



PROJET BECOMING 2019

Intensité et impact environnemental du blanchissement corallien de 2019 sur les récifs coralliens de La Réunion

Janvier 2020



Partenaire du Projet BECOMING 2019 (par ordre alphabétique):

CORDIO, Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de La Réunion (DEAL), ESPACEDEV, ENTROPIE, Initiative Française pour les Récifs Coralliens (IFRECOR), Institut de Recherche et de Développement (IRD), MAREX, SEAS-OI, Réserve Naturelle Marine de La Réunion (RNMR) Région Réunion, Université de La Réunion (UR).

Les images satellites ont été fournies gracieusement par le programme KALIDEOS Réunion (CNES). Les images ULM ont été fournies par SEAS-OI/Région Réunion.

Contact: Jean Benoit NICET : jbenoit.nicet@gmail.com

Rédaction rapport :

MAREX : J.B. Nicet, Julien Wickel

ESPACE-DEV/SEAS-OI : Valère Dufay, Pascal Mouquet, Gwenaëlle Pennober,

Terrain :

MAREX : J.B. Nicet, M. Pinault, J. Wickel

OCEAN OBS : Hendrik Sauvignet

TSMOI

Crédit photo :

MAREX/J.B. NICET et OCEANOBS/SAUVIGNET

Acquisition et traitement d'image :

ESPACE-DEV/SEAS-OI : Valère Dufay, G. Pennober, Pascal Mouquet

Région/SEAS-OI : Stéphane Guyard

Données régionales :

CORDIO : David Obura

Date : 05 février 2020

A citer sous la forme :

NICET J.B., DUFAY V., MOUQUET P., OBURA D., PENNOBER G., PINAULT. M., WICKEL J., BIGOT L., CHABANET P., 2019. Intensité et impact environnemental du blanchissement corallien massif de 2019 sur les récifs coralliens de La Réunion. Projet BECOMING 2019. Rapport MAREX, ESPACEDEV, ENTROPIE, UR, IRD, SEAS-OI, CORDIO pour la DEAL Réunion, la RNMR et l'IFRECOR, 70 pages + annexes.

RESUME NON TECHNIQUE

En décembre 2018, la NOAA a émis une alerte sur un risque de blanchissement élevé pour la saison chaude 2019. Suite à cette alerte, la DEAL Réunion appuyé par l'IFRECOR et la Réserve Naturelle Marine de La Réunion ont mis en place une phase de surveillance du blanchissement et préparé un suivi qui a été réalisé lorsque un blanchissement important a effectivement été observé sur le terrain par les usagers et scientifiques.

Ce suivi a deux volets :

-) Un suivi in situ pour quantifier le blanchissement et la mortalité associée total et par genre ;
-) Une carte du blanchissement réalisée à partir d'images satellites Pléiades et l'utilisation pour la première fois de drone et d'un ULM pour cartographier le blanchissement.

Il ressort du programme BECOMING2 sur l'évaluation du phénomène de blanchissement survenu à La Réunion en 2019 :

-) Un DHW (risque de blanchissement) le plus élevé en avril 2019 depuis 1985 ;
-) Un blanchissement important (40% de la couverture corallienne sur la pente externe et les platiers) mais une mortalité faible à moyenne (15% sur les platiers et 12% sur la pente externe) ;
-) Les genres les plus touchés sont les *Acropora*, *Montipora*, *Millepora* et *Porites* (uniquement sur la pente externe pour ces derniers) ;
-) Sur la pente externe les genres dominants *Pocillopora* et *Astreopora* n'ont pas été touchés ce qui risque de favoriser leur dominance au détriment des *Porites* et *Acropora* aggravant le déséquilibre des peuplements coralliens sur la pente externe ;
-) Une carte des coraux blanchis réalisée à partir des images Pléiades en accord avec les observations terrains pour la répartition du blanchissement. La superficie totale blanchie est en revanche à prendre avec précaution car dépend des seuils choisis pour la détection du blanchissement ;
-) Une comparaison entre les trois types d'images a été réalisée. Il en ressort que les images Pléiades et ULM sont les types d'images à privilégier ;
-) Enfin, pour la première fois il a été possible d'évaluer la mortalité à l'aide des images ULM sur un site pilote.

SOMMAIRE

1	Contexte et objectifs.....	8
1.1	Contexte.....	9
1.2	Objectifs.....	11
2	Les methodes mises en place pour le suivi du blanchissement	12
2.1	La caractérisation <i>in situ</i> du blanchissement : une méthode régionale et pour les territoires français	13
2.2	La cartographie par images satellites ou aéroportées.....	19
2.3	Calcul du risque de blanchissement à partir des températures marines de surfaces.....	22
3	La temperature marine de surface durant l'événement El Nino 2019	24
3.1	Situation dans le Sud-Ouest de l'océan Indien	25
3.2	La température de surface à La Réunion durant le phénomène de blanchissement	26
4	Impact du blanchissement de 2019.....	28
4.1	Etendue et intensité du phénomène.....	29
4.2	Les réponses au phénomène de blanchissement en fonction des genres coralliens	31
4.3	Mise en perspective du phénomène de blanchissement 2019 avec les phénomènes antérieurs	36
4.4	Mise en perspective du blanchissement corallien sur l'ensemble du Sud-Ouest de l'océan Indien.....	38
5	La cartographie du blanchissement	39
5.1	La cartographie du blanchissement en 2019	40
6	Synthèse et recommandations.....	62
6.1	Synthèse.....	63
6.2	Les prévisions pour 2020 et 2030-2050.....	63
6.3	Exemples de mesures permettant d'augmenter la résistance/résilience d'un récif au blanchissement corallien.....	65
6.4	Recommandations pour les prochains suivis	67
7	References.....	68
8	ANNEXE.....	

Figures

Figure 1 : Prédiction des anomalies de température (en °C) entre janvier et octobre 2019 pour le Pacifique (Nino 3.4) (données CPC/NCEP/NWS/IRICS).....	10
Figure 2 : Fiche d'alerte de CORDIO en janvier 2019.....	10
Figure 3 : Guide IFRECOR pour le suivi des épisodes de blanchissement	13
Figure 4 : Ensemble des scénarii possibles et scénario retenu (scénario 4, entouré en rouge)	14
Figure 5 : Illustration de la méthode déployée.....	15
Figure 6 : Plan d'échantillonnage vérité terrain	18
Figure 7 : Secteurs où des images drones ont été acquises (en orange).....	21
Figure 11 : Position des stations de mesure de la température (en vert station pente externe et en noir station de platier). Polygone rouge : périmètre de zone sanctuaire de la RNMR	23
Figure 12: Evolution du niveau d'alerte au blanchissement corallien du 1er décembre 2018 au 30 juin 2019 - coralreefwatch.noaa.gov.....	25
Figure 13 : DHW des sondes de platier.....	27
Figure 14 : DHW et niveau d'alerte calculés par la NOAA (à partir des données satellites) pour Tromelin et La Réunion entre 2016 et 2019	27
Figure 15 : Taux de blanchissement (et mortalité) en avril 2019 (à gauche), taux de la mortalité en juin 2019 (au centre) et perte de couverture corallienne en valeur absolue du recouvrement du substrat entre avril et juin suite au blanchissement (à droite)	30
Figure 16 : Prévalence du blanchissement (et mortalité) en avril 2019, prévalence de la mortalité en juin 2019 pour les genres coralliens dominants le peuplement pour le platier (a) et la pente externe du récif frangeant (b)	32
Figure 17 : Colonie de Millepora (à gauche) et de Sinularia (à droite) blanchies sur le platier en avril 2019... 33	33
Figure 18 : Acropora digités blanchis sur le platier de Saint-Leu en avril 2019 (à gauche) et colonie d'Acropora avec des parties mortes, blanchies et en bon état de santé en avril 2019 (à droite).....	33
Figure 19 : Pocillopora vivant (flèche jaune), Acropora digité blanchi (flèche rouge) et Acropora submassif mort (Acropora abrotanoïdes, flèche orange) en avril 2019 (à gauche) et colonies de Montipora blanchies sur la pente externe en avril 2019 (à droite).....	33
Figure 20 : Nombreuses colonies blanchies sur la pente externe en avril 2019 (à gauche) et Porites blanchi et mort (à droite) sur la pente externe en avril 2019 (à droite).....	34
Figure 21 : Colonies d'acropores branchus complètement mortes sur le platier en juin 2019 (Etang Salé, à gauche) et colonies d'acropores branchus vivantes en juin 2019 (à droite).....	34
Figure 22 : Colonies de Lobophyton mortes en avril 2019 (à droite) et Stylophora fluorescent sur le platier en avril 2019 (à droite).....	34
Figure 23 : Colonies d'Acropora submassifs (Acropora abrotanoïdes) morte (flèche jaune) et vivante (flèche rouge) sur la pente externe en juin 2019 (à gauche) et colonies d'Acropora submassifs (Acropora abrotanoïdes) et Acropora branchus vivantes en juin 2019 (à droite).....	35
Figure 24 : Colonies d'Astreopora vivantes sur la pente externe en avril 2019 (à gauche) et Acropora digités morts en juin 2019 sur la pente externe (à droite)	35
Figure 25 : Observations du blanchissement dans le Sud-Ouest de l'océan indien durant la saison chaude 2018/2019 (données CORDIO).....	38
Figure 26 : Altération (blanchissement) au 14 avril 2019 sur le platier du récif de Saint-Gilles	41

Figure 27 : Altération (blanchissement) au 18 avril 2019 sur le platier du récif de Saint-Leu et le 14 avril sur le récif d'Etang Salé.....	42
Figure 28 : Altération (blanchissement) au 18 avril 2019 sur le récif d'Etang Salé.....	43
Figure 29 : Altération (blanchissement) au 18 avril 2019 sur le récif de Saint-Pierre	44
Figure 30 : Blanchissement en 2016 et 2019 sur le récif de Saint Gilles	45
Figure 31 : Blanchissement en 2016 et 2019 sur le récif de Saint-Leu.....	46
Figure 32 : Blanchissement en 2016 et 2019 sur les récifs d'Etang Salé et de Saint-Pierre	47
Figure 33 : Suivi de l'indice de brillance sur 5 mesures ponctuelles du secteur de Saint-Leu, 3 points coralliens subissant du blanchissement (saleXX), un point sable immergé (s01) et le parking émergé de la Ravine Blanche.....	49
Figure 34 : Suivi de l'indice de brillance sur les 3 plateformes récifales de Saint-Gilles, l'Etang-Salé et Saint-Pierre	49
Figure 35 : Illustration des différences de résolution spatiale entre les images drone (a) et ULM (b) d'un côté et les images Pléiades (c) de l'autre côté.....	52
Figure 36 : Illustration de la proximité de la signature spectrale des colonies blanchies (flèche bleue) et du substrat sableux (flèche rouge).....	52
Figure 37 : Illustration du "wave focusing" (reflet blanc réticulé sur le sable, flèche rouge) et de la proximité spectrale avec les colonies blanchies (flèche bleue).....	53
Figure 38 : Carte du blanchissement (en rouge) sur la zone de La Varangue (Saint-Leu) à partir de l'image pléiades (a) de l'image ULM (b) et de l'image drone (c) où l'on voit clairement une surestimation du blanchissement car prise en compte du wave focusing.....	54
Figure 39 : Carte du blanchissement (en rouge) sur la zone Saint-Leu à partir de l'image pléiades (a) et de l'image ULM (b). Vu la petite taille des polygones sur l'image ULM, la plupart ne sont pas visible à cette échelle.....	55
Figure 40 : Exemple de cartographie du blanchissement (hachuré en rouge) réalisée à partir de l'image ULM (à gauche) et de l'image Pléiades (à droite).....	56
Figure 41 : Cartographie du blanchissement réalisée à partir de l'image Pléiades avec à gauche trois niveaux d'intensité du blanchissement (jaune : faible, orange : moyen, rouge : élevé) et à droite uniquement les niveaux moyen et élevé, les plus représentatifs de la "réalité terrain".....	56
Figure 42 : Plan d'échantillonnage et résultats de la vérité terrain de septembre 2019.....	59
Figure 43 : Illustration des signatures spectrales proches entre les coraux vivants (flèches bleues), des coraux morts (flèches rouges) et le substrat détritiques (flèches orange).....	60
Figure 44 : Coraux morts et vivants en septembre 2019 après avoir blanchi en avril 2019 sur la zone de La Varangue)	61
Figure 45 : Prédiction du risque de blanchissement à La Réunion/Tromelin entre le 14 janvier et le 14 avril (NOAA/Coralreefwatch)	64
Figure 46 : Prédiction (en pourcentage) du risque de blanchissement annuel par décade en 2030 (en haut) et 2050 (en bas) où l'alerte de niveau 2 sera déclenchée dans le cadre du suivi NOAA Coral Reef Watch. Scénario IPCC : A1B ("Business as-usual"). D'après Reef at Risk, 2011 / Donner et al., 2009.....	64

Tableaux

<i>Tableau 1 : Choix du scénario à mettre en place en fonction de l'intensité du blanchissement (d'après Nicet et al., 2019).....</i>	14
<i>Tableau 2 : Nombre de stations échantillonnées</i>	16
<i>Tableau 3 : Stations échantillonnées</i>	17
<i>Tableau 4 : Liste des images acquises (en gras) et des images refusées (en normal).....</i>	20
<i>Tableau 5 : Synthèse des données de température disponibles (en gras les stations avec une série temporelle complète).....</i>	22
<i>Tableau 6 : Risque de blanchissement calculé à partir des sondes in situ et des données NOAA en 2016 et 2019</i>	26
<i>Tableau 7 : Taux de blanchissement (blancs + pâles) en avril (a) et de mortalité en juin (b) des coraux durs (moyenne pondérée par la couverture corallienne).....</i>	29
<i>Tableau 8 : Taux de blanchissement (blancs + pâles) en avril (a) et de mortalité en juin (b) des coraux mous (moyenne pondérée par la couverture corallienne).....</i>	29
<i>Tableau 9 : Superficie corallienne blanchie sur la zone de La Varangue obtenues à partir des différentes images/méthodes.....</i>	51
<i>Tableau 10 : Avantages et inconvénients des différents types d'image utilisées et méthodes employées pour la cartographie du blanchissement</i>	57
<i>Tableau 11 : Raisons d'impliquer les différents usagers et mesures de gestion pouvant être mis en place avec les différents acteurs (d'après Obura et Gudka, 2016).....</i>	66

Abréviations

AMP _____ Aires Marines Protégées	IRD _____ Institut de Recherche et de Développement
COI _____ Commission de l'Océan Indien	NESDIS _____ National Environment Data Information System
CORDIO _____ Coastal Ocean Research and Development Indian Ocean	NOAA _____ National Oceanographic and Atmospheric Administration
DCE _____ Directive Cadre sur l'Eau	SEAS-OI _____ Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite – Océan Indien
DHW _____ Degree Hot Week	
GCRMN _____ Global Coral Reef Monitoring Network	
ENSO _____ El Nino Southern Oscillation	
ICRI _____ International Coral Reef Initiative	



1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 Contexte

1.1.1 L'alerte blanchissement en 2018/2019

Les différents indicateurs pertinents pour prédire un risque de blanchissement corallien, tel que le Degree Hot Week¹ (DHW, Coral Reef Watch/NOAA), le ENSO Diagnostic² (Climate Prediction Center/NOAA) étaient tous au rouge pour la saison chaude 2018/2019 dans l'Indo-Pacifique (Figure 1). Suite à ces alertes, relayées d'ailleurs par de nombreux acteurs (notamment CORDIO pour l'océan Indien³, Figure 2), il a été décidé de rentrer en phase d'alerte à l'échelle régionale au niveau des territoires français (Mayotte et La Réunion),

La préparation des suivis a été réalisée selon la méthode décrite dans le guide IFRECOR pour le suivi du blanchissement (Nicet et al., 2019). Les différents acteurs ont donc saisi l'importance et l'urgence de la situation pour mettre en place très rapidement des suivis en cas de blanchissement, que ce soit d'un point de vue technique ou administratif.

1.1.2 Les suivis participatifs et la remontée d'information

Etant donnée la forte intensité pressentie du phénomène de blanchissement en 2018/2019 pour l'IndoPacifique et notamment dans le Sud-Ouest de l'océan Indien, la RNMR a activé son réseau pour synthétiser les observations de terrain par les usagers (scientifiques, club de plongées, autres).

Au niveau régional, CORDIO répertorie depuis plusieurs années déjà les observations de blanchissement corallien de la région Sud-Ouest de l'océan Indien.

¹ <http://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/index.php>

² http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/

³ http://cordioea.net/bleaching_resilience/io-coral-bleaching-alert/

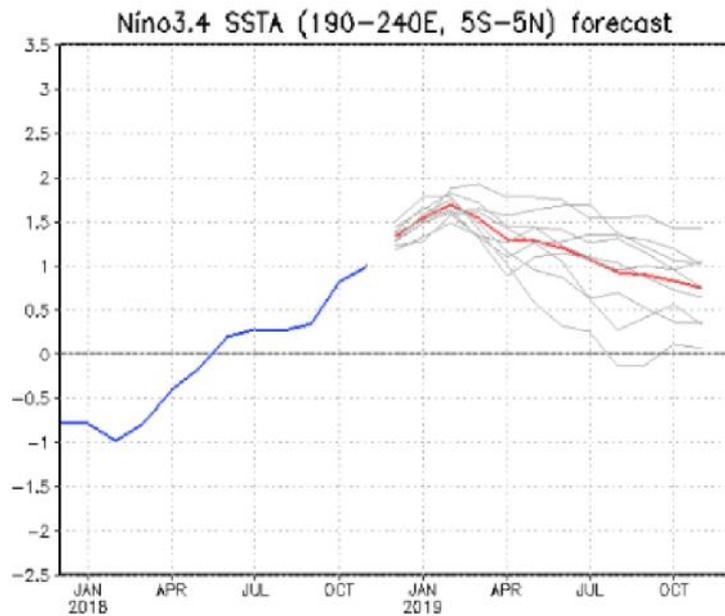


Figure 1 : Pr evision des anomalies de température (en  C) entre janvier et octobre 2019 pour le Pacifique (Nino 3.4) (données CPC/NCEP/NWS/IRICS)

WESTERN INDIAN OCEAN – Regional coral bleaching alert

DATE OF THIS ALERT: 07 January 2019

<http://www.cordioea.net/bleachingalert/>
Contact: bleaching@cordioea.net

Area	Region	Alert	Bleaching observations
S Moz/S Africa	Cool, south (D1)	warning	
SWO/E Madagascar	Cool, south (D2)	moderate	
SW Madagascar	Hot, south (A1)	moderate	
South Equat Curr	Moderate, central (C)	moderate	
East Moz Cha/Comoros	Hot, central (A2)	moderate	
East Moz Cha/C Tanz	Warm, central (B)	moderate	
NW Seychelles	Hot, north (A3)	moderate	
Kenya-Somalia	Variable, north (E)	moderate	

Indications are for a reasonably hot 2019 bleaching season in the Western Indian Ocean, with moderate to high bleaching expected, and first occurrence of bleaching around Madagascar. All monitoring programs, conservation areas and groups invested in coral reefs should initiate early observations to determine the first onset of bleaching in their area and report to the links below.

Report all bleaching (and non-bleaching) observations at the link above, or <https://goo.gl/forms/iP3Ke9cch3VM8403>

Global & Regional Indicators

2018 was relatively cool, compared to 2015-2017, which were among the hottest years ever recorded. The decadal predictions by the UK Met Dept, indicate a cool cycle for 2018-19 (see figure) and warmer temperatures from 2020 compared to 2015-17. This prediction will be updated in late January 2019.

A new forecasting approach (<http://www2.cnr.fr/en/3148.htm>) has predicted high temperature anomalies for SST globally from 2018-2022, and given the cool temperatures in 2018 and existence of reasonably strong El Niño currently, this suggests temperatures for 2020-22 may be extremely high, potentially for 2019 as well.

NOAA Products – 4 January 2019

SST Anomaly **Virtual stations** **Season outlook (Jan-Apr 2019)**

At the beginning of January, temperatures across the entire WIO are over 1 C warmer than usual for the same time period, and all except NOAA's southern-most virtual stations (South Africa) are on bleaching watch status, with 4 on bleaching warning. The seasonal outlook predicts moderate bleaching across the region with greater than 60% probability.

Expectation for 2019 - Indications are for a reasonably hot 2019 bleaching season in the Western Indian Ocean, with moderate to high bleaching expected.

Bleaching observations – Jan 2019 - Bleaching observations were made in Tanga in November/December 2018 (by S. Riedmiller) and Chole Bay, Mafia Island, that likely correspond with warming conditions at the end of the southeast monsoon, but not indicative of 2019 seasonal bleaching, apart from perhaps being due to high background temperatures going into 2019.

Indian Ocean Dipole (DMI)

ENSO index (3.4)

Cyclones

Cyclone Cilida traversed the banks area and east of Mauritius from 20-24 December 2018.



Figure 2 : Fiche d'alerte de CORDIO en janvier 2019

1.2 Objectifs

L'objectif principal du présent projet est de quantifier le blanchissement corallien massif de 2019 et la mortalité associée à La Réunion.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

-) Acquérir et analyser des images satellites, ULM et drones pour pouvoir quantifier l'intensité spatiale du phénomène ;
-) Procéder à une vérité terrain au paroxysme du phénomène pour (i) augmenter la précision des cartes obtenues et (ii) quantifier les principaux genres et formes coralliennes touchés (prévalence et étendue spatiale) ;
-) Procéder à une vérité terrain en juin soit à la fin de l'épisode de blanchissement, pour quantifier la mortalité associée au phénomène par formes et genres coralliens (prévalence et superficie),
-) Réaliser des cartes sur l'étendue spatiale du blanchissement et comparer les avantages et inconvénients de chaque type d'image et méthode,
-) Essayer de quantifier par image ULM la mortalité suite au blanchissement de 2019 sur une zone test.



2 LES METHODES MISES EN PLACE POUR LE SUIVI DU BLANCHISSEMENT

2.1 La caractérisation *in situ* du blanchissement : une méthode régionale et pour les territoires français

2.1.1 La méthode

La méthode utilisée est celle décrite dans le "Guide à l'attention des gestionnaires des Outre-mer Français pour le suivi environnemental des épisodes de blanchissement corallien et l'évaluation de leurs impacts sur le peuplement corallien" (Nicet *et al.*, 2019) (Figure 3). Pour plus de précision, se référer à ce guide méthodologique.

En fonction des retours des observations de blanchissement sur le terrain le scénario 4 a été retenu (Tableau 1) : suivi semi quantitatif sur les stations historiques (GCRMN+DCE) et les stations complémentaires (Figure 4).

Le suivi a été réalisé selon deux niveaux :

-) Le niveau basique, avec une estimation de la part des colonies en bon état de santé, pâles/blanchies et mortes. Les moyennes par secteur ou type géomorphologique, ont été pondérées par la couverture corallienne de chaque station ;
-) Le niveau intermédiaire, avec une estimation de la prévalence par genre⁴ des colonies en bon état de santé,

pâles, blanchies et mortes. Les moyennes de prévalence par secteur ou type géomorphologique ont été pondérées par la couverture corallienne de chaque station ;

Au final la méthode déployée permet de caractériser :

-) L'intensité du blanchissement ;
-) L'étendue spatiale du blanchissement ;
-) Les principaux genres touchés ;
-) La mortalité induite.

En outre elle a servi de vérité terrain (phase d'apprentissage) pour la réalisation des cartes.

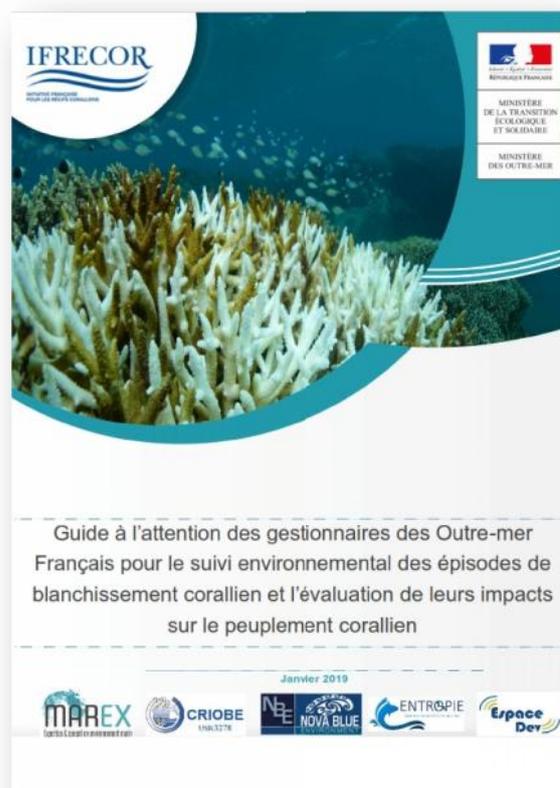
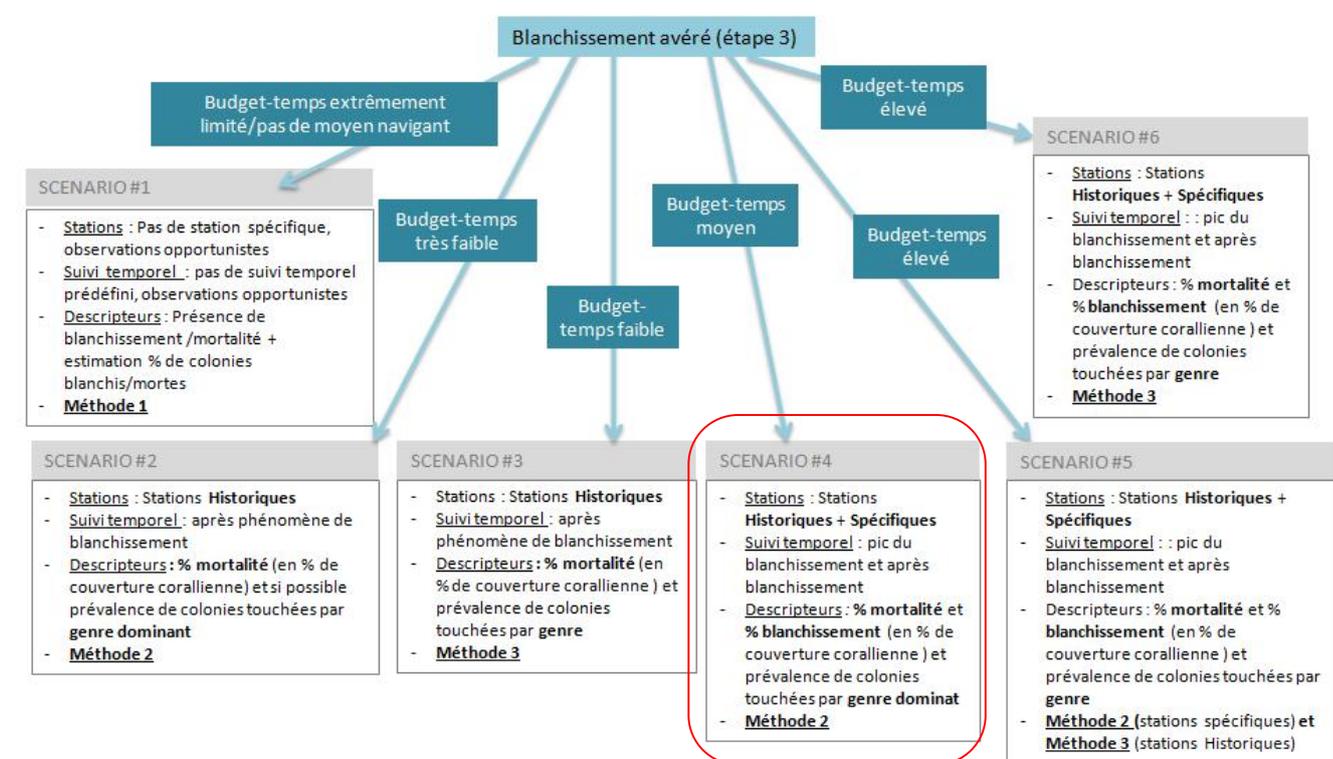


Figure 3 : Guide IFRECOR pour le suivi des épisodes de blanchissement

⁴ Uniquement pour les genres dominants.

Tableau 1 : Choix du scénario à mettre en place en fonction de l'intensité du blanchissement (d'après Nicet et al., 2019)

Intensité du blanchissement (% couverture corallienne ou prévalence) et localisation	Réalisation de l'étape 4 : Suivi du blanchissement
<10%	Scénario 1
Entre 10% et 50% sur quelques secteurs	Scénario 2 ou 3 avec possibilité de mettre en place scénario 4 sur les secteurs touchés
Entre 10% et 50% sur de nombreux secteurs	Scénario 4 ou 5
>50% sur de nombreux secteurs	Scénario 4 ou 5 (ou 6 pour NC et PF)



Rappel des méthodes et descripteurs associés:

Méthode #1: « Collectes opportunistes » (% couverture blanche/morte)
 Méthode #2: « Estimation visuelle » (% couverture corallienne blanchie/morte + prévalence colonies blanchies/mortes par genre dominant)
 Méthode #3: « Photo-quadrat » (% couverture corallienne blanchie/morte + prévalence colonies blanchies/mortes par genre)

Variante possible pour chaque scénario:

Variante #1: pas de moyens navigants ou accès limité, limitations aux stations localisées en frangeant
 Variante #2: Ajout de survol aérien
 Variante #3: Ajout de traitements d'images satellites

Figure 4 : Ensemble des scénarii possibles et scénario retenu (scénario 4, entouré en rouge)



Figure 5 : Illustration de la méthode déployée

2.1.2 Le plan d'échantillonnage

Le suivi réalisé en avril et en juin/juillet 2019 a permis de quantifier le blanchissement à son pic et la mortalité qui a suivi.

Ce suivi a été réalisé en apnée et en palmes-masque-tuba par un binôme. Ce moyen d'investigation a été préféré aux plongées en scaphandre autonome pour sa simplicité de mise en œuvre et le nombre important de stations qu'il permet d'échantillonner en une

journee. Ainsi, en moyenne, entre 10 et 15 stations ont été échantillonnées par jour.

Au total, 67 stations ont été échantillonnées dont 32 sur la pente externe et 35 sur le platier (Tableau 2, Tableau 3, Figure 6).

Le plan d'échantillonnage a été repris du guide IFRECOR, il inclut notamment les stations GCRMN/RNMR et les stations complémentaires DCE.

Tableau 2 : Nombre de stations échantillonnées

Type géomorphologique	Saint Gilles	Saint Leu	Etang Salé	Saint Pierre	TOTAL
Pente externe	13	9	3	7	32
Platier	15	8	5	7	35
TOTAL	28	17	8	14	67

Tableau 3 : Stations échantillonnées

Secteur	Geomorphologie	Station	Longitude	Latitude	Date campagne avril 2019	Date campagne juin 2019
Etang Salé	Pente externe	BL1	55,330100	-21,272730	05-mai	25-juin
Etang Salé	Pente externe	DCE Etang salé	55,327500	-21,264100	05-mai	25-juin
Etang Salé	Pente externe	Etang salé pente externe	55,328280	-21,268780	05-mai	25-juin
Etang Salé	Platier	BL2	55,332260	-21,270910	28-avr	14-juin
Etang Salé	Platier	BL4	55,332200	-21,266950	28-avr	14-juin
Etang Salé	Platier	BL53	55,332485	-21,271112	28-avr	14-juin
Etang Salé	Platier	BL54	55,332198	-21,268628	28-avr	14-juin
Etang Salé	Platier	Etang salé platier	55,332920	-21,269510	28-avr	14-juin
Saint Gilles	Pente externe	3 Chameaux pente externe	55,217010	-21,081260	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL11	55,221458	-21,029875	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL12	55,216410	-21,072770	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL46	55,244028	-21,108391	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL47	55,219050	-21,050550	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL5	55,235520	-21,103140	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL52	55,219582	-21,057209	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL6	55,226460	-21,095300	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL7	55,222649	-21,089265	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	BL8	55,216931	-21,060617	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	DCE Aigrettes	55,213700	-21,039600	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	DCE Souris chaude	55,258300	-21,125300	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Pente externe	Planch alizes pente externe	55,229690	-21,099000	04-mai	26-juin
Saint Gilles	Platier	3 Chameaux platier	55,221340	-21,081540	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL13	55,248470	-21,107260	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL14	55,219950	-21,078500	27-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL15	55,219520	-21,071290	27-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL16	55,221300	-21,060770	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL17	55,237750	-21,098990	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL19	55,228820	-21,091730	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL20	55,226670	-21,087300	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL21	55,241513	-21,101542	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL22	55,224782	-21,083926	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL23	55,219651	-21,074436	27-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL57	55,234387	-21,098340	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL58	55,218878	-21,047339	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	BL59	55,233107	-21,096071	26-avr	17-juin
Saint Gilles	Platier	Planch alizes platier	55,232770	-21,096350	26-avr	17-juin
Saint Leu	Pente externe	BL33	55,277440	-21,154380	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	BL35	55,282830	-21,170430	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	BL36	55,284270	-21,177060	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	BL37	55,284760	-21,160920	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	DCE Gendarmerie	55,283600	-21,181700	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	DCE Kelonia	55,272700	-21,152600	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	DCE Marine	55,279400	-21,199800	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	La Corne pente externe	55,282610	-21,164040	04-mai	26-juin
Saint Leu	Pente externe	La Varangue pente externe	55,282490	-21,173550	04-mai	26-juin
Saint Leu	Platier	BL38	55,286070	-21,177230	25-avr	14-juin
Saint Leu	Platier	BL39	55,285810	-21,180630	25-avr	14-juin
Saint Leu	Platier	BL40	55,278480	-21,152860	25-avr	14-juin
Saint Leu	Platier	BL41	55,275360	-21,151010	25-avr	14-juin
Saint Leu	Platier	BL49	55,283190	-21,156470	25-avr	14-juin
Saint Leu	Platier	BL55	55,285265	-21,165877	25-avr	14-juin
Saint Leu	Platier	La Corne platier	55,284740	-21,165720	25-avr	14-juin
Saint Leu	Platier	La Varangue platier	55,285790	-21,173389	25-avr	14-juin
Saint Pierre	Pente externe	Alizes plage pente externe	55,471028	-21,348555	05-mai	25-juin
Saint Pierre	Pente externe	BL42	55,462380	-21,345430	05-mai	25-juin
Saint Pierre	Pente externe	BL43	55,455470	-21,341820	05-mai	25-juin
Saint Pierre	Pente externe	BL50	55,479859	-21,349815	05-mai	25-juin
Saint Pierre	Pente externe	BL51	55,466654	-21,347607	05-mai	25-juin
Saint Pierre	Pente externe	DCE Terre Sainte	55,481400	-21,352200	05-mai	25-juin
Saint Pierre	Pente externe	Ravine Blanche pente externe	55,461160	-21,342550	05-mai	25-juin
Saint Pierre	Platier	Alizes plage platier	55,472330	-21,345580	28-avr	24-juin
Saint Pierre	Platier	BL27	55,481044	-21,348513	28-avr	24-juin
Saint Pierre	Platier	BL30	55,466400	-21,344790	28-avr	24-juin
Saint Pierre	Platier	BL31	55,458530	-21,340800	28-avr	24-juin
Saint Pierre	Platier	BL32	55,465641	-21,343110	28-avr	24-juin
Saint Pierre	Platier	BL56	55,469232	-21,345006	28-avr	24-juin
Saint Pierre	Platier	Ravine Blanche platier	55,462563	-21,346910	28-avr	24-juin

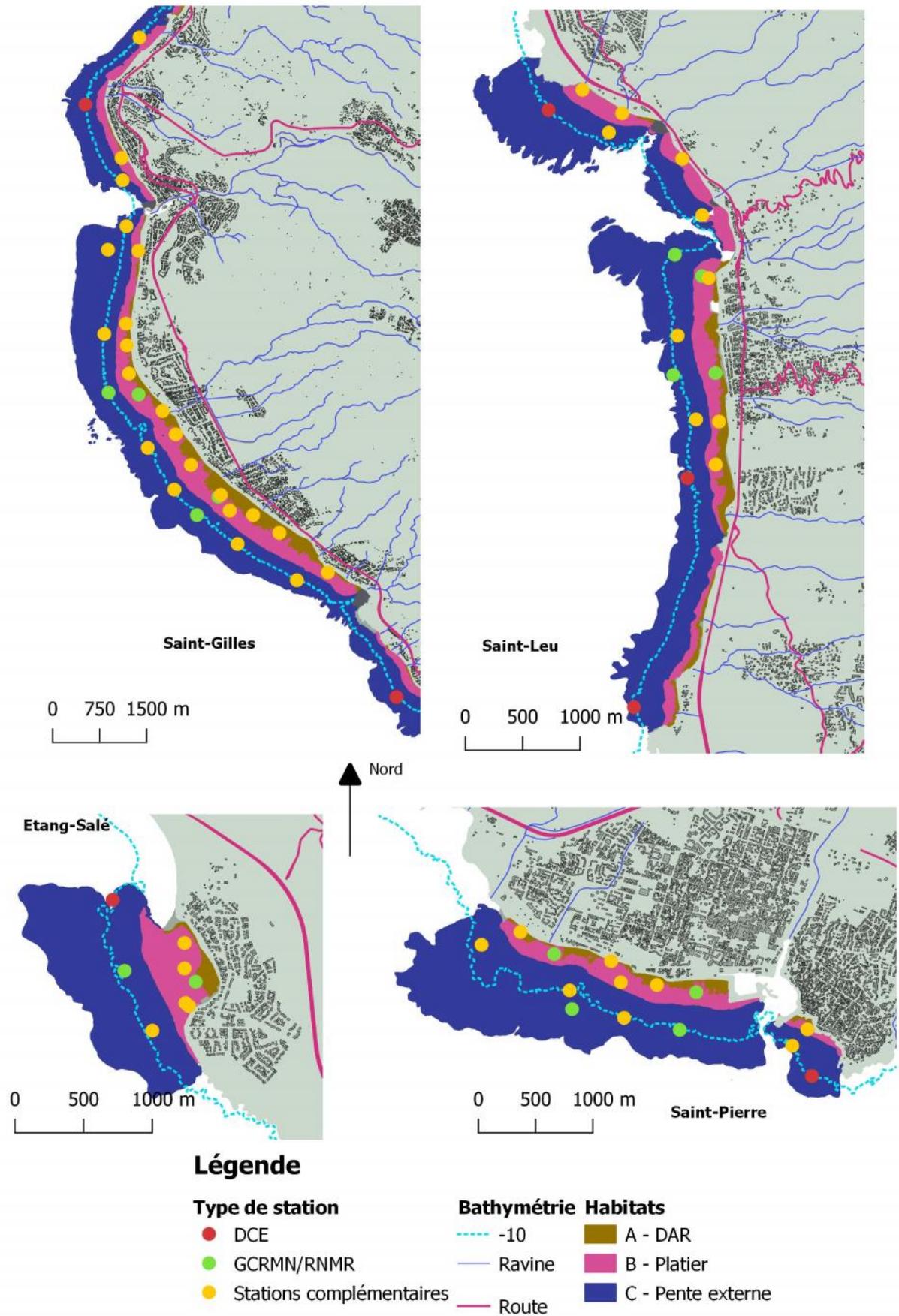


Figure 6 : Plan d'échantillonnage vérité terrain

2.2 La cartographie par images satellites ou aéroportées

2.2.1 La possibilité de cartographier le blanchissement

La faisabilité de cartographie du blanchissement par images satellites ou aéroportées dépend de la combinaison de 4 principaux facteurs :

-) La couverture corallienne ;
-) La proportion de colonies coralliennes blanchies ;
-) L'atténuation du signal par la colonne d'eau (profondeur et turbidité) ;
-) La résolution spatiale de l'image (taille du pixel).

Ainsi, pour que le blanchissement puisse être facilement détecté, il faut que la couverture corallienne soit importante, la profondeur faible et le blanchissement conséquent pour qu'il impacte la réponse à l'échelle du pixel.

En effet, si le blanchissement est trop éparpillé, il reste cantonné à des colonies isolées, la résolution des images devra être très élevée (0.1m) pour détecter cette altération du corail. D'autre part, comme énoncé ci-dessus, la signature spectrale est fortement corrélée à une couverture corallienne, ainsi qu'à l'intensité du phénomène observé et ne peut être assimilée à une prévalence de colonies touchées mais plutôt à un pourcentage de surface du substrat total touché. Ainsi, une carte de blanchissement contribuera à spatialiser le phénomène de blanchissement, mais la mesure de l'intensité du blanchissement et de ses

caractéristiques impose de réaliser des observations *in-situ*.

2.2.2 L'acquisition des images

Trois types d'images ont été utilisées :

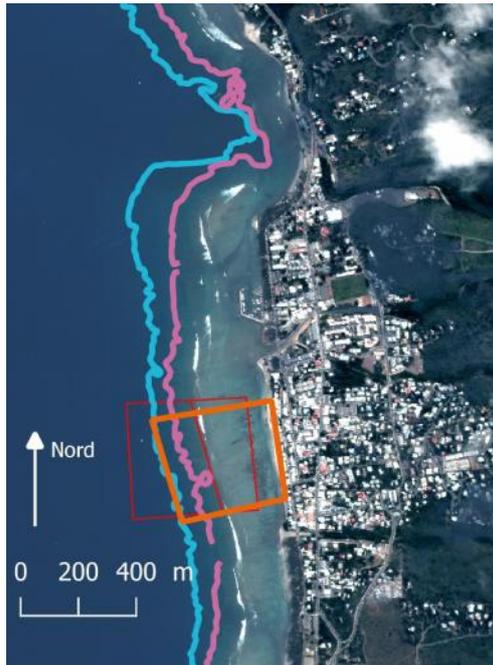
-) Des images satellites Pléiades : (résolutions spatiales 0.5m (PAN)/2m (XS)) et Sentinel 2 : (résolution spatiale 10m). Elles concernent l'ensemble des récifs frangeants de La Réunion ;
-) Des ortho-photographies géoréférencées prises par ULM (PIMANT) (résolution spatiale : 0.1m) sur l'ensemble des récifs frangeants de La Réunion ;
-) Des ortho-photographies géoréférencées (géoréférencement Espace-Dev) prises par drone (Ocean Obs) d'une résolution spatiale de 0.05m. Elles concernent une zone sur chacun des 4 secteurs (Saint-Gilles, Saint-Leu, Etang Salé et Saint Pierre, Figure 7).

Le Tableau 4 présente la base de données images satellites constituée dans le cadre du projet. Ces images ont été programmées spécifiquement pour cette étude, en mobilisant Seas-OI, Kalideos et Ocean'Obs sur un intervalle de temps allant du 09 mai 2018 (image pré-blanchissement) jusqu'au 25 septembre 2019 (image post blanchissement).

La description de la méthode figure en annexe 1

Tableau 4 : Liste des images acquises (en gras) et des images refusées (en normal)

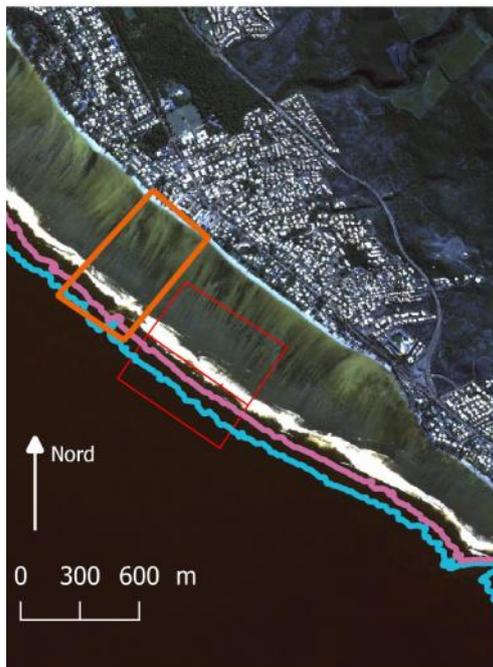
Dates	Temporalité	Zones	Type d'image originale	Traitements disponible	Traitement utilisé
24/04/2019	Pic de blanchissement	La Saline	49 photographies drone DJI	Orthomosaïque 5cm	Aucun
24/04/2019	Pic de blanchissement	St Leu	28 photographies drone DJI	Orthomosaïque 5cm	Aucun
19/04/2019	Pic de blanchissement	St Pierre	16 photographies drone DJI	Orthomosaïque 5cm	Aucun
19/04/2019	Pic de blanchissement	Etang Salé	29 photographies drone DJI	Orthomosaïque 5cm	Aucun
24/04/2019	Pic de blanchissement	St Pierre	ULM PIMANT	Orthomosaïque PIMANT 10cm	Aucun
19/04/2019	Pic de blanchissement	Etang Salé	ULM PIMANT	Orthomosaïque PIMANT 10cm	Aucun
19/04/2019	Pic de blanchissement	St Leu	ULM PIMANT	Orthomosaïque PIMANT 10cm	Aucun
17/04/2019	Pic de blanchissement	La Saline	ULM PIMANT	Orthomosaïque PIMANT 10cm	Aucun
25/09/2019	Post blanchissement	St Leu	ULM PIMANT	Orthomosaïque PIMANT 10cm	Aucun
jan 2019 - juin 2019	Pré, pic et post blanchissement	La Saline St Leu Etang Salé St Pierre	Sentinel 2 A/B L2A	Réunion entière L2A 10,20,60m	Aucun
09/05/2018	Pré blanchissement	St Pierre	Pléiades 1B PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
15/05/2018	Pré blanchissement	St Gilles - La Saline	Pléiades 1A PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
28/05/2018	Pré blanchissement	St Leu - Etang Sale	Pléiades 1B PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
30/05/2017	Pré blanchissement	St Leu - Etang Sale	Pléiades 1A PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
22/05/2017	Pré blanchissement	St Gilles - La Saline	Pléiades 1B PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
24/06/2016	Pré blanchissement	La Saline St Leu Etang Salé	Pléiades 1A PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
26/06/2016	Pré blanchissement	St Pierre	Pléiades 1A PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
18/04/2019	Pic de blanchissement	La Saline St Leu Etang Salé	Pléiades 1A PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
18/04/2019	Pic de blanchissement	St Pierre	Pléiades 1A PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
15/06/2019	Post blanchissement	La Saline St Leu Etang Salé	Pléiades 1B PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m
16/06/2019	Post blanchissement	St Pierre	Pléiades 1A PAN et XS ortho TOA	Pansharpening XS/PAN 0.5m	Recalibration sur un invariant XS 2m



Saint-Leu



Etang Salé



Saint-Gilles



Saint-Pierre

Légende

- Survol drone
- Bathymétrie -10
- Delimitation RNMR -5
- Protection intégrale

Figure 7 : Secteurs où des images drones ont été acquises (en orange)

2.3 Calcul du risque de blanchissement à partir des températures marines de surface

Deux types de données sont disponibles à La Réunion : la température mesurée par satellite (NOAA) et la température mesurée *in situ* et en continu par la RNMR (Figure 8 et Tableau 5).

Tableau 5 : Synthèse des données de température disponibles (en gras les stations avec une série temporelle complète)

Station	Date de début des mesures	Date de fin des mesures
Saint-Gilles platier	20/05/2015	28/07/2016
Saint-Leu platier	20/05/2015	31/05/2019
Etang-Salé platier	06/06/2015	31/05/2019
Saint-Pierre platier	06/06/2015	31/05/2019
Saint-Gilles pente externe	10/10/2015	24/05/2019
Saint-Leu pente externe	10/10/2015	24/05/2019
Etang-Salé pente externe	10/10/2015	07/12/2016
Saint-Pierre pente externe	01/06/2015	21/12/2015

Calcul du Degree Heating Week

La méthode « Degree Heating Week » (DHW) (Strong et *al.*, 1997, (Liu et *al.*, 2003, Liu et *al.*, 2005) ainsi que les DHW sont accessibles sur le site de la NOAA à l'adresse suivante : <https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/index.php>

Cette méthode se base sur la quantification de l'accumulation d'anomalies positives de la température (Strong et *al.*, 1997).

Calcul de l'anomalie de température (HotSpot) :

L'anomalie de température est la différence entre la température critique (température mensuelle la plus élevée de l'année type) et la température mesurée.

Calcul du DHW :

Le DHW est l'accumulation des anomalies positives de température sur une période de 12 semaines. Il s'exprime en °C/semaine. Le DHW est initialisé lorsque l'anomalie de température est supérieure ou égale à 1 °C.

Le niveau d'alerte au blanchissement

Plusieurs niveaux d'alerte sont émis par la NOAA en fonction des anomalies positives de température et des valeurs de DHW.

La description détaillée de la méthode figure dans le rapport "Suivi de la température marine 2015-2019 sur les platiers et pentes externes des récifs frangeants de La Réunion"



Photographie : Système d'attache autour d'un corail mort (à gauche) et d'une filière des bouées de délimitation de la RNMR (à droite)

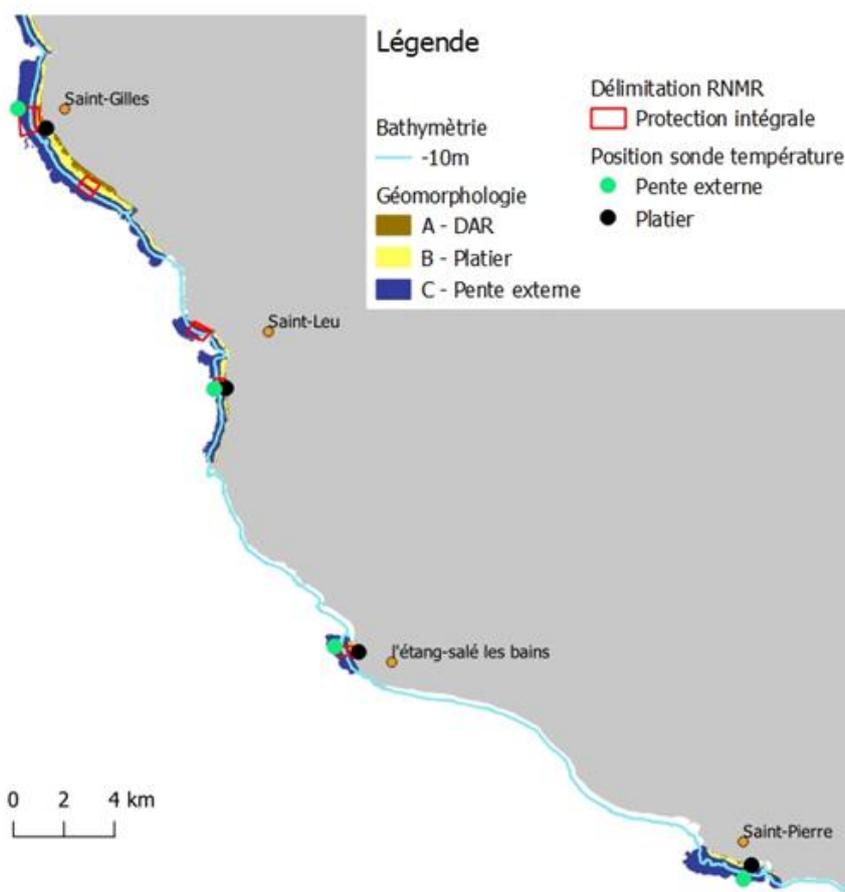


Figure 8 : Position des stations de mesure de la température (en vert station pente externe et en noir station de platier). Polygone rouge : périmètre de zone sanctuaire de la RNMR



3 LA TEMPERATURE MARINE DE SURFACE DURANT L'ÉVENEMENT EL NINO 2019

3.1 Situation dans le Sud-Ouest de l’océan Indien

Les données de température sur le bassin du Sud-Ouest de l’océan Indien montrent (Figure 9, NOAA/ Coral Reef watch) :

-)] Un risque de blanchissement à partir de janvier 2019 (situation « Watch et Warning ») ;
-)] Un risque de blanchissement maximum dans la zone des Mascareignes et plus faible ailleurs (notamment dans le canal du Mozambique).

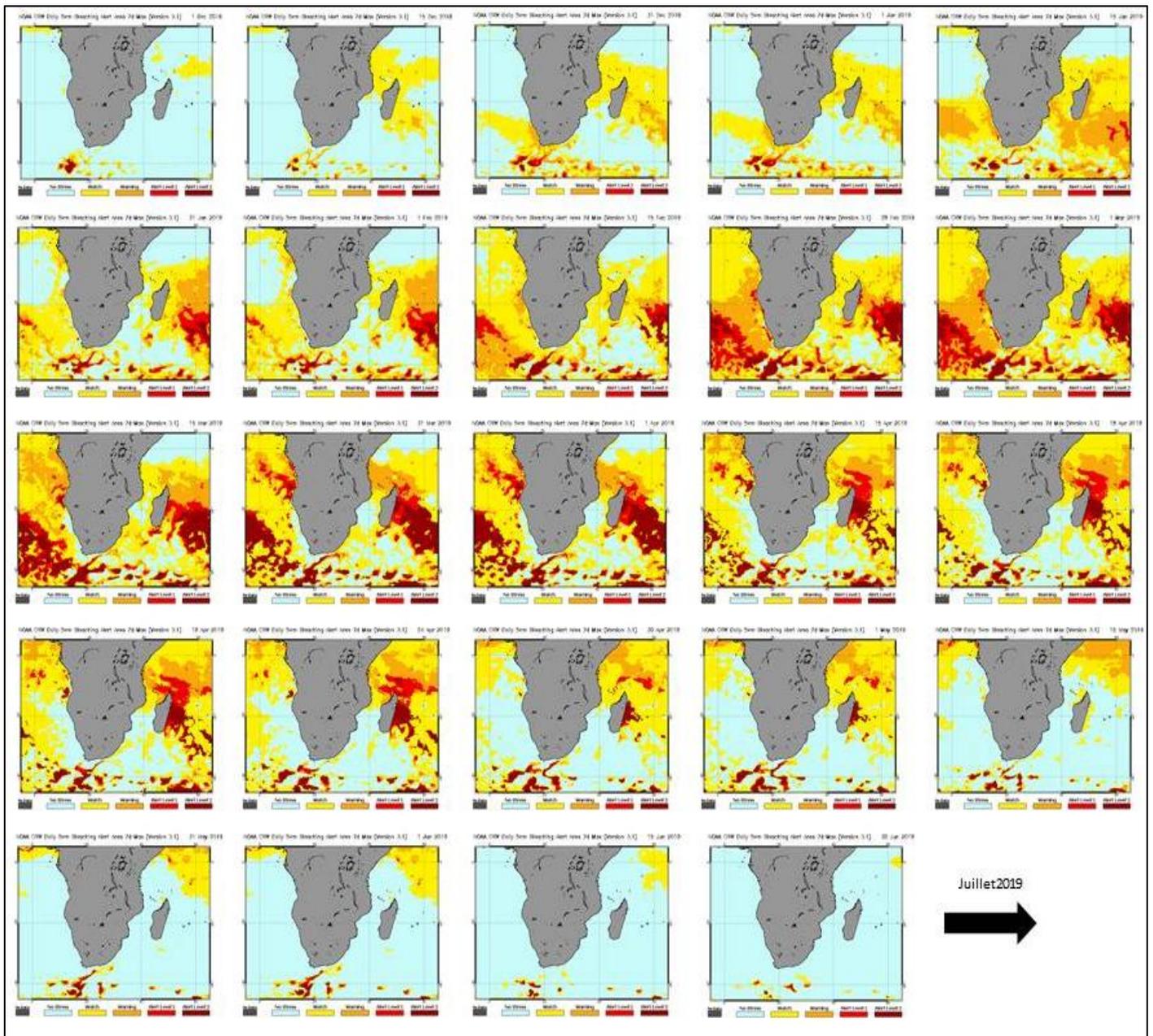


Figure 9: Evolution du niveau d’alerte au blanchissement corallien du 1er décembre 2018 au 30 juin 2019 - coralreefwatch.noaa.gov

3.2 La température de surface à La Réunion durant le phénomène de blanchissement

L'analyse des sondes *in situ* et des données satellites permet de dresser le constat suivant (Tableau 6, Figure 10 et Figure 11) :

-) Le risque de blanchissement à été maximum en 2016 et 2019 avec un DHW maximum en avril 2019

(compris entre 6 et 11 sur les stations platier) ;

-) Un DHW plus élevé pour les sondes platier en 2019 qu'en 2016 (DHW compris entre 4 et 10 en 2016) ;
-) Un DHW maximum (=15) en 2019 calculé à partir des données de la NOAA qui existent depuis 1985.

Remarque :

alerte niveau 1 : $4 < \text{DHW} < 8$

alerte niveau 2 (maximum) : $\text{DHW} > 8$

Tableau 6 : Risque de blanchissement calculé à partir des sondes *in situ* et des données NOAA en 2016 et 2019

Année	Station	Données sonde <i>in situ</i>	Données NOAA
2016	Saint-Gilles platier	Alert level 2	Alert level 2
	Saint-Leu platier	Alert level 1	
	Etang Salé platier	Alert level 1	
	Saint-Pierre platier	Alert level 1	
	Saint-Gilles pente externe	Alert level 1	
	Saint-Leu pente externe	Alert level 1	
	Etang Salé pente externe	Alert level 1	
2019	Saint-Gilles platier	ND	Alert level 2
	Saint-Leu platier	Alert level 2	
	Etang Salé platier	Alert level 2	
	Saint-Pierre platier	Alert level 1	
	Saint-Gilles pente externe	Alert level 1	
	Saint-Leu pente externe	Alert level 1	
	Etang Salé pente externe	ND	

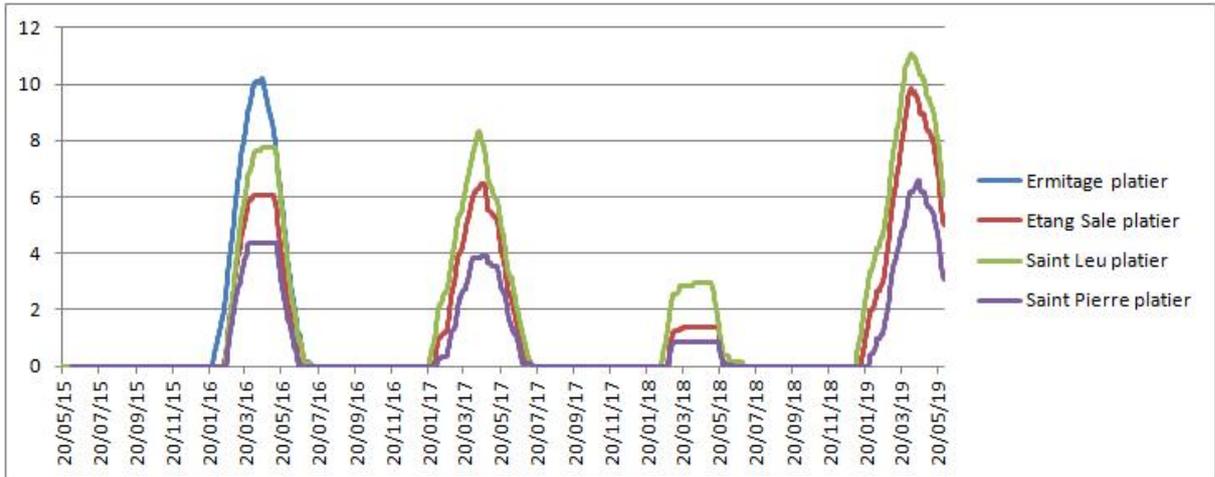


Figure 10 : DHW des sondes de platier

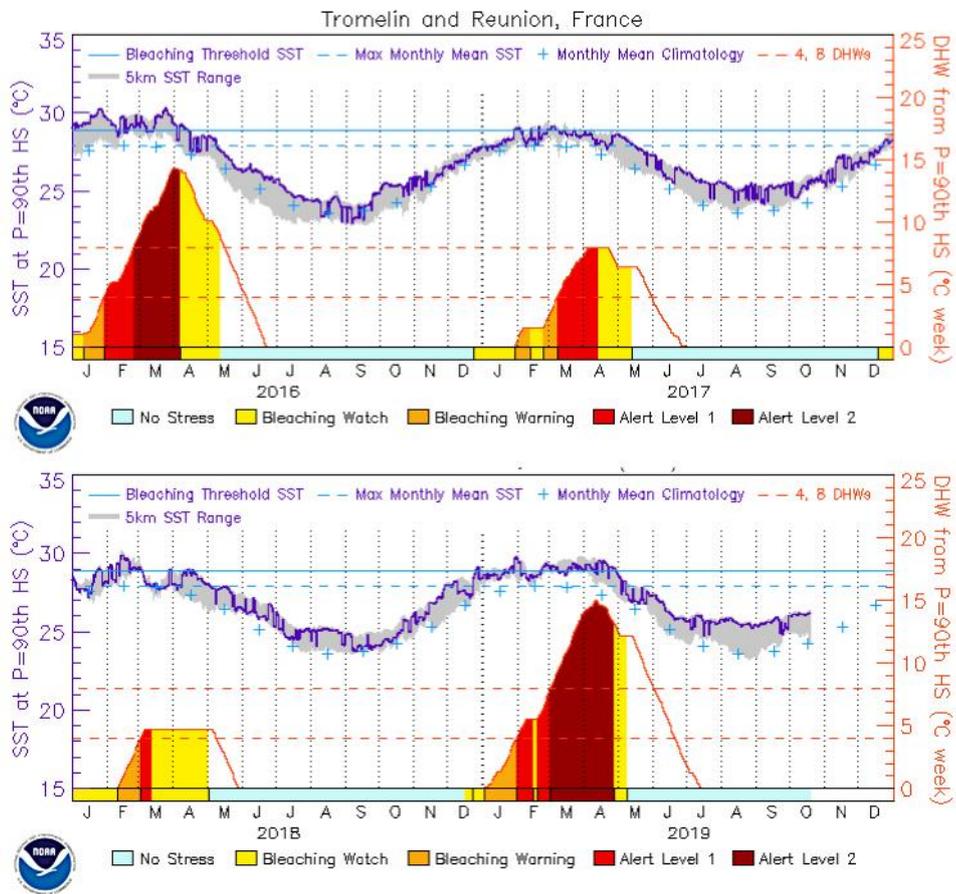
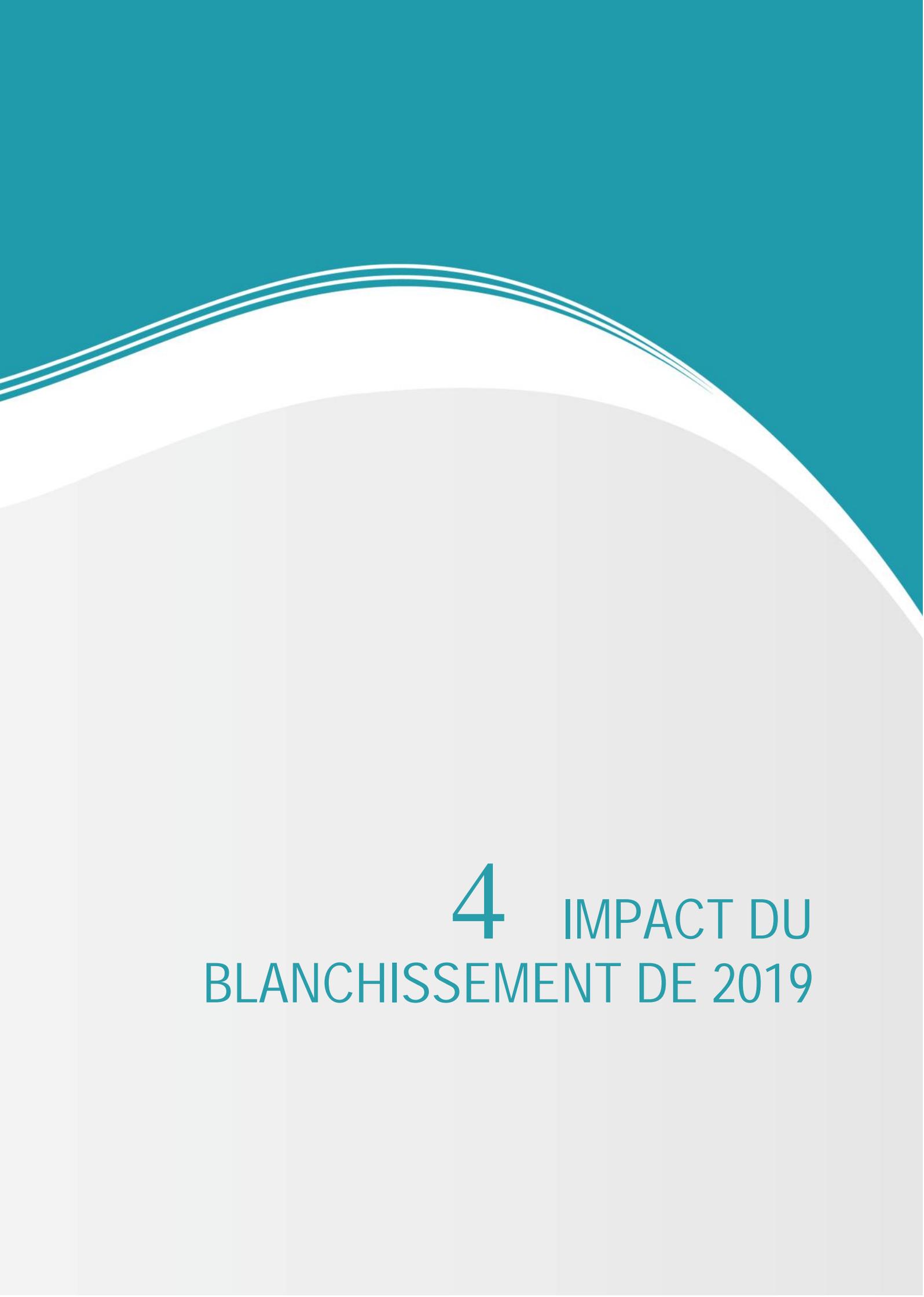


Figure 11 : DHW et niveau d'alerte calculés par la NOAA (à partir des données satellites) pour Tromelin et La Réunion entre 2016 et 2019



4 IMPACT DU BLANCHISSEMENT DE 2019

4.1 Etendue et intensité du phénomène

Les suivis réalisés en avril et juin/juillet 2019 ont permis de caractériser finement l'étendue et l'intensité du phénomène à La Réunion.

Il en ressort les points suivants (Tableau 7, Tableau 8 et Figure 12) :

-)] De manière générale, le blanchissement a été assez important en avril (40% de la couverture corallienne) mais la mortalité associée a été faible à moyenne (14%) ;
-)] Sur les platiers : Saint-Pierre est le secteur le plus touché en avril avec 57% de colonies blanchies/pâles. Ceci est principalement lié à la composition du peuplement (majorité d'*Acropora*, cf. § 4.2). Mais au final, la mortalité

pour l'ensemble des platiers peut être considérée comme faible à moyenne puisque de 15% avec un pic de 20 % à Saint Pierre ;

-)] Sur la pente externe : le blanchissement est important (40%) sur l'ensemble des secteurs (de 31% à 53%). Au niveau de la mortalité, le secteur le plus touché est Saint Gilles avec une mortalité de 15 %. Pour l'ensemble des pentes externes la mortalité est de 12%, ce qui peut être considéré comme faible.
-)] Enfin, concernant les coraux mous, ils présentent un taux de blanchissement très important, notamment sur les platiers et une mortalité moyenne à élevée (51%) sur les platiers et faible (7%) sur les pentes externes

Tableau 7 : Taux de blanchissement (blancs + pâles) en avril (a) et de mortalité en juin (b) des coraux durs (moyenne pondérée par la couverture corallienne)

(a)

Secteur	Pente externe	Platier
Etang Salé	53	27
Saint Gilles	31	33
Saint Leu	41	38
Saint Pierre	45	57
TOTAL	40	40

(b)

Secteur	Pente externe	Platier
Etang Salé	7	25
Saint Gilles	15	8
Saint Leu	9	19
Saint Pierre	12	20
TOTAL	12	15

Tableau 8 : Taux de blanchissement (blancs + pâles) en avril (a) et de mortalité en juin (b) des coraux mous (moyenne pondérée par la couverture corallienne)

(a)

Secteur	Pente externe	Platier
Etang Salé	68	
Saint Gilles	49	100
Saint Leu	9	100
Saint Pierre	18	67
TOTAL	34	90

(b)

Secteur	Pente externe	Platier
Etang Salé	13	
Saint Gilles	3	49
Saint Leu	2	52
Saint Pierre	15	50
TOTAL	7	51

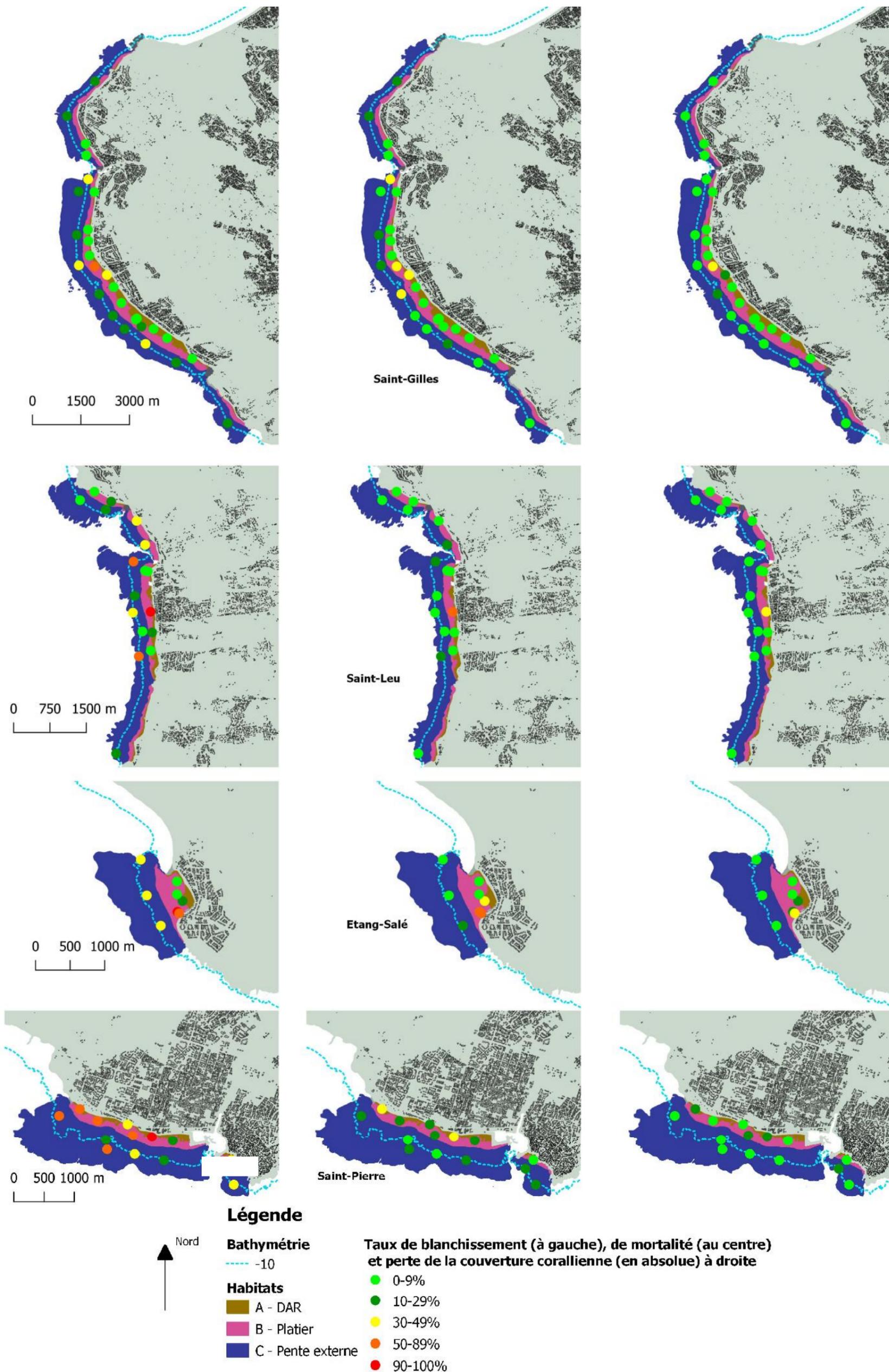


Figure 12 : Taux de blanchissement (et mortalité) en avril 2019 (à gauche), taux de la mortalité en juin 2019 (au centre) et perte de couverture corallienne en valeur absolue du recouvrement du substrat entre avril et juin suite au blanchissement (à droite)

4.2 Les réponses au phénomène de blanchissement en fonction des genres coralliens

Les genres ont été impactés différemment par cet épisode de blanchissement, on note ainsi (Figure 13) :

) Platier : les genres les plus affectés sont les *Acropora* (notamment, branchus, submassifs et digités), les *Millepora* (coraux de feu). et les coraux mous *Sinularia*. Les *Acropora* tabulaires qui ont fortement blanchi en avril (plus de 50% pâles et blanchis) ont finalement bien récupéré puisque l'on n'observe que très peu de

mortalité. Enfin, le genre *Stylophora* fortement menacé à La Réunion, qui était fluorescent en avril 2019 a bien résisté en juin 2019. Parmi les genres dominants, les *Pocillopora*, *Pavona* et *Porites* ne sont que peu touchés, comme en 2016 ;

) Pente externe : les genres les plus affectés (prévalence de mortalité en juillet) sont les *Millepora*, les *Acropora* submassifs (*Acropora abrotanoïdes*), *Acropora* digités et *Acropora* branchus, les *Porites* et les *Montipora* digités. Parmi les genres dominants, il est à noter que les *Pocillopora* et les *Astreopora* n'ont quasiment pas blanchi, comme en 2016

DEAL/IFRECOR

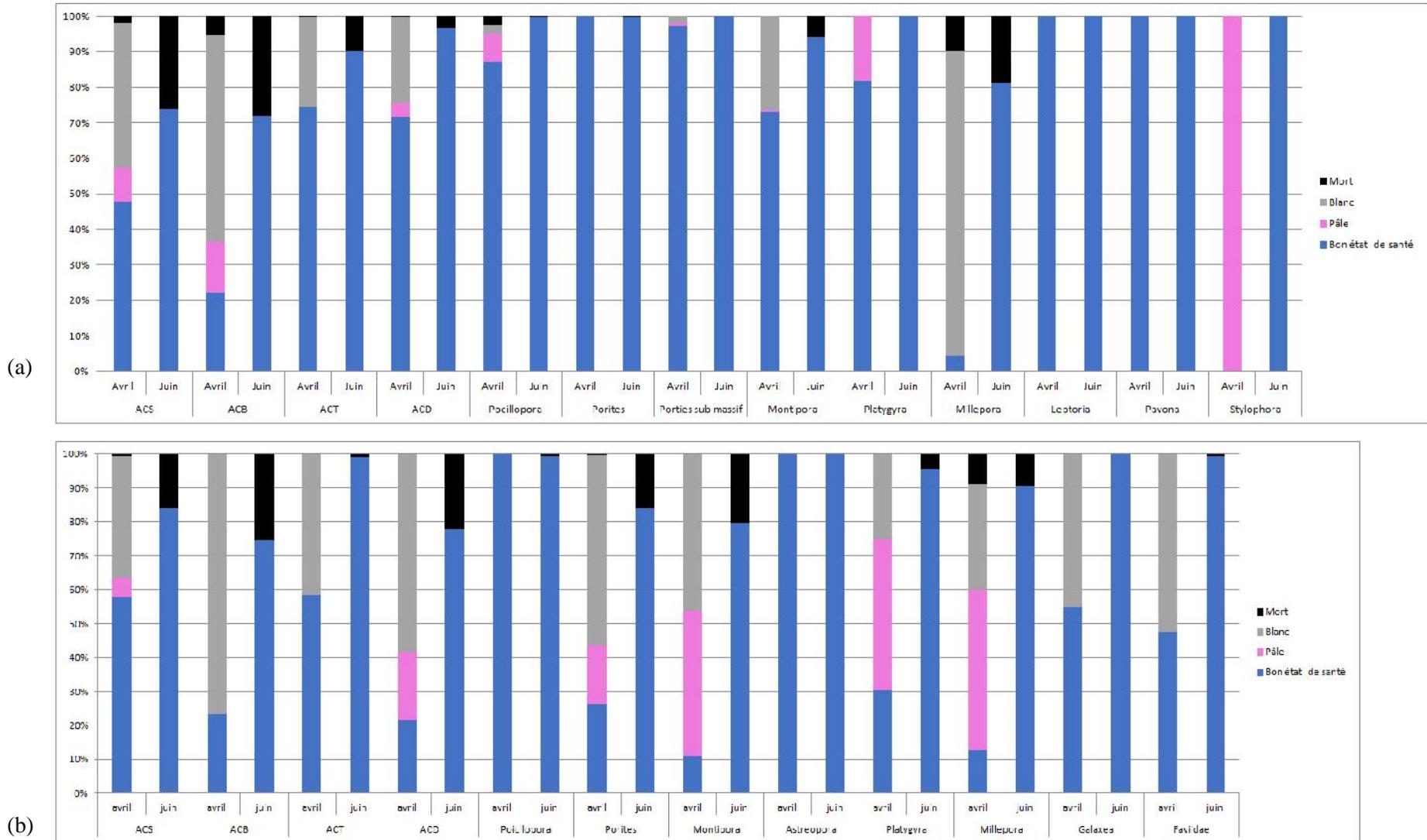


Figure 13 : Prévalence du blanchissement (et mortalité) en avril 2019, prévalence de la mortalité en juin 2019 pour les genres coralliens dominants le peuplement pour le plateau (a) et la pente externe du récif frangeant (b)



Figure 14 : Colonies de *Millepora* (à gauche) et de *Sinularia* (à droite) blanchies sur le platier en avril 2019

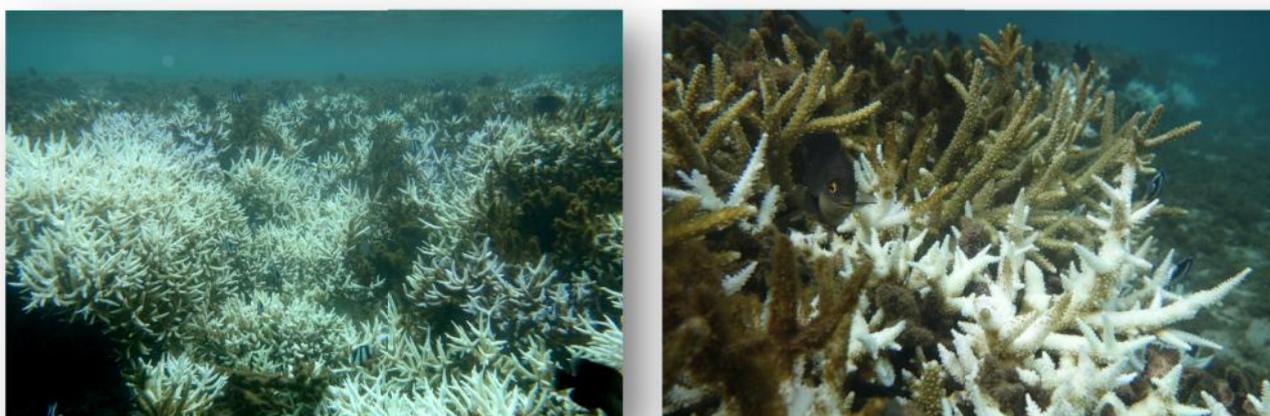


Figure 15 : *Acropora digitata* blanchis sur le platier de Saint-Leu en avril 2019 (à gauche) et colonie d'*Acropora* avec des parties mortes, blanchies et en bon état de santé en avril 2019 (à droite)



Figure 16 : *Pocillopora* vivant (flèche jaune), *Acropora digitata* blanchi (flèche rouge) et *Acropora submassif* mort (*Acropora abrotanoïdes*, flèche orange) en avril 2019 (à gauche) et colonies de *Montipora* blanchies sur la pente externe en avril 2019 (à droite)



Figure 17 : Nombreuses colonies blanchies sur la pente externe en avril 2019 (à gauche) et Porites blanchi et mort (à droite) sur la pente externe en avril 2019 (à droite)



Figure 18 : Colonies d'acropores branchus complètement mortes sur le platier en juin 2019 (Etang Salé, à gauche) et colonies d'acropores branchus vivantes en juin 2019 (à droite)

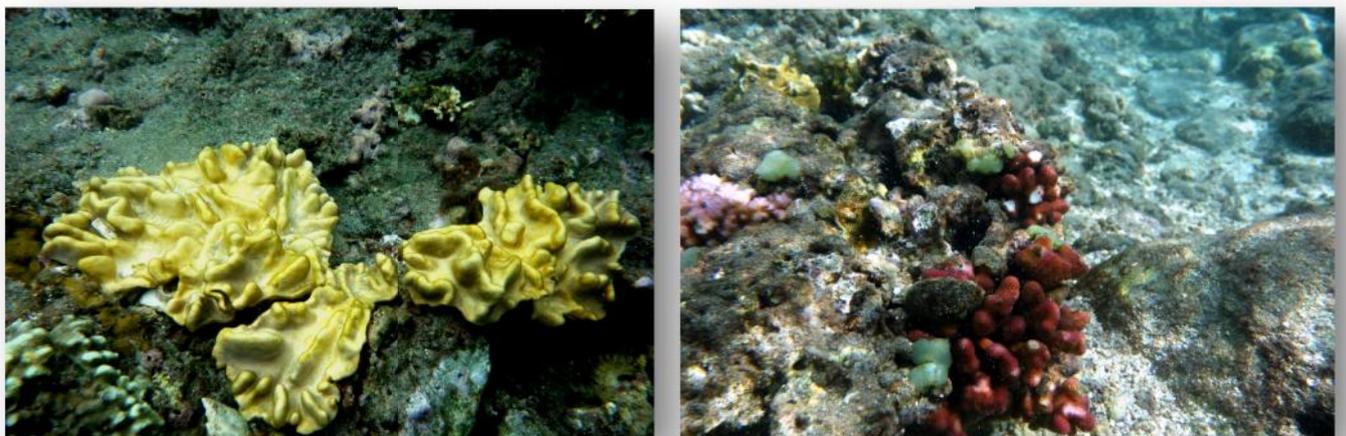


Figure 19 : Colonies de Lobophyton mortes en avril 2019 (à gauche) et Stylophora fluorescent sur le platier en avril 2019 (à droite)

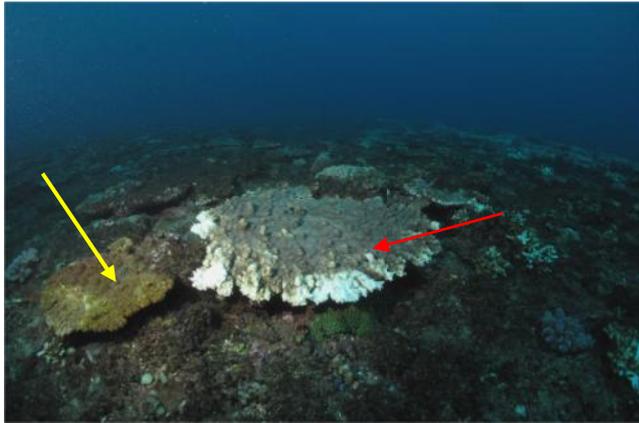


Figure 20 : Colonies d'*Acropora submassifs* (*Acropora abrotanoïdes*) morte (flèche jaune) et vivante (flèche rouge) sur la pente externe en juin 2019 (à gauche) et colonies d'*Acropora submassifs* (*Acropora abrotanoïdes*) et *Acropora branchus* vivantes en juin 2019 (à droite)



Figure 21 : Colonies d'*Astreopora* vivantes sur la pente externe en avril 2019 (à gauche) et *Acropora digités* morts en juin 2019 sur la pente externe (à droite)

4.3 Mise en perspective du phénomène de blanchissement 2019 avec les phénomènes antérieurs

Depuis 1998, chaque phénomène de blanchissement a été suivi la plupart du temps à l'échelle de l'ensemble des récifs (survol aérien) et sur quelques stations *in situ*. Ainsi, ont été relevés les impacts suivants pour les blanchissements précédents (à partir de 1998) :

-)] **Blanchissement de 1998** (Conand et *al.*, 2000) : blanchissement faible à modéré et localisé principalement sur les platiers récifaux ;
-)] **Blanchissement de 2001** (Turquet et *al.*, 2001) : le blanchissement a affecté tous les secteurs récifaux avec des intensités variables. Ainsi, le secteur le plus touché est constitué par la dépression d'arrière récif et les platiers récifaux de La Saline Sud. Les espèces de coraux les plus touchées sont essentiellement les coraux branchus, *Acropora muricata*, et dans une moindre mesure le genre *Montipora* surtout sur le site de Planch Alizé. ;
-)] **Blanchissement de 2002** (Quod et *al.*, 2002): ce blanchissement est dû aux apports d'eau douce et de fines terrigènes suites aux précipitations liées au passage du cyclone Dina. Le blanchissement induit est variable selon les endroits ;

)] **Blanchissement de 2003** (Turquet et *al.*, 2003) : les secteurs les plus touchés sont situés dans les dépressions d'arrière récif et les platiers récifaux de La Saline Nord et Sud, la Souris Chaude, la Pointe des Châteaux, les Colimaçons et Saint-Pierre. Les espèces de coraux les plus touchées sont essentiellement les coraux branchus, *Acropora muricata*, espèce dominante de ces zones et dans une moindre mesure les genres *Millepora* et *Montipora* ;

)] **Blanchissement de 2004** (Nicet et *al.*, 2004). Le blanchissement a affecté tous les secteurs récifaux avec des intensités variables. En effet, les secteurs les plus touchés sont situés dans les dépressions d'arrière récif et les platiers récifaux de Grand Fond, la Souris Chaude, la Pointe des Châteaux, les Colimaçons, Saint-Pierre, Grand Bois et Grand Anse Corne Nord. Sur les stations de platier du GCRMN (n=7), une moyenne de 37% de la couverture corallienne était blanchie ;

)] **Blanchissement de 2005** (Guillaume et *al.*, 2005) : Les récifs ont été moyennement affectés, sauf les dépressions d'arrière-récif et les platiers récifaux de Grand Fond, la Pointe des Châteaux, la corne Nord de Saint-Leu qui ont été fortement touchés. Enfin la partie méridionale des récifs a été très affectée (Saint-Pierre, Grand Bois, Grande Anse) ;

)] **Blanchissement 2009** (Guillaume et *al.*, 2010) : Globalement, le blanchissement 2009 aura été peu

sévère et limité spatialement par rapport aux évènements de blanchissement passés, probablement grâce à la baisse de température induite par le passage du cyclone Gaël. Sur les stations platier du GCRMN (n=7), une moyenne de 27% de la couverture corallienne était blanchie. Cette proportion de couverture blanchie était seulement de 2% sur les 7 stations de pente externe ;

) **Blanchissement 2016** (Nicet et *al.*, 2017) : le blanchissement sur les platiers est compris entre 30% et 50% et entre 15 et 65% sur les pentes externes pour les 4 secteurs d'étude. La mortalité a été faible puisqu'inférieure à 10% sur les platier et 5 à 25% sur la pente externe. Concernant les genres touchés ont retrouvent sensiblement les mêmes genres qu'en 2019 avec une

mortalité la plus élevée sur les *Acropora* pour le platier et les *Porites*, *Acropora* et *Millepora* pour la pente externe.

Bien qu'il soit difficile de comparer directement le blanchissement de 2019 avec les événements antérieurs à 2016 où les données sont parcellaires, le blanchissement de 2019 (sans tenir compte de la mortalité) semble dans la moyenne haute.

La mortalité induite par le blanchissement de 2019 est comparable à celle du blanchissement de 2016.

4.4 Mise en perspective du blanchissement corallien sur l'ensemble du Sud-Ouest de l'océan Indien

A partir de la compilation de données réalisée par la COI/CORDIO et des données collectées dans le cadre du présent projet auprès de scientifiques ayant participé à des suivis aux dates de blanchissement il est possible de dresser un bilan qualitatif de l'impact du blanchissement corallien de 2019 dans le Sud-Ouest de l'océan Indien :

-)] Pas de blanchissement notable en Afrique de l'Est et à Madagascar;

-)] Blanchissement faible à Mayotte et pas de mortalité notable (DEAL) ;
-)] Pas de blanchissement observé sur les îles Eparses en avril 2019 (rotation du Marion Dufresne, L. Bigot, J.B. Nicet) ;
-)] Des colonies pâles aux Seychelles mais avec peu de mortalité (bulletin CORDIO) ;
-)] Blanchissement important sur 4 stations de suivi à l'île Maurice (données MOI).

Au final, il apparaît que dans la région, le secteur le plus touchés a été les Mascareignes et dans une moindre mesure les Seychelles.

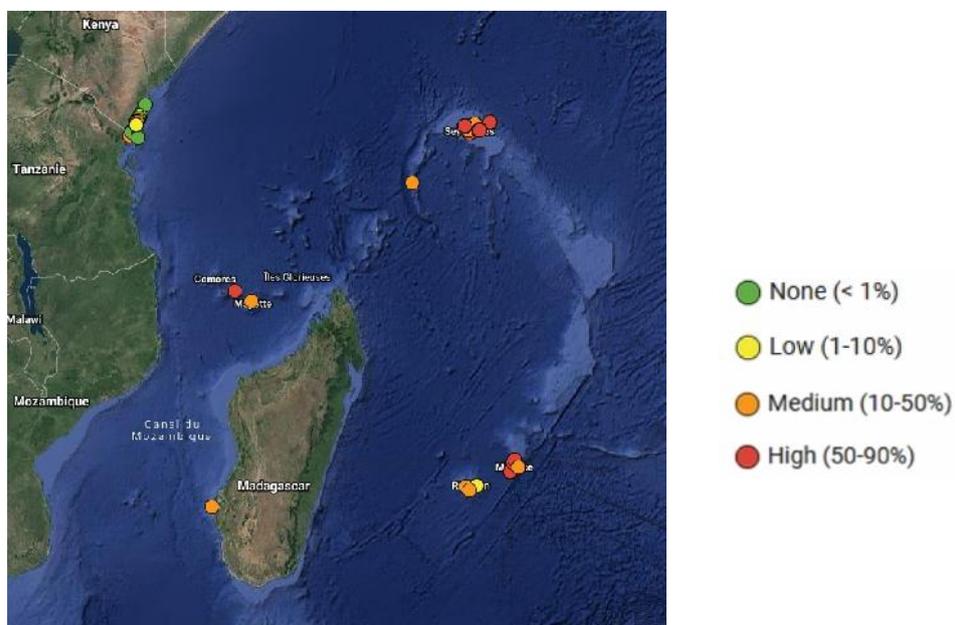


Figure 22 : Observations du blanchissement dans le Sud-Ouest de l'océan indien durant la saison chaude 2018/2019 (données CORDIO)



5 LA CARTOGRAPHIE DU BLANCHISSEMENT

5.1 La cartographie du blanchissement en 2019

5.1.1 Cartographie du blanchissement 2019 à partir des images Pléiades

Les Figure 23 à Figure 26 illustrent la spatialisation du blanchissement à La Réunion et notamment les zones où le blanchissement a été le plus important.

Ainsi, en accord avec les données *in situ*, le blanchissement détecté a été le plus élevé sur le platier de Saint-Pierre et le plus faible sur le platier de Saint-Gilles. Le secteur de La Varangue (Saint-Leu) et du Parc à Huître (Etang-Salé) ont également fortement été touchés.

Sur l'ensemble des platiers c'est 3.3 ha de coraux qui sont détectés comme blanchis alors qu'en 2016 c'est 10.4 ha qui ont été cartographiés comme tel. Il convient de relativiser cette différence de surface dans la mesure où en fonction des seuils utilisés la comparaison peut s'avérer délicate. La distribution spatiale comparée de 2016 et 2019 est représentée sur la Figure 27, la Figure 28 et la Figure 29.

La description détaillée des résultats figure dans le premier volet "Améliorer la détection du blanchissement corallien à la Réunion à partir d'images satellites THRS Pléiades" du rapport "Suivi du blanchissement corallien par des méthodes de télédétection - Analyse de données satellite haute résolution PLEIADES et SENTINEL 2" d'Espace-Dev (2020).

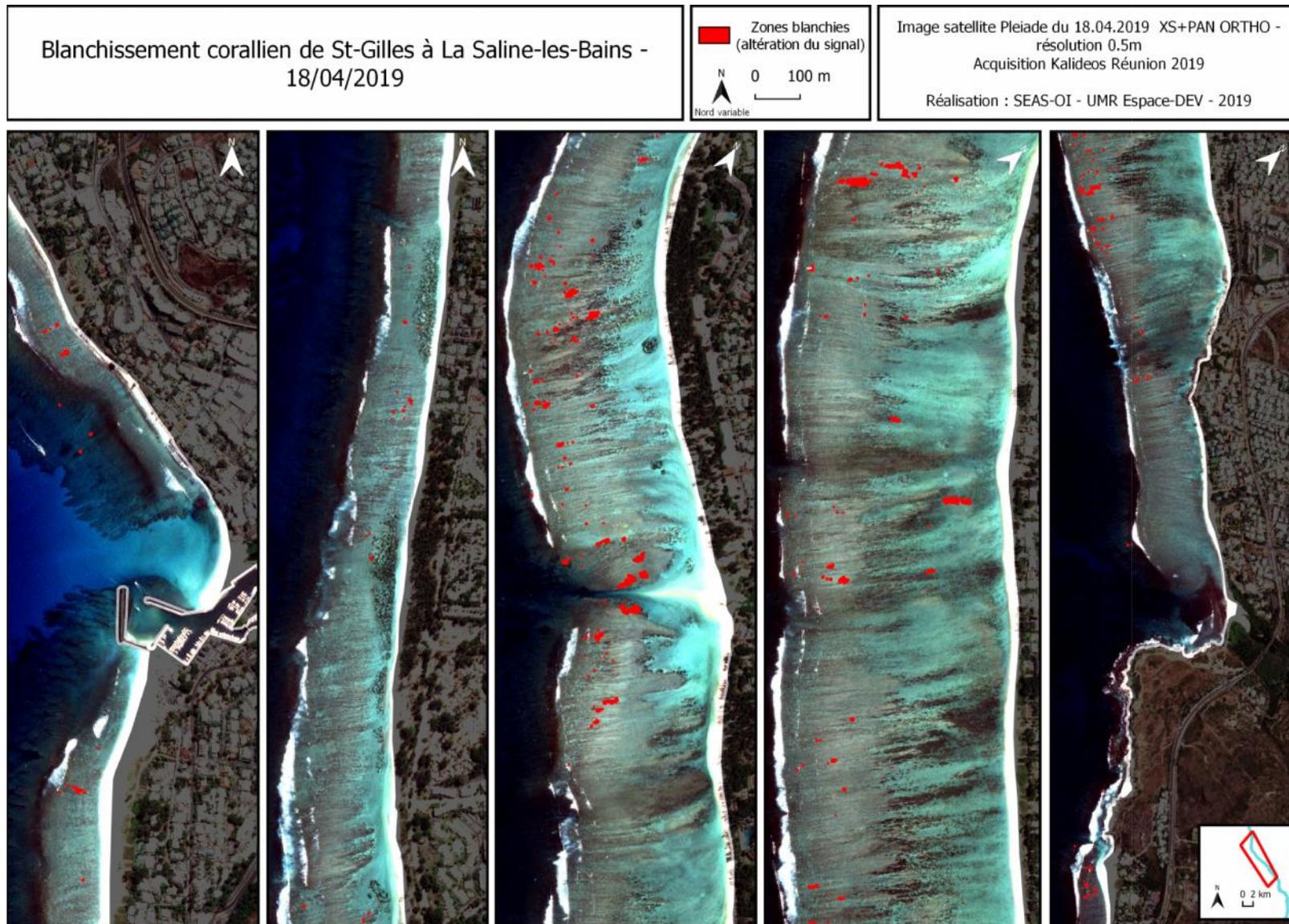


Figure 23 : Altération (blanchissement) au 14 avril 2019 sur le platier du récif de Saint-Gilles

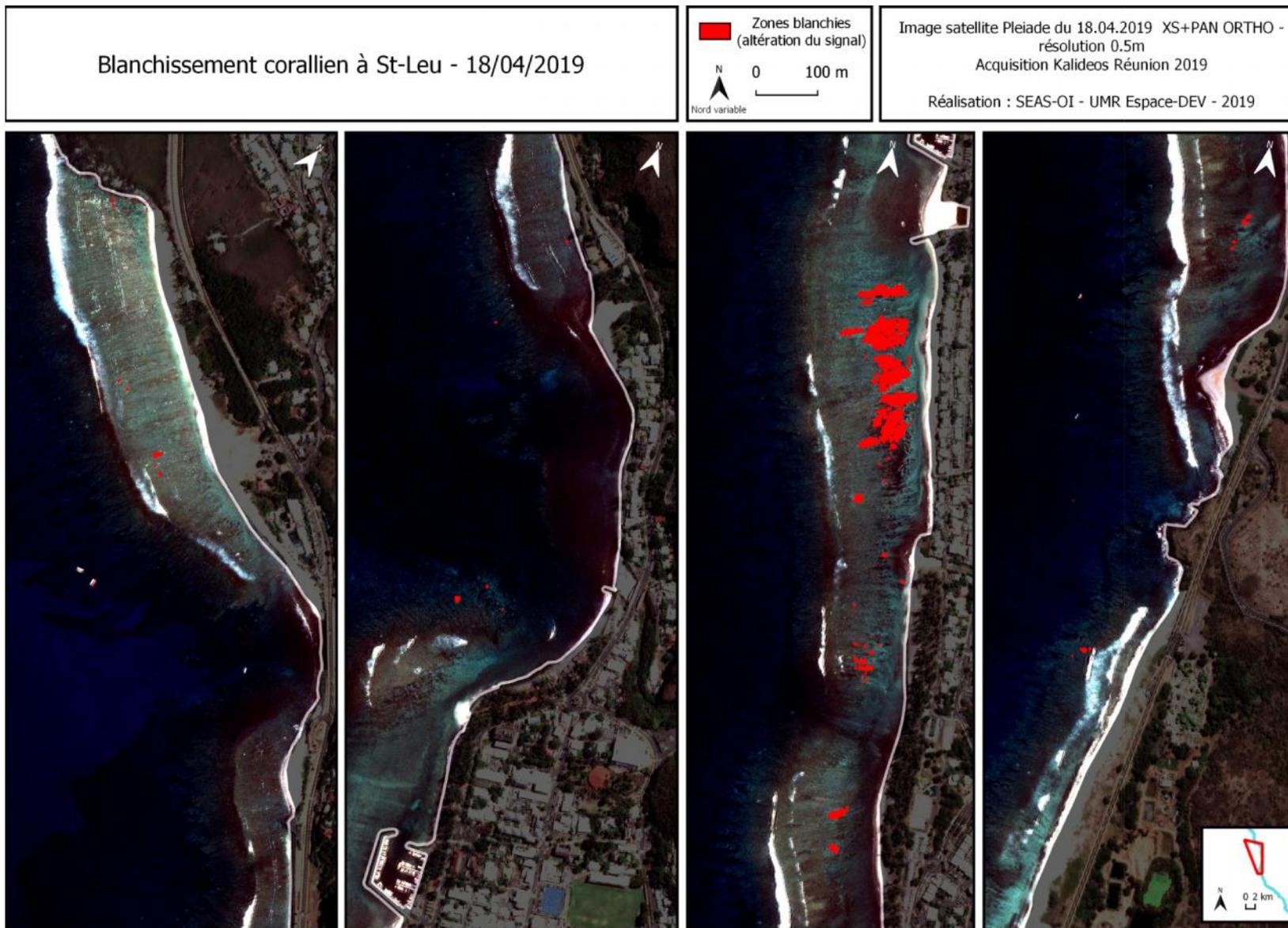


Figure 24 : Altération (blanchissement) au 18 avril 2019 sur le platier du récif de Saint-Leu et le 14 avril sur le récif d'Etang Salé

Blanchissement corallien à l'Etang-Salé - 18/04/2019

 Zones blanchies
(altération du signal)

 0 100 m

Image satellite Pleiade du 18.04.2019 XS+PAN ORTHO -
résolution 0.5m
Acquisition Kalideos Réunion 2019
Réalisation : SEAS-OI - UMR Espace-DEV - 2019



Figure 25 : Altération (blanchissement) au 18 avril 2019 sur le récif d'Etang Salé

Blanchissement corallien à St-Pierre - 18/04/2019

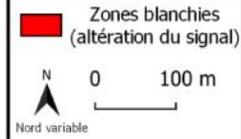


Image satellite Pleiade du 18.04.2019 XS+PAN ORTHO -
résolution 0.5m
Acquisition Kalideos Réunion 2019
Réalisation : SEAS-OI - UMR Espace-DEV - 2019

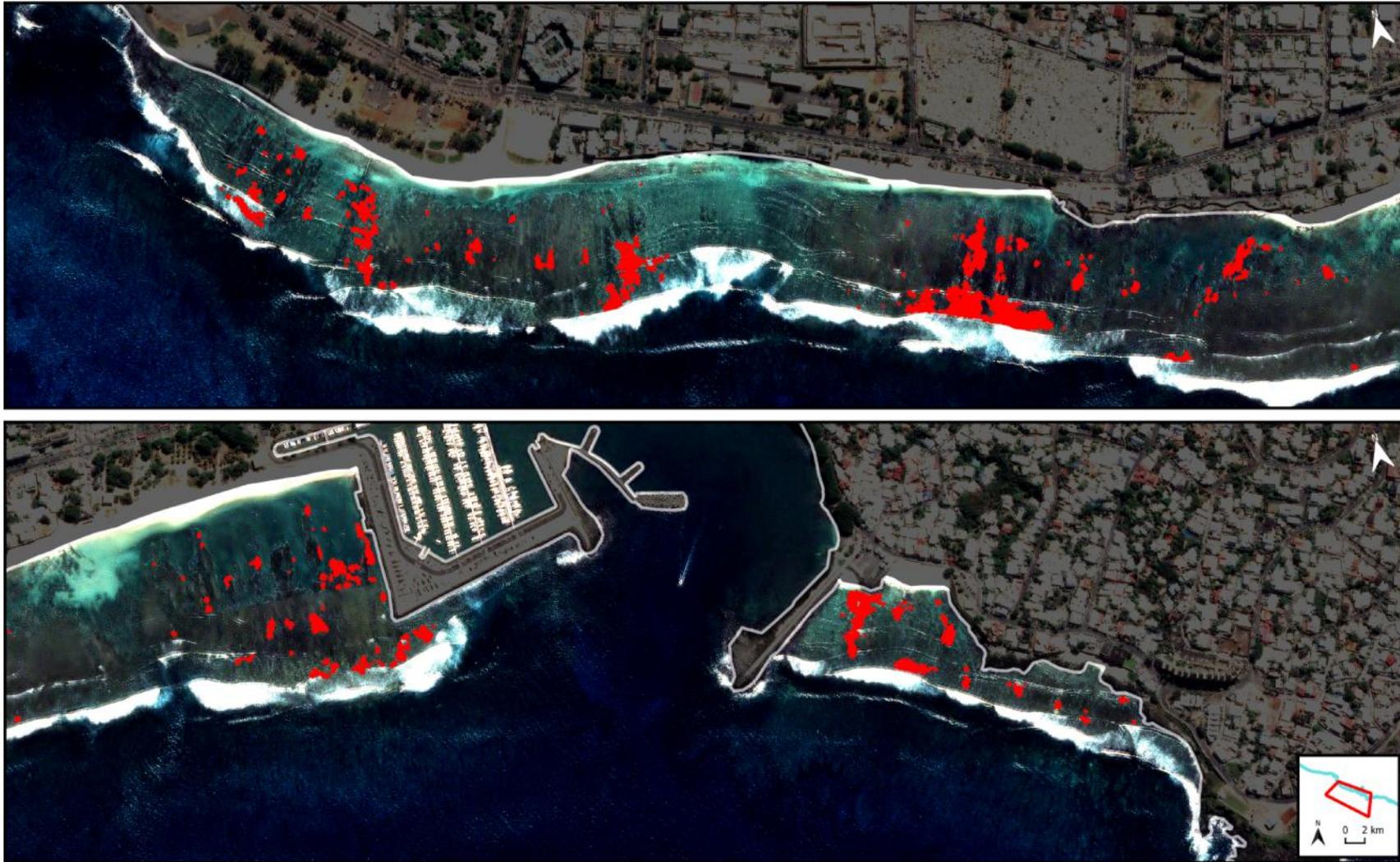


Figure 26 : Altération (blanchissement) au 18 avril 2019 sur le récif de Saint-Pierre

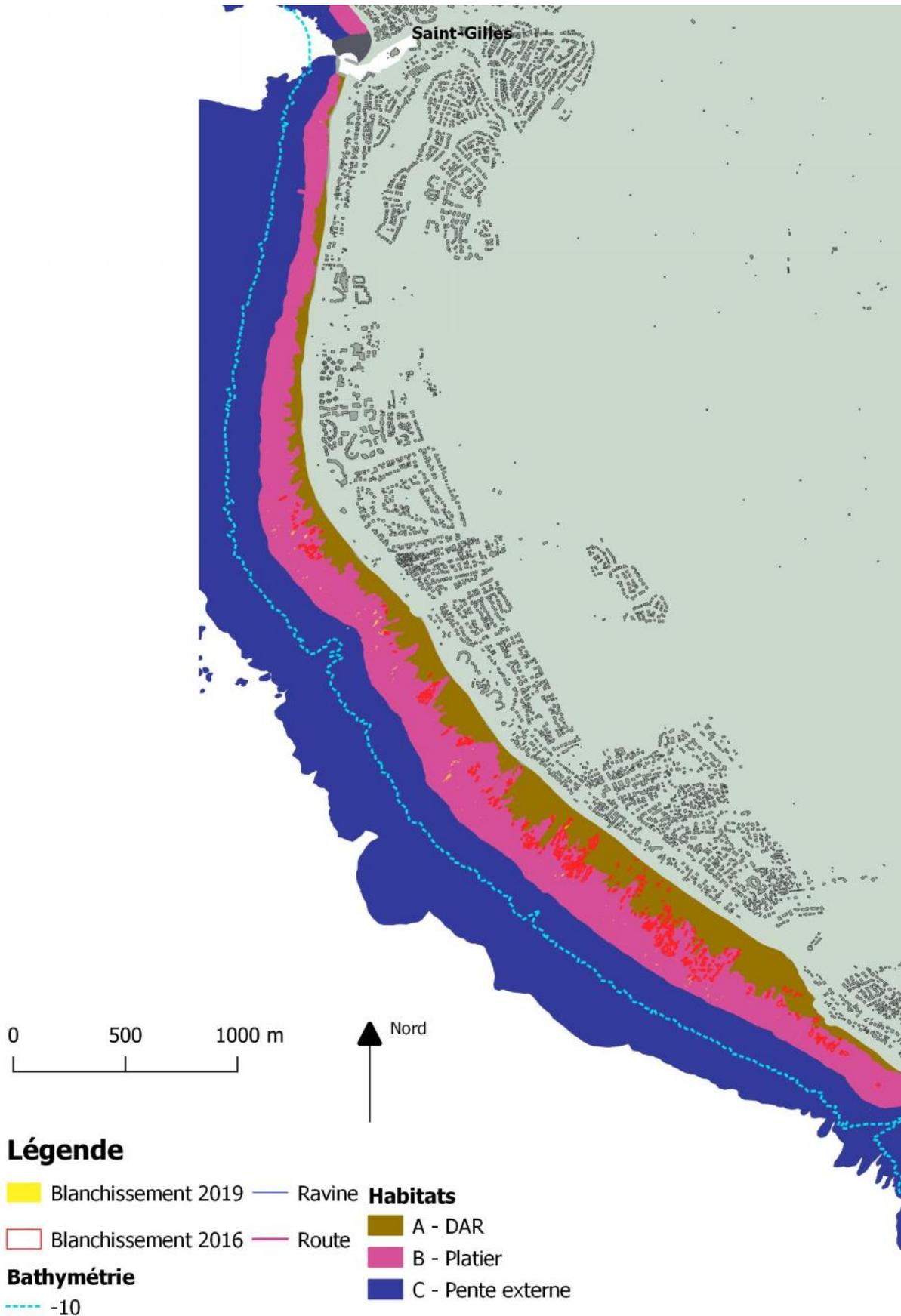


Figure 27 : Blanchissement en 2016 et 2019 sur le récif de Saint Gilles

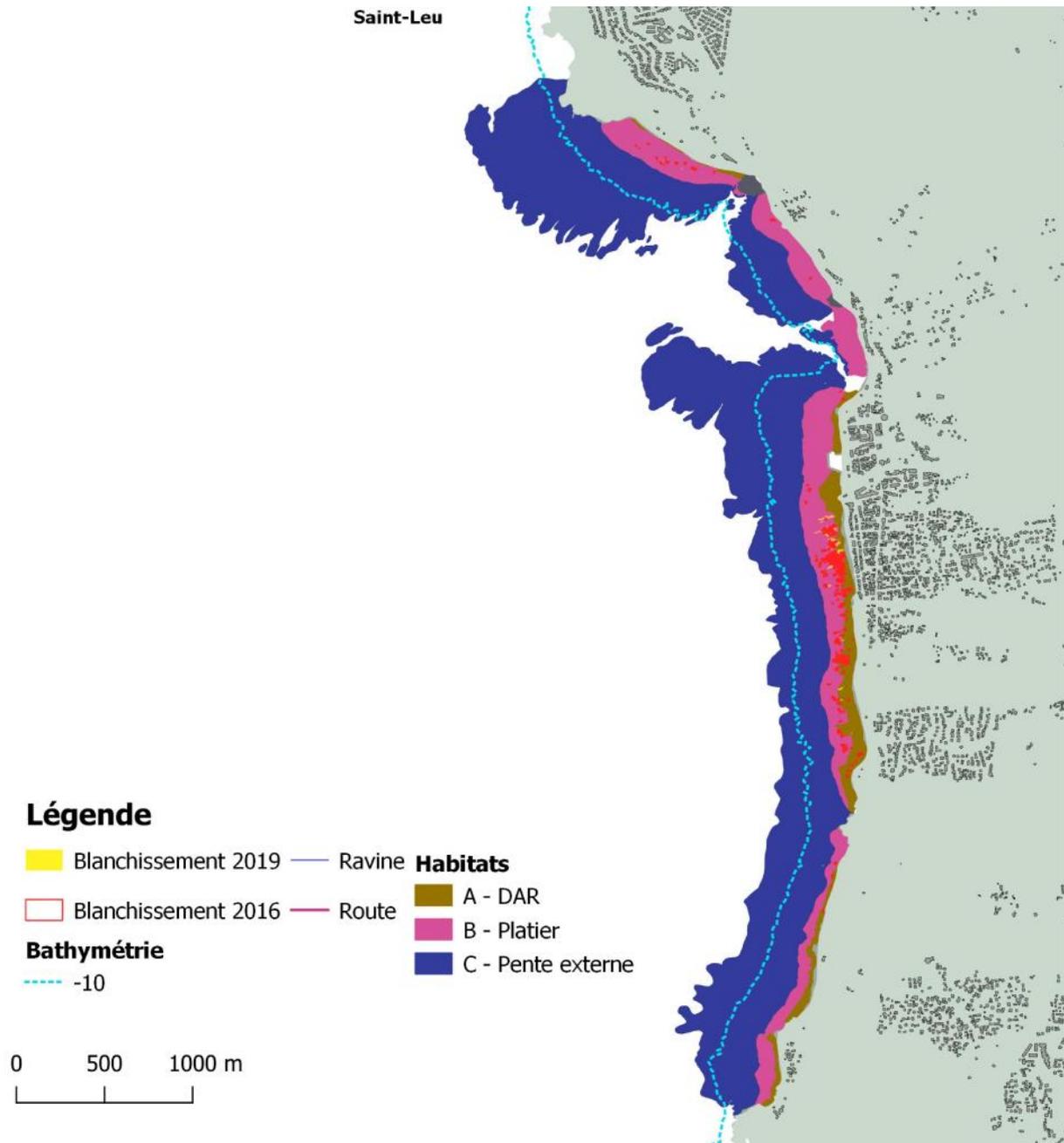


Figure 28 : Blanchissement en 2016 et 2019 sur le récif de Saint-Leu

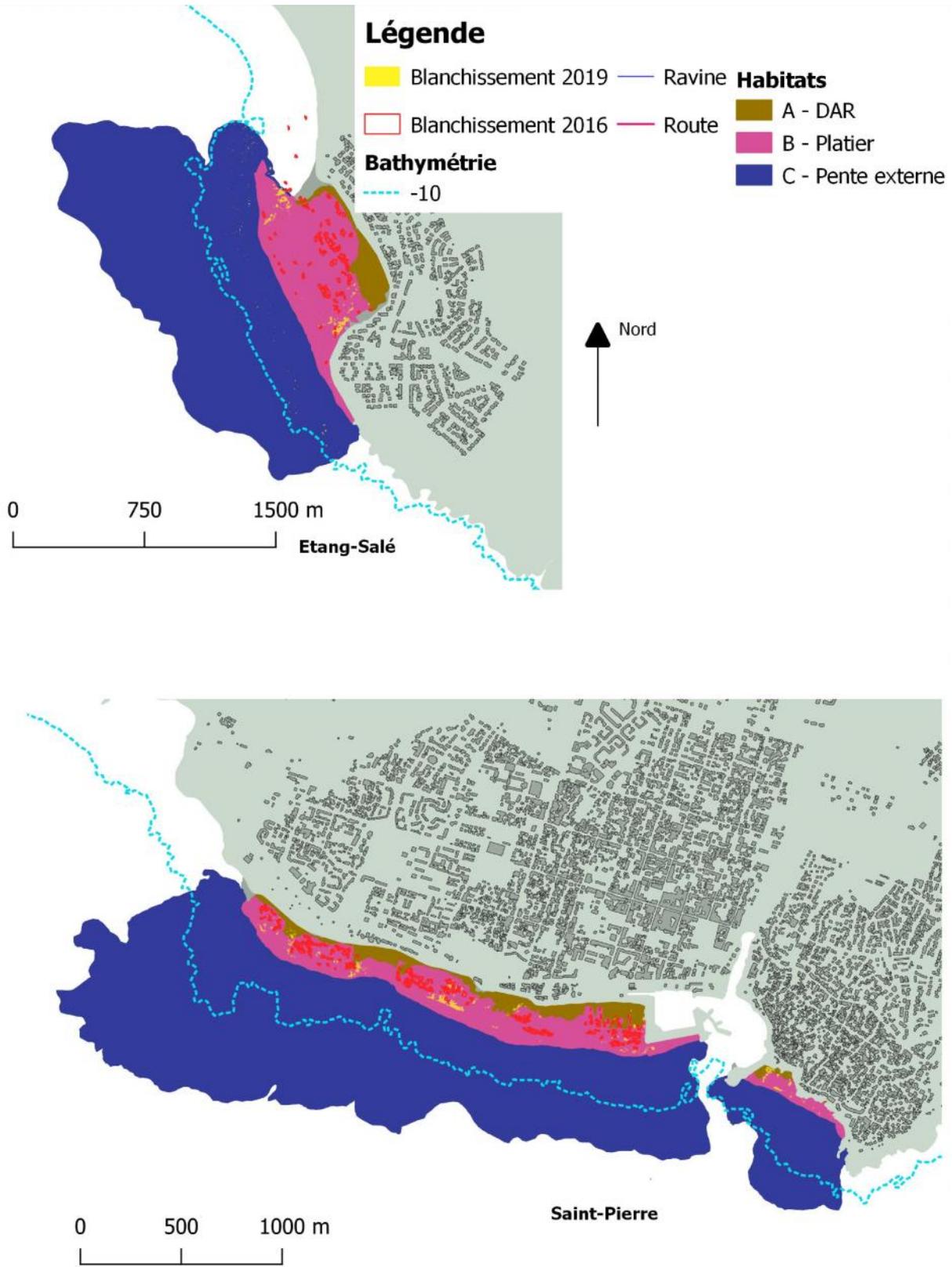


Figure 29 : Blanchissement en 2016 et 2019 sur les récifs d'Etang Salé et de Saint-Pierre

5.1.2 Détection du blanchissement à partir des images Sentinel2

Il n'est pas ici question de cartographier le blanchissement de manière fine mais de prendre des polygones témoin et de voir leur variation de brillance lors des épisodes de blanchissement.

Il semble ainsi que lors de l'épisode de blanchissement sur les secteurs de Saint-Leu (Figure 30), d'Etang-Salé et Saint-Pierre (Figure 31) l'indice de brillance ait augmenté (signe d'un blanchissement) même si cela n'est pas toujours clair du fait du fort bruit sur les données (houle, turbidité, incidence solaire, ...).

Les points invariants terrestres (points témoins) permettent ici d'appuyer ces observations avec une variation saisonnière globale de la brillance, avec un début de baisse en février/mars, non observé sur les zones coralliennes en cours de blanchissement où la brillance reste élevée (Figure 31).

Les données satellites Sentinel 2 nous ont montré ici qu'il était possible, dans des zones très localisées où les couvertures coralliennes sont importantes et fortement touchées, de mettre en évidence le phénomène de blanchissement corallien.

La haute résolution temporelle (une image tous les 5 jours) a permis de compenser le filtrage

nécessaire des données pour suivre sa dynamique.

Cependant les données Sentinel 2 de par leur faible résolution spatiale montrent aussi leurs limites pour l'observation de phénomènes localisés et peu étendus comme le blanchissement des colonies coralliennes à La Réunion. Bien sûr, la faible résolution de ces données ne permet pas de réaliser une cartographie précise des zones impactées.

Il serait intéressant de pouvoir approfondir l'intérêt de cette approche sur d'autres zones géographiques où les couvertures coralliennes sont plus importantes, comme Mayotte ou les îles Eparses.

La description détaillée des résultats figure dans le volet 2 "Becoming 2 - analyse des données Sentinel2" du rapport "Suivi du blanchissement corallien par des méthodes de télédétection - Analyse de données satellite haute résolution PLEIADES et SENTINEL 2" d'Espace-Dev (2020).

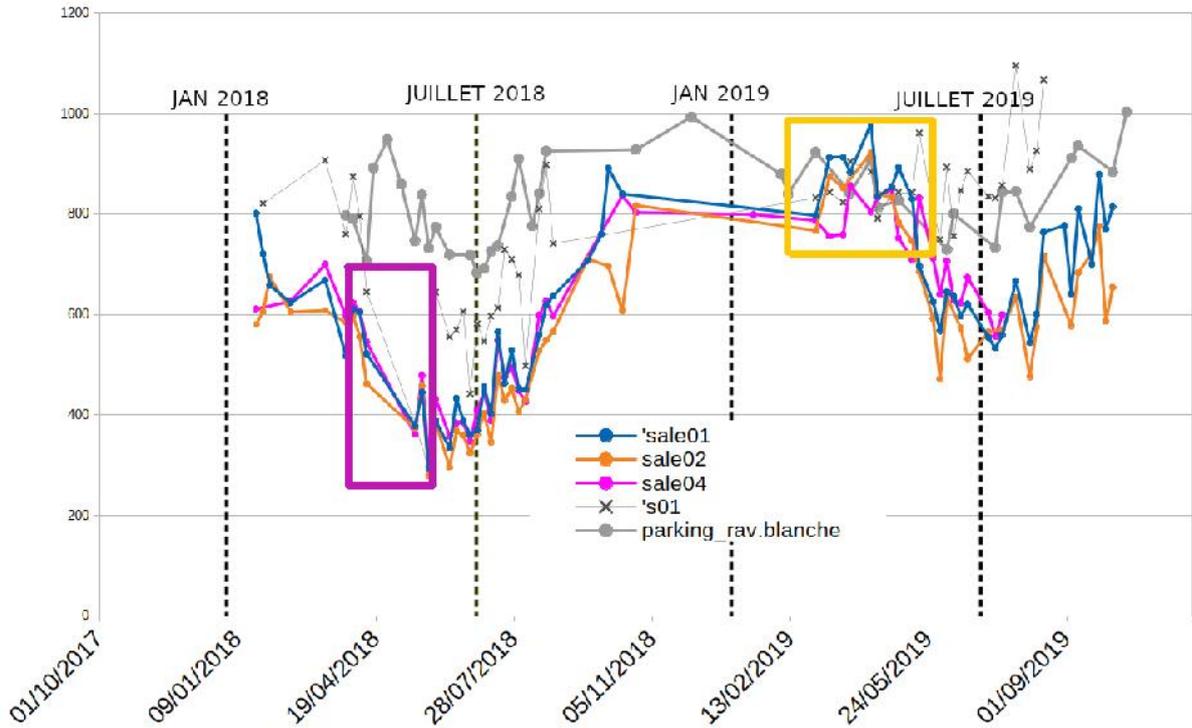


Figure 30 : Suivi de l'indice de brillance sur 5 mesures ponctuelles du secteur de Saint-Leu, 3 points coralliens subissant du blanchissement (saleXX), un point sable immergé (s01) et le parking émergé de la Ravine Blanche

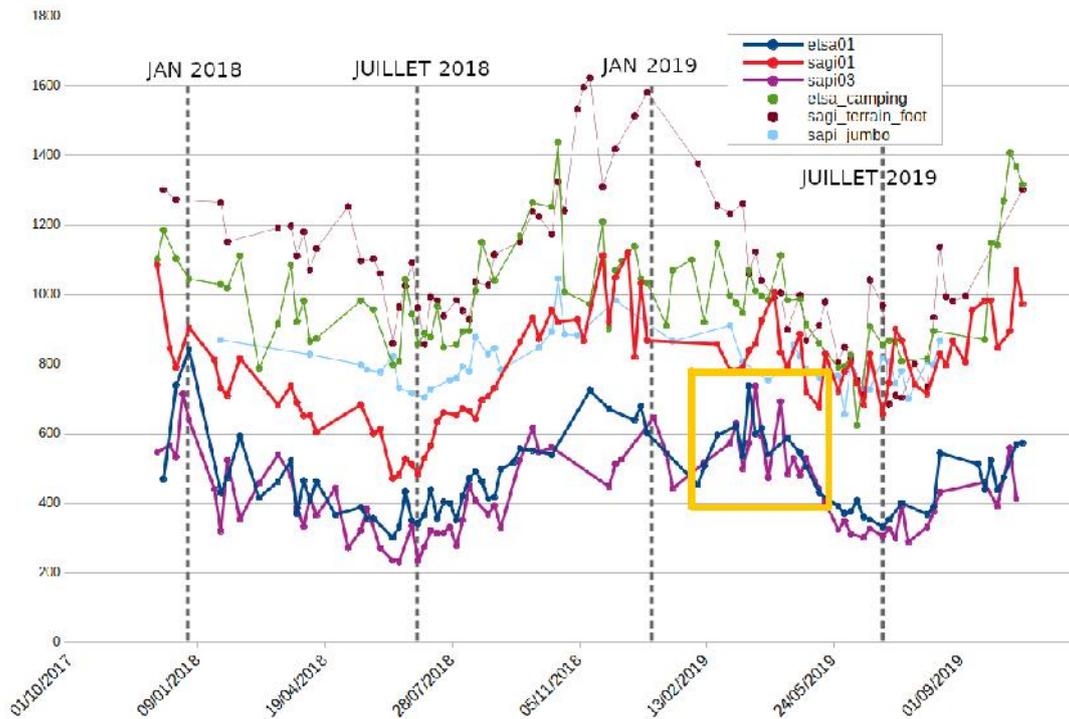


Figure 31 : Suivi de l'indice de brillance sur les 3 plateformes récifales de Saint-Gilles, l'Etang-Salé et Saint-Pierre

5.1.3 Comparaison de la cartographie du blanchissement à partir des images Pléiades, ULM et drone

Afin de comparer les avantages et inconvénients des différentes images et méthodes utilisées, une cartographie du blanchissement à partir des trois types d'images a été réalisée sur la zone de La Varangue (Saint-Leu) où un blanchissement important a été observée en avril 2019 (Figure 35). Une comparaison est également réalisée entre les images Pléiades et ULM sur l'ensemble du récif frangeant de Saint-Leu.

Une analyse orienté objet couplée avec une analyse multi date ont été appliquées sur les images Pléiades. Une classification supervisée a été appliquée sur les images ULM et drone.

Il en ressort les points suivants :

-) La meilleure résolution spatiale des images ULM et drone par rapport aux images Pléiades permet de détecter des blanchissements sur de faibles surfaces voire sur des colonies individuelles. **Il en résulte sur ce point une sous estimation sur les images Pléiades du blanchissement quand il est faible ou que la couverture corallienne est faible** (Figure 32) ;
-) En l'absence d'analyse multi date, il est clair qu'il est difficile de différencier sur les images ULM et drone les colonies coralliennes blanchies du substrat sableux (Figure 33). Ainsi, en fonction des zones d'apprentissage retenues on obtiendra soit une surestimation de la surface blanchie

(qui englobera une partie du substrat sableux), soit une sous estimation (le blanchissement trop proche du substrat sableux ne sera pas pris en compte). Nous avons choisi de ne pas avoir de substrat sableux classé comme blanchissement, **il en résulte donc pour les images drones et ULM une sous évaluation de la superficie blanchie ;**

-) Sur les images drones, acquises au soleil, du "wave focusing" est présent (Figure 34) ce qui rend impossible la discrimination entre celui-ci et le blanchissement. Ce phénomène est dû à l'amplification de la lumière par la surface de l'eau (effet de loupe). **De ce fait le blanchissement détecté est largement surévalué à partir des images drones.** Cet effet n'est pas sensible sur les images ULM, acquises probablement avec un voile nuageux ou très tôt le matin. Sur les images satellites, la plus faible résolution permet d'estomper l'effet par une moyenne spatiale ;

-) **Les images drones et ULM permettent de cartographier le blanchissement sur la pente externe contrairement aux images Pléiades** (Figure 36). En effet, du fait du schéma de répartition particulier à La Réunion des colonies coralliennes sur la pente externe (colonies coralliennes de petite taille et relativement éparées), les pixels de 0.5m de côté des images Pléiades sont trop larges pour pouvoir isoler les colonies coralliennes blanchies. Toutefois, là encore, sur les images ULM traitées par classification

supervisée, il peut y avoir une confusion entre le substrat sableux et les colonies blanchies. D'autre part l'atténuation du signal lumineux avec la profondeur rend difficile une classification homogène sur l'ensemble de la pente externe avec une seule phase d'apprentissage. Il est ainsi nécessaire de découper la zone de pente externe en bandes adjacentes selon la bathymétrie. Dans le présent exemple la classification a été réalisée jusqu'à -10m ;

)] **Du fait de la résolution spatiale plus faible des images Pléiades, sur les zones avec un fort blanchissement et en fonction du seuil de brillance**

retenu on peut aboutir à une surestimation du blanchissement (Figure 37). C'est pourquoi trois niveaux de blanchissement ont été appliqués sur les images Pléiades (Figure 38). Ainsi, si on regarde la superficie du blanchissement sur ce secteur, **il en ressort que pour les images Pléiades les niveaux fort et moyen reflètent le mieux la réalité**, il convient alors de ne pas prendre en compte le niveau faible (Figure 38).

Une synthèse des avantages et inconvénients des différents types d'images et méthodes utilisées est présentée dans le Tableau 10.

Tableau 9 : Superficie corallienne blanchie sur la zone de La Varangue obtenues à partir des différentes images/méthodes

Image (résolution spatiale)	Méthode de traitement	Superficie (m ²) PLATIER	Nombre de polygone Superficie moyenne par polygone (équivalent nombre de pixel)	Remarque
Pléiades (0,5m)	Analyse multiscalaire + approche orientée objet	Niveau faible + moyen + élevé = 3213 Niveau moyen + élevé = 668	Nb polygones : 35 Surf. Moy. Poly : 91m ² (équivalent 367 pixels)	Les niveaux d'intensité moyen et élevé semblent être les 2 niveaux reflétant le mieux la vérité terrain
ULM (0,1m)	Classification supervisée	622	Nb polygones : 3330 Surf. Moy. Poly : 0,19m ² (équivalent 19 pixels)	Superficie légèrement sous estimée du fait de la signature spectrale proche entre le substrat sableux et les colonies coralliennes blanchies
Drone (0,05m)	Classification supervisée	1190	Nb polygones : 40320 Surf. Moy. Poly : 0,03m ² (équivalent 12 pixels)	Superficie surestimée du fait du wave focusing cartographié comme blanchissement

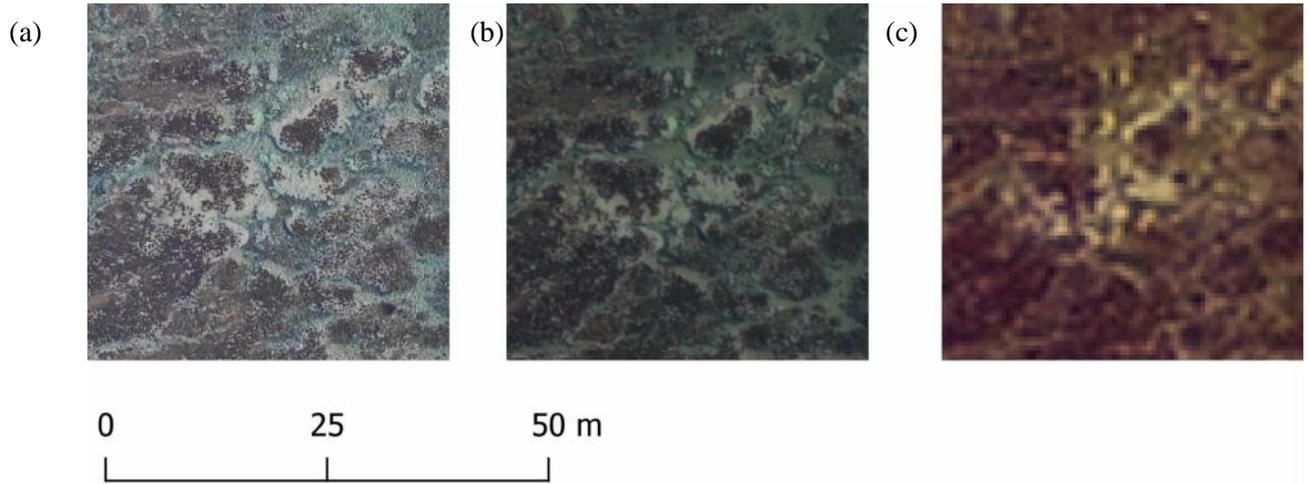


Figure 32 : Illustration des différences de résolution spatiale entre les images drone (a) et ULM (b) d'un côté et les images Pléiades (c) de l'autre côté



Figure 33 : Illustration de la proximité de la signature spectrale des colonies blanchies (flèche bleue) et du substrat sableux (flèche rouge)

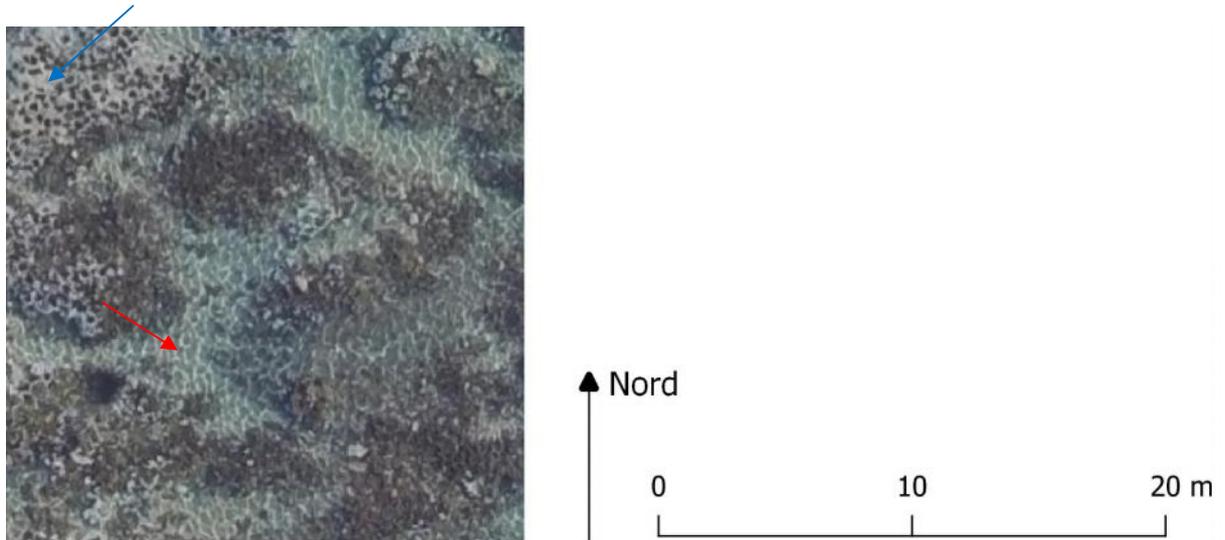


Figure 34 : Illustration du "wave focusing" (amplification de la lumière (effet loupe) produisant des structures claires réticulées sur le sable, flèche rouge) et de la proximité spectrale avec les colonies blanchies (flèche bleue)

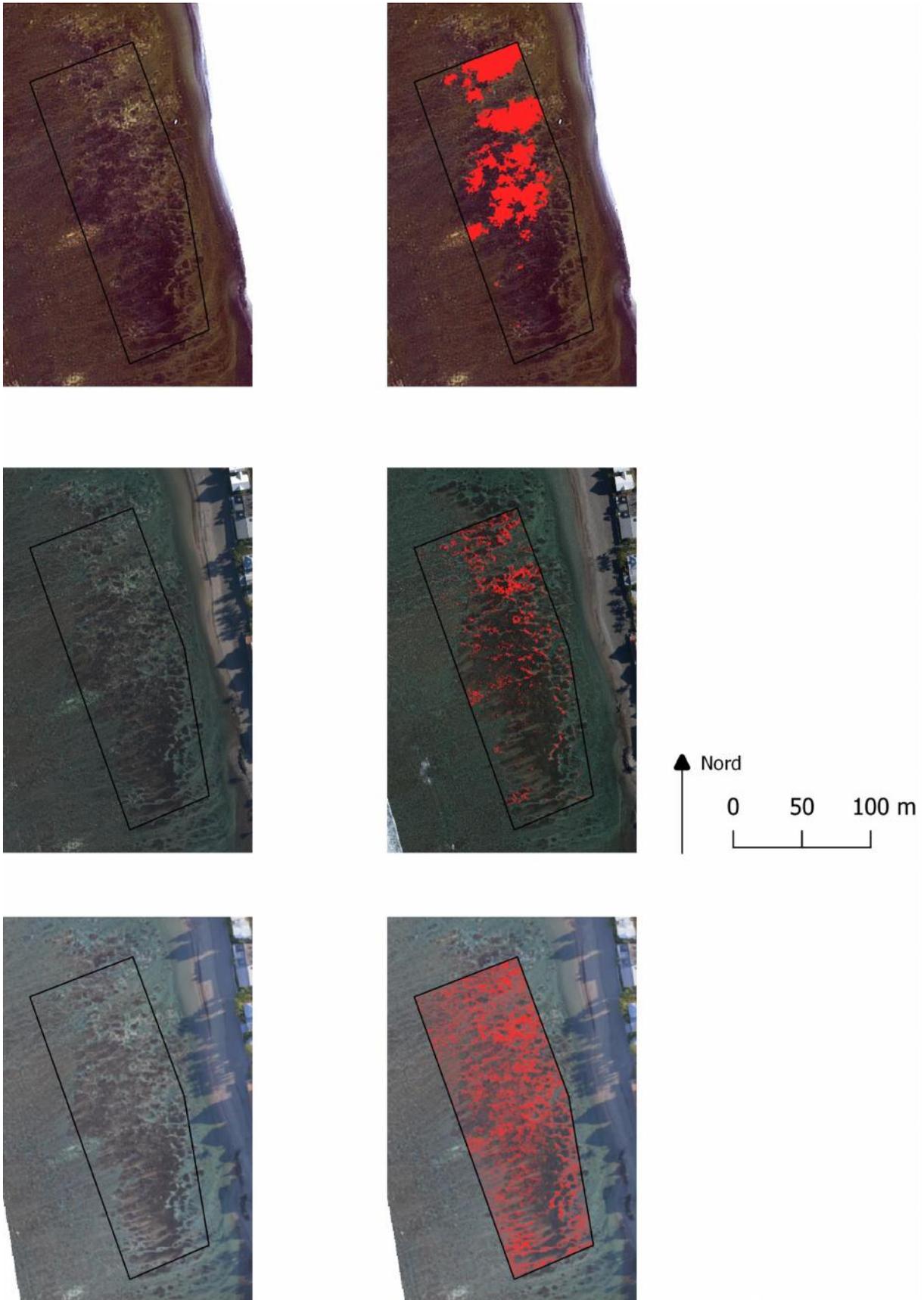


Figure 35 : Carte du blanchissement (en rouge) sur la zone de La Varangue (Saint-Leu) à partir de l'image pléiades (a) de l'image ULM (b) et de l'image drone (c) où l'on voit clairement une surestimation du blanchissement car prise en compte du wave focusing.

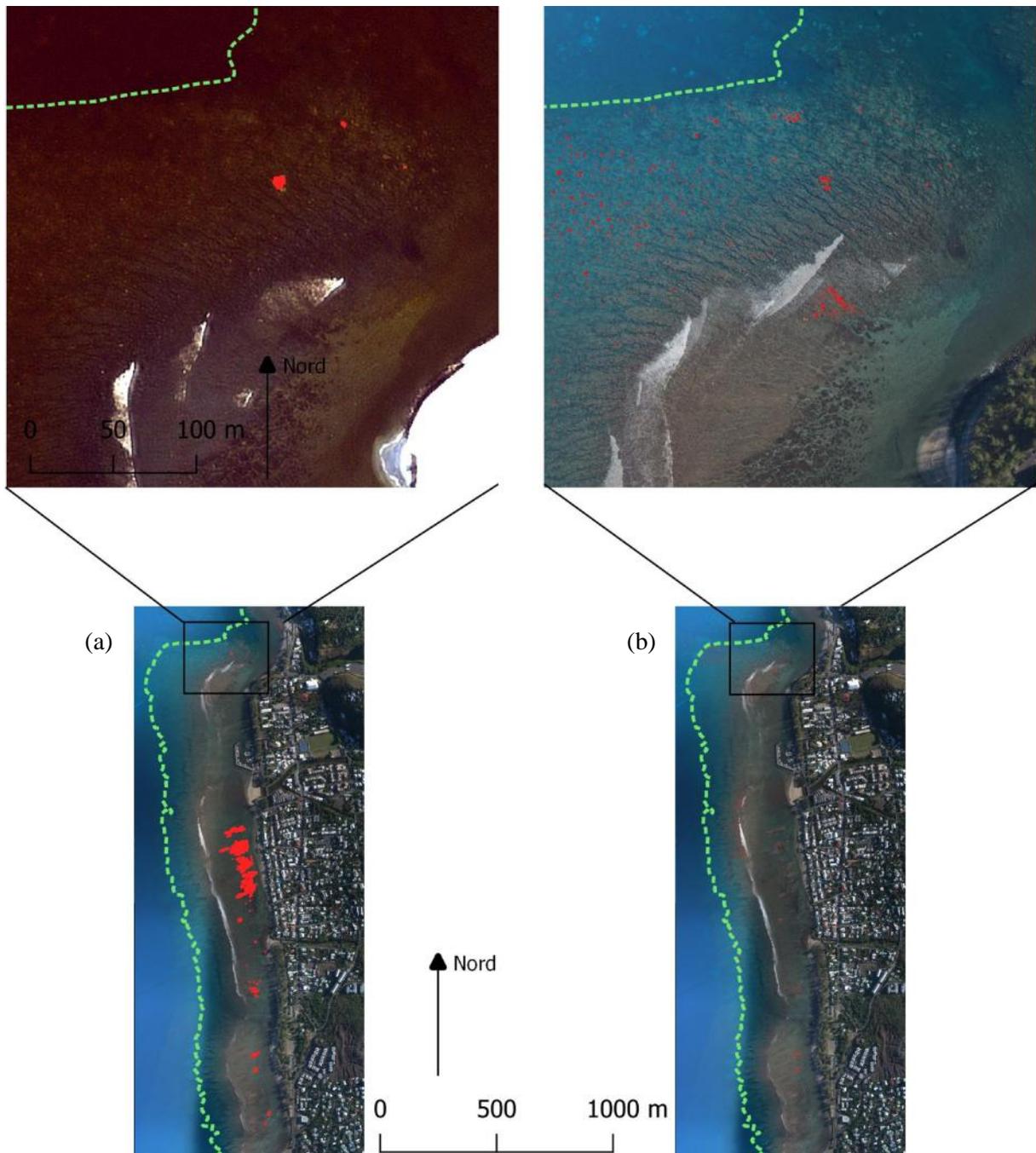


Figure 36 : Carte du blanchissement (en rouge) sur la zone Saint-Leu à partir de l'image pléiades (a) et de l'image ULM (b). Vu la petite taille des polygones sur l'image ULM, la plupart ne sont pas visibles à cette échelle.

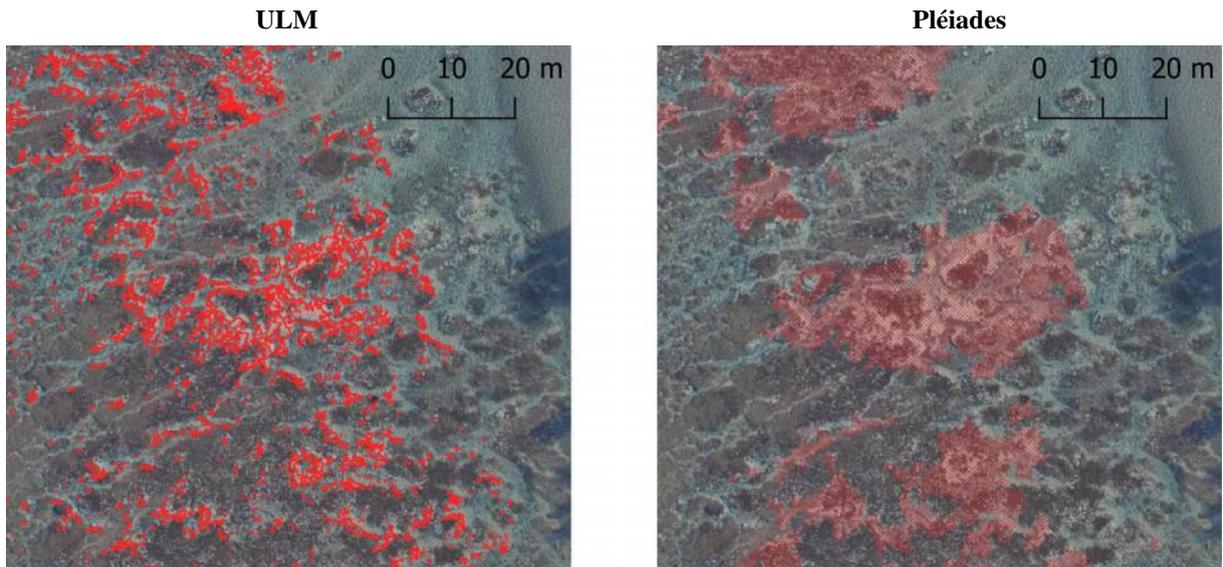


Figure 37 : Exemple de cartographie du blanchissement (hachuré en rouge) réalisée à partir de l'image ULM (à gauche) et de l'image Pléiades (à droite)

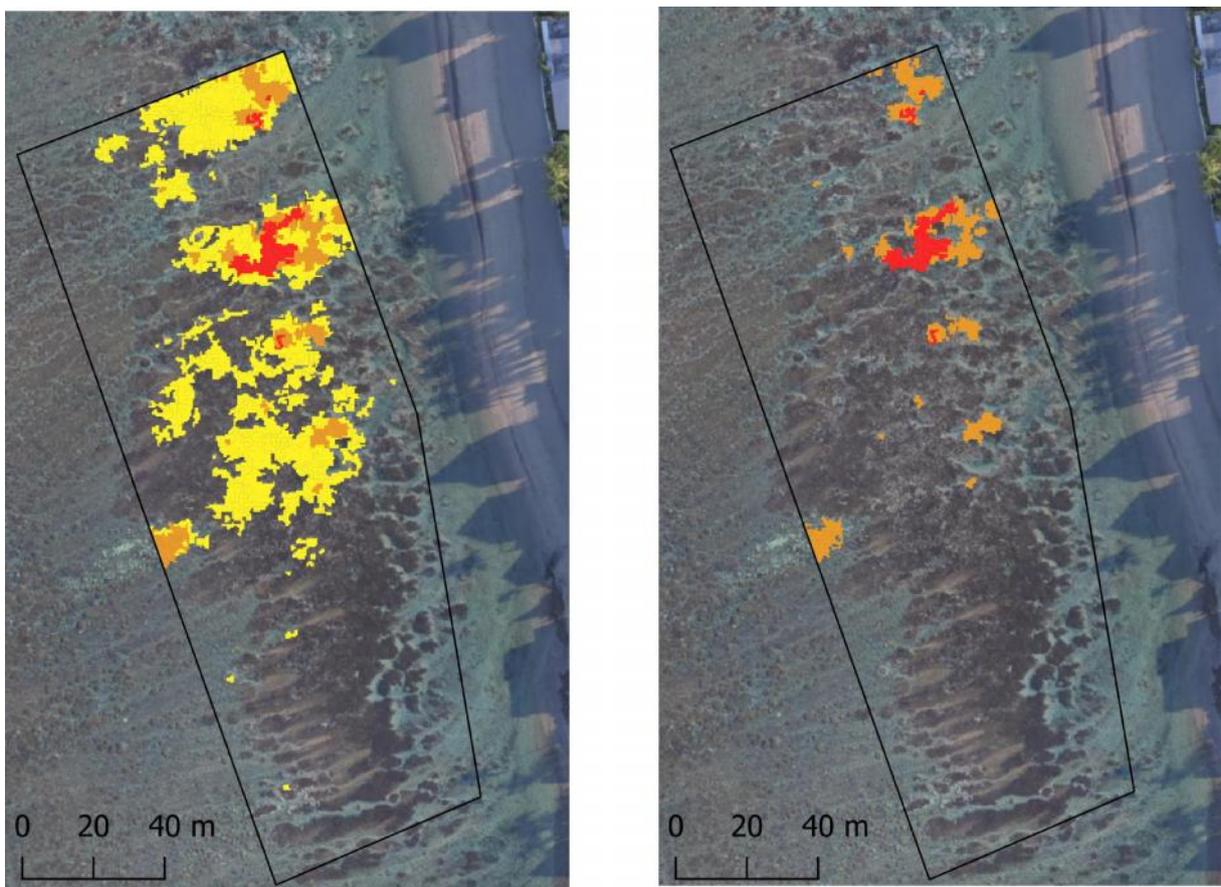


Figure 38 : Cartographie du blanchissement réalisée à partir de l'image Pléiades avec à gauche trois niveaux d'intensité du blanchissement (jaune : faible, orange : moyen, rouge : élevé) et à droite uniquement les niveaux moyen et élevé, les plus représentatifs de la "réalité terrain"

Tableau 10 : Avantages et inconvénients des différents types d'image utilisées et méthodes employées pour la cartographie du blanchissement

Image (résolution spatiale)	Méthode de traitement	Avantages	Inconvénient	Amélioration possible
Pléiades (0,5m)	Analyse multidate + approche orientée objet	1/ Englobe l'ensemble des récifs coralliens de La Réunion 2/ Acquisition pour le moment incluse dans des programmes (coût nul pour le gestionnaire) 3/ Acquisition d'image à une fréquence temporelle élevée possible	1/ Résolution spatiale faible (par rapport aux images drone et ULM) pixel : 0,5m de côté 2/ Du fait de la résolution, difficulté pour cartographier le blanchissement sur la pente externe	1/ Lancement en 2020 et 2022 de Pléiade Néo plus performant et avec une résolution spatiale plus importante : pixel 0,3m de côté
ULM (0,1m)	Classification supervisée	1/ Englobe l'ensemble des récifs coralliens de La Réunion 2/ Acquisition pour le moment incluse dans des programmes (coût nul pour le gestionnaire) 3/ Résolution spatiale élevée (pixel : 0,1m de côté)	1/ Acquisition d'image à une fréquence temporelle élevée contraignante 2/ Cartographie du blanchissement par classification supervisée rendue difficile par la signature spectrale proche entre les colonies coralliennes blanchies et le substrat sableux 3/ Potentiel "wave focusing"	Pour le traitement de l'image 1/ Procéder selon la même méthode que pour les images Pléiades (nécessite d'acquérir une image avant l'épisode de blanchissement ou 2/ Séparer l'ensemble du récif en de nombreux sous secteurs pour les zones d'apprentissages et de traitements 3/ Acquisition tôt le matin pour éviter "wave focusing"
Drone (0,05m)	Classification supervisée	1/ Résolution spatiale élevée (pixel : 0,1m de côté)	1/ Pas de possibilité à un coût raisonnable de survoler l'ensemble des récifs coralliens 2/ Acquisition d'image à une fréquence temporelle élevée contraignante 3/ Cartographie du blanchissement par classification supervisée rendue difficile par la signature spectrale proche entre les colonies coralliennes blanchies et le substrat sableux 4/ Potentiel "wave focusing"	Pour le traitement de l'image 1/ Procéder selon la même méthode que pour les images Pléiades (nécessite d'acquérir une image avant l'épisode de blanchissement ou 2/ Séparer l'ensemble du récif en de nombreux sous secteurs pour les zones d'apprentissages et de traitements 3/ Acquisition tôt le matin pour éviter "wave focusing"

5.1.4 Essai de cartographie de la mortalité suite au blanchissement à partir des images ULM

Pour tenter de quantifier la mortalité suite à l'épisode de blanchissement une image ULM a été acquise en septembre 2019. Cette acquisition a été couplée avec une vérité terrain pour permettre de distinguer les coraux vivants des coraux morts (Figure 39).

Si à l'image il est alors possible de différencier les zones vivantes des zones mortes (Figure 40), la forte variabilité spectrale des coraux vivants et la proximité de leur signature spectrale avec soit des coraux morts, soit avec le substrat détritique rend délicat une classification supervisée.

Afin d'améliorer cette classification, nous avons alors procédé à la classification uniquement sur les zones détectées blanchies en avril 2019, éliminant de ce fait les zones de substrat détritique. La classification est alors plus aisée puisque ne comportant plus que 2 classes : corail vivant et corail mort. **Ainsi, pour le secteur de La Varangue, 25% des coraux détectés blanchis en avril 2019 sont identifiés comme morts en septembre 2019 (Figure 41).**

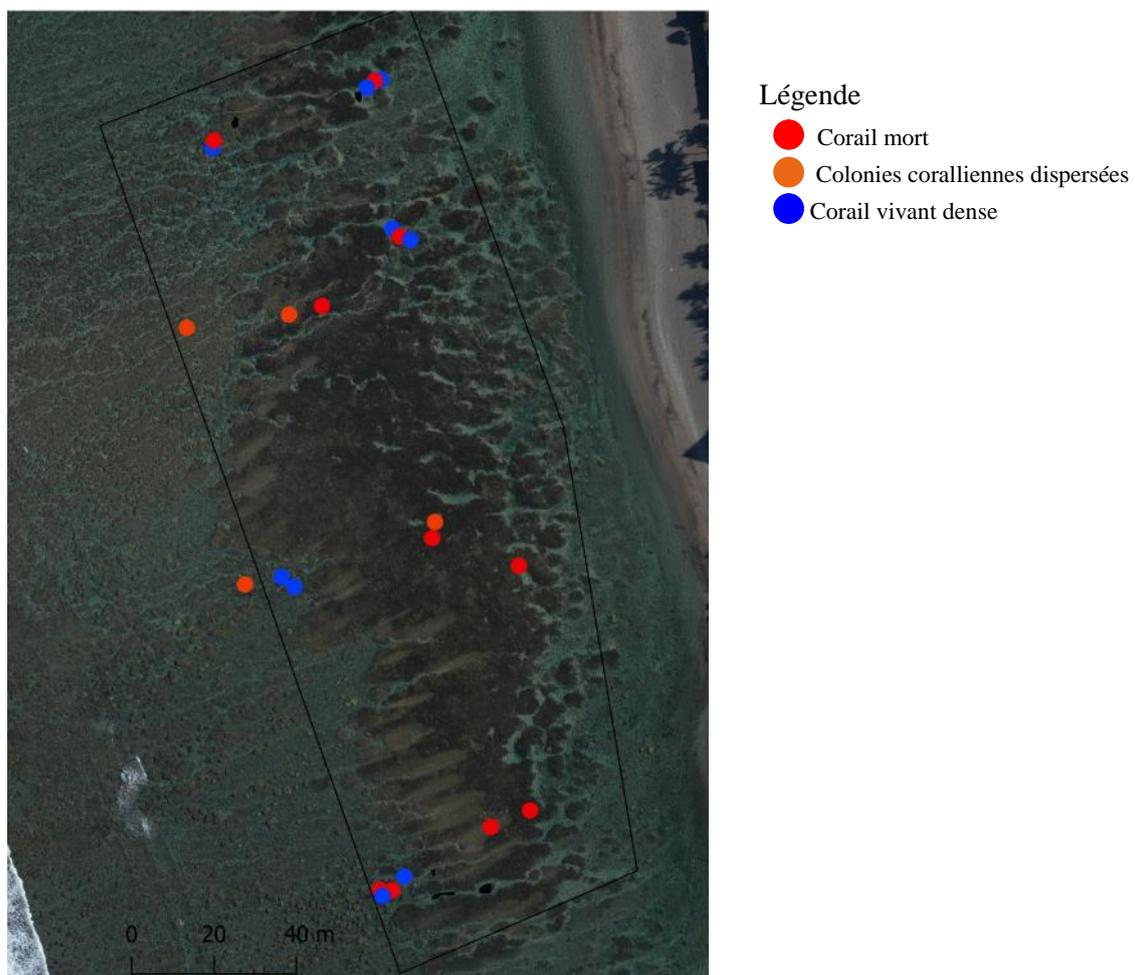


Figure 39 : Plan d'échantillonnage et résultats de la vérité terrain de septembre 2019

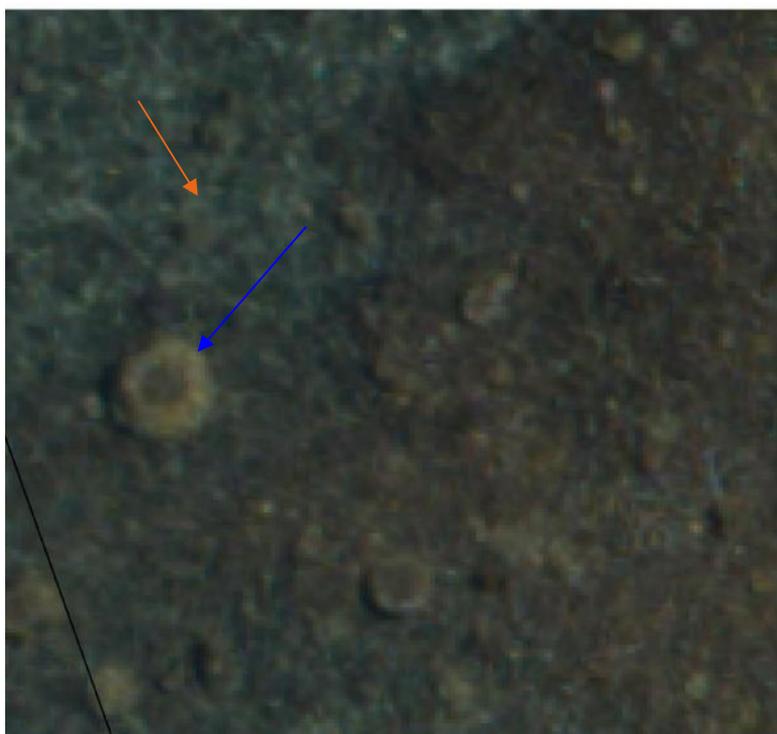
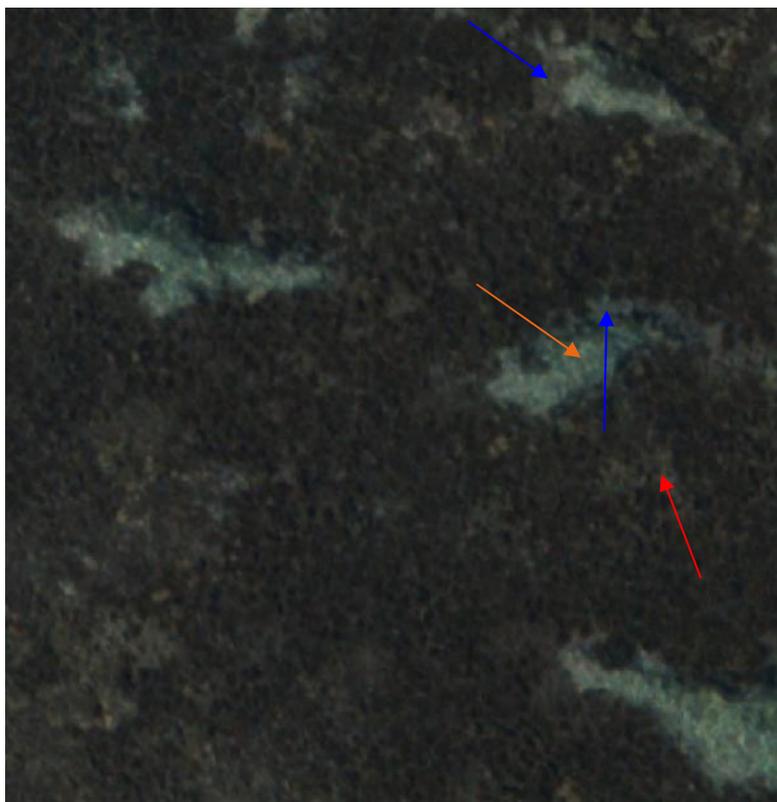


Figure 40 : Illustration des signatures spectrales proches entre les coraux vivants (flèches bleues), des coraux morts (flèches rouges) et le substrat détritiques (flèches orange)

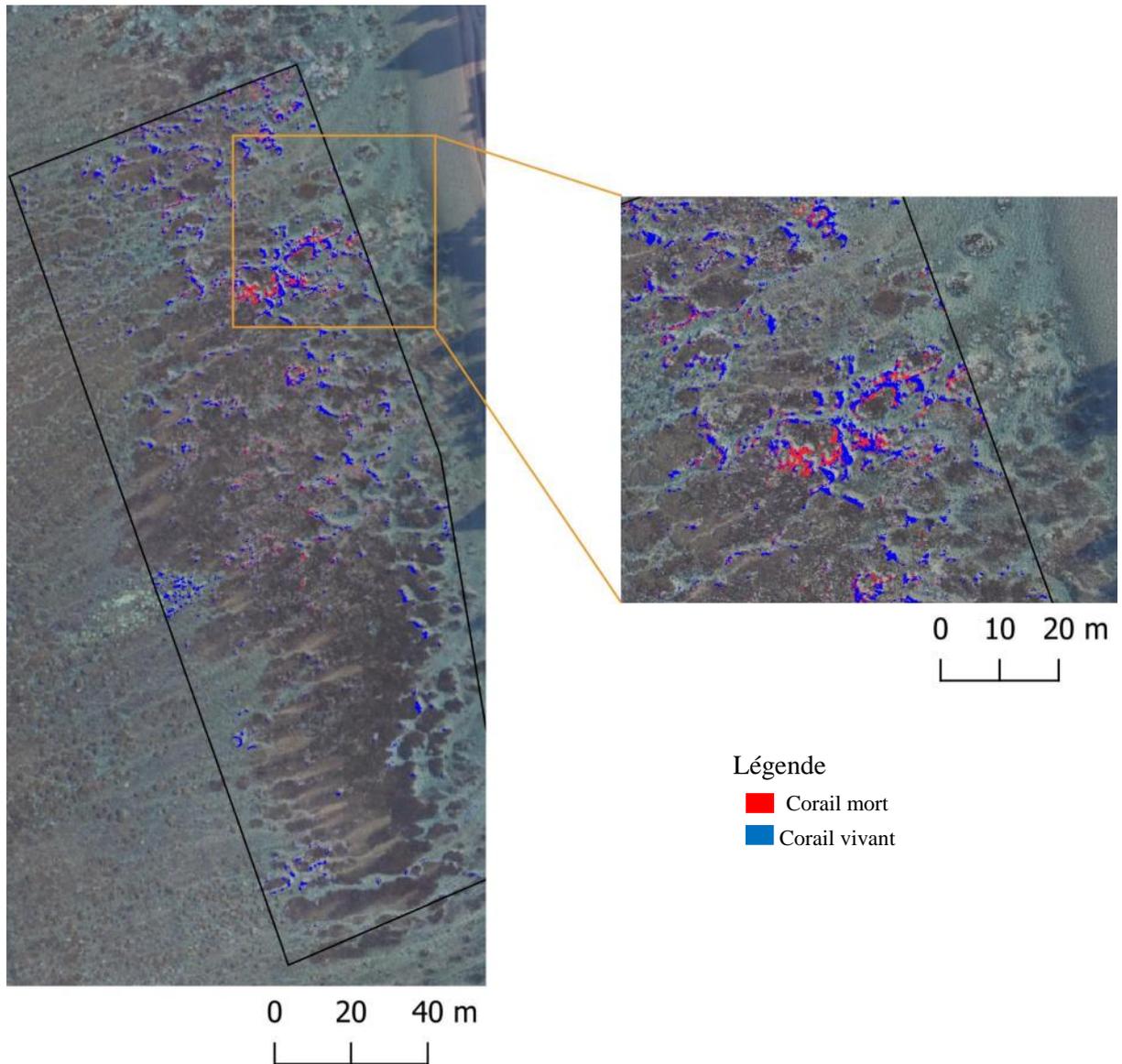


Figure 41 : Coraux morts et vivants en septembre 2019 après avoir blanchi en avril 2019 sur la zone de La Varangue)



6 SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

6.1 Synthèse

Il ressort du programme BECOMING2 sur l'évaluation du phénomène de blanchissement survenu à La Réunion en 2019 :

-) Un DHW (risque de blanchissement) le plus élevé en avril 2019 depuis 1985 ;
-) Un blanchissement important (40% de la couverture corallienne sur la pente externe et les platiers) mais une mortalité faible à moyenne (15% sur les platiers et 12% sur la pente externe) ;
-) Les genres les plus touchés sont les *Acropora*, *Montipora*, *Millepora* et *Porites* (uniquement sur la pente externe pour ces derniers) ;
-) Sur la pente externe les genres dominants *Pocillopora* et *Astreopora* n'ont pas été touchés ce qui risque de favoriser leur dominance au détriment des *Porites* et *Acropora* aggravant le déséquilibre des peuplements coralliens sur la pente externe ;
-) Une carte des coraux blanchis a été réalisée à partir des images Pléiades en accord avec les observations terrains pour la répartition du blanchissement. La superficie totale blanchie cartographiée est en revanche à prendre avec précaution, notamment la comparaison avec les surfaces déterminées en 2016, car elle dépend des seuils choisis pour la détection du blanchissement ;
-) Une comparaison entre les trois types d'images a été réalisée. Il en ressort que les images Pléiades et ULM sont les types d'images à privilégier ;

-) Enfin, pour la première fois il a été possible d'évaluer la mortalité à l'aide des images ULM sur un site pilote.

6.2 Les prévisions pour 2020 et 2030-2050

6.2.1 2020

Pour la saison chaude 2019/2020, les prévisions de la NOAA indiquent un risque élevé (alerte niveau 2, risque maximum Figure 42) pour avril 2020. **Il convient donc d'ores et déjà d'alerter les différents acteurs** (scientifiques, RNMR, association) pour faire remonter les futures observations de blanchissement potentielles. **Il conviendrait également de mettre en place un suivi qui ne serait déclenché que si le blanchissement est important.**

6.2.1 2030-2050

Le phénomène de changement climatique aura un effet sur l'occurrence des événements de blanchissements massifs avec une augmentation de leur nombre (et de leur intensité). L'étude menée par Donner et *al.* 2009, indique des probabilités d'occurrence d'alerte niveau 2 (NOAA coral Reef watch) pour la zone Sud-Ouest de l'océan Indien de tous les 2-3 ans pour 2030 et tous les 1-2 ans vers 2050 (Figure 43). Dans ce contexte il est impératif de prendre en compte ces phénomènes dans la gestion des récifs coralliens et d'essayer par des mesures de gestion d'augmenter la résistance et/ou la résilience des récifs réunionnais aux événements de blanchissement.



Tromelin and Reunion, France Bleaching Alert Area (v3.1) and Outlook (v5)
2020-01-13

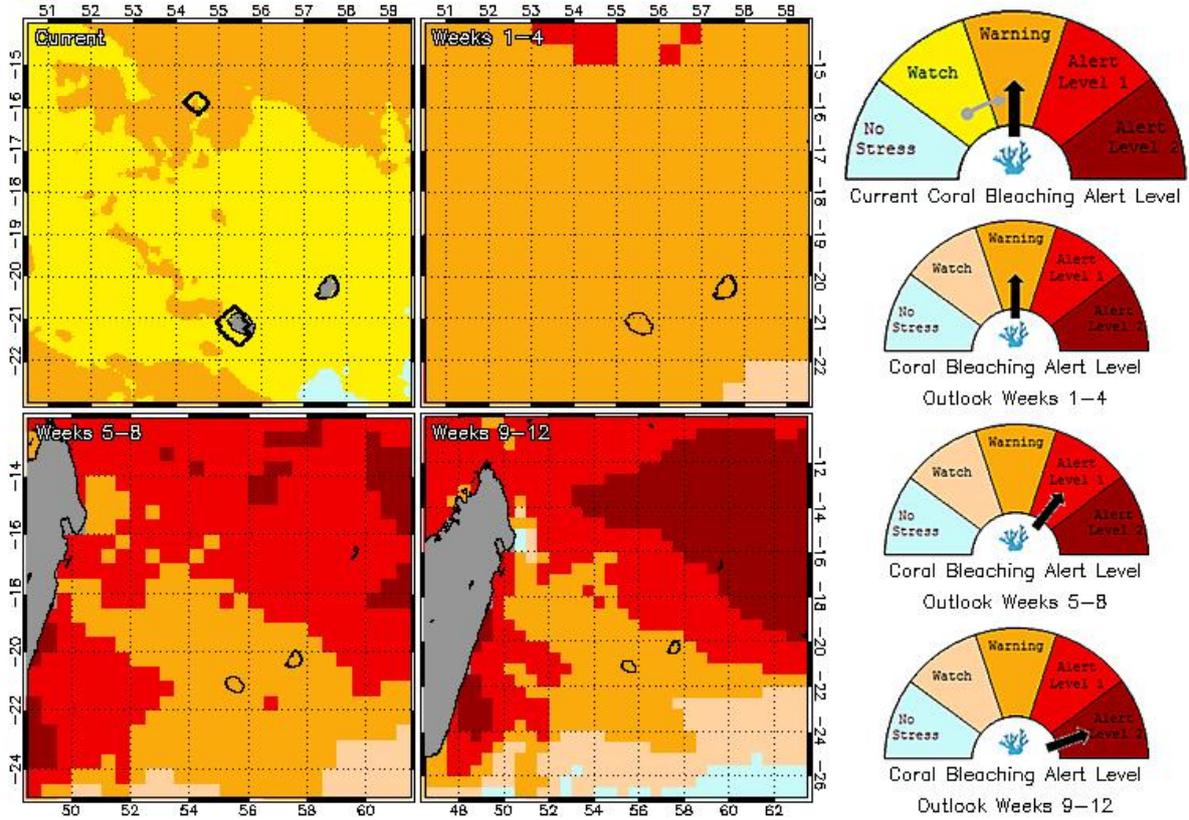


Figure 42 : Prédiction du risque de blanchissement à La Réunion/Tromelin entre le 14 janvier et le 14 avril (NOAA/Coralreefwatch)

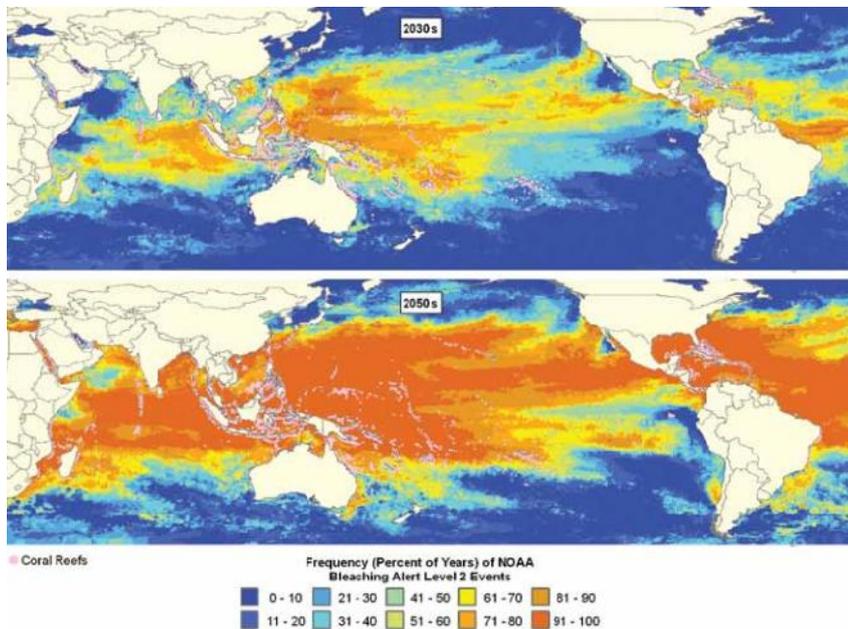


Figure 43 : Prédiction (en pourcentage) du risque de blanchissement annuel par décennie en 2030 (en haut) et 2050 (en bas) où l'alerte de niveau 2 sera déclenchée dans le cadre du suivi NOAA Coral Reef Watch. Scénario IPCC : A1B ("Business as-usual"). D'après Reef at Risk, 2011 / Donner et al., 2009

6.3 Exemples de mesures permettant d'augmenter la résistance/résilience d'un récif au blanchissement corallien

Devant l'augmentation probable des phénomènes de blanchissements (en lien avec le changement climatique) il est important de prendre toutes les mesures nécessaires permettant d'augmenter la capacité de résistance/résilience d'un récif.

Ainsi pour augmenter la résistance d'un récif (capacité d'un récif à résister au blanchissement et avoir une mortalité *in fine* faible), les actions suivantes peuvent être mises en place (d'après Obura et Gudka, 2016) :

-)] Durant l'épisode de blanchissement renforcer la protection des zones les plus touchées ;
-)] Gérer la pêche côtière récifale. En effet, une pêche trop importante aura comme effet de déstructurer les communautés de poissons et, indirectement, par effet cascade, les peuplements coralliens ;
-)] Avoir une eau de mer de bonne qualité (nutriments, matière organique, turbidité). A titre d'exemple, limiter les travaux de dragage ou susceptibles d'entraîner une augmentation significative de la turbidité de l'eau en période de blanchissement.

D'un autre côté, pour augmenter la résilience d'un récif (capacité d'un récif à retrouver des peuplements coralliens en bonne santé après

une forte mortalité liée au blanchissement), les actions suivantes peuvent être mises en place :

-)] Protéger les sites qui ont résisté au blanchissement pour qu'ils puissent être des zones sources en termes de larve des organismes coralliens. ;
-)] Limiter les pressions sur les récifs (qualité de l'eau, pêche, espèces invasives, ...);
-)] Dans certains cas bien spécifiques, envisager de la transplantation corallienne ;
-)] Construire le réseau d'AMP en prenant en compte la connectivité des zones.

Quoi qu'il en soit, il est impératif d'impliquer tous les acteurs et usagers concernés afin que l'intérêt des mesures prises soit bien compris et celles-ci acceptées. Le tableau ci-dessous résume les raisons d'impliquer les différents types d'acteurs, les mesures pouvant être prises et les moyens de communication avec les différents usagers.

Tableau 11 : Raisons d’impliquer les différents usagers et mesures de gestion pouvant être mis en place avec les différents acteurs (d’après Obura et Gudka, 2016)

Stakeholder (s)	Reasons to engage	Management actions	Communication methods
Fishermen	Explain new management measures/regulations e.g. closure of fishing around reefs, ban on certain key herbivore fish species	<ul style="list-style-type: none"> • Development of alternative livelihoods • Compensation • Educating communities as to why new measures need to be implemented 	<ul style="list-style-type: none"> • Community stakeholder meetings pre-implementation • Posters/videos
Tourist operators	Explain new management measures/regulations e.g. temporary closure of reefs, stricter regulations on tourist numbers	<ul style="list-style-type: none"> • Alternate businesses and livelihoods • Compensation • Educating businesses as to why stricter measures need to be implemented 	<ul style="list-style-type: none"> • Community stakeholder meetings
Local NGOs + Researchers	<ul style="list-style-type: none"> • Exchange of bleaching data • Discuss ideas for management strategies • Discuss possible monitoring collaborations 	<ul style="list-style-type: none"> • Joint efforts with managers to perform monitoring • Sharing expertise and data • Joint interventions with stakeholders 	<ul style="list-style-type: none"> • Emails • Meetings
Local government + decision makers	Implement stricter regulations on: <ul style="list-style-type: none"> • Fisheries • Coastal development • Pollution levels 	<ul style="list-style-type: none"> • Foster multi-sectoral approaches to limit compounding stresses • Formulate new guidelines and regulations based on situation • Enforce new regulations 	<ul style="list-style-type: none"> • Inter-sectoral committees • Meetings (Stakeholder) • Email/social media • Reports & factsheets
General Public	Raise public awareness of the issues	<ul style="list-style-type: none"> • Contact local media • Events, e.g. school competitions 	<ul style="list-style-type: none"> • Social media • Local media

6.4 Recommandations pour les prochains suivis

Concernant le suivi des événements, il conviendrait de :

-) Pérenniser le réseau de sondes de température disposées à l'heure actuelle sur l'ensemble des récifs frangeants de La Réunion, quitte à l'alléger si nécessaire ;
-) Mettre en place dès à présent sur une des zones les plus impactées un suivi de la résilience des coraux et un suivi de la faune/flore associée. Il est en effet important de prendre conscience que la dégradation des colonies coralliennes qui découle des épisodes de blanchissement, va entraîner, notamment si elle se reproduit régulièrement, une modification

profonde de l'habitat et, de fait, des organismes qui y trouvent refuge et nourriture. Un suivi de l'impact des phénomènes de blanchissement sur ces organismes est crucial pour appréhender quelle est la réponse des communautés associées aux coraux. La priorité doit être accordée aux peuplements coralliens (pour caractériser la résilience) et aux peuplements ichthyologiques, les poissons représentant un enjeu fondamental au niveau économique (pêche et éco-tourisme) mais également au niveau écologique (rôle des poissons dans la résilience des récifs).



7 REFERENCES

Bigot, L., & Quod, J. P. (2000). Coral bleaching in the Indian Ocean islands: Ecological consequences and recovery in Madagascar, Comoros, Mayotte and Reunion.

Commission de l'océan Indien (2016) Guide de suivi du blanchissement des coraux Ouest de l'océan Indien - 2016 Compilé par David Obura. Projet Biodiversité, Commission de l'océan Indien. 12 pages.

Conand C., Lame M., Quod J.P., Conand F. et Turquet J., 2000. Proceedings 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia 23-27 October 2000. Vol. 2 pp1155-1159.

Donner, S. 2009. "Coping with Commitment: Projected Thermal Stress on Coral Reefs under Different Future Scenarios." PLoS ONE 4: e5712.

Guillaume M., Turquet J., Bruggemann H., Cauvin, B., 2005, Cambert H., Nicet J.B., 2005. Le blanchissement des coraux à La Réunion en 2005. Réseau récifs. 30 pages.

Guillaume M., Cambert H., Pribat B., Cauvin, B., Nicet J.B., Bruggemann H, 2010. Le blanchissement des coraux à La Réunion en 2009. Réseau récifs, pour le compte de la RNMR 41 pages.

Nicot J.B., Wickel J., Pinault M., Jean Turquet, 2019. Suivi de la température marine 2015-2019 sur les platiers et pentes externes des récifs frangeants de La Réunion. Note technique MAREX pour le compte de la RNMR, 28 pages + annexes.

Nicot J.B., Pennober G., Burcklen M., Wickel J., Bigot L., Chabanet P., Obura D., 2016. Intensité et impact du blanchissement corallien massif de 2016 sur les récifs coralliens français de l'océan Indien. Projet BECOMING 2016. Rapport MAREX, ESPACEDEV, ENTROPIE, UR, IRD, SEAS-OI, CORDIO, AAMP, PNMM, PNMG, TAAF, RNMR, DEAL Réunion, RNB, IFRECOR, UE, 89 pages

Nicot J.B., Hedouin L., Marechal J.P., Vii J, Adjerooud M., Benzoni F., Bigot L., Chabanet P., Payri C., L. Penin, Pennober G., Pinault M., Wickel J., 2019. Guide à l'attention des gestionnaires des Outre-mer français pour le suivi environnemental des épisodes de blanchissement corallien et l'évaluation de leurs impacts sur le peuplement corallien. Rapport MAREX/CRIOBE/BNE/ENTROPIE/ESPACE-DEV pour le compte de l'IFRECOR, 57 pages.

Nicot J.B. & Turquet J., 2004. Réponse à un phénomène de blanchissement corallien observé en 2004 à La Réunion. Rapport ARVAM pour le compte de la DIREN. 27 pp.

Obura D., Gudka M., 2016. Overview of the 2016 WIO Bleaching Event & Discussion on Bleaching Management Planning. Webinar, 28 septembre 2016. <http://www.reefresilience.org/overview-of-the-2016-wio-bleaching-event-discussion-on-bleaching-management-planning/>

Quod, J. P., Dahalani, Y., Bigot, L., Nicet, J. B., Ahamada, S., & Maharavo, J. (2002). Status of coral reefs at Reunion, Mayotte and Madagascar. Coral Reef Degradation in the Indian Ocean, 185.

Turquet J., Garnier R., Quod J.P., Bigot L., Moyne-Picard M., Naim O., Cauvin B., 2003. Réponse au phénomène de blanchissement corallien observé en 2003 à La Réunion. Rapport pour le compte de la DIREN Réunion. 35 pages.

Turquet J., Mirault E., Conand C., Conand F., Rard M., Cambert H., Quod J.P., 2001. Réponse au phénomène de blanchissement corallien observé en mars-avril 2001 à La Réunion. Rapport pour le compte du Parc Marin de La Réunion. 35 pages.



8 ANNEXES

Annexe 1 : Méthode pour la cartographie du blanchissement

Description synthétique de la
méthode par Analyse Orientée
Objet et analyse multi-dates
(images Pléiades)

Cette méthode a été utilisée sur les images satellites. Elle comporte globalement 5 étapes (ci-dessous) :

-) La calibration des images Pléiades XS ORTHO TOA (raster) ;
-) Le calcul d'indice et différence d'indice de brillance (raster) : mise en évidence des zones de changement ;
-) La découpe des zones d'intérêts : Saint-Gilles, Saint-Leu, Etang-Salé, Saint-Pierre (raster);
-) La segmentation sur les images pansharpened (vecteur) ;
-) La classification et l'extraction des zones de blanchissement pour la cartographie (vecteur).

La description détaillée de la méthode figure dans le volet 1 "Améliorer la détection du blanchissement corallien à la Réunion à partir d'images satellites THRS Pléiades" du rapport "Suivi du blanchissement corallien par des méthodes de télédétection - Analyse de données satellite haute résolution PLEIADES et SENTINEL 2" d'Espace-Dev (2019).

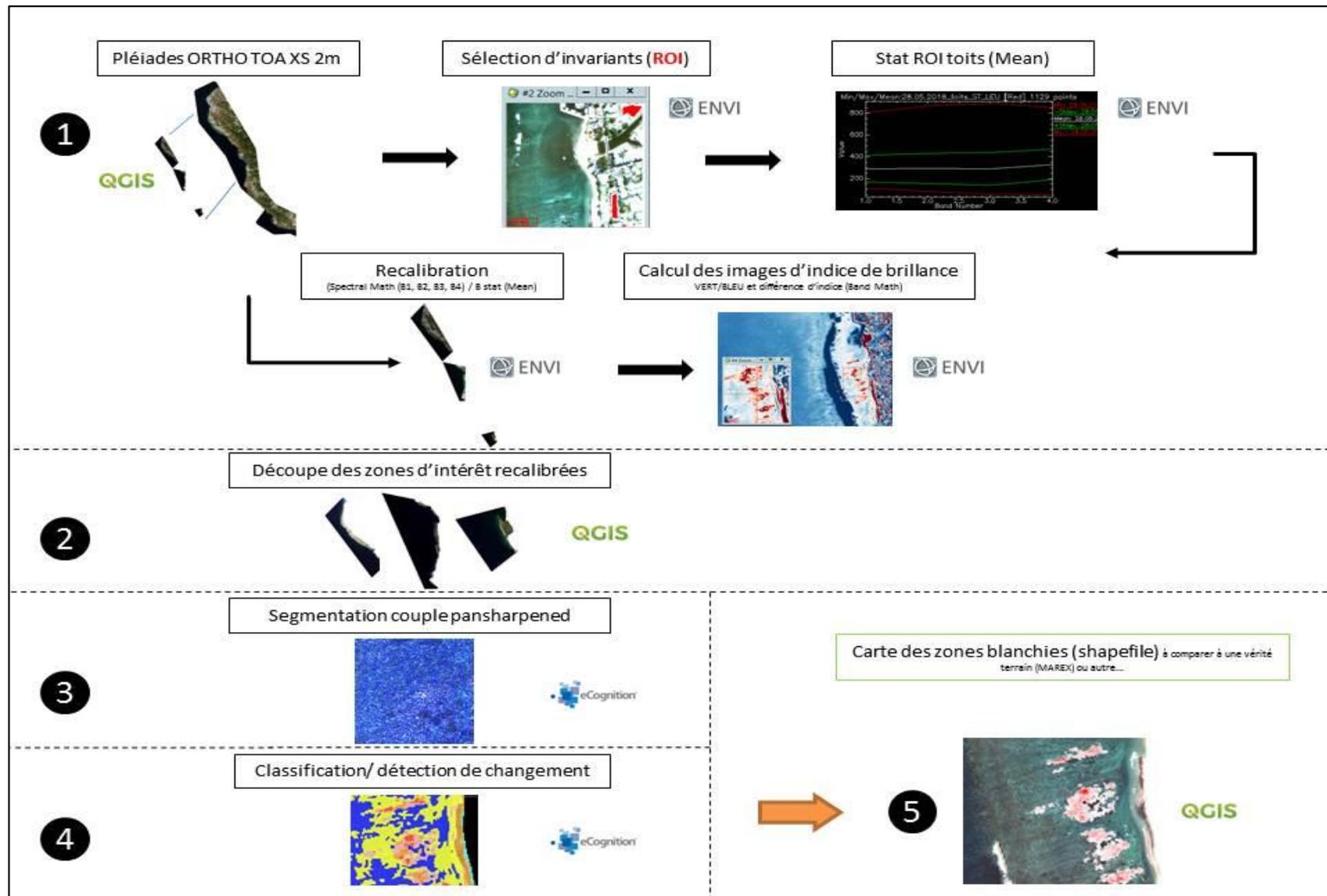


Schéma de synthèse de la méthode pour la cartographie des zones blanchies (altération du signal)

Description synthétique de la méthode par analyse multi date (images Sentinel 2)

La période d'étude s'étend sur deux années du 1er décembre 2017 au 19 octobre 2019 pour une meilleure interprétation des résultats.

Comme pour le travail de cartographie réalisé à partir des données Pléiades, le suivi du blanchissement a été fait par l'analyse de l'indice de brillance bleu-vert.

Le but de la méthode étant de montrer les capacités des images Sentinel 2 à détecter et suivre la dynamique du blanchissement à La Réunion, le suivi a été réalisé sur des petites

zones tests, dans lesquelles le blanchissement a été particulièrement important, ainsi que sur des invariants terrestres pour comparaison (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

La description détaillée de la méthode figure dans le second volet "Becoming 2 - analyse des données Sentinel 2" du rapport "Suivi du blanchissement corallien par des méthodes de télédétection - Analyse de données satellite haute résolution PLEIADES et SENTINEL 2" d'Espace-Dev (2019).



Saint-Leu

Saint-Gilles



Etang Salé



Saint-Pierre



Localisation des différents points de suivi. En haut sur le secteur de Saint-Leu, polygones jaunes principale zone de blanchissement sur laquelle des statistiques spatiales ont été calculées. Points bleus (corail blanchis) et orange (sable détritique de la DAR). En bas de gauche à droite, points suivis sur les secteurs de Saint-Gilles, l'Etang-Salé et Saint-Pierre, en jaune épices de zone de fort blanchissement, en rouge invariants terrestres émergés.

Description synthétique de la méthode par classification supervisée (images drones et ULM)

Cette méthode a été utilisée sur les images ULM et drones.

La classification supervisée permet une classification de chaque pixel selon sa signature spectrale en fonction des classes et des zones d'apprentissage définies par l'utilisateur.

Dans la présente étude 3 ou 4 classes ont été

définies selon les secteurs d'étude : (i) substrat détritique, (ii) platier détritique ou dalle, (iii) corail vivant/algue, (iv) pente externe, et enfin (v) corail blanchi.

Les zones d'apprentissages sont des groupes de pixels choisis par le producteur de la carte auxquels il attribue la classe. Dans un second temps, une classification par distance minimale est appliquée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

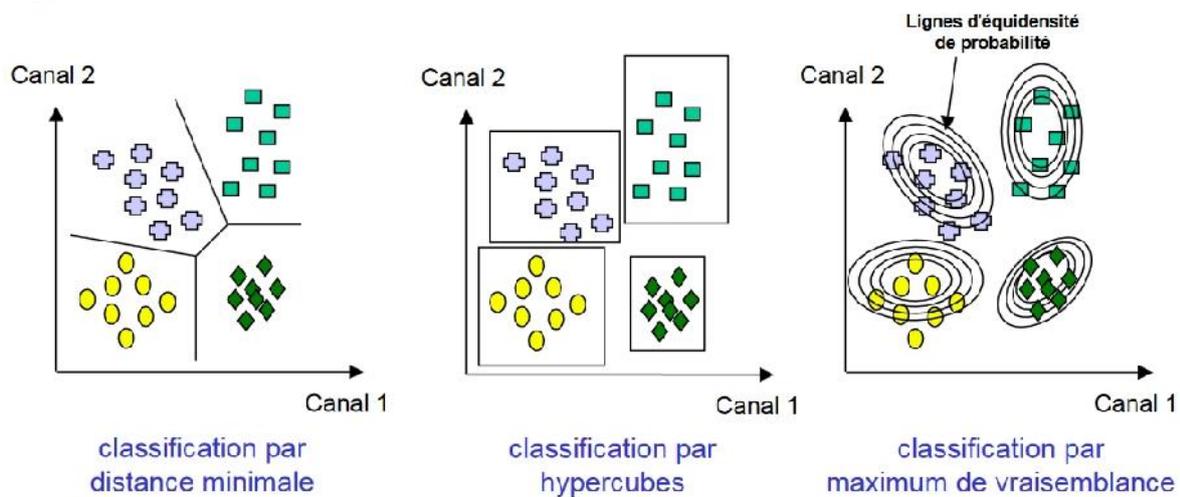


Illustration de 3 méthodes de classification supervisée (celle utilisée dans la présente étude est celle de la distance minimale)