



ÉTUDE EXPLORATOIRE SUR L'INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LES CONCENTRATIONS EN H₂S ISSUES DE LA DÉCOMPOSITION DES ALGUES SARGASSES

• 2025 •

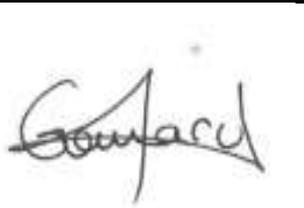
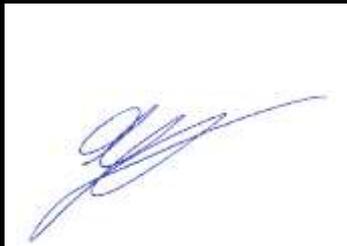
Etude exploratoire sur l'influence des conditions environnementales sur les concentrations en H₂S issues de la décomposition des algues sargasses

Année 2025

Madininair : Observatoire de la Qualité de l'Air



Rapport édité sous système de management de la qualité
certifié AFAQ ISO 9001 : 2008

	Rédaction	Vérification	Approbation
Nom	Loetitia Gamard	Jean Guimberteau	Carole Boullanger
Qualité	Chargée d'études	Ingénieur d'études	Responsable d'études
Visa			

Avec la contribution de Marty DESBRILLES et Lucie PEROTTI pour le traitement et l'analyse des données.

Crédit Photo de couverture : Florent PUY

○ SOMMAIRE ○

Table des abréviations.....	5
Table des figures.....	6
Table des tableaux.....	8
Introduction.....	9
I. Présentation du réseau de surveillance de sargasses.....	11
I.1 La surveillance des gaz émis par la dégradation des algues en Martinique	11
I.1.1 Le réseau fixe de Cairnet	12
I.1.2 Les Drägers : réseau mobile de mesures complémentaires	12
I.1.3 Information et communication des résultats.....	13
I.2 Méthode de collecte des images et traitement des données de surface des nappes de sargasses.....	13
I.2.1 Implantation et origine du réseau de caméras	14
I.2.2 Dispositif Solarcam : outils de surveillance des arrivages de sargasses.....	15
I.2.3 Détection et traitement des données issues des images.....	16
II. Analyses exploratoires des émissions de gaz liées à la décomposition des algues sargasses et choix du site de Frégate-Est 2.....	19
II.1 Etude des variations temporelles des concentrations en H ₂ S entre 2018 et 2022.....	19
II.2 Présentation des dépassements des seuils de 1ppm et de 5 ppm (2018-2022).....	23
II.3 Identification du rapport entre l'arrivage des nappes de sargasses et les concentrations en H ₂ S sur le site de Frégate-Est 2.....	26
III. Evaluation de la corrélation entre les variables météorologiques et les concentrations en H ₂ S sur le site de Frégate-Est 2	29
III.1 Localisation et sources des données sur le site d'étude	29
III.2 Méthode d'évaluation de la corrélation des variables : Analyse en Composantes Principales	30
III.2.1 Éléments de définitions.....	30
III.2.2 Lecture des cercles de corrélation	31
III.2.3 Filtres appliqués à l'étude	32
III.3 Relations entre les variables en intervalle de temps horaire.....	32
III.3.1 Interprétation graphique des résultats en cercle des corrélations.....	33
III.3.2 Mesure des corrélations en fonction de la concentration en H ₂ S	35
III.4 Relations entre les variables en intervalle de temps journalier.....	36



III.4.1	Interprétation graphique des résultats en cercles des corrélations	36
III.4.2	Mesure des corrélations en fonction de la concentration en H ₂ S	39
IV.	Identification des paramètres météorologiques prépondérant dans la décomposition des algues sargasses sur le site de Frégate-Est 2	42
IV.1	Le vent	42
IV.2	La marée	45
IV.3	Les précipitations	47
IV.4	La température.....	49
IV.5	L'humidité relative	50
IV.6	L'insolation	52
IV.7	Le facteur jour/nuit	53
	Conclusion	55
	Bibliographie	57
V.	Annexes	58
V.1	Implantation des sites par commune.....	58
V.2	Synthèse des paramètres étudiés en moyennes mensuelles	59
V.3	Analyses des paramètres météorologiques avant la période d'étude (de 2014 à 2018) à l'échelle de la Martinique.....	60
V.4	Echelle de Beaufort	63

Table des abréviations

ACP	Analyse en Composantes Principales
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, Alimentation, Environnement, Travail
ARS	Association Régionale de la Santé
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
DEAL	Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement
DV	Direction du Vent
H₂S	Hydrogène Sulfuré
HCSP	Haut Conseil de Santé Publique
ND	No Data
NH₃	Ammoniac
Ppm	Partie par millions
HR	Humidité Relative
INS	Durée d'insolation
RR1	Précipitations horaires
SHOM	Service Hydrographique et Océanique de la Marine
SISPS	Syndicat intercommunal pour la mise en valeur des plages et sites touristiques de Guadeloupe
SURF	Surface estimée des nappes de sargasses
T	Température de l'air
VV	Vitesse du Vent

Table des figures

Figure 1 : Localisation des sites de mesure H ₂ S	11
Figure 2 : Photographies (a) d'un capteur Cairnet et (b) des cairsens	12
Figure 3 : Photographies d'un dispositif Dräger constitué d'une batterie portable et d'un capteur ...	13
Figure 4 : Carte de localisation des caméras BRGM, Madinainair et ImpactMer. Source : Madinainair, 2022.....	14
Figure 5 : Chronologie du réseau de caméras.....	15
Figure 6 : Photo du dispositif de caméra. Source : M.DESBRILLES, 2023.	15
Figure 7 : Fenêtre de visualisation des images caméras. Site de Frégate-EST 2 au François, le lundi 15 mai 2023 à 14 :29. Source : SolarCam, 2023.....	16
Figure 8 : Création du modèle de détection sur le site de Frégate-Est-2. À gauche, les images brutes capturées au niveau du barrage ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, une classification automatique de l'image par l'algorithm. Image du 23 avril 2021 à 10 :16. Source : BRGM, 2021.....	17
Figure 9 : Géo-rectification des images capturées par le dispositif SolarCam, sur le site de Frégate-Est 2 au François. À gauche, image ortho-photo (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visé de la caméra (S). À droite, image rectifiée où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image. En rouge dans l'axe longitudinal et en vert dans l'axe transversal. Source : BRGM, 2021	18
Figure 10 : Détection du banc de sargasses au niveau du filet à Frégate-Est 2 par l'algorithm du BRGM	18
Figure 11 : Saisonnalité des concentrations moyennes mensuelles de H ₂ S tous sites confondus pour les années 2018 à 2022	20
Figure 12 : Moyennes annuelles des concentrations de H ₂ S en ppm par site entre 2018 et 2022 par site de mesure.....	22
Figure 13 : Nombre de dépassements des seuils de gestion par sites entre janvier 2018 et décembre 2022 sur des moyennes de concentrations journalières de H ₂ S en ppm et concentration en H ₂ S maximale journalière (*)	24
Figure 14 : Diagrammes en secteurs de proportion de dépassements des seuils de 1 ppm et 5 ppm pour les trois les plus impactés en Martinique entre 2018 et 2022.....	25
Figure 15 : Répartition mensuelle des moyennes de surface estimée de sargasses à Frégate-est 2 entre 2020 et 2022. Source : BRGM.	26
Figure 16 : Relation entre la surface des sargasses et les moyennes des concentrations en H ₂ S entre 220 et 2022 à Frégate-Est 2.....	27
Figure 17 : Carte de localisation des sources de données	29
Figure 18 : Graphique théorique d'un cercle de corrélation.....	31
Figure 19 : Cercle de corrélation des axes 1 et 2 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022	33
Figure 20 : Cercle de corrélation des axes 1 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022	34
Figure 21 : Cercle de corrélation des axes 2 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022	35
Figure 22 : Cercle de corrélation des axes 1 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières entre 2020 et 2022	37
Figure 23 : Cercle de corrélation des axes 1 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières entre 2020 et 2022	38

Figure 24 : Cercle de corrélation des axes 2 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières entre 2020 et 2022.	39
Figure 25 : Moyennes horaires des vitesses en fonction de la direction du vent pour la période 2020-2022.	43
Figure 26 : Rose des pollutions avec les moyennes horaires des concentrations en H ₂ S en fonction de la direction du vent.	44
Figure 27 : Moyennes mensuelles des hauteurs d'eau au Robert pour les années 2020, 2021 et 2022 pour les pleines mers (PM) et basses mers (BM)	46
Figure 28 : Répartition des cumuls mensuels de précipitations à François Chopotte entre 2020 et 2022.	48
Figure 29 : Evolution mensuelle de la moyenne des températures à François Chopotte (données des années 2020 à 2022)	49
Figure 30 : Evolution annuelle des températures moyennes à François Chopotte entre 2020 et 2022	50
Figure 31 : Évolution des moyennes d'humidité relative à François Chopotte entre 2020 et 2022.....	51
Figure 32 : Durées d'insolation mensuelle moyenne en heure à François Chopotte entre 2020 et 2022	53
Figure 33 : Influence du facteur jour/nuit sur les concentrations de H ₂ S à Frégate-Est 2, Four à Chaux, Pointe Hyacinthe (données de 2018 à 2022)	54

Table des tableaux

Tableau 1 : Moyennes annuelles des concentrations de H ₂ S en Martinique	21
Tableau 2 : Synthèse des sources de données de l'étude	30
Tableau 3 : Tableau de corrélation pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022.....	36
Tableau 4 : Tableau de corrélation des variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières 2020 et 2022.	40
Tableau 5 : Concentrations horaires moyennes en H ₂ S en fonction des Directions (°) et des Vitesses de vent (m/s).	45
Tableau 6 : Concentrations horaires de H ₂ S en fonction des moyennes des Hauteurs d'eau de la marée réparties en classes de 0,1 m.	47
Tableau 7 : Répartition du marnage en classe de 0.1m en fonction des concentrations horaire en H ₂ S	47
Tableau 8 : Concentrations moyennes journalières en H ₂ S en fonction des cumuls de précipitation journaliers.....	48
Tableau 9 : Concentrations moyennes horaires en H ₂ S en fonction des moyennes horaires des températures.....	50
Tableau 10 : Concentrations moyennes horaires en H ₂ S en fonction des moyennes horaires d'humidité relative.....	51
Tableau 11 : Concentrations moyennes journalières en H ₂ S en fonction des moyennes journalières d'humidité relative.	52
Tableau 12 : Moyennes journalières des concentrations en H ₂ S en fonction des cumuls journaliers d'insolation.....	53

Introduction

Depuis plus d'une dizaine d'années, le phénomène d'échouement des sargasses est devenu un enjeu majeur pour le territoire notamment avec les épisodes de 2011, 2014, 2018, 2020, 2021 et 2022. Selon le rapport de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, Alimentation, Environnement, Travail (ANSES) de 2017 ¹ environ 58 000 tonnes de sargasses se sont échouées aux abords du littoral martiniquais en 2011.

Sous l'impulsion de l'avis du Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) de 2015², relatant la toxicité des gaz émis par la décomposition des algues sargasses et les risques des populations exposées, des mesures de gestion ont été mises en place. En réponse à cette problématique de santé publique, plusieurs moyens de surveillance ont été déployés par les services de l'Etat. Parmi eux, la surveillance des concentrations dans l'air d'hydrogène sulfuré (H₂S) et d'ammoniac (NH₃), gaz dont les effets néfastes sur la santé sont reconnus et nécessitent une surveillance pour les populations les plus exposées. Cette surveillance est effectuée par un réseau de seize capteurs implantés sur la côte atlantique et le sud de la Martinique depuis 2015. Ce réseau est suivi stratégiquement et techniquement par Madinair, l'observatoire de la qualité de l'air en Martinique, en association avec l'Agence Régionale de Santé de Martinique (ARS).

Les sites d'implantation des capteurs sont définis par l'ARS au plus proches des populations exposées, En fonction, de la densité de l'habitat, de la vulnérabilité des populations, des zones d'échouement et des caractéristiques de la morphologie littorale. En parallèle de ce réseau de surveillance, en 2018, avec le soutien technique du Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), la Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DEAL) de Martinique a installé des caméras sur le littoral en vue d'un suivi photographique à intervalles de temps réguliers des arrivages des nappes d'algues sargasses. Depuis 2020, Madinair intègre ce réseau de surveillance en gérant techniquement onze caméras qui ont pour objectif de dimensionner le phénomène d'échouement, et d'améliorer l'évaluation de l'exposition des populations et la compréhension du phénomène de dégradation des algues sargasses. **Dans ce contexte, Madinair a été mandaté par la DEAL pour fournir une analyse rétrospective entre 2018 et 2020 des données issues du réseau de capteurs et de caméras couplées aux données météorologiques, afin de prospecter sur les facteurs environnementaux qui influencent la décomposition des algues sargasses**, dans le but d'identifier les relations entre les concentrations de H₂S et les conditions météorologiques et océaniques propre à la Martinique.

L'objectif de cette étude est de déterminer par un traitement statistique si les différents paramètres météorologiques et océaniques peuvent influencer la mesure de la concentration en H₂S émis par la décomposition des algues et ainsi, à terme, lors de travaux complémentaires, d'anticiper les pics de concentrations et prévenir les habitants selon leur niveau d'exposition. Pour ce faire, la méthodologie utilisée a été de sélectionner un site d'étude représentatif des enjeux liés à la dégradation des sargasses grâce à des analyses exploratoires rétrospectives, puis d'identifier les corrélations entre les paramètres météorologiques et les concentrations en H₂S. Ce rapport présente les analyses obtenues avec en premier lieu, une présentation des moyens de surveillance des algues sargasses (I); puis une

¹ ANSES (Mars 2017). Expositions aux émanations d'algues sargasses en décomposition aux Antilles et en Guyane, *Rapport d'expertise collective, Edition scientifique*, 135 pages.

² HCSP (3 septembre 2015). Avis relatif à la gestion du risque sanitaire lié au émissions toxiques d'algues brunes échouées sur les côtes de Martinique en provenance de la mer des Sargasses, 9 pages.



description du choix du site d'étude (II) et de la corrélation entre variables (III); pour finir par l'analyse des paramètres météorologiques (IV).

I. Présentation du réseau de surveillance de sargasses

Cette section couvre la description des dispositifs de surveillance des concentrations en H₂S et NH₃ utilisés par Madinair comprenant le réseau fixe de capteurs, le réseau mobile et les données issues des caméras.

I.1 La surveillance des gaz émis par la dégradation des algues en Martinique

En Martinique, les concentrations de H₂S et de NH₃ sont mesurées à l'aide de capteurs autonomes de type Cairnet du fournisseur Envea qui sont répartis essentiellement sur la côte atlantique et le sud de la Martinique (Figure 1). Plus précisément, les points de mesure sont localisés du Marigot à Sainte-Anne, avec la majeure partie des appareils implantés sur les communes les plus impactées du Robert et du François (Annexe V.1 page 58).



Figure 1 : Localisation des sites de mesure H₂S

Les sites d'implantation de ces capteurs sont validés par l'ARS en fonction de l'exposition de la population aux gaz. Cette exposition des riverains est définie en fonction des arrivages des nappes de sargasses échouées à la côte et les couloirs de vent (vitesse et direction). Les récents aménagements du littoral, notamment la multiplication des barrages anti-sargasses depuis 2022³, ont modifié les zones d'échouements des sargasses. Une spatialisation des mesures de H₂S du territoire est en cours pour actualiser les sites d'implantation des appareils.

I.1.1 Le réseau fixe de Cairnet

Les Cairnet sont des capteurs qui constituent un réseau de surveillance des mesures des concentrations de H₂S et de NH₃. Les données sont transmises en continu et en temps réel. L'unité de mesure est en partie par million, noté ppm.

Ces appareils sont composés de micro-capteurs, appelés Cairsens, avec une détection de type électrochimique dont la limite de détection est à 0.03 ppm pour la mesure d'H₂S (Figure 2). Une batterie reliée à des panneaux photovoltaïques assure leur autonomie en énergie. La transmission des données est faite grâce au réseau mobile 4G et la visualisation sur la plateforme du constructeur.



Figure 2 : Photographies (a) d'un capteur Cairnet et (b) des Cairsens

I.1.2 Les Drägers : réseau mobile de mesures complémentaires

Les capteurs Drägers sont des appareils de mesure du H₂S avec la particularité d'être facilement mobilisable. Ils répondent à un besoin de collecte de données ponctuelle, notamment en cas d'arrivage massif d'algues sargasse ou pour une étude spécifique. Les détecteurs Drägers se composent d'un

³ Plan national de prévention et de lutte contre les sargasses sur la période 2022 à 2025, Mesure 11 : « Les services de l'État, avec les collectivités concernées, recense et priorisent les besoins en matière d'implantation de barrages pour la durée du présent plan. »

capteur à détection électrochimique et d'un socle de rechargement du capteur d'une autonomie d'une semaine (Figure 3). A ce jour, Madinair dispose de six Dräger qui sont implantés sur la côte atlantique.



Figure 3 : Photographies d'un dispositif Dräger constitué d'une batterie portable et d'un capteur

I.1.3 Information et communication des résultats

Les données du réseau de surveillance sont diffusées par un bulletin journalier envoyé aux partenaires et aux publics inscrits à la newsletter. De plus, les données de ce réseau sont publiées sur le site internet de Madinair et les réseaux sociaux. Le communiqué journalier est réalisé avec les valeurs moyennes sur 24h, de 12h le jour J-1 à 12h le jour J.

Les données du réseau mobile sont disponibles sous forme d'un communiqué hebdomadaire transmis aux partenaires et disponible sur le site internet de Madinair.

Ces communiqués permettent d'informer et d'alerter en cas de dépassements des concentrations en H_2S et NH_3 , à la fois les acteurs de la santé, les institutions, les décideurs et la population.

I.2 Méthode de collecte des images et traitement des données de surface des nappes de sargasses

Avec l'ampleur du phénomène d'échouement de sargasses au fil des années, un réseau de surveillance du littoral par un système de caméras autonomes a été mis en place. Il est aujourd'hui géré techniquement et conjointement entre le BRGM et Madininair.

I.2.1 Implantation et origine du réseau de caméras

Les sites d'implantation (Figure 4) ont été sélectionnés par la DEAL en fonction des zones d'échouements. Les sites choisis sont chez des particuliers, sur la voie publique ou dans des établissements accueillant du public (Madininair, 2021). Au total, 25 caméras sont installées sur le littoral en 2024.

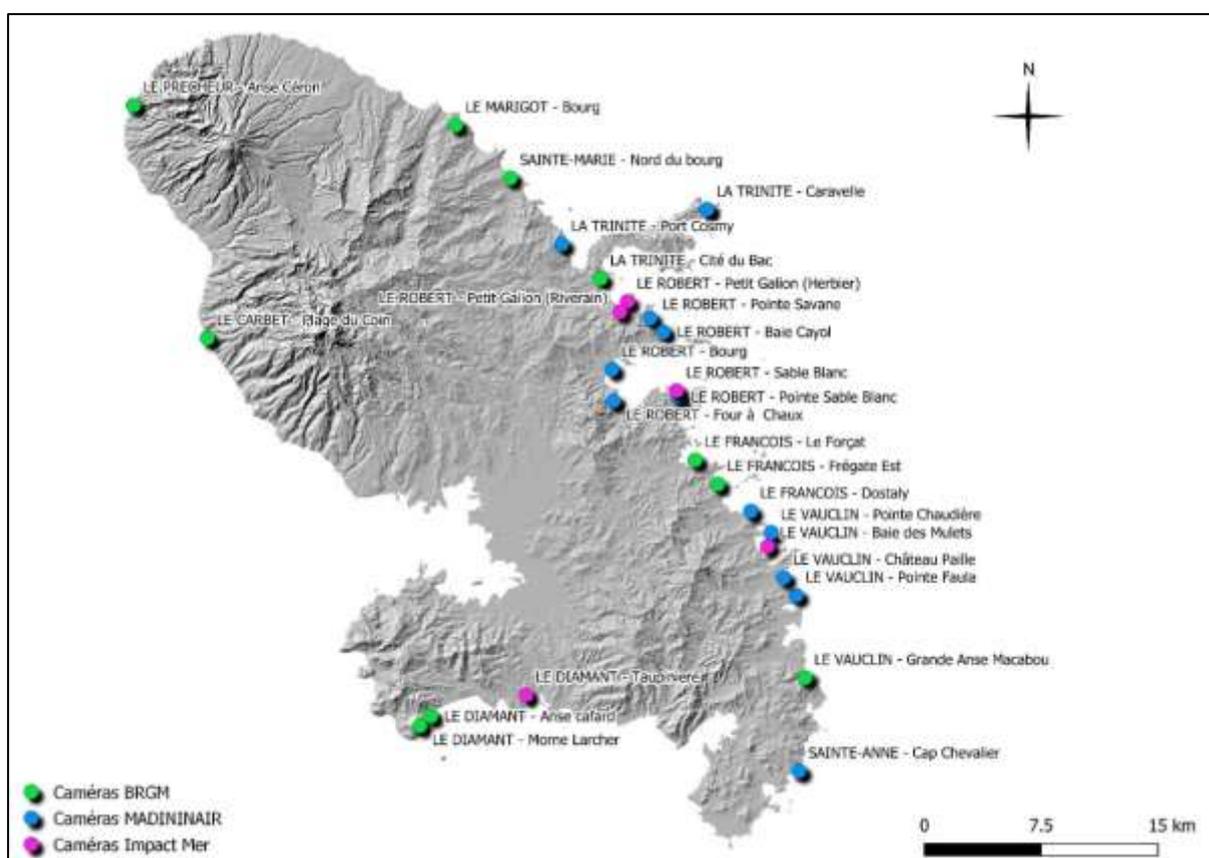


Figure 4 : Carte de localisation des caméras BRGM, Madininair et ImpactMer. Source : Madininair, 2022.

Ce dispositif a été installé en 2018 par le BRGM en partenariat avec l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et la DEAL. Dix sites en Martinique ont été instrumentés en 2018 pour permettre le suivi de l'évolution des échouements (Figure 5). Et ce, grâce à des images prises toutes les heures et transmises en temps réel durant la journée. Ainsi, les autorités en charge de la gestion des algues sargasses sont informées et peuvent effectuer la vérification du bon fonctionnement des barrages à distance (BRGM, 2020).



Figure 5 : Chronologie du réseau de caméras

À partir de mars 2021, Madininair, missionné par la DEAL, a rejoint le réseau de surveillance avec l’installation et la maintenance de onze caméras. Depuis 2022, quatre caméras ont également été installées par Madininair pour couvrir les besoins du bureau d’étude Impact Mer.

I.2.2 Dispositif Solarcam : outils de surveillance des arrivages de sargasses

Le dispositif de l’entreprise SolarCam, est composé d’un smartphone, protégé par un boîtier étanche, relié à un panneau solaire qui permet de maintenir la charge de la caméra (Figure 6). Il doit être placé de façon à capter un maximum de rayonnement solaire.

Les premières caméras qui ont été installées avaient une résolution de 12 mégapixels, par la suite elles ont été remplacées par des modèles plus performants avec une résolution de 20 mégapixels (Madininair, 2021).

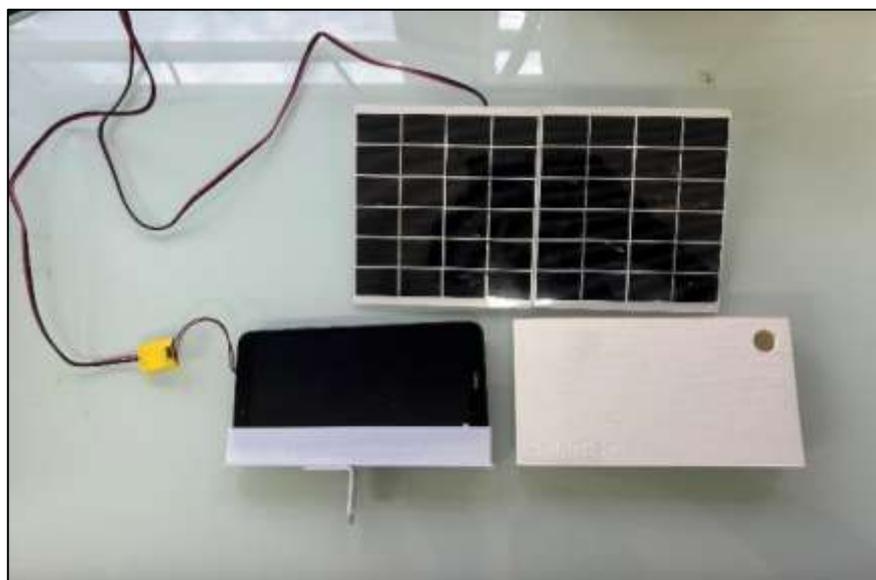


Figure 6 : Photo du dispositif de caméra. Source : M.DESBRILLES, 2023.

Les données des caméras correspondent à des images prises toutes les heures entre 7h et 17h, soit 10 heures de temps, qui correspondent à la période diurne en Martinique. Au-delà de ces heures, les images ne sont pas exploitables à cause du manque de luminosité.

Les images obtenues sont transférées par 3G/4G sur une interface de visualisation (Figure 7) où sont regroupées les images du BRGM et de Madininair. Il y a trois modes de visualisation : la dernière image,

les dix dernières images et les trois derniers jours. Pour l'historique des images, Madinair et le BRGM stockent les images via un stockage interne à chaque structure.

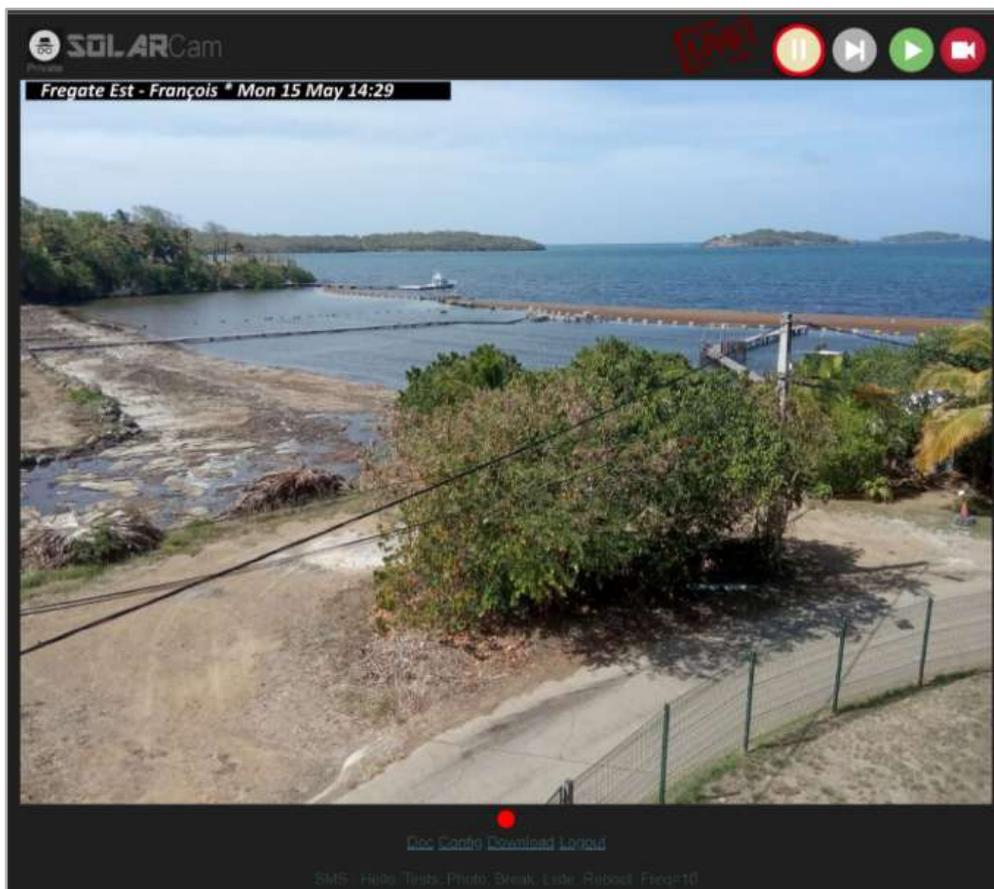


Figure 7 : Fenêtre de visualisation des images caméras. Site de Frégate-EST 2 au François, le lundi 15 mai 2023 à 14 :29.
Source : SolarCam, 2023.

En plus d'être un outil de surveillance en temps réel, il est aussi possible aujourd'hui d'exploiter les images des caméras en surface des nappes de sargasses, grâce à un algorithme développé par le BRGM en 2020.

1.2.3 Détection et traitement des données issues des images

La surface des nappes de sargasses est obtenue à partir des photographies prises par les caméras SolarCam. Les images sont retranscrites en surface grâce à un algorithme de détection développé par le BRGM en 2020. Il s'agit d'un algorithme de traitement des images pour la détection automatique des nappes de sargasses et le calcul des surfaces d'algues visibles sur les caméras. D'après les différents tests effectués, l'algorithme est capable de détecter de façon fidèle la présence de sargasses même

lorsque la visibilité sur site est réduite : faible luminosité, buée sur l'objectif. Les résultats ne sont pour le moment disponibles que sur quelques sites d'échouement (BRGM, 2021⁴).

Les caméras SolarCam prennent au total dix photographies toutes les 24h, durant la journée entre 7h et 17h. Cependant, l'algorithme traite une image toutes les deux heures, soit cinq images par jour. L'algorithme, fonctionne essentiellement en deux étapes qui sont les suivantes :

1. La détection des classes d'intérêt, pour attribuer un type d'information à chaque objet et en extraire la classe correspondant aux sargasses
2. Le géoréférencement, pour déterminer la position et les limites des nappes

En premier lieu, un algorithme de segmentation par classe d'intérêt est utilisé pour la détection des sargasses. Il faut préalablement fournir à l'algorithme quelques images étiquetées manuellement afin que la reproduction des différentes catégories (mer, sargasses, ciel, végétation, sable ...) se fasse automatiquement (Figure 8).

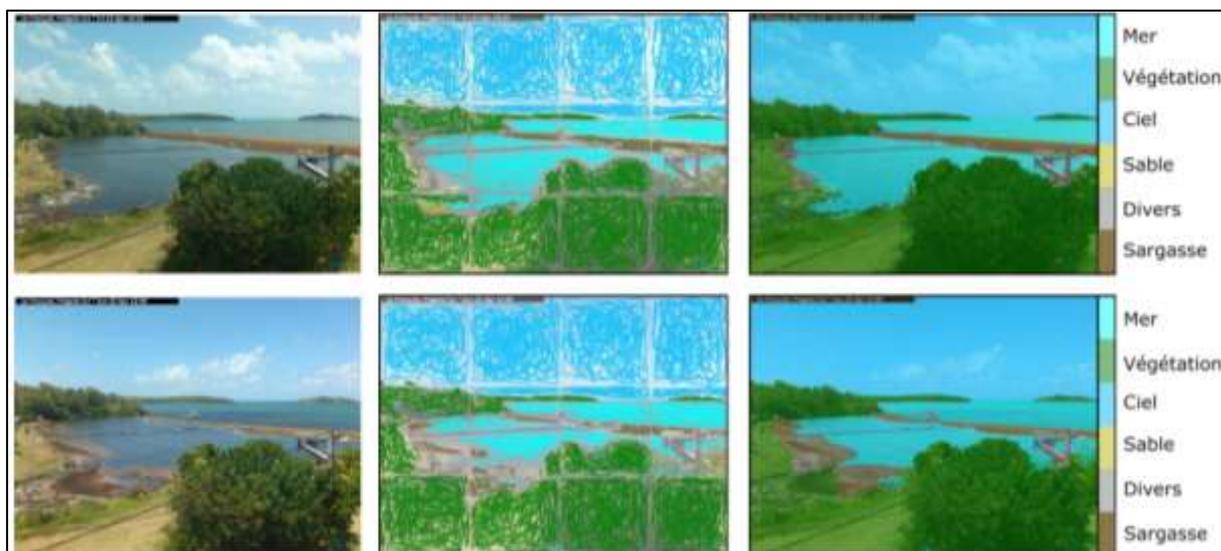


Figure 8 : Création du modèle de détection sur le site de Frégate-Est-2. À gauche, les images brutes capturées au niveau du barrage ; au centre, un étiquetage manuel (couleurs) superposé sur l'image selon les différentes classes d'intérêt ; à droite, une classification automatique de l'image par l'algorithme. Image du 23 avril 2021 à 10 :16. Source : BRGM, 2021

Les pixels considérés comme appartenant à la classe "sargasses" sont ensuite extraits. Une solution de géo-rectification est appliqué sur l'image afin de convertir le nombre de pixel en coordonnées géographiques dont en découleront la surface de sargasses détectée en mètres-carrés (Figure 9).

⁴ La référence bibliographique complète de cette source est la suivante : C. Bouvier (2021) – Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (rapport technique des années 2020 et 2021). Rapport final V1. BRGM/RP-71396-FR, 42 p

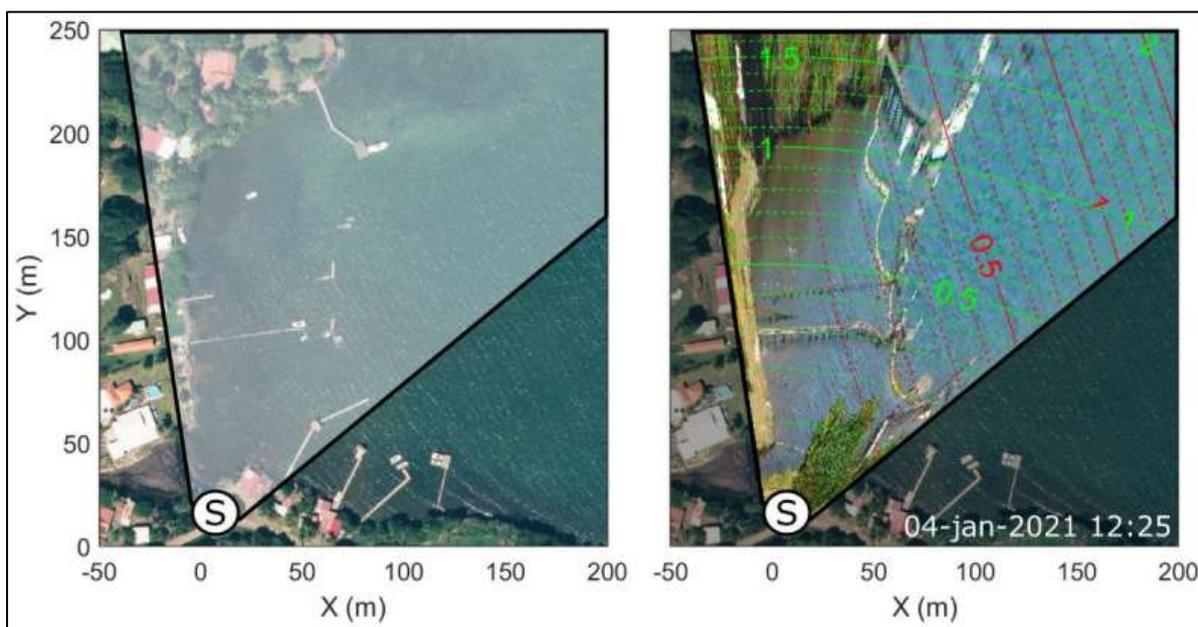


Figure 9 : Géoréctification des images capturées par le dispositif SolarCam, sur le site de Frégate-Est au François. À gauche, image ortho-photo (BDORTHO®, 2017) sur laquelle est superposé le champ de visé de la caméra (S). À droite, image rectifiée où les iso-contours indiquent la résolution des pixels de l'image. En rouge dans l'axe longitudinal et en vert dans l'axe transversal. Source : BRGM, 2021

Par la suite, le géoréférencement de chaque pixel, identifié dans la classe sargasse, permet d'obtenir la relation entre les coordonnées des pixels de l'image et leur position réelle, et par conséquent de quantifier les données physiques. Pour le géoréférencement de chaque site, la position, la distance focale et l'orientation de la caméra ont été déterminées grâce à des repères dont on connaît les coordonnées réelles. Enfin, un algorithme de détection du trait de côte est appliqué.

Plus précisément, pour le site de Frégate-Est 2, l'algorithme identifie la présence d'algues à proximité du barrage flottant (Figure 10). Chaque pixel identifié comme représentant des sargasses est associé à une surface par un calcul trigonométrique. La somme de ces pixels indique donc la surface totale de la nappe de sargasse au niveau du barrage flottant. Il est à noter que l'algorithme ne calcule la surface des nappes de sargasses qu'avec les algues en amont des barrages.



Figure 10 : Détection du banc de sargasses au niveau du filet à Frégate-Est 2 par l'algorithme du BRGM

II. Analyses exploratoires des émissions de gaz liées à la décomposition des algues sargasses et choix du site de Frégate-Est 2

Dans cette partie, sont abordés plusieurs analyses sur les concentrations en H₂S par sites d'implantation des capteurs en Martinique, ainsi qu'une évaluation des seuils de dépassement de 1ppm et 5ppm en H₂S pour les trois sites les plus impactés en Martinique. Et ce, pour justifier la sélection du site de Frégate-Est en tant que cas d'étude pour une analyse plus approfondie du sujet.

II.1 Etude des variations temporelles des concentrations en H₂S entre 2018 et 2022

La Figure 11 ci-dessous représente les concentrations moyennes mensuelles classées par années en Martinique.

On remarque que les concentrations moyennes en H₂S maximales sont comprises entre les mois d'avril et de septembre, avec deux pics en juillet 2021 et aout 2022 dont la moyenne mensuelle a dépassé 1ppm. Entre les mois d'octobre et de mars les moyennes sont plus faibles.

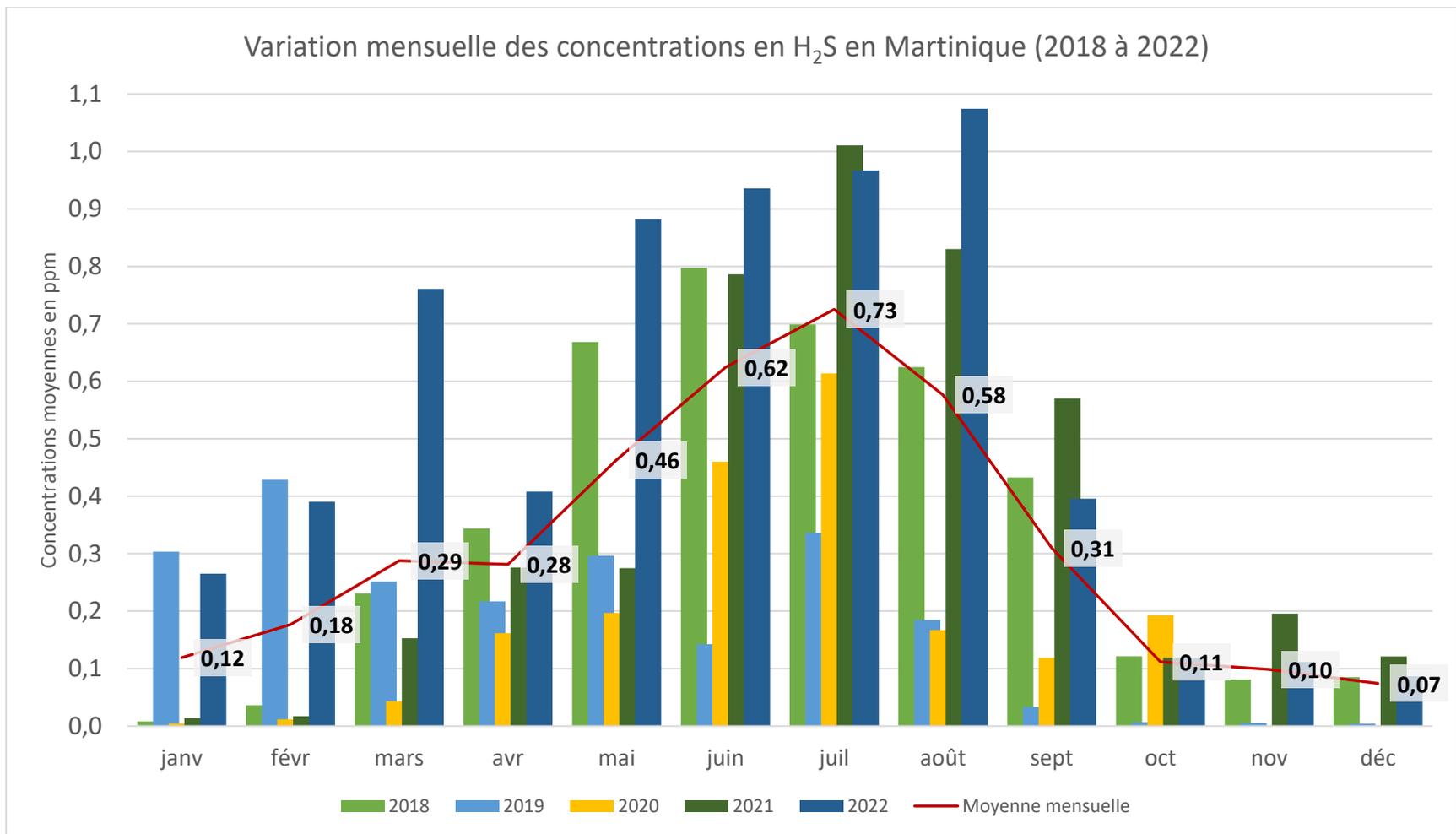


Figure 11 : Saisonnalité des concentrations moyennes mensuelles de H₂S tous sites confondus pour les années 2018 à 2022

Le Tableau 1 suivant, est une synthèse des moyennes annuelles de la période d'étude, tous sites confondus. Sur les cinq dernières années, l'épisode de 2022 enregistre les concentrations moyennes annuelles maximale avec 0.53 ppm. On notera l'épisode majeur de 2021 et 2018 avec une moyenne annuelle s'élevant à 0.36 et 0.34 ppm respectivement.

Année	Concentration en ppm
2018	0.34
2019	0.18
2020	0.20
2021	0.36
2022	0.53

Tableau 1 : Moyennes annuelles des concentrations de H₂S en Martinique

Sur la Figure 12 ci-dessous, on constate que les sites de Frégate Est-2, Pointe Hyacinthe et Four à Chaux sont les sites les plus impactés par les concentrations en H₂S sur les cinq années étudiées. La moyenne pour les cinq années est de :

- 1.39 ppm à Frégate Est-2 (François)
- 1.16 ppm à Pointe Hyacinthe (Le Robert)
- 0.64 ppm à Four à Chaux (Le Robert).

Il est à noter que pour l'année 2022, les moyennes annuelles des sites de Frégate-Est 2 et Pointe Hyacinthe avoisinent les 2 ppm, avec respectivement 1.84 ppm (Frégate Est - 2) et 1.80 ppm (Pointe Hyacinthe).

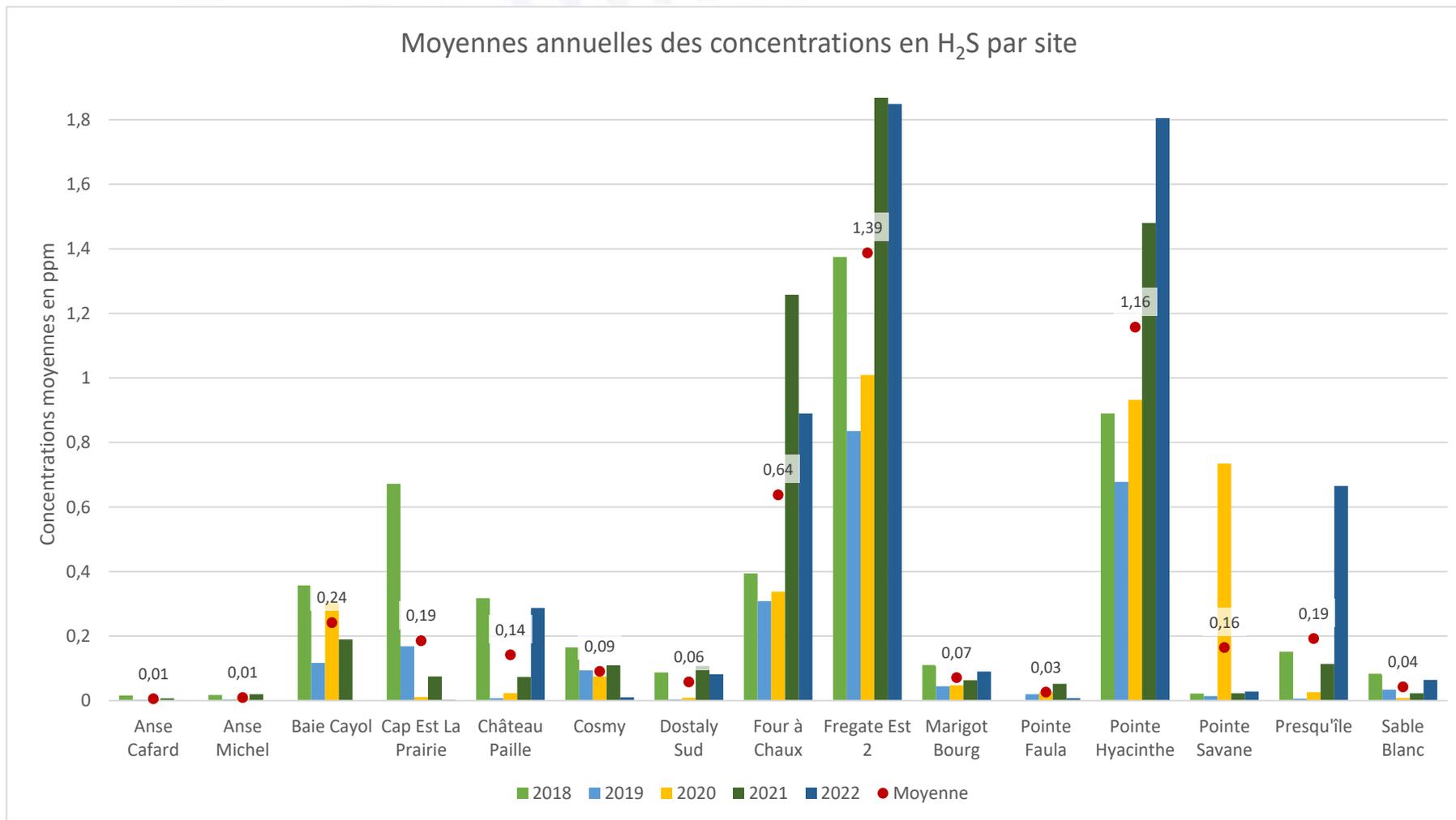


Figure 12 : Moyennes annuelles des concentrations de H₂S en ppm par site entre 2018 et 2022 par site de mesure

II.2 Présentation des dépassements des seuils de 1ppm et de 5 ppm (2018-2022)

La Figure 13 ci-dessous présente le nombre de dépassements des seuils journaliers de 1ppm et 5 ppm, ainsi que le maximum des concentrations journalières (noté "max. jr"), sur la période 2018 à 2022 pour chaque site de mesure en Martinique.

Le plus grand nombre de dépassements est enregistré sur le site de Frégate-Est 2 ; secondairement, sur les sites de Pointe Hyacinthe et de Four à Chaux. Ces dépassements représentent, en fonction du nombre de jours actifs de l'appareil sur toute la période considérée, un taux de dépassement pour le seuil de 1 ppm de 2018 à 2022 de :

- 43% pour Frégate-Est 2
- 37% pour Pointe Hyacinthe
- 19% pour Four à Chaux.

Pour les dépassements du seuil d'alerte de 5 ppm de 2018 à 2022, les pourcentages de dépassements sont de :

- 4% pour Frégate-Est 2
- 0.8% pour Pointe Hyacinthe
- 2% pour Four à Chaux.

Ces trois sites enregistrent également les concentrations moyennes journalières maximales entre 2018 et 2022 avec respectivement 9.5 ppm (Frégate-Est 2 le 08/07/2020), 9.6 ppm (Four à Chaux le 05/09/2021) et 8.3 ppm (Pointe Hyacinthe le 12/08/2022). Ainsi, les communes les plus impactées sont les communes du Robert et du François.

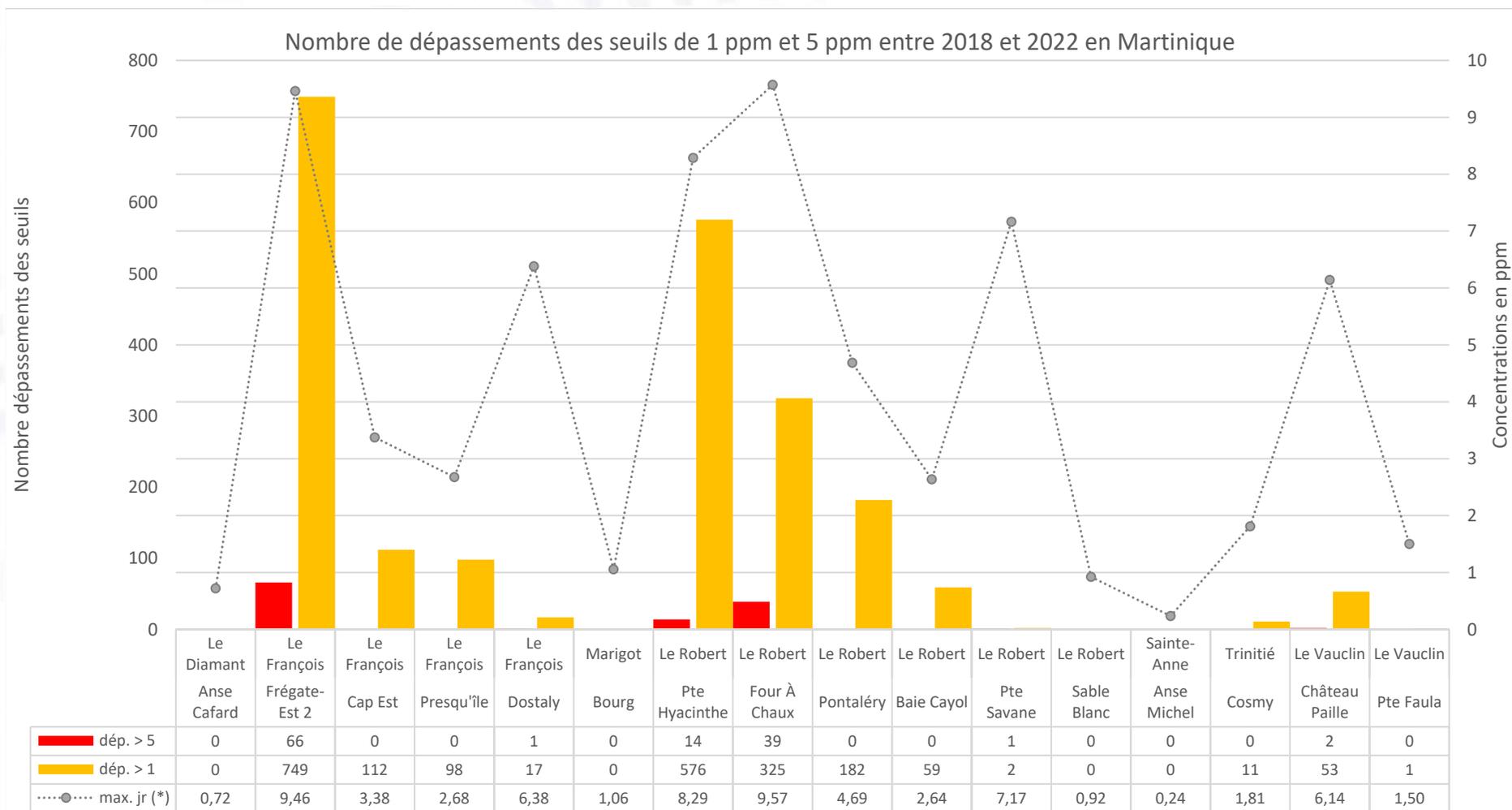


Figure 13 : Nombre de dépassements des seuils de gestion par sites entre janvier 2018 et décembre 2022 sur des moyennes de concentrations journalières de H₂S en ppm et concentration en H₂S maximale journalière (*)

La Figure 14 montre la répartition des jours sans dépassement et avec dépassements des seuils de gestion de 1ppm et 5 ppm pour ces trois sites de 2018 à 2022. On remarque que sur le site de Frégate-Est 2, 82% des journées sur cinq années consécutives ont une concentration moyenne journalière supérieure aux seuils de gestion.

Répartition du nombre de dépassements de 1ppm et 5ppm en H₂S de 2018 à 2022

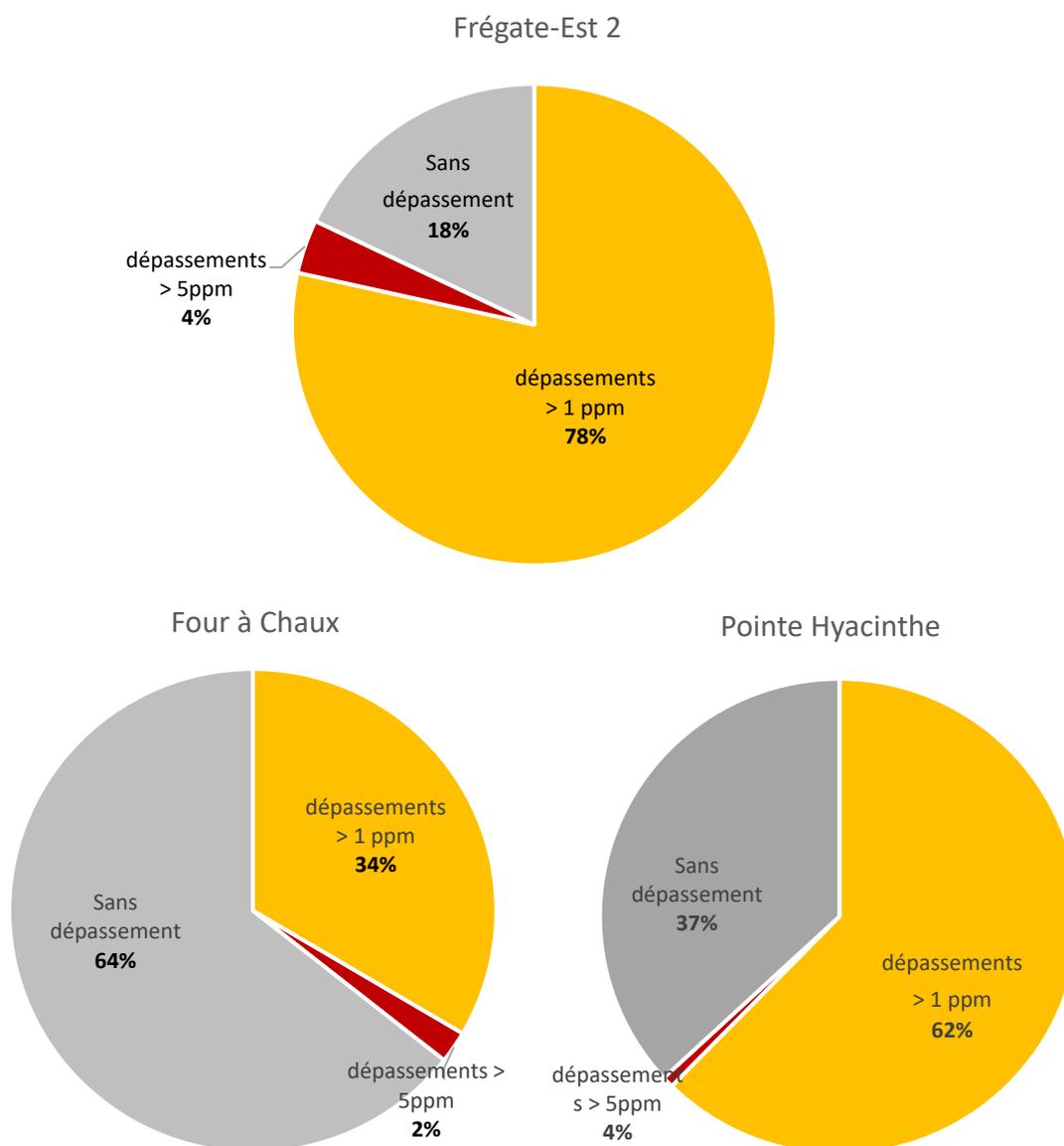


Figure 14 : Diagrammes en secteurs de proportion de dépassements des seuils de 1 ppm et 5 ppm pour les trois les plus impactés en Martinique entre 2018 et 2022

La disparité géographique des mesures sur le littoral Martiniquais illustre la complexité à appréhender le phénomène d'échouement et leur conséquence sur les concentrations mesurées d'H₂S. Pour la suite de l'étude, le traitement des données sera réalisé sur le site de Frégate-Est 2, qui enregistre à la fois le plus grand nombre de dépassements et des moyennes de concentration en H₂S maximales en Martinique.

II.3 Identification du rapport entre l'arrivage des nappes de sargasses et les concentrations en H₂S sur le site de Frégate-Est 2

La caméra installée sur le site de Frégate-Est 2 nous permet de suivre les échouements de sargasses de façon continue. Grâce à l'algorithme du BRGM les données photographiques de la caméra de Frégate-Est 2 sont exploitables en tant que surface de sargasses en m² entre le 14 janvier 2020 et le 30 août 2022. Pour Frégate-Est 2, les résultats sont estimés comme étant satisfaisants sur le secteur du barrage pour plus de 80% des images (BRGM, 2021).

Cependant, dû à la morphologie littorale propre au site de Frégate il existe un biais entre la surface calculée et les données de concentrations mesurées. En effet, les algues s'accumulent en fond de baie et émettent du H₂S en stagnant au niveau du canal. Or, l'algorithme ne prend en compte dans le calcul de la surface seulement les algues en amont du barrage. Les données extraites de l'algorithme ne peuvent pas être mises en relation avec les données de H₂S mesurées. La source des données de surface en fait une variable à traiter indépendamment.

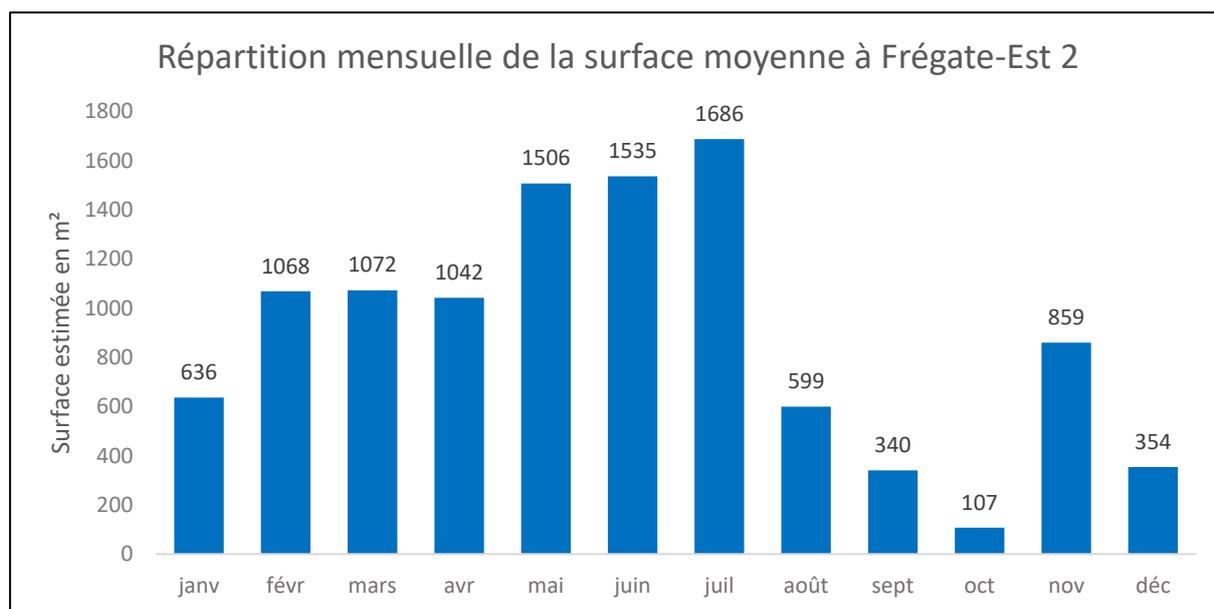


Figure 15 : Répartition mensuelle des moyennes de surface estimée de sargasses à Frégate-est 2 entre 2020 et 2022. Source : BRGM.

On remarque que les nappes de sargasses s'échouent en plus grande quantité principalement en mai, juin et juillet. Pour les mois de septembre, octobre et décembre, une quantité beaucoup plus faible est présente sur les côtes de Frégate (Figure 15).

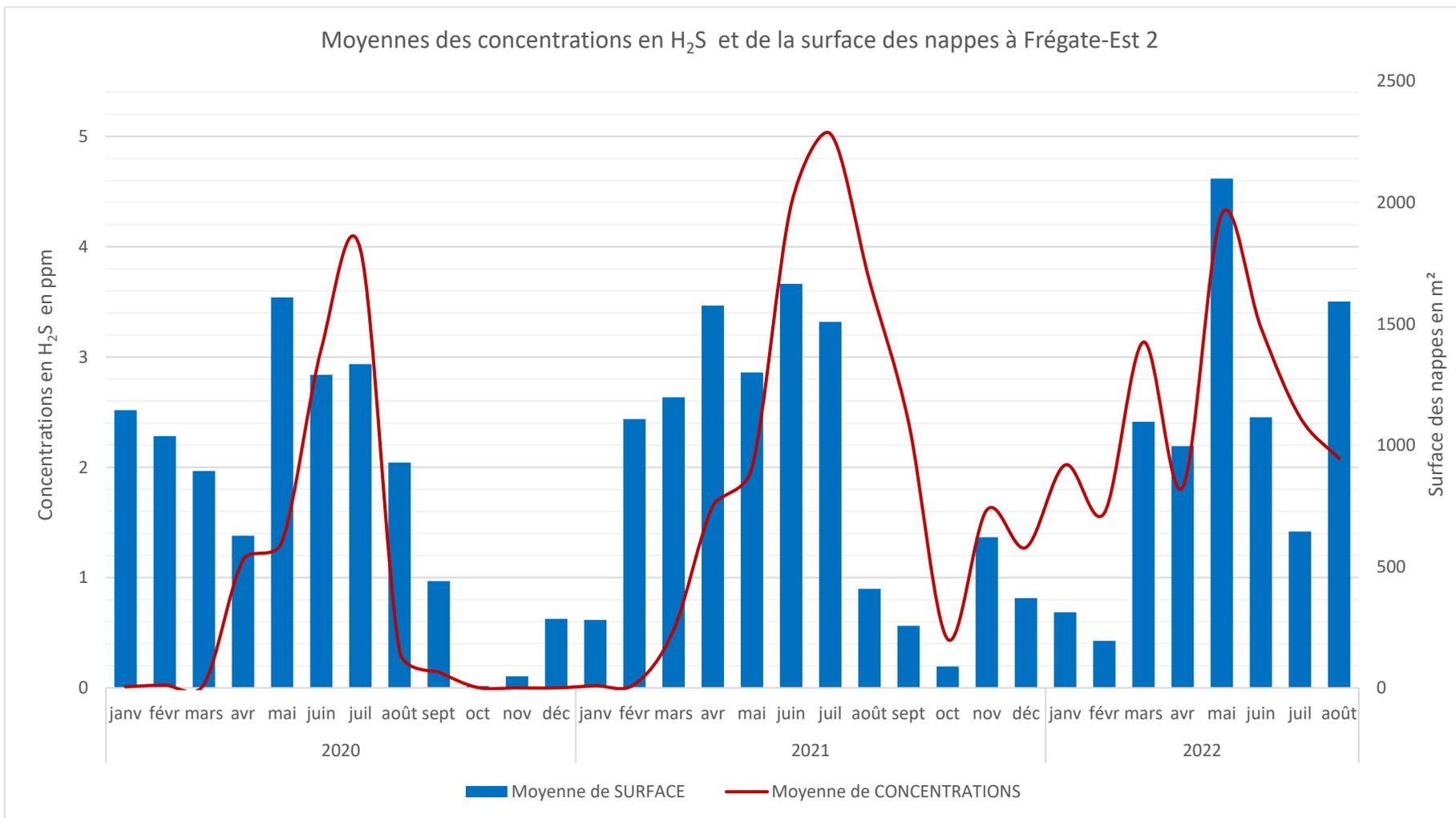


Figure 16 : Relation entre la surface des sargasses et les moyennes des concentrations en H₂S entre 2020 et 2022 à Frégate-Est 2



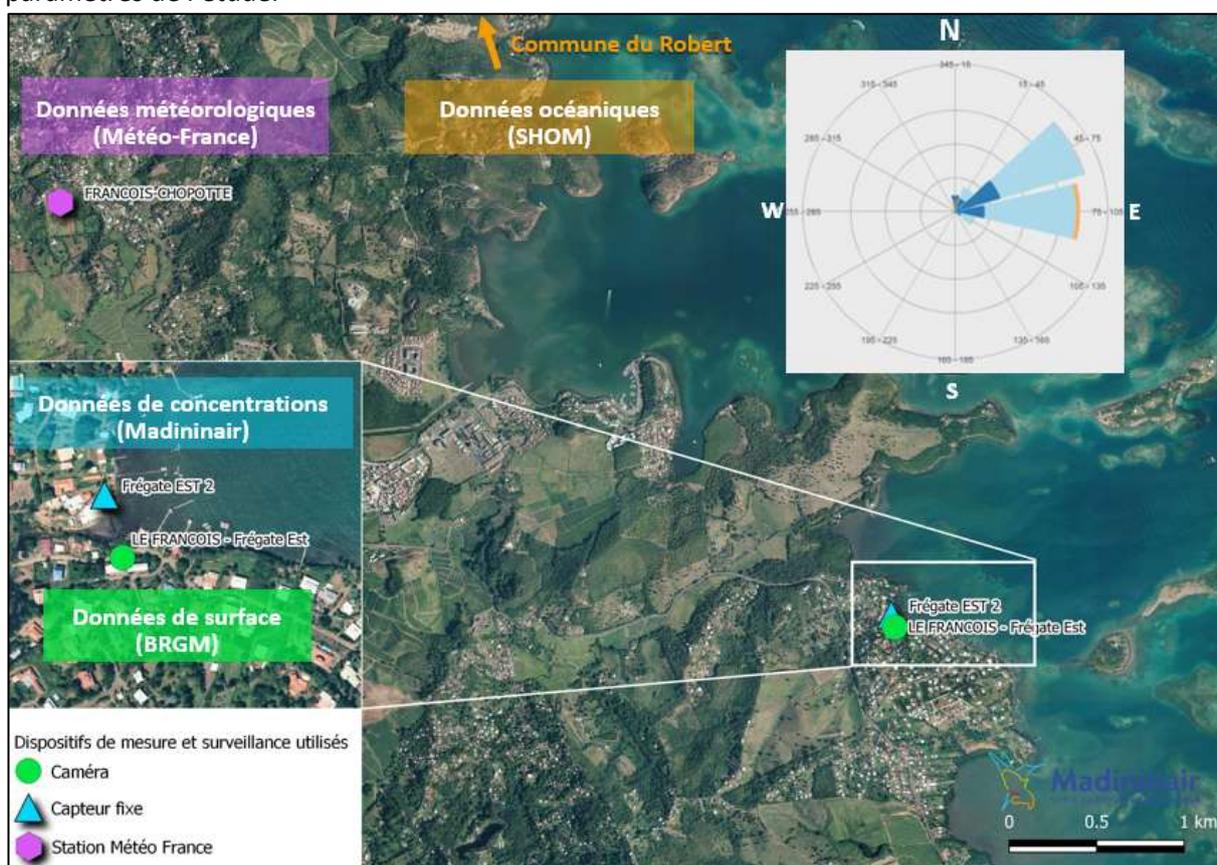
Ce graphique (Figure 16) illustre l'évolution entre les moyennes mensuelles des concentrations en H₂S et la surface des nappes de sargasses générée par l'algorithme du BRGM. On observe que la courbe des concentrations en H₂S suit celle de la surface des nappes de sargasse, indiquant une augmentation des concentrations en H₂S lors des arrivées des algues. Néanmoins, on notera un décalage temporel entre les pics de concentration en H₂S et les valeurs de surface. Pour approfondir plus en détails la relation entre ces variables (surface et concentrations en H₂S), une Analyse en Composante Principale (ACP) est exposée dans la partie suivante. Cet ACP intègrera également les paramètres météorologiques.

III. Evaluation de la corrélation entre les variables météorologiques et les concentrations en H₂S sur le site de Frégate-Est 2

Ce volet se concentre sur la relation et les liens de corrélation de la concentration en H₂S en fonction des paramètres météorologiques pour identifier les variables susceptibles d'exercer une influence sur la décomposition des algues sargasses.

III.1 Localisation et sources des données sur le site d'étude

La Figure 17 présente la localisation des sources utilisées pour faire les traitements de données des paramètres de l'étude.



Les données océaniques utilisées pour les analyses proviennent du marégraphe du Service Hydrographique et Océanique de la Marine (SHOM) situé au Robert et à environ 12 km du site d'étude. Les données météorologiques sont issues de la station François-Chopotte de MétéoFrance, sur la commune du François et à 5 km de Frégate-Est 2. Les surfaces estimées des nappes de sargasses sont le résultat du traitement de l'algorithme du BRGM. Les données de concentrations en H₂S proviennent du réseau de capteurs fixes de Madinair.

Le Tableau 2 suivant est un récapitulatif des paramètres étudiés en fonction des unités et de la source des données.

Paramètre	Unité	Source
Marée (hauteur d'eau et marnage)	Mètre (m)	SHOM
Concentration en H ₂ S	Partie par million (ppm)	Madininair
Surface estimée des nappes de sargasse	Mètre carré (m ²)	BRGM
Température de l'air	Degrés Celsius (°C)	Météo France
Insolation	Minute (min)	Météo France
Hauteur des précipitations	Millimètre (mm)	Météo France
Humidité Relative de l'air	Pourcentage (%)	Météo France
Vitesse du vent	Mètre par seconde (m/s)	Météo France
Direction du vent	Point Cardinal	Météo France

Tableau 2 : Synthèse des sources de données de l'étude

Ces paramètres météorologiques sont exploités par la suite dans un traitement statistique appelé ACP dans le but d'identifier les relations entre les concentrations en H₂S et les dynamiques atmosphériques.

III.2 Méthode d'évaluation de la corrélation des variables : Analyse en Composantes Principales

III.2.1 Éléments de définitions

Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP est une méthode d'analyse statistique utilisée pour explorer et résumer des ensembles de données comportant plusieurs variables numériques. Elle vise à réduire la complexité des données en les projetant sur un nouveau système d'axes, appelés composantes principales, qui capturent les directions de variabilité maximale. Ces axes sont des combinaisons linéaires des variables initiales.

Les axes de l'ACP n'ont pas de signification physique directe, mais leur interprétation repose sur les variables qui contribuent le plus à leur définition. Les poids attribués à chaque variable (appelés coefficients ou charges) reflètent leur importance dans la construction de chaque axe.

Lorsque les deux ou trois premiers axes expliquent une part importante de la variabilité totale, il est possible de représenter graphiquement les données dans un espace à deux ou trois dimensions, facilitant ainsi leur visualisation et leur interprétation.

L'ACP est une méthode d'exploration de données puissante, utilisée pour divers objectifs : analyser les relations entre variables, détecter des patterns sous-jacents, réduire la dimensionnalité des données, ou encore visualiser des ensembles de données complexes.

Corrélation

Le calcul de la corrélation s'effectue sur uniquement deux variables et permet de mesurer à quel point elles évoluent ensemble. En d'autres termes, c'est un indicateur qui montre si une variable change de manière prévisible en fonction de l'autre. Le coefficient de corrélation (R) varie entre -1 et +1.

- Si la corrélation est positive (par ex. +0,8), cela signifie que lorsque l'une augmente, l'autre a tendance à augmenter aussi.

- Si la corrélation est négative (par ex. -0,8), cela signifie que lorsque l'une augmente, l'autre a tendance à diminuer.
- Si la corrélation est proche de zéro, cela signifie qu'il n'y a pas de lien clair entre les deux.

III.2.2 Lecture des cercles de corrélation

Un plan factoriel est formé par deux axes principaux (composantes principales) dans lequel les données sont projetées. Les variables sont représentées par des vecteurs dans un cercle de corrélation, montrant leur contribution aux axes (Figure 18). Le cercle a un rayon de 1, car il représente des corrélations, qui varient entre -1 et +1. La proportion des données représentées sur chaque dimension est indiquée en pourcentage. La somme de ces proportions donne le pourcentage du jeu de données représenté dans ces deux dimensions.

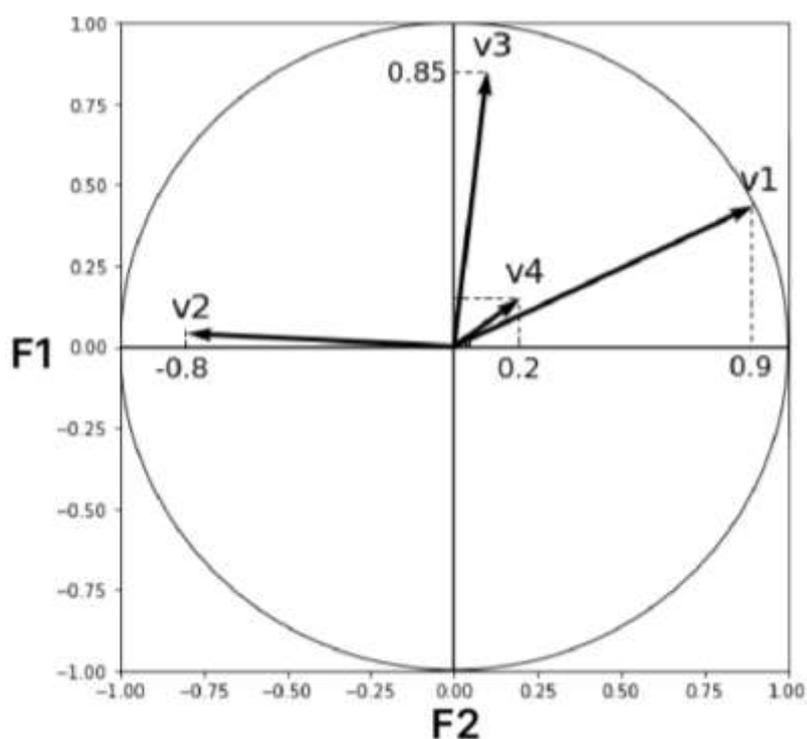


Figure 18 : Graphique théorique d'un cercle de corrélation

Les corrélations se lisent de la façon suivante :

- Plus l'angle entre deux vecteurs (variables) est proche de 0° plus la corrélation est positive (V1 et V4 sur le graphique).
- Lorsque l'angle entre les vecteurs est proche de 180° la corrélation est négative (V2 par rapport à V1 et V4 sur le graphique).
- Lorsque deux vecteurs forment un angle proche de 90° , elles sont faiblement corrélées ou quasi-indépendantes (V2 et V3 sur le graphique).

- Plus les vecteurs sont proches de l'extrémité du cercle, mieux les variables sont représentées (V1, V2 et V3 sur le graphique). Et inversement, les variables avec des flèches courtes, proches du centre, sont mal représentées (V4 sur le graphique).

III.2.3 Filtres appliqués à l'étude

Pour les ACP, différents filtres ont été appliqués sur nos données en fonction des objectifs de l'étude. En effet, on se concentre sur les épisodes de pollution, nous avons donc exclu les pas de temps correspondant à des concentrations en H₂S inférieures à **0,005 ppm** (en se basant sur seuil de détection et de fiabilité de l'appareil de mesure qui est de 0.03 ppm).

De plus, sous les recommandations du BRGM, nous avons également exclu les valeurs des surfaces estimées des nappes de sargasses ayant un indice de confiance strictement inférieur à 2 (environ 15% du jeu de données). Cet indice de confiance a été défini par le BRGM et indique la qualité de détection des nappes de sargasses par l'algorithme.

Les analyses suivantes ont été effectuées avec des données météorologiques recueillies entre le 01 janvier 2020 et le 31 décembre 2022.

III.3 Relations entre les variables en intervalle de temps horaire

Le paramètre de surface de sargasse n'a pas été étudié pour les ACP avec les moyennes horaires car il n'y a qu'une valeur toutes les deux heures et uniquement pendant la journée, soit cinq valeurs entre 7h et 17h, le nombre de données n'est donc pas suffisant pour être représentatif. De plus, nous avons gardé les axes 1, 2 et 3 car ils regroupent un pourcentage suffisant de l'information totale.

Les variables ont la notation suivante :

- VV pour la Vitesse du Vent,
- H pour la Hauteur d'eau,
- P pour les Précipitations,
- T pour la Température,
- HR pour l'Humidité Relative,
- INS pour l'Insolation.

Les analyses suivantes ont été traitées à intervalle de temps horaire.

III.3.1 Interprétation graphique des résultats en cercle des corrélations

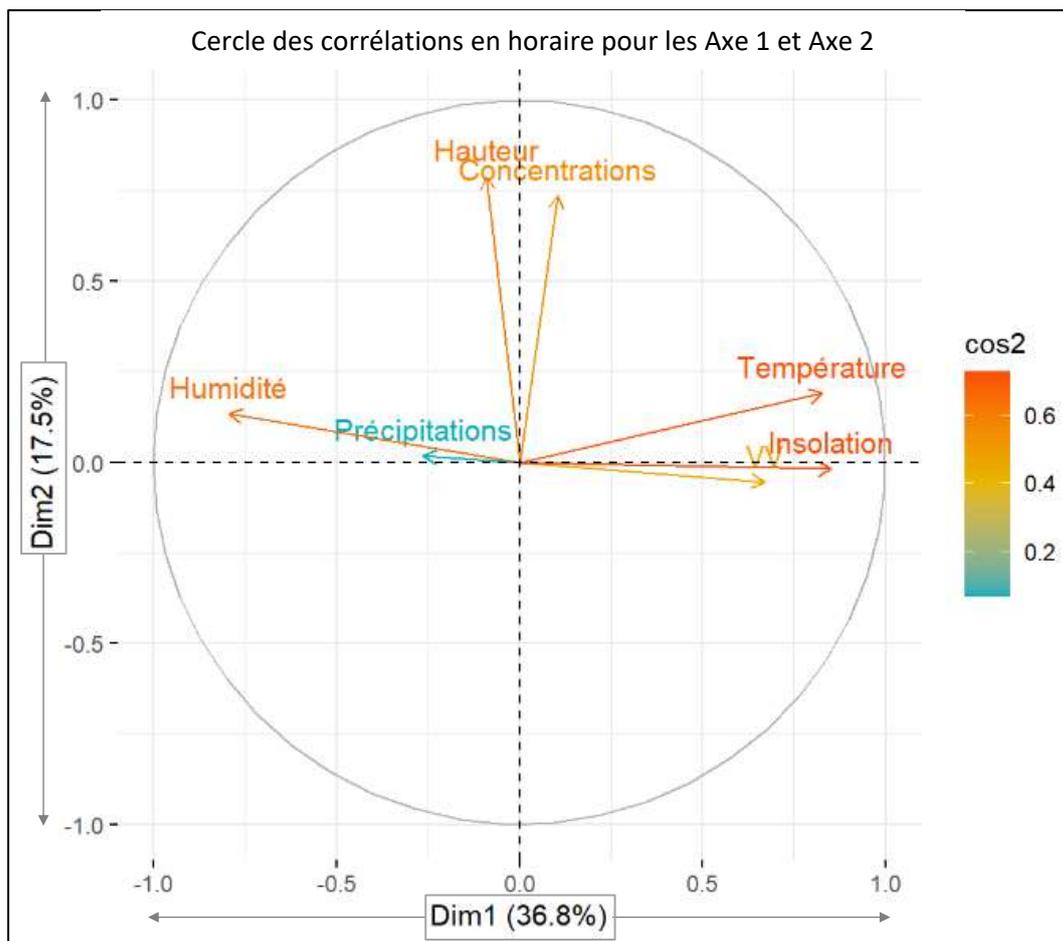


Figure 19 : Cercle de corrélation des axes 1 et 2 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022

Les axes 1 et 2 représentent 54.3% des données (Figure 19). 36.8% des données de la dimension 1 sont portées par les variables température, insolation, vitesses du vent, humidité et précipitations. La dimension 2 porte 17.5% avec les variables hauteur d'eau et concentrations.

Pour notre étude, on remarque que les variables :

- *Concentrations* en H₂S et *Hauteur* d'eau ont une corrélation positive sur la dimension 2.
- *Précipitation* est plutôt mal représentée avec les dimensions 1 et 2. Il n'est donc pas très pertinent d'analyser cette variable dans ce cercle de corrélation.

Le tableau des corrélations (Tableau 3, page 36), présentera une analyse plus fine des corrélations de la concentration en H₂S par rapport aux autres variables.

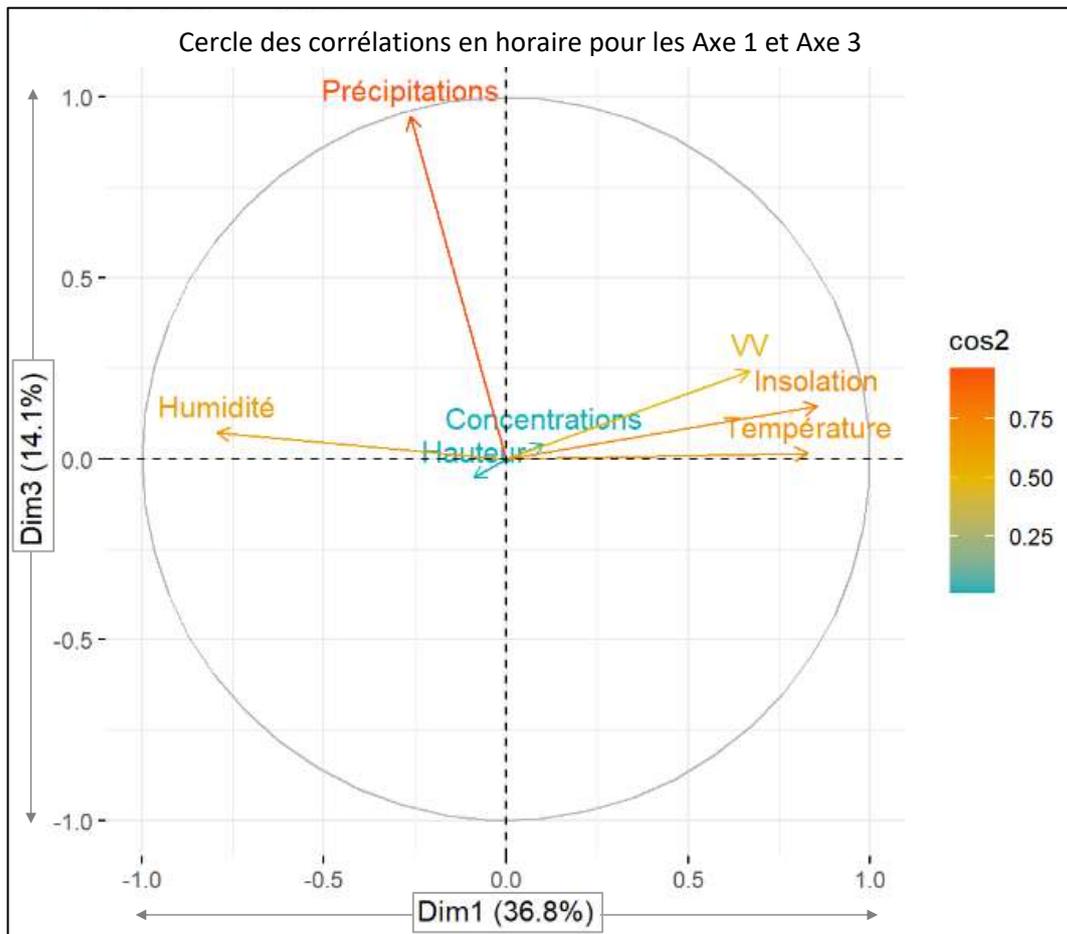


Figure 20 : Cercle de corrélation des axes 1 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022

Les axes 1 et 3 représentent 50.8% des données. La concentration en H_2S est mal représentée sur ce cercle, donc il n'y a pas de conclusion fiable (Figure 20).

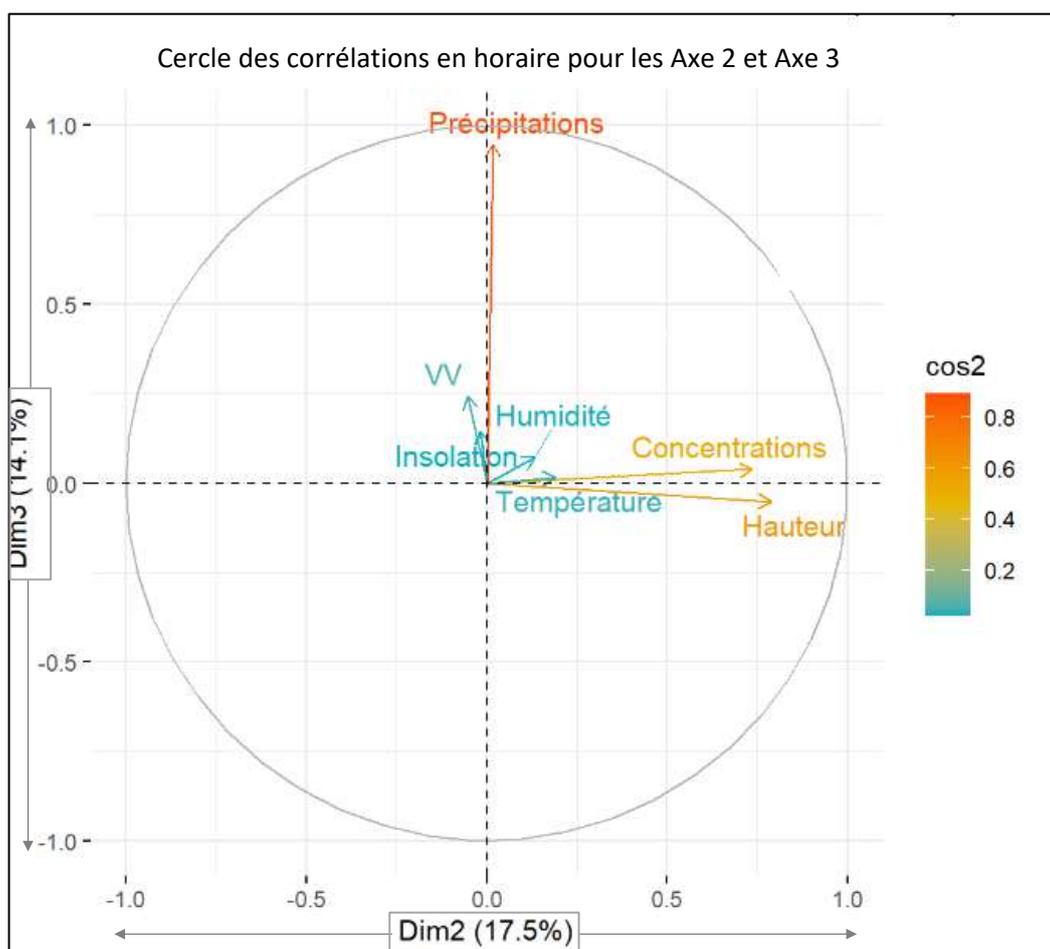


Figure 21 : Cercle de corrélation des axes 2 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022

Les axes 2 et 3 regroupent 31.6% des données. Avec 14,1% des données représentées pour la dimension 3 portées principalement par la variable précipitations.

On remarque que les variables (Figure 21) :

- Concentration en H₂S et Hauteur d'eau ont une corrélation positive.
- Humidité, VV (Vitesse du vent), Insolation et Température sont mal représentées.

Le tableau des corrélations (Tableau 3, page 36), présentera une analyse plus fine des corrélations de la concentration en H₂S par rapport aux autres variables.

III.3.2 Mesure des corrélations en fonction de la concentration en H₂S

La corrélation est une représentation des relations entre deux paramètres. Elle est comprise entre -1 et 1. Plus la corrélation entre les variables est forte (proche de 1 ou -1), plus les variables sont linéairement associées.

	P	INS	HR	VV	T	H
Concentrations	-0,005	-0,002	0,078	0,079	0,166	0,224

Tableau 3 : Tableau de corrélation pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes horaires entre 2020 et 2022

On considère que la concentration en H₂S (Tableau 3) est :

- **Faiblement corrélée positivement** avec la *Hauteur d'eau* et la *Température*.
- **Non corrélée** avec la *Vitesse du Vent (VV)*, l'*Humidité Relative*, la *Précipitation* et l'*Insolation*.

Les corrélations pour ces paramètres ne sont pas très significatives (< 0,5). On ne peut pas en déduire une influence concrète sur les concentrations moyennes horaire de H₂S. Une analyse complémentaire sur le paramètre hauteur d'eau est présentée Partie IV.2 page 45.

III.4 Relations entre les variables en intervalle de temps journalier

Les prochaines corrélations sont analysées à intervalle de temps journalier. La marée en Martinique est semi-diurne, à savoir deux pleines mers et deux basses mers par jour donc le paramètre de hauteur d'eau n'est pas pertinent vis à vis d'une analyse journalière. Ce paramètre a été exclu pour cette ACP.

Les variables utilisées ont la notation suivante :

- VV pour la Vitesse du Vent,
- P pour la Précipitation,
- T pour la Température,
- HR pour l'Humidité Relative
- INS pour l'Insolation
- SURF pour la Surface des nappes de sargasses estimées.

III.4.1 Interprétation graphique des résultats en cercles des corrélations

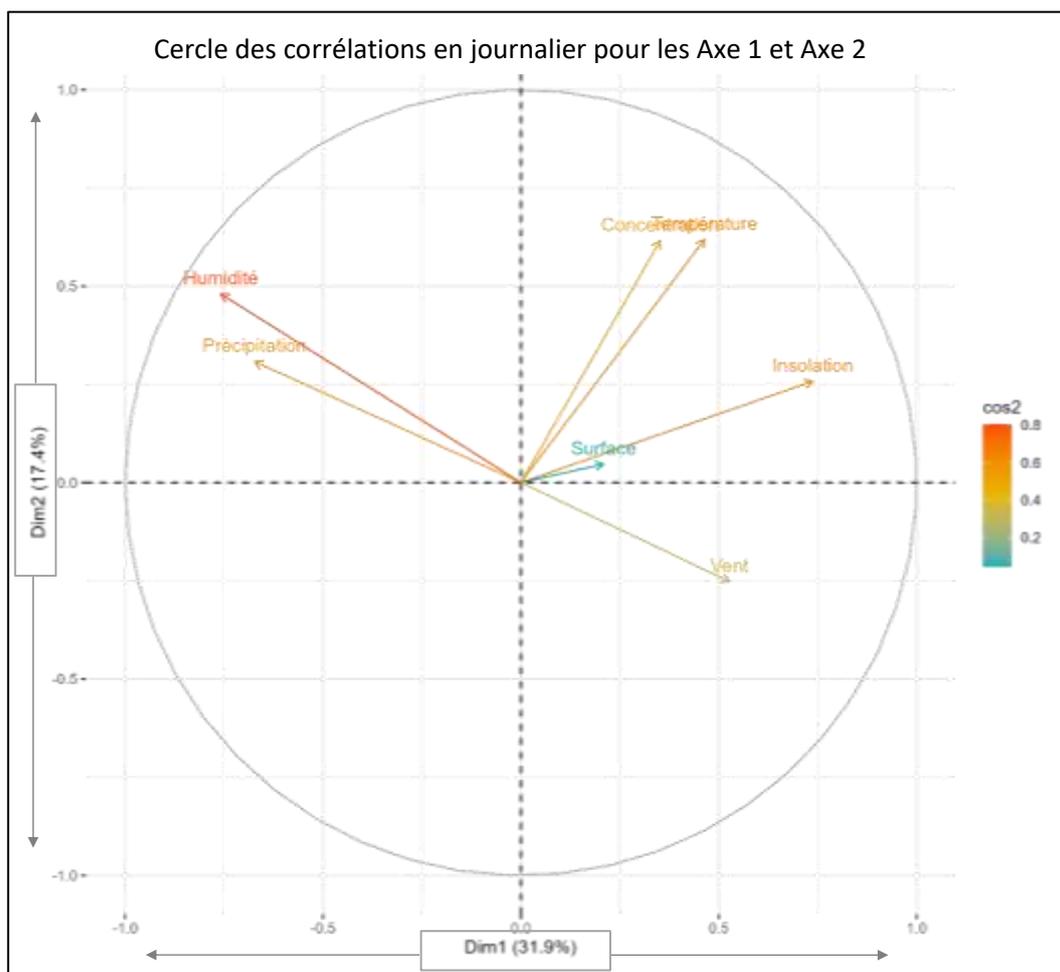


Figure 22 : Cercle de corrélation des axes 1 et 2 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières entre 2020 et 2022

Les axes 1 et 2 représentent 49.3% des données (Figure 22). La dimension 1 est représentée par 31.9% des données et portée principalement par l'insolation, l'humidité et la précipitation. Sur dimension 2 (17.4% des données) les variables qui contribuent le plus sont la concentration, la température et l'humidité.

On remarque que les variables :

- Concentrations en H_2S et Température ont une corrélation positive.
- Surface est mal représentée.

Le tableau des corrélations (Tableau 4, page 40) apportera une analyse plus fine des corrélations avec les concentrations en H_2S .

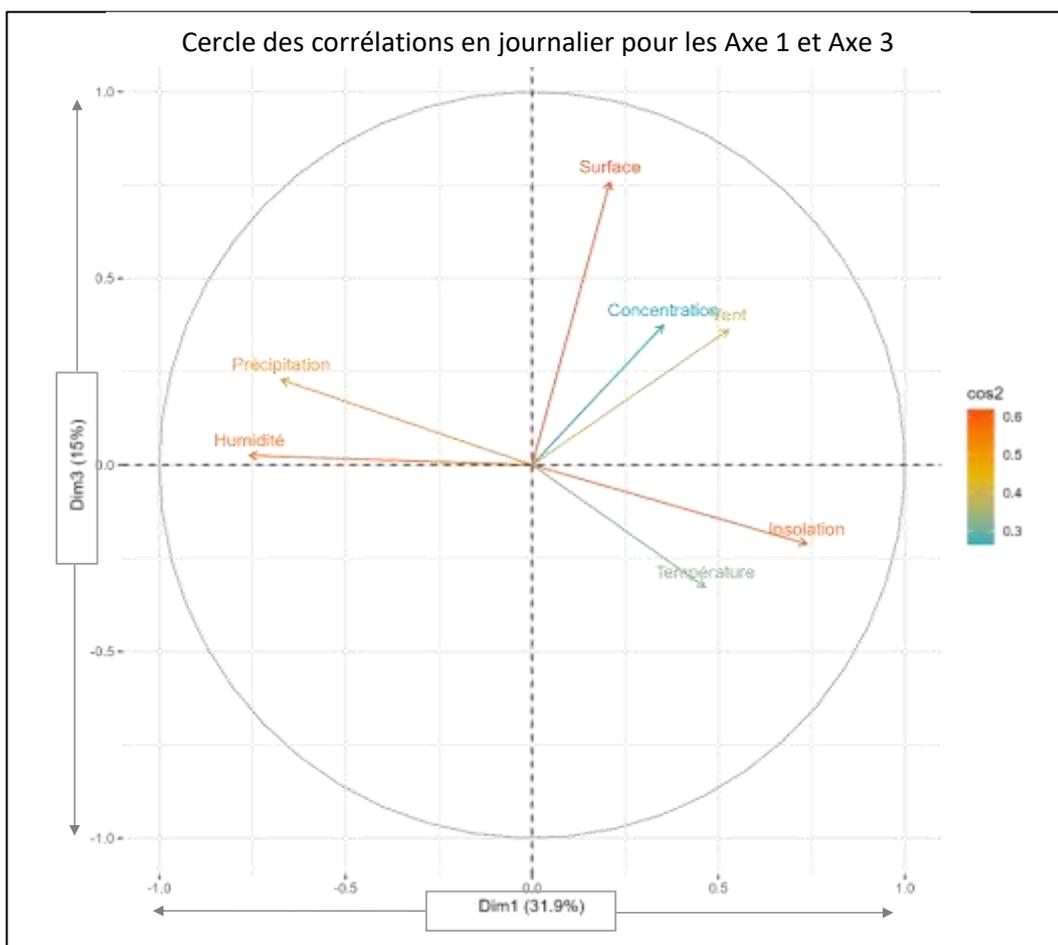


Figure 23 : Cercle de corrélation des axes 1 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières entre 2020 et 2022

Les axes 1 et 3 représentent 46.9% des données (Figure 23). La dimension 3 représente 15% des données et est portée principalement par la variable surface.

On remarque que les variables :

- Concentrations en H₂S et VV ont une corrélation positive.
- Concentrations et Surface ont une corrélation positive.

Une analyse plus fine des corrélations avec la concentration en H₂S est présentée dans le tableau (Tableau 4, page 40) des corrélations.

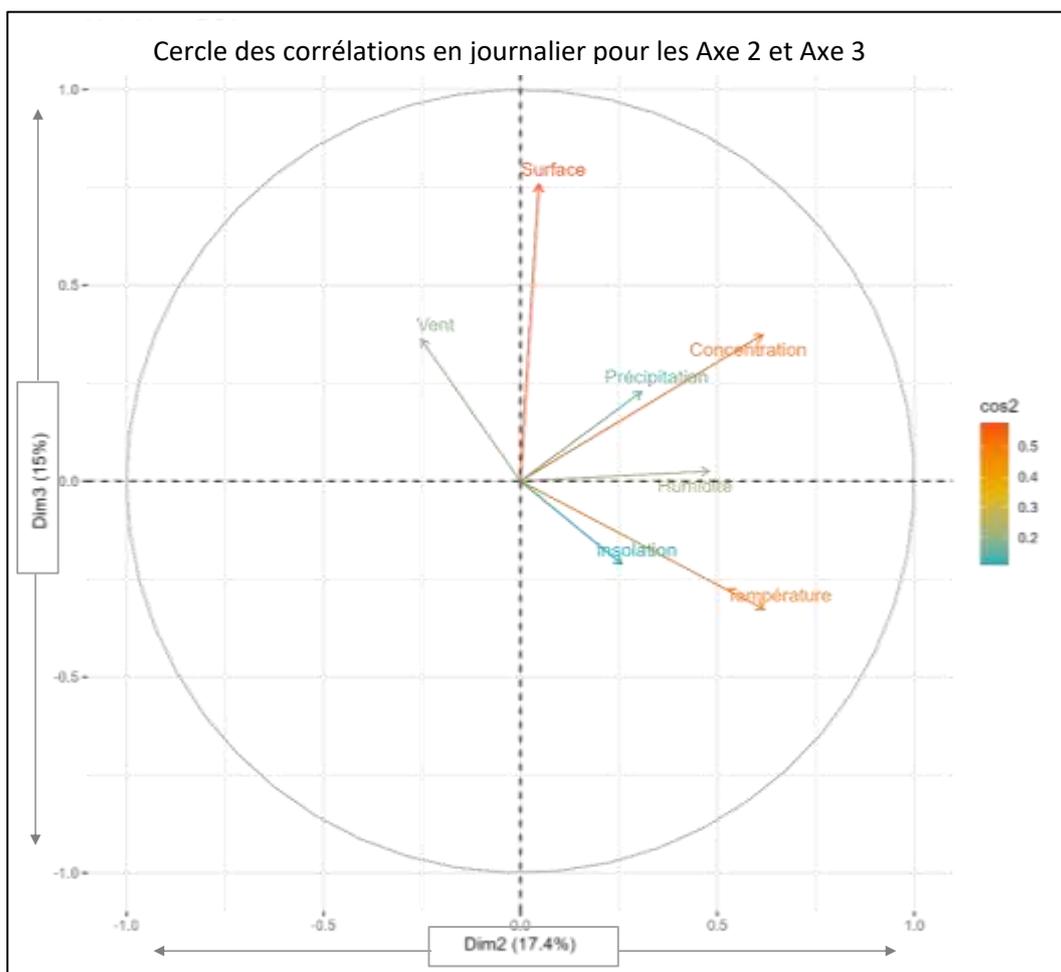


Figure 24 : Cercle de corrélation des axes 2 et 3 pour les variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières entre 2020 et 2022.

Les axes 2 et 3 ne représentent que 33% des données (Figure 24).

On remarque que les variables :

- *Concentrations* en H₂S et *précipitation* ont une corrélation positive. Cependant la variable *précipitation* n'est pas représentée de manière optimale.

Le tableau des corrélations (Tableau 4, page 40) en fonction de la concentration en H₂S présente une analyse plus fine.

III.4.2 Mesure des corrélations en fonction de la concentration en H₂S

La corrélation est une représentation des relations linéaires entre deux paramètres. Elle est comprise entre -1 et 1. Plus la corrélation entre les variables est forte (proche de 1 ou -1), plus les variables sont linéairement associées.

	INS	P	VV	SURF	HR	T
Concentrations	-0,007	0,003	0,082	0.131	0,147	0.353

Tableau 4 : Tableau de corrélation des variables étudiées avec les concentrations moyennes journalières 2020 et 2022.

La concentration en H₂S est :

- **Faiblement corrélée positivement** avec la *Température*, la *Surface* et l'*Humidité Relative*.
- **Non corrélée** avec la *Vitesse du vent*, l'*insolation* et la *Précipitation*.

Les corrélations pour ces paramètres ne sont pas très significatives (< 0,5). On ne peut pas en déduire une influence concrète sur les concentrations moyennes journalières de H₂S (

Tableau 4).

Résumé du volet ACP et corrélations

L'objectif était d'identifier les relations de chaque paramètre météorologique en fonction des concentrations en H₂S. Nous avons choisi de traiter les données à intervalle de temps horaire et journalier avec les concentrations en H₂S supérieures à 0,005 ppm pour une meilleure représentativité des variables.

Les analyses ont révélé une faible corrélation positive des concentrations en H₂S avec :

- La hauteur moyenne du niveau de l'eau résultant de la **marée** pour les concentrations de H₂S en moyenne horaire.
- La moyenne des **températures** de l'air ambiant pour les concentrations de H₂S en moyenne horaire et également en moyennes journalière.

Ces résultats semblent indiquer une légère relation linéaire entre ces paramètres. On peut donc conclure que parmi tous les épisodes de pollution étudiés, les concentrations de H₂S ont eu tendance à être plus élevées lorsque la marée était haute, ainsi que lors des périodes où les températures étaient plus importantes.

La relation entre les concentrations en H₂S avec la surface des nappes de sargasse, le vent, l'humidité, la précipitation et l'insolation s'est avéré insuffisamment corrélée donc l'analyse statistique ne révèle pas d'influence entre ces paramètres et les concentrations de H₂S. Cela n'implique pas nécessairement qu'il n'y a pas de relation entre ces paramètres mais que les données disponibles et l'analyse statistique ne permet pas de les mettre en lumière.

On peut d'ailleurs s'étonner de l'absence de corrélation entre la surface estimée des nappes de sargasse et les concentrations mesurées. Plusieurs explications pourraient justifier ces résultats :

- Une mauvaise estimation des surfaces en décomposition sur le site de Frégate Est 2 d'autant plus que l'algorithme du BRGM ne prend en compte que les algues retenues derrière le filet pour ce site,
- Un décalage temporel entre l'évolution des deux paramètres, si on considère qu'il faut plusieurs jours aux algues retenues derrière le filet pour venir s'échouer et se mettre en



décomposition, ce qui impliquerait une relation non-linéaire entre les paramètres, qu'il n'est pas possible d'identifier avec les outils statistiques utilisés dans cette étude.

Il serait nécessaire reproduire cette étude sur différents sites d'échouement pour tirer de meilleures conclusions vis à vis de ces paramètres.

En outre, les cercles de corrélation de l'ACP ont mis en évidence des corrélations entre certains paramètres météorologiques et les concentrations en H₂S. Une analyse individuelle de chacun des paramètres complète ce premier traitement de données statistique dans le chapitre suivant.

IV. Identification des paramètres météorologiques prépondérant dans la décomposition des algues sargasses sur le site de Frégate-Est 2

Dans le domaine de la qualité de l'air, plusieurs paramètres influent sur la pollution atmosphérique. En effet, les conditions météorologiques peuvent agir sur l'émission et la dispersion des polluants, et donc sur les concentrations mesurées de H₂S émis par la décomposition des sargasses. Les deux saisons qui rythment le climat en Martinique se distinguent par une saison sèche, « le carême », de février à avril et une saison humide, « l'hivernage », de juillet à octobre. Les intersaisons de novembre à janvier et de mai à juin possèdent des caractéristiques climatiques intermédiaires.

Nous analyserons ici les facteurs environnementaux en fonction des concentrations en H₂S pour évaluer l'influence individuelle de chaque paramètre météorologique sur la décomposition des algues sargasses (Annexe V.2 page 59 et Annexe V.3 page 60).

IV.1 Le vent

Les alizés sont le régime de vents dominants en Martinique. Il s'agit de vents de secteur Est à Nord-Est réguliers qui soufflent toute l'année à une vitesse moyenne de 20 km/h, soit 5.5 m/s. Les alizés sont plus présents entre les mois de novembre à juin, et ont tendance à s'atténuer pendant la saison humide sous l'influence des perturbations cycloniques. Les données de vent utilisées pour cette étude proviennent de la station Météo-France située à François-Chopotte (à 5 km de Frégate-Est 2). Le jeu de donnée s'étale entre le 1^{er} janvier 2020 et le 6 octobre 2022. Les données de vent sont des moyennes horaires dont la mesure est effectuée à 10m du sol.

Sur la période de mesure la vitesse du vent varie entre un minimum de 0 m/s et un maximum s'élevant à 8.1 m/s qui correspond au passage de la tempête Elsa, début juillet 2021.

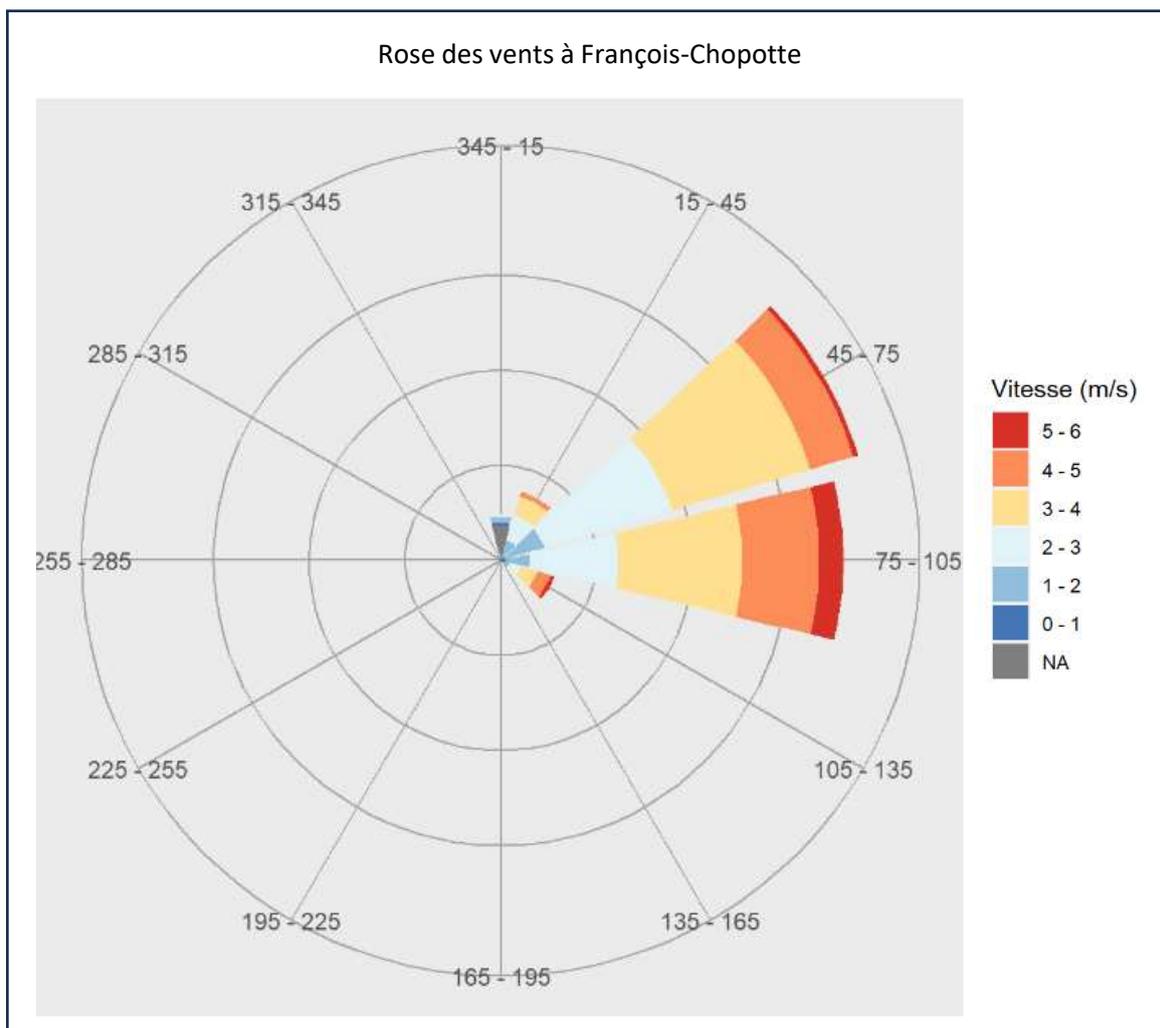


Figure 25 : Moyennes horaires des vitesses en fonction de la direction du vent pour la période 2020-2022.

Le graphique (Figure 25) nous permet de lire à la fois l'occurrence avec la taille des secteurs et la vitesse des vents avec le gradient de couleur en fonction de leurs directions. Ici, on constate que la majorité des vents sont de secteur Est à Nord-Est. Les vitesses maximales comprises entre 5 et 6 m/s et essentiellement en provenance de l'est. Cependant, on remarque que les vents de secteurs Sud-Est ont peu d'occurrence mais leur vitesse est qualifiée comme étant *modéré* (force 4) sur l'échelle de Beaufort (Annexe V.4 page 63).

La Figure 26 ci-dessous est une rose des pollutions qui est une représentation graphique du polluant étudié en fonction des vitesses/direction des vents, afin de mieux appréhender la dynamique atmosphérique des émissions en H₂S.

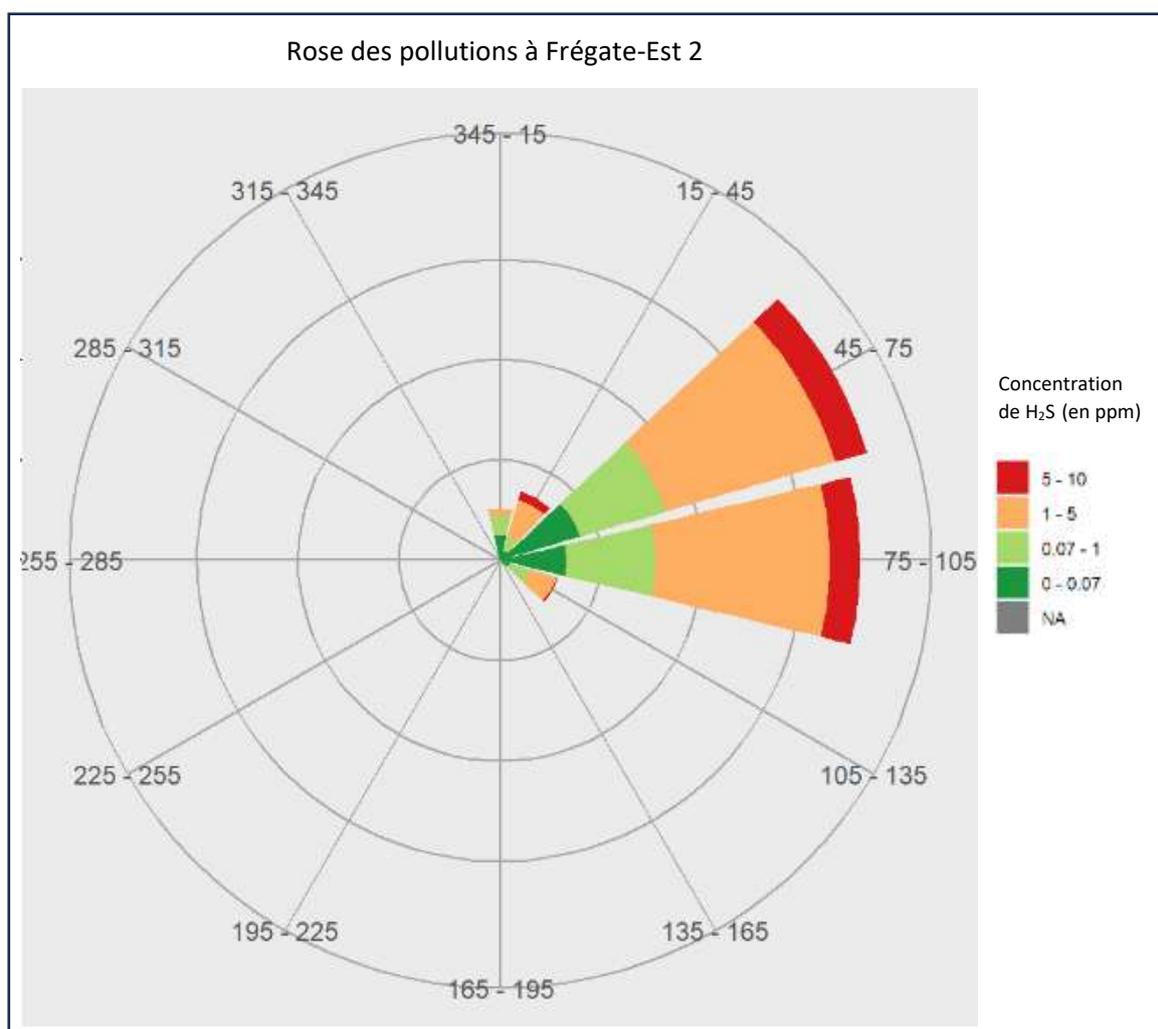


Figure 26 : Rose des pollutions avec les moyennes horaires des concentrations en H₂S en fonction de la direction du vent.

Sur cette rose des pollutions, la fréquence des concentrations en H₂S les plus élevées sont principalement orientées sur les secteurs Nord-Est à Est. On notera d'ailleurs que les secteurs sud-est et nord-st enregistrent une part importante des concentrations en H₂S supérieures à 5ppm, ce qui pourrait traduire un manque d'efficacité du barrage lors de ces conditions. Globalement, la localisation du capteur, situé à l'ouest des zones d'échouements de sargasses et également sous les vents dominants, explique la fréquence à laquelle des concentrations élevées sont enregistrées.

Pour le tableau ci-dessous (Tableau 5), les données de vitesse de vent sont filtrées à partir de 1,5 m/s. Les directions de vent ont été réparties par secteurs de 20° et les vitesses moyennes du vent par tranches de 0,5 m/s. Les concentrations en H₂S sont analysées en moyennes horaires.

Dir.(°) Vit. (m/s)	Nord	NNE	NE	ENE	Est	ESE	SE	SSE	Sud	NO	NNO	Moy.
	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160	161-180	321-340	341-360	
1,1-1,5	1,03	1,33	1,01	0,95	1,04	0,95	0,35	0,37	0,27	1,25	0,57	0,83
1,6-2,0	1,40	1,60	1,60	1,58	1,36	0,96		0,38		1,66	0,41	1,22
2,1-2,5	1,34	2,04	1,55	1,78	1,38	0,98	0,61		0,43		1,25	1,26
2,6-3,0	1,86	2,66	1,62	1,82	1,57	1,16	0,48					1,59
3,1-3,5		2,42	1,66	1,87	1,67	0,92	1,18					1,62
3,6-4,0		2,11	1,47	1,90	1,75	1,23	1,15					1,60
4,1-4,5		2,52	1,50	1,88	1,67	1,60	1,08					1,71
4,6-5,0		2,33	1,32	1,81	1,65	1,43						1,71
5,1-5,5			1,27	1,70	1,77	1,88						1,65
> 5,5				1,44	1,77	2,23						1,81
Moy.	1,41	2,13	1,44	1,67	1,56	1,33	0,81	0,37	0,35	1,46	0,74	1,21

Tableau 5 : Concentrations horaires moyennes en H₂S en fonction des Directions (°) et des Vitesses de vent (m/s).

On constate, sur le site de Frégate Est 2 les concentrations en H₂S sont maximales pour des vents de nord-nord-est à est. Plus particulièrement sur le secteur nord/nord-est, dès que les vitesses de vent sont supérieures à 2 m/s, les concentrations horaires moyennes sont supérieures à 2 ppm. En revanche par vent faible, on note des concentrations moyennes inférieures.

IV.2 La marée

Grâce à l'ACP, nous avons déterminé que la hauteur d'eau induite par la marée est un paramètre qui influence les concentrations en H₂S pour les résultats à intervalle de temps horaire.

Les variations de hauteur du niveau de la mer restent faibles dans les Caraïbes, et ne sont pas aussi significatives a contrario de certaines régions du monde comme en Bretagne. En revanche, ces faibles variations des hauteurs d'eau due à la marée peuvent jouer sur l'efficacité des barrages et permettre aux sargasses de s'infiltrer pour ensuite s'échouer sur le littoral. De même, l'élévation du niveau d'eau à la côte peut provoquer la ré-immersion et donc l'humidification des algues déjà échouées et sèches ce qui peut réactiver le processus de décomposition et l'émanation de H₂S.

Les résultats présentés sont issus des données du marégraphe du SHOM situé au Robert (marégraphe le plus proche du site d'étude) dont le marnage⁵ varie entre 0,2m et 0,8 m. Le jeu de données brutes échantillonné à la minute pour la période du 1^{er} janvier 2020 au 31 décembre 2022. La hauteur de marée varie entre un minimum de 0.001 m et un maximum de 1.2 m.

La Figure 27 présente les moyennes mensuelles des basses et pleines mers entre 2020 et 2022. On remarque une faible amplitude entre les plus hautes et plus basses mers, néanmoins les moyennes mensuelles augmentent légèrement entre juin et septembre, peut-être en raison de phénomènes cycloniques générant une élévation du niveau de la mer (aussi appelé surcote). Comme vu précédemment, c'est aussi à cette période que les concentrations en H₂S sont maximales.

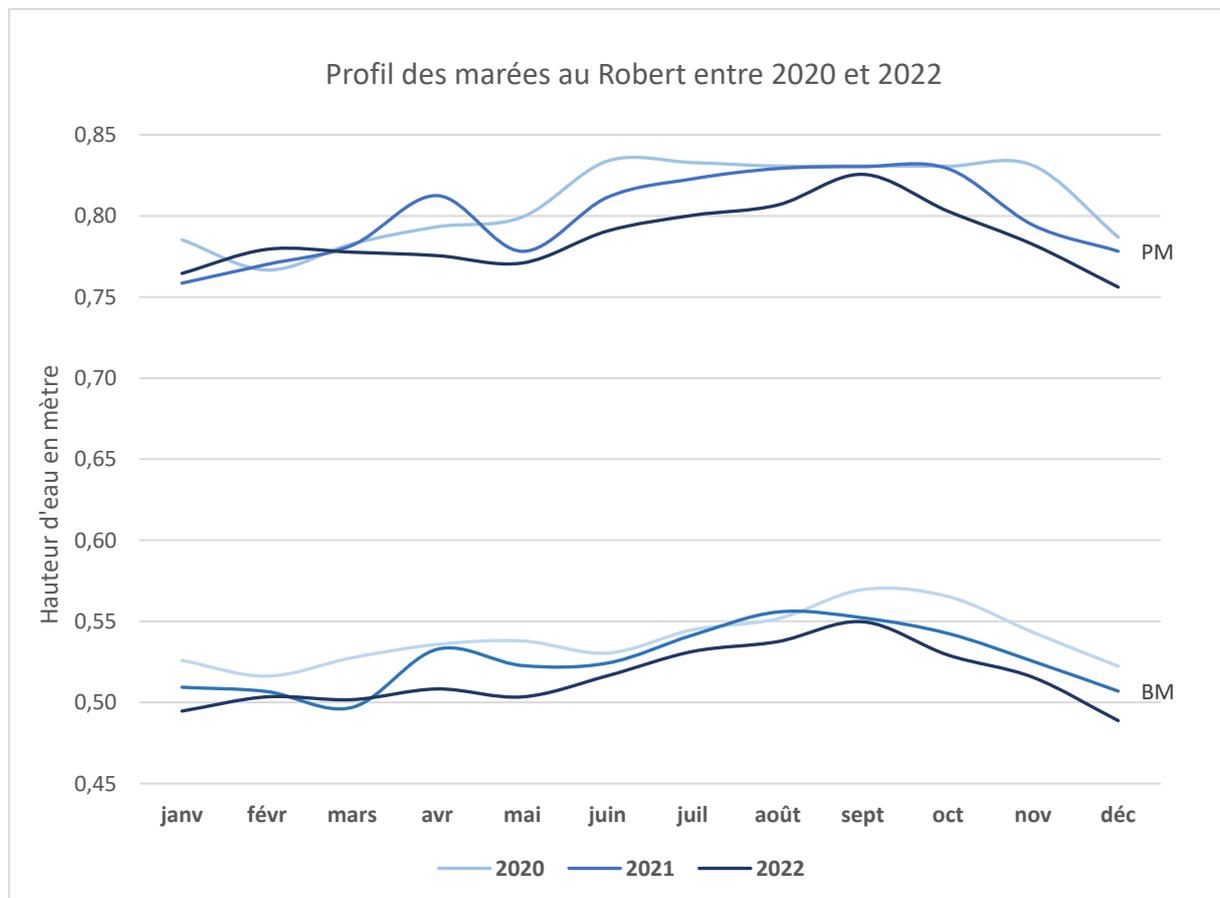


Figure 27 : Moyennes mensuelles des hauteurs d'eau au Robert pour les années 2020, 2021 et 2022 pour les pleines mers (PM) et basses mers (BM)

Les données suivantes sont traitées en moyennes horaires afin que toutes les variables utilisées pour l'étude soient exploitées dans les mêmes dimensions temporelles.

⁵ Le marnage se définit selon le SHOM comme étant la différence de hauteur entre une basse mer et une pleine mer successives.

Hauteur d'eau (m)	[0,0-0,1]	[0,1-0,2]	]0,2-0,3]	]0,3-0,4]	]0,4-0,5]	]0,5-0,6]	]0,6-0,7]	]0,7-0,8]	]0,8-0,9]	]0,9-1,0]	]1,0-1,1]	]1,1-1,2]
Concentrations (ppm)	1,03	0,89	0,98	1,10	1,22	1,22	1,48	1,70	1,88	2,42	2,78	0,30
Nombre d'occurrences	5	83	471	1359	2758	4615	5371	5172	3000	1138	192	2

Tableau 6 : Concentrations horaires de H₂S en fonction des moyennes des Hauteurs d'eau de la marée réparties en classes de 0,1 m.

Dans la partie ACP nous avons démontré une corrélation entre les variables. Cependant, il était nécessaire d'approfondir l'analyse pour établir un lien de cause à effet. Le Tableau 6 semble indiquer une relation de causalité entre la hauteur de marée et les concentrations en H₂S. En effet, plus la marée est haute plus les concentrations en H₂S sont élevées. A noter que les hauteurs de marée comprises entre 0 et 0,1 m et celles supérieures à 1,1 m ne seront pas prises en compte dans les conclusions car leur occurrence est très faible par rapport aux autres hauteurs.

Marnage (m)	< 0,3	]0,3-0,4]	]0,4-0,5]	]0,5-0,6]	]0,6-0,7]	≥ 0,7
Concentrations (ppm)	2,38	1,44	1,23	1,66	1,84	1,72
Nombre d'occurrences	66	210	256	255	134	71

Tableau 7 : Répartition du marnage en classe de 0.1m en fonction des concentrations horaire en H₂S

De même pour le marnage, lorsqu'il est supérieur à 0,5 m, les concentrations en H₂S sont maximales. Pour un marnage très faible soit moins de 0,3 m, on constate une augmentation des concentrations en H₂S (Tableau 7). Avec ces résultats entre le marnage et les concentrations en H₂S nous pouvons supposer que l'algue émet majoritairement des gaz tant qu'elle reste humide.

En somme, chaque site de mesure présente des caractéristiques littorales uniques. Les résultats recueillis à Frégate-Est 2 sont significatifs en raison de la présence d'un canal en fond de baie qui garde les algues sargasses humide, un phénomène amplifié par l'action des marées. En revanche, si elles restent immergées ou si elles sont sèches, les émissions en gaz dans l'air seront moindres.

IV.3 Les précipitations

La précipitation se définit comme étant une " particule d'eau, liquide ou solide qui tombe en chute libre dans l'atmosphère " par Météo France. Les données de précipitations à Frégate-Est 2 proviennent de la station Météo-France située à François Chopotte. Les mois les plus secs pour les années 2020, 2021 et 2022 sont avril et mai, avec des minima mensuels inférieurs à 60 mm. Quant aux mois les plus

pluvieux, à savoir octobre et novembre, les moyennes des cumuls de précipitations dépassent 75 mm (Figure 28).

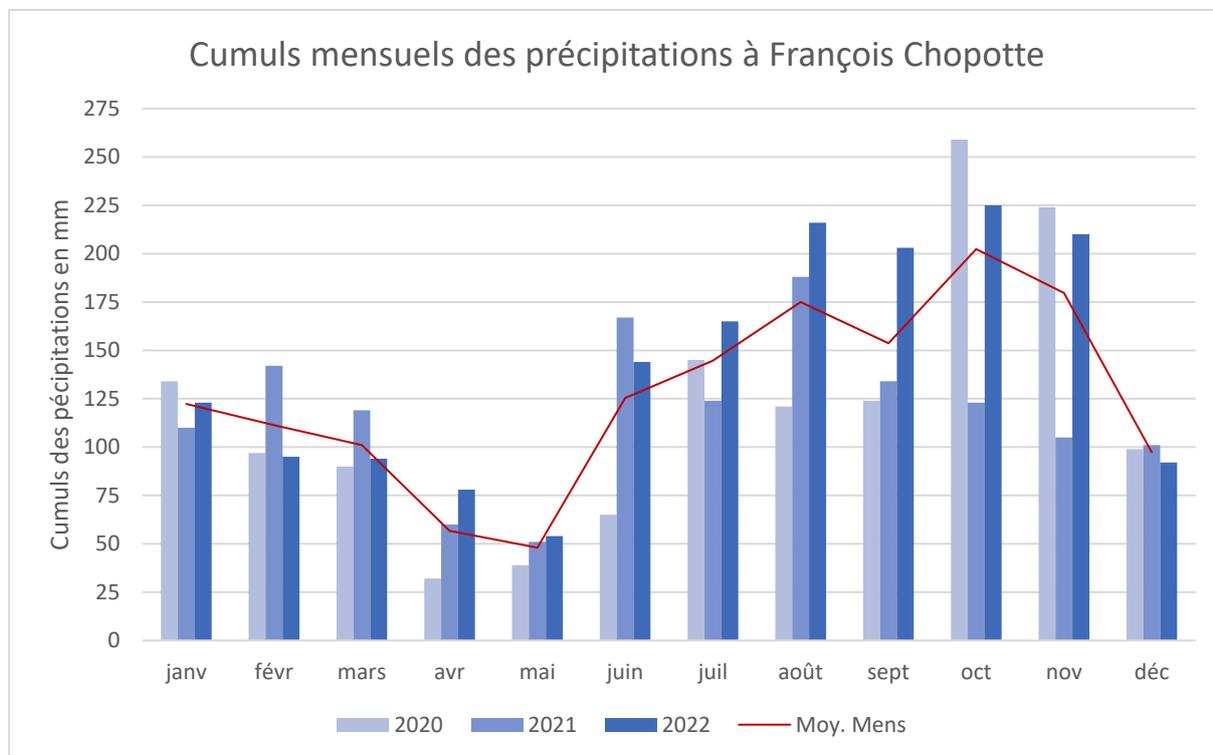


Figure 28 : Répartition des cumuls mensuels de précipitations à François Chopotte entre 2020 et 2022.

Afin de mieux représenter l'influence des précipitations sur les concentrations en H₂S, les précipitations ont été traitées en cumuls journaliers (Tableau 8). On remarque globalement une diminution des concentrations en H₂S lorsque les cumuls journaliers de précipitations sont supérieurs à 10 mm.

Cumul de précipitations (mm)	[0,0]	[0,1-1]	]1-5]	]5-10]	]10-15]	> 15
Concentrations (ppm)	1,64	1,40	1,56	1,51	1,17	1,19
Nombre de données	299	287	282	92	29	75

Tableau 8 : Concentrations moyennes journalières en H₂S en fonction des cumuls de précipitation journaliers.

Néanmoins, la station de Météo France se situe à 5 km du site de mesure des concentrations en H₂S. On considère que les deux points de mesures sont éloignés l'un de l'autre. En effet, dû au caractère très localisé des phénomènes de précipitation en Martinique, cela peut induire un biais dans les conclusions présentées pour ce site d'étude.

IV.4 La température

La température moyenne en Martinique est d'environ 27°C (Figure 29) avec une amplitude thermique annuelle de 10°C. Les données de température sont issues de la station Météo-France François Chopotte, avec la température sous abri par heure en degrés Celsius entre le 1^{er} janvier 2020 au 31 décembre 2022.

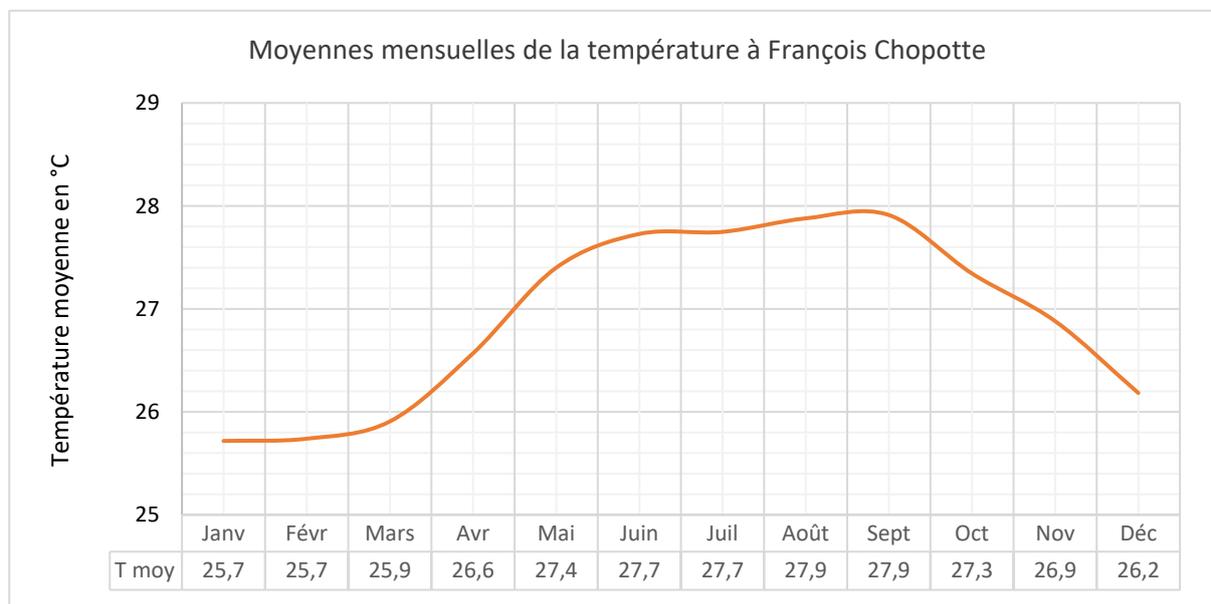


Figure 29 : Evolution mensuelle de la moyenne des températures à François Chopotte (données des années 2020 à 2022)

Sur le graphique suivant (Figure 30), on constate une amplitude thermique moyenne annuelle de 2 °C avec des minima à 26°C pendant les mois de janvier ou février et des maxima de 28 °C en aout et septembre.

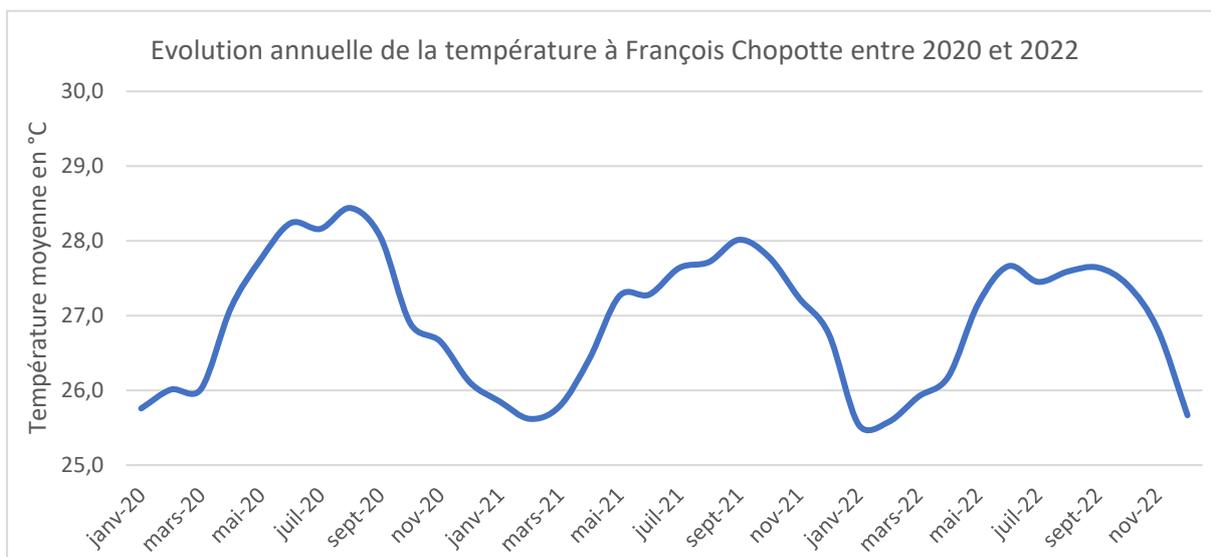


Figure 30 : Evolution annuelle des températures moyennes à François Chopotte entre 2020 et 2022

Dans le Tableau 9, sont présentées les concentrations moyennes horaires en H₂S en fonction des moyennes horaires des températures réparties en classes de 1° C. Plus les températures sont élevées, plus les concentrations en H₂S augmentent.

Température °C	<24	25	26	27	28	29	>30
Concentrations (ppm)	0,55	0,87	1,20	1,91	1,79	1,65	1,61
Nombre de données	1268	2892	4495	5194	4531	5531	1337

Tableau 9 : Concentrations moyennes horaires en H₂S en fonction des moyennes horaires des températures

On considère alors que, les périodes durant lesquelles la température est la plus élevée coïncident avec les pics d'arrivage des nappes de sargasses, soit entre juillet et septembre. Bien que les températures jouent un rôle dans la putréfaction de l'algue, l'amplitude thermique mensuelle n'est pas significative sur notre site d'étude, ce qui nous empêche d'établir une relation de causalité entre les deux paramètres.

IV.5 L'humidité relative

Le taux d'humidité relative est le rapport entre la quantité actuelle de vapeur d'eau dans l'air et la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air contient à la même température. On considère qu'à 100% d'humidité relative, l'air a atteint sa tension maximale et arrive à saturation, alors se forment des

nuages. Il est à noter que la température joue un rôle dans le seuil de saturation. En effet, plus la température est élevée, plus l'air se dilate et plus le seuil de tension maximale augmente. Selon Météo France, la quantité maximale de vapeur d'eau contenue dans une particule d'air pour une température de 30 °C est de 30 g/m³.

Les données d'humidité relative proviennent de la même station Météo-France à François Chopotte, avec des données brutes sur l'humidité relative horaire en pourcentage entre le 1^{er} janvier 2020 au 31 décembre 2022.

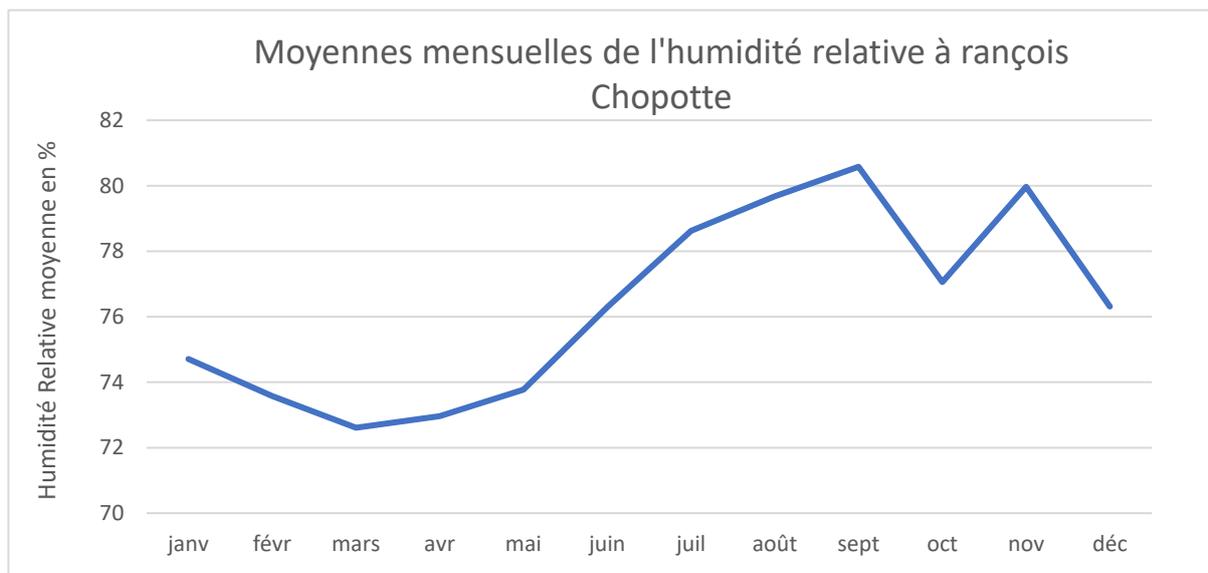


Figure 31 : Évolution des moyennes d'humidité relative à François Chopotte entre 2020 et 2022

Globalement, le climat tropical est caractérisé par un fort taux d'hygrométrie. Les moyennes mensuelles d'humidité relatives utilisées pour le site d'étude varient entre 73% et 81% (Figure 31).

Humidité (%)	< 55	]55-60]	]60-65]	]65-70]	]70-75]	]75-80]	]80-85]	]85-90]	]90-95]	> 95
Concentrations (ppm)	0,86	0,91	1,18	1,55	1,58	1,74	1,61	1,40	0,88	0,12
Nombre de données	177	368	1869	3821	5671	5906	3712	1884	1411	337

Tableau 10 : Concentrations moyennes horaires en H₂S en fonction des moyennes horaires d'humidité relative.

Les moyennes horaires d'humidité relative ont été réparties par classes de 5%. Lorsque l'humidité relative est inférieure à 65%, les concentrations en H₂S sont relativement faibles. À une humidité relative comprise entre 65 et 85% les concentrations en H₂S augmentent. Lorsque l'humidité relative atteint plus de 90%, les concentrations de H₂S chutent (Tableau 10).

Humidité (%)	[70]	]70-75]	]75-80]	]80-85]	]85-90]
Concentrations (ppm)	1,04	1,66	1,75	1,20	0,61
Nombre de données	119	347	346	243	14

Tableau 11 : Concentrations moyennes journalières en H₂S en fonction des moyennes journalières d'humidité relative.

Les concentrations moyennes journalières en H₂S et de l'humidité ont été regroupées dans le tableau ci-dessus (Tableau 11). Lorsque l'humidité est comprise entre 70% et 80% les concentrations en H₂S augmentent. On suppose qu'à partir de 80%, le taux d'humidité relative est suffisant pour laisser place aux précipitations. Tout comme la température, on observe que les périodes d'échouements massifs correspondent aux périodes où l'humidité relative est comprise entre 70% et 80%.

Ainsi, comme décrit précédemment dans le Tableau 8 (page 48), lors des journées pluvieuses les concentrations en H₂S diminuent, ce qui est en lien avec la diminution des concentrations en H₂S à partir de 80% d'humidité relative.

IV.6 L'insolation

L'insolation se définit selon Météo France comme étant "l'exposition d'un objet au rayonnement solaire direct". A savoir que l'on mesure l'insolation lorsque l'éclairement par le soleil est au minimum de 120 watts par mètre carré, la présence de nuages ou le relief peut interférer dans la durée d'insolation. Cette durée est considérée comme étant le cumul des intervalles de temps à laquelle un objet est exposé au rayonnement solaire.

Les données d'insolation proviennent de la station Météo-France de François Chopotte, comprises entre le 1^{er} janvier 2020 au 31 décembre 2022. Initialement, la source des données est en minutes. Le cumul des minutes en heure d'insolation par jour nous permet d'analyser les données en durée d'insolation par jour.

En raison de la faible latitude de la Martinique, donc peu soumise aux variations saisonnières de la durée du jour, on observe peu de différence entre les durées d'insolations aux solstices d'hiver (décembre) et d'été (juin) sur la Figure 32. On note toutefois une baisse de la durée d'insolation sur la période d'octobre et novembre, ce qui correspond au pic de la saison cyclonique et traduit une couverture nuageuse plus dense en moyenne.

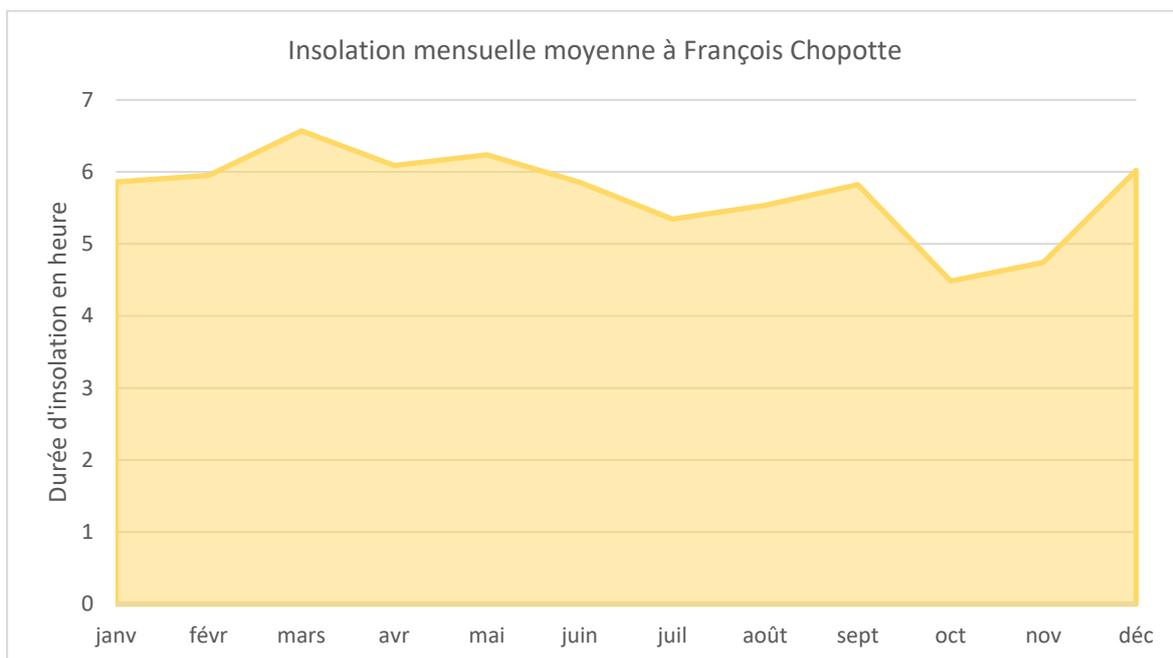


Figure 32 : Durées d'insolation mensuelle moyenne en heure à François Chopotte entre 2020 et 2022

Afin de mieux représenter l'influence de l'insolation, nous avons classé les moyennes journalières de concentration en H₂S par rapport aux cumuls journaliers d'insolations échantillonnés par heure.

Durées d'Insolation	<1h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	>9h
Concentrations (ppm)	1,27	0,99	1,81	1,59	1,20	1,63	1,57	1,41	1,55	1,71
Nombre d'occurrences	36	31	33	58	89	136	209	223	198	59

Tableau 12 : Moyennes journalières des concentrations en H₂S en fonction des cumuls journaliers d'insolation.

Il n'y a pas de tendance nette qui se dégage entre la durée d'insolation et les concentrations en H₂S (Tableau 12). Le nombre d'occurrences augmente pour les cumuls entre 5h et 8h, qui n'enregistre pas systématiquement les concentrations moyennes maximales. Ainsi, l'insolation ne semble pas être un critère influençant les concentrations en H₂S dans l'air.

IV.7 Le facteur jour/nuit

La Figure 33 représente l'évolution sur 24 heures des concentrations horaires moyennes en H₂S pour les sites de Frégate-Est 2, de Four à Chaux et de Pointe Hyacinthe. Les concentrations de H₂S qui correspondent début et à la fin de la période diurne sont affichées.

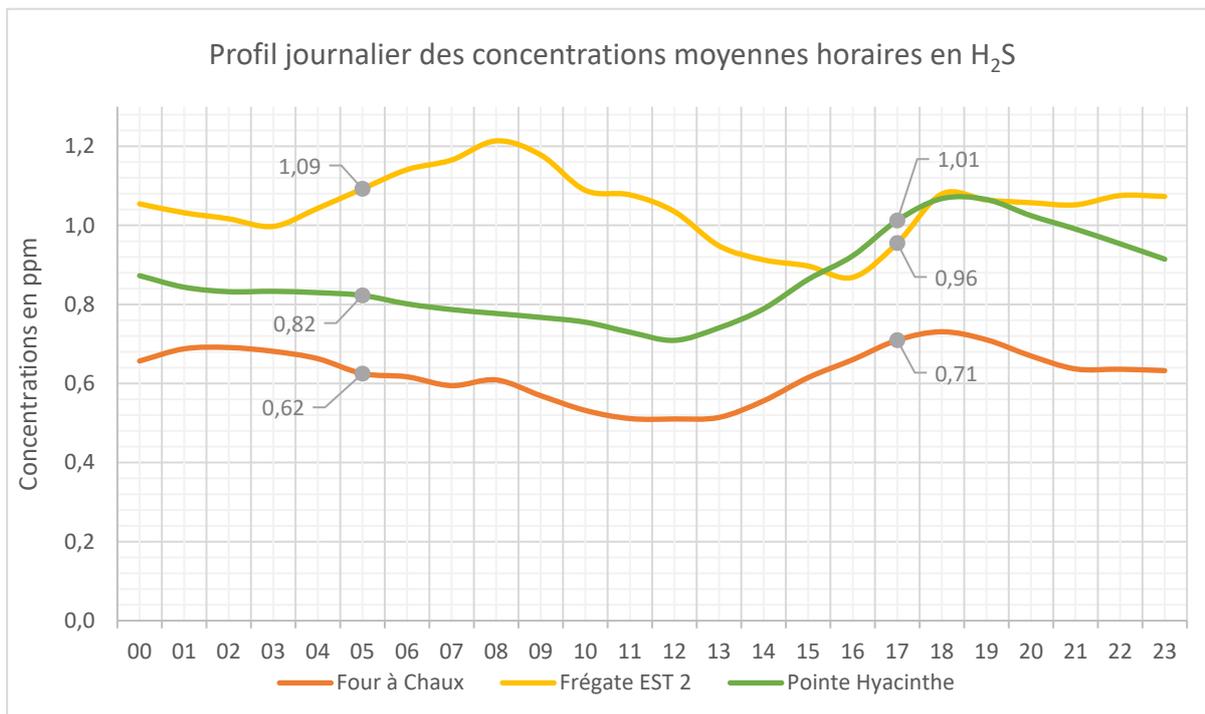


Figure 33 : Influence du facteur jour/nuit sur les concentrations de H₂S à Frégate-Est 2, Four à Chaux, Pointe Hyacinthe (données de 2018 à 2022)

Les concentrations en H₂S varient selon l'heure de la journée pour les trois sites représentés, cependant aucune tendance globale, ni une différence jour/nuit notable, ne s'en dégagent. Seuls les sites de Four à Chaux et de Pointe Hyacinthe présentent un comportement similaire avec une augmentation des concentrations dans l'après-midi pour atteindre un pic à 18h au moment du coucher du soleil ce qui pourrait confirmer l'influence de la température de l'air sur la décomposition mais le site de Frégate-Est 2 se comporte différemment.

Il est probable que différents paramètres environnementaux jouent sur la décomposition des algues et que selon la configuration des sites, certains paramètres s'expriment plus que d'autres.

Conclusion

Pour répondre à la problématique initiale portant sur l'influence des paramètres météorologiques sur la décomposition des algues sargasses, Madinair a utilisé les données du réseau de capteurs fixes, ainsi que les données de caméras traitées par l'algorithme du BRGM et les données environnementales fournies par Météo France et le SHOM. Il en résulte deux phases dans cette étude, une première réflexion exploratoire pour cibler à la fois les paramètres intéressants à approfondir et à la fois pour délimiter les périodes et lieux où les pics en H₂S sont les plus élevés.

En effet, le site de Frégate-Est 2 s'est révélé le plus propice à être utilisé comme cas d'étude et ce, grâce la présence d'une caméra et d'un capteur fixe, mais aussi car c'est le site en Martinique qui a les concentrations en H₂S les plus élevées sur la période la plus longue. Lors de cette phase exploratoire la méthode de l'ACP a été utilisée pour déterminer les corrélations entre les différentes variables météorologiques et océaniques sélectionnées au préalable en fonction des données disponibles. S'en suit au cours de ce rapport, une analyse par paramètres, pour étayer la pertinence des relations entre les concentrations en H₂S et les variables météo-marines retenues lors de l'ACP.

Il est à prendre en compte que l'étude des paramètres environnementaux ne porte que sur un seul site en Martinique, Frégate-Est 2 dont la morphologie littorale est atypique liée à la présence d'un canal où s'accumulent les sargasses. Il est donc difficile de le considérer comme un site témoin sur lequel il serait possible d'extrapoler les conclusions aux autres sites de la Martinique. Il s'avère que pour ce site, le paramètre de la marée semble le plus impactant. **En effet, on constate une augmentation des concentrations en H₂S lorsque l'algue échouée est humidifiée par la mer. On observe aussi que les concentrations semblent diminuer lors des journées présentant de fortes précipitations. Enfin on note une diminution des concentrations lorsque le vent s'affaiblit et notamment lorsqu'il provient du secteur sud**, ce qui peut correspondre à une particularité du site mais également découler de l'observation précédente, l'ACP ayant montré que la vitesse du vent et les précipitations sont globalement des variables anti-corrélées donc évoluant à l'inverse l'une de l'autre.

A l'inverse, d'autres paramètres comme l'insolation et la température n'ont pas semblés présenter d'influence significative sur les concentrations, notamment si on considère la saisonnalité du phénomène des échouements qui intervient sur les mois où on enregistre déjà les températures les plus élevées.

Toutefois plusieurs contraintes liées aux sources de données qui ont servi à cette étude rendent difficile l'exploitation des résultats :

Le jeu de données utilisé pour caractériser la surface de la nappe de sargasse retenue par le barrage, ne comporte pas de mesure lors des périodes nocturnes car l'utilisation des images ne peut pas être réalisée de nuit. Les analyses effectuées avec ces données n'ont pas pu être concluantes, mais l'irrégularité de l'échantillonnage (seulement cinq valeurs par jour et uniquement entre 8h et 18h) rendent impossible les analyses sur 24h avec ce paramètre. Il est d'autant plus difficile à exploiter que les surfaces exprimées ne correspondent pas aux surfaces réellement en décomposition au niveau de la plage ou du canal.

Qui plus est, les sources de données météorologiques et marines sont éloignées du site d'étude ce qui apporte un biais dans l'analyse de certains paramètres tels que la pluviométrie qui est très localisée sur le territoire.



En somme, les analyses montrent des perspectives d'amélioration pour la récolte des données sources et l'approfondissement de cette thématique d'étude. L'installation d'une station météorologique sur le site de Frégate-Est 2 pourrait combler le manque de données et évincer les biais dû à l'éloignement du site de mesure et de la station Météo France. Aussi, des tests pourraient être effectués pour étayer les hypothèses sur certains paramètres, notamment la relation de causalité entre la réhumidification des algues et l'augmentation des concentrations en H₂S.

Bibliographie

ANSES (Mars 2017). Expositions aux émanations d'algues sargasses en décomposition aux Antilles et en Guyane. *Rapport d'expertise collective - Avis révisé de l'Anses*, 135 pages.

BOUVIER C. (2021). Suivi des échouages de sargasses sur le littoral de la Martinique (Rapport technique des années 2020 et 2021). *Rapport final V1. BRGM/RP-71396-FR*, 42 pages.

CESBRON O. (2018). Campagne de mesures de la qualité de l'air - Port du Légué -Saint-Brieuc (22). *Rapport d'études Air Breizh*, 64 pages.

DEAL de la Martinique, ADEME, & SISPS. (2023). Panorama des dispositifs techniques pour la collecte et la prévention des échouages des algues sargasses. Rapport des Préfectures de Guadeloupe et de Martinique, 46 pages.

GOUVERNEMENT (2022). Plan national de prévention et de lutte contre les sargasses 2022 - 2025. *Rapport du ministère*, 36 pages.

Haut Conseil de la Santé Publique. (2018). *Avis relatif à la définition de mesures de gestion concernant l'exposition des populations antillaises à de l'ammoniac (NH₃) et du sulfure d'hydrogène (H₂S) issus de la décomposition d'algues Sargasses*, 22 pages.

JAMES L. (2021). Identification des indicateurs susceptibles d'influer sur les niveaux d'émanation d'hydrogène sulfuré par les sargasses. *Mémoire de fin d'études - Université Côte d'Azur - Madinair*, 132 pages.

V. Annexes

V.1 Implantation des sites par commune

Site	Commune
Anse Cafard	Diamant
Frégate Est 2	François
Cap Est La Prairie	François
Dostaly Sud	François
Presqu'île	François
Bourg	Marigot
Pontaléry	Robert
Baie Cayol	Robert
Four à Chaux	Robert
Pointe Savane	Robert
Pointe Hyacinthe	Robert
Sable Blanc	Robert
Anse Michel	Saint-Anne
Cosmy	Trinité
Pointe Faula	Vauclin
Château Paille	Vauclin

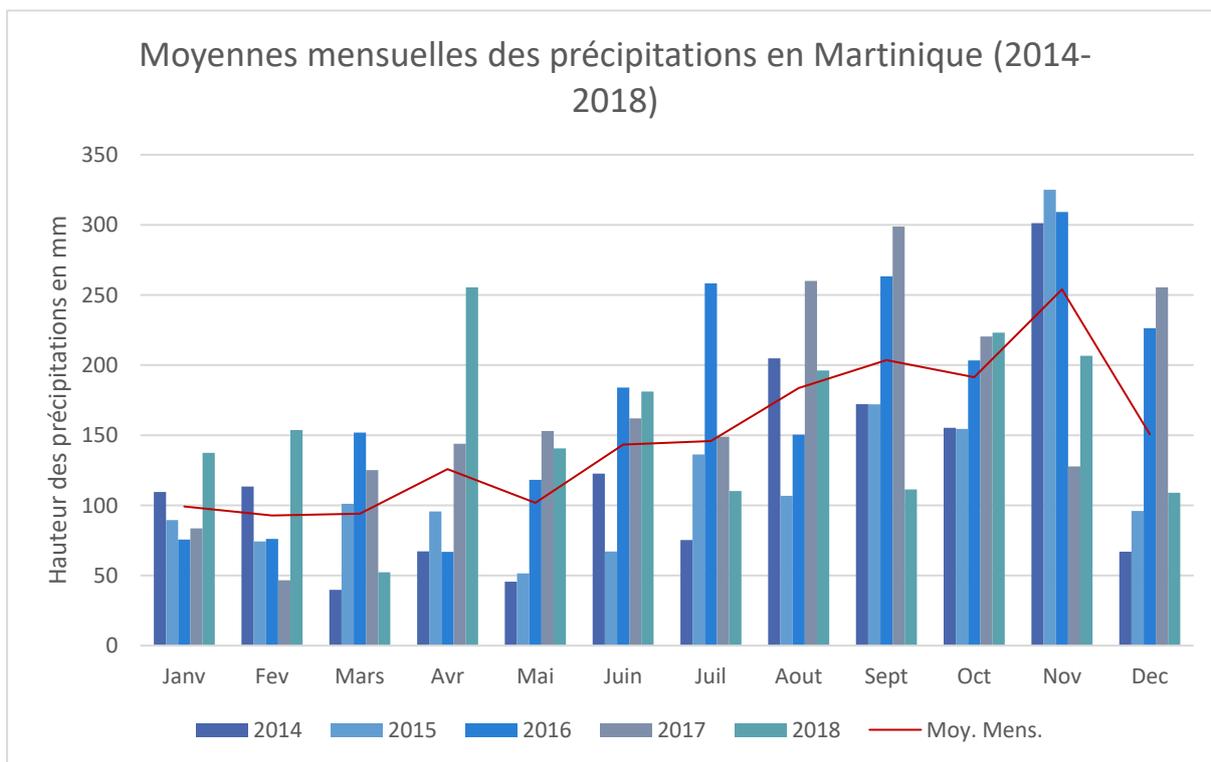
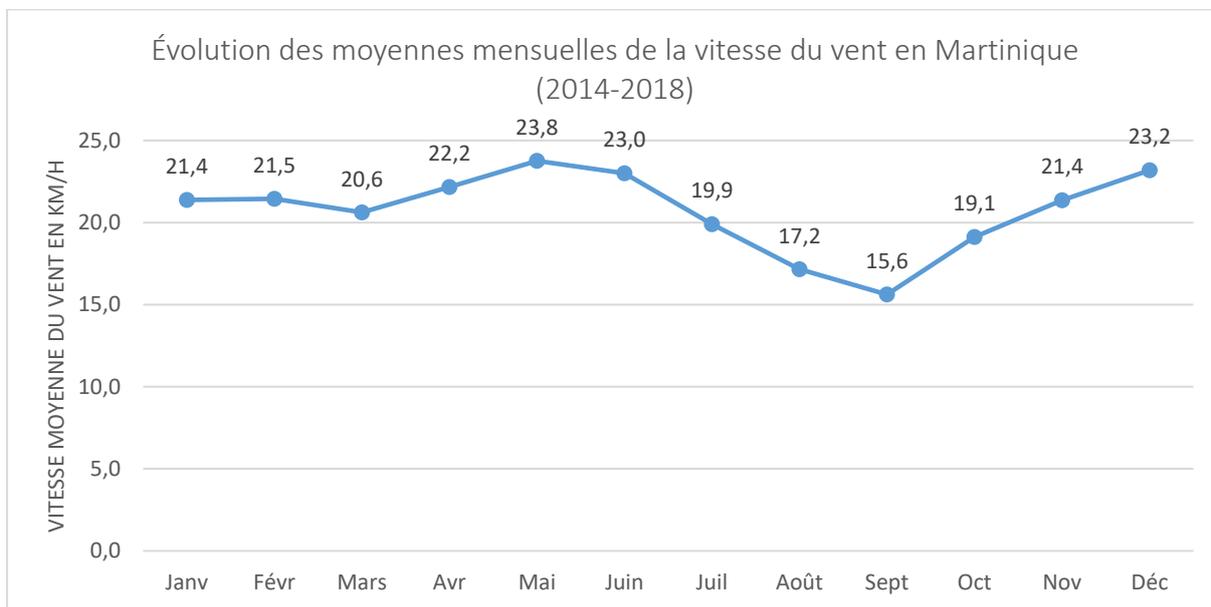
V.2 Synthèse des paramètres étudiés en moyennes mensuelles

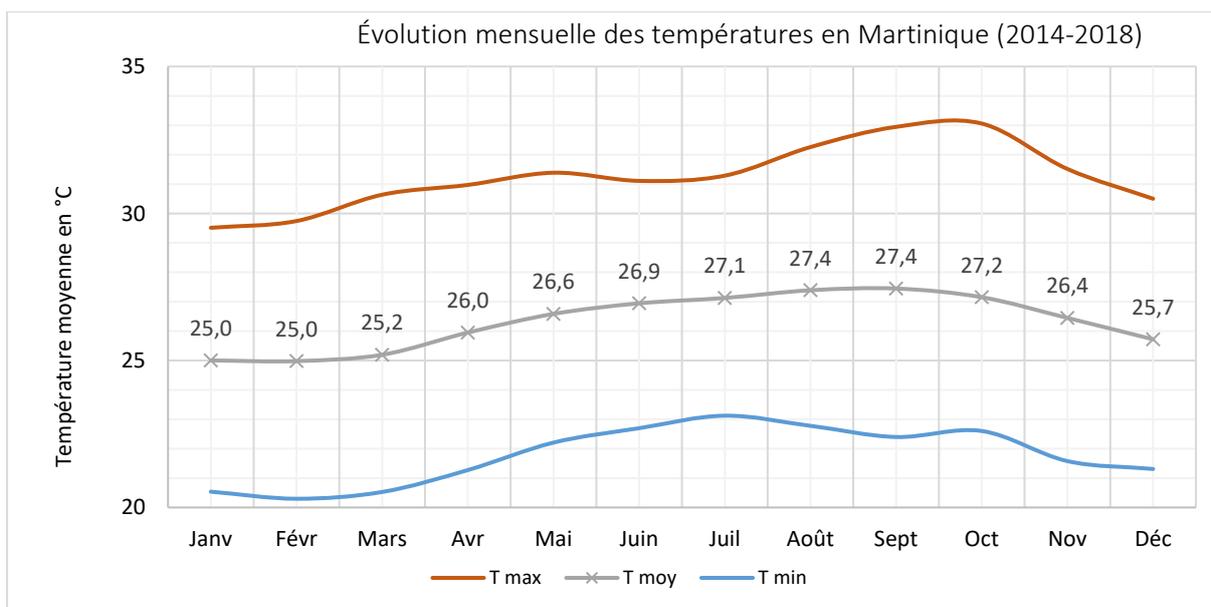
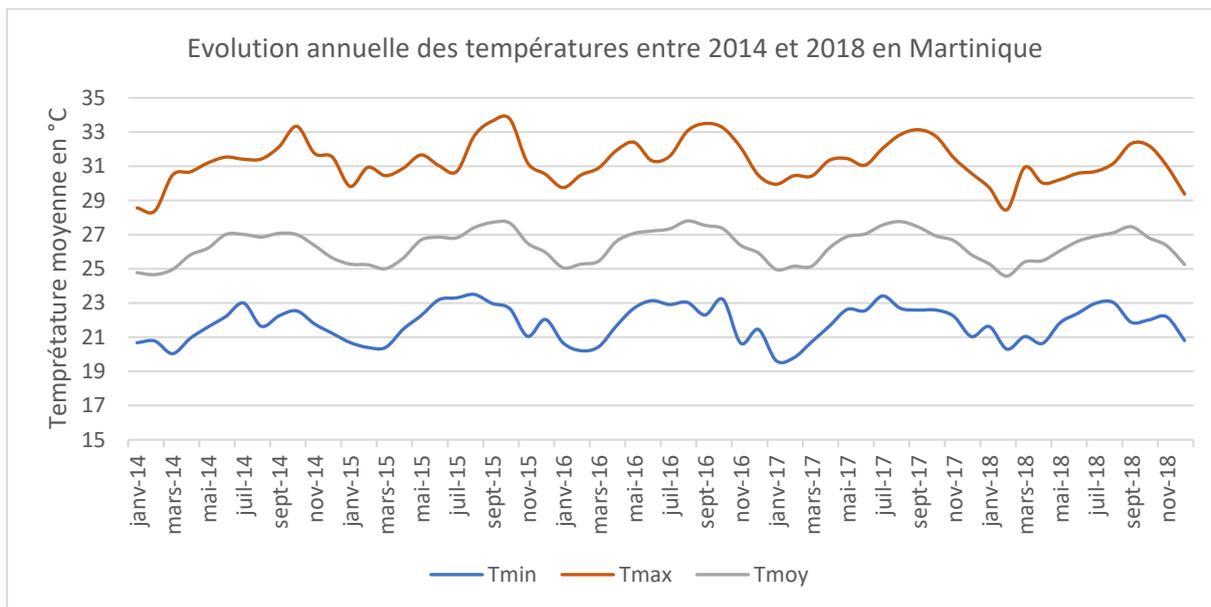
2020	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dèc.
Humidité	80	77	75	75	75	78	80	82	85	88	86	82
Température	26,3	26,5	26,5	27,7	28,2	28,7	28,6	28,9	28,5	27,4	27,3	26,6
Insolation (h)	6	5	7	7	7	7	6	6	6	4	5	7
Précip.	100	76	56	11	26	38	125	195	109	403	304	1
Vitesse Vent	1,5	2,4	1,2	1,7	2,7	3,2	3,9	4,7	4,0	4,8	4,5	4,3
H ₂ S	0	0	0	1,2	1,3	3,1	4,0	0,3	0,1	0	0	0

2021	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dèc.
Humidité	78	76	75	76	74	79	81	83	82	72	79	76
Température	26,5	26,1	26,3	27,0	27,7	27,7	28,3	28,2	28,5	28,5	27,8	27,3
Insolation (h)	6	6	6	6	7	5	5	6	7	5	6	6
Précip.	70	63	97	77	38	34	173	99	155	143	114	65
Vitesse Vent	3,3	2,5	3,9	3,4	2,9	2,6	2,2	1,8	1,1	1,3	1,4	2,0
H ₂ S	0	0	0,5	1,6	2,0	4,3	4,4	3,7	2,4	0,4	1,6	1,3

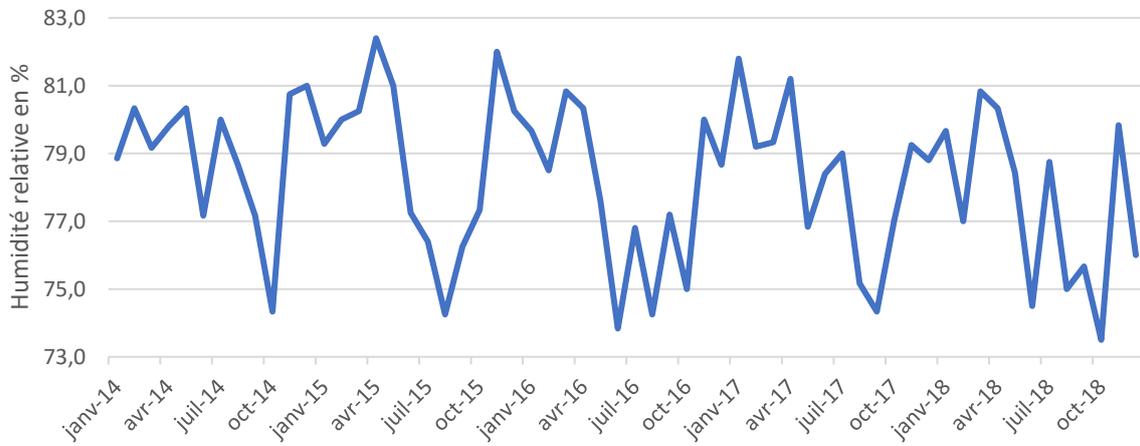
2022	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dèc.
Humidité	76	77	76	77	80	81	84	86	87	86	85	81
Température	26,1	26,1	26,3	26,7	27,6	28,1	27,8	28,0	28,3	27,9	27,3	26,2
Insolation (h)	6	7	6	6	5	6	6	6	5	5	4	6
Précip.	60	67	49	45	65	201	84	200	301	205	170	55
Vitesse Vent	2,6	2,9	2,2	2,6	3,4	4,1	4,0	3,4	4,0	4,2	4,1	4,2
H ₂ S	2,0	1,6	3,1	1,8	4,3	3,3	2,5	2,1	0,6	0,4	0,2	0,3

V.3 Analyses des paramètres météorologiques avant la période d'étude (de 2014 à 2018) à l'échelle de la Martinique

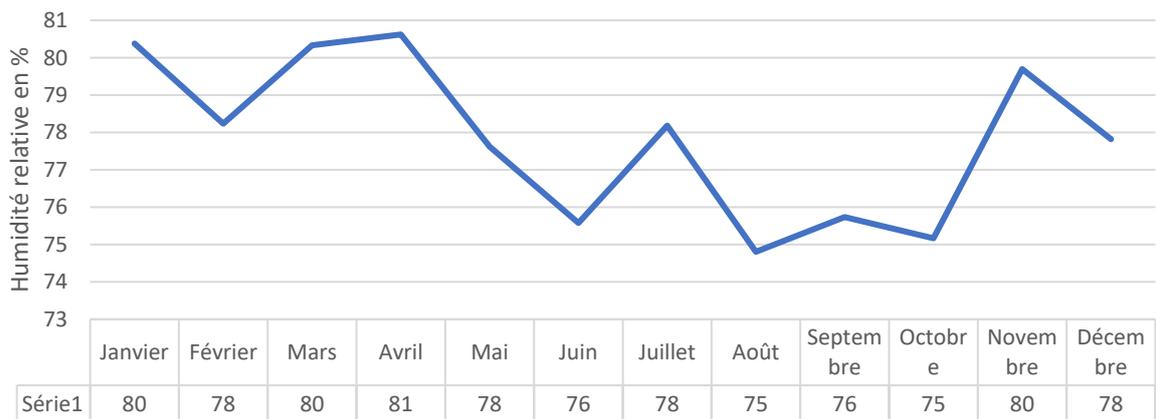




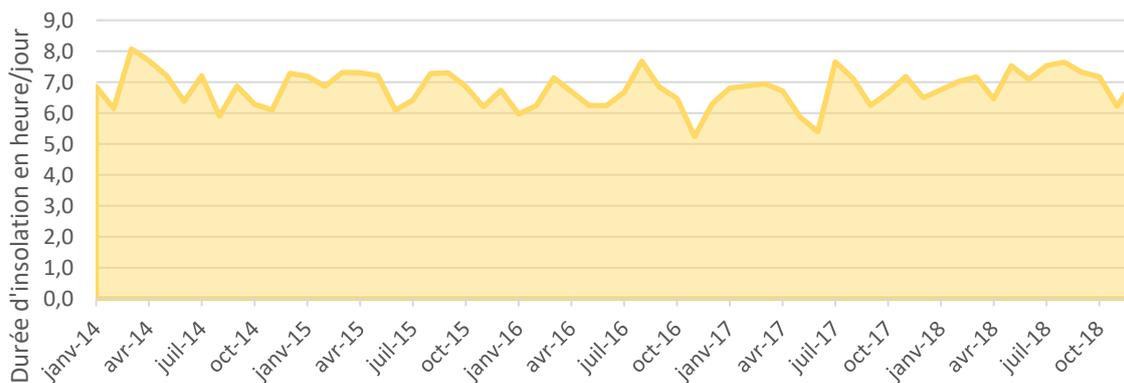
Evolution de l'humidité relative en Martinique entre 2014 et 2018



Moyennes mensuelles de l'Humidité Relative en Martinique (2014-2018)



Moyennes mensuelles des durées d'insolation par jour entre 2014 et 2018 en Martinique



V.4 Echelle de Beaufort

Force	Désignation	km/h	m/s	Noeuds	mph	Effet
0	Air calme	< 1	< 0,3	< 1	< 1	Rien du tout
1	Air léger	1 - 5	0,3 - 1,5	1 - 3	1 - 3	Dérivation de la fumée
2	Légère brise	6 - 11	1,6 - 3,3	4 - 6	4 - 7	Contractions des feuilles
3	Brise légère	12 - 19	3,4 - 5,4	7 - 10	8 - 12	Mouvement des branches
4	Vent modéré	20 - 28	5,5 - 7,9	11 - 15	13 - 17	Mouvement des membres
5	La brise fraîche	29 - 38	8,0 - 10,7	16 - 21	18 - 24	Déplacement des petits arbres
6	Forte brise	39 - 49	10,8 - 13,8	22 - 27	25 - 30	Mouvement des branches fortes
7	Vent fort	50 - 61	13,9 - 17,1	28 - 33	31 - 38	Déplacement des arbres
8	Coup de vent	62 - 74	17,2 - 20,7	34 - 40	39 - 46	Difficulté à marcher
9	Coup de vent de ficelle	75 - 88	20,8 - 24,4	41 - 47	47 - 54	Dommmages à la maison
10	Tempête	89 - 102	24,5 - 28,4	48 - 55	55 - 63	Déracinement d'arbres
11	Tempête violente	103 - 117	28,5 - 32,6	56 - 63	64 - 73	Dommmages causés par la tempête
12	Ouragan	> 118	> 32,7	> 64	> 74	Dévastation



Madininair
votre parten'air en Martinique

31, rue du Professeur Raymond Garcin
Allée du Prunier - 97200 Fort-de-France
Tél. : 0596 60 08 48
info@madininair.fr
www.madininair.fr

