

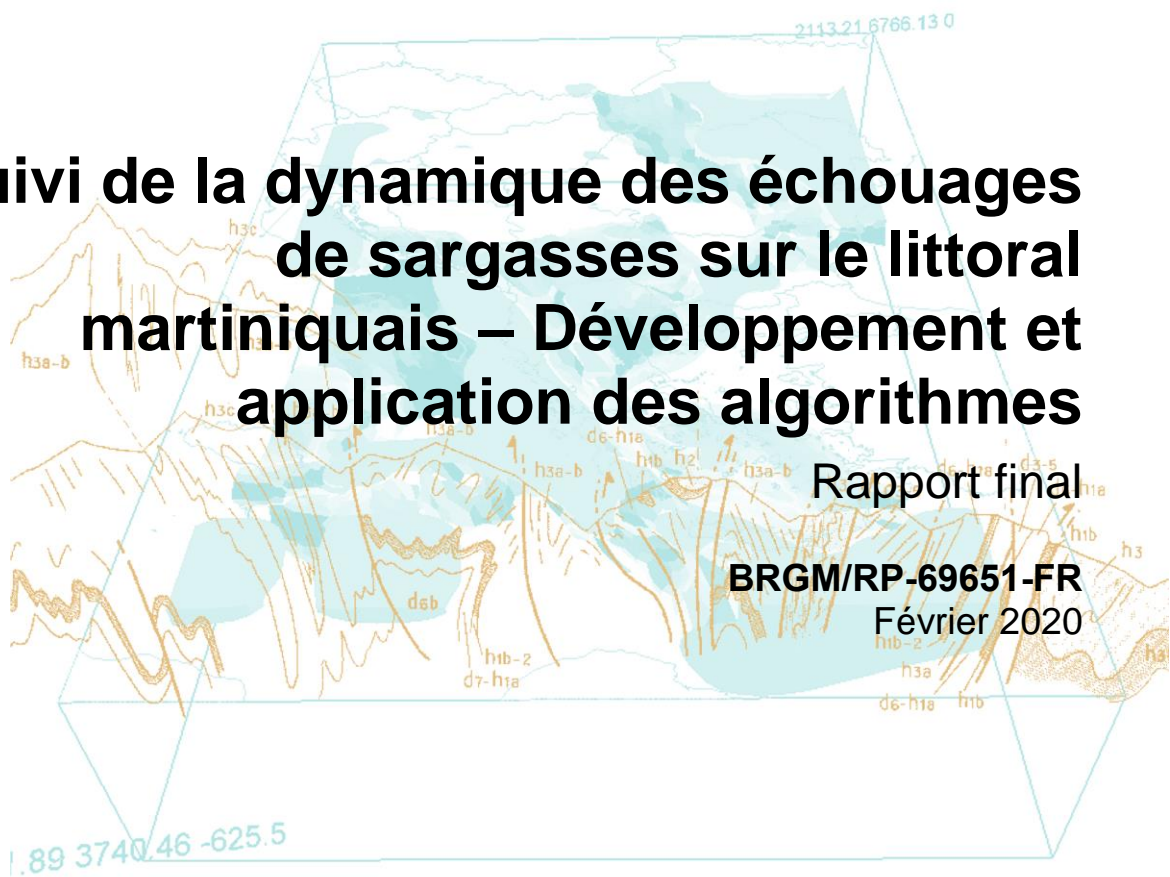


Suivi de la dynamique des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Développement et application des algorithmes

Rapport final

BRGM/RP-69651-FR

Février 2020



Suivi de la dynamique des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Développement et application des algorithmes

Rapport final

BRGM/RP-69651-FR

Février 2020

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Recherche du BRGM 2019 - AP18FDF012

C. Bouvier

Avec la collaboration de

T. De Cathelineau et N. Valentini

Vérificateur :

Nom : Y. Balouin

Fonction : Expert Littoral

Date : 12/02/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : B. Vittecoq

Fonction : directeur régional

Date : 14/02/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : littoral, sargasses, réseau de suivi photographique, érosion, dynamique sédimentaire

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

Bouvier C., De Cathelineau, T. et Valentini, N. (2020) – Suivi de la dynamique des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Développement et application des algorithmes. Rapport final. BRGM/RP-69651-FR, p. 53, ill. 38, tabl.1.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Depuis 2011, des échouages particulièrement massifs de sargasses ont touché les côtes des Antilles, du Brésil et d'Afrique de l'Ouest, avec d'importantes répercussions écologiques, économiques et sanitaires. Les sargasses impliquées dans ces échouages sont des algues brunes pélagiques (*Sargassum natans* et *Sargassum fluitans*) 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.

Afin d'améliorer la connaissance et la compréhension des échouages de sargasses et leur impact sur le littoral, 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 général de ce projet vise à expérimenter un suivi des échouages de sargasses par un réseau de caméras autonomes. Ce réseau doit permettre de suivre l'évolution des arrivages et des échouages à distance et en continu afin d'informer en temps réel les autorités en charge de leur gestion. Par ailleurs, il s'agit également de mieux connaître les phénomènes d'échouage en domaine proche côtier ainsi que d'évaluer les techniques de collecte et leurs impacts sur les plages. Ce suivi vise donc aussi à caractériser l'impact des échouages et de leur gestion à travers l'analyse de l'évolution du trait de côte.

Le réseau de suivi mis en place est opérationnel depuis décembre 2018 et permet de couvrir les principales façades exposées aux échouages sur le littoral martiniquais. Parmi les 15 sites suivis, neuf correspondent à des littoraux urbanisés (fond de baie ou port) et six à des plages sableuses. 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. L'algorithme développé est capable de détecter de façon fidèle la présence de sargasses même si la série temporelle comporte quelques lacunes souvent associées à des images où la visibilité sur site est très réduite (faible luminosité, buée sur l'objectif).

Sur la période de suivi, les résultats obtenus mettent en évidence une dynamique très variée des mécanismes naturels d'arrivages de sargasses ou au contraire d'expulsion des algues échouées par la mer. Les nouveaux arrivages de sargasses peuvent s'étaler sur plusieurs jours et sont alors à l'origine d'une forte augmentation des surfaces échouées sur la plage. Au contraire, des épisodes ponctuels de fortes houles peuvent venir remanier les sargasses présentes en domaine proche côtier et entraînent généralement une diminution brutale des surfaces à l'échelle d'un événement de tempête. Au vu de la complexité observée concernant la dynamique des échouages de sargasses, la mise en place d'un système d'alerte en temps réel est essentielle pour une meilleure gestion du risque d'échouage de sargasse. Le système d'alerte mis en place sur les trois sites pilotes offre de nombreuses perspectives pour une meilleure gestion du risque d'échouage ou d'arrivage de sargasses en Martinique et plus généralement dans les Antilles.

Afin de mieux caractériser les impacts de ces échouages sur les plages, les positions des différents traits de côtes sont extraites à partir des images obtenues sur les plages au nord du bourg à Sainte Marie et de Grande Anse Macabou au Vauclin. Alors que l'évolution du trait de côte sur la plage de Sainte Marie présente une dynamique très marquée, la plage de Grande Anse Macabou apparaît nettement plus stable au cours du temps même si certains épisodes de fortes vagues entraînent le recul du trait de côte sur plusieurs mètres. Sur la plage de Sainte Marie, l'évolution du trait de côte semble parfois influencée par la quantité d'algues échouées.

Les résultats présentés suggèrent alors un rôle protecteur des sargasses sur la problématique d'érosion du littoral. Aussi, la répétition des situations de fortes vagues avec ou sans la présence de sargasses pourra nous apporter dans le futur des informations complémentaires et venir confirmer ce résultat.

De façon plus générale, les résultats de ce projet démontrent qu'un suivi local site par site est indispensable au vue de la complexité du phénomène. Ce suivi doit non seulement être réalisé en appui (en terme d'images brutes) pour la validation des prévisions d'échouages ou pour l'organisation des ramassages mais surtout pour permettre de poursuivre la communication d'une information quantitative en temps réel sous la forme d'une alerte ou de chroniques d'échouages. De plus, les données de surface de sargasses détectées à proximité des côtes ou échouées sur la plage sont indispensables pour mieux comprendre les mécanismes d'échouages et permettent d'envisager de nombreuses perspectives de gestion (organisation d'un ramassage adéquat, dimensionnement des engins de collecte, suivi de l'efficacité d'un barrage). Enfin la poursuite du réseau de suivi permettra à terme de mieux qualifier le rôle des sargasses sur les évolutions du trait de côte.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE	11
1.2. OBJECTIFS.....	13
2. Présentation du dispositif de suivi et choix des sites pilotes.....	15
2.1. DISPOSITIF DE SUIVI	15
2.2. SELECTION DES SITES ET INSTALLATION DU DISPOSITIF	15
2.3. DETERMINATION DES SITES PILOTES	17
2.3.1. Bourg du Marigot.....	17
2.3.2. Plage nord du bourg de Sainte-Marie	18
2.3.3. Grande Anse Macabou, Le Vauclin.....	18
3. Développement des algorithmes et données complémentaires	19
3.1. DEVELOPPEMENT DES ALGORITHMES	19
3.1.1. Géoréférencement des images	19
3.1.2. Détection des sargasses	20
3.1.3. Détection du trait de côte	22
3.2. DONNEES COMPLEMENTAIRES.....	23
3.2.1. Données météorologiques	23
3.2.2. Données marégraphiques	24
3.2.3. Régime de houle le long du littoral	24
4. Analyse des résultats.....	27
4.1. DYNAMIQUE DES ECHOUAGES ET ARRIVAGES DE SARGASSE.....	27
4.1.1. Le bourg du Marigot	27
4.1.2. Plage au nord du bourg de Sainte Marie.....	30
4.1.3. Plage de Grande Macabou au Vauclin.....	33
4.1.4. Comparaison inter-sites	35
4.2. FONCTIONNEMENT ET EFFICACITE DU SYSTEME D'ALERTE.....	37
4.2.1. Description du dispositif en place	38
4.2.2. Efficacité du système d'alerte et perspectives.....	39
4.3. DYNAMIQUE DU TRAIT DE COTE	42
4.3.1. Plage au nord du bourg à Sainte Marie.....	43
4.3.2. Plage de Grande Anse Macabou au Vauclin.....	44
4.3.3. Impact des échouages sur la dynamique du trait de côte	45
5. Discussion et conclusion	49
6. Bibliographie	53

Liste des illustrations

- Illustration 1 : a) Evolution temporelle de la couverture spatiale (km²) de sargasses dans la mer des Caraïbes et la zone Atlantique équatoriale (moyenne annuelle). b) Densité moyenne (%) de sargasses pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre sur la période 2011-2017. c) Densité moyenne (%) mensuelle de sargasses pour le mois de juillet entre 2011 et 2018. Illustration extraite de Wang et al., 2019..... 12
- Illustration 2 : Photographies aériennes montrant un échouage de sargasses sur la commune du François (Frégate Est). Photographies prise par la DEAL le 08 mars 2018. 13
- Illustration 3 : a) Localisation des sites équipés d'un dispositif de suivi vidéo. b) Exemple de localisation du dispositif sur le site de Grande Anse Macabou au Vauclin. c) Image capturée par le dispositif de suivi sur le site de Grande Anse Macabou révélant un échouage massif de sargasses le 15 avril 2019..... 16
- Illustration 4 : Synthèse des acquisitions vidéo en nombre de photos par jour sur les différentes caméras. 17
- Illustration 5 : Localisation du dispositif et prise de vue au bourg du Marigot. 17
- Illustration 6 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie. 18
- Illustration 7 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. 18
- Illustration 8 : 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. 19
- Illustration 9 : De la gauche vers la droite : images brutes (vue oblique), rectifiées (vue en plan) et résolution des pixels de l'image pour le dispositif en place en place sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Les couleurs expriment la résolution des pixels de l'image dans la direction de l'axe parallèle à celui de la plage (Y) tandis que la couleur correspond la résolution dans l'axe transversal (X)..... 20
- Illustration 10 : 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. La surface de sargasses calculée automatiquement par la méthode de détection atteint plus de 3000 m². 21
- Illustration 11 : Interface de traitement des images développée par le BRGM..... 22
- Illustration 12 : Caractéristiques du vent à la Trinité depuis novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence des vitesses de vent moyen (W_v en m/s).24
- Illustration 13 : a) Niveau d'eau (nz) mesuré à Fort de France depuis le 01 novembre 2018 (1 an de mesure). b) Marées hautes et marées basses enregistrées à Fort de France au début du mois d'octobre. Les niveaux d'eau sont données par rapport au zéro hydrographique. 24
- Illustration 14 : Caractéristiques des vagues à Basse pointe depuis novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence de la hauteur significative des vagues (H_s). 25
- Illustration 15: (en haut) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses à Marigot bourg. Les différentes couleurs représentent les proportions des différentes classes d'intérêt (algue, bâti, écume, ciel, végétation, eau) déterminées par le modèle. (en bas) Exemple d'une image brute capturée le 07 juillet 2019 (à gauche) et de sa transformée (à droite) résultant du modèle de

	classification. L'axe x_{uv} représente la ligne de pixel utilisé pour l'obtention du timestack (Illustration 17b).	28
Illustration 16 :	Séquence illustrant un arrivage massif de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur le site du bourg du Marigot. La densité de probabilité de présence de sargasses dépasse 75 % le 4 mai 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme atteint alors plus de 4000 m ²	28
Illustration 17 :	a) Evolution des surfaces (en noir) et du nombre de pixel (en gris clair) de sargasses détectés à partir du modèle de segmentation sur le site du bourg du Marigot. Le trait rouge correspond au signal filtré (Savitzky and Golay, 1964). b) Représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses sur un profil x_{uv} le long de la digue (cf. Illustration 15) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.	29
Illustration 18 :	Séquence illustrant le renouvellement de la masse d'eau sur le site du bourg du Marigot suite à un épisode de vagues particulièrement énergétique le 24 avril 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme réduit en quelques heures de plus de 3000 m ²	30
Illustration 19 :	(en haut) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses à Sainte Marie, Plage Nord. Les différentes couleurs représentent les proportions des différentes classes d'intérêt (algue, bâti, écume, ciel, végétation, eau) déterminées par le modèle. (en bas) Exemple d'une image brute capturée le 11 juillet 2019 (à gauche) et de sa transformée (à droite) résultant du modèle de classification. L'axe x_{uv} représente la ligne de pixel utilisé pour l'obtention du timestack (Illustration 21b).	31
Illustration 20 :	Ramassage des sargasses entre le 20 aout et le 02 septembre 2019 sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie.	31
Illustration 21 :	a) Evolution des surfaces (en noir) et du nombre de pixel (en gris clair) de sargasses détectés à partir du modèle de segmentation sur le site de Sainte Marie, Plage Nord. Le trait rouge correspond au signal filtré (Savitzky and Golay, 1964). b) Représentation visuelle (timestack) des échouages de sargasses sur un profil x_{uv} le long de la digue (cf. Illustration 19) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.	32
Illustration 22 :	Séquence illustrant la dégradation progressive des sargasses échouées sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie entre le 27 juillet et le 6 aout 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme réduit progressivement en une semaine (5000 m ² en moins), notamment suite au coup de mer du 04 aout.	32
Illustration 23 :	(en haut) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Les différentes couleurs représentent les proportions des différentes classes d'intérêt (algue, bâti, écume, ciel, végétation, eau) déterminées par le modèle. (en bas) Exemple d'une image brute capturée le 07 juillet 2019 (à gauche) et de sa transformée (à droite) résultant du modèle de classification. L'axe x_{uv} représente la ligne de pixel utilisé pour l'obtention du timestack (Illustration 24b).	33
Illustration 24 :	a) Evolution des surfaces (en noir) et du nombre de pixel (en gris clair) de sargasses estimée à partir du modèle de segmentation sur le site de Grande Anse Macabou au Vauclin. Le trait rouge correspond au signal filtré (Savitzky and Golay, 1964). b) Représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses sur un profil x_{uv} le long de la digue (cf. Illustration 23) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.	34
Illustration 25 :	Séquence illustrant la réduction brutale de la quantité de sargasses échouées sur la plage de grande Anse Macabou suite au passage des épisodes de vagues du 28 septembre et du 27 octobre 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme réduit en quelques heures de plus de 2000 m ²	35

- Illustration 26: Évolution temporelle a) de la vitesse et direction du vent mesurées à la trinité (w_v et D_{wind} respectivement), b) de la hauteur significative et direction des vagues mesurées à Basse Pointe (H_s et D_{wave} respectivement). (c-d) Evolution des surfaces de sargasses exprimés en m^2 sur les trois sites étudiés entre janvier et novembre 2019. Les points noirs représentent le calcul ponctuel des surfaces et la courbe rouge le signal filtré (polynome de degré 4 sur 21 points, Savitzky and Golay, 1964). 37
- Illustration 27 : Exemple de mail envoyé pour une alerte déclenchée sur le site du bourg du Marigot le 09 septembre 2019. La surface de sargasses estimée par l’algorithme atteint plus de $2500 m^2$ 39
- Illustration 28 : Evolution des surfaces de sargasses exprimées en m^2 sur les trois sites étudiés entre janvier et novembre 2019. Les points noirs représentent le calcul ponctuel des surfaces et la courbe rouge le signal filtré (polynome de degré 4 sur 21 points, Savitzky and Golay, 1964). Les cercles verts correspondent aux dates des alertes déclenchés par l’option n°1 (Eq. 2) et les croix noires entourées d’un cercle correspondent aux alertes déclenchées par l’option n°2 (Eq. 3). 40
- Illustration 29 : Series d’images illustrant l’efficacité du système d’alerte sur le site du bourg du Marigot (3 derniers déclenchements sur la période de suivi). Le seuil d’alerte a été fixé à $2800 m^2$ 40
- Illustration 30 : Series d’images illustrant l’efficacité du système d’alerte sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie (un seul déclenchement sur la période de suivi). Le seuil d’alerte a été fixé à $4000 m^2$ 41
- Illustration 31 : Series d’images illustrant l’efficacité du système sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin d’alerte (3 derniers déclenchement sur la période de suivi). Le seuil d’alerte a été fixé à $4000 m^2$ 42
- Illustration 32 : Images rectifiées des deux sites étudiés pour la dynamique du trait de côte (a) la plage au nord du bourg (Sainte Marie) et (b) Grande Anse Macabou (Vauclin). Les positions du trait de côte (X_{tdc}) extraites au moment de la prise de vue le 14 octobre 2019 sont superposées en noir. Les positions d’équilibre théoriques (X_{tdceq}) sont représentées par la ligne rouge continue. 43
- Illustration 33 : Dynamique du trait de côte sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie. a) Hauteur significative des vagues (H_s) mesurée à Basse Pointe et b) évolution de la largeur de plage moyenne calculée par rapport à la position d’équilibre (Illustration 32a), avec en traits épais la composante filtré (polynome de degré 4 sur 15 jours, Savitzky and Golay, 1964). 44
- Illustration 34 : Séquences illustrant la dynamique naturelle du trait de côte sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie avec une première phase d’accrétion (en haut) entre le 15 juillet et le 15 septembre (la plage s’élargit sur plus de 30 m) et une phase d’érosion (en bas). La succession des épisodes de fortes vagues entre le 15 septembre et le 15 octobre provoque le rétrécissement de la largeur de plage sur plus de 30 m. 44
- Illustration 35 : Dynamique du trait de côte sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. a) Hauteur significative des vagues (H_s) mesurée à Basse Pointe et b) évolution de la largeur de plage moyenne calculée par rapport à la position d’équilibre (Illustration 32a), avec en traits épais la composante filtré (polynome de degré 4 sur 15 jours, Savitzky and Golay, 1964). 45
- Illustration 36 : Séquence illustrant le recul du trait de côte sur la plage du Grande Anse Macabou entre le 15 juillet et le 1^{er} octobre. La succession des épisodes de fortes vagues comme le 28 septembre provoque la réduction de la largeur de plage sur plus de 15 m. 45
- Illustration 37 : a) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses (rose) sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie. b) Hauteur significative des vagues (H_s) mesurée à Basse Pointe et c) évolution de la largeur de plage moyenne

par rapport à la position d'équilibre. Les évènements S1 et S2 sont marqués par des cercles en pointillés rouges..... 46

Illustration 38 : Séquence illustrant la réponse contrastée du trait de côte sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie suite aux épisodes de fortes vagues (S1 en haut et S2 en bas). Une quantité importante de sargasses échouées sur la plage est visible avant l'épisode S1 du 27 aout 2019. 46

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) a pour mission la gestion collective et territoriale des déchets, dont les sargasses font partie une fois ramassées. La gestion intégrée, raisonnée et durable du littoral fait également partie des missions de la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL). Enfin, le BRGM, Service Géologique National, a également parmi ses missions l'amélioration de la connaissance de la dynamique du trait de côte, le suivi du littoral et la caractérisation des pollutions. Dans ce cadre, les problématiques de dynamique des plages (érosion/accrétion, mobilité du trait de côte) et celles des sargasses constituent un enjeu commun.

Depuis 2011, des échouages particulièrement massifs de sargasses ont touché les côtes des Antilles, du Brésil et d'Afrique de l'Ouest, avec d'importantes répercussions écologiques, économiques et sanitaires (Partlow and Martinez, 2015). Les sargasses impliquées dans ces échouages sont des algues brunes pélagiques (*Sargassum natans* et *Sargassum fluitans*) qui se développent en haute mer et se déplacent sous l'effet des courants de surface grâce à leur capacité de flottaison (Franks et al., 2015).

En relation avec ces échouages, on observe depuis 2011 la prolifération importante de ces algues (bloom) à travers l'Océan Atlantique Central, 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 ». 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'Amazonie 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). Les observations satellites récentes suggèrent qu'une prolifération récurrente de sargasses dans l'Atlantique Central et la mer des Caraïbes pourrait devenir une nouvelle norme.

En raison de la prolifération rapide des Sargasses dans l'Atlantique Central et la mer des Caraïbes, la Martinique et plus largement l'arc antillais font donc face à un phénomène d'échouages périodique et massif d'algues sargasses, plus ou moins conséquent selon les années. Les communes de la façade Atlantique et de la façade Sud Caraïbe de la Martinique sont particulièrement exposées.

A proximité immédiate des côtes, les algues s'accumulent, s'échouent et entrent en décomposition dans la zone littorale. Cette décomposition libère des gaz malodorants et incommodants avec en particulier le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'ammoniac (NH_3) qui peuvent avoir des impacts sanitaires sur les populations exposées. La grande quantité d'algues échouées perturbe les environnements marins, avec des impacts directs sur les milieux littoraux (herbiers, récifs, mangroves ou plages) ainsi que sur la faune et la flore (formation de zone anoxique, enrichissement en matière organique). De plus, les échouages récurrents de sargasses ont aussi des effets sur les activités économiques et de loisirs tels que le tourisme, le transport et la pêche. Enfin, l'impact du dépôt des sargasses et de leur ramassage vis-à-vis de la dynamique sédimentaire des plages reste également mal connu.

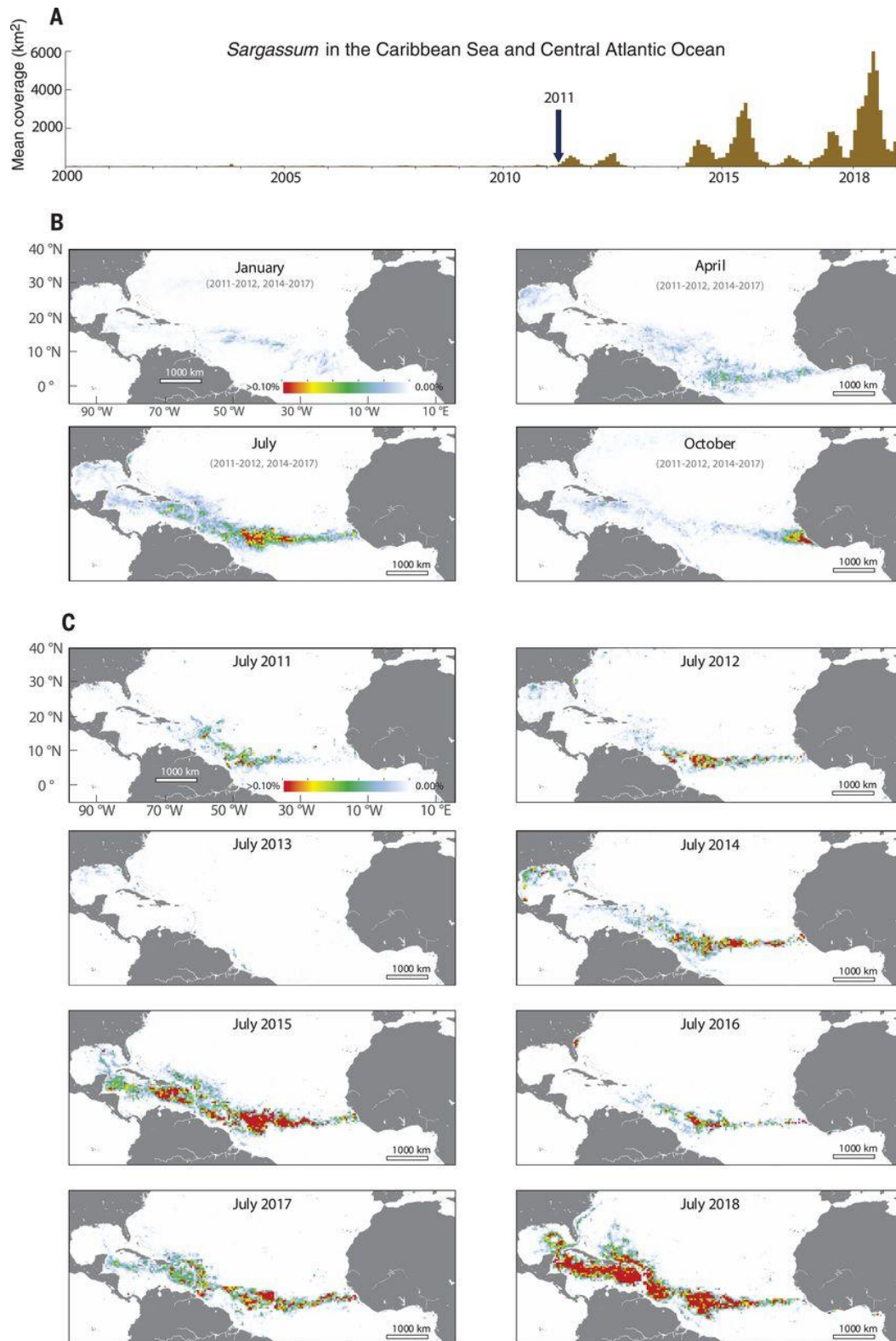


Illustration 1 : a) Evolution temporelle de la couverture spatiale (km²) de sargasses dans la mer des Caraïbes et la zone Atlantique équatoriale (moyenne annuelle). b) Densité moyenne (%) de sargasses pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre sur la période 2011-2017. c) Densité moyenne (%) mensuelle de sargasses pour le mois de juillet entre 2011 et 2018. Illustration extraite de Wang et al., 2019.



Illustration 2 : Photographies aériennes montrant un échouage de sargasses sur la commune du François (Frégate Est). Photographies prise par la DEAL le 08 mars 2018.

Un suivi du phénomène est donc primordial pour la mise en place d'un dispositif de gestion efficace. Actuellement, le système de suivi se base sur l'exploitation d'images satellites couplées à des modèles de prévision des courants marins de surface pour estimer la dérive des bancs de sargasses et anticiper les échouages. Depuis 2019, les dispositifs de suivi ont été mutualisés entre les Antilles françaises et la Guyane, sous la responsabilité de Météo-France, qui produit un bulletin hebdomadaire de prévision du risque d'échouage. Toutefois, ce système ne permet pas de définir précisément les quantités et les lieux d'échouage en raison de la résolution spatiale (précision des images) et temporelle (période de revisite, visibilité) des images satellites, ou de la résolution des modèles de prévision des courants.

Afin d'améliorer la connaissance et la compréhension des échouages de sargasses et leur impact sur le littoral, l'ADEME, le BRGM et la DEAL souhaitent développer des outils d'observation visant à mieux suivre et gérer le littoral martiniquais. Une démarche conjointe est également en cours en Guadeloupe avec comme objectif de mutualiser et coordonner les savoir-faire, moyens et méthodes mises en œuvre.

1.2. OBJECTIFS

L'objectif général de ce projet vise à expérimenter un suivi des échouages et arrivages de sargasses par un réseau de caméras autonomes. Ce réseau doit permettre de suivre l'évolution des échouages et arrivages à distance et en continu afin d'informer en temps réel les autorités en charge de leur gestion.

Par ailleurs, il s'agit également de mieux connaître les phénomènes d'échouages en domaine proche côtier ainsi que d'évaluer les techniques de collecte et leurs impacts sur les plages. En effet, certaines techniques de collecte utilisées peuvent contribuer à fragiliser l'équilibre sédimentaire en raison des prélèvements de sable associés, pouvant se caractériser par un abaissement du profil de plage et un recul du trait de côte. A l'inverse, les dépôts de sargasses peuvent également jouer un rôle de protection en favorisant le maintien du sable et en atténuant les effets de la houle sur le littoral. Ce suivi vise donc aussi à caractériser l'impact des échouages et de leur gestion à travers l'analyse de l'évolution du trait de côte sur les sites étudiés.

Les objectifs spécifiques de ce projet sont les suivants :

- déployer sur quinze plages (ou sites) un dispositif de suivi continu par imagerie vidéo ;
- développer des algorithmes semi-automatisés de détection (sargasses, trait de côte) et de calcul de surface d'échouage de sargasses ;
- appliquer les algorithmes sur deux des plages instrumentées ;
- concevoir une chaîne d'alerte et de suivi en temps réel.

Le programme d'étude est décomposé en trois phases :

- (1) choix des sites, installation et maintenance du matériel sur 15 sites ;
- (2) développement méthodologique des algorithmes de traitement des images et conception d'une chaîne d'alerte en temps réel ;
- (3) démonstration des résultats sur deux sites pilotes.

Un premier rapport a permis de dresser le bilan de la première phase du projet consacrée au déploiement du système de suivi vidéo sur les quinze sites retenus (rapport BRGM/RP-69071-FR). Les phases 2 et 3, font l'objet du présent rapport, et ont permis de développer les algorithmes de traitement et de tester la chaîne d'alerte sur des sites pilotes prédéterminés. Un bilan des résultats concernant l'analyse de l'évolution des échouages et du trait de côte en lien avec l'impact potentiel des techniques de collecte sera présenté. Le bilan devra également permettre de résumer les principaux avantages et limites du dispositif ainsi que les différentes perspectives pour le développement d'un réseau de suivi opérationnel.

2. Présentation du dispositif de suivi et choix des sites pilotes

2.1. DISPOSITIF DE SUIVI

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 de sargasses sont les outils associés à l'imagerie vidéo. Les instruments peuvent être embarqués sur des satellites, ou plus localement sur des véhicules aéroportés (hélicoptère). 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 très 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 Sargasse. Les systèmes fixés de manière permanente sur des plateformes 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. Aarninkhof et al., 2003; Lippmann and Holman, 1989; Van Enckevort and Ruessink, 2001).

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). 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 de 8 mega pixel 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 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.

2.2. SELECTION DES SITES ET INSTALLATION DU DISPOSITIF

Le réseau de suivi est opérationnel depuis décembre 2018. La répartition des caméras permet ainsi de couvrir les principales façades exposées aux échouages sur le littoral martiniquais (Illustration 3a). Bien que le réseau ne soit pas exhaustif, cette répartition permet de recueillir des informations représentatives sur les façades exposées aux échouages. Les sites sélectionnés ont été choisis en fonction de leur adaptabilité d'un point de vue technique par rapport aux contraintes liées au fonctionnement du dispositif et aux objectifs du suivi, non en raison d'enjeux sanitaires ou économiques éventuels. Parmi ces 15 sites, neuf correspondent à des littoraux urbanisés (fond de baie ou port) et six à des plages sableuses. Ainsi sur les littoraux urbanisés, les sites suivis sont : le bourg du Marigot (01), port Cosmy (03) et cité du bac à la Trinité (04) ; Pointe Savane (05), Pontaléry (06) et Pointe Sable Blanc (07) au Robert ; Presqu'île (8) et

Frégate Est (9) au François ; et enfin Pointe Jacob (10) au Vauclin. Parmi les littoraux non urbanisés, le dispositif de suivi permet de suivre les plages : au nord du bourg de Sainte-Marie (02) ; de la Pointe Faula (11) et Grande Anse Macabou (12) au Vauclin ; Anse Michel (13), Anse Cafard (14) et Morne Larcher (15) au Diamant. Chacun des sites du réseau de suivi a été décrit dans le rapport de la phase 1 du projet (BRGM/RP-69071-FR). Les photographies des sites suivis sont rassemblées et visualisables en temps réel sur une page internet dédiée mise en place dans le cadre de ce projet (accès sur demande auprès de la DEAL).

Sur les 12 premiers mois de fonctionnement, le nombre d'intervention technique est relativement important (38 interventions, soit environ 3 par mois), permettant d'assurer une récupération des images à hauteur de 85 % en moyenne (Illustration 4). Certains sites présentent une vulnérabilité plus importante que d'autres comme à la Pointe Faula au Vauclin en raison notamment de difficultés liées au réseau mobile ou à des problèmes d'alimentation solaire. De la même façon, des images n'ont pas pu être transférées pour le site de Presqu'île au François en raison d'un signal trop faible du réseau mobile 3G de février à avril 2019. Les principaux facteurs jouant sur la performance des caméras sont d'ailleurs souvent reliés à l'instabilité du réseau 3G et à l'alimentation solaire (connectiques souvent endommagés). De plus, lorsque que les conditions météorologiques sont défavorables, à cause de la pluie ou de l'exposition aux embruns, les images peuvent être ponctuellement inexploitable. Reste désormais à suivre la pérennité de ce dispositif sur une période plus longue et notamment l'exposition continue du matériel à des fortes chaleurs, une humidité importante, à des embruns ou des vents violents au cours de la saison cyclonique. La seconde menace est liée aux émissions de sulfure d'hydrogène H₂S rejetées par la décomposition des sargasses pouvant provoquer une oxydation des métaux et donc un dysfonctionnement électronique du dispositif sur le long terme. Le système déployé est en évolution constante (passage à la 4G, panneaux solaires plus résistants à la corrosion, ...) et pourrait permettre à terme d'optimiser le temps de maintenance.

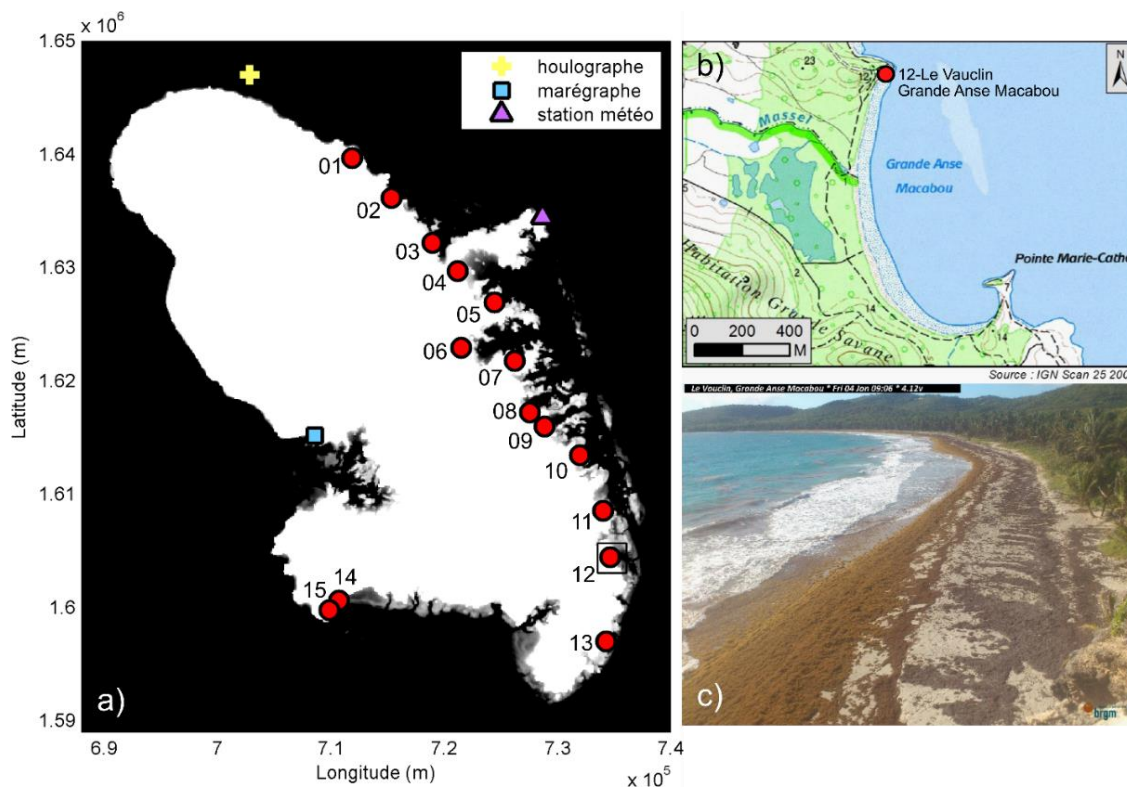


Illustration 3 : a) Localisation des sites équipés d'un dispositif de suivi vidéo. b) Exemple de localisation du dispositif sur le site de Grande Anse Macabou au Vauclin. c) Image capturée par le dispositif de suivi sur le site de Grande Anse Macabou révélant un échouage massif de sargasses le 15 avril 2019.

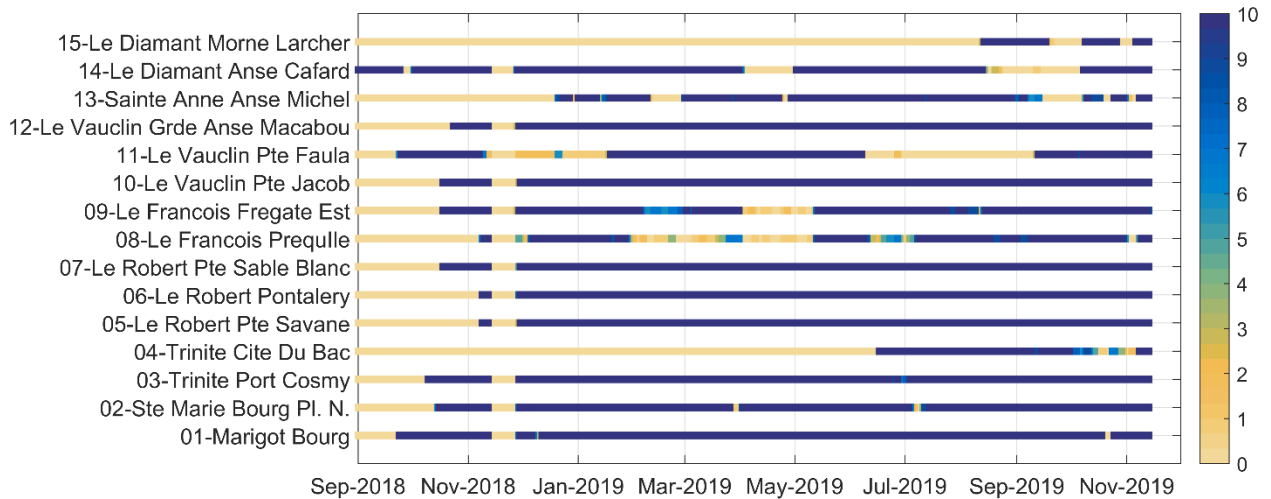


Illustration 4 : Synthèse des acquisitions vidéo en nombre de photos par jour sur les différentes caméras.

2.3. DETERMINATION DES SITES PILOTES

L'un des objectifs de cette étude étant la détection automatique des échouages et arrivages de sargasses, le choix des sites pilotes a été orienté vers des environnements qui présentaient une occurrence des échouages importante pendant la période de suivi entre janvier 2019 et novembre 2019. Ainsi, trois sites ont été choisis pour le développement des algorithmes et la phase de test : (1) le site du bourg du Marigot, (2) la plage au nord du bourg de Sainte-Marie et (3) la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Ces deux derniers ont également pu faire l'objet d'une analyse de l'évolution du trait de côte.

2.3.1. Bourg du Marigot

Le dispositif a été déployé le 24 septembre 2018 sur un poteau en bois à une hauteur d'environ 20 m. 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). Mis à part une panne généralisée sur le réseau fin novembre 2018 (problème de connexion au serveur), le dispositif mis en place au bourg du Marigot a connu très peu de disfonctionnement. Le système a dû être changé le 18 Octobre 2019 pour des problèmes d'alimentation sur la batterie.



Illustration 5 : Localisation du dispositif et prise de vue au bourg du Marigot.

2.3.2. Plage nord du bourg de Sainte-Marie

Sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie, le dispositif a été installé le 15 octobre 2018, sur un arbre situé en bordure d'un terrain escarpé à environ 30 m de hauteur au nord de la plage visée. La position et l'angle de champ du dispositif garantissent le suivi des échouages de sargasses. En revanche, la position du jet de rive a été masquée sur toute la première partie de la période de suivi par la présence des arbres sur la falaise côtière, au premier plan sur la photographie (Illustration 6). L'élagage et le débardage des arbres obstruant la vue a été réalisé le 19 avril 2019.



Illustration 6 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie.

2.3.3. Grande Anse Macabou, Le Vauclin

La plage de Grande Anse Macabou, partagée par les communes du Vauclin et du Marin, fait l'objet d'un suivi vidéo depuis le 24 octobre 2018. Le dispositif a été installé sur le sol, au sommet de la falaise, surplombant la plage au nord (Illustration 7). À une hauteur d'environ 20 m, le dispositif permet d'obtenir une vue générale et plongeante sur le site, avec une orientation perpendiculaire adéquate pour le suivi du trait de côte ou le suivi des échouages de sargasses.

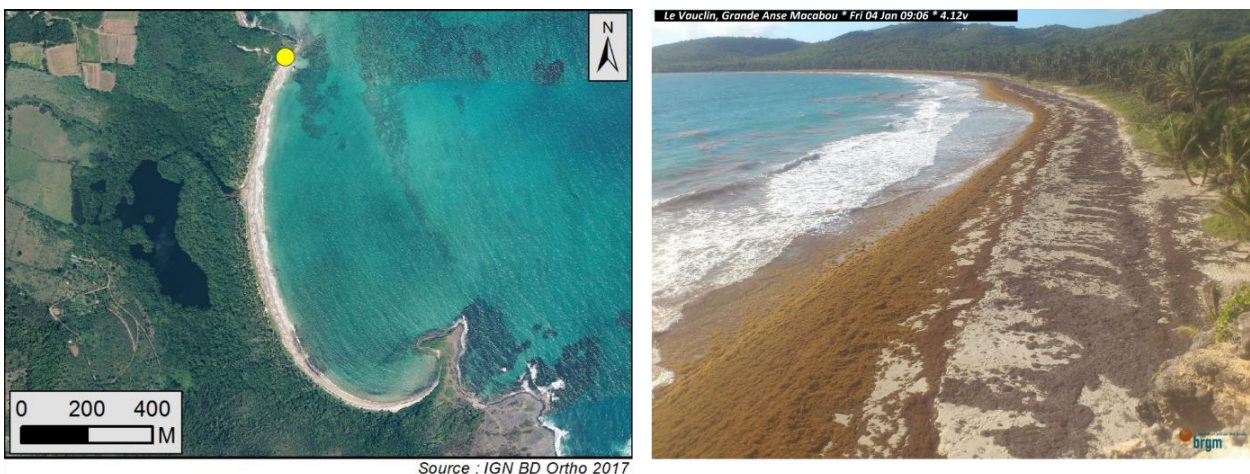


Illustration 7 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin.

3. Développement des algorithmes et données complémentaires

3.1. DEVELOPPEMENT DES ALGORITHMES

Afin de réaliser des observations quantitatives à partir des images du réseau de suivi, différents algorithmes de traitement ont été développés. Ces traitements visent au géoréférencement des images, la détection des sargasses et du trait de côte ainsi que la mise en place d'un système d'alerte. Le développement des outils de traitement a été mutualisé avec la direction régionale du BRGM en Guadeloupe et le support des experts du BRGM Montpellier.

3.1.1. Géoréférencement 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 (Illustration 8). 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 images et réelles sont connues (gcp1 à gcp5, Illustration 8). 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).

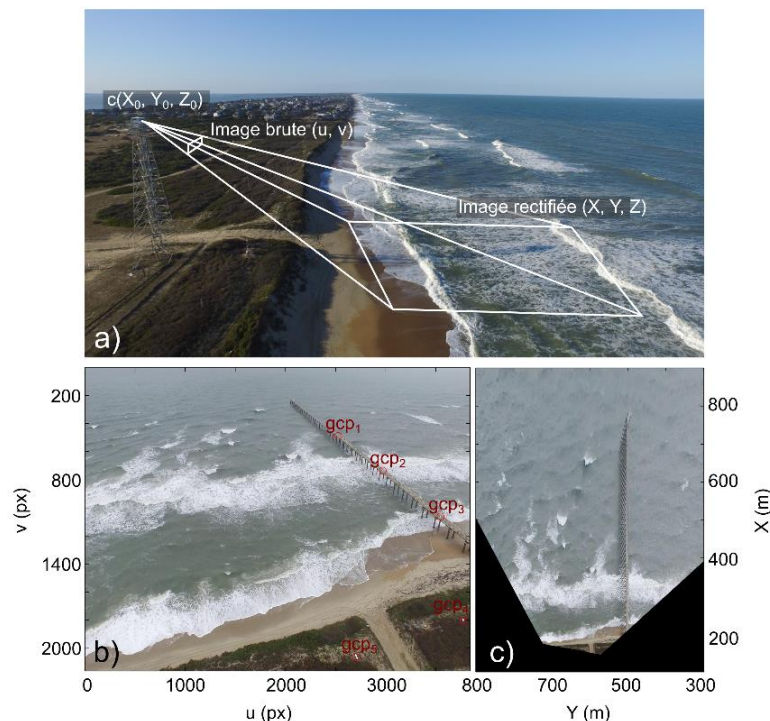


Illustration 8 : Photo aérienne de la plage de Duck (Caroline du Nord, États-Unis) montrant la transformation d'une image oblique (coordonnées u, v) en image plane (coordonnées X, Y, Z). (b,c) Rectification d'une image à partir de points gcps connus. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en juin 2017.

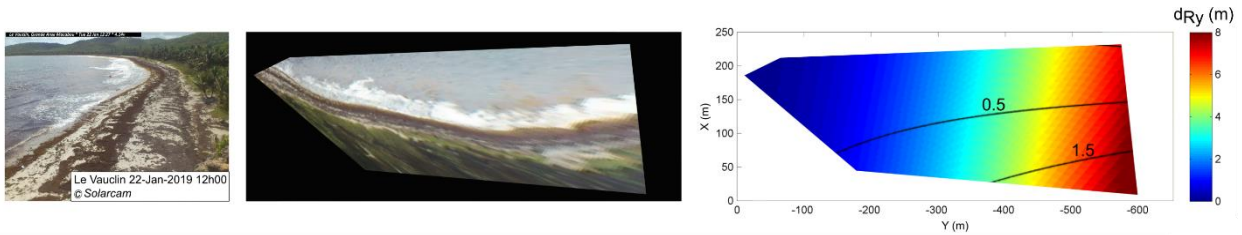


Illustration 9 : De la gauche vers la droite : images brutes (vue oblique), rectifiées (vue en plan) et résolution des pixels de l'image pour le dispositif en place en place sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Les couleurs expriment la résolution des pixels de l'image dans la direction de l'axe parallèle à celui de la plage (Y) tandis que la couleur correspond la résolution dans l'axe transversal (X).

Sur de nombreux 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, chaque image nécessite 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 une grille d'environ 600 m dans la direction parallèle à la plage et de 250 m dans la direction transversale (Illustration 9). La résolution d'un pixel peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres dans les zones les plus éloignées de la caméra (Illustration 9). Dans un secteur proche du trait de côte, la résolution transversale des pixels varie entre 0.25 m et 1.5 m selon la distance à laquelle se situe le pixel de la lentille de l'appareil (Illustration 9). La résolution de l'image dans l'axe parallèle à celui de la plage varie entre 0.25 et 10 m.

3.1.2. Détection 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).

3.2.1. Classification des images

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 l'illustration 10 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 and Koltun, 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.

Pour terminer, la phase suivante consiste à calculer les surfaces de sargasses échouées. Dans un premier temps, à partir des résultats de la segmentation sémantique, les pixels identifiés comme appartenant à la classe « Sargasse » sont extraits. La solution de géorectification 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 les surfaces échouées en mètres carrés.

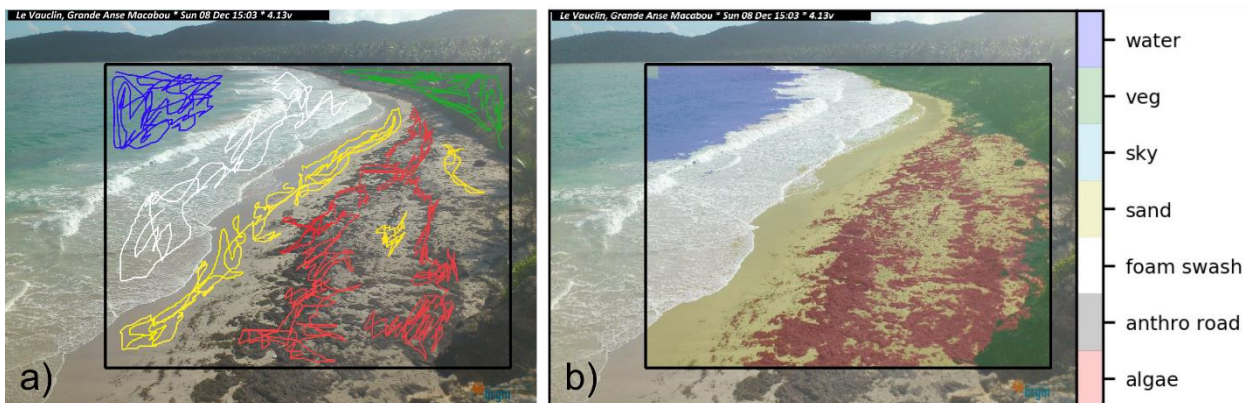


Illustration 10 : a) Image brute capturée à Grande Anse Macabou au Vauclin le 08 décembre 2019. Un étiquetage manuel (couleurs) est superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt. b) Classification automatique de l'image par l'algorithme. La surface de sargasses calculée automatiquement par la méthode de détection atteint plus de 3000 m².

3.4. CONCEPTION DU SYSTÈME 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 trois sites pilotes prédéterminés. Une description complète du fonctionnement du système d'alerte ainsi que de son efficacité est présentée au chapitre 4.

3.5. INTERFACE DE TRAITEMENT DES IMAGES

Afin de réaliser certains traitements, une interface utilisateur a été développée sous MATLAB par le BRGM (Illustration 11). Elle permet entre autre de réaliser la géorectification des images à partir des points de contrôle, la classification des images, la détection du trait de côte et des surfaces de sargasses ou encore la réalisation de *timestack* représentant les évolutions temporelles de pixel sur des profils transverses (chapitre 4).

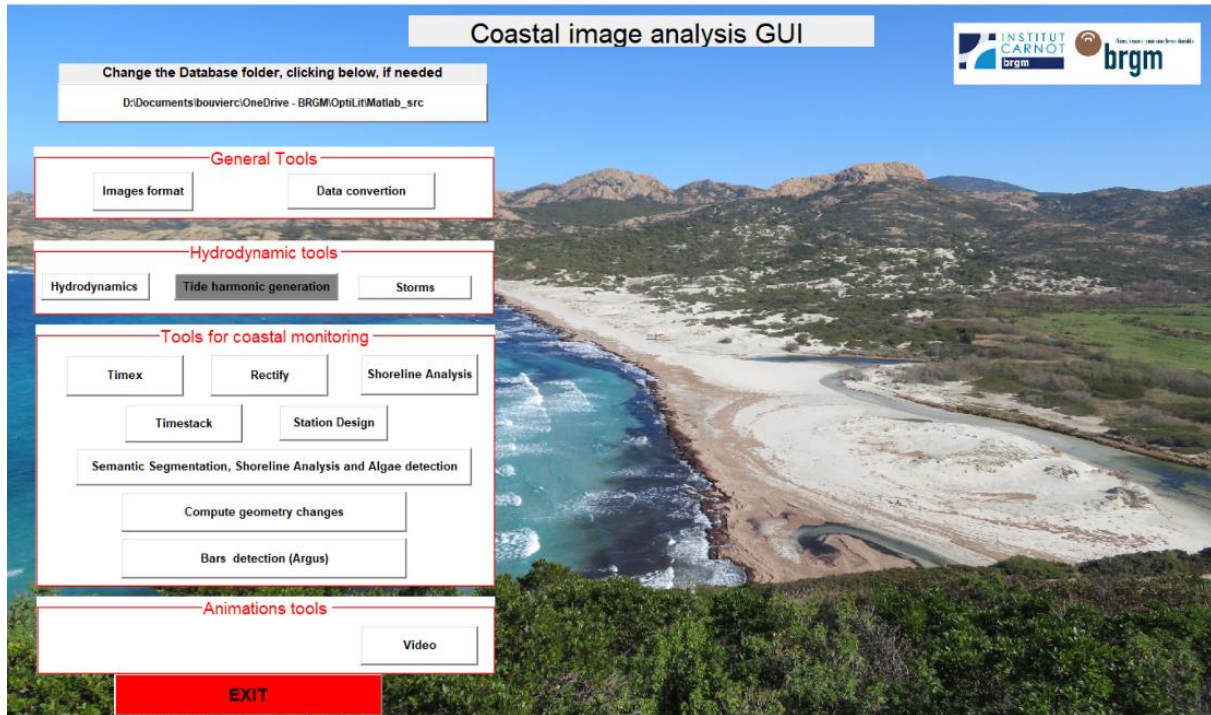


Illustration 11 : Interface de traitement des images développée par le BRGM

3.1.3. Détection du trait de côte

La détection du trait de côte est réalisée en utilisant les images obliques issues directement des caméras. La détection du trait de côte peut être manuelle ou semi-automatique et peut s'effectuer de façon plus ou moins robuste ou complexe. La méthode utilisée ici consiste à détecter l'interface entre les zones humides et sèches (Aarninkhof et al., 2003). Pour cela, l'image RGB (Red, Green, Blue) est transformée dans un espace *CieLab* (luminance, vert-rouge, bleu-jaune). Sur cette nouvelle image, un partitionnement en k-moyennes est réalisé afin d'effectuer un regroupement en deux surfaces (plage et la mer) dans une région d'intérêt. La détection du trait de côte est ensuite réalisée avec l'extraction du contour entre ces deux surfaces.

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. 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 est essentiel de préciser pour la 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 la vidéo.

A partir des images obtenues sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin, le trait de côte a été extrait environ tous les jours depuis le 1^{er} Novembre 2018 pendant 12 mois consécutifs. Sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie, la position du jet de rive a été masquée par la présence des arbres jonchant la falaise côtière sur toute la première partie de la période de suivi (Illustration 7). Le trait de côte a pu être extrait à partir du 17 juillet 2019 pendant 4 mois consécutifs. Les images sont choisies en fonction des conditions hydrodynamiques ($H_s < 1.3$ m) et météorologiques (vent faible), ce qui suppose une erreur verticale due au set-up/set-down (Δ_{Setup}) inférieure à 0.30 m (Stockdon et al., 2006). En ajoutant la variation du niveau d'eau due à la marée ($\Delta_{marée} = 0.30$ m pour les images sélectionnées), et considérant une pente de plage α à 6 %, on peut estimer une erreur sur la position du trait de côte par :

$$\phi_{tdc} = \frac{\Delta_{Setup} + \Delta_{marée}}{\tan(\alpha)} \quad (1)$$

Au cours du suivi, l'erreur horizontale maximale obtenue est d'environ 10 m sur les traits de côte digitalisés dans cette étude. Si l'on ajoute la résolution transversale de l'image redressée (< 1 m au niveau du trait de côte), l'erreur maximale estimée est d'environ 11 m et reste inférieure aux mouvements associés à l'évolution du trait de côte à l'échelle événementielle saisonnière ou pluriannuelle.

3.2. DONNEES COMPLEMENTAIRES

Afin d'enrichir les analyses du suivi des échouages et arrivages de sargasses ou de la dynamique du trait de côte sur les sites pilotes déterminés, il convient de rappeler le contexte météorologique et hydrodynamique de la Martinique et de présenter les différents instruments de mesure utilisés en parallèle des algorithmes développés pour ce projet.

3.2.1. Données météorologiques

La Martinique connaît un climat tropical, chaud et humide, présentant une saison sèche, le carême (de décembre à mai, centrée sur les mois de février/mars) et une saison humide, l'hivernage (de juin à novembre). La Martinique est soumise aux alizés toute l'année. En provenance constante de l'Est-Nord-Est à l'Est, ces vents soufflent en moyenne à une vitesse de 7 m/s (soit 25 km/h). A la trinité (Illustration 3), une station de Météo-France permet de mesurer les différents paramètres météorologiques dont les vitesses et directions du vent (Illustration 12).

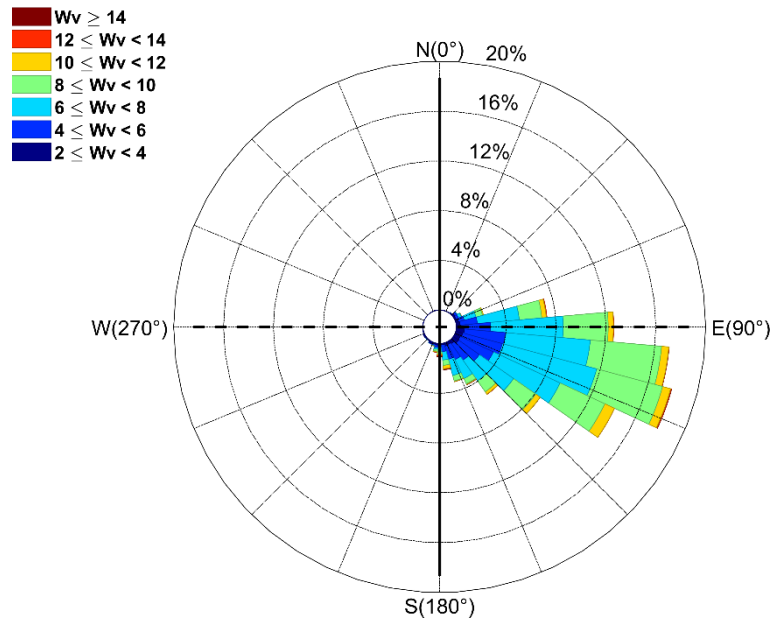


Illustration 12 : Caractéristiques du vent à la Trinité depuis novembre 2018 (1 an de mesures).
Diagramme directionnel en fréquence des vitesses de vent moyen (W_v en m/s).

3.2.2. Données marégraphiques

Les marées en Martinique sont d'amplitude microtidal avec un marnage moyen de 45 cm (SHOM, 2016) et une amplitude de marée aux équinoxes qui peut atteindre 90 cm. Le niveau moyen marin est de 55 cm (par rapport au zéro hydrographique). 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 (Illustration 13). Plusieurs points de mesure sont disponibles autour de la Martinique et notamment sur la commune de Fort de France (Illustration 13).

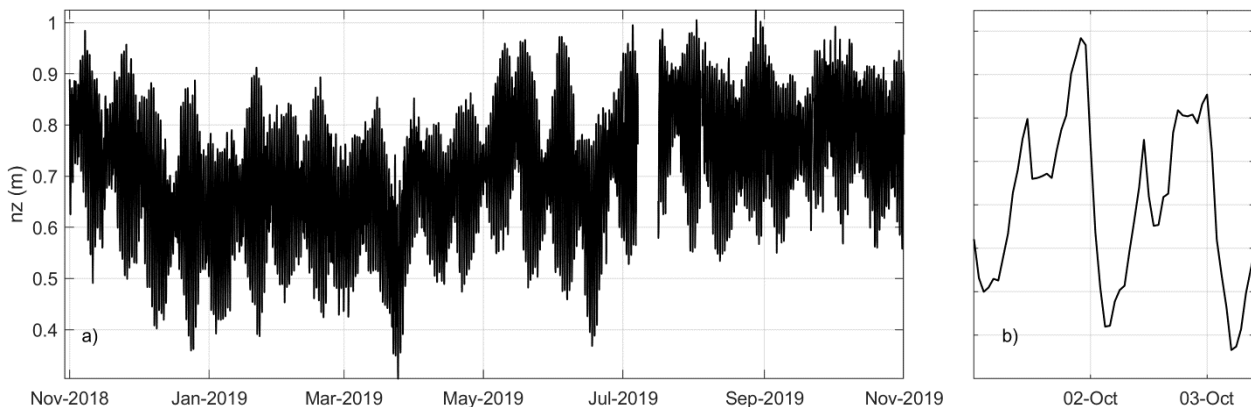


Illustration 13 : a) Niveau d'eau (n_z) mesuré à Fort de France depuis le 01 novembre 2018 (1 an de mesure). b) Marées hautes et marées basses enregistrées à Fort de France au début du mois d'octobre. Les niveaux d'eau sont données par rapport au zéro hydrographique.

3.2.3. Régime de houle le long du littoral

En Martinique, trois régimes de houle peuvent être rencontrés. (1) La houle d'Est à Nord-Est dite d'alizés est très fréquente mais peu énergétique (période inférieure à 10 sec). (2) La houle de Nord à Nord-Ouest est peu fréquente (une dizaine d'occurrences par an environ) et d'énergie modérée,

généralement engendrée par des dépressions au Nord de l'Atlantique. (3) La houle cyclonique est peu fréquente mais très énergétique (période supérieure à 10 sec). Elle est susceptible de toucher tous les secteurs côtiers de l'île. Il existe au Nord de la Martinique, au large de Basse Pointe (Illustration 3), un houlographe du réseau *Candhis* (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ) qui mesure et enregistre les caractéristiques des vagues depuis les années 2000 (Illustration 14).

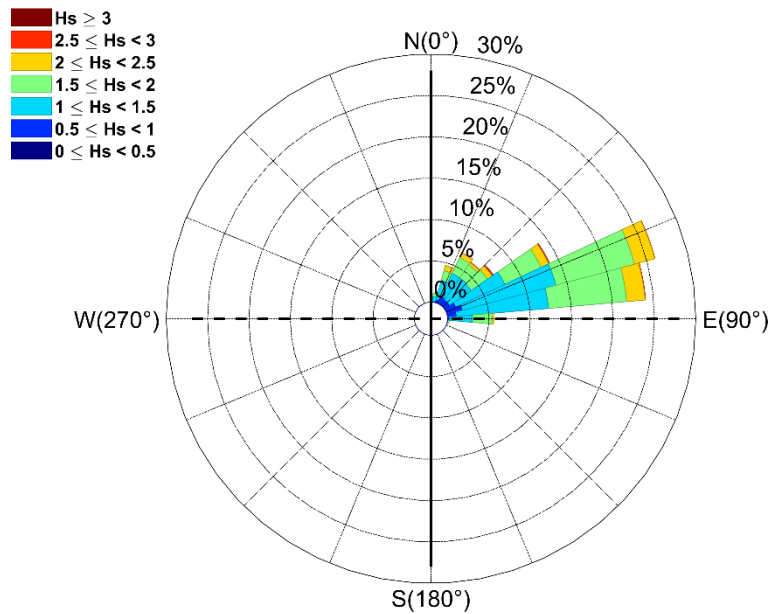


Illustration 14 : Caractéristiques des vagues à Basse Pointe depuis novembre 2018 (1 an de mesures).
Diagramme directionnel en fréquence de la hauteur significative des vagues (H_s).

4. Analyse des résultats

4.1. DYNAMIQUE DES ECHOUAGES ET ARRIVAGES DE SARGASSE

La chaîne de traitement des images a été testée sur le site du bourg du Marigot, la plage au nord du bourg de Sainte-Marie et la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Notons que pour les besoins de l'étude, la méthode permet de détecter les échouages de sargasses ainsi que les nouveaux arrivages. Les nappes de sargasses (à proximité de la côte) ainsi que les échouages (sur la côte) sont donc prises en compte dans le calcul de l'évolution des surfaces.

Afin d'évaluer la robustesse de l'algorithme à détecter les algues sargasses, les évolutions temporelles de la proportion de pixel obtenue comme appartenant à la classe « sargasse » (densité de probabilité) sont comparées avec les images brutes sur différentes dates.

Le nombre de pixels (n) détecté par l'algorithme est ensuite convertie en une surface (S en m^2) en utilisant le géoréférencement des images. Le calcul des surfaces de sargasses peut donc être obtenue si des points de contrôle sont identifiés ou visibles au moment des acquisitions. Une fois les surfaces calculées, un filtre polynomial de degré 4 avec une fenêtre glissante de 21 points (Savitzky and Golay, 1964) permet de lisser le signal dans le temps afin de limiter les variations trop brutales provoquées par une mauvaise estimation des surfaces de sargasses.

Les évolutions temporelles des surfaces de sargasses obtenues sur chacun des sites pilotes sont comparées avec une observation visuelle sur un profil perpendiculaire au trait de côte ("images" *timestack*). La comparaison permet de valider la cohérence du signal entre les surfaces calculées à partir du modèle de détection et l'interprétation visuelle du *timestack*.

4.1.1. Le bourg du Marigot

Classification des images

Le bourg du Marigot est un site largement exposé aux nouveaux arrivages de sargasses (Illustration 15). Les sargasses sont en majorité du temps visibles à la surface de l'eau bien que des échouages sur la partie émergée de la plage puissent également être observés au cours des plus gros arrivages. L'algorithme mis en place est capable de détecter de façon fidèle la présence de sargasses malgré que la série temporelle comporte quelques variations ponctuelles du signal, souvent haute fréquence (horaire), reliées à des erreurs de détection du modèle. Par exemple, les images avec des nuages, sombres ou encore lorsqu'il y a de la pluie, dégradent les performances du modèle de classification. Si les nappes de sargasses sur le site du bourg du Marigot sont particulièrement bien détectées par l'algorithme, la classification de la végétation ou du bâti (digue) est souvent ici plus difficile à réaliser. Ainsi, des variations horaires importantes (Δ Prob. Density > 10 %) sont souvent observées sur les densités de probabilité de présence d'eau, d'écume, de végétation et du bâti. Ces variations haute fréquence peuvent être expliquées par des pixels difficilement classifiables par leur ressemblance. Par exemple, la couleur de la digue ressemble parfois à celle de la végétation ou à celle de la couleur de l'eau.

Au cours de la période de suivi, entre janvier et novembre 2019, le site est occupé (Prob. Density > 25 %) à 60 % du temps par des sargasses (soit plus d'un jour sur deux). La dynamique des arrivages de sargasses présente une variabilité très importante (Illustration 15). La densité de probabilité de présence des sargasses évolue de façon très rapide au cours du temps et oscillent entre 0 et 75 %. Par exemple, entre le 30 avril et le 5 mai 2019, on observe une

augmentation brutale (plus de 70 %) de la densité de probabilité de présence de sargasses (Illustration 15 et Illustration 16). Suite à un arrivage massif de sargasse, la densité de probabilité de sargasses peut décroître de façon tout aussi rapide selon les conditions marines, par le mélange de la colonne d'eau ou grâce à des courants favorables. A partir du 20 septembre, avec une densité de probabilité de présence qui reste inférieure à 20 %, aucun arrivage de sargasses n'a été enregistré sur une durée d'un mois. On remarque que cette période sans sargasse est la plus longue enregistrée depuis le début du suivi des arrivages sur le site du bourg du Marigot.

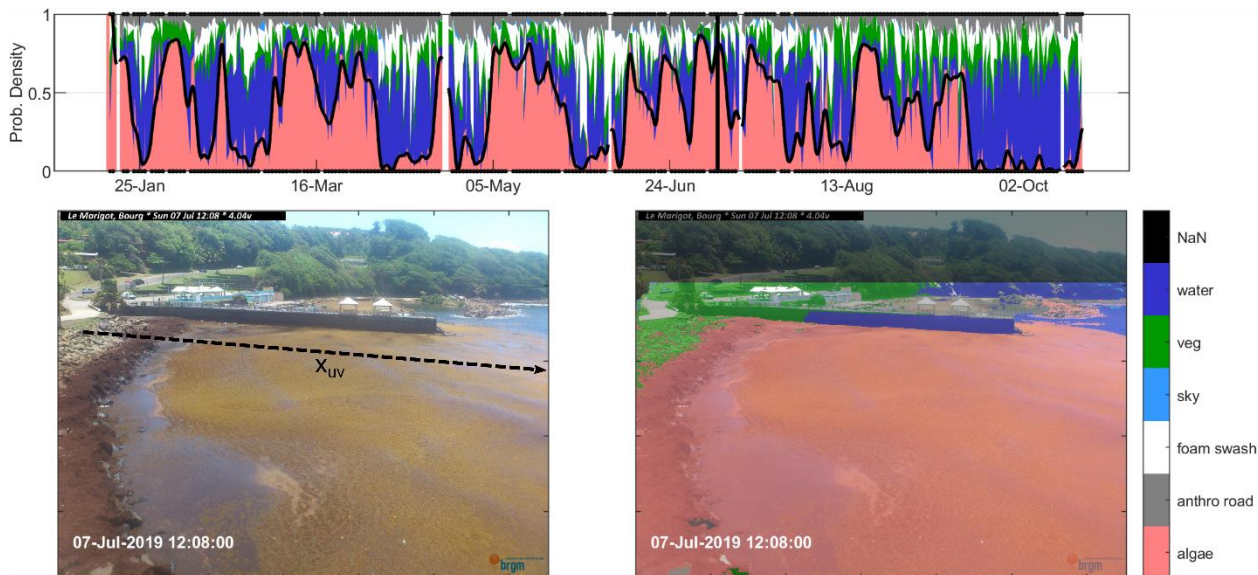


Illustration 15: (en haut) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses à Marigot bourg. Les différentes couleurs représentent les proportions des différentes classes d'intérêt (algue, bâti, écume, ciel, végétation, eau) déterminées par le modèle. (en bas) Exemple d'une image brute capturée le 07 juillet 2019 (à gauche) et de sa transformée (à droite) résultant du modèle de classification. L'axe x_{uv} représente la ligne de pixel utilisé pour l'obtention du timestack (Illustration 17b).

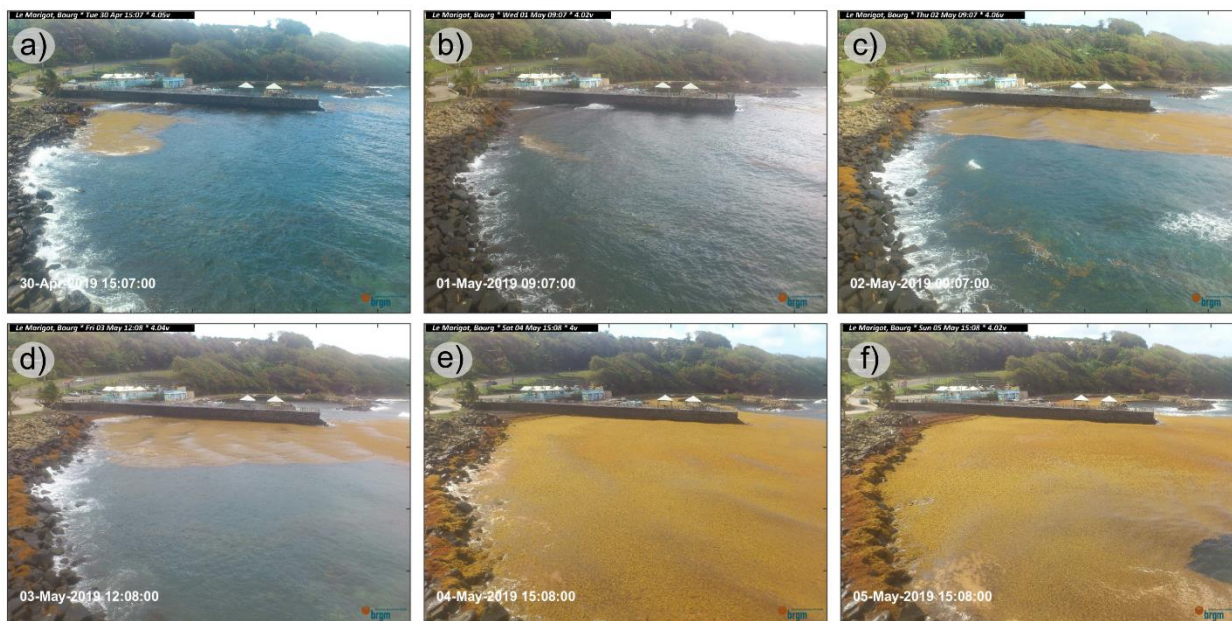


Illustration 16: Séquence illustrant un arrivage massif de sargasses capturé par le dispositif de suivi sur le site du bourg du Marigot. La densité de probabilité de présence de sargasses dépasse 75 % le 4 mai 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme atteint alors plus de 4000 m².

Dynamique des surfaces de sargasse

Afin de comparer les évolutions des surfaces de sargasses calculées par l'algorithme avec des observations visuelles, le long d'une ligne de pixel transversale (x_{uv} , Illustration 15), un *timestack* a été réalisé sur l'ensemble de la période d'observation (Illustration 17b). En comparant ces deux représentations de l'évolution des échouages, une bonne cohérence générale est constatée entre les surfaces calculées à partir du modèle de détection et l'interprétation visuelle de la variation des surfaces échouées sur la plage (Illustration 17).

On remarque des arrivées massives de sargasses ($S > 3000 \text{ m}^2$) en date du 28 janvier, 16 février, 4 mars, 17 avril, 4 mai, 12 juin et 15 août 2019 (Illustration 17a). Suite à des arrivages de si grande importance, les nappes de sargasses peuvent rester sur site plusieurs jours ou plusieurs mois selon les conditions de vagues. Par exemple, entre le 17 et le 23 avril, les surfaces de sargasses restent supérieures à 3000 m^2 jusqu'à réduire de façon brutale ($S < 500 \text{ m}^2$) le 24 avril suite à des conditions de vagues particulièrement fortes ($H_s > 2 \text{ m}$) et d'incidence Nord-Est qui provoquent, à priori, le mélange et le renouvellement de la masse d'eau (Illustration 18). Les nappes de sargasses, une fois mélangées à la colonne d'eau, deviennent alors invisibles pour l'algorithme de détection ou pourraient aussi avoir été expulsées en dehors de la baie par des courants d'arrachements dirigés vers le large.

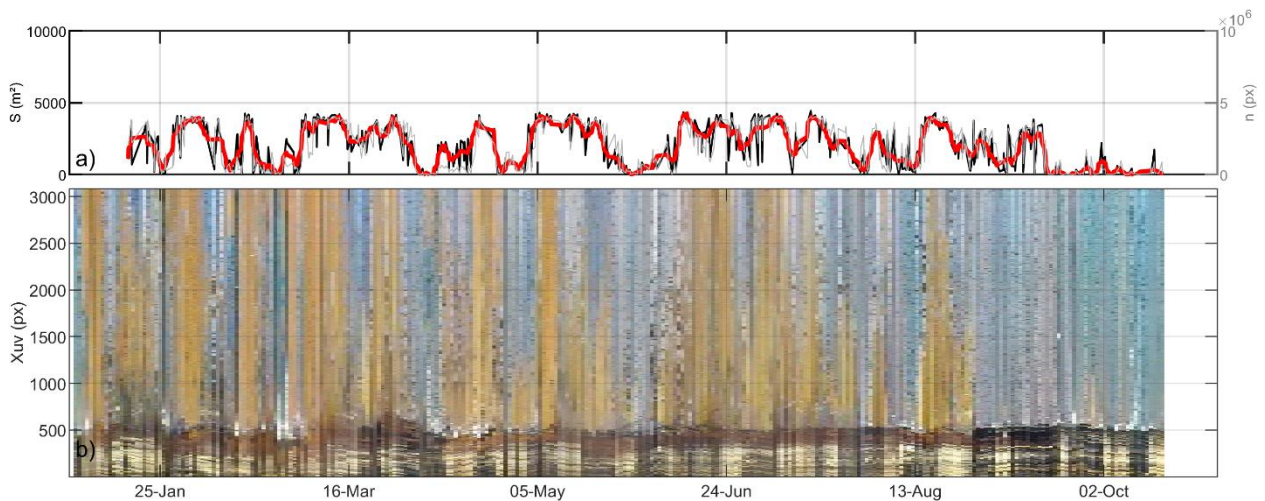


Illustration 17 : a) Evolution des surfaces (en noir) et du nombre de pixel (en gris clair) de sargasses détectés à partir du modèle de segmentation sur le site du bourg du Marigot. Le trait rouge correspond au signal filtré. b) Représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses sur un profil x_{uv} le long de la digue (cf. Illustration 15) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.



Illustration 18 : Séquence illustrant le renouvellement de la masse d'eau sur le site du bourg du Marigot suite à un épisode de vagues particulièrement énergétique le 24 avril 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme réduit en quelques heures de plus de 3000 m².

4.1.2. Plage au nord du bourg de Sainte Marie

Classification des images

La plage du Nord de Sainte Marie est également un site exposé aux arrivages de sargasses où les algues sont visibles le plus souvent échouées sur la plage (Illustration 19). La classification automatique des images a été mise en place sur ce site à partir du 21 mai 2019. L'algorithme est capable de détecter de façon relativement fidèle la présence de sargasses bien que la série temporelle comporte quelques variations ponctuelles du signal, reliées à des erreurs de détection du modèle (Illustration 19). Là encore, les images où la visibilité est réduite favorisent une classification plus approximative. De plus, lorsque les sargasses échouées sur la plage se trouvent à une distance trop importante de la caméra (> 200 m), la résolution des pixels devient grossière et la détection des sargasses plus difficile (Illustration 19). La classification des pixels correspondant à du sable, de l'eau ou encore à de la végétation est assez bien estimée par le modèle. Plus particulièrement, le modèle parvint aussi à détecter de façon relativement fiable la proportion des pixels correspondant à de l'écume et permet ainsi d'obtenir une estimation de l'étendue de la zone de déferlement (en blanc, Illustration 19) qui évolue selon les conditions de vagues.

La dynamique des échouages/arrivages de sargasses présente une variabilité légèrement moins marquée que sur le site du bourg de Marigot (Illustration 19). La densité de probabilité de présence des sargasses oscille entre 0 et 30 %. Pendant la période de suivi, on observe trois cycles où la proportion de sargasses reste importante (Prob. Density > 20 %) entre le 12 et le 21 juin, entre et le 28 juin et le 1^{er} aout ou entre le 17 et le 24 aout (Illustration 19). Suite à un échouage massif de sargasses, la densité de probabilité de sargasses reste ici élevée sur une durée de plusieurs jours pour décroître de façon progressive provoqué par le ramassage des algues échouées entre le 20 aout et le 02 septembre (Illustration 20).

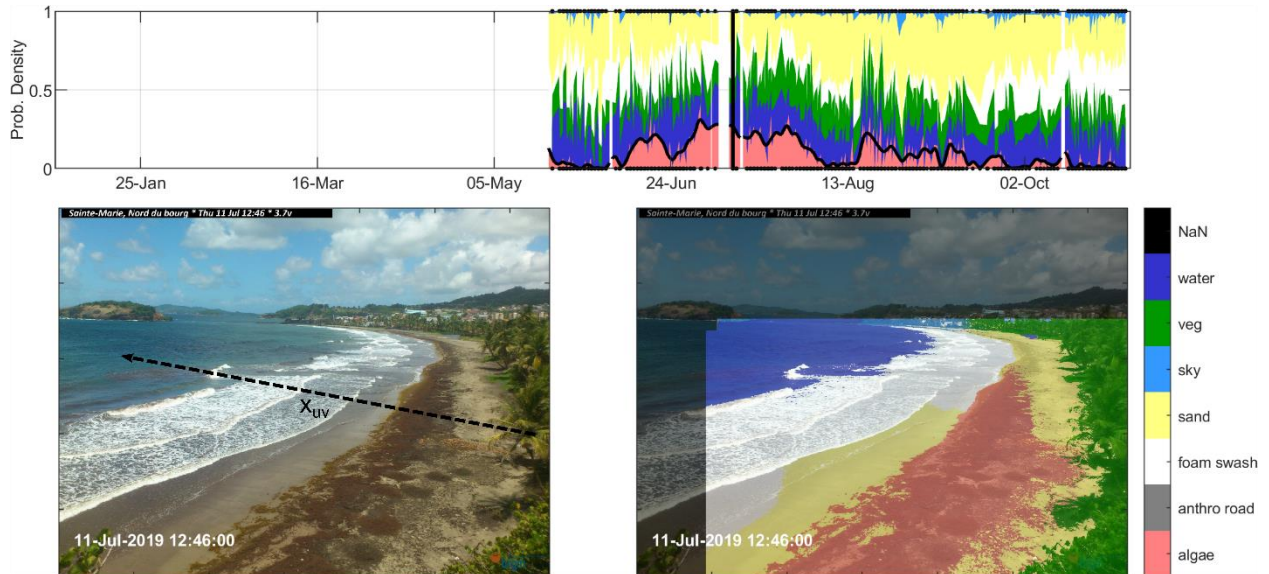


Illustration 19: (en haut) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses à Sainte Marie, Plage Nord. Les différentes couleurs représentent les proportions des différentes classes d'intérêt (algue, bâti, écume, ciel, végétation, eau) déterminées par le modèle. (en bas) Exemple d'une image brute capturée le 11 juillet 2019 (à gauche) et de sa transformée (à droite) résultant du modèle de classification. L'axe x_{uv} représente la ligne de pixel utilisée pour l'obtention du timestack (Illustration 21b).



Illustration 20 : Ramassage des sargasses entre le 20 août et le 02 septembre 2019 sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie.

Dynamique des surfaces de sargasses

Afin de comparer les évolutions des surfaces de sargasses calculées par l'algorithme avec des observations visuelles, le long d'une ligne de pixel transversale (x_{uv} , Illustration 19), un *timestack* a été également réalisé sur l'ensemble de la période d'observation (Illustration 21b). En comparant ces deux représentations de l'évolution des échouages, une assez bonne cohérence est constatée entre les surfaces calculées et l'interprétation visuelle bien qu'il soit plus difficile ici de différencier visuellement les sargasses échouées et le sable de couleur assez sombre (Illustration 21).

On remarque des échouages importants de sargasses ($S > 4000 \text{ m}^2$) en date du 15 juillet et du 17 août 2019 (Illustration 21a). Suite à des arrivages de si grande importance, lorsqu'elles ne sont pas ramassées, les nappes de sargasses restent généralement échouées sur la plage plusieurs jours, jusqu'à décroître de façon progressive selon les conditions de vagues ou de

marée. Il reste encore difficile de déterminer si les sargasses échouées sont progressivement remaniées par la mer et redistribuées dans la colonne d'eau ou si les grains de sable se mélangent progressivement aux sargasses et rendent alors impossible une détection fiable par l'algorithme (Illustration 22). 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 de plus de 5000 m².

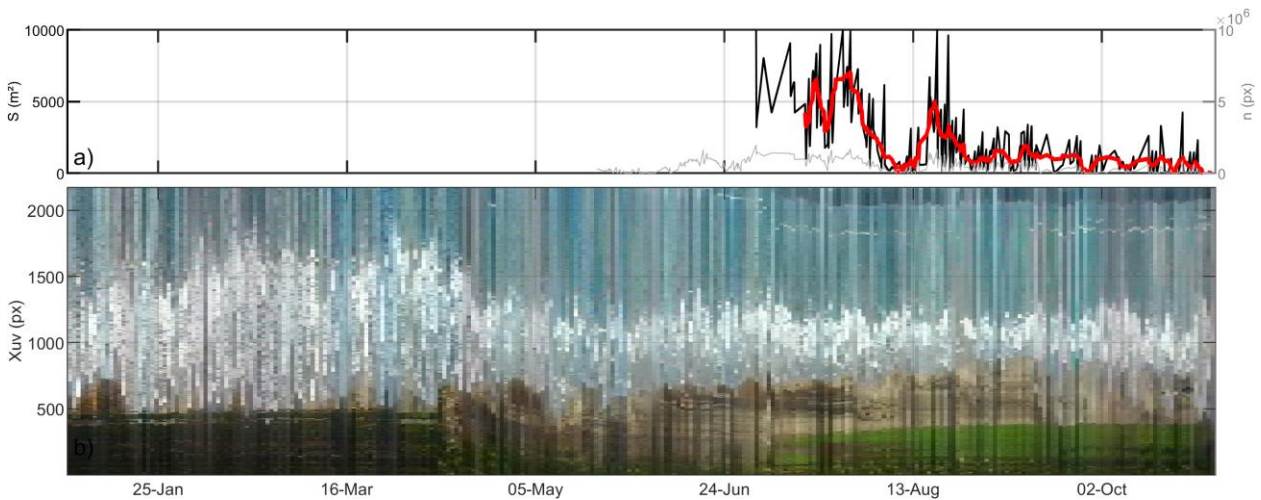


Illustration 21 : a) Evolution des surfaces (en noir) et du nombre de pixel (en gris clair) de sargasses détectés à partir du modèle de segmentation sur le site de Sainte Marie, Plage Nord. Le trait rouge correspond au signal filtré. b) Représentation visuelle (timestack) des échouages de sargasses sur un profil x_{uv} (cf. Illustration 19) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.



Illustration 22 : Séquence illustrant le tassement et l'enfouissement progressif des sargasses échouées sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie entre le 27 juillet et le 6 août 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme réduit progressivement en une semaine (5000 m² en moins), notamment suite au coup de mer du 04 août.

4.1.3. Plage de Grande Macabou au Vauclin

Classification des images

La plage de Grand Macabou au Vauclin, est un site exposé de façon quasi continue aux échouages de sargasses. La classification automatique des images a été mise en place sur ce site à partir du 16 janvier 2019. L'algorithme est capable de détecter de façon fidèle la présence de sargasses bien que la série temporelle comporte quelques variations ponctuelles du signal, reliées à des erreurs de détection du modèle. Sur ce site, comme sur les autres, les images avec des nuages, sombres ou encore lorsqu'il y a de la pluie, dégradent largement les performances du modèle de classification. Ici, la classification des images et plus particulièrement, la différenciation entre le sable et les sargasses est mieux réalisée par l'algorithme que dans le cas de la plage de Sainte Marie car la couleur des grains de sable est généralement plus claire et le contraste donc plus élevé. La classification des pixels correspondant à du sable, eau ou encore de la végétation est encore une fois assez bien estimée par le modèle.

La dynamique des échouages ou arrivages de sargasses présente ici une variabilité également moins marquée que sur le site du bourg du Marigot (Illustration 23). La densité de probabilité de présence des sargasses oscille entre 0 et 60%. Pendant la période de suivi, on observe de façon quasi-continue une proportion importante de sargasses (Prob. Density > 25 %) signifiant leur présence quasi-permanente (plus de 80% du temps) sur la plage. La densité de probabilité de sargasses reste ici élevée sur une durée de plusieurs mois et décroît finalement de façon significative à partir du mois d'octobre puis du mois de novembre.

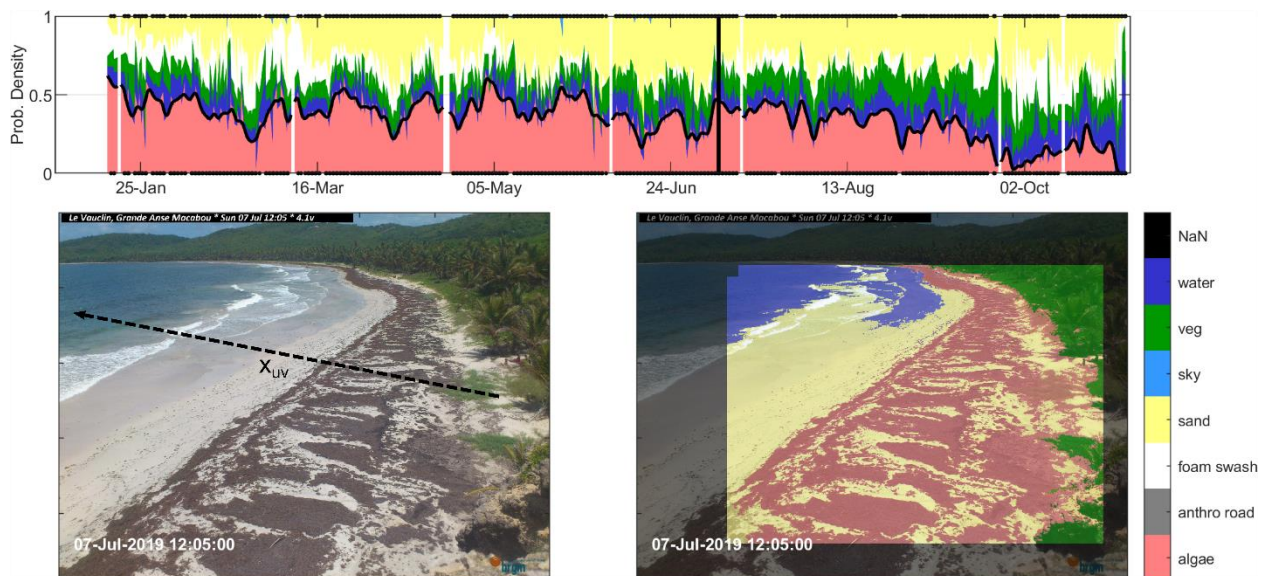


Illustration 23 : (en haut) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Les différentes couleurs représentent les proportions des différentes classes d'intérêt (algue, bâti, écume, ciel, végétation, eau) déterminées par le modèle. (en bas) Exemple d'une image brute capturée le 07 juillet 2019 (à gauche) et de sa transformée (à droite) résultant du modèle de classification. L'axe x_{uv} représente la ligne de pixel utilisé pour l'obtention du timestack (Illustration 24b).

Dynamique des surfaces de sargasse

Afin de comparer les évolutions des surfaces de sargasses calculées par l'algorithme avec des observations visuelles, le long d'une ligne transversale de pixel (x_{uv} , Illustration 23), un timestack

a été réalisé une fois encore sur l'ensemble de la période d'observation (Illustration 24b). En comparant ces deux représentations de l'évolution des échouages, une assez bonne cohérence est constatée entre les surfaces calculées et l'interprétation visuelle.

On remarque la présence quasi-continue de sargasses ($S > 2000 \text{ m}^2$) sur toute la période de suivi sauf à partir du 28 septembre et du 27 octobre où on observe une réduction significative des surfaces (Illustration 21a). Ce phénomène est provoqué par des conditions de vagues importantes ($H_s > 2 \text{ m}$) qui se traduisent sur la plage par un jet de rive puissant, jusqu'à la ligne de végétation, entraînant alors le remaniement par la mer des algues échouées sur la plage. Les sargasses seraient alors mélangées à la colonne d'eau et rendues invisibles pour l'algorithme de détection ou bien expulsées en dehors de la baie par des courants d'arrachements dirigés vers le large.

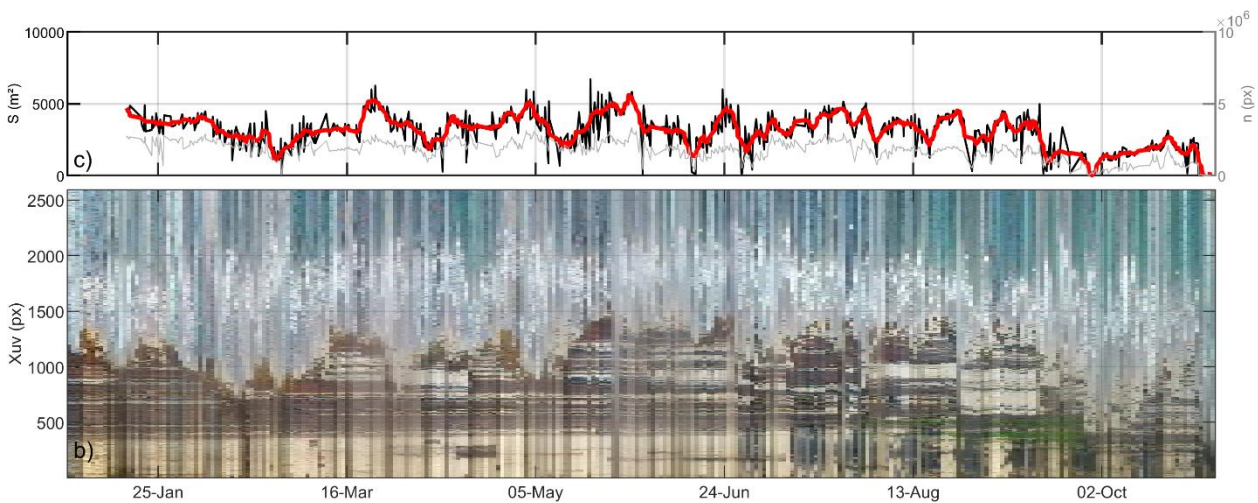


Illustration 24 : a) Evolution des surfaces (en noir) et du nombre de pixel (en gris clair) de sargasses estimée à partir du modèle de segmentation sur le site de Grande Anse Macabou au Vauclin. Le trait rouge correspond au signal filtré . b) Représentation visuelle (timestack) des arrivages de sargasses sur un profil x_{uv} (cf. Illustration 23) extrait à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.



Illustration 25 : Séquence illustrant la réduction brutale de la quantité de sargasses échouées sur la plage de grande Anse Macabou suite au passage des épisodes de vagues du 28 septembre et du 27 octobre 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme réduit en quelques heures de plus de 2000 m².

4.1.4. Comparaison inter-sites

Les conditions de vent et de vagues observées sur la côte Atlantique (La Trinité et Basse-pointe respectivement), sont représentées sur l'illustration 26a-b pour la période située entre janvier et novembre 2019. Le vent montre la majorité du temps des vitesses supérieures à 5 m/s (18 km/h) et provient d'un secteur Est à Sud-Est ($90^\circ < D_{\text{wind}} < 135^\circ$, Illustration 26a). La hauteur significative des vagues reste le plus souvent supérieure à 1 m en provenance du secteur Est-Nord-Est ($30^\circ < D_{\text{wave}} < 90^\circ$, Illustration 26b), reflétant un climat de vagues modérément énergétique contrôlé par les alizés. On enregistre, pour ces gammes de direction, une hauteur significative à 1.40 m et une période pic à 7 s en moyenne pendant la durée du suivi. On note également une importante proportion (10 % d'occurrences) de vagues de secteur Nord à Nord-Nord-Est ($0^\circ < D_{\text{wave}} < 30^\circ$, Illustration 26b) souvent plus énergétique caractérisée par une période pic en moyenne à 8.3 s, induite par le passage d'une dépression au Nord du bassin Atlantique.

Malgré que chacun des sites pilotes prédéterminés soient exposés face à la côte Atlantique avec une orientation Nord-Est, une grande variabilité inter-sites de la dynamique des arrivages ou échouages de sargasses peut être observée (Illustration 26). Une importante quantité de sargasses ($S > 1500 \text{ m}^2$) est présente de façon récurrente sur le site du bourg du Marigot (plus de 50% du temps) ou sur la plage de Grande Anse Macabou (plus de 80 % du temps). Au contraire, sur la plage Nord de Sainte Marie, la quantité de sargasses présente est bien moins importante sur la période de suivi ($S < 1500 \text{ m}^2$ à 80 % du temps). Bien que l'emprise de l'image ne soit pas la même, les résultats présentés traduisent une sensibilité aux échouages de sargasses plus marquée pour le site du bourg du Marigot et pour la plage de Grande Anse

Macabou et suggère alors qu'un suivi site par site est indispensable pour la mise en place d'un système d'alerte adapté aux besoins des différents sites. Il faut également souligner que sur les sites du Marigot et de Macabou, les algues n'ont pas été ramassées sur la durée du suivi. Au contraire, un nettoyage de la plage a été mis en place sur la plage de Sainte Marie entre le 20 août et le 02 septembre permettant une diminution significative (~ 5000 m²) de la surface de sargasses échouée sur la plage.

En plus de la disparité importante des quantités de sargasses présentes entre les différents sites, l'illustration 26 met également en évidence la dynamique très variée des mécanismes naturels d'arrivages ou de « nettoyage » de la plage. Sur le site du bourg du Marigot, suite à des arrivages de grande importance, les nappes de sargasses peuvent rester sur site plusieurs jours ou plusieurs mois selon les conditions de vagues. Par exemple, entre le 17 et le 23 avril, les surfaces de sargasses restent supérieures à 3000 m² jusqu'à réduire de façon brutale ($S < 500$ m²) le 24 avril suite à des conditions de vagues particulièrement fortes ($H_s > 2$ m) et d'incidence Nord-Nord-Est qui provoquent le mélange et le renouvellement de la masse d'eau. De façon similaire, au cours du même évènement, on observe une réduction importante de la surface de sargasses sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin, provoquée par un puissant jet de rive relié à ces conditions de vagues énergétiques qui entraînent le remaniement par la mer des algues échouées sur la plage. Le même phénomène est par ailleurs observé en date du 28 septembre où on remarque une réduction significative des surfaces sur les deux sites, reliée à des conditions de vagues particulièrement énergétiques. Les nappes de sargasses seraient alors mélangées à la colonne d'eau et rendues invisibles pour l'algorithme de détection ou bien expulsées vers le large par des courants d'arrachements. Sur le site de Sainte Marie, suite à des arrivages d'assez grande importance, si les algues ne sont pas ramassées (Illustration 20), les nappes de sargasses restent généralement échouées sur la plage plusieurs jours, jusqu'à décroître de façon progressive selon les conditions de vagues ou de marées par un mécanisme plus lent de tassement et d'enfouissement.

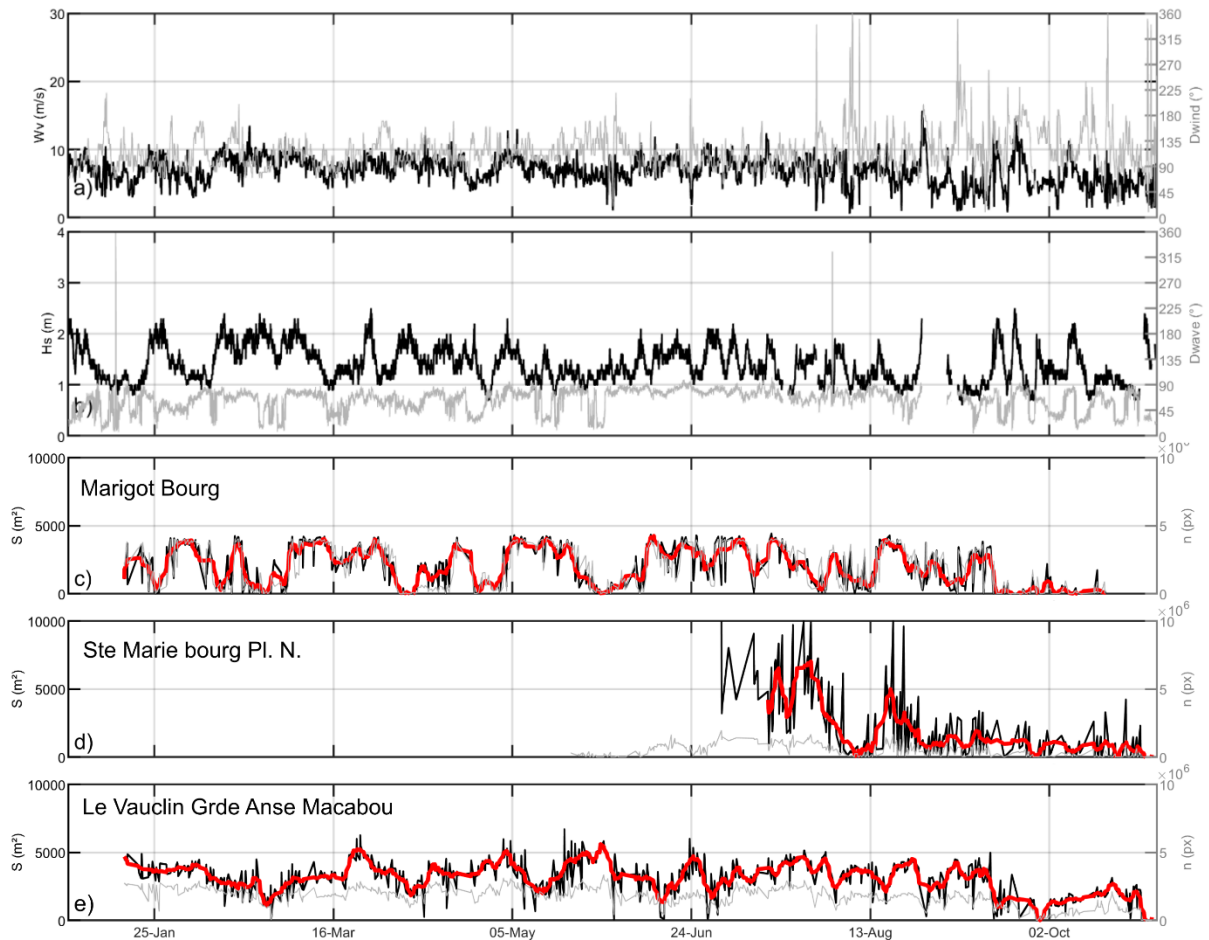


Illustration 26: Évolution temporelle a) de la vitesse et direction du vent mesurées à la trinité (w_v et D_{wind} respectivement), b) de la hauteur significative et direction des vagues mesurées à Basse Pointe (H_s et D_{wave} respectivement). (c-d) Evolution des surfaces de sargasses exprimés en m^2 sur les trois sites étudiés entre janvier et novembre 2019. Les points noirs représentent le calcul ponctuel des surfaces et la courbe rouge le signal filtré.

4.2. FONCTIONNEMENT ET EFFICACITE DU SYSTEME D'ALERTE

A proximité immédiate des côtes, les algues s'échouent et entrent en décomposition dans la zone littorale en entraînant potentiellement des impacts sanitaires sur les populations et les biens exposés. Un suivi du phénomène en temps réel est donc primordial pour la mise en place d'un dispositif de gestion efficace. Actuellement, le système de suivi se base sur l'exploitation d'images satellites couplées à des modèles de prévision des courants marins de surface pour estimer la dérive des bancs de sargasses et anticiper les échouages. Toutefois, ce système ne permet pas de définir précisément les quantités et les lieux d'échouage en raison de la résolution spatiale (précision des images) et temporelle (période de revisite, visibilité) des images satellites, ou de la résolution des modèles de prévision des courants. La mise en place d'un système d'alerte en temps réel et à une résolution spatiale adaptée (site par site) est essentielle pour une meilleure gestion du risque d'échouage ou d'arrivage de sargasses en Martinique et plus généralement dans les Antilles.

4.2.1. Description du dispositif en place

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 soit restée supérieure à un seuil défini. Les images flous ou trop sombres ne sont pas analysées et redistribuées vers un dossier d’archive. Au contraire les images dont la visibilité est suffisante sont utilisées par l’algorithme pour la détection des nappes de sargasses échouées ou en approche à la surface de l’eau. La surface de sargasses est alors estimée en pixel ou en mètre carré si des points de références ont été au préalable mis en place sur le site.

Déclenchement de l’alerte

L’alerte est déclenchée lorsque la surface de sargasses estimée par l’algorithme est supérieure à un seuil déterminé et si la variation de surface sur les dernières 24 h est supérieure à 20 % du seuil déterminé (Eq. 2) :

$$\text{if } S_t > \text{Seuil}_{local} \ \&\& \ S_t - S_{t-1} > 0.020 \times \text{Seuil}_{local} \ \&\& \ H_t - H_{t-1} > 24 \quad (2)$$

$$\text{Alert}_t = 1$$

Avec S_t la surface estimée par l’algorithme à l’instant t , $S_t - S_{t-1}$ la variation de surface calculée depuis la dernière estimation et $H_t - H_{t-1}$ la durée en nombre d’heure entre les deux images. Le seuil (Seuil_{local}) est défini site par site selon sa sensibilité aux échouages ou aux arrivages de sargasse. Le déclenchement de l’alerte a donc lieu lorsqu’une augmentation brutale (supérieure à 20% du seuil fixé) de la surface de sargasses a lieu sur les dernières 24 h. Le désavantage de cette méthode (option n°1, Illustration 28) est que le déclenchement de l’alerte reste très sensible aux erreurs de détection qui peuvent avoir lieu selon la qualité de la prise de vue (contraste, luminosité).

Une seconde méthode a également été testée à titre de comparaison (option n°2, Illustration 28) et permet d’éviter le déclenchement des alertes systématiques en lissant les erreurs liés à une détection approximative. Cette méthode consiste à calculer la surface moyenne 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. 3) :

$$\text{if } \frac{S_t + S_{t-1}}{2} > \text{Seuil}_{local} \ \&\& \ H_t - H_{t-1} > 24 \ \&\& \ H_{Alert} - H_t > 72 \quad (3)$$

$$\text{Alert}_t = 1$$

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. A titre d'exemple, le contenu du mail est illustré sur l'illustration 27.

MESSAGE D'INFORMATION DU RESEAU DE SUIVI DES ECHOUAGES DE SARGASSES (09-Sep-2019 12:09)

Ce message concerne le littoral de la Martinique. Il est envoyé automatiquement comme information d'alerte aux personnes en charge du réseau de suivi des échouages de sargasses.

La superficie moyenne de sargasses estimée sur le site : 01_Marigot_Bourg est de 2500 m².

Si il n'est pas possible de se rendre sur place pour des mesures complémentaires, veuillez contacter les personnes en charge du réseau de suivi:

c.bouvier@brgm.fr, t.decathelineau@brgm.fr, a.nachbaur@brgm.fr, y.balouin@brgm.fr, b.vittecoq@brgm.fr.

***** FIN DU MESSAGE *****



Illustration 27 : Exemple de mail envoyé pour une alerte déclenchée sur le site du bourg du Marigot le 09 septembre 2019. La surface de sargasses estimée par l'algorithme atteint 2500 m².

4.2.2. Efficacité du système d'alerte et perspectives

Le système d'alerte a été mis en place dans un premier temps en considérant l'option n°1 (Eq 2) depuis le 05 septembre 2019 sur les trois sites étudiés, le bourg du Marigot (Illustration 28a), la plage au nord du bourg de Sainte Marie (Illustration 28b) et la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin (Illustration 28c). Un nombre total de 16 mails a été envoyé sur une période de deux mois (~ 8 mails/mois). Si les alertes déclenchées correspondent à priori à des instants où la quantité de sargasses présente sur site est importante, le nombre de mails reçus sur la période de suivi est jugé trop importants par rapport aux observations réalisées (Illustration 28 cercles verts). Par exemple entre le 12 et le 20 septembre 2019, cinq alertes ont été envoyées pour le site de Grande Anse Macabou au Vauclin alors que la quantité de sargasses échouée reste à priori stable sur la durée (Illustration 28c). En effet la méthode n°1 reste très sensible aux erreurs de détection de par le calcul d'un gradient de surface sur les dernières 24 h.

Au contraire, la méthode n°2 permet à priori de lisser ces erreurs en les moyennant sur une journée (Illustration 28 cercles noirs). De plus, en interdisant le déclenchement d'une nouvelle alerte si celle-ci a déjà été déclenchée au cours des 72 dernières heures, le nombre de mails envoyés réduit de façon significative avec une moyenne de 11 alertes par site sur une période de 10 mois (~ 1 mail/mois).

Sur le site du bourg du Marigot, avec un seuil fixé à 2800 m², un total de 15 alertes a été déclenché depuis le mois de janvier sur une période de 10 mois (Illustration 28a). A titre d'exemple, les séries d'images correspondant aux 4 dernières alertes déclenchées sont présentées sur l'illustration 29. Entre le 11 et le 16 juillet, la surface de pixel détectée par l'algorithme évolue de 1000 à 4000 m² et entraîne le déclenchement de l'alerte le 15 juillet (Illustration 28a et Illustration 29). De la même façon, une alerte est déclenchée le 02 août avec une surface de sargasses estimée à plus de 4000 m² (Illustration 28a), bien que la nappe de sargasses présente sur le site semble de plus faible importance (Illustration 29). Deux semaines plus tard, entre le 13 et le 16 août, la surface de pixel estimée augmente de façon significative et passe de 1000 à plus de 3000 m² (Illustration 28a), entraînant le déclenchement de l'alerte le 15 août (Illustration 29). A la fin de la période de suivi, le 11 septembre, des sargasses sont détectées par l'algorithme bien que cette fois-ci, les algues restent sous la surface de l'eau (Illustration 29), probablement suite à un mélange provoqué par le coup de mer du 27 août.

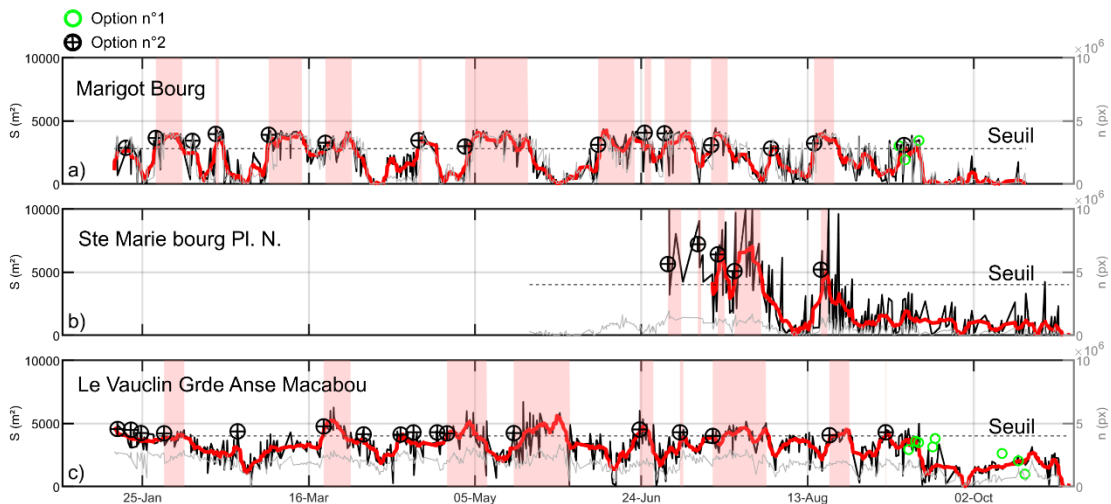


Illustration 28 : Evolution des surfaces de sargasses exprimées en m² sur les trois sites étudiés entre janvier et novembre 2019. Les points noirs représentent le calcul ponctuel des surfaces et la courbe rouge le signal filtré. Les cercles verts correspondent aux dates des alertes déclenchés par l'option n°1 (Eq. 2) tandis que les croix noires entourés d'un cercle correspondent aux alertes déclenchées par l'option n°2 (Eq. 3).

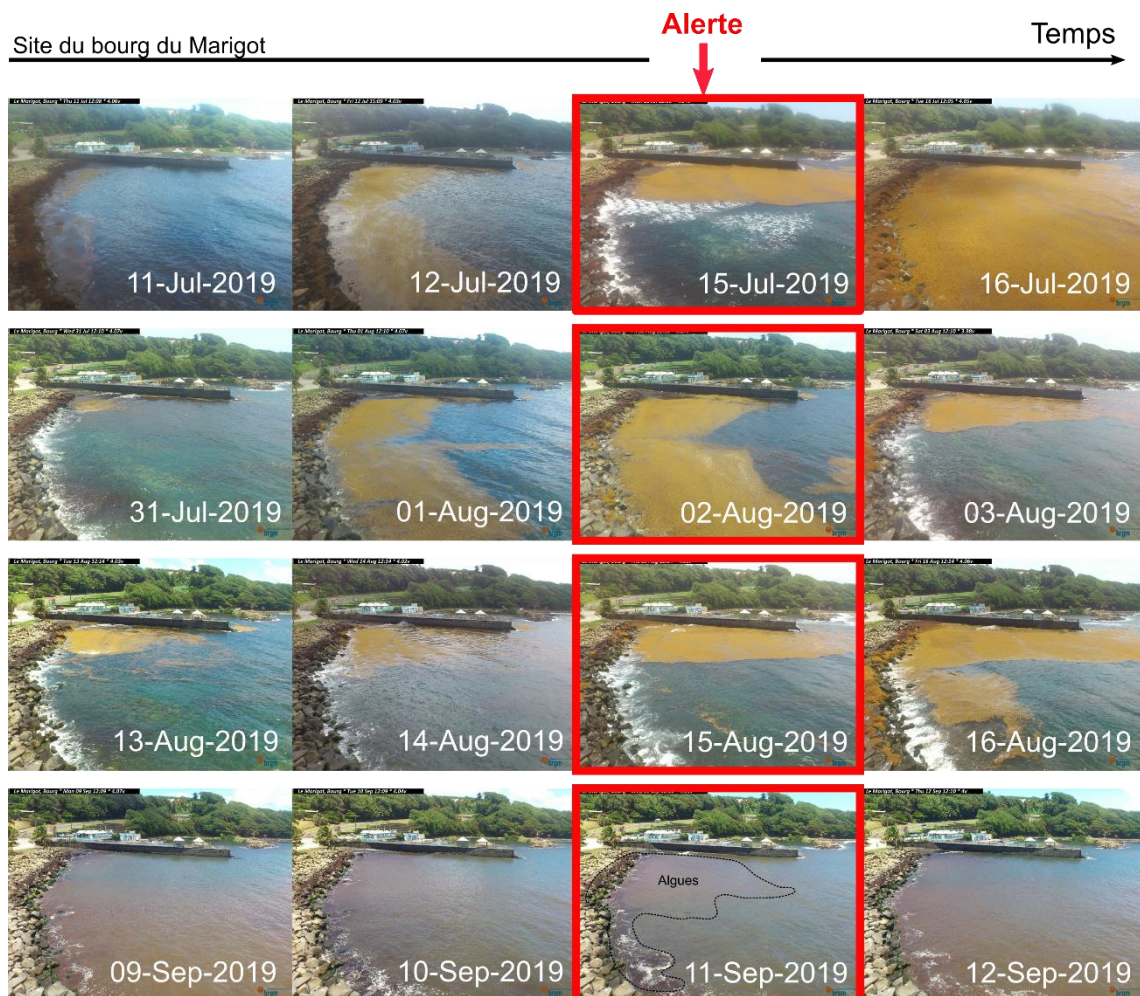


Illustration 29 : Series d'images illustrant l'efficacité du système d'alerte sur le site du bourg du Marigot (3 derniers déclenchements sur la période de suivi). Le seuil d'alerte a été fixé à 2800 m².

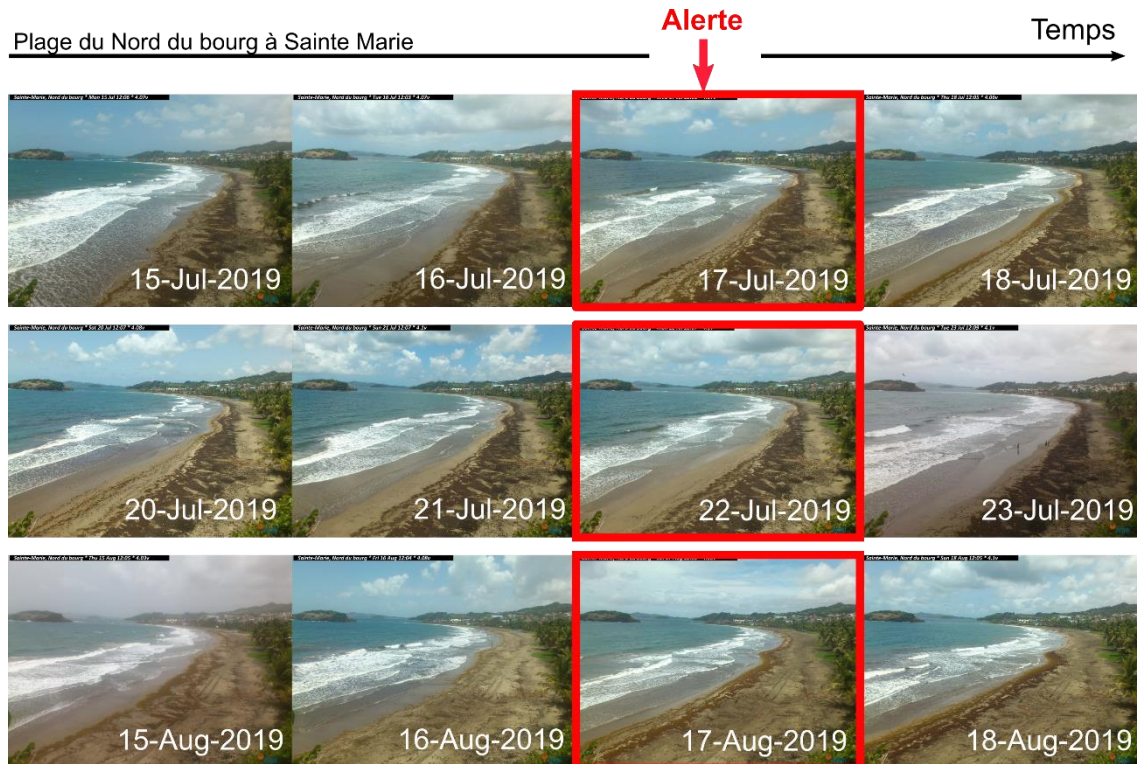


Illustration 30 : Series d'images illustrant l'efficacité du système d'alerte sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie (un seul déclenchement sur la période de suivi). Le seuil d'alerte a été fixé à 4000 m².

Sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie, avec un seuil fixé à 4000 m², 5 alertes ont été déclenchées depuis le mois de juillet sur une période de plus de 3 mois (Illustration 28b). A titre d'exemple, les images correspondant au déclenchement de l'alerte sont présentées sur l'illustration 30. Entre le 15 juillet et le 18 juillet, la surface de sargasses détectée par l'algorithme atteint plus de 5000 m², ce qui entraîne le déclenchement de l'alerte le 17 juillet (Illustration 30). Quelques jours plus tard, la surface de sargasses estimée reste élevée ($S > 5000$ m²) et entraîne le déclenchement d'une nouvelle alerte le 22 juillet (Illustration 30). Enfin, entre le 15 et le 17 août, une nouvelle alerte est envoyée suite à un nouvel échouage de sargasses au cours duquel la surface d'algues échouées sur la plage atteint plus de 5000 m². Sur le site de Sainte Marie, au moment de l'alerte, les surfaces de sargasses sont déjà échouées sur la plage.

Sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin, avec un seuil fixé à 4000 m², un total de 17 alertes a été déclenché depuis le mois de janvier sur une période de 10 mois (Illustration 28c). A titre d'exemple, les séries d'images correspondant aux 3 dernières alertes déclenchées sont présentées sur l'illustration 31. Entre le 11 et le 15 juillet, la surface de pixel détectée par l'algorithme évolue de 3500 à plus de 4000 m² et entraîne le déclenchement de l'alerte (Illustration 28c). Un mois plus tard, entre le 17 et le 20 août, la surface de pixel estimée atteint plus de 4000 m² (Illustration 28c), entraînant le déclenchement d'une nouvelle alerte (Illustration 31). De la même façon, une alerte est déclenchée le 05 septembre avec une surface de sargasses estimée à plus de 4000 m² (Illustration 28c).

Alors que sur les sites du bourg du Marigot ou de la plage de Sainte Marie, les alertes déclenchées correspondent effectivement la plupart du temps à des échouages ou arrivages significatifs de sargasse, la présence quasi-permanente de ces algues sur le site de Grande Anse Macabou provoque le déclenchement récurrent de l'alerte alors que les surfaces échouées restent finalement assez stable. Un seuil d'alerte plus élevé (par exemple fixé à 5000 m²) sur le site de Grande Anse Macabou permettrait de se concentrer sur les plus gros échouages.



Illustration 31 : Series d'images illustrant l'efficacité du système sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin d'alerte (3 derniers déclenchement sur la période de suivi). Le seuil d'alerte a été fixé à 4000 m².

4.3. DYNAMIQUE DU TRAIT DE COTE

Afin de mieux évaluer les impacts des échouages de sargasses sur les plages le suivi vise aussi à caractériser l'évolution du trait de côte sur les sites étudiés. En effet, certaines techniques de collecte utilisées peuvent contribuer à fragiliser l'équilibre sédimentaire en raison des prélèvements de sable associés. A l'inverse, les dépôts de sargasses peuvent également jouer un rôle de protection en favorisant le maintien du sable et en atténuant les effets de la houle sur le littoral.

Les positions des différents traits de côtes sont extraites à partir des images obtenues sur les plages au nord du bourg à Sainte Marie et de Grande Anse Macabou au Vauclin (Illustration 32). Sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie, la position du jet de rive a été masquée par la présence des arbres jonchant la falaise côtière sur toute la première partie de la période de suivi. Les positions du trait de côte ont pu être extraites à partir du 17 juillet 2019 pendant 4 mois consécutifs. Les positions du trait de côte ont été extraites environ tous les jours depuis le 1^{er} novembre 2018 pendant 12 mois consécutifs sur la plage de Grande Anse Macabou.

Pour les deux sites étudiés, la position d'équilibre théorique ($X_{tdc_{eq}}$, Illustration 32) est obtenue site par site en moyennant dans le temps chacune des positions du trait de côte (X_{tdc}). Afin de quantifier un recul ou une avancée du trait de côte, l'écart (ΔX_{tdc}) par rapport à cette position d'équilibre théorique est calculé pour chacune des positions du trait de côte extraites à partir des images (Illustration 32).

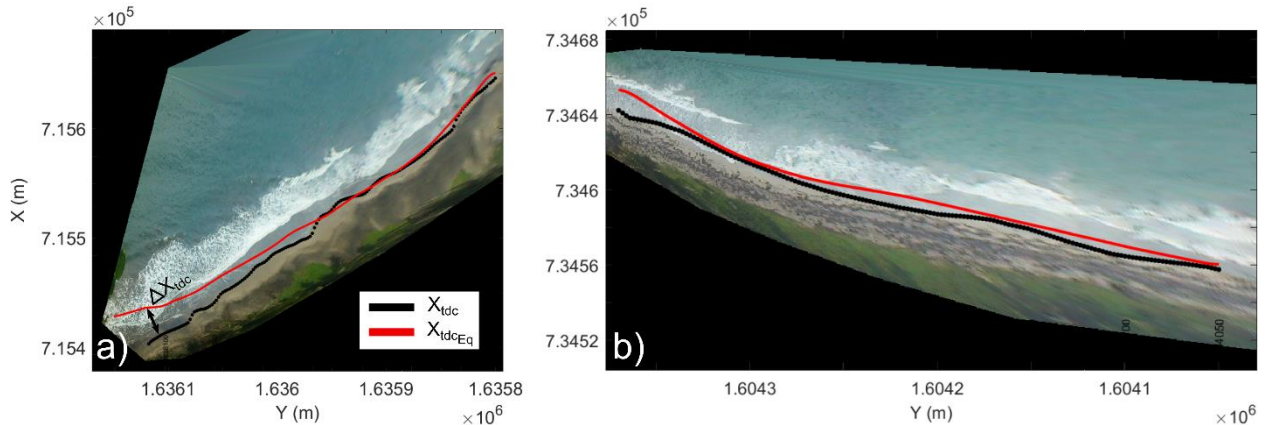


Illustration 32 : Images rectifiées des deux sites étudiés pour la dynamique du trait de côte (a) la plage au nord du bourg (Sainte Marie) et (b) Grande Anse Macabou (Vauclin). Les positions du trait de côte (X_{tdc}) extraites au moment de la prise de vue le 14 octobre 2019 sont superposées en noir. Les positions d'équilibre théoriques ($X_{tdc_{eq}}$) sont représentées par la ligne rouge continue.

4.3.1. Plage au nord du bourg à Sainte Marie

Sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie, la position du trait de côte a été moyennée sur toute la portion de plage analysée. L'évolution de la largeur de plage moyenne par rapport à la position d'équilibre ($\overline{\Delta X_{tdc}}$) a été calculée sur une durée de 4 mois depuis le 16 juillet 2019 (Illustration 33b). La dynamique du trait de côte présente principalement une phase d'accrétion où la largeur de plage augmente jusqu'au 15 septembre et une phase d'érosion plus rapide, où la largeur de plage diminue jusqu'au 10 octobre (Illustration 33b).

Pendant la phase d'accrétion (Illustration 34, en haut), la largeur de plage augmente d'environ 30 m sur une durée de 3 mois (soit à une vitesse de 10 m/mois) en relation avec un climat de vagues modéré. Au cours de cette période, la hauteur significative des vagues reste inférieure à 2 m hormis le 27 août pendant un épisode de fortes vagues (Illustration 33a). Alors que l'on aurait pu s'attendre à une érosion importante de la plage, cette épisode de forte vague n'entraîne pas de recul du trait de côte.

Au contraire, les épisodes de vagues du 17 et du 22 septembre entraînent un recul significatif du trait de côte, illustré par la largeur de plage qui réduit fortement (plus de 20 m, Illustration 33b) entre le 15 septembre et le 23 septembre (Illustration 34, en bas). Plus particulièrement le coup de mer du 17 septembre entraîne une érosion de plus de 15 m en quelques heures seulement. A la suite de ces épisodes, un troisième épisode de vagues énergétiques survint le 29 septembre et provoque le recul du trait de côte sur une dizaine de mètres supplémentaires. Par la suite, la succession des mesures présente des sinuosités peu significatives jusqu'à l'épisode du 29 octobre qui provoque un nouveau recul du trait de côte.

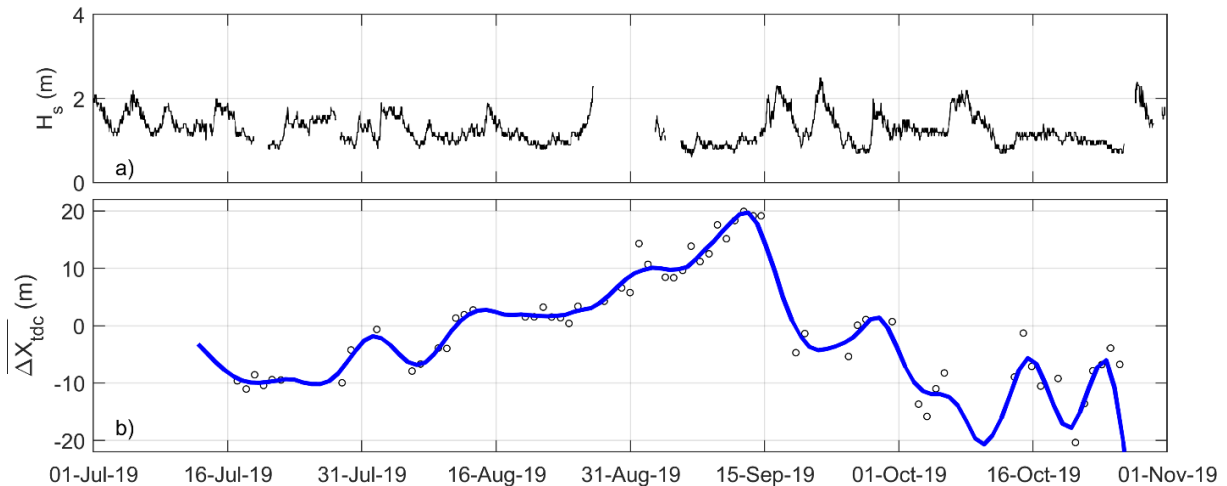


Illustration 33 : Dynamique du trait de côte sur la plage au nord du bourg à Sainte Marie. a) Hauteur significative des vagues (H_s) mesurée à Basse Pointe et b) évolution de la largeur de plage moyenne caclulée par rapport à la position d'équilibre (Illustration 32a), avec en traits épais la composante filtré.



Illustration 34 : Séquences illustrant la dynamique naturelle du trait de côte sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie avec une première phase d'accrétion (en haut) entre le 15 juillet et le 15 septembre (la plage s'élargit sur plus de 30 m) et une phase d'érosion (en bas). La succession des épisodes de fortes vagues entre le 15 septembre et le 15 octobre provoque le rétrécissement de la largeur de plage sur plus de 30 m.

4.3.2. Plage de Grande Anse Macabou au Vauclin

Sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin, l'évolution de la largeur de plage moyenne par rapport à la position d'équilibre ($\overline{\Delta X}_{tdc}$) a été calculée sur une durée de 12 mois depuis le 01 novembre 2018 (Illustration 35b). La dynamique du trait de côte présente une certaine stabilité bien que les épisodes de fortes vagues entraînent systématiquement la diminution de la largeur de plage (Illustration 35b). Par exemple les événements du 27 août et du 29 octobre provoque un recul du trait de côte sur une dizaine de mètres. De façon plus marquée, la succession des épisodes de fortes vagues du 17, 22 et 29 septembre provoque une érosion importante du trait de côte qui subit au total un recul de plus de 15 m (Illustration 35 et Illustration 36).

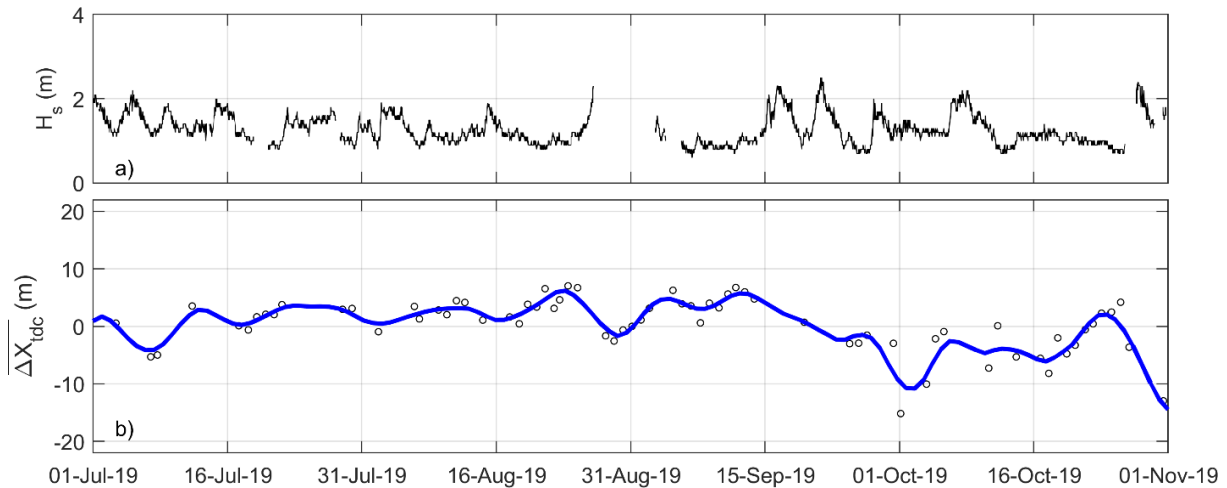


Illustration 35 : Dynamique du trait de côte sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. a) Hauteur significative des vagues (H_s) mesurée à Basse Pointe et b) évolution de la largeur de plage moyenne caclulée par rapport à la position d'équilibre (Illustration 32a), avec en traits épais la composante filtré).



Illustration 36 : Séquence illustrant le recul du trait de côte sur la plage du Grande Anse Macabou entre le 15 juillet et le 1^{er} octobre. La succession des épisodes de fortes vagues comme le 28 septembre provoque la réduction de la largeur de plage sur plus de 15 m.

4.3.3. Impact des échouages sur la dynamique du trait de côte

Afin d'évaluer le rôle de la présence de sargasses sur la dynamique du trait de côte, l'impact des épisodes de fortes vagues du 27 aout (S1, Illustration 37b) et du 17 octobre (S2, Illustration 37b) a été comparé sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie. Au cours de ces deux évènements, la quantité de sargasses échouée sur la plage est très différente avec plus de 15 % des pixels identifiés comme étant des sargasses avant l'épisode S1 et moins de 3 % avant S2 (Illustration 37a). Comme le montre l'illustration 37b, le houllographe connaît un disfonctionnement matériel pendant l'épisode S1. Afin de comparer les caractéristiques des vagues pendant les deux évènements, les données issues du modèle de prévision WAVEWATCH III développé par Ifremer (<http://marc.ifremer.fr/>) ont été utilisées. Au niveau du point d'extraction du houllographe déficient, les caractéristiques des vagues simulées pendant le pic des évènements S1 et S2 sont décrites par le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des vagues au pic des évènements S1 et S2 (données extraites à Basse pointe à partir du modèle de prévision WAVEWATCH III). Données disponibles sur <http://marc.ifremer.fr/>).

Évènement	Date	H_s	T_p	Direction
S1	27/08/2019	2,50	8-9 s	ESE
S2	17/09/2019	2.20	8-9 s	ENE

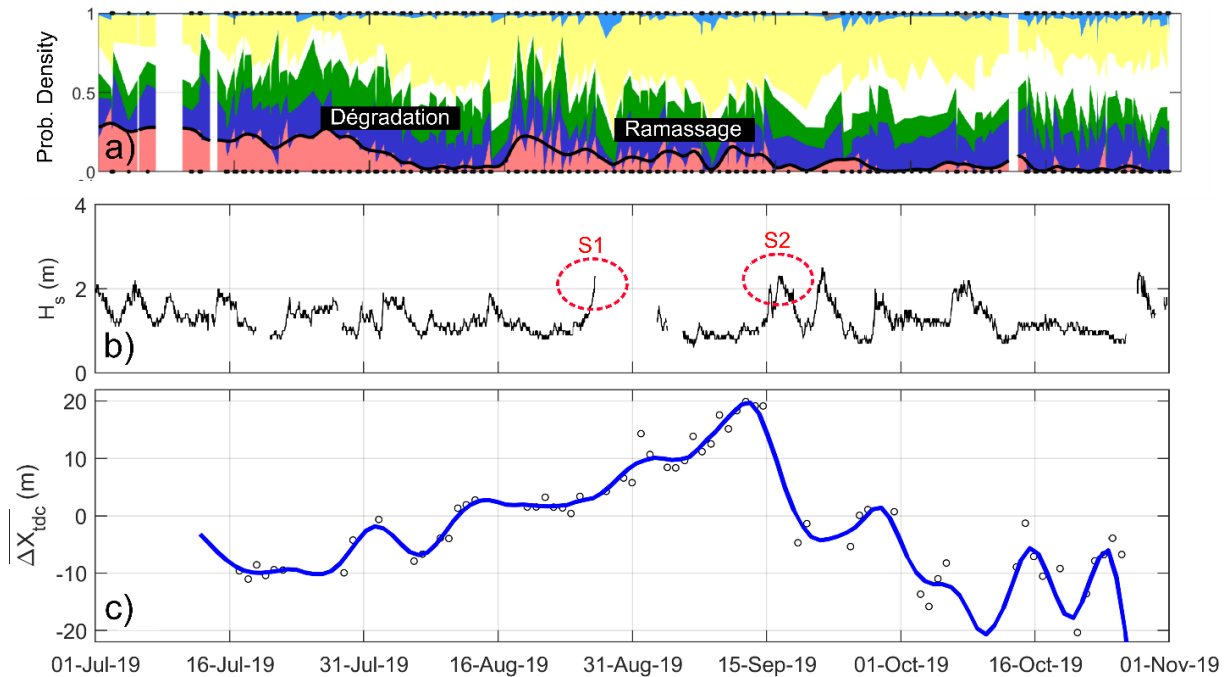


Illustration 37 : a) Evolution temporelle de la densité de probabilité de présence des sargasses (rose) sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie. b) Hauteur significative des vagues (H_s) mesurée à Basse Pointe et c) évolution de la largeur de plage moyenne par rapport à la position d'équilibre. Les évènements S1 et S2 sont marqués par des cercles en pointillés rouges.



Illustration 38 : Séquence illustrant la réponse contrastée du trait de côte sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie suite aux épisodes de fortes vagues (S1 en haut et S2 en bas). Une quantité importante de sargasses échouées sur la plage est visible avant l'épisode S1 du 27 aout 2019.

Au cours des deux évènements, la hauteur des vagues dépasse 2 m de hauteur significative avec une période de propagation située entre 8 et 9 s (Tableau 1). La direction de propagation des vagues est légèrement différente entre les deux épisodes, avec une exposition plus importante aux fortes vagues au cours de l'évènement S2. L'évolution du trait de côte sur la plage de Sainte Marie montre une dynamique très différente en réponse aux deux évènements (Illustration 37c). Dans un premier temps, on observe une certaine stabilité en réponse à l'épisode de forte vague du 27 aout (S1, Illustration 37b et c) au cours duquel une quantité non négligeable de sargasses

est détectée, visible échouée sur la plage (Illustration 37a et Illustration 38). Au contraire, un recul du trait de côte sur plus de 15 m est observé suite à l'évènement S2. En relation avec cette dynamique, on remarque l'absence totale de sargasses échouées sur la plage avant et pendant l'évènement (Illustration 37a et Illustration 38). Ces résultats suggèrent alors le rôle protecteur des sargasses échouées sur la plage pendant l'épisode S1. Pendant le pic de la tempête, les algues présentes sur la plage favorisent une certaine retenue du jet de rive qui s'étend alors sur une distance assez faible par rapport à la hauteur des vagues qui déferlent sur la plage (Illustration 38, en haut).

La répétition des situations de fortes vagues avec ou sans la présence de sargasses pourra apporter dans le futur des informations complémentaires et venir confirmer ce constat. De plus, l'incidence des vagues ou encore la durée de l'évènement n'ont pu être examinées précisément du au dysfonctionnement du houlographe au cours de l'évènement S1. Des fonctionnements similaires n'ont pu être observés sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin au vu de la présence quasi-permanente des algues sur la plage pendant la période de suivi.

5. Discussion et conclusion

Afin d'améliorer la connaissance et la compréhension des échouages de sargasses et leur impact sur le littoral, 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 général de ce projet visait à expérimenter un suivi des échouages et arrivages de sargasses par un réseau de caméras autonomes.

- **Le réseau de suivi**

Le réseau de suivi est opérationnel depuis décembre 2018 et permet de couvrir les principales façades exposées aux échouages sur le littoral martiniquais. Parmi les 15 sites suivis, neuf correspondent à des littoraux urbanisés (fond de baie ou port) et six à des plages sableuses. Chacun des sites du réseau de suivi a été décrits dans le rapport de la phase 1 du projet (BRGM/RP-69071-FR). Les photographies des sites suivis sont rassemblées et visualisables en temps réel sur une page internet dédiée mise en place dans le cadre de ce projet. Sur les 12 premiers mois de fonctionnement, le nombre d'interventions techniques est relativement important (38 interventions, soit environ 3 par mois), mais permet d'assurer une récupération des images à hauteur de 85 % en moyenne. Les principaux facteurs jouant sur la performance des caméras sont souvent reliés à la fluctuation du réseau 3G et à l'alimentation solaire (connectiques souvent endommagées). Reste désormais à suivre la pérennité de ce dispositif sur une période plus longue. La seconde menace est liée aux émissions de sulfure d'hydrogène H₂S rejetées par la décomposition des sargasses pouvant provoquer une oxydation des métaux et donc un dysfonctionnement électronique du dispositif sur le long terme.

- **Efficacité des algorithmes de détection**

La chaîne de traitement des images a été testée sur le site du bourg du Marigot, la plage au nord du bourg de Sainte-Marie et la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Notons que pour les besoins de l'étude, la méthode permet de détecter les échouages de sargasses ainsi que les nouveaux arrivages visibles d'abord à la surface de l'eau. L'algorithme développé est capable de détecter de façon relativement fidèle la présence de sargasses bien que la série temporelle comporte quelques lacunes correspondant à des erreurs de détection du modèle de classification. Les images avec des nuages, sombres ou encore lorsqu'il y a de la pluie, dégradent largement les performances du modèle. La différenciation entre le sable, l'eau et les sargasses est plus ou moins bien réalisée par l'algorithme lorsque le contraste entre les différentes classes reste élevé. Par exemple, la différenciation entre le sable, et les sargasses est mieux réalisée sur la plage de Grande Anse Macabou que dans le cas de la plage de Sainte Marie car la couleur des grains de sable y est généralement plus clair et le contraste par conséquent plus élevé.

- **Dynamique des échouages et efficacité du système d'alerte**

En plus de la disparité importante des quantités de sargasses présentes entre les différents sites, les analyses réalisées mettent également en évidence la dynamique très variée des mécanismes naturels d'arrivages ou de remaniement des algues échouées sur la plage. 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 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 évènement de tempête. Au contraire, lorsque les conditions de vagues restent modérées, le

tassement et l'enfouissement progressif des sargasses échouées peut être observée sur plusieurs semaines. Par ailleurs, en lien avec les interventions de collecte réalisées sur les plages, des facteurs anthropiques viennent perturber la variabilité des surfaces échouées.

Au vue de la complexité observée concernant la dynamique des échouages de sargasse, la mise en place d'un système d'alerte en temps réel et à une résolution spatiale adaptée (site par site) est essentielle pour une meilleure gestion du risque d'échouage ou d'arrivage de sargasses en Martinique et plus généralement dans les Antilles. L'algorithme de segmentation des images a été alors 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 prédéterminé par l'utilisateur, l'alerte est automatiquement déclenchée et un message d'information est envoyé par mail. Actuellement, l'ensemble des étapes du traitement des images a été testé et mis en œuvre sur les trois sites pilotes prédéterminés.

Alors que sur les sites du bourg du Marigot ou de la plage de Sainte Marie, les alertes déclenchées correspondent effectivement la plupart du temps à des arrivages significatifs de sargasses, le système d'alerte montre une certaine limite sur la plage de Grande Anse Macabou. La présence quasi-permanente de sargasses avec une surface estimée par l'algorithme proche du seuil fixé provoque le déclenchement récurrent de l'alerte alors que les surfaces échouées restent finalement assez stable. Un seuil d'alerte plus élevé sur le site de Grande Anse Macabou au Vauclin permettrait de limiter ces effets et ainsi d'augmenter l'efficacité du système d'alerte. De plus, une délimitation plus précise des zones d'intérêt où doit s'effectuer le calcul de la surface de sargasses devrait permettre de limiter les erreurs de détection lorsque la présence d'algue n'est pas envisageable. Au cours de la classification automatique des images, nous préconisons par exemple de ne pas prendre en compte certains éléments (bâti, végétation dense) afin d'améliorer la précision de l'estimation de la surface de sargasses et de limiter les fausses alertes. Enfin, un seuil d'alerte calculé sur une base quotidienne en moyennant la surface de sargasses estimée par l'algorithme sur une journée devrait également permettre de limiter les alertes provoquées par des erreurs de détection.

Le système d'alerte mis en place offre de nombreuses perspectives pour une meilleure gestion du risque d'échouage ou d'arrivage de sargasses en Martinique et plus généralement dans les Antilles. En complétant du mail d'alerte, une chronique de l'évolution de la densité de probabilité de sargasses sur les 20 ou 30 derniers jours pourrait fournir au gestionnaire le recul nécessaire pour une meilleure évaluation de l'exposition d'un site aux arrivages de sargasse. Ces chroniques pourraient alors être réalisées sous la forme d'un bulletin envoyé automatiquement au différents acteurs du réseau de suivi.

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

Afin de mieux caractériser les impacts des échouages de sargasses sur les plages le suivi vise aussi à caractériser l'évolution du trait de côte sur les sites étudiés. Les positions des différents traits de côtes sont extraites à partir des images obtenues sur les plages au nord du bourg à Sainte Marie et de Grande Anse Macabou au Vauclin.

Sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie, l'évolution de la largeur de plage moyenne a été évaluée sur une durée de 4 mois depuis le 16 juillet 2019. La dynamique du trait de côte présente principalement une phase d'accrétion où la largeur de plage augmente d'environ une trentaine de mètre jusqu'au 15 septembre et une phase d'érosion plus rapide, où la largeur de plage diminue sur plus de 35 m jusqu'au 10 octobre. Plus particulièrement le coup de mer du 17 septembre entraîne une érosion de plus de 15 m en quelques heures seulement.

Sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin, l'évolution de la largeur de plage moyenne a été calculée sur une durée de 12 mois depuis le 01 novembre 2018. La dynamique du trait de côte présente une certaine stabilité bien que les épisodes de fortes vagues entraînent systématiquement la diminution de la largeur de plage. Par exemple, la succession des épisodes de fortes vagues du 17, 22 et 29 septembre provoque une érosion importante du trait de côte qui subit au total un recul de plus de 15 m.

Afin d'évaluer le rôle de la présence de sargasses sur la dynamique du trait de côte, l'impact des épisodes de fortes vagues du 27 août et du 17 octobre a été comparé sur la plage au nord du bourg de Sainte Marie. L'évolution du trait de côte sur la plage de Sainte Marie montre une dynamique très différente en réponse aux deux événements. Dans un premier temps, on observe une certaine stabilité en réponse à l'épisode de forte vague du 27 août, caractérisé par la présence d'une quantité non négligeable de sargasses sur la plage avant et pendant l'évènement. Au contraire, un recul du trait de côte sur plus de 15 m est observé suite à l'évènement du 17 octobre, caractérisé par l'absence de sargasses sur la plage avant et pendant l'évènement. Ce premier constat suggère alors le rôle protecteur des sargasses échouées sur la plage pendant cet épisode.

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

6. Conclusion générale

L'efficacité du dispositif de suivi par caméras autonome des échouages de sargasses a été évalué sur trois sites-pilotes martiniquais : le site du bourg du Marigot, la plage au nord du bourg de Sainte Marie et la plage de Grande anse Macabou au Vauclin. Sur chacun de ces sites, un algorithme de détection automatique des arrivages et des échouages de sargasses a été mis en place et présente des résultats très satisfaisants.

La comparaison entre les surfaces de sargasses (échouées sur la plage ou à la surface de l'eau) calculées automatiquement par l'algorithme et les observations visuelles (*timestack*) mettent en avant la pertinence des détections réalisées.

Afin de fournir un outil d'aide à la décision et à la gestion des sargasses, un prototype d'alerte par mail a été mis en place, se basant sur des seuils de surfaces qui restent à ce stade, très spécifique à chacun des sites, en raison notamment de la forte variabilité des comportements (remaniement des algues lors des tempêtes, ramassage) ou de l'emprise des caméras sur leurs sites respectifs.

Les résultats obtenus depuis 2018 suggèrent qu'un suivi site par site est indispensable vu la complexité du phénomène et permettent d'émettre des hypothèses sur la dynamique des échouages et de leur devenir lors des tempêtes, ainsi que des effets induits sur l'évolution du trait de côte.

Cette étude fournit à la fois des éléments de compréhension sur l'évolution du littoral, mais également un dispositif opérationnel efficace pour la gestion des dépôts de sargasse. Les données obtenues sont indispensables pour mieux comprendre les mécanismes d'échouages ou de remaniement naturel des algues par la mer et permettent d'envisager de nombreuses perspectives de gestion comme le suivi de l'efficacité d'un barrage, l'organisation adéquat d'un ramassage, ou encore le stockage des algues ramassées en fonction des surfaces évaluées.

L'application de ces algorithmes à d'autres sites de la côte martiniquaise et la poursuite des observations dans les prochaines années permettront d'améliorer la gestion de ces situations d'échouages massifs de sargasses et de mieux comprendre les effets de ces événements sur les évolutions du trait de côte.

7. Bibliographie

- Aarninkhof, S.G.J., Turner, I.L., Dronkers, T.D.T., Caljouw, M., Nipius, L., 2003. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coast. Eng.* [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(03\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(03)00064-4)
- Belon, R., Bodéré, G., 2016. Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Rapport d'observations 2015.
- Bouvier, C., Balouin, Y., Castelle, B., Holman, R., 2019. Modelling camera viewing angle deviation to improve nearshore video monitoring. *Coast. Eng.* 174, 99–106.
- Franks, J., Johnson, D., Ko, D., 2015. North Equatorial Convergence Region of the Atlantic Ocean: a hypothesis for examining recent mass strandings of pelagic *Sargassum* along Caribbean *Proc. Gulf Caribb.*
- Holland, K.T., Holman, R. a, Lippmann, T.C., Stanley, J., Plant, N., 1997. Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies - *Oceanic Engineering, IEEE Journal of. IEEE J. Ocean. Eng.* 22, 81–92.
- Lippmann, T.C., Holman, R.A., 1989. Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *J. Geophys. Res.* 94, 995. <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p00995>
- Lombard, M., De Cathelineau, T., Nachbaur, A., 2019. Suivi des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Bilan de la phase d'installation du dispositif photographique.
- Partlow, J., Martinez, G., 2015. Mexico deploys its navy to face its latest threat: Monster seaweed. *Washington Post*.
- Savitzky, A., Golay, M.J.E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* 36, 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Van Enckevort, I.M.J., Ruessink, B.G., 2001. Effect of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position. *J. Geophys. Res.* 106979, 969–16. <https://doi.org/10.1029/1999JC000167>
- Vos, K., Harley, M.D., Splinter, K.D., Simmons, J.A., Turner, I.L., 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coast. Eng.* 150, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B.B., Mitchum, G., Lapointe, B., Montoya, J.P., 2019. The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science* (80-.). 364, 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>



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale de la Martinique
4 lot. Miramar
Route Pointe des nègres
97200 – Fort de France – France
Tél. : 05 96 71 17 70