



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document public

# Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (rapport technique des années 2020 et 2021)

Rapport final

**BRGM/RP-71396-FR**

Version 1 du 9 décembre 2021

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

**C. Bouvier**

**Vérificateur :**

Nom : BALOUIN, Y.

Fonction : Expert Littoral

Date : 07/12/2021

Signature :

**Approbateur :**

Nom : Vittecoq, B.

Fonction : Directeur régional Martinique

Date : 08/12/2021

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)

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## 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 mis à votre disposition.

**Mots clés :** Martinique, littoral, sargasse, trait de côte, imagerie, mer, océan

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

**C. Bouvier** (2021) – 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.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-21/09/2021

## Synthèse

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. 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, l'ADEME, le BRGM et la DEAL ont souhaité développer des outils d'observation visant à mieux suivre et gérer le littoral martiniquais.

L'objectif de ce cette nouvelle étude (juin 2020-juin 2022) est de maintenir le dispositif de suivi par imagerie photographique sur sept sites, 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.

Ce rapport d'avancement s'attache à présenter chacun des sites équipés du dispositif pour cette nouvelle convention et à détailler le suivi déjà réalisé depuis 2018 en exposant les algorithmes qui ont été développés, notamment concernant la détection des surfaces de sargasses arrivant à proximité des côtes ou échouées sur les plages.

La maintenance du dispositif a été assurée pendant les 17 derniers mois, entre juin 2020 et octobre 2021, sur les 7 sites suivis. Sur cette période, le dispositif de suivi a connu très peu de disfonctionnement avec en moyenne moins de 5 % d'échec dans l'acquisition des images. Plus de 31 985 images ont pu ainsi être capturées et sauvegardées, représentant un total de 25 giga-octets. Au cours des 36 derniers mois (octobre 2018 à octobre 2021), plus de 94 000 images ont pu être stockées sur le serveur du BRGM (soit plus de 75 giga-octets).

Les algorithmes développés permettent aujourd'hui de détecter de façon automatique avec une bonne précision la surface de sargasses échouées ou arrivant à proximité des côtes sur les sites de la baie du bourg du Marigot ; la plage au nord du bourg de Sainte-Marie ; Cité du bac à la Trinité ; Frégate Est au François. Néanmoins, pour deux des six sites sur lesquels ont été réalisés les développements des améliorations sont encore nécessaires. Il s'agit des sites de Grande Anse Macabou et du Diamant. La création de nouveaux modèles de détection pouvant être réalisés à partir d'une plus grande collection d'image devrait permettre d'améliorer significativement les résultats. De nouveaux tests pourront être réalisés pendant la deuxième partie du projet.

La grande quantité d'images à disposition combinée avec les derniers développements réalisés offre de nombreuses perspectives pour l'amélioration de la compréhension des phénomènes d'échouages de sargasses et une meilleure gestion de ces évènements.



## Sommaire

1. Introduction .....	9
1.1. Contexte.....	9
1.2. Objectifs .....	10
2. Présentation des sites suivis .....	12
2.1. Introduction .....	12
2.2. Les sites suivis .....	14
2.2.1. <i>La baie du bourg du Marigot</i> .....	14
2.2.2. <i>La plage du bourg de Sainte-Marie</i> .....	14
2.2.3. <i>Cité du Bac (la Trinité)</i> .....	15
2.2.4. <i>Frégate est (le François)</i> .....	15
2.2.5. <i>Grande anse Macabou (le Vauclin)</i> .....	16
2.2.6. <i>Anse Cafard (le Diamant)</i> .....	16
2.2.7. <i>Morne Larcher (le Diamant)</i> .....	17
2.3. Performance du suivi.....	18
2.3.1. <i>Suivi et maintenance sur les 17 derniers mois</i> .....	18
2.3.2. <i>Suivi et maintenance depuis 2018</i> .....	18
3. Les algorithmes de traitement des images .....	20
3.1. Géoréférencement des images .....	20
3.2. Détection du trait de côte .....	21
3.3. Détection des sargasses .....	23
3.4. Conception du syteme d’alerte .....	24
3.5. Application des algorithmes sur les sites suivis .....	26
3.5.1. <i>La baie du bourg du Marigot</i> .....	26
3.5.2. <i>La plage du bourg de Sainte-Marie</i> .....	28
3.5.3. <i>Cité du Bac (la Trinité)</i> .....	30
3.5.4. <i>Frégate Est (Le François)</i> .....	32
3.5.5. <i>Grande anse Macabou (le Vauclin)</i> .....	34
3.5.6. <i>Morne Larcher (le Diamant)</i> .....	35
4. Conclusion .....	38
5. Bibliographie .....	39

## Liste des figures

Figure 1 : a) Evolution 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. ....	9
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.	10
Figure 3 : Présentation du dispositif de suivi ©Solarcam ( <a href="https://www.solarcam.fr">https://www.solarcam.fr</a> ) à gauche et installation sur le site de Grande anse Macabou au Vauclin (2018-2020) à droite.....	12
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 ( <a href="http://www.observatoire-olimar.fr">www.observatoire-olimar.fr</a> ).....	13
Figure 5 : Localisation du dispositif et prise de vue au bourg du Marigot.....	14
Figure 6 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du bourg de Sainte-Marie. ....	14
Figure 7 : Localisation du dispositif et prise de vue à la Trinité sur le site de Cité de Bac.....	15
Figure 8 : Localisation du dispositif et prise de vue au François sur le site de Frégate Est.....	16
Figure 9 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Grande anse Macabou au Vauclin.....	16
Figure 10 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de anse Cafard au Diamant.	17
Figure 11 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Dizac au Dlamant. ....	17
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 2021).....	18
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.....	19
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 gpcs connues. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en juin 2017.....	21
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. ....	22
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.....	22
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. ....	23

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>. ..... 25

Figure 19 : Géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la baie du bourg du Marigot. A gauche, image orthophoto (BDORTHO<sup>®</sup>, 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..... 26

Figure 20: 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..... 27

Figure 21: détection automatique des sargasses S(u,v) dans la baie du bourg du Marigot à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021. .... 28

Figure 22 : Géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la plage du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image orthophoto (BDORTHO<sup>®</sup>, 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 23 : création du modèle de détection sur le site de Sainte-Marie. A gauche, Images brutes capturées sur la plage du bourg ; 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..... 29

Figure 24: 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. .... 30

Figure 25 : 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..... 31

Figure 26 : 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. .... 31

Figure 27: géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur le site de Frégate Est au François. A gauche, image orthophoto (BDORTHO<sup>®</sup>, 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. .... 32

Figure 28 : 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..... 33

Figure 29 : 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. .... 33

Figure 30 : 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. .... 34

- Figure 31: 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. .... 35
- Figure 32 : 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. .... 36
- Figure 33 : création du modèle de détection sur le site du Diamant. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Dizac ; 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 34: 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. ... 37

# 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 (Illustration 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) à proximité de la côte Ouest Africaine en lien avec la modification des courants océaniques (Wang et al., 2019).

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, l'ADEME, le BRGM et la 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).

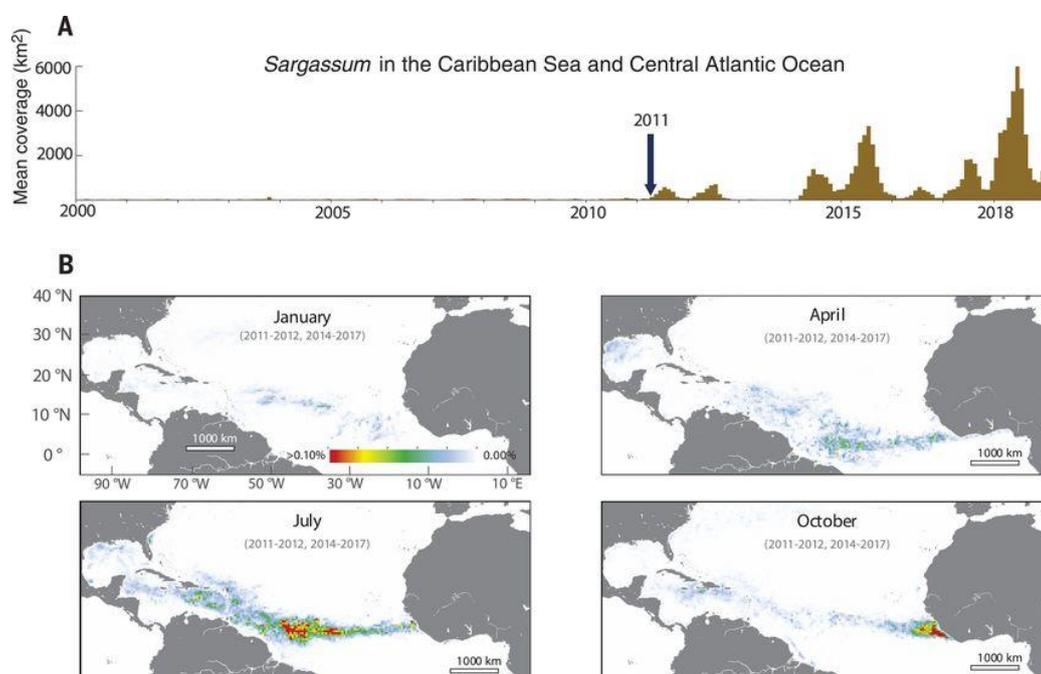


Figure 1 : a) évolution temporelle de la couverture spatiale (km<sup>2</sup>) de sargasses dans la mer des Caraïbes et la zone Atlantique équatoriale (moyenne mensuelle). b) Densité moyenne (%) de sargasses pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre sur la période 2011-2017. Illustration extraite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



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.

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 (convention de recherche et de développement sur 24 mois).

## 1.2. OBJECTIFS

L'objectif général de cette nouvelle étude (juin 2020-juin 2022) est de maintenir le dispositif de suivi par imagerie vidéo sur sept sites, 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 d'avancement s'attache à présenter les sites équipés du dispositif pour cette nouvelle convention et détaille le suivi déjà réalisé depuis 2018 en exposant les images disponibles sur les années 2020 et 2021. Les nouveaux développements effectués sont décrits par la suite dans ce rapport, notamment concernant la détection automatique des algues sur les sites équipés.

## 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 le court et moyen-terme. La méthode de suivi adoptée doit alors permettre de couvrir l'ensemble de ces échelles temporelles. 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 (inférieur à 500€, 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 en Martinique. 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.

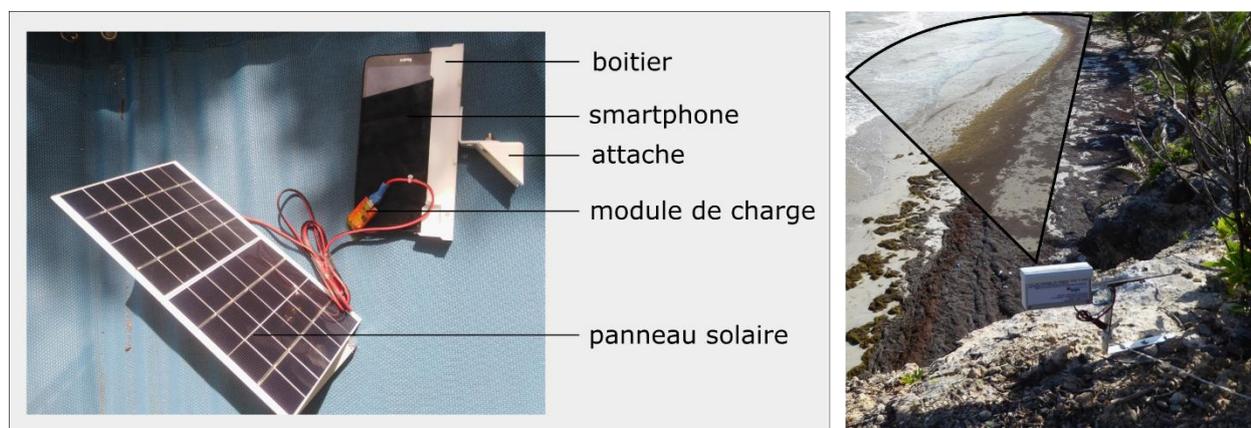


Figure 3 : présentation du dispositif de suivi ©Solarcam (<https://www.solarcam.fr>) à gauche et installation sur le site de Grande anse Macabou au Vauclin (2018-2020) à droite.

L'installation des ©SolarCam a été réalisé 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 17 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 Morne Larcher (7) au 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 Madinair (<https://www.madinair.fr>) et ne font plus l'objet de la présente convention (2020-2022).

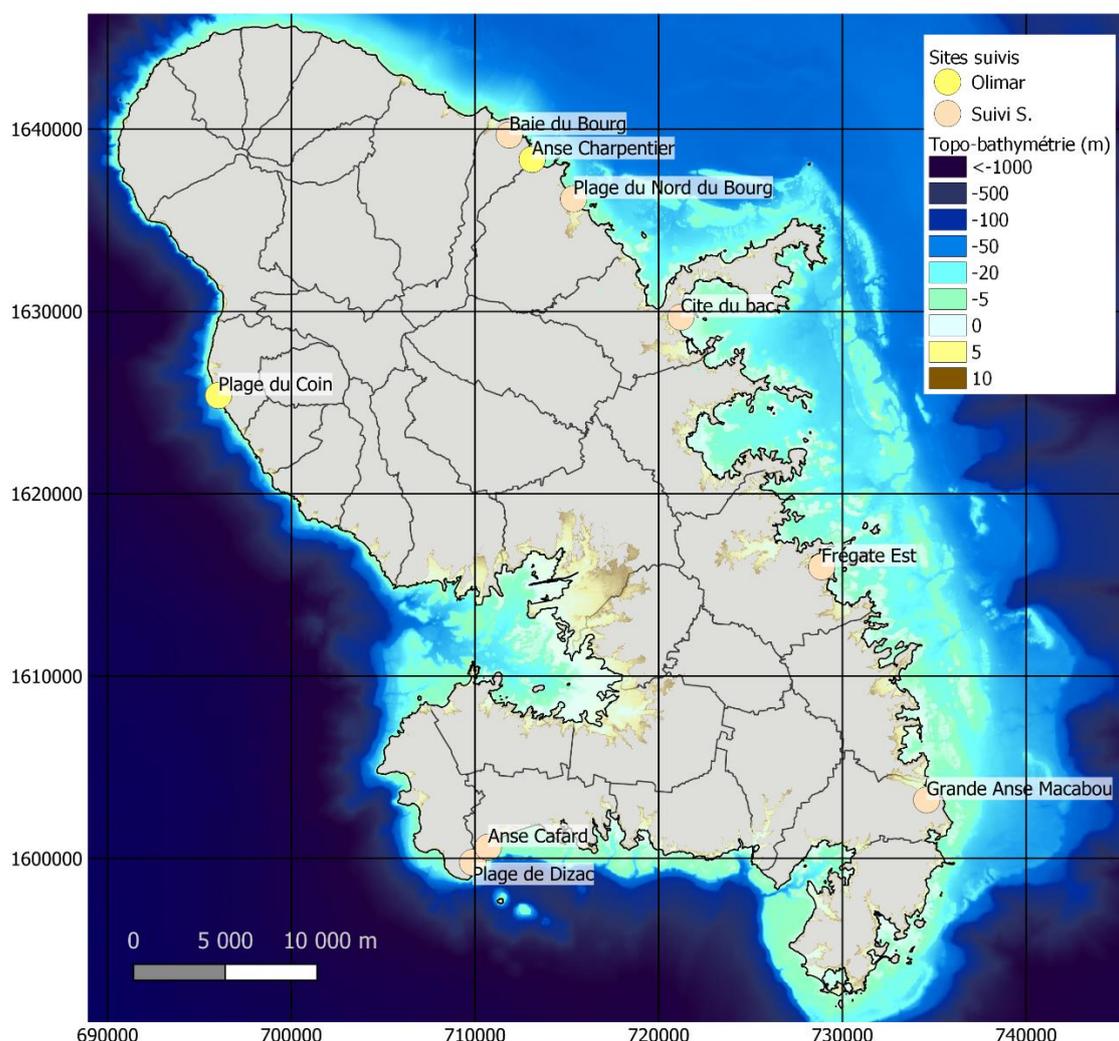


Figure 4 : localisation des sites équipés d'un dispositif ©Solarcam avec en rose les sites instrumentés dans le cadre du suivi des échouages de sargasses et en jaune les plages de l'observatoire OLIMAR ([www.observatoire-olimar.fr](http://www.observatoire-olimar.fr)).

## 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). 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.

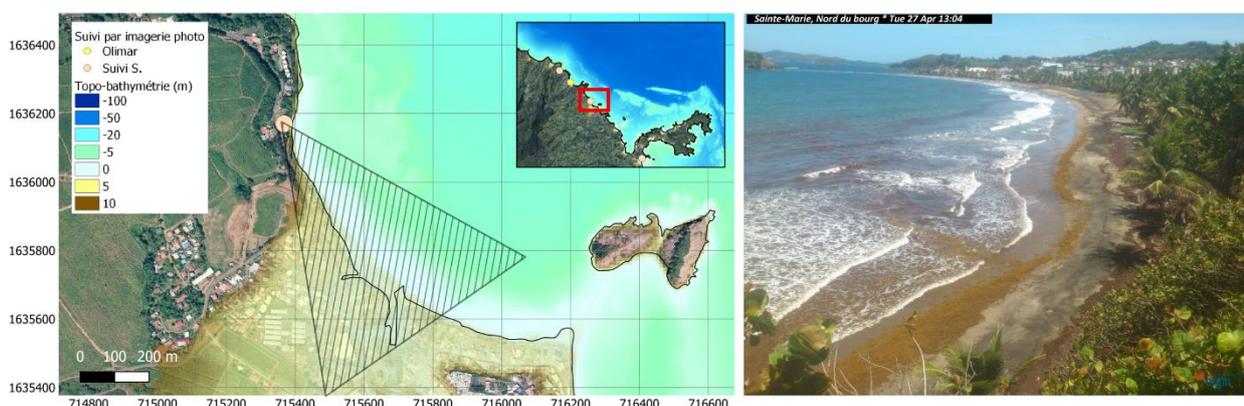


Figure 6 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du bourg de Sainte-Marie.

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. 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.

### 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.

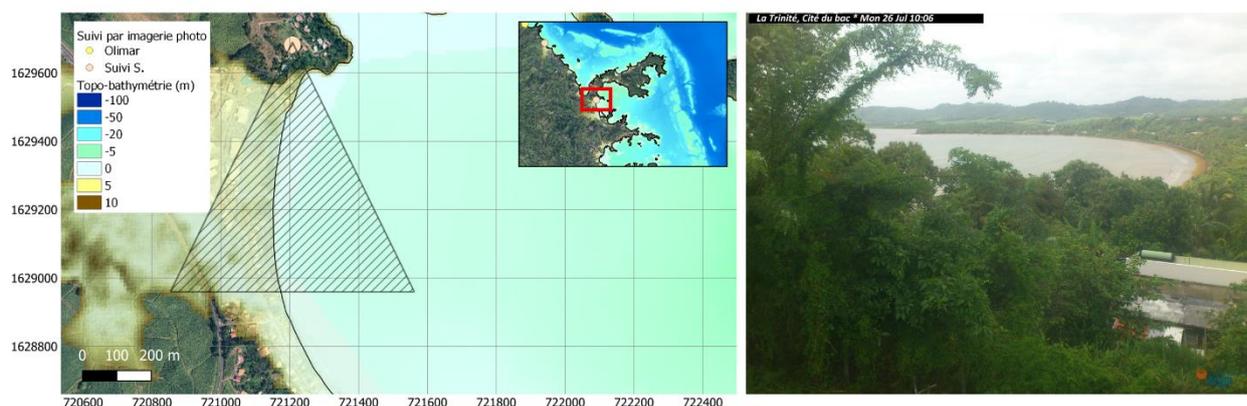


Figure 7 : localisation du dispositif et prise de vue à la Trinité sur le site de Cité de Bac.

### 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 mètre plus au large. Cette cellule sédimentaire est centrée sur une ravine qui se prolonge en mer. Le secteur est équipé d'un barrage mis en place 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.

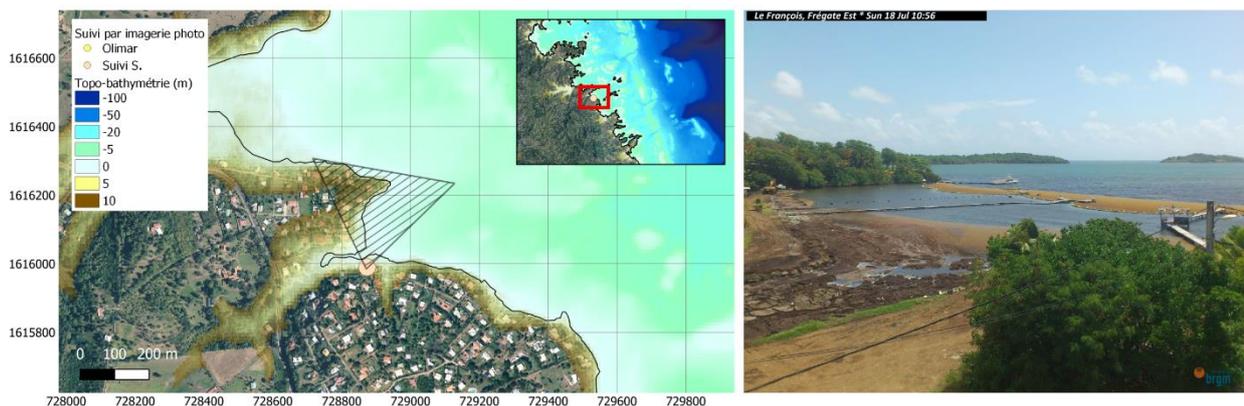


Figure 8 : localisation du dispositif et prise de vue au François sur le site de Frégate Est.

### 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 aout 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)

La plage de 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, aussi 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.

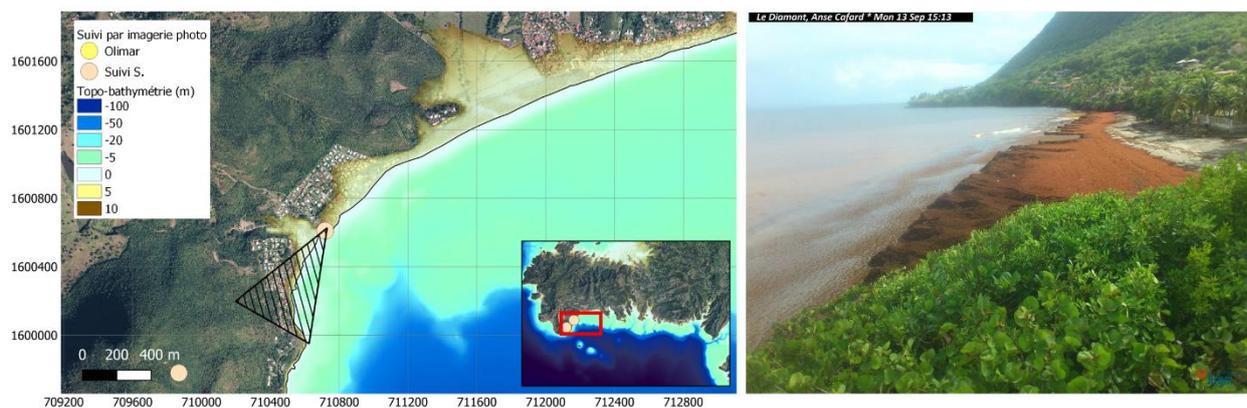


Figure 10 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de anse Cafard au Diamant.

### 2.2.7. Morne Larcher (le Diamant)

La plage de Dizac est située sur la commune du Diamant au sud-ouest de la Martinique (Figure 11). Cette cellule sédimentaire s'étend sur plus de 3 km de long et s'impose comme l'une des plages 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.

Le dispositif de suivi a été mis en place depuis aout 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. Les sargasses en mer sont souvent identifiables, permettant ainsi une analyse qualitative de la dérive des radeaux de sargasses.

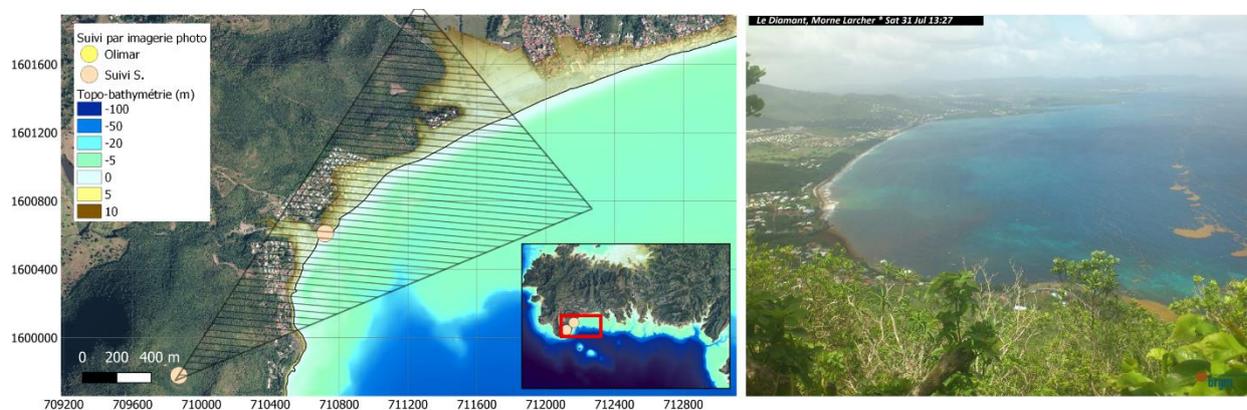


Figure 11 : localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Dizac au Diamant.

## 2.3. PERFORMANCE DU SUIVI

### 2.3.1. Suivi et maintenance sur les 17 derniers mois

Dans le cadre de ce projet la maintenance du dispositif a été assurée pendant les 17 derniers mois, entre juin 2020 et octobre 2021, sur les 7 sites présentés section 2.2. Sur cette période, le système de suivi a connu très peu de dysfonctionnement avec en moyenne moins de 5 % d'échec dans l'acquisition des images (aucune image capturée pendant toute une journée). Le suivi proposé est donc opérationnel avec au total, plus de 31 985 images disponibles sur un serveur, représentant un volume de 25 giga-octets.

Avec environ 10 % d'échec, le site de Grande Anse Macabou et de Frégate sont ceux qui ont connus le plus de difficultés sur ces 17 derniers mois. Pour ces deux sites, le suivi a été ponctué de quelques coupures ponctuelles liées à des problèmes de connexion sur le réseau mobile et une coupure plus longue (une dizaine de jours sans image) qui a conduit dans les deux cas au remplacement de la carte Sim des deux appareils. Sur 488 jours de suivi chacun des dispositifs ont malgré tout pu capturer plus de 4000 images avec une couverture journalière à plus de 90% (seulement une quarantaine de jours sans image à disposition).

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 17 derniers mois. Plus de 4695 images ont pu être capturées pendant cette période, soit plus de 9 images par jour.

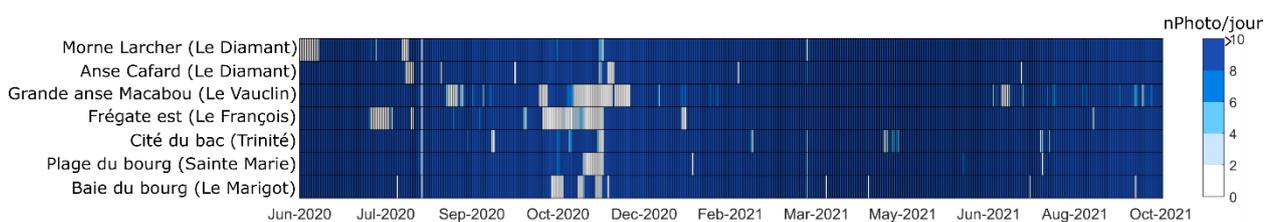


Figure 12 : performance du suivi par imagerie photo sur les sept sites équipés en nombre de photos capturées par jour et par site depuis le début de la présente convention (entre juin 2020 et octobre 2021).

### 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 36 derniers mois (octobre 2018 à octobre 2021), plus de 94 000 images ont pu être capturées et sont aujourd'hui stockées sur le serveur du BRGM (soit plus de 75 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 4000 images par site avec des minima et maxima pouvant aller de 1000 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 et décembre 2019.

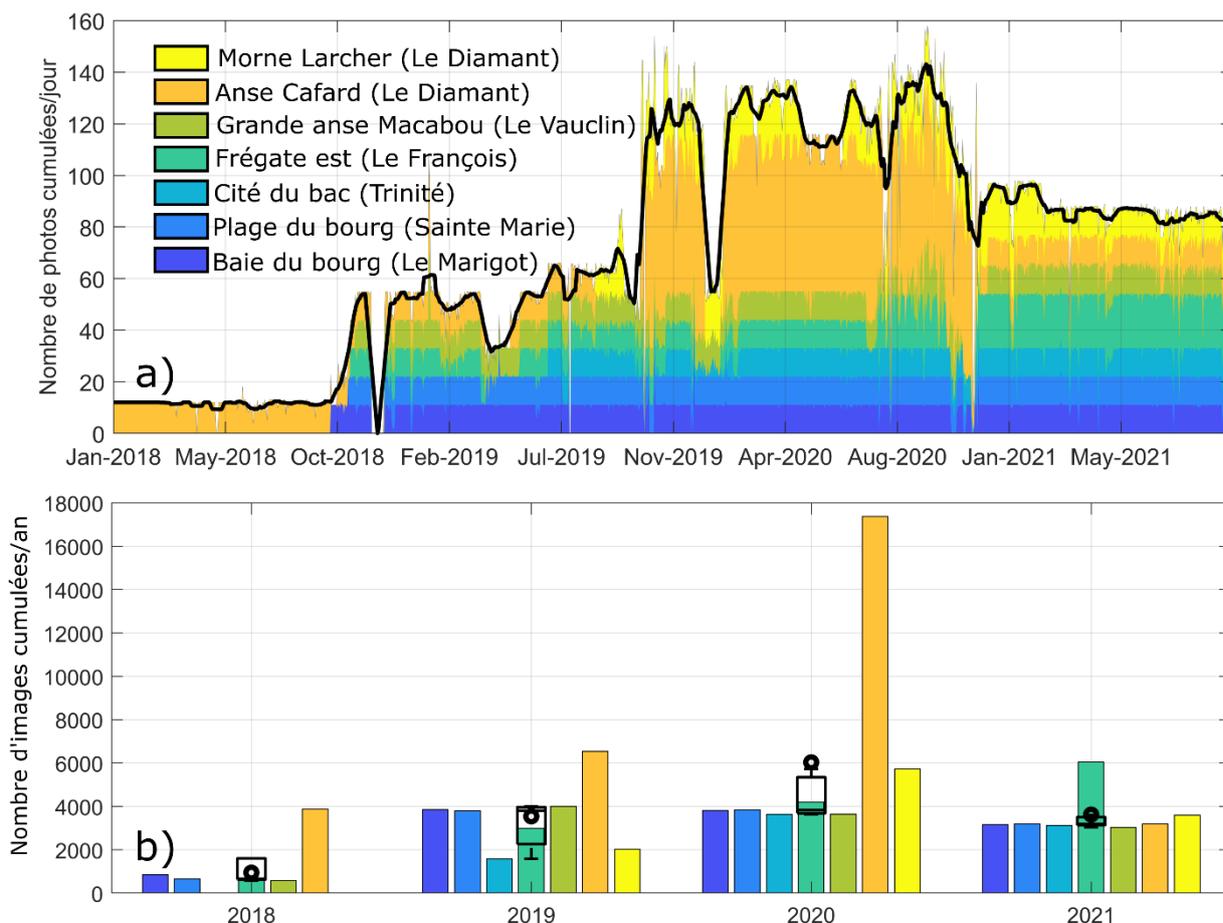


Figure 13 : performance du suivi par imagerie photo sur les sept sites équipés depuis 2018. a) Evolution temporelle du nombre d'images capturées pour chaque site (en cumul) et par jour depuis la mise en place du suivi. b) Histogramme représentant le nombre d'images capturées par année et pour chaque 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 6 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 Morne Larcher au Diamant (07).

### 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 (parfois) 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.

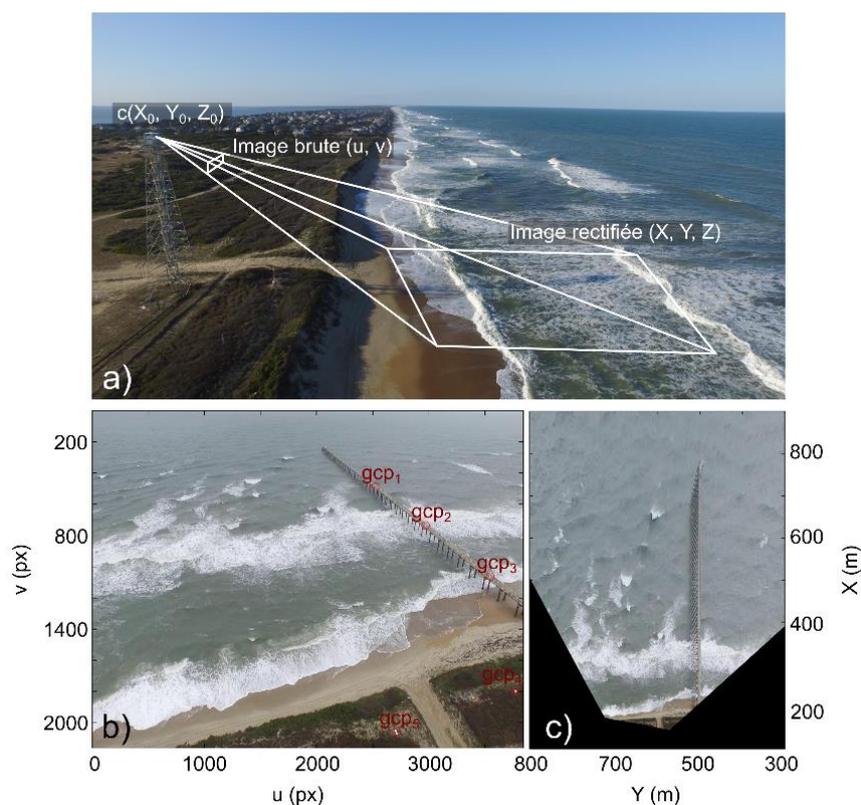


Figure 14 : photo aérienne de la plage de Duck (Caroline du Nord, États-Unis) montrant la transformation d'une image oblique (coordonnées  $u, v$ ) en image plane (coordonnées  $X, Y, Z$ ). (b,c) Rectification d'une image à partir de points gcps connus. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck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

### 3.2. DETECTION DU TRAIT DE COTE

La détection du trait de côte est réalisée en utilisant les images géo-référencées capturées par le dispositif de suivi installé sur la plage du bourg de Sainte-Marie. Situées à plusieurs centaines de mètres de la caméra, la résolution disponible sur les plages de Cité du Bac à la Trinité, Grande Anse Macabou au Vauclin ou sur la plage de Dizac au Diamant ne permettent pas un suivi haute fréquence précis de la position 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 plages) 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 mouillée de l'océan (Figure 15, à droite). L'espace RmB (Red minus Blue) 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'océan (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. L'erreur sur la position du trait de côte varie selon les écarts verticaux du niveau d'eau au cours d'une période de suivi et qui se traduisent en une erreur horizontale selon la pente de la plage. La résolution transversale de l'image redressée est enfin ajoutée comme source d'erreur affectant l'identification du trait de côte. Si les erreurs totales maximales associées à un suivi du trait de côte sont généralement inférieures à 10 m (e.g. Holman and Stanley, 2007; Plant et al., 2007; Rutten et al., 2018; Valentini et al., 2017), il sera essentiel de préciser, lors des futures analyses, pour chaque plage étudiée (résolution du système vidéo, pente de la plage) et pour la période analysée (caractéristique hydrodynamique et météorologique de chacune des images), les différentes sources d'erreurs liées à l'utilisation de ces méthodes.

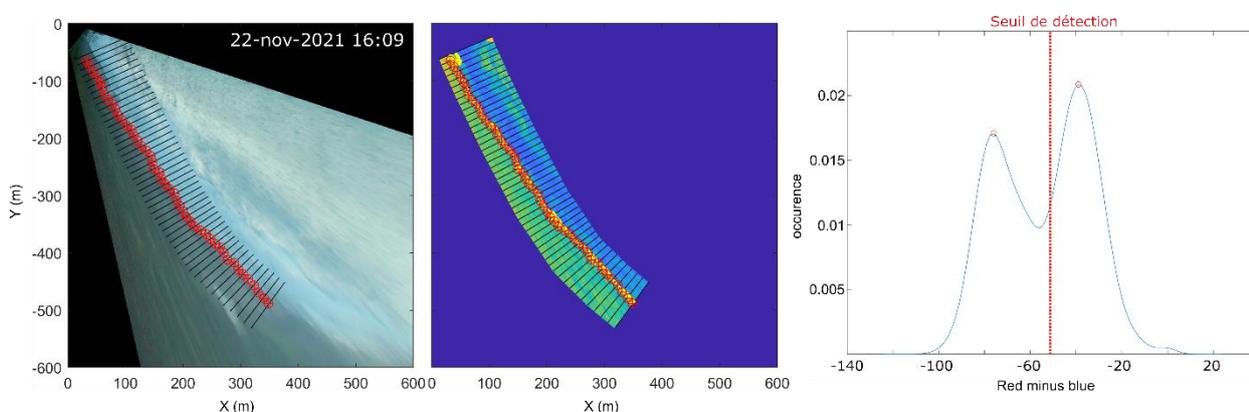


Figure 15 : les différentes étapes de la détection automatique de la position du trait de côte (points rouge) sur la plage du nord du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image rectifiée où sont superposées chacun des transects. Au centre, image rectifiée dans l'espace couleur RmB à partir de laquelle l'analyse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

### 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), classe une première fois 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.

- Ensuite, un raffinement CRF (Conditional Random Fields) est appliqué pour détailler le résultat (Krähenbühl et al., 2011). C'est une méthode statistique cherchant à modéliser la probabilité d'appartenance à une classe à l'intérieur d'un groupe de pixel.

- Afin d'améliorer les résultats de la segmentation, une découpe Superpixel est également appliquée à différentes étapes de la segmentation. La découpe Superpixel consiste à regrouper des pixels dont les paramètres sont proches.

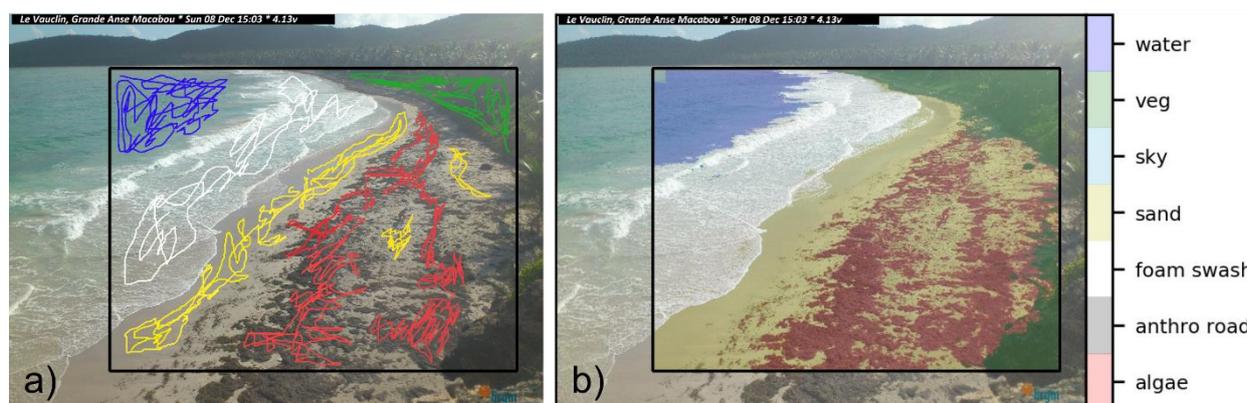


Figure 17 : a) image brute capturée à Grande Anse Macabou au Vauclin le 08 décembre 2019. Un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt. b) Classification automatique de l'image par l'algorithme.

Pour terminer, la phase suivante consiste à calculer les surfaces de sargasses échouées. A 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.

### 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.

#### 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.

#### 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 si cette surface est supérieure au seuil fixé. 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 et la dernière alerte émise. Le seuil ( $Seuil_{local}$ ) 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 Vauclin)	500	-
Morne Larcher (le Diamant)	-	2000

## 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 qui permet 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.

Actuellement, la liste de diffusion contient une quarantaine de personnes de différents organismes.

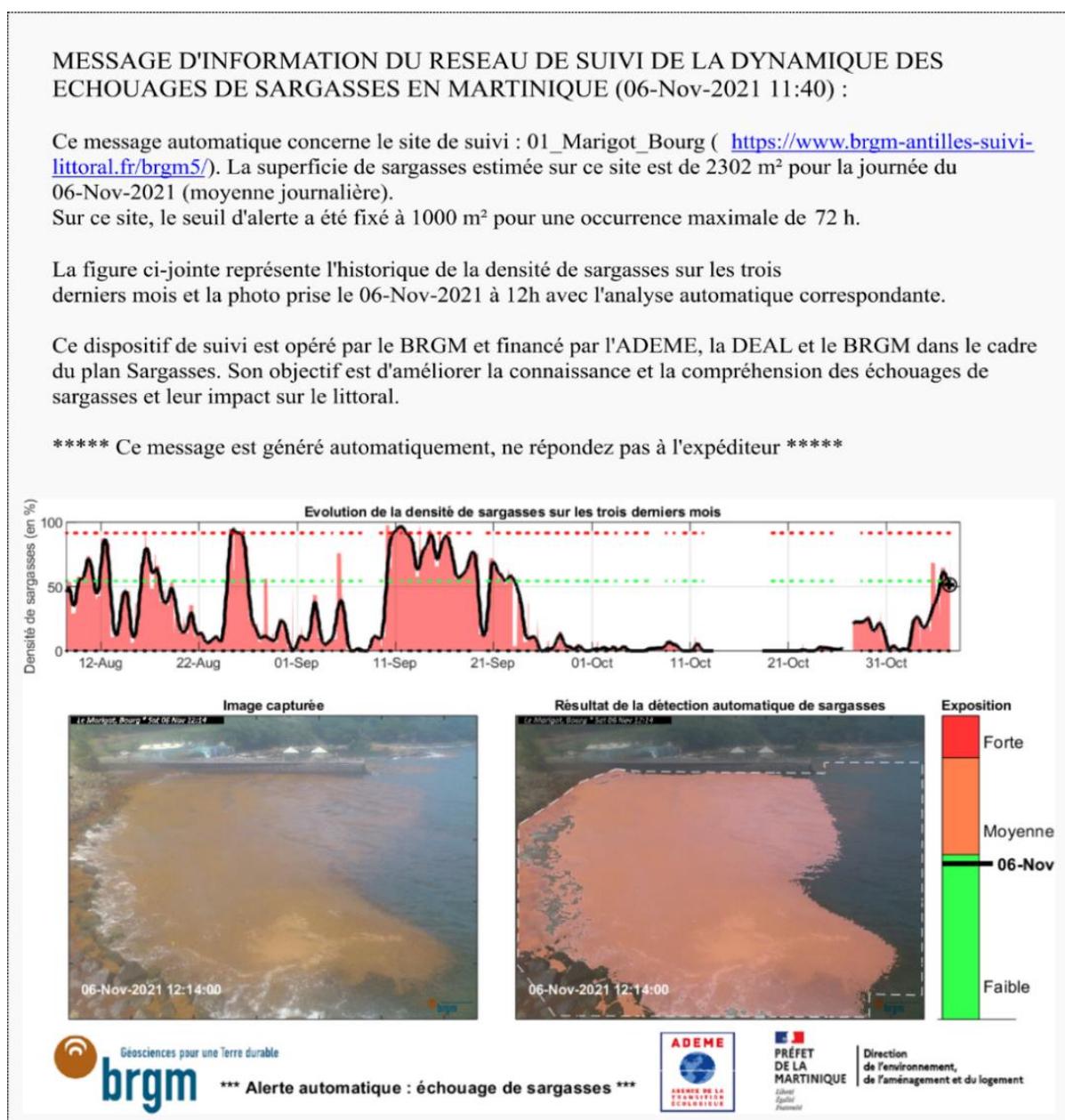


Figure 18 : exemple de mail envoyé pour une alerte déclenchée sur le site du bourg du Marigot le 06 novembre 2021. La surface de sargasses estimée par l'algorithme atteint plus de 2300 m<sup>2</sup>.

### 3.5. APPLICATION DES ALGORITHMES SUR LES SITES SUIVIS

#### 3.5.1. La baie du bourg du Marigot

##### 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, carbets 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 19). 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 19 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 19).

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.

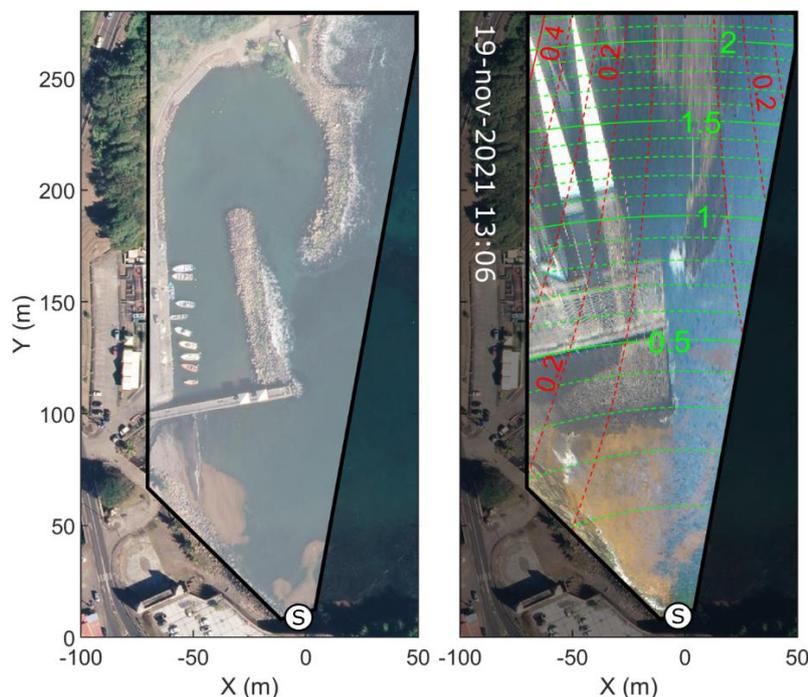


Figure 19 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la baie du bourg du Marigot. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 19 novembre 2021 où les iso-contours indiquent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

## Détection des sargasses

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 20). 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 100 images choisies de façon aléatoires) montrent que le modèle de détection automatique parvient à distinguer, avec un fort taux de réussite (résultat satisfaisant à très satisfaisant pour ~ 80 % des images), le contraste de couleur entre la surface de l'eau et les algues (e.g. Figure 21). 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 7000m<sup>2</sup> depuis l'extrémité sud de la baie jusqu'au ponton sur une largeur d'une centaine de mètre (Figure 21).

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 qui est illustrée par le trait en pointillés blanc sur la Figure 21.

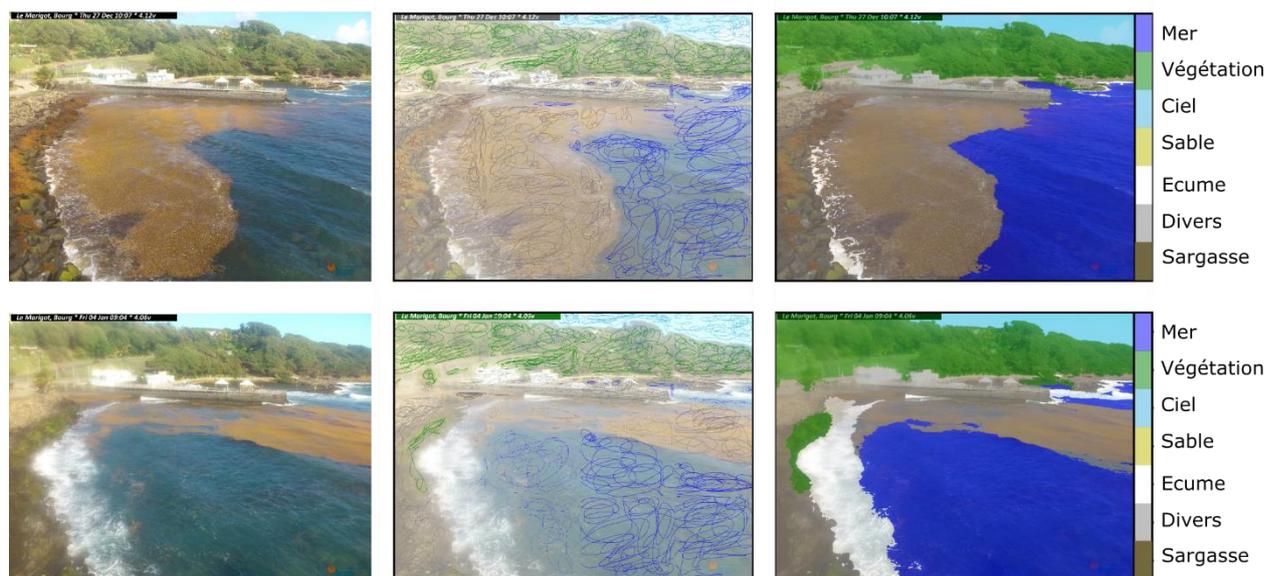


Figure 20 : création du modèle de détection sur le site du Marigot. A gauche, Images brutes capturées dans la baie du Marigot ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.



Figure 21 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  dans la baie du bourg du Marigot à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.

### 3.5.2. La plage du bourg de Sainte-Marie

#### 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 de 1 km m de long sur 650 m de large dans la direction longitudinale et latitudinale, respectivement (Figure 22). 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 22 à droite). Dans le secteur proche du dispositif de suivi, situé sur les 200 premiers mètres de la plage, la résolution des pixels varie entre 0.1 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 échouages sur ce secteur. Le suivi des échouages peut être réalisé avec une bonne précision sur une emprise de 250 m de long sur 100 m de large (Figure 22).

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.

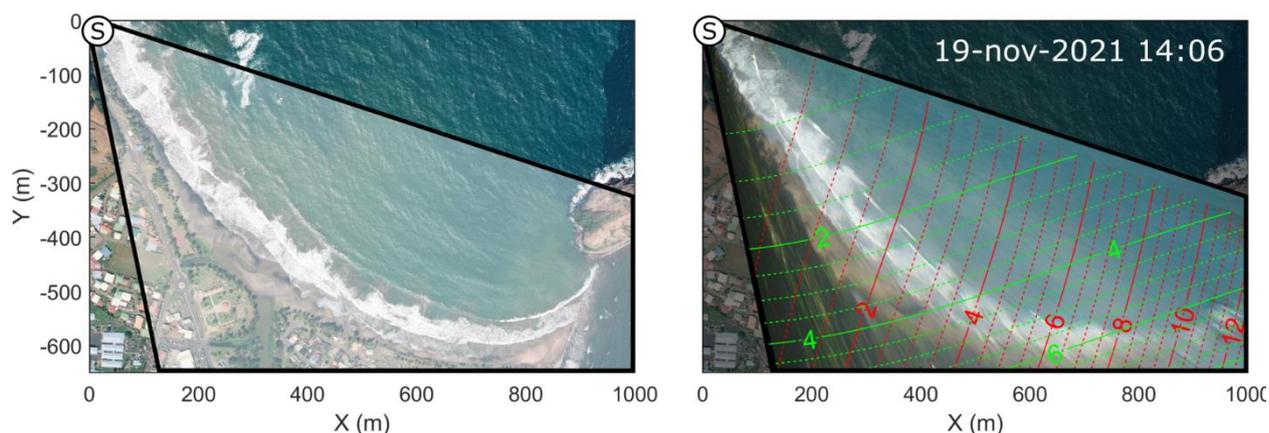


Figure 22 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la plage du bourg à Sainte-Marie. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 19 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image ; en rouge (en vert) dans l'axe longitudinal (transversal), respectivement.

### Détection des sargasses

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 classes différentes (Figure 23). 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 est confondu avec la présence de sargasses). En contournant cette difficulté avec une zone d'intérêt spécifique, nos observations montrent que le modèle de détection présente des résultats satisfaisants pour la majorité des images (Figure 24) avec environ 70 % de réussite (d'après une inspection visuelle sur 100 images choisies de façon aléatoire). Le modèle de détection montre plus de difficultés lorsque la luminosité est faible, en fin de journée ou lorsque le temps est pluvieux.

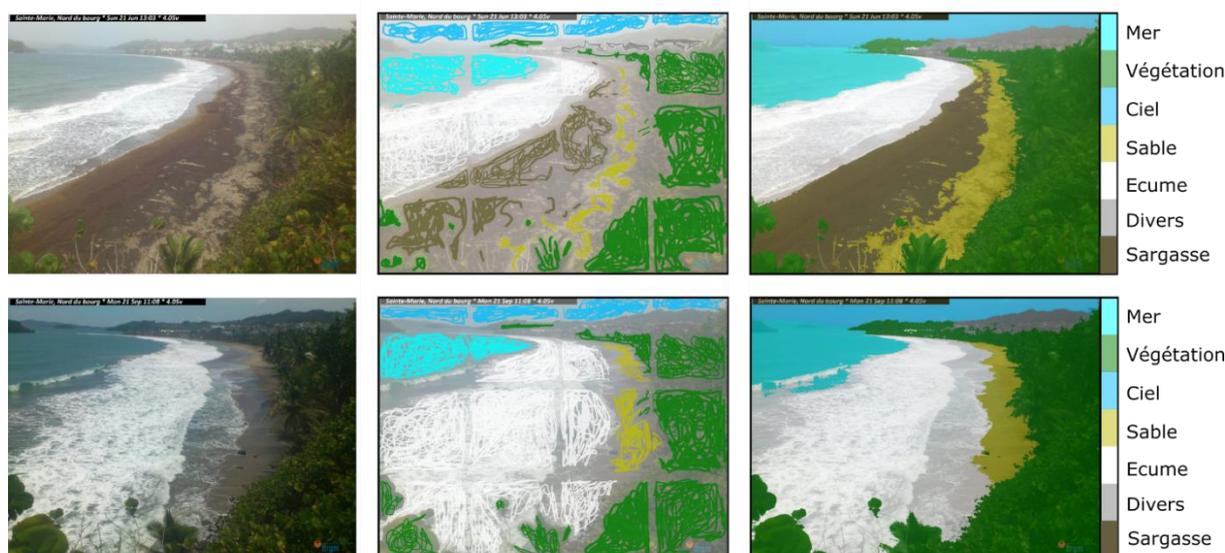


Figure 23 : création du modèle de détection sur le site de Sainte-Marie. A gauche, Images brutes capturées sur la plage du bourg ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.



Figure 24 : 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.

### 3.5.3. Cité du Bac (la Trinité)

#### 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 temporaire de plusieurs cibles permettrait le référencement de l'image et pourrait être envisagée si nécessaire au cours de la deuxième phase du projet.

#### 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 25). 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 la 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, ne sont souvent

pas détectées par le modèle (e.g. le 7 juillet 2021, Figure 26). Cependant, lorsque la quantité de sargasses arrivant à la côte est importante, le modèle parvient à détecter les algues avec une assez bonne précision (e.g. le 5 et le 16 juillet 2021, Figure 26). 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.

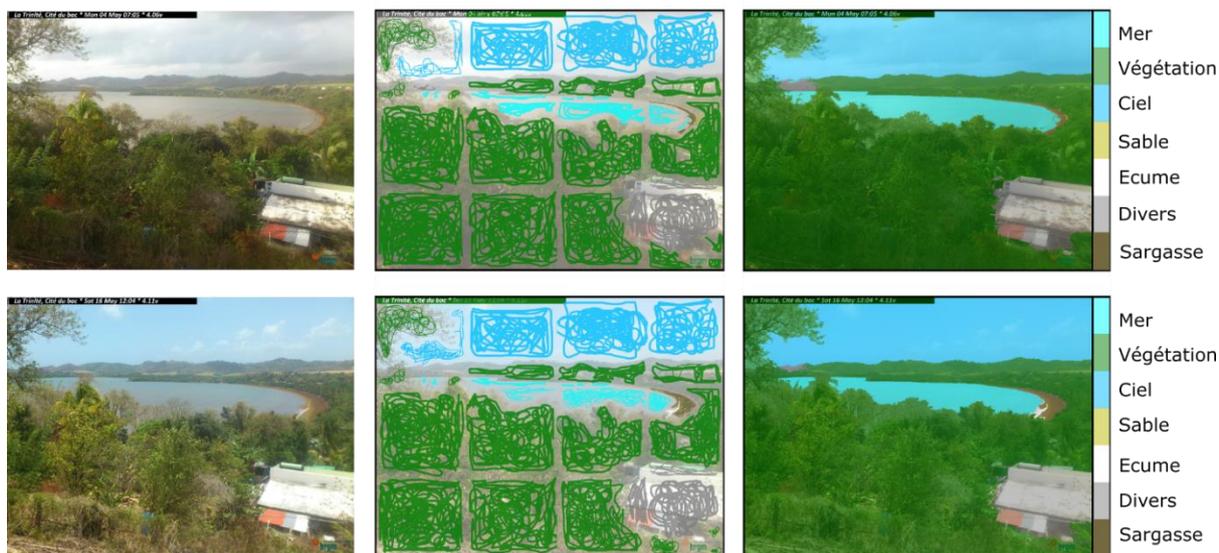


Figure 25 : création du modèle de détection sur le site de la Trinité. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Cité du Bac ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.



Figure 26 : 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.

### 3.5.4. Frégate Est (Le François)

#### 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 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 de long sur 200 m de large dans la direction latitudinale et longitudinale, respectivement (Figure 27). 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 27 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.

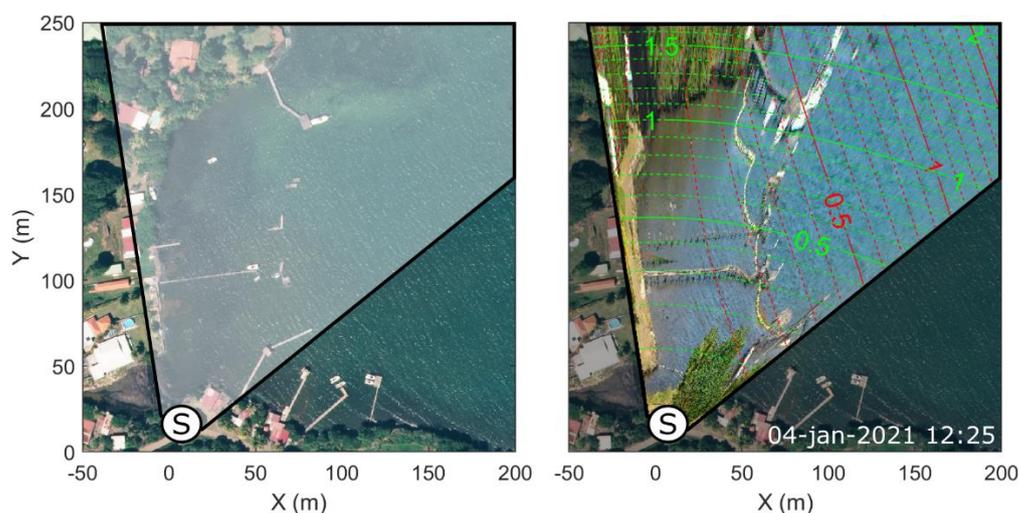


Figure 27 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur le site de Frégate Est au François. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visé de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 4 janvier 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image ; en rouge (en vert) dans l'axe longitudinal (transversal), respectivement.

#### Détection des sargasses

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 28). 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 situées sur un secteur situé à quelques dizaines de mètres au large, au niveau du barrage, est réalisée avec une bonne précision (Figure 29). Ainsi, le modèle de détection présente des résultats satisfaisants sur le secteur du barrage pour plus de 80 % des images (d'après une inspection visuelle sur 100 images choisies de façon aléatoire).

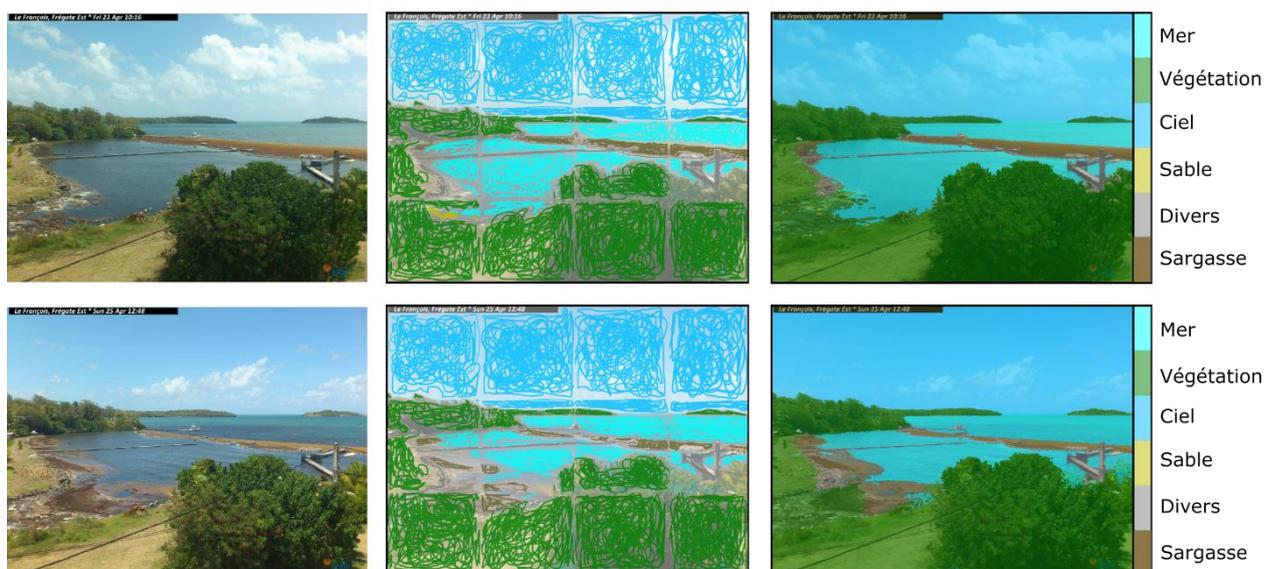


Figure 28 : création du modèle de détection sur le site du François. A gauche, Images brutes capturées sur le barrage à Frégate Est ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.



Figure 29 : 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.

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. Le modèle de détection mis en place parvient à distinguer, avec un bon taux de réussite, le contraste de couleur entre la surface de l'eau et les algues et nous permet de suivre les arrivages de sargasses contre le barrage ainsi que son efficacité (Figure 29).

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

#### Géoréférencement des images

De la même façon que décrit précédemment sur le site de Cité du Bac à la Trinité, les points fixes disponibles qui pourraient permettre la géo-rectification de l'image sont limités sur ce site. La mise en place temporaire de plusieurs cibles pourrait permettre le référencement de l'image et pourrait être envisagée si nécessaire au cours de la deuxième phase du projet.

#### 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 30). 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 31). En revanche la détection automatique des nappes de sargasses arrivant à proximité de la plage avant l'échouage reste possible (e.g. le 14 mai 2021, Figure 31).

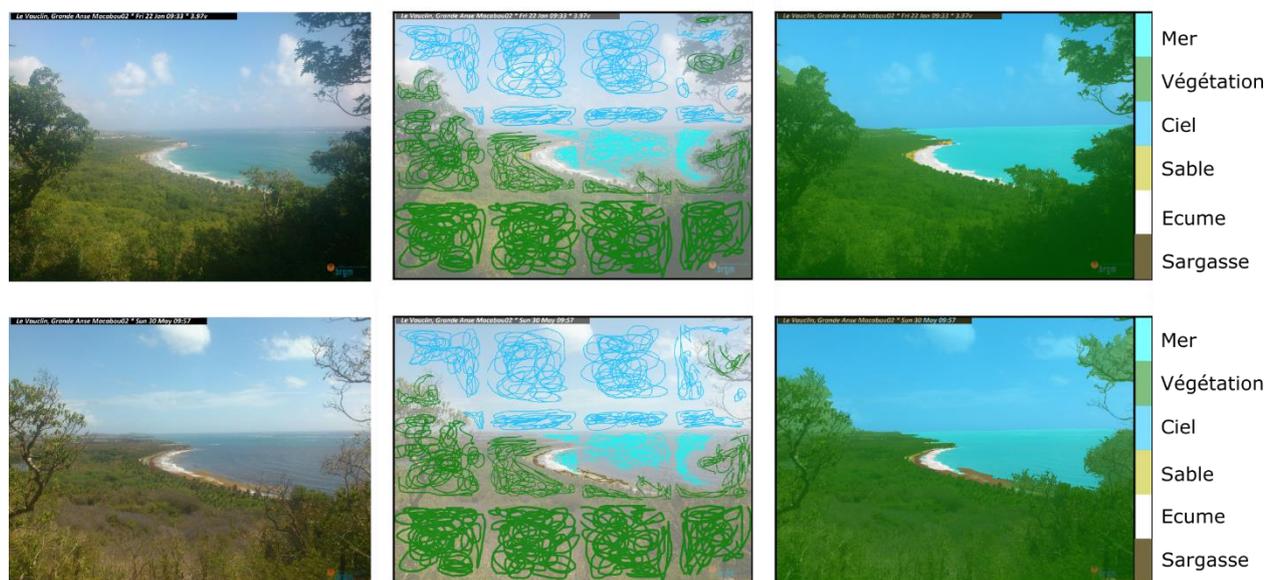


Figure 30 : création du modèle de détection sur le site du Vauclin. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Grande anse Macabou ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par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



Figure 31 : 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.

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 (e.g. le 16 mai 2021, Figure 31). La création d'un nouveau modèle de détection pouvant être réalisé à partir d'une plus grande collection d'image devrait permettre d'améliorer significativement les résultats sur ce site.

### 3.5.6. Morne Larcher (le Diamant)

#### Géoréférencement des images

Installé en bordure de falaise sur le Morne Larcher à une hauteur de 355 m (ngm), la prise de vue 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 3500 m de long sur 1500 m de large dans la direction longitudinale et latitudinale, respectivement (Figure 32). 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 32 à droite). Dans le secteur « proche » du dispositif de suivi, situé sur les 1500 premiers mètres de la baie, la résolution des pixels 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.

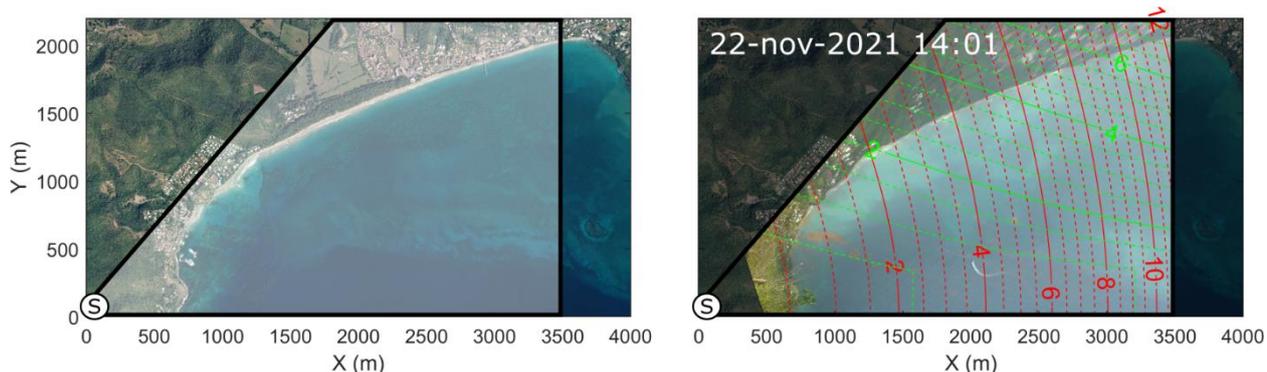


Figure 32 : géo-rectification des images capturées par le dispositif ©Solarcam (S) sur la plage de Dizac. A gauche, image orthophoto (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visée de la caméra. A droite, image ©Solarcam géo-rectifiée du 22 novembre 2021 où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image ; en rouge (en vert) dans l'axe longitudinal (transversal), respectivement.

### Détection des sargasses

Le modèle de détection mis en place pour le suivi de la plage de Dizac au Vauclin s'appuie sur la classification des pixels de l'image en sept classes différentes (Figure 33Figure 20). Le dispositif de suivi est situé à une distance qui varie entre 600 m et 1200 m de la zone d'étude selon le secteur de la plage concernée. La banquette de sargasses occasionnellement 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 16 mai 2021, Figure 34). En revanche la détection automatique des nappes de sargasses arrivant à proximité de l'anse cafard avant l'échouage est plus souvent relevées (e.g. le 1<sup>er</sup> ou le 16 mai 2021, Figure 34).

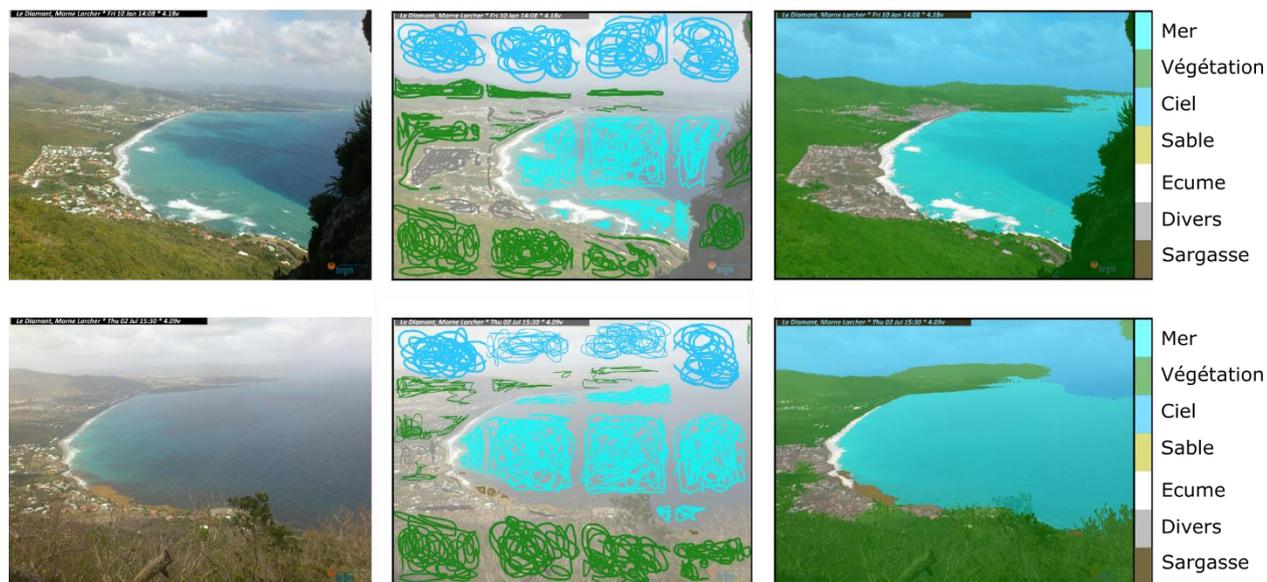


Figure 33 : création du modèle de détection sur le site du Diamant. A gauche, Images brutes capturées sur la plage de Dizac ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, classification automatique de l'image par l'algorithme.

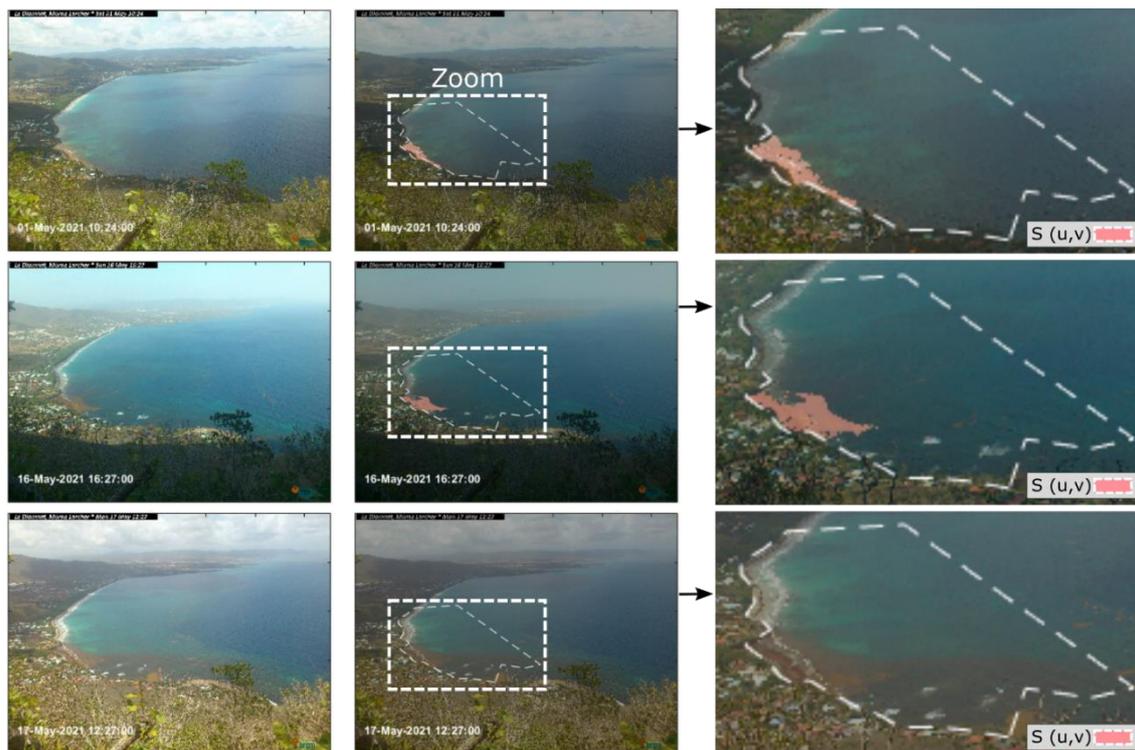


Figure 34 : détection automatique des sargasses  $S(u,v)$  à proximité de la plage de Dizac depuis le Morne Larcher à différentes dates et pour des quantités de sargasses variables en 2021.

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. Comme sur le site de Macabou, les sargasses échouées sur la plage ne sont quasiment jamais détectées par le modèle. Les nappes de sargasses qui sont facilement visibles en mer sont plus souvent bien réalisées même si parfois le modèle ne parvient pas à les identifier (e.g. le 17 mai 2021, Figure 34). De la même manière que vu précédemment sur Macabou, la création d'un nouveau modèle de détection pouvant être réalisé à partir d'une plus grande collection d'image devrait permettre d'améliorer significativement les résultats sur ce site. De nouveaux tests pourront être réalisés pendant la deuxième partie du projet.

## 4. Conclusion

Ce rapport technique s'attache à présenter les sites équipés du dispositif de suivi pour cette nouvelle convention (2020-2022) et détaille le suivi déjà réalisé depuis 2018 en exposant les algorithmes qui ont été développés, notamment concernant la détection des surfaces de sargasses arrivant à proximité des côtes ou échouées sur les plages.

La maintenance du dispositif a été assurée pendant les 17 derniers mois, entre juin 2020 et octobre 2021, sur les 7 sites suivis. Sur cette période, le dispositif de suivi a connu très peu de dysfonctionnement avec en moyenne moins de 5 % d'échec dans l'acquisition des images. Plus de 31 985 images ont pu être sauvegardées, représentant un total de 25 giga-octets.

Les algorithmes développés permettent aujourd'hui de détecter de façon automatique avec une bonne précision la quantité de sargasses échouées ou arrivant à proximité des côtes. Néanmoins, pour deux des six sites sur lesquels ont été réalisés les développements des améliorations sont encore nécessaires. La création de nouveaux modèles de détection pouvant être réalisés à partir d'une plus grande collection d'image devrait permettre d'améliorer significativement les résultats. De nouveaux tests pourront être réalisés pendant la deuxième partie du projet.

Les données à disposition combinées avec les derniers développements réalisés offrent de nombreuses perspectives pour l'amélioration de la compréhension des phénomènes d'échouages (2<sup>ème</sup> phase de l'étude) et une meilleure gestion de ces événements.

## 5. Bibliographie

- 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.*
- 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, 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).
- 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 de Martinique**

4, lot Miramar Route Pointe des Nègres

97200 Fort-de-France

Tél. : 05 96 71 17 70

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



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**