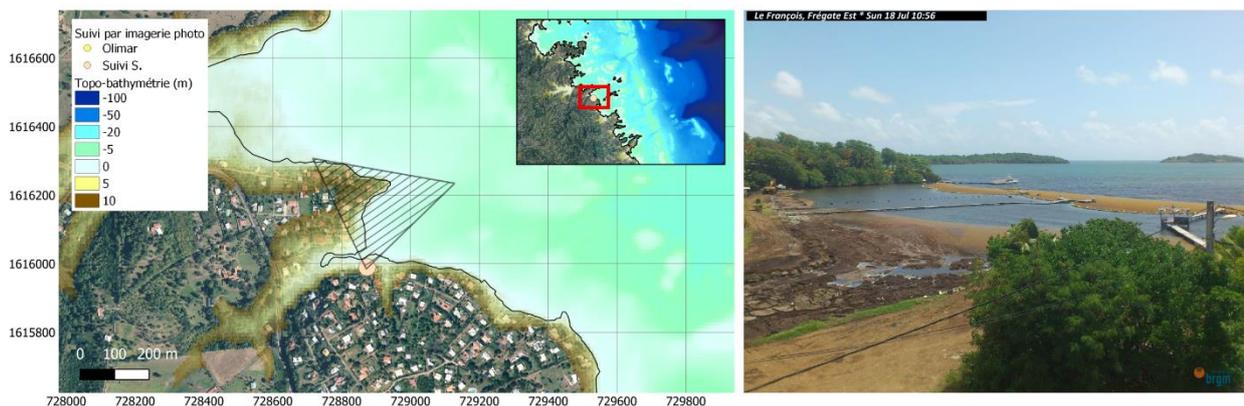


Figure 8 : localisation du dispositif et prise de vue au François sur le site de Frégate Est.

### 2.2.5. Grande anse Macabou (le Vauclin)

La plage de Grande anse Macabou est située sur la commune du Vauclin et s'étend sur environ 1.5 km de long. La cellule sédimentaire est délimitée par la pointe Marie-Catherine au Sud et par une falaise rocheuse au Nord. La plage est essentiellement composée de sables fins et reste exposée à un climat de vague assez énergétique. Des sargasses échouées sont très fréquemment présentes sur la plage.

La cellule sédimentaire 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. 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 mètre de la zone d'intérêt. À une hauteur d'environ 70 m, le dispositif permet d'obtenir une vue générale et plongeante sur le site.



Figure 9 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Grande anse Macabou au Vauclin.

### 2.2.6. Anse Cafard (le Diamant)

L'anse Cafard est située sur la commune du Diamant (Figure 10) et s'étend sur environ 200 m de long. La cellule sédimentaire est délimitée par des enrochements à l'est qui la sépare de la plage de Dizac et par un cap rocheux à l'ouest, appelé le Cap 110 situé au pied du Morne Larcher. La plage est essentiellement composée de sables fins et reste exposée à un climat de vague assez énergétique. Des sargasses échouées sont très fréquemment présentes en grande quantité sur la plage.

Cette cellule sédimentaire fait l'objet d'un suivi photographique depuis octobre 2017 où le dispositif de suivi est installé en haut d'un palmier situé sur le terrain d'un particulier au nord-est de la plage (Figure 10). La localisation de la caméra, située à environ 15 m (ngm) permet d'offrir une vue plongeante et relativement proche de la plage. De par son orientation, les images capturées par le dispositif peuvent être occasionnellement floues à cause des embruns, lorsque les vagues deviennent suffisamment énergétiques. Par ailleurs, étant situé sur un palmier, la prise de vue oscille sous l'effet du vent relié à la mobilité de l'arbre-support.



Figure 10 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de anse Cafard au Diamant.

### 2.2.7. 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 11). 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. Orientée vers le sud-est et exposée à un climat de vague relativement énergétique, la plage de Dizac est composée majoritairement de sables fins. Elle est souvent sujette aux échouages de sargasses, en particulier sur son extrémité ouest (cf. 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 11 : 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 28 derniers mois

Dans le cadre de ce projet, la maintenance du dispositif a été assurée pendant les 28 derniers mois, entre juin 2020 et octobre 2022, sur les sept sites présentés section 2.2. Au cours de cette période, le système de suivi a connu très peu de dysfonctionnement avec moins de 8 % d'échec en moyenne dans l'acquisition des images (aucune image capturée pendant toute une journée, Figure 12). Le suivi proposé est donc opérationnel avec au total, plus de 74 200 images disponibles sur un serveur, représentant un volume de 74 giga-octets.

Avec environ 10 % d'échec, le site de Frégate et du Marigot sont ceux qui ont connus le plus de difficultés sur ces 27 derniers mois (Figure 12). Pour ces deux sites, le suivi a été ponctué de quelques coupures liées à des problèmes de connexion sur le réseau mobile et quelques interruptions plus longue (une dizaine de jours sans image) qui a souvent conduit au remplacement des appareils. Sur 823 jours de suivi, chacun des dispositifs ont malgré tout pu capturer plus de 8 000 images avec une couverture journalière à plus de 90 % (moins de 80 jours sans image). Le site de Cité du Bac à la Trinité reste celui qui a connu le moins de difficulté avec seulement 2 % d'échecs sur les 28 derniers mois.

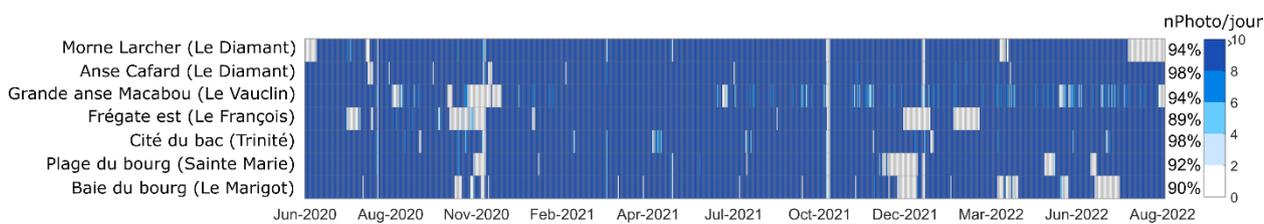


Figure 12 : performance du suivi par imagerie photo sur les sept sites équipés en nombre de photos capturées par jour et par site depuis le début de la présente convention (entre juin 2020 et octobre 2022).

### 2.3.2. Suivi et maintenance depuis 2018

Dans le cadre de la première convention relative au suivi des échouages de sargasses (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020), une première phase de maintenance avait permis d'acquérir des images sur les sites suivis depuis octobre 2018 (Figure 12). Au cours des 48 derniers mois (octobre 2018 à octobre 2022), plus de 123 000 images ont pu être capturées et sont aujourd'hui stockées sur le serveur du BRGM (soit plus de 100 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 15 % 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 17 000 images par exemple sur le site de Anse Cafard qui est resté opérationnel à raison d'une photo toutes les quinze minutes entre octobre 2019 et décembre 2020.

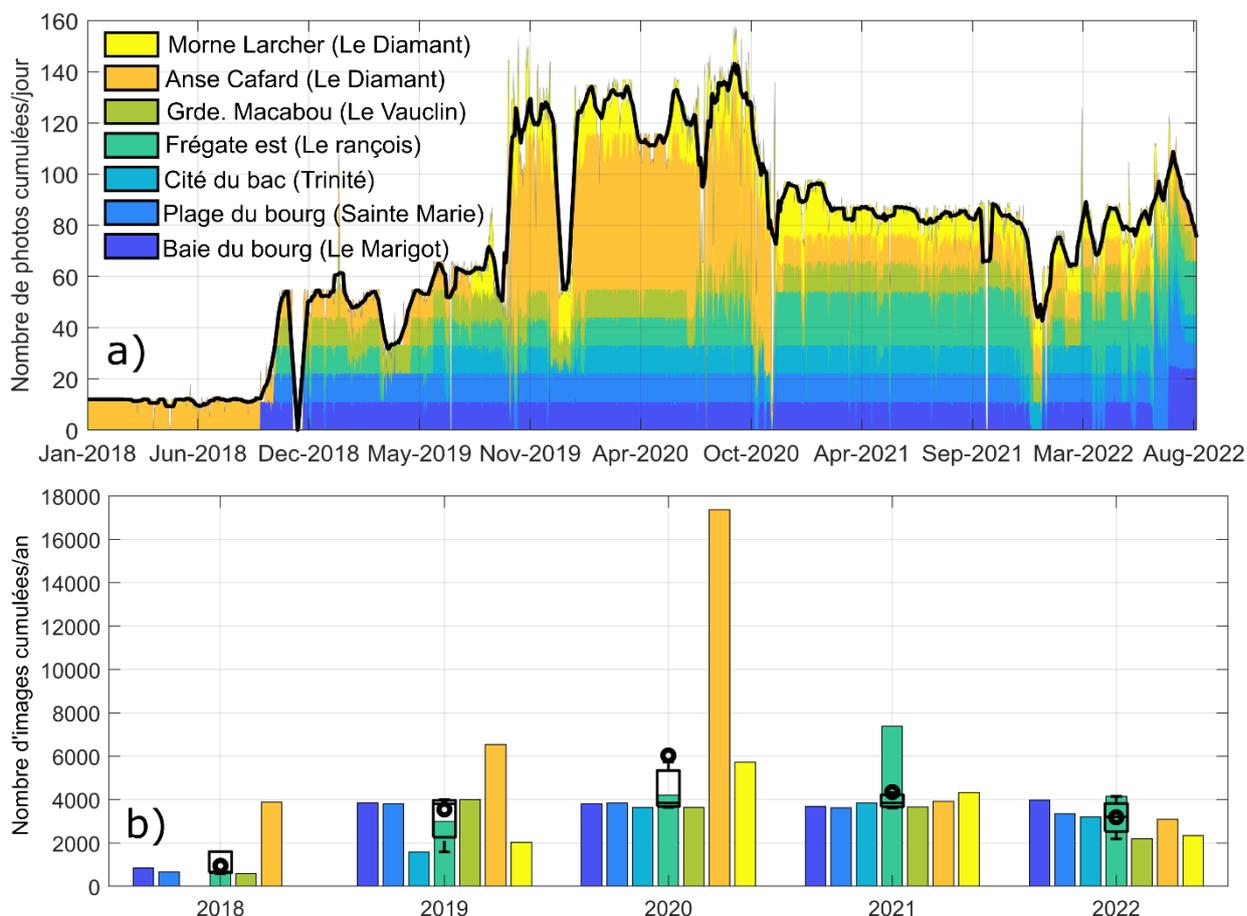


Figure 13 : performance du suivi par imagerie photo sur les sept sites équipés depuis 2018. a) Evolution temporelle du nombre d'images capturées pour chaque site (en cumul) et par jour depuis la mise en place du suivi. b) Histogramme représentant le nombre d'images capturées par année et pour chaque site, depuis 2017. Les diagrammes en boîte annuels illustrent l'ensemble de la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) calculée pour l'intégralité des images collectées, tandis que la moyenne est représentée par les ronds noirs.

### 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 (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020). Ces traitements visent au géoréférencement des images (section 3.1), à la détection des sargasses (section 3.2) et du trait de côte (section 3.3) ainsi que la mise en place d'un système d'alerte (section 3.4).

L'un des objectifs du projet consiste à appliquer les algorithmes développés dans la phase précédente sur six sites du réseau de suivi, à savoir : le bourg du Marigot (01) ; la plage au nord du bourg de Sainte-Marie (02) ; cité du bac à la Trinité (03) ; Frégate Est au François (04) ; Grande Anse Macabou (05) au Vauclin et la baie du Diamant (06). Les algorithmes n'ont pas été déployés sur anse Cafard étant donné que le site de la baie du Diamant permet déjà l'observation des arrivages sur cette cellule sédimentaire. Les images capturées directement sur site à Anse Cafard pourront néanmoins être utilisées si nécessaire pour des situations spécifiques.

#### 3.1. GEOREFERENCEMENT DES IMAGES

La quantification de données physiques requiert un géoréférencement des images vidéo. 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 réel (Figure 14). La relation entre l'image et les coordonnées 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 14).

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 environ 600 m de long et 250 m de large. La résolution d'un pixel peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres dans les zones les plus éloignées de la caméra. Plus de détails pour chacun des sites sont fournis dans la section 3.5.

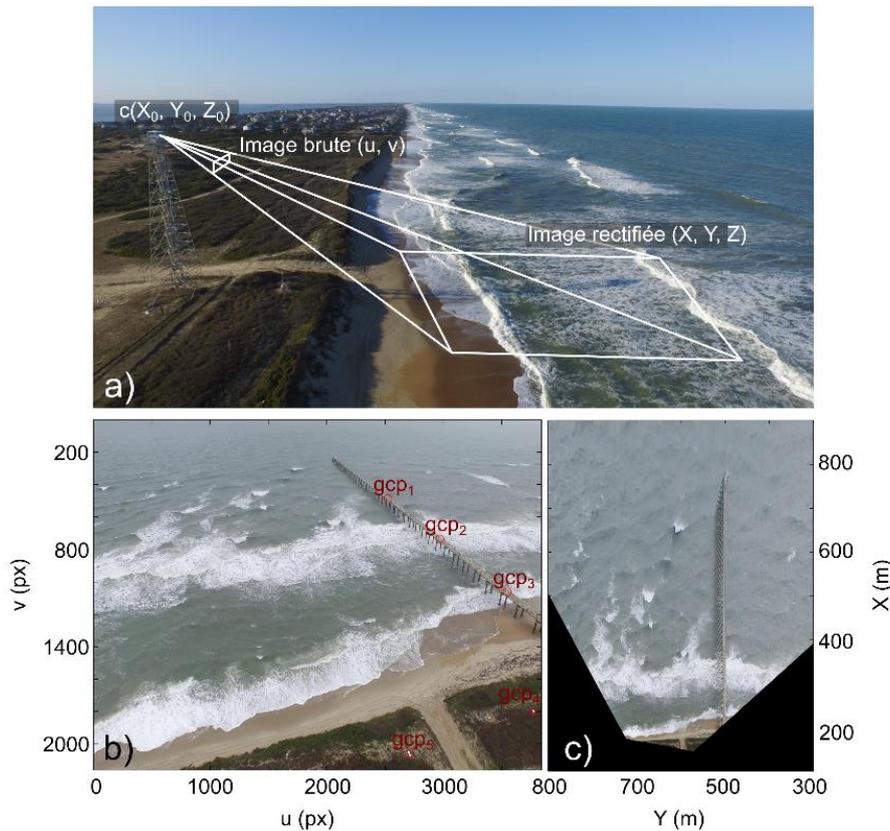


Figure 14 : photo aérienne de la plage de Duck (Caroline du Nord, États-Unis) montrant la transformation d'une image oblique (coordonnées  $u, v$ ) en image plane (coordonnées  $X, Y, Z$ ). (b, c) Rectification d'une image à partir de points gcps connus. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en juin 2017.

### 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. Etant donné la distance de plusieurs centaines de mètre qui sépare les caméras des plages de Cité du Bac à la Trinité, Grande Anse Macabou au Vauclin ou de Dizac au Diamant, la résolution des images est insuffisante pour permettre une détection automatique et haute fréquence du trait de côte. Toutefois, certaines situations particulières pourront être analysées lorsque nécessaire. En effet, 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 15, 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 15, à droite). L'espace RmB est obtenu en soustrayant les canaux rouges aux canaux bleus à partir de l'image initiale (Figure 15, 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 15, 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 16). 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.

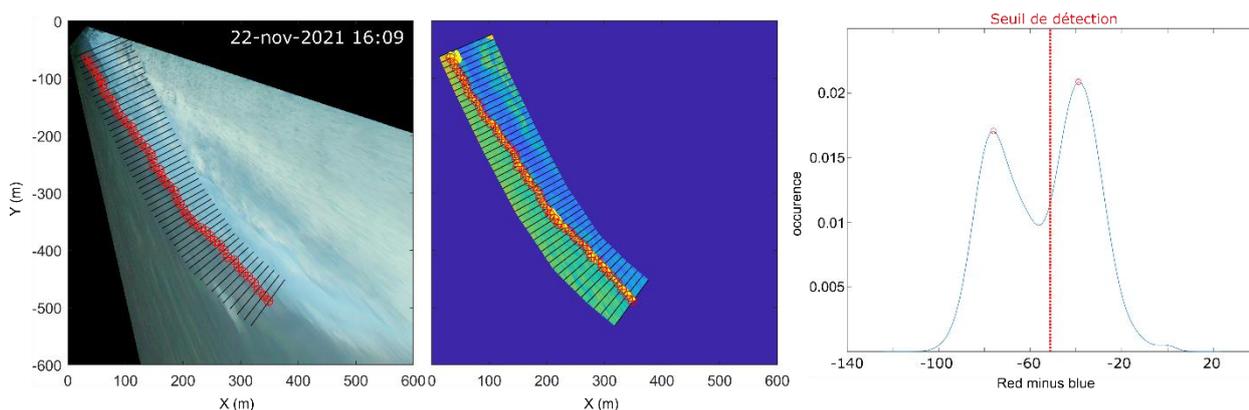


Figure 15 : les différentes étapes de la détection automatique de la position du trait de côte (points rouge) sur la plage du nord du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image rectifiée où sont superposées chacun des transects. Au centre, image rectifiée dans l'espace couleur RmB à partir de laquelle l'analyse est réalisée. A droite, distribution bimodale et seuil de détection associée.



Figure 16 : 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 (section 4.2.3) 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  $\alpha$  à 6 %, on peut estimer une erreur sur la position du trait de côte entre  $\pm 2$  m et  $\pm 5$  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  $\pm 3$  m et  $\pm 6$  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. 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 (Yu et al., 2018, Valentini & Balouin, 2020).

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 17 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 :

- 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.

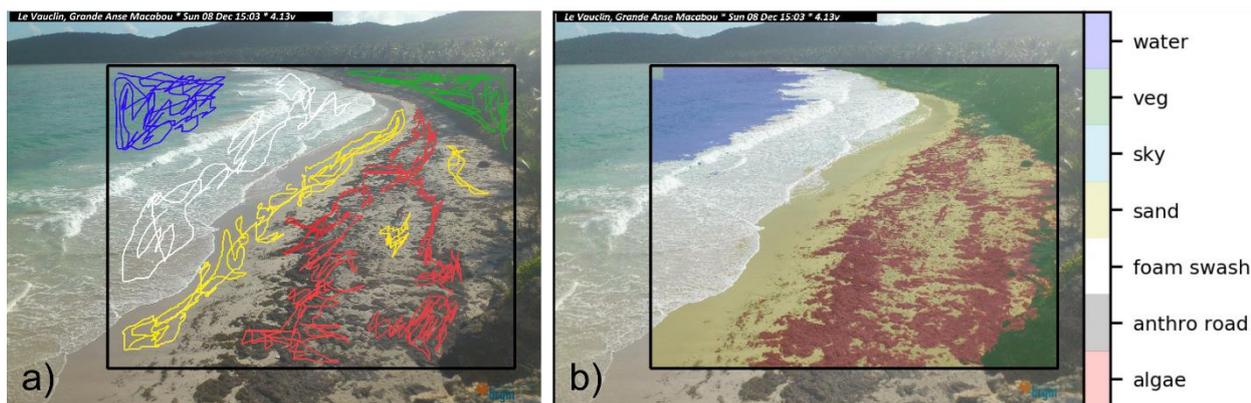


Figure 17 : a) image brute capturée à Grande Anse Macabou au Vauclin le 08 décembre 2019. Un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt. b) Classification automatique de l'image par l'algorithme.

### 3.4. CONCEPTION DU SYTEME D'ALERTE

L'algorithme de segmentation des images est appliqué quotidiennement à 10h00, 12h00 et 15h00 afin de calculer automatiquement les surfaces de sargasses échouées. Lorsque la surface de sargasses estimée par l'algorithme franchit une valeur seuil prédéterminée par l'utilisateur, l'alerte est automatiquement déclenchée et un message d'information peut être envoyé par mail. Actuellement, l'ensemble des étapes du traitement des images a été testé et mis en œuvre sur les six sites de suivi.

La mise en œuvre du système d'alerte comporte trois étapes principales qui sont : (1) la détection automatique et le calcul des surfaces de sargasses visibles selon la prise de vue de l'image ; (2) le déclenchement de l'alerte par le franchissement d'un seuil fixé et défini selon l'exposition du site concerné ; (3) la communication de l'alerte aux différents acteurs du réseau de suivi.

#### a) Détection automatique et calcul des surfaces de sargasse

Une fois les images rapatriées sur le serveur du BRGM, les données sont filtrées de façon automatique selon les conditions de visibilité où la netteté de l'image doit rester supérieure à un seuil défini. Les images flous ou trop sombres ne sont pas analysées mais redistribuées vers un dossier d'archive. Au contraire les images dont la visibilité reste suffisante sont utilisées par l'algorithme pour la détection des nappes de sargasses échouées ou en approche à la surface de l'eau. La quantité de sargasses est alors estimée en pixel ou en mètre carré lorsque le géoréférencement est possible.

#### b) Déclenchement de l'alerte

La méthode consiste à calculer la quantité de sargasses détectée au cours des dernières 24 h et à déclencher l'alerte ( $Alert_t = 1$ , Eq. 2) si cette surface est supérieure au seuil fixé ( $Seuil_{local}$ ). Un message d'alerte est envoyé dans le cas où aucune alerte n'aurait été déclenchée dans les 72 dernières heures (Eq. 2) :

$$if \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Si > Seuil_{local} \ \&\& \ H_{Alert} - H_t > 72 \quad (2)$$

$$Alert_t = 1$$

Avec  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Si$  la surface (ou le nombre de pixel) de sargasses moyenne détectées au cours de la journée (3 à 4 calculs par jour sur chaque site) et  $H_{Alert} - H_t$  la durée en nombre d'heure entre

la date de capture de l'image analysée ( $H_{Alert}$ ) et la dernière alerte émise ( $H_t$ ). Le seuil de surface ( $Seuil_{local}$ ) est défini pour chaque site suivi selon sa sensibilité aux échouages ou aux arrivages de sargasse.

Tableau 1 : seuils d'alerte ( $Seuil_{local}$ ) définis pour chacun des sites suivis.

Site suivi	Seuil d'alerte	
	En nombre de pixel (n)	En superficie (m <sup>2</sup> )
La baie du bourg du Marigot	-	1500
La plage du bourg de Sainte-Marie	-	1000
Cité du Bac (la Trinité)	500	-
Frégate Est (Le François)	-	1000
Grande anse Macabou (le Vaucelin)	500	-
Baie du Diamant	-	2000

### c) Communication aux différents acteurs du réseau de suivi

Une fois l'alerte déclenchée, le dispositif envoie un mail automatiquement aux différents acteurs intéressés avec une photographie correspondant à la prise de vue au moment du déclenchement de l'alerte et une chronique des échouages sur les 90 derniers jours. Afin de fournir une information encore plus complète aux différents destinataires, les percentiles 95 et 60 sont indiqués sur la chronique et permettent de mettre en évidence la situation actuelle par rapport aux données statistiques du site en question. Le niveau d'exposition pour la situation actuelle est illustré en bas à droite de la figure en fonction de la quantité d'algues détectées (Figure 18). Actuellement, la liste de diffusion contient une quarantaine de personnes de différents organismes.

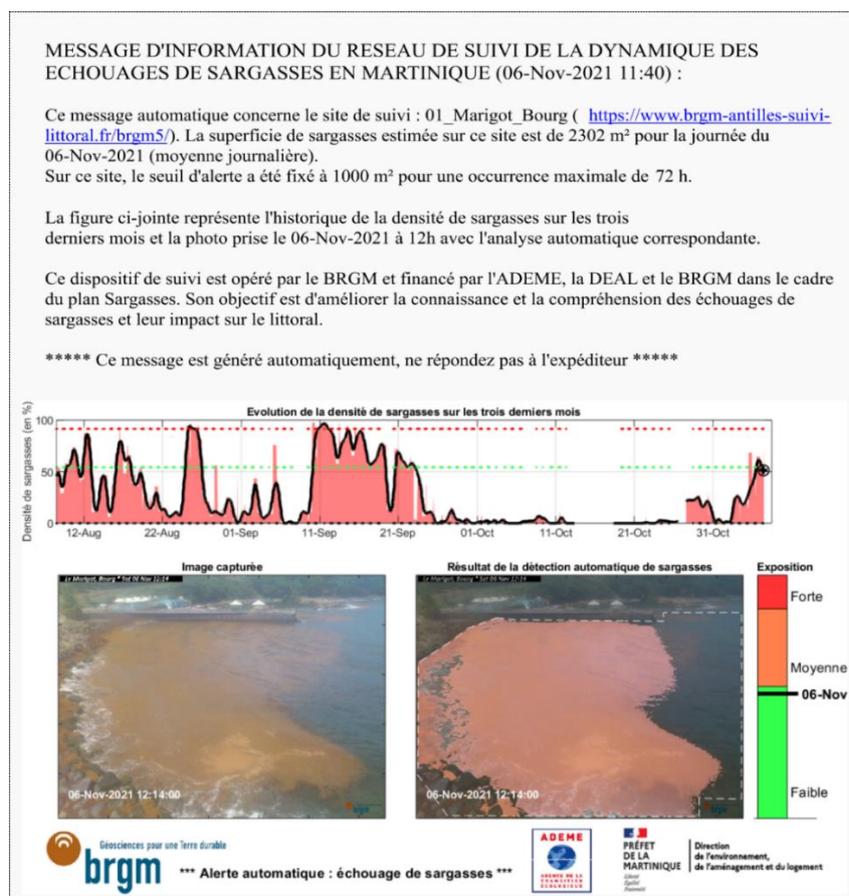


Figure 18 : exemple de mail envoyé pour une alerte déclenchée sur le site du bourg du Marigot le 6 novembre 2021. La surface de sargasses estimée par l'algorithme atteint plus de 2300 m<sup>2</sup>.

### 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 (Figure 19). La houle d'est à est-nord-est dite d'alizés (1) est très fréquente mais peu énergétique (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 (Figure 19, à droite). 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 énergétique (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.

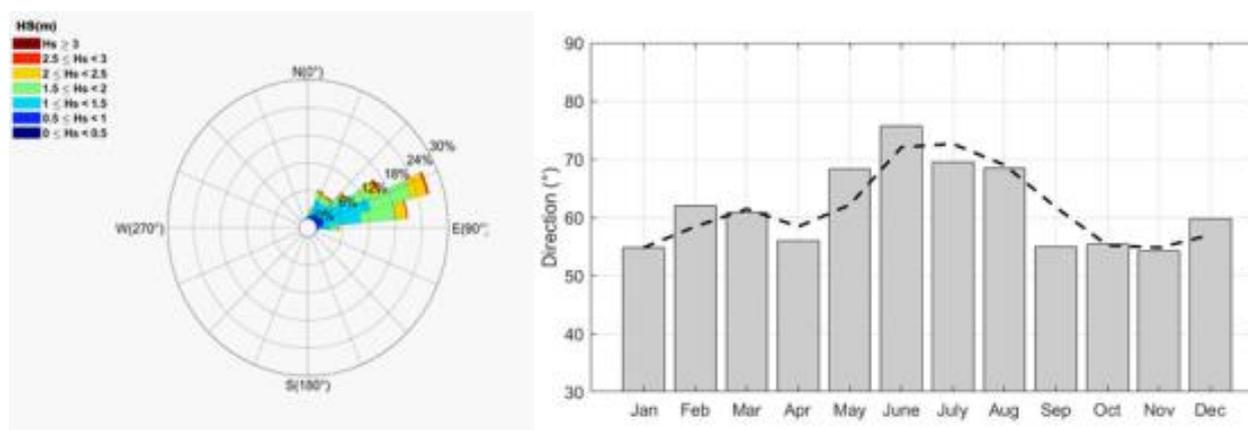


Figure 19 : (à gauche) Diagramme directionnel en fréquence des hauteurs significatives de vagues ( $H_s$ ) à la station Basse-Pointe entre janvier 2016 et mai 2022. (à droite) Moyenne mensuelle des directions ( $^\circ$ ) de vagues.

## 4. Résultats

### 4.1. LA BAIE DU BOURG DU MARIGOT

#### 4.1.1. Géoréférencement des images

Installé sur un poteau électrique en bois à une altitude d'environ 11 m (ngm), le dispositif de suivi offre une vue plongeante sur la baie. La relation entre l'image « brute » et les coordonnées réelles peut être obtenue en utilisant neuf points de références fixes (e.g. position du muret, tronc d'un palmier, abri de bus, carbeta sur la jetée, extrémité de la jetée) dont les coordonnées (longitude, latitude, altitude) sont connues. La rectification de l'image brute (pixels) en image géo-référencée (coordonnées métriques) permet d'obtenir une vision globale de bonne qualité sur la totalité de la baie, soit une grille de 250 m de long sur 100 m de large dans la direction latitudinale et longitudinale, respectivement (Figure 20). La résolution d'un pixel peut varier de quelques centimètres à plus de 2 m dans les zones les plus éloignées de la caméra (Figure 20 à droite). Dans le secteur proche du dispositif de suivi, situé en amont de la jetée, la résolution des pixels varie entre 0.1 et 0.4 m selon la distance à laquelle se situe le pixel de la lentille de l'appareil. Ainsi, la résolution de l'image géo-rectifiée reste très satisfaisante sur ce secteur (< 1 m) pour le suivi des arrivages de sargasses et devient insuffisante pour un suivi précis dans la zone du port (Figure 20).

Le dispositif étant installé sur un poteau électrique, le mouvement de la caméra et la modification de son angle de vue restent limités. Néanmoins, nous observons parfois de légères oscillations selon le vent ou la dilatation thermique du poteau en bois. Le calcul d'une nouvelle solution de géo-rectification est alors parfois nécessaire.

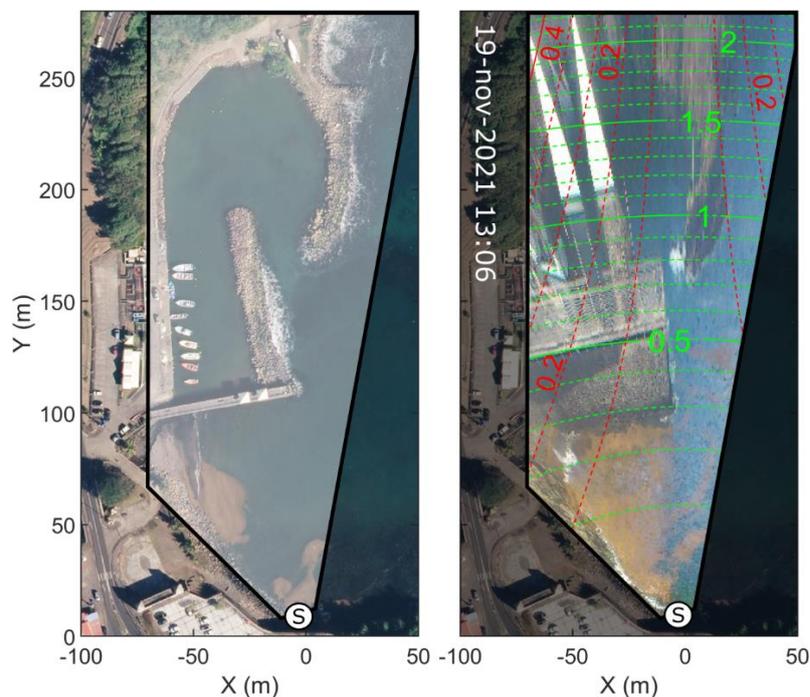


Figure 20 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la baie du bourg du Marigot. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 19 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image ; en rouge (en vert) dans l'axe longitudinal (transversal), respectivement.

#### 4.1.2. Détection des sargasses et jeu de données disponible

Le modèle de détection mis en place sur le site du bourg de Marigot s'appuie sur la classification des pixels de l'image en sept classes différentes (Figure 21). La prise de vue dispose d'une luminosité généralement suffisante et d'une bonne résolution en raison de la faible distance du dispositif de suivi par rapport à la zone visée. Le secteur ne présente donc pas de difficultés particulières pour la détection des algues sargasses à la surface de l'eau.

Nos observations (inspections visuelles sur chaque image analysée) montrent que le modèle de détection automatique parvient à distinguer, avec un fort taux de réussite (résultat satisfaisant à excellent pour ~ 90 % des images, cf. Tableau 2), le contraste de couleur entre la surface de l'eau et les algues (e.g. Figure 22). Malgré parfois quelques embruns qui affectent la qualité de l'image, les résultats restent satisfaisants et 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 7000 m<sup>2</sup> depuis l'extrémité sud de la baie jusqu'au ponton sur une largeur d'une centaine de mètre (Figure 22).

La détection des sargasses échouées sur le bord de mer est en revanche plus difficile à obtenir en raison du faible contraste entre le gris des galets (parfois couvert d'une fine couche d'algue verte) et la sargasse échouée. Néanmoins, cette superficie représente moins de 3 % de la zone couverte par la zone d'étude (illustrée par le trait en pointillés blanc sur la Figure 22). A noter que les sargasses pouvant être présentes dans le port ne sont pas prises en compte dans le calcul des surfaces. Les chroniques d'échouage alors obtenues sur ce site sont représentatives du fond de baie mais pas de la totalité du secteur.

Sur le site du Marigot, les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit 5 images par jour analysées). Ainsi, entre janvier 2020 et septembre 2022, plus de 4000 images ont été analysées (Tableau 2). Les données produites ont été contrôlées par une inspection visuelle sur chacune des images. Au cours de la période de suivi, plus de 90 % des images montrent des résultats excellents (77 %) ou satisfaisants (14 %).

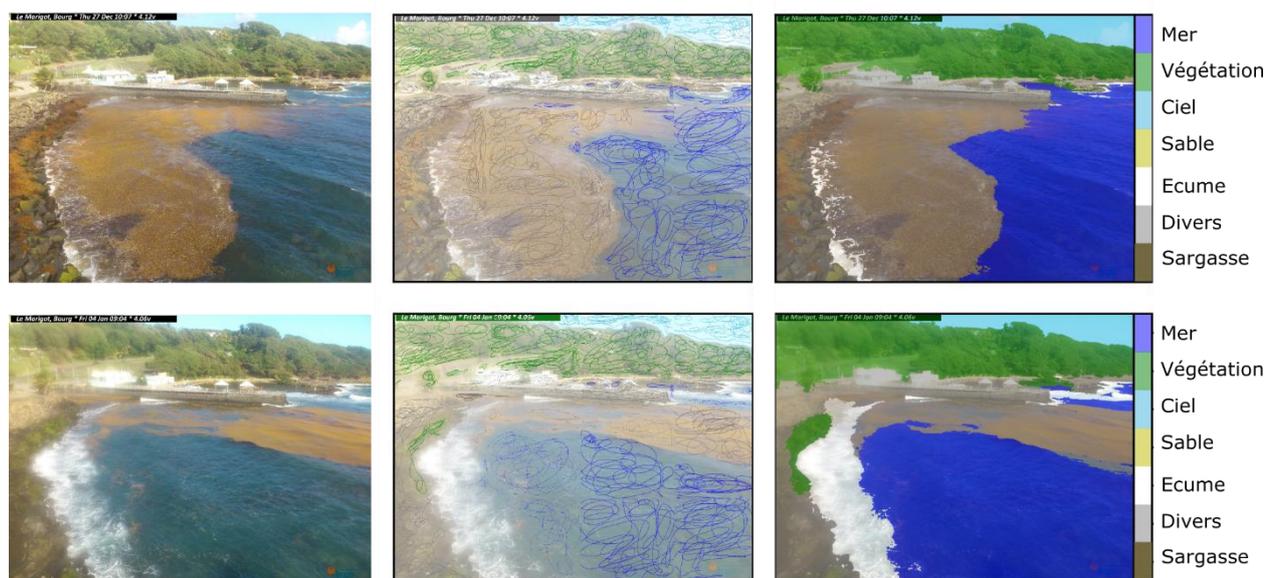


Figure 21 : création du modèle de détection sur le site du Marigot. A gauche, Images brutes capturées dans la baie du Marigot ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.



Figure 22 : détection automatique de la superficie de sargasses  $S(u,v)$  dans la baie du bourg du Marigot à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.  $(u,v)$  sont les coordonnées de l'image en pixels

Tableau 2 : précision de la détection sur les images capturées au Marigot entre janvier 2020 et septembre 2022.

Précision/Qualité	nombre d'images	%
Excellente	3123	77
Satisfaisant	564	14
Moyenne	297	7
Mauvaise	70	2
<b>Total</b>	<b>3929</b>	<b>100</b>

Sur la totalité des images analysées, environ une image sur dix n'est pas exploitable directement en tant que surface de sargasses (qualité de la détection moyenne à mauvaise, Tableau 2). Ainsi, nous encourageons les futurs utilisateurs à utiliser la donnée surfacique lorsque la qualité de la détection est jugée satisfaisante ou excellente (plus de 90 % du jeu de données). Les données à disposition comprennent la date d'acquisition, la quantité de sargasses détectées en pixel ou en mètres carrés, la proportion de sargasses sur l'image et la précision de la détection.

#### 4.1.3. Analyse des résultats

Au cours de la période de suivi, entre janvier 2020 et septembre 2022, le site du Marigot fut exposé à un grand nombre de séquences d'arrivages de sargasses (augmentation significative des surfaces présentes), estimé à plus de 18 par année. Avec une surface de sargasses détectées supérieure à 1 800 m<sup>2</sup> en moyenne au cours des trente-trois derniers mois, le site est largement exposé aux arrivages de nouvelles nappes en provenance du large. L'analyse des observations montre que le site est occupé avec une occurrence d'un jour sur deux par une surface de sargasses environ égale à 1 300 m<sup>2</sup> (percentile 50, Figure 23). Les sargasses sont visibles la plupart du temps à la surface de l'eau bien que des algues puissent également être observées à terre au cours des plus gros arrivages.

Pour de tels évènements, la surface de sargasses détectée par l'algorithme peut atteindre plus de 5 000 m<sup>2</sup> (percentile 90, Figure 23). Les nappes en provenance du large (secteur est-nord-est) se propagent vers la côte le long de l'ouvrage portuaire et s'accumulent en surface dans le fond de la baie (Figure 24, panneaux supérieurs). 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 les sorties en mer. Aussi, l'emplacement actuel du dispositif de suivi ne permet pas une estimation précise des quantités de sargasses présentes dans le port (e.g. le 24 février 2022, Figure 24). Le jeu de données disponible sur ce site est donc représentatif du fond de la baie et ne permet pas d'avoir une vision totale de la sensibilité de l'ensemble du secteur aux arrivages de sargasses (Figure 25). Ainsi, le dimensionnement de la collecte sur ce secteur peut venir s'appuyer sur les surfaces de sargasses détectées et fournies par ce jeu de données en considérant que la quantité de sargasses présente sur site est souvent sous-estimée (représentant ~ 60 % à 70 % de la surface totale présente).

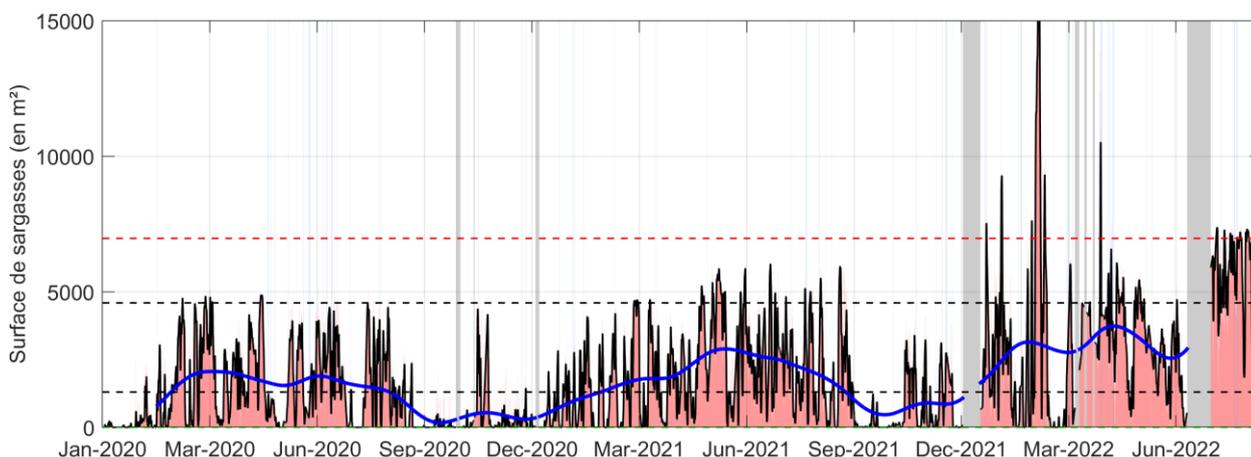


Figure 23: évolution temporelle de la quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site du Marigot entre janvier 2020 et septembre 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98.



Figure 24 : (panneaux supérieurs) séquence illustrant un arrivage massif de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur le site du bourg du Marigot. La surface de sargasses détectée dépasse 11 000 m<sup>2</sup> le 24 février 2022. (Panneaux inférieurs) séquence illustrant la coulée des sargasses et leurs évacuations progressives vers le large. La surface de sargasses estimée par l’algorithme réduit en quelques jours de plus de 4000 m<sup>2</sup>.



Figure 25 : image drone capturée suite à un arrivage massif de sargasses le 20 août 2020. La surface de sargasses détectées excède 6 000 m<sup>2</sup> avec une quantité importante présente dans le port contre 4 000 m<sup>2</sup> à partir des caméras sur la même date. Crédit photo : Bertrand Delapierre.

Suite à des arrivages importants, les algues peuvent rester plusieurs jours ou plusieurs semaines sur site selon les conditions de vagues. A plusieurs reprises, les observations réalisées montrent que les surfaces de sargasses restent présentes sur site pendant plusieurs jours jusqu'à réduire de façon brutale suite à des conditions de vagues particulièrement fortes et d'incidence est-nord-est ( $H_s > 2$  m) qui favorisent le mélange et 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 et deviennent alors moins visibles sur les images (Figure 24, panneaux inférieurs). Par la suite, elles peuvent être progressivement expulsées en dehors de la baie par les courants (Figure 24, panneaux inférieurs).

Les résultats obtenus au cours du suivi montrent une variabilité saisonnière significative (amplitude supérieure à 2 000 m<sup>2</sup>) où la période située entre janvier et août correspond à celle où les arrivages de sargasses sont les plus fréquents (courbe bleue, Figure 23). La variabilité saisonnière des quantités de sargasses présentes sur site apparaît très nettement sur toute la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90, Figure 26). Ainsi, chaque année entre janvier et août, ce fond de baie est exposé a de nouveaux arrivages avec en moyenne des quantités présentes qui varient entre 1 000 et 2 500 m<sup>2</sup> par mois. De septembre à décembre, les quantités de sargasses présentes sur site sont nettement moins élevées (facteur 2) et varient entre 50 et 600 m<sup>2</sup> par mois. De manière similaire, la variabilité saisonnière de l'occurrence des événements les plus importants apparaît nettement sur les percentiles 90 et sur les épisodes d'échouages extrêmes (percentile 98). Entre janvier et août, 100 % des événements les plus importants (où la quantité de sargasses excède 5 000 m<sup>2</sup>) sont capturés (Figure 26). Au cours de l'année 2022, une quinzaine d'alerte ont été envoyées aux différents acteurs du réseau.

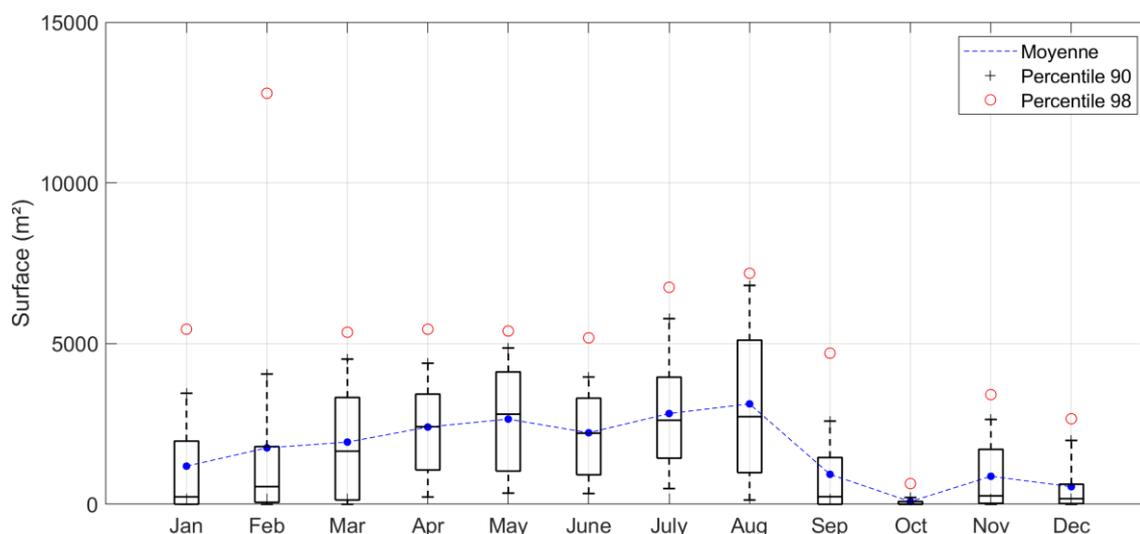


Figure 26 : diagramme en boîte mensuelle des quantités (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site du Marigot (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 33 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des événements les plus importants (percentile 98).

## 4.2. LA PLAGE DU BOURG DE SAINTE-MARIE

### 4.2.1. Géoréférencement des images

Installé sur un arbre à environ 30 m (ngm), le dispositif de suivi offre une vue plongeante et dégagée sur la plage. La relation entre l'image « brute » et les coordonnées réelles est obtenue en utilisant six points de références fixes (e.g. tronc d'un palmier, le toit de certains bâtiments, extrémité de l'îlet au large) dont les coordonnées sont connues. La rectification de l'image permet d'obtenir une grille sur 1 km de long et 650 m de large dans la direction longitudinale et latitudinale, respectivement (Figure 27). La résolution d'un pixel peut varier de quelques centimètres à plus de 10 m dans les zones les plus éloignées de la caméra (Figure 27 à droite). A proximité du dispositif de suivi, sur les 200 premiers mètres de plage, la résolution de l'image varie entre 0.1 et 2 m selon la distance à laquelle se situe le pixel de la lentille de l'appareil. Le suivi des échouages peut alors être réalisé avec une bonne précision sur une emprise de 250 m de long sur 100 m de large (Figure 27).

Le dispositif étant installé sur un arbre, l'angle de vue de la caméra peut légèrement varier en fonction du vent mais aussi de la pousse de l'arbre au fur et à mesure des mois et des années. Une correction de la solution de géo-rectification est au minimum nécessaire chaque mois afin de limiter les erreurs sur le calcul des surfaces de sargasse.

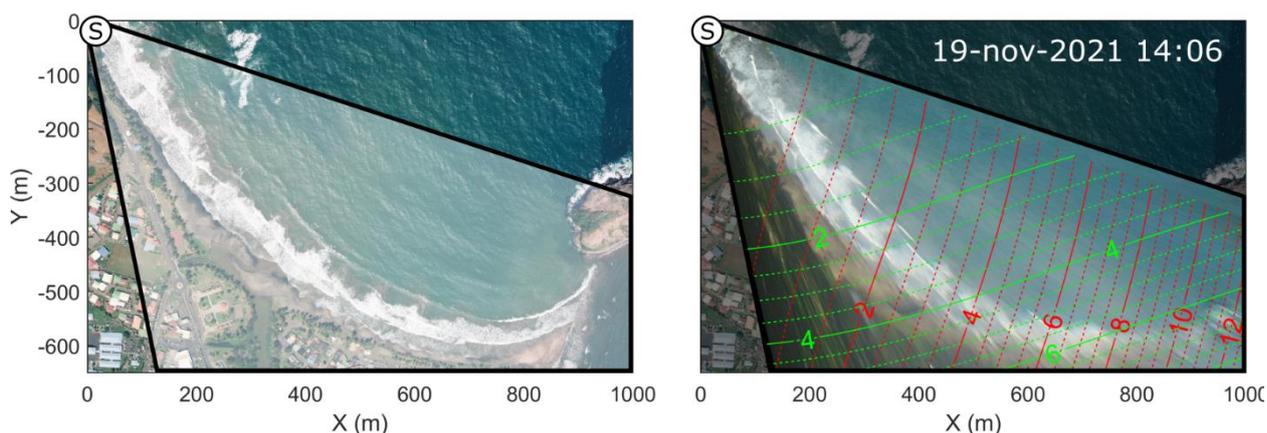


Figure 27 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la plage du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 19 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image ; en rouge (en vert) dans l'axe longitudinal (transversal), respectivement.

### 4.2.2. Détection des sargasses et jeu de données disponible

Le modèle de détection mis en place sur le site de Sainte-Marie s'appuie sur la classification des pixels de l'image en sept catégories différentes (Figure 28). 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 (section 3.1). La création d'une zone d'intérêt spécifique qui longe la limite de la végétation du haut de plage permet d'éviter la prise en compte des fausses détections qui pourraient être réalisées (lorsque la végétation d'arrière plage se confond avec la présence de sargasses). En contournant cette difficulté avec une détection réalisée uniquement sur la zone d'intérêt (Figure 29), nos observations montrent que le modèle de détection présente des résultats satisfaisants pour la majorité des images (résultat satisfaisant à très satisfaisant

pour ~ 80 % des images, Tableau 3). Le modèle de détection montre plus de difficultés lorsque la luminosité est faible en fin de journée ou lorsque le temps est pluvieux.

Il est important de préciser que la détection des algues et le calcul des surfaces échouées sont réalisés uniquement sur la partie nord de la plage de Sainte-Marie. Ainsi, les sargasses pouvant être présentes sur la seconde moitié sud de la plage ne sont pas prises en compte dans le calcul des surfaces. Les chroniques d'échouage alors obtenues sur ce site sont représentatives du secteur nord de Sainte-Marie mais pas de la totalité de la cellule sédimentaire.

A partir de mai 2022, le dispositif de suivi a été remplacé par un modèle de caméra plus performant qui dispose d'une meilleure résolution (12 Mégapixels au lieu de 8 Mégapixels). Aussi, le modèle de détection initialement déployé, adapté au dispositif de suivi de l'époque, montre une performance limitée sur les images collectées plus récemment par le nouvel appareil. Un nouveau modèle de détection doit être mis en place pour traiter les images reçues depuis mai 2022 afin d'obtenir de meilleures performances. En attendant la mise en place d'un nouveau modèle de détection, le chapitre suivant présente le jeu de données et les résultats obtenus à Sainte-Marie entre janvier 2020 et mai 2022 (29 mois).

Sur le site de Sainte-Marie, les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit 5 images par jour). Ainsi, entre janvier 2020 et mai 2022, près de 4 000 images ont été analysées (Tableau 3). Une inspection visuelle de chacune des images traitées permet de contrôler la validité de la détection et montrent des résultats satisfaisants (30 %) à excellents (50 %). Sur la totalité des images analysées, on estime à environ une détection sur cinq les résultats qui ne sont pas exploitables directement en tant que surface de sargasses (où la qualité de la détection varie de moyenne à mauvaise, Tableau 3). 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 (environ 80 % du jeu de données), représentant un total de 3 139 images. Les données à disposition comprennent la date d'acquisition, la quantité de sargasses détectées en pixel ou en mètres carrés, la proportion de sargasses sur l'image et la précision de la détection.

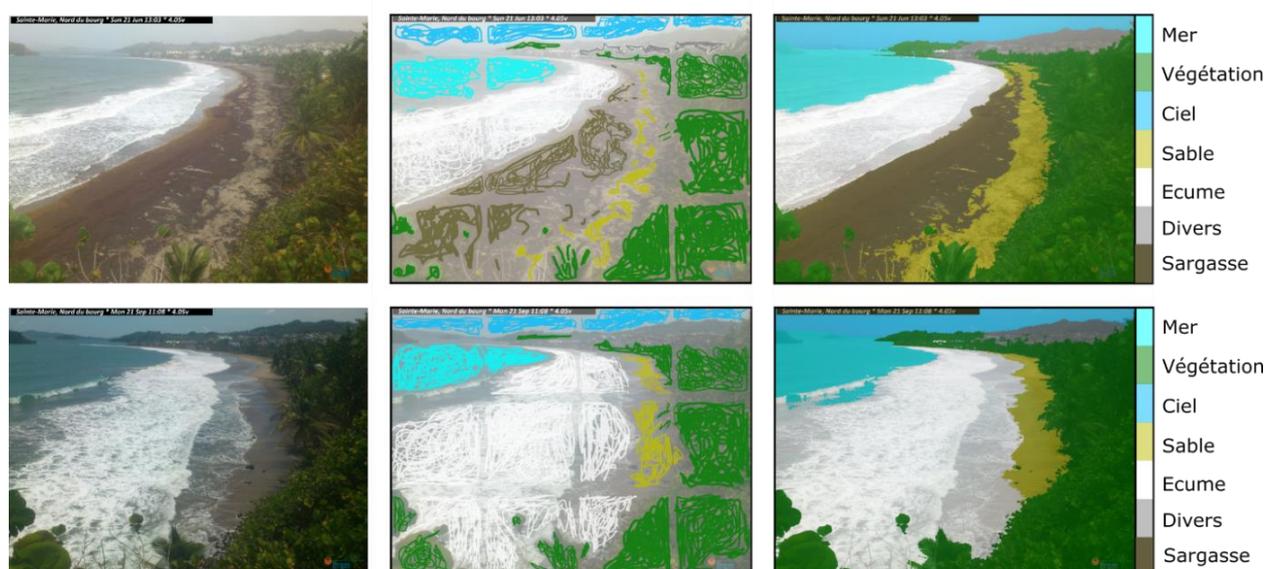


Figure 28 : création du modèle de détection sur le site de Sainte-Marie. A gauche, Images brutes capturées; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.



Figure 29 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  sur la plage du bourg de Sainte-Marie à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.

Tableau 3 : précision de la détection sur les images capturées à Sainte-Marie entre janvier 2020 et mai 2022.

Précision/Qualité	nombre d'images	%
Excellente	1966	50
Satisfaisant	1173	30
Moyenne	783	20
Mauvaise	7	0
<b>Total</b>	<b>3929</b>	<b>100</b>

### 4.2.3. Analyse des résultats

Au cours de la période de suivi, entre janvier 2020 et mai 2022, la plage de Sainte-Marie fut exposée à un grand nombre d'arrivages (estimé à plus de 30 séquences, soit une dizaine par année). Avec une surface détectée supérieure à 1 500 m<sup>2</sup> en moyenne au cours des vingt-neuf derniers mois, le site de Sainte-Marie est principalement exposé à de nouveaux arrivages entre mars et août (Figure 30) où les sargasses viennent s'échouer la plupart du temps sur les premiers mètres de la plage. Les algues, entraînées par des vents de secteur est à est-sud-est, dérivent majoritairement sur le secteur nord de la plage. Ainsi, on retrouve souvent une quantité plus importante d'algues sur cette portion de la cellule sédimentaire. Selon la direction des vents, des courants ou de la localisation des nappes de sargasses quelques centaines de mètres plus au large, les algues peuvent aussi venir s'échouer sur les autres portions de la plage. Au cours de la période de suivi, la zone d'intérêt sur laquelle sont réalisés les calculs de surface peut évoluer selon l'angle de vue de la caméra et les choix de l'utilisateur. Ainsi, suite à une légère modification de l'emprise de la zone d'intérêt, la quantité de sargasses présente sur site en 2022 paraît plus importante qu'en 2020 et 2021 (Figure 30). Ces écarts sont principalement dus à la superficie sur laquelle sont initialement réalisées les calculs de surface.

Selon les épisodes, la quantité de sargasses échouées sur la plage (seulement sur la première moitié nord) peut atteindre plus de 6 000 m<sup>2</sup>, s'étalant alors sur une distance transversale parfois supérieure à 20 m sur la partie émergée de la plage (Figure 32). Par exemple, en 2021, au début du mois juin, on observe un arrivage massif de sargasses en provenance du secteur est, localisé essentiellement sur le secteur nord de la cellule sédimentaire (Figure 32, panneaux supérieurs). En quelques heures, les algues viennent s'échouer sur la plage et la surface détectée par l'algorithme atteint plus de 5 000 m<sup>2</sup> (Figure 30 et Figure 32). Suite à cet épisode, pendant plusieurs mois, les algues ne sont pas remobilisées et la quantité de sargasses présente sur site reste supérieure à 2 500 m<sup>2</sup> en moyenne. Après plusieurs mois, au début du mois de septembre, un épisode de forte houle ( $H_s > 2$  m) entraîne la submersion temporaire d'une partie de la plage et la remobilisation des algues par la mer. Cet événement provoque une diminution significative de la largeur de plage et de la surface de sargasses échouées (Figure 32, panneaux inférieurs). Ainsi, les observations réalisées à Sainte-Marie montrent que suite à un arrivage significatif d'algues, la quantité de sargasses reste généralement importante sur une durée de plusieurs semaines à quelques mois 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.

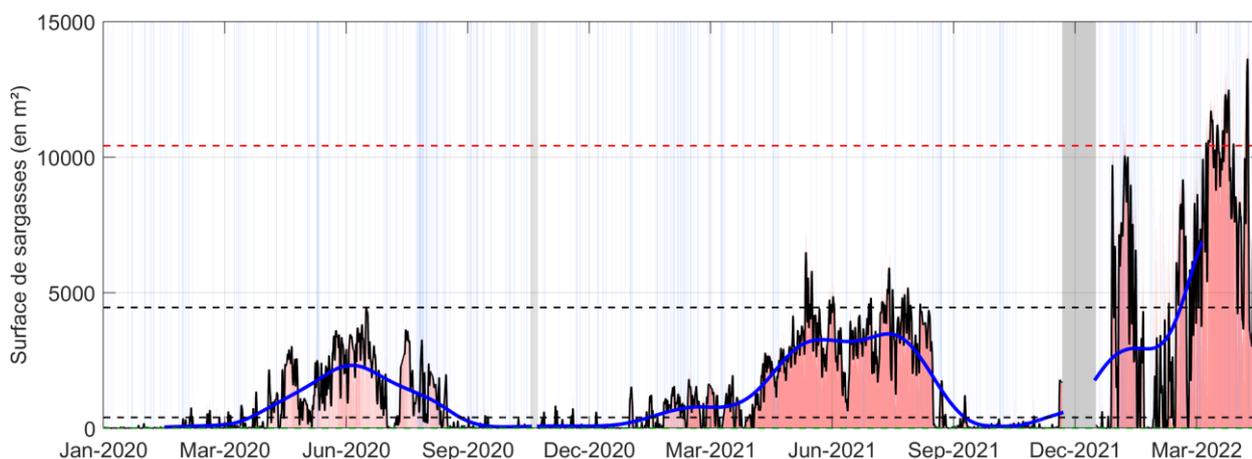


Figure 30 : évolution temporelle de la quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site de Sainte-Marie entre janvier 2020 et mai 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98.

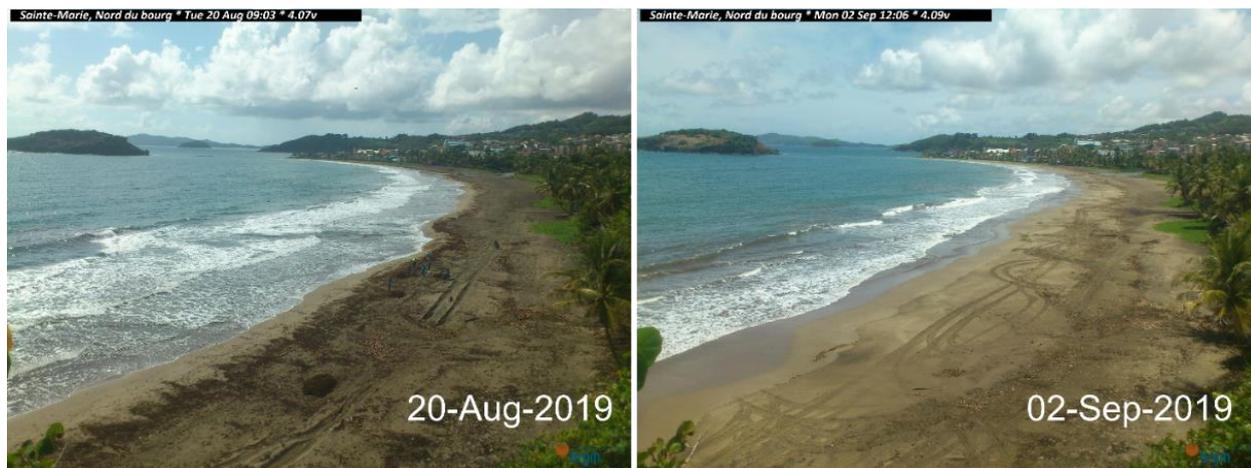


Figure 31 : ramassage des algues entre le 20 août et le 02 septembre 2019 sur la plage de Sainte-Marie.

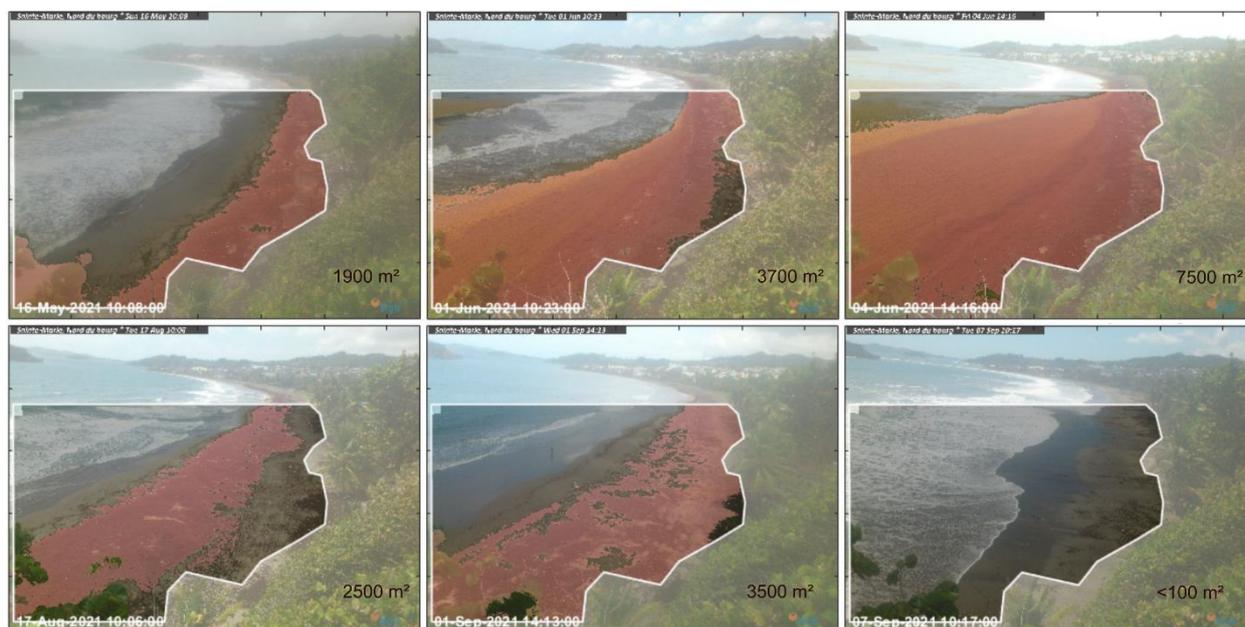


Figure 32 : (panneaux supérieurs) séquence illustrant un arrivage massif de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur la plage de Sainte-Marie. La surface de sargasses détectée dépasse 7 500 m<sup>2</sup> le 4 juin 2021. (Panneaux inférieurs) séquence illustrant le tassement et le remaniement des sargasses et leurs évacuations progressives vers le large. La surface de sargasses estimée par l’algorithme réduit en quelques semaines de plus de 3000 m<sup>2</sup>.

Lorsque les algues sont ramassées, par exemple entre le 20 août et le 02 septembre 2019 la surface de sargasses échouées sur la plage réduit sur plus de 2 000 m<sup>2</sup> (Figure 31). Selon le dispositif de ramassage, ces séquences entraînent de façon plus ou moins marqué un affaissement global du profil de plage du au prélèvement d’une quantité importante de sédiments. Certaines pratiques nécessitent alors un certain cadrage où le ramassage manuel est à privilégier. Lorsqu’elles ne sont pas ramassées, les sargasses restent généralement échouées sur la plage plusieurs semaines, jusqu’à décroître de façon progressive selon les conditions de vagues ou de marée. Les observations réalisées au cours de la période de suivi montrent que les sargasses sont souvent remobilisées par la mer au cours d’épisode de fortes vagues. Néanmoins, selon les épisodes, il est parfois encore difficile de déterminer si les sargasses échouées sont progressivement remaniées par la mer et redistribuées dans la colonne d’eau puis vers le large ou si les grains de sable se mélangent progressivement aux sargasses à terre.

Les résultats obtenus montrent une variabilité saisonnière importante ( $> 2\,000\text{ m}^2$ ) où la période située entre mars et août correspond à celle où les échouages sont les plus fréquents (courbe bleue, Figure 30). De façon peut être encore plus marquée que sur le site du Marigot, les échouages de sargasses sur la plage de Sainte-Marie présentent une grande variabilité mensuelle qui se traduit très nettement sur toute la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90, Figure 33). Ainsi, entre mars et août, la plage est exposée à de nouveaux arrivages avec une quantité de sargasses présente sur site qui peut varier entre 2 000 et 3 000  $\text{m}^2$  (moyenne mensuelle, Figure 33). De septembre à février, les quantités de sargasses présentes sur site sont nettement moins élevées (facteur 3) et varient entre 50 et 700  $\text{m}^2$  (moyenne mensuelle). Cette variabilité se traduit également sur les événements les plus importants (percentiles 90 ou percentiles 98) où la plupart des gros arrivages ont lieu entre mars et août.

Afin de mieux comprendre les interactions possibles entre la dynamique des banquettes de sargasses et de leurs impacts sur la variabilité de la position du trait de côte, l'évolution de la largeur de plage a été étudiée sur la seconde moitié nord de la cellule sédimentaire entre janvier 2020 et mai 2022. A Sainte-Marie, 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 (Figure 34). En effet, chaque année à partir du mois de septembre, la plage est exposée à un recul marqué où sa largeur diminue rapidement ( $> 20\text{ m}$  en quelques semaines). Suite à cette séquence, la plage reste très étroite avec seulement quelques mètres de large jusqu'à connaître une avancée progressive de la position du trait de côte. Ainsi, à partir du mois de février jusqu'en juillet on observe un gain de plage qui varie entre 10 et 20 m de large selon les années (Figure 34).

Cette variabilité est étroitement liée aux conditions hydrodynamiques où entre septembre et mars, les vagues proviennent majoritairement du secteur est-nord-est (Figure 19, à droite), orientant le transport sédimentaire vers le sud, entraînant un rétrécissement de la plage sur le secteur nord. Au contraire, entre mai et août, les vagues proviennent généralement de l'est avec parfois une composante est-sud-est orientant le transport sédimentaire vers le nord et entraînant un élargissement de plus de 15 m sur le même secteur.

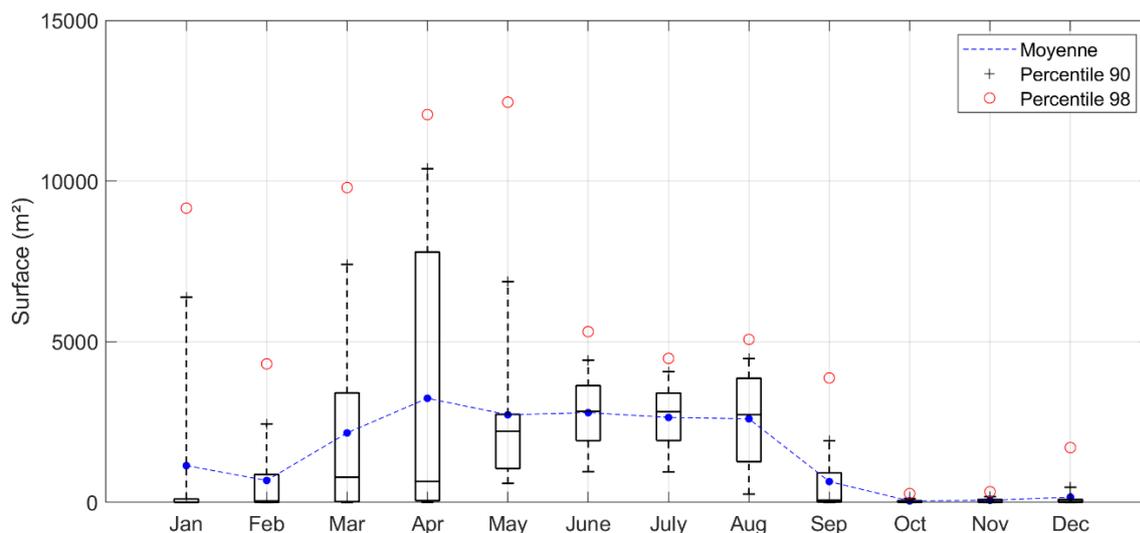


Figure 33 : diagramme en boîte mensuelle des quantités ( $\text{m}^2$ ) de sargasses détectés sur le site de Sainte-Marie (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 29 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des événements les plus importants (percentile 98).

Ces observations nous permettent de montrer que la dynamique sédimentaire est avant tout contrôlée par les vagues sur la plage de Sainte-Marie. Par exemple, malgré la présence d'une quantité importante de sargasses échouées sur la plage à la fin du mois d'août (Figure 30 et Figure 33) la plage montre systématiquement une réduction significative de sa largeur au début du mois de septembre avec les premiers épisodes de houle de nord qui entraînent non seulement une érosion significative mais également le remaniement des algues par la mer vers le large. La Figure 35 présente l'évolution temporelle de la position du trait de côte et de la banquette de sargasses le long d'un profil (trait blanc en pointillé) extrait à partir des images d'archives suite au passage de l'ouragan Fiona. Les observations montrent un recul significatif de la position du trait de côte (~ 15 m) malgré la présence d'algues sur plusieurs mètres de large.

Ces résultats 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 (Figure 35).

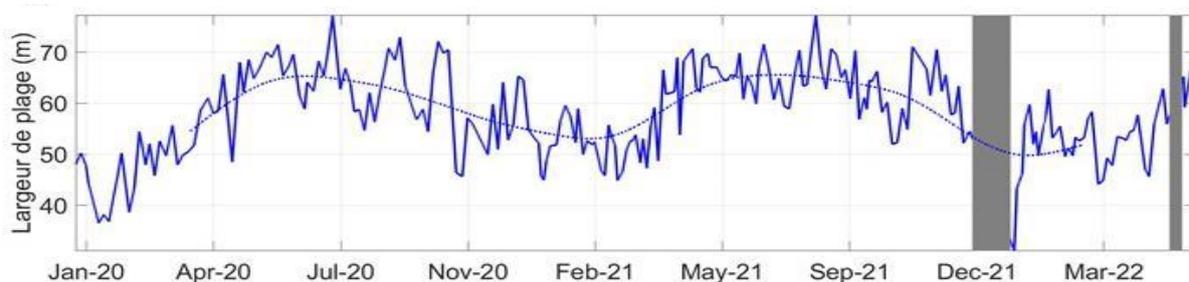


Figure 34 : évolution moyenne de la plage à Sainte-Marie (secteur Nord) entre janvier 2020 et mai 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours).

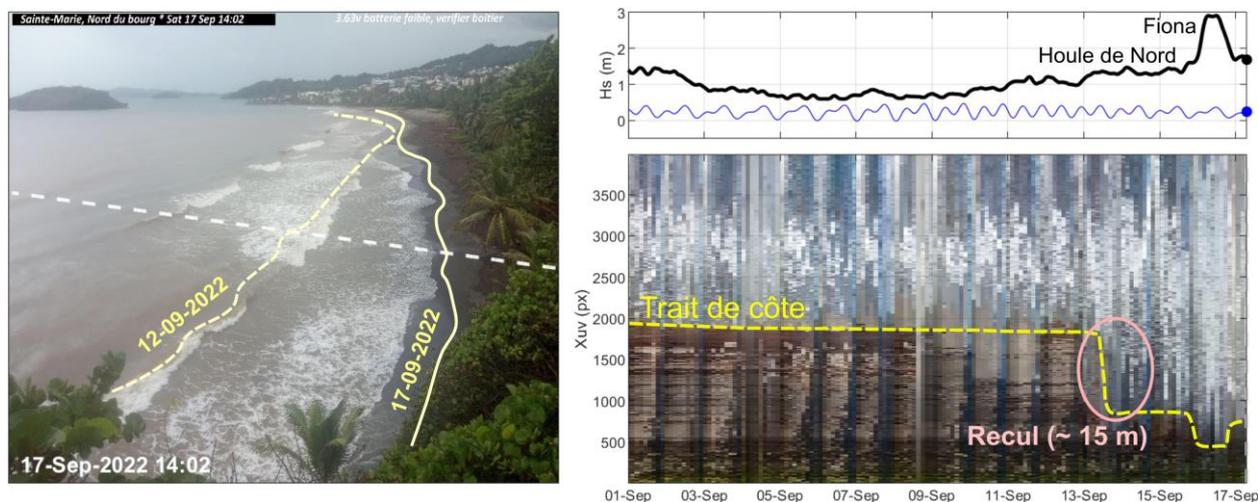


Figure 35 : représentation visuelle (timestack) de l'évolution de la position du trait de côte et de la banquette de sargasses le long d'un profil (trait blanc en pointillé) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire suite au passage de l'ouragan Fiona. Les courbes noires et bleues situées sur le panneau en haut à droite présentent respectivement l'évolution de la hauteur significative des vagues (houlographe à Basse-Pointe) et des niveaux d'eau (marégraphe au Robert) au cours de l'évènement.

### 4.3. CITE DU BAC (LA TRINITE)

#### 4.3.1. Géoréférencement des images

Sur ce site les points fixes disponibles qui pourraient permettre la géo-rectification de l'image sont limités. La mise en place de plusieurs cibles temporaires serait à envisager si un géoréférencement de l'image devient nécessaire.

#### 4.3.2. Détection des sargasses

Le modèle de détection mis en place sur le site de Cité du Bac à la Trinité s'appuie sur la classification des pixels de l'image en sept classes différentes (Figure 36). Le sable de couleur sombre et l'ombre des arbres présent sur l'arrière plage rendent particulièrement difficile la détection des sargasses échouées. De plus, le dispositif de suivi est situé à une distance qui varie entre 200 m et 400 m de la zone d'étude selon le secteur de plage concernée. Dans la zone de suivi, les pixels de l'image ont alors une résolution relativement grossière rendant la banquette de sargasses difficile à détecter automatiquement. A partir des images analysées au cours de cette première phase de suivi (inspection visuelle sur 100 images choisies de façon aléatoire), le modèle de détection présente des résultats satisfaisants pour environ 40 % des images où, les sargasses échouées sur la plage, en prenant la forme d'une banquette brunâtre, sont rarement détectées par le modèle (e.g. le 7 juillet 2021, Figure 37). Cependant, lorsque la quantité de sargasses arrivant à la côte est importante, le modèle parvient à détecter les algues avec une relative précision (e.g. le 5 et le 16 juillet 2021, Figure 37). Le modèle de détection mis en place sur la plage de Cité du Bac à la Trinité semble capable de relever la présence des sargasses à proximité de la côte, à condition que l'échouage en question présente une superficie suffisamment grande.

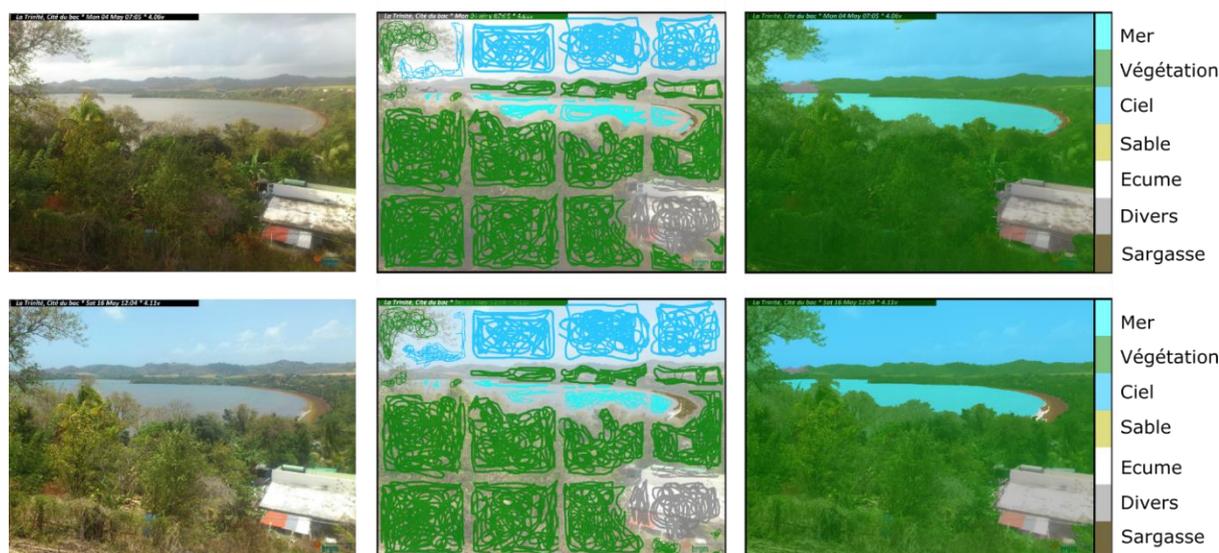


Figure 36 : création du modèle de détection sur le site de la Trinité. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Cité du Bac ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.



Figure 37 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  sur la plage de Cité du bac (La Trinité) à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.

Si la qualité de la détection ne permet pas d'obtenir directement 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 une information quantitative et un suivi du phénomène. Ce type de représentation a donc été choisie entre janvier 2020 et octobre 2022 où un algorithme permet la détection de l'extension de la nappe de sargasses lorsque celle-ci arrive à la côte (Figure 38).

#### 4.3.3. Analyse des résultats

La dynamique des échouages de sargasses sur le site de Cité du Bac à la Trinité présente une variabilité relativement faible au cours de la période de suivi (Figure 38). Nos observations mettent en évidence la présence d'une banquette de plusieurs mètres de large entre les mois de mars et septembre. La Figure 39 illustre une séquence d'images capturées par le dispositif de suivi le 15 mai 2022. Au cours de cet épisode, une nappe de surface relativement importante ( $> 10\,000\text{ m}^2$ ) dérive en provenance du secteur est vers la portion centrale du fond de baie. Une fois située à une distance suffisamment proche de la côte, les algues parviennent à s'échouer sur la plage ou poursuivent leur dérive vers le sud en suivant le sens de la dérive littorale (Figure 39).

Une fois échouée sur la plage, nos observations montrent que les algues peuvent être par la suite naturellement déplacées vers d'autres portions de la cellule sédimentaire en fonction des conditions de vagues. Les sargasses seraient alors mélangées à la colonne d'eau et rendues invisibles sur les images ou bien expulsées en dehors de la baie par des courants d'arrachements dirigés vers le large.

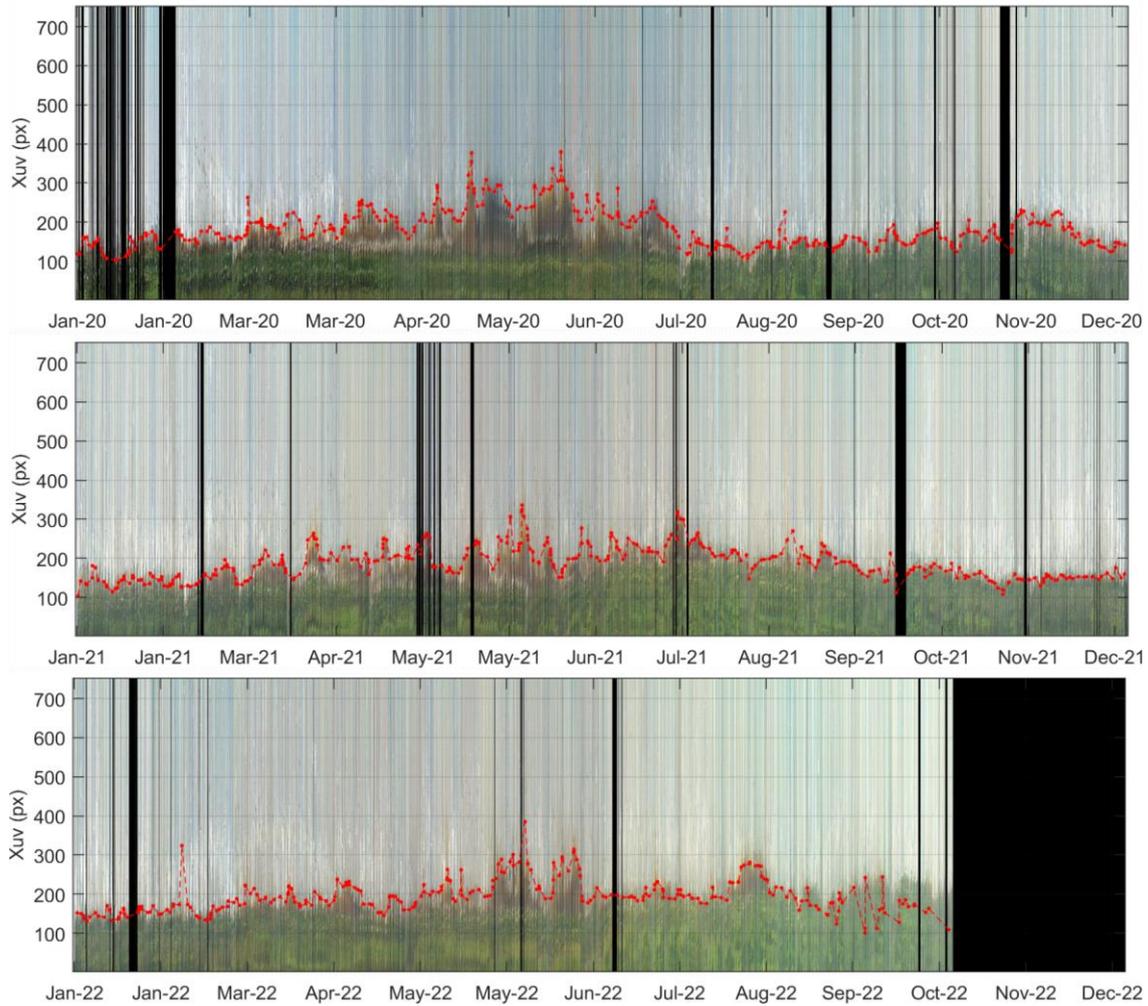


Figure 38 : représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses le long d'un profil transversal sur Cité du Bac (trait bleu, Figure 39) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire en 2020 (en haut), 2021 (au centre) et 2022 (en bas).



Figure 39 : séquence illustrant un arrivage de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur la plage de Cité du Bac le 15 mai 2022. Le trait bleu représente la ligne de pixel utilisé pour l'obtention du timestack (Figure 38).

## 4.4. FREGATE EST (LE FRANÇOIS)

### 4.4.1. Géoréférencement des images

Installé chez un particulier à environ 12 m (ngm), le dispositif de suivi offre une vue sur le fond de baie et plus particulièrement sur le barrage flottant mis en place. La relation entre l'image « brute » et les coordonnées réelles est obtenue en utilisant huit points de références fixes (e.g. extrémité des pontons, le bas de mur du bâtiment, cap rocheux) dont les coordonnées sont connues. La rectification de l'image permet d'obtenir une grille de 250 m de long sur 200 m de large dans la direction latitudinale et longitudinale, respectivement (Figure 40). La résolution d'un pixel peut varier de quelques centimètres à plus de 1 m dans les zones les plus éloignées de la caméra (Figure 40 à droite). Dans le secteur proche du dispositif de suivi, situé sur les 200 premiers mètres de la baie, la résolution des pixels varie entre 0.1 et 1 m selon la distance à laquelle se situe le pixel de la lentille de l'appareil. Ainsi, la résolution de l'image géo-rectifiée reste satisfaisante (< 1 m) pour le suivi des échouages sur ce secteur. Le dispositif étant installé sur une structure immobile, l'angle de vue de la caméra reste fixe. Le calcul d'une nouvelle solution de géo-rectification est rarement nécessaire.

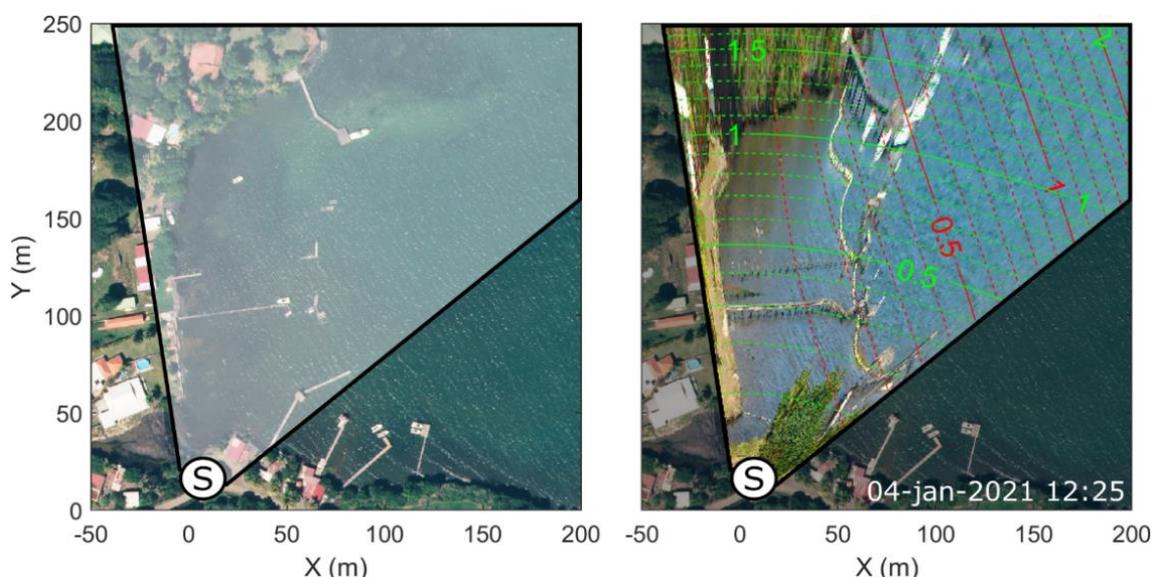


Figure 40 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur le site de Frégate Est au François. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visé de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 4 janvier 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image ; en rouge (en vert) dans l'axe longitudinal (transversal), respectivement.

### 4.4.2. Détection des sargasses et jeu de données disponible

Le modèle de détection mis en place sur le site de Frégate Est au François s'appuie sur la classification des pixels de l'image en six classes différentes (Figure 41). 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 sur un secteur situé à quelques dizaines de mètres au large, au niveau du barrage, est réalisée avec une bonne précision (Figure 42). La prise de vue dispose d'une bonne luminosité et d'une résolution adaptée à l'exercice en lien avec la distance relativement faible du dispositif de suivi par rapport au secteur étudié. A noter que le calcul des surfaces n'est pas réalisé au niveau de l'extrémité sud du barrage et les quantités de sargasses peuvent alors être légèrement sous-estimées (< 20 %).

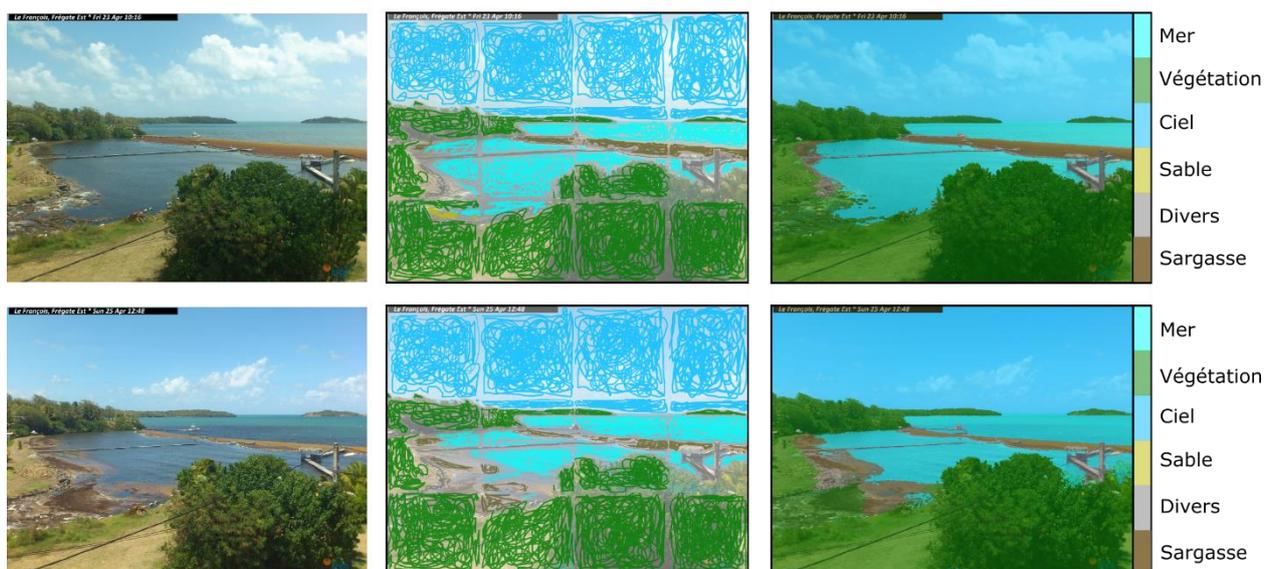


Figure 41 : création du modèle de détection sur le site du François. A gauche, Images brutes capturées sur le barrage à Frégate Est ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.

Sur le site de Frégate, les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit cinq images par jour). Ainsi, entre janvier 2020 et septembre 2022, plus de 4 200 images ont été traitées (Tableau 4). Après une inspection visuelle, 87 % des détections réalisées montrent des résultats satisfaisants (16 %) à excellents (71 %). Sur la totalité des images analysées, on estime à environ une détection sur dix les résultats qui ne sont pas exploitables directement en tant que surface de sargasses (où la qualité de la détection varie de moyenne à mauvaise, Tableau 4). Aussi, nous encourageons les futurs utilisateurs à utiliser les résultats où la qualité de détection a été jugée satisfaisante ou excellente, représentant un total de 3 683 images (~ 90 % du jeu de données). Les données à disposition comprennent la date d'acquisition, la quantité de sargasses détectées en pixel ou en mètres carrés, la proportion de sargasses sur l'image et la précision de la détection.

#### 4.4.3. Analyse des résultats

Au cours de la période de suivi, entre janvier 2020 et septembre 2022, le site de Frégate fut exposé à un grand nombre d'arrivages de sargasses (estimé à plus de 35 événements en 33 mois). Avec une surface occupée environ égale à 1 000 m<sup>2</sup> en moyenne, le site est très exposé aux nouveaux arrivages. En provenance du secteur est, les sargasses dérivent en surface et viennent buter contre le barrage en place. L'analyse des observations montre que le barrage est occupé à raison d'un jour sur deux par une surface de plus de 350 m<sup>2</sup> d'algues (percentile 50, Figure 43). 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 m<sup>2</sup>.



Figure 42 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  sur le barrage de Frégate Est au François à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.

Tableau 4 : précision de la détection sur les images capturées à Frégate entre janvier 2020 et septembre 2022.

Précision/Qualité	N	%
Excellente	2999	71
Satisfaisant	684	16
Moyenne	476	11
Mauvaise	70	2
<b>Total</b>	<b>4229</b>	<b>100</b>

Les plus gros arrivages enregistrés sont ceux du 15 mai et du 30 juin 2020 où la surface de sargasses atteint plus de 13 000 m<sup>2</sup> (Figure 43). La Figure 44 illustre la séquence du 15 mai avec une représentation visuelle (*timestack*) le long du profil transversal (trait pointillé blanc) extrait à partir des images d'archives. Alors que la quantité d'algues présente contre le barrage situé à quelques dizaines de mètres de la côte est restée relativement modérée jusqu'au 13 mai (Figure 44a), une nappe de sargasses conséquente dérive vers l'ouvrage pendant la journée du 15 mai (Figure 44b). Au cours de cette période, la surface de sargasses détectée par l'algorithme augmente brutalement de 3 000 m<sup>2</sup> à 13 000 m<sup>2</sup>. A noter que l'orientation de la caméra ne permet pas de voir jusqu'où s'étend cette nappe (Figure 44b) et la quantité d'algues alors estimée est probablement sous-estimée (< 20 %). 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 (processus de coulée) 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 à proximité de la côte et parviennent à atteindre le secteur sud du fond de baie (Figure 44c).

Ce type de dynamique a été observé à nombreuses reprises pendant la période de suivi où les plus gros arrivages de sargasses 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.

Les résultats obtenus montrent une variabilité saisonnière importante (> 2 000 m<sup>2</sup>) où la période située entre février et août correspond à celle où les échouages sont les plus fréquents (courbe bleue, Figure 43). Comme sur les autres sites étudiés, les arrivages de sargasses sur le site de Frégate présentent une grande variabilité mensuelle qui se traduit très nettement sur toute la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90, Figure 45). Ainsi, entre février et août, le site s'expose à de nouveaux arrivages avec en moyenne une quantité de sargasses qui varie entre 1 000 et 3 000 m<sup>2</sup> par mois où les algues sont localisées à proximité du barrage. De septembre à janvier, les quantités de sargasses présentes sur site sont nettement moins élevées (facteur 3). Cette variabilité se traduit également sur les événements les plus importants (percentiles 90 ou percentiles 98) où la plupart des arrivages importants (> 5 000 m<sup>2</sup>) ont lieu entre mars et août.

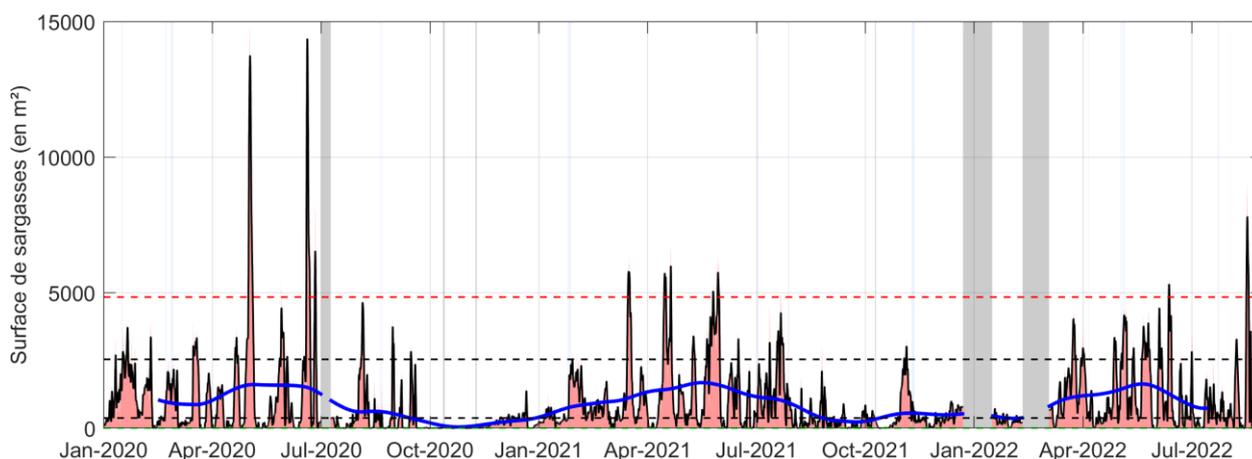


Figure 43 : évolution temporelle de la quantité (m<sup>2</sup>) de sargasses détectées sur le site de Frégate entre janvier 2020 et septembre 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98.

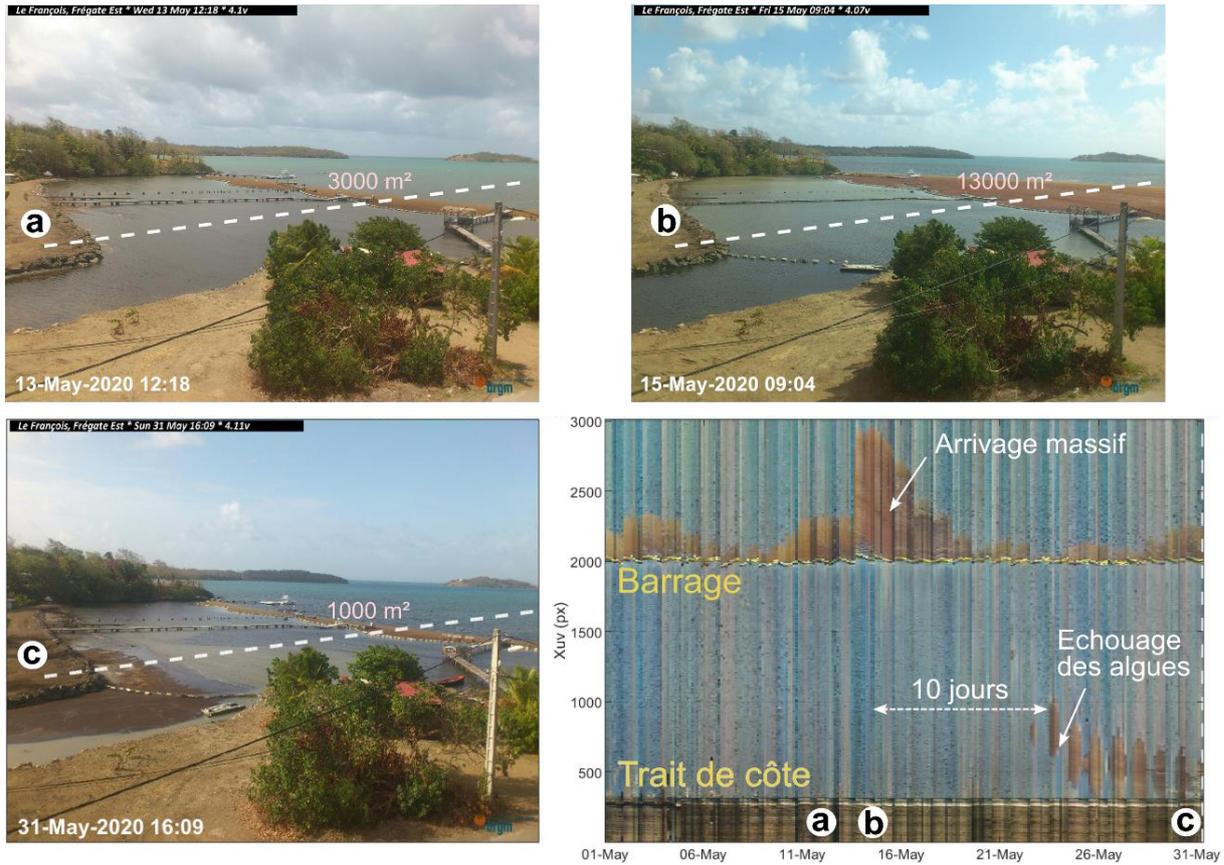


Figure 44 : représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses sur le long du profil transversal (trait pointillé blanc) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.

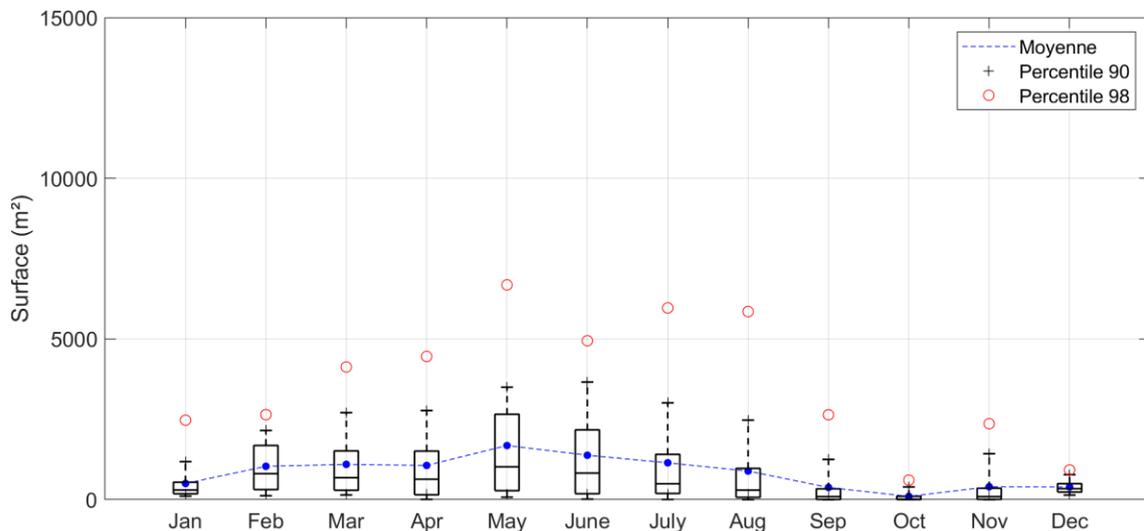


Figure 45 : diagramme en boîte mensuelle des quantité (m²) de sargasses détectés sur le site de Frégate (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 33 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des évènements les plus importantes (percentile 98).

## 4.5. GRANDE ANSE MACABOU (LE VAUCLIN)

### 4.5.1. Géoréférencement des images

De la même façon que décrit précédemment sur le site de Cité du Bac à la Trinité, aucun point fixe (e.g. bâtiment, jetée, route, arbre) qui pourrait permettre la géo-rectification de l'image n'est présent. La mise en place de plusieurs cibles temporaires pourrait permettre le référencement de l'image et serait à envisager si nécessaire.

### 4.5.2. Détection des sargasses

Le modèle de détection mis en place sur la plage de Grande anse Macabou au Vauclin s'appuie sur la classification des pixels de l'image en six classes différentes (Figure 46). La banquette de sargasses fréquemment présente à proximité du jet de rive reste difficile à détecter automatiquement à cause de la résolution des pixels de l'image (e.g. le 14 mai 2021, Figure 47).

A partir des images analysées au cours de cette première phase de suivi, le modèle de détection présente des résultats satisfaisants pour seulement 30 % des images (d'après une inspection visuelle sur 100 images choisies de façon aléatoire). Les sargasses échouées sur la plage ne sont jamais détectées par le modèle et les sargasses plus facilement visibles en mer ne sont parfois pas relevées en fonction de la luminosité (e.g. le 16 mai 2021, Figure 47). La création d'un nouveau modèle de détection réalisé à partir d'une plus grande collection d'image pourrait permettre d'améliorer les résultats sur ce site.

Si la qualité de la détection ne permet pas d'obtenir avec une précision suffisante la surface de sargasses présente, une représentation visuelle de type *timestack* le long d'un profil transversal (trait bleu, Figure 48) extrait à partir des images d'archives permet d'obtenir une information quantitative et un suivi du phénomène. Ce type de représentation a donc été choisie entre janvier 2021 et septembre 2022 sur le site de Macabou.

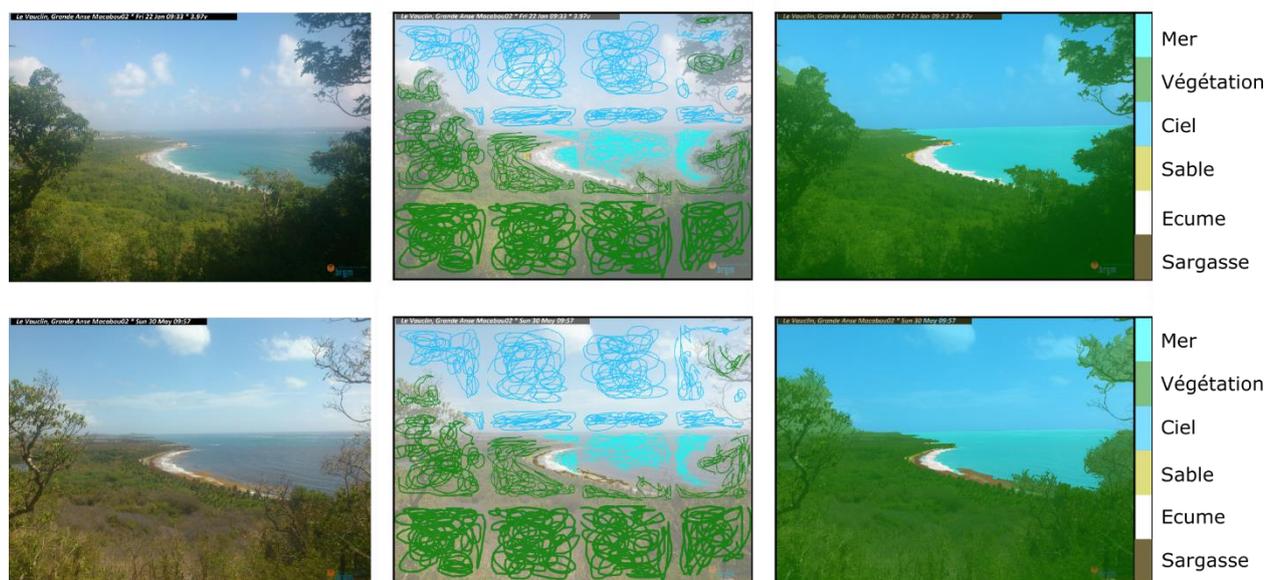


Figure 46 : création du modèle de détection sur le site du Vauclin. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Grande anse Macabou ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.

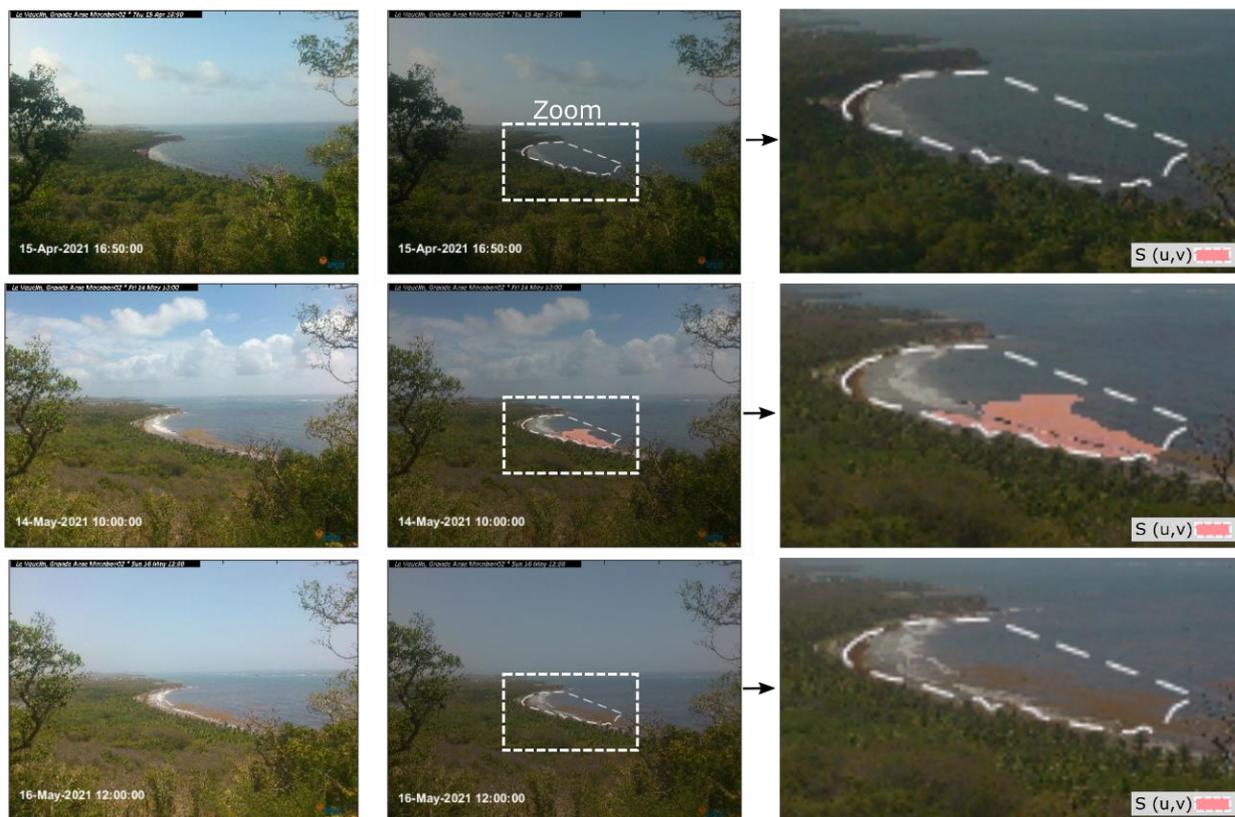


Figure 47 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  à proximité de la plage de Grande anse Macabou à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.

#### 4.5.3. Analyse des résultats

La dynamique des échouages ou arrivages de sargasses sur le site de Grand Macabou présente une variabilité nettement moins marquée (Figure 48) que sur le site de Frégate est. Pendant la période de suivi, on observe de façon quasi-continue une banquette de plusieurs mètres de large signifiant la présence d'algues échouées sur la plage. La Figure 48 montre toutefois que la surface de sargasses présente à proximité de la côte est plus importante entre mars et septembre, correspondant à plusieurs épisodes d'arrivages. La Figure 49 présente une séquence d'images capturées par le dispositif de suivi sur la plage de Grand Macabou le 19 mai 2022. Au cours de cet épisode, une nappe de sargasses dont la surface est relativement importante ( $> 20\,000\text{ m}^2$ ) dérive en provenance du secteur est vers l'extrémité nord de l'anse (Figure 49, à gauche). Une fois située à une distance suffisamment proche de la côte, les algues dérivent vers le sud en suivant le sens de la dérive littorale ou parviennent à s'échouer sur la plage (Figure 49, au centre et à droite).

Une fois échouées, nos observations montrent que les algues peuvent être par la suite naturellement déplacées vers d'autres portions de la cellule sédimentaire. Ce phénomène est fortement relié aux conditions de vagues où au cours d'un épisode de fortes houles ( $H_s > 2\text{ m}$ ), le jet de rive peut parfois atteindre la limite de végétation (haut de plage) et entraîne le remaniement des algues échouées sur la plage. Les sargasses se retrouvent alors mélangées à la colonne d'eau et ne sont plus visibles ou bien dérivent vers le sud jusqu'à sortir de la baie.

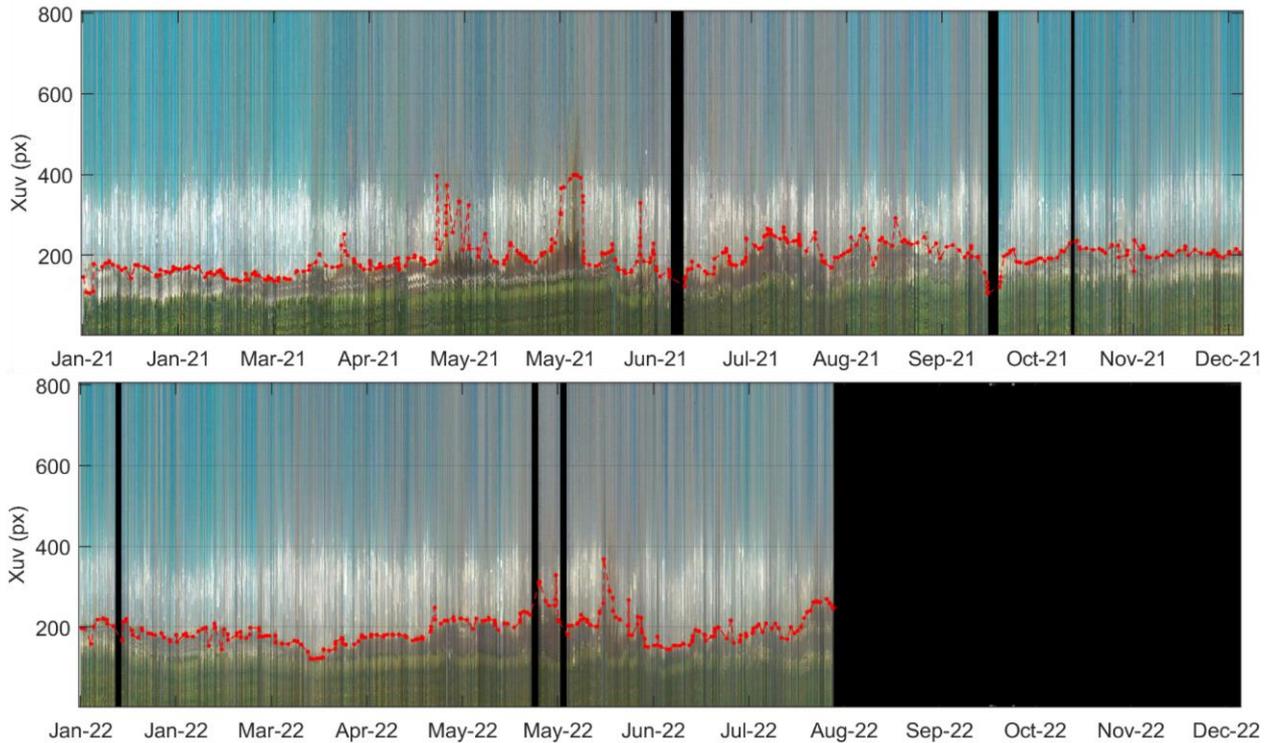


Figure 48 : représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses le long d'un profil transversal sur Macabou (trait bleu, Figure 49) réalisée à partir des images d'archives à un pas de temps horaire en 2021 (en haut) et 2022 (en bas).



Figure 49 : séquence illustrant un arrivage de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur la plage de Grand Macabou le 19 mai 2022. Le trait bleu représente la ligne de pixel utilisée pour l'obtention du timestack (Figure 48) et la flèche rouge illustre la localisation de la nappe en surface.

## 4.6. LA BAIE DU DIAMANT

### 4.6.1. Géoréférencement des images

Installé en bordure de falaise sur le Morne Larcher à une hauteur de 355 m (ngm), le dispositif de suivi surplombe la baie du Diamant. La relation entre l'image « brute » et les coordonnées réelles est obtenue en utilisant neuf points de références fixes (e.g. toit de certains bâtiments, ponton, cap rocheux) dont les coordonnées sont connues. La rectification de l'image permet d'obtenir une grille de 3 500 m de long sur 1 500 m de large dans la direction longitudinale et latitudinale, respectivement (Figure 50). La résolution d'un pixel peut varier de quelques dizaines de centimètres à plus de 10 m dans les zones les plus éloignées de la caméra (Figure 50 à droite). Dans le secteur « proche » du dispositif de suivi, situé sur les 1 500 premiers mètres de la baie, la résolution de l'image varie entre 0.5 et 2 m selon la distance à laquelle se situe le pixel de la lentille de l'appareil. Ainsi, la résolution de l'image géo-rectifiée reste satisfaisante (< 2 m) pour le suivi des arrivages sur ce secteur. Le dispositif étant installé sur un arbre à l'abri du vent, les variations de l'angle de vue de la caméra au cours du temps restent relativement limitées. Le calcul d'une nouvelle solution de géo-rectification est donc rarement nécessaire.

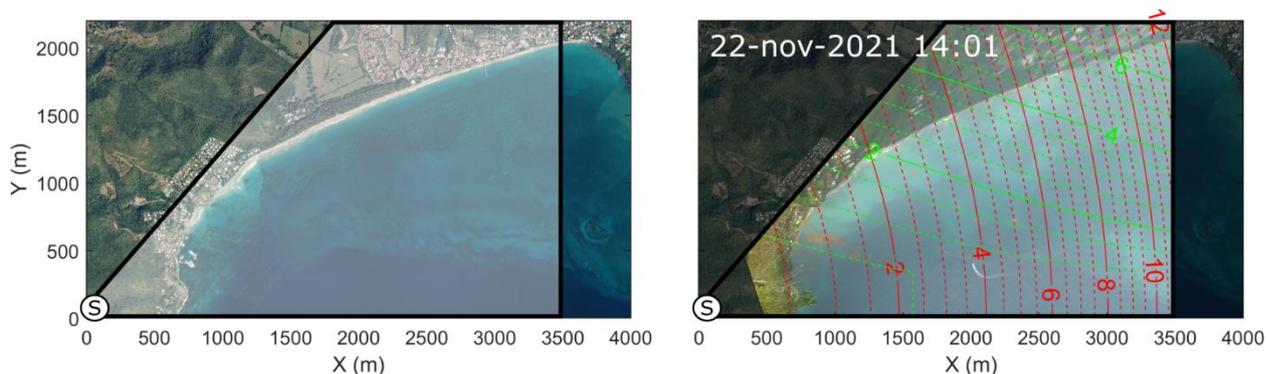


Figure 50 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la plage de Dizac. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 22 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image ; en rouge (en vert) dans l'axe longitudinal (transversal), respectivement.

### 4.6.2. Détection des sargasses

Le modèle de détection mis en place sur la baie du Diamant s'appuie sur la classification des pixels de l'image en sept classes différentes (Figure 51). La banquette de sargasses occasionnellement présente sur la plage, dans une zone située à proximité du jet de rive reste difficile à détecter automatiquement à cause de la résolution des pixels de l'image (e.g. le 16 mai 2021, Figure 52). En revanche la détection automatique des nappes de sargasses arrivant à proximité de la côte avant l'échouage est souvent bien réalisée (e.g. le 1er ou le 16 mai 2021, Figure 52).

Sur ce site, les calculs ont été réalisés toutes les deux heures entre 8h00 et 17h00 (soit 5 images par jour). Ainsi, entre janvier 2020 et septembre 2022, près de 4 400 images ont été analysées (Tableau 5). Une inspection visuelle de chacune des images traitées permet de contrôler la validité de la détection qui montre des résultats satisfaisants sur la partie marine de la baie (90 %). En effet, les sargasses échouées sur la plage ne sont quasiment jamais détectées par le modèle qui a été bâti pour identifier plus précisément les nappes de sargasses qui dérive à la surface de l'eau. Pour des conditions de luminosité insuffisante ou en cas de forte pluie, il arrive que le modèle ne parvienne pas à identifier précisément la surface de ces nappes.

Sur la totalité des images analysées, on estime à environ une détection sur dix les résultats qui ne sont pas exploitables directement en tant que surface de sargasses, lorsque la qualité de la détection varie de moyenne à mauvaise (Tableau 5). Les futurs utilisateurs de ce jeu de données sont encouragés à exploiter la donnée surfacique lorsque la qualité de la détection est jugée satisfaisante (environ 90 % du jeu de données), représentant un total de 3 986 images. Parmi l'ensemble des images analysées, des variations de quantité de sargasses (jusqu'à 2 000 m<sup>2</sup>) correspondant à l'interprétation inexacte de certaines portions de l'image (e.g. confusion avec de la végétation ou avec un secteur de plage plus ombragée) ont été enregistrées et ne doivent pas être interprétées par les utilisateurs comme de réelles évolutions. Ces variations restent peu significatives par rapport aux réels arrivages observés pendant la période de suivi (cf. section 4.6.3). Les données à disposition comprennent la date d'acquisition, la quantité de sargasses détectées en pixel ou en mètres carrés, la proportion de sargasses sur l'image et la précision de la détection.

Pour rappel (section 3), les algorithmes n'ont pas été déployés sur anse Cafard étant donné que le site de la baie du Diamant permet déjà l'observation des arrivages sur cette cellule sédimentaire. Les images capturées directement sur site à Anse Cafard pourront néanmoins être utilisées si nécessaire pour des situations spécifiques.

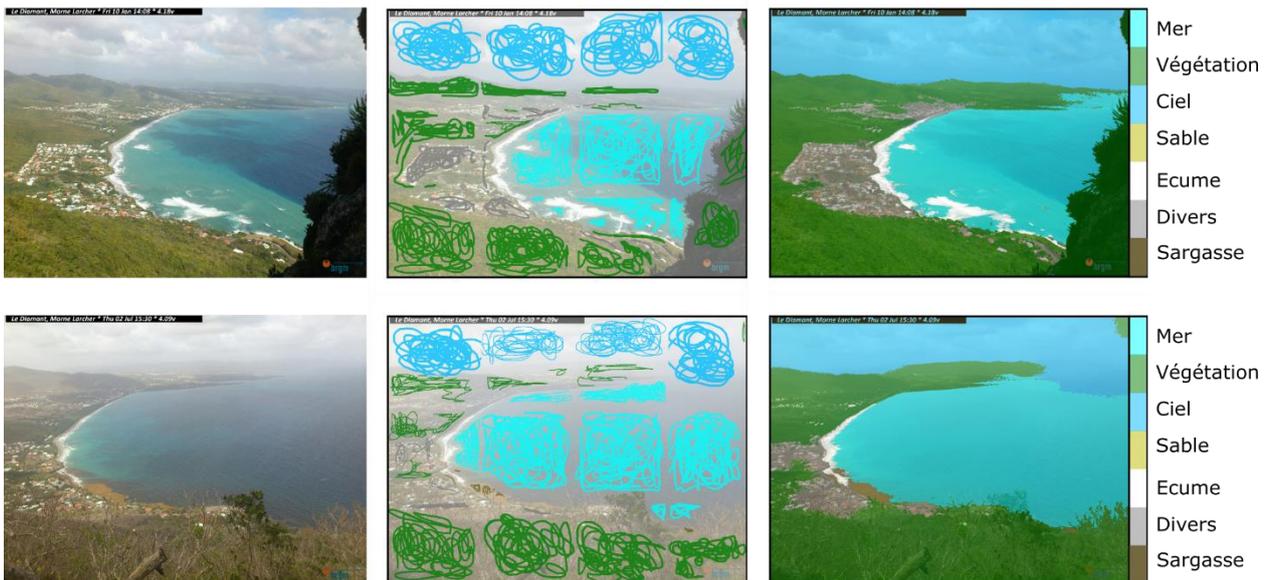


Figure 51 : création du modèle de détection sur le site du Diamant. A gauche, images brutes capturées depuis le Morne Larcher ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.

Tableau 5 : précision de la détection sur les images capturées au Diamant entre janvier 2020 et septembre 2022.

Précision/Qualité	nombre d'images	%
Excellente	0	0
Satisfaisant	3986	90
Moyenne	419	9
Mauvaise	11	0
<b>Total</b>	<b>4416</b>	<b>100</b>

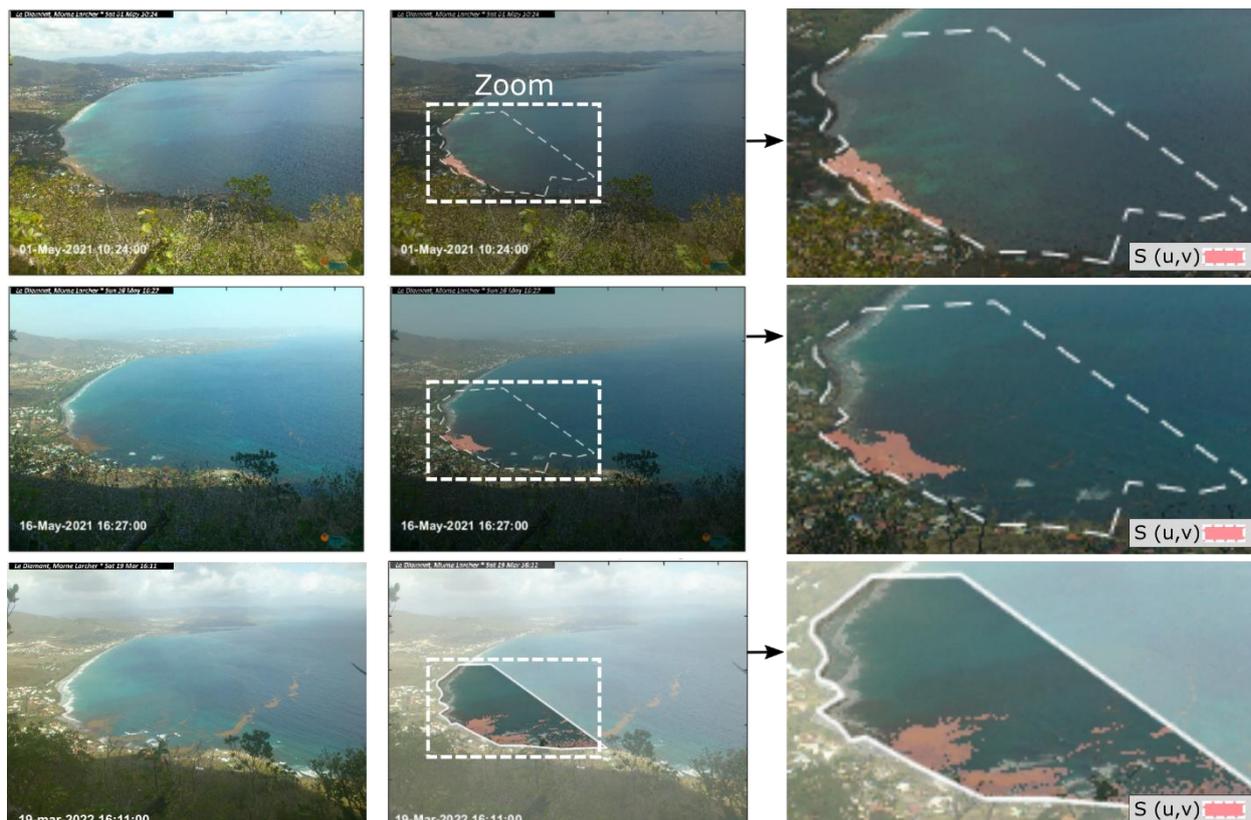


Figure 52 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  dans la baie du Diamant à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021 et 2022.

#### 4.6.3. Analyse des résultats

Au cours de la période de suivi, entre janvier 2020 et septembre 2022, la plage de Dizac et l'anse Cafard en particulier furent exposées à un nombre d'arrivages de sargasses importants (estimé à plus de 23 événements en 33 mois). 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 (située sur la partie sud de la baie). Au cours de la période de suivi, on note plusieurs pics où la surface de sargasses détectée sur la baie excède 10 000 m<sup>2</sup> (Figure 53).

Les plus gros arrivages enregistrés sont ceux du 16 mai 2021, 1<sup>er</sup> août 2021 ou du 3 juin 2022 où la surface de sargasses atteint plus de 10 000 m<sup>2</sup> (Figure 53). La Figure 54 illustre un arrivage d'algues le 3 juin 2022 où plus de 60 000 m<sup>2</sup> a été détecté au cours de la 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. A partir de quelques jours, les algues parviennent finalement à atteindre la côte en formant une banquette relativement compacte.

Le même type de processus a été observé pendant la période de suivi au cours des journées du 16 mai et du 1<sup>er</sup> août 2021 où une grosse partie des nappes de sargasses détectées dérive en surface vers l'anse Cafard. A partir d'un certain temps estimé à une dizaine de jours, les algues s'accumulent à la côte, formant une banquette d'algues dont l'épaisseur est variable (Figure 55). Les algues qui n'ont pas pu atteindre la plage dérivent généralement vers le sud jusqu'à sortir définitivement de la baie (Figure 55). La banquette formée sur la plage peut alors se maintenir

pendant plusieurs semaines jusqu'au ramassage éventuel des algues. Dans ce but, le passage d'engins mécaniques a notamment eu lieu plusieurs fois en 2018 ou en 2019. Aussi, les mesures du profil de plage réalisées sur le site d'anse Cafard montrent un recul significatif du trait de côte sur plus de 2 m depuis la mise en place du suivi topographique en juillet 2017 jusqu'en juillet 2020 (BRGM/RP-70659-FR, 2021). Ce phénomène d'érosion semble être provoqué par un affaissement global du profil de plage et pourrait être la conséquence du ramassage mécanique des algues échouées sur la plage. Si le ramassage des algues reste à priori nécessaire sur ce site, cette méthode est aussi connue pour entraîner une diminution du stock sédimentaire. Certaines pratiques nécessitent alors un certain cadrage où le ramassage manuel est à privilégier.

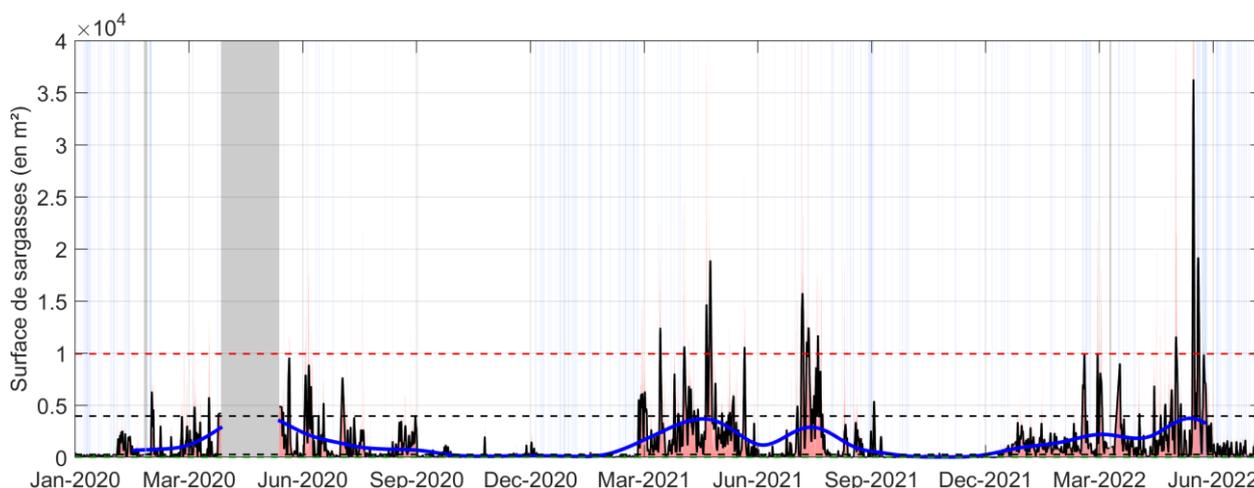


Figure 53 : évolution temporelle de la quantité ( $m^2$ ) de sargasses détectées sur le site du Morne Larcher entre janvier 2020 et septembre 2022. La courbe bleue présente la composante saisonnière du signal (filtre de Hanning 90 jours). Les lignes horizontales noires indiquent les percentiles 50 et 90 tandis que la ligne rouge présente la valeur obtenue pour le percentile 98.

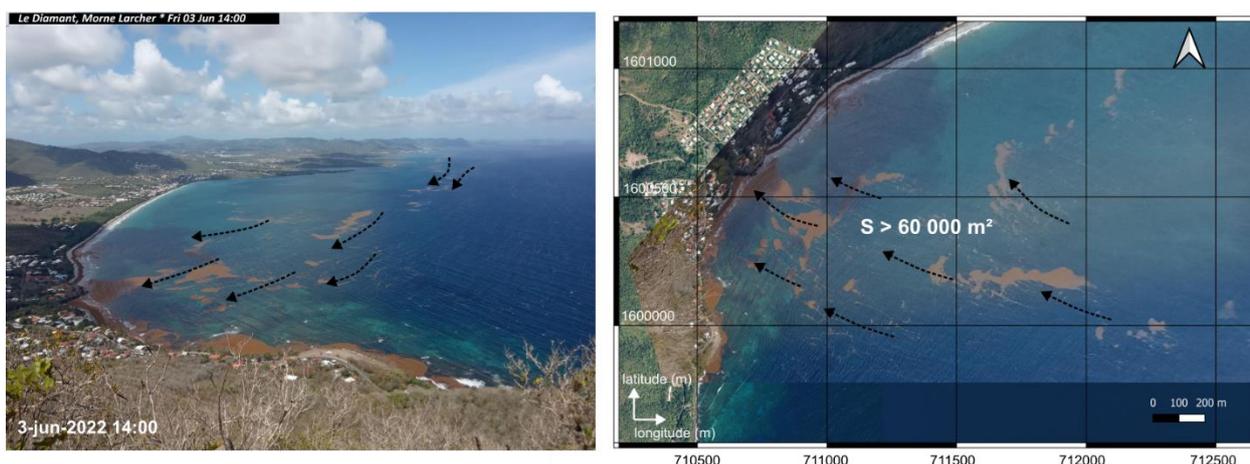


Figure 54 : dérive de nappes de sargasses vers la côte au Diamant le 3 juin 2022. A gauche, image brute capturée par le dispositif de suivi sur le site du Morne Larcher. A droite, image géo-rectifiée illustrant les arrivages des nappes en provenance du secteur est-sud-est. Au cours de la journée, une surface de plus de  $60\,000\ m^2$  a été détectée.



Figure 55 : séquence illustrant l'arrivage d'algues sur l'anse Cafard et la formation d'une banquette quelques jours plus tard (spirale noire). Les algues qui n'ont pas pu atteindre la plage dérivent généralement vers le sud jusqu'à être évacuées de la baie.

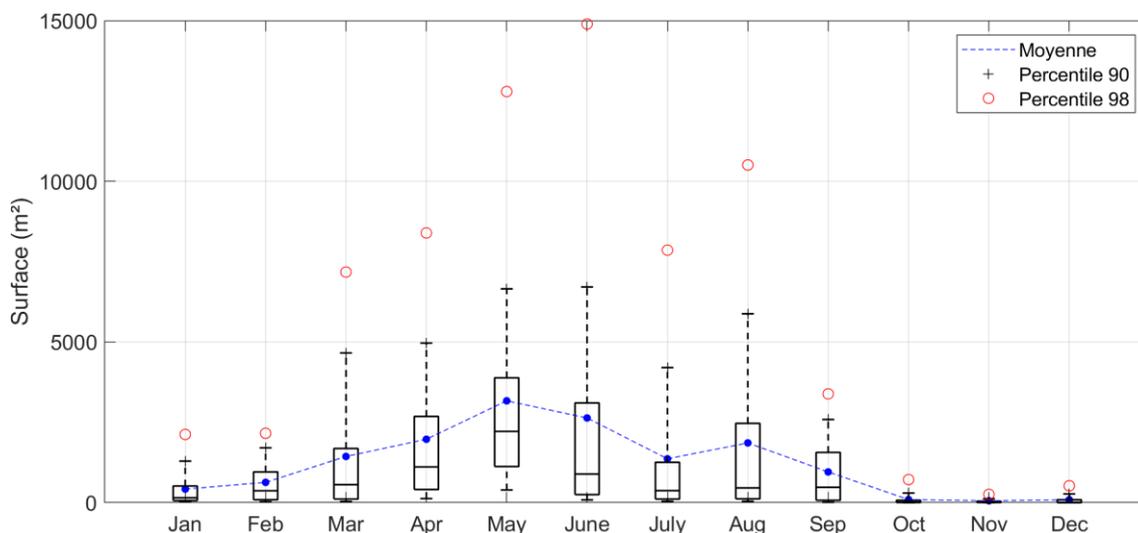


Figure 56 : diagramme en boîte mensuelle des quantité (m²) de sargasses détectés sur la baie du Diamant (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) depuis 2020 pendant 33 mois. Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la surface de sargasses observées lors du pic des évènements les plus importantes (percentile 98).

Les résultats obtenus sur la baie du Diamant montrent également une variabilité saisonnière importante où la période située entre mars et août correspond à celle où les échouages sont les plus fréquents (courbe bleue, Figure 53). Cette variabilité saisonnière se traduit très nettement sur toute la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90, Figure 56) où les quantités de sargasses présentes sur site sont nettement moins élevées entre septembre et janvier. Cette variabilité se traduit également sur les événements les plus importants (percentiles 90 ou percentiles 98) où la plupart des arrivages massifs ont lieu entre mars et août.

## 5. Conclusion

### L'observation et le partage de l'information

Entre octobre 2018 et octobre 2022, plus de 123 000 images ont été capturées sur sept 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 aussi été développée, montrant des résultats satisfaisants à excellents sur quatre sites. Sur ces derniers (Tableau 6), les chroniques des surfaces échouées peuvent être également mises à disposition et 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. Un système d'alerte performant sur quatre sites a également été déployé comprenant une liste de diffusion d'une quarantaine de personnes issues de différents organismes.

### La dynamique des arrivages et des échouages de sargasses

Au cours de la période de suivi, les résultats montrent une disparité importante entre les différents sites étudiés avec une exposition aux arrivages de sargasses hétérogène (Tableau 6). Par ailleurs, les observations réalisées mettent en évidence une dynamique très variée des mécanismes naturels d'arrivages ou de remaniement des algues échouées à la côte.

Plusieurs facteurs peuvent alors expliquer la variabilité des surfaces de sargasses à proximité des côtes. Les nouveaux arrivages de sargasses depuis la mer peuvent s'étaler sur un à plusieurs jours et sont souvent à l'origine d'une forte augmentation des surfaces calculées automatiquement par l'algorithme. Des épisodes ponctuels de fortes houles peuvent venir remanier les sargasses présentes sur site et se traduisent généralement par une diminution des surfaces à l'échelle d'un événement (e.g. Le Marigot, Sainte-Marie, Tableau 6).

Au contraire, lorsque les conditions de vagues restent modérées, le tassement ou l'enfouissement progressif des sargasses échouées peut être observé sur plusieurs semaines (e.g. Cité du Bac, Grande Anse Macabou, Tableau 6). Par ailleurs, en lien avec les interventions de collecte réalisées sur les plages, des facteurs anthropiques viennent perturber la variabilité des surfaces échouées (Baie du Diamant, Tableau 6).

Les résultats obtenus montrent également une variabilité saisonnière significative où la période située entre février et août correspond à celle où les arrivages de sargasses sont les plus fréquents (Tableau 6). En effet, la zone océanique de l'Atlantique Nord tropical reçoit des quantités relativement importantes de nutriments provenant de différentes sources (flux sortants de l'Amazonie et de l'Orénoque, *upwelling* équatorial, *upwelling* côtier au nord-ouest de l'Afrique) selon la période de l'année (Skliris et al., 2022). Ces différents processus présentent une forte

saisonnalité forçant les sargasses à s'accumuler sous la zone de convergence intertropicale (ZCIT) entre février et septembre. Ainsi, une grande zone où les sargasses sont très concentrées s'y développe et se déplace vers le nord jusqu'à atteindre les petites Antilles, généralement entre février et août, en suivant la migration méridienne saisonnière de la ZCIT (Skiris et al., 2022). En conséquence, les épisodes d'arrivages de sargasses les plus importants sont généralement capturés pendant cette période en Martinique (Tableau 6).

*Tableau 6 : synthèse des observations pour les arrivages de sargasses les plus importants sur les différents sites entre janvier 2020 et septembre 2022. Les quantités de sargasses présentes sur site lors de tels événements sont exprimées par les percentiles 90 ( $P_{90}$  en  $m^2$ ). Les sites marqués par un astérisque sont ceux où la détection automatique des algues montre des résultats satisfaisants à excellents.*

Sites Suivis	Nombre d'arrivages (N/an)	Quantité ( $P_{90}$ $m^2$ )	Période préférentielle	Caractéristiques principales
<b>Baie du bourg (Marigot)*</b>	10<N<15	4 500	janvier à août	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dérive vers secteur sud</li> <li>- Présence quasi-continue de sargasses entre janvier et août (<math>P_{50}</math> = 1300 <math>m^2</math>)</li> <li>- Evacuation naturelle si forte houle</li> <li>- Comblement du port lors de gros arrivages</li> </ul>
<b>Plage du bourg (Ste-Marie)*</b>	5<N<10	4 500	mars à août	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Echouage au nord</li> <li>- Dérive probable vers secteur sud</li> <li>- Formation banquette si échouages massifs</li> <li>- Remaniement naturel des algues échouées par la mer si forte houle</li> </ul>
Cité du Bac (la Trinité)	5<N<10	< 4 000	avril à septembre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dérive vers secteur sud</li> <li>- Echouage sur la plage</li> <li>- Remaniement naturel difficile</li> <li>- Site moins exposé aux nouveaux arrivages</li> </ul>
<b>Frégate Est (Le François)*</b>	10<N<15	2 500	février à août	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence d'un barrage</li> <li>- Sédimentation des algues (plusieurs jours)</li> <li>- Echouage à la côte possible</li> <li>- Dérive vers l'embouchure de la ravine</li> </ul>
Grande Macabou (le Vauclin)	5<N<10	< 4 000	avril à septembre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dérive vers secteur sud</li> <li>- Echouage sur la plage</li> <li>- Remaniement naturel difficile</li> <li>- Formation banquette si échouages massifs</li> </ul>
<b>Baie du Diamant*</b>	5<N<10	10 000	mars à août	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Echouage au sud (cf. anse Cafard)</li> <li>- Formation d'une banquette lors d'échouages massifs</li> <li>- Remaniement naturel des algues échouées sur la plage difficile</li> <li>- Ramassage ponctuel des algues échouées</li> </ul>

## Les effets des algues sur la dynamique du trait de côte

Sur les sites étudiés, la variabilité de la position du trait de côte est étroitement reliée aux conditions de vagues où pendant la période située entre septembre et mars elles proviennent majoritairement du secteur est-nord-est, orientant le transport sédimentaire vers le sud le long de la façade Atlantique. Au contraire, entre avril et juillet, les vagues proviennent généralement du quart est-sud-est orientant le transport sédimentaire vers le nord. 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. La poursuite du suivi et la répétition des situations de fortes vagues avec ou sans la présence de sargasses pourra nous apporter dans le futur des informations complémentaires.

Toutefois, les mesures réalisées par l'observatoire du littoral martiniquais ([www.observatoire-olimar.fr](http://www.observatoire-olimar.fr)) sur d'autres sites (e.g. Anse Michel, Anse Four à Chaux) montrent que les algues, lorsqu'elles parviennent à former une banquette épaisse et compact, peuvent parfois prendre les allures d'un ouvrage longitudinal de type « perré » et ont tendance au contraire à renforcer la réflexion des vagues (BRGM/RP-70659-FR, 2021). Le sédiment serait alors facilement remis en suspension au pied de la banquette d'algues et transporté vers la mer, favorisant alors localement un abaissement altimétrique. Ce phénomène pourrait générer un affouillement et constituer un facteur d'érosion.

Enfin, 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 (Anse Cafard, Tableau 6). 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

- Bouvier, C., Balouin, Y., & Castelle, B. (2017). Video monitoring of sandbar-shoreline response to an offshore submerged structure at a microtidal beach. *Geomorphology*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.017>
- BRGM/RP-66351-FR. (2016). *Belon R., Bodéré G. Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Rapport d'observations 2015.*
- BRGM/RP-69071-FR. (2019). *Lombard M., De Cathelineau T., Nachbaur A. Suivi des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Bilan de la phase d'installation du dispositif photographique. Rapport final.* 41.
- BRGM/RP-69651-FR. (2020). *Bouvier C., De Cathelineau T. et Valentini N. Suivi de la dynamique des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Développement et application des algorithmes. Rapport final.*
- BRGM/RP-70659-FR. (2021). *Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais (OLiMar) – Rapport technique d'année 2 et 3 (2019-2020).*
- BRGM/RP-71396-FR. (2021). *Bouvier, C. Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (rapport technique des années 2020 et 2021). Rapport final V1. BRGM/RP-71396-FR, 42 p.*
- Harley, M. D., Kinsela, M. A., Sánchez-García, E., & Vos, K. (2019). Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images. *Coastal Engineering*, 150, 175–189. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2019.04.003>
- 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*. Retrieved December 7, 2021, from <http://papers.nips.cc/paper/4296-efficient-inference-in-fullyconnected-crfs-with-gaussian-edge-potentials.pdf>
- Lippmann, T. C., & Holman, R. A. (1989). Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94(C1), 995. <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p00995>
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). *MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks* (pp. 4510–4520).

SHOM. (2020). *Références Altimétriques Maritimes*.

Skiris, 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(6), 383–404. <https://doi.org/10.1007/S10236-022-01511-1>

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*. <https://doi.org/10.3390/JMSE8010023>

Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 364(6448), 83–87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>

Yu, H., Yang, Z., Tan, L., Wang, Y., Sun, W., Sun, M., & Tang, Y. (2018). Methods and datasets on semantic segmentation: A review. *Neurocomputing*, 304, 82–103. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.03.037>



**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 Martinique**

Adresse : 4 lot. Miramar, 97200 Fort-de-France

Tél. : 05 96 71 17 70

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**