



Sciences de la mer | Biologie marine

Rapports scientifiques et techniques N°67

Novembre 2017



Plan d'action rapide et adaptatif, en cas de blanchissement corallien : Le cas de la Nouvelle-Calédonie, épisode 2016, synthèse

Francesca **BENZONI**, Fanny **HOULBREQUE**Laure Vaitiare **ANDRÉ**, Claude **PAYRI**

Une science engagée pour un fufur durable Science for a sustainable future

www.nouvelle-caledonie.ird.fr

Centre IRD de Nouméa BP A5 101 Promenade Roger Laroque 98848 Nouméa cedex Nouvelle-Calédonie

Tél.: +687 26.10.00 Fax: +687 26.43.26 © IRD - Nouméa, 2017.

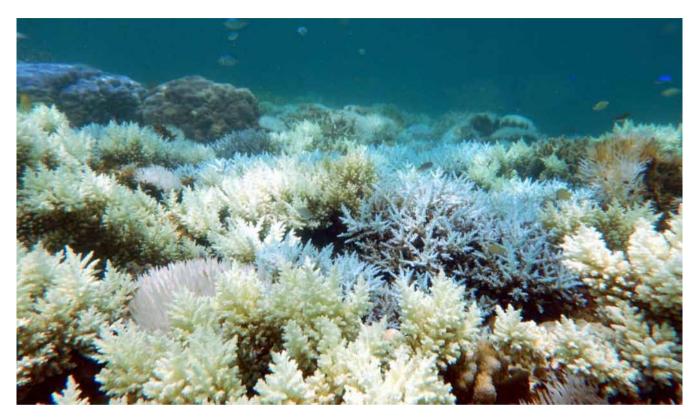
/Benzoni, Francesca *

* ENTROPIE UMR 250

Benzoni F., Houlbrèque F., André L., Payri, C.E. 2017. Plan d'action rapide et adaptatif, en cas de blanchissement corallien : Le cas de la Nouvelle-Calédonie, épisode 2016, synthèse. 90 pages

Nouméa : IRD, novembre 2017. 90 p. multigr. Sciences de la Mer. Biologie Marine. Rapports Scientifiques et Techniques ; 67

BLANCHISSEMENT CORALLIEN, NOUVELLE-CALÉDONIE, GUIDE MÉTHODOLOGIQUE; ATLAS D'ESPÈCES; CORAUX SCLÉRACTINIAIRES, ZOOXANTHELLES, RÉSILIENCE





Projet Blanco



Plan d'action rapide et adaptatif, en cas de blanchissement corallien : Le cas de la Nouvelle-Calédonie, épisode 2016 Synthèse

Convention N° DAFE/ENV/2016-9 du 22 nov. 2016

Convention de subvention Ministère des outre-mer du 25 octobre 2016

Résumé exécutif

Les récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie ont connu au cours de l'été austral 2016 un épisode massif de blanchissement corallien dont les premiers symptômes ont été observés dès la mi-février 2016. Grâce au soutien financier de l'IRD, de l'IFRECOR/DAFE et du Ministère des outremer, un co-financement a permis à plusieurs UMRs implantées au centre IRD de Nouméa et sous la coordination de l'UMR ENTROPIE d'entreprendre l'étude du phénomène à l'appui d'un suivi sur une période de 12 mois.

Le présent rapport fournit les principaux résultats qui sont réunis en 5 livrables. Une cartographie du phénomène à l'échelle de l'archipel Calédonien, abondamment illustrée montre l'importance du phénomène en relation avec les conditions météorologiques du moment, notamment sur les récifs frangeants et lagonaires de la grande Terre et tous les récifs des atolls d'Entrecasteaux.

Un guide décrivant précisément la méthode mise en place pour l'occasion, basée sur des observations le long de lignes transects permanentes, sur les colonies imagées et dont l'évolution de la santé a été suivie mois après mois durant une année; une analyse des avantages et des inconvénients est également proposée avec des recommandations pour améliorer le protocole à la lumière de l'expérience acquise.

L'impact du phénomène est décrit à l'échelle de l'espèce dans un atlas en 18 planches couleur, organisées par familles et illustrant les 161 espèces ayant montré une sensibilité au stress avec une échelle d'intensité du blanchissement. La dynamique du blanchissement est analysée à l'échelle des communautés dans une étude de l'évolution spatio-temporelle depuis les premiers signes de blanchissement jusqu'à la récupération ou la mortalité des colonies à l'appui d'histogrammes retraçant la dynamique du phénomène site par site. Quatre mois après le début du blanchissement 80 % des coraux avaient récupéré leur état de santé ; un an plus tard moins de 20 % des coraux étaient morts avec quelques impacts sur le paysage corallien.

Finalement, un suivi temporel physiologique des colonies coralliennes sélectionnées dans leur habitat naturel s'attache à décrire la réponse au stress au niveau de la relation intime entre le corail et les algues symbiotiques. L'utilisation d'un PAM a révélé un second épisode de blanchissement de faible intensité passé inaperçu à l'œil nu. Les analyses physiologiques ont confirmé les espèces *Stytophora. pistillata* et *Pocillopora damicornis*, comme les grands perdants de cet épisode alors que *Porites lutea* montre la meilleure résistance et résilience.

Photographie de couverture : Récif frangeant de la Roche Blanche, Canal Woodin : mars 2016. @Benzoni-IRD Porteur du projet : UMR ENTROPIE, coordination Claude Payri

Rédacteurs: Francesca Benzoni, Fanny Houlbrèque, Laure André

Contribution: Sylvie Fiat, Christophe Menkes, Giuseppe Garlasché, Marco Zampighi, Solene Mora, Naïs Favre, David Varillon, Jérome Aucan, Serge Andréfouët, Riccardo Rodolfo Metalpa

Liste des livrables

1.	Description du phénomène et Cartographie du phénomène à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie en combinant des diverses données obtenues	p. 3	
2.	Guide méthodologique pour réaliser les observations et le suivi du phénomène	p. 14	
3.	Atlas des espèces de coraux scléractiniaires sensibles au stress thermique	p. 3	
4.	Evolution des populations coralliennes post-blanchissement	p. 54	
5.	Suivi physiologique des colonies coralliennes sélectionnées et évolution des symbiontes durant la phase de blanchissement et post-blanchissement.	p. 72	
Bib	Bibliographie		

Livrable 1. Description du phénomène et Cartographie du phénomène à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie en combinant des diverses données obtenues

Récifs coralliens : ressource en danger

Les récifs coralliens font partie des écosystèmes les plus diversifiés en termes du nombre d'espèces et les plus importants en termes économiques. Ils fournissent des services écosystémiques vitaux pour les sociétés humaines et les industries, que ce soit par le biais de la pêche, la protection du littoral, des matériaux de construction, de nouveaux composés biochimiques, ou encore du tourisme. Les écosystèmes des récifs coralliens sont particulièrement sensibles aux changements des conditions environnementales et leur rapide déclin est observé à l'échelle mondiale, conséquence d'une combinaison de facteurs incluant le changement climatique global, la surexploitation, les maladies spécifiques des coraux (bactéries et virus), et la dégradation globale du milieu physique (sédimentation, pollutions etc...) (Hughes et al., 2003).

Le blanchissement des récifs coralliens

Les coraux bâtisseurs de récifs, avec quelques autres taxons de récif, abritent des algues dinoflagellés symbiotes (genre *Symbiodinium*), communément appelées "zooxanthelles", qui contribuent aux budgets énergétiques de leurs hôtes, leur permettant notamment d'accélérer la calcification du squelette. Les zooxanthelles contribuent également à la coloration des tissus vivants de leur hôte en raison de leurs pigments photosynthétiques bruns / verts. L'événement résultant de la perte substantielle ou complète des algues symbiotiques des tissus animaux et / ou de faibles concentrations des pigments photosynthétiques dans les algues est appelé blanchissement (Figure 1). Visuellement, il en

résulte une perte de coloration de l'hôte. Dans le cas des coraux scléractinaires, le tissu animal blanchi devient transparent et le squelette carbonaté blanc est donc visible en dessous.

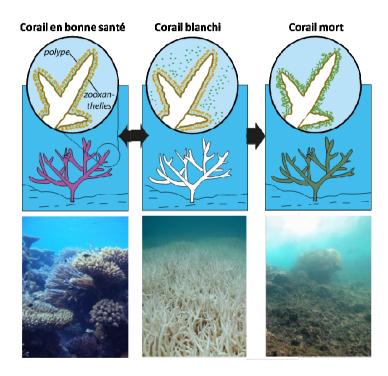


Figure 1 Représentation schématique du blanchissement des coraux au niveau de la colonie (en haut) et de la communauté (en bas). Corail sain avec des zooxanthelles et coloration normale (de gauche à droite), corail blanchi après l'expulsion des zooxanthelles, gazon algal sur le squelette de corail mort. Modifié à partir de: http://www.gbrmpa.gov.au/managing-the-reef/threats-to-

the-reef/climate-change/what-does-this-mean-for-species/corals/what-is-coral-bleaching

Un corail blanchi est un corail vivant. Il peut récupérer les algues symbiotiques et / ou leurs pigments si les facteurs qui ont déclenché le phénomène reviennent assez rapidement à la normale (la vitesse du retour à la normale dépend largement de l'espèce) Ce processus affecte alors la croissance des coraux, leur fertilité et leur reproduction et peut même conduire à la mort de l'hôte. Cependant, si le rétablissement ne se fait pas rapidement, le corail finit par mourir et son squelette carbonaté reste en place et sert de substrat disponible pour d'autres organismes benthiques (Figure 1). Les premiers organismes colonisateurs sont généralement des algues gazonnantes. Avec le temps, l'action mécanique des mouvements de l'eau et des différents processus de bioérosion peuvent conduire à la déstructuration de la colonie morte, affectant ainsi les organismes associés.

Le blanchissement des coraux est habituellement causé par les changements environnementaux abruptes auxquels le corail est incapable de s'adapter, tels qu'un rayonnement UV élevé, une faible salinité ou une infection bactérienne (Baker et al., 2008). La plupart des blanchissements massifs observés à grande échelle semblent avoir été causés par des températures de surface élevées (par seulement 1 ou 2° C) pendant plusieurs semaines d'affilée. Malheureusement, le réchauffement climatique global et l'augmentation associée des températures de surface de la mer (TSM) sont maintenant projetées de façon très probable pour ces prochaines décennies (IPCC, 2013).

Février 2016 : le blanchissement massif en Nouvelle-Calédonie

Les récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie abritent la plus grande diversité d'espèces de coraux et d'habitats récifaux des départements français et territoires d'outre-mer, et une partie d'entre eux a été incluse dans la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. Jusqu'à



récemment, les récifs de la Nouvelle-Calédonie avaient été épargnés

Figure 2 Un récif blanchi autour d'Ilot St. Marie, Nouméa, visible sur une image aérienne prise lors d'un vol ULM le 29/02/16.

par les événements massifs de blanchissement. Un événement de blanchissement a été documenté dans les années 1995-96 (Richer de Forges et Garrigue, 1997), mais les données disponibles limitées visaient uniquement deux localités sur le territoire. En février 2016, un épisode de blanchissement massif a été observé, affectant les récifs de Nouvelle-Calédonie (Figures 2-3).



Figure 3 Vue aérienne d'un récif frangeant de la Grande Terre aux abords du canal Woodin, toujours blanchi en avril 2016 (11/04/16, vol en hélicoptère).

Le blanchissement des coraux et la vague de chaleur de 2016 sur les récifs de Nouvelle-Calédonie

Alors que le blanchissement des récifs de 2016 en Nouvelle-Calédonie n'a probablement pas été déclenché par un seul facteur et que les conditions météorologiques locales ont joué un rôle important dans le déclenchement du phénomène, une anomalie positive de la température de l'eau a été détectée de facto à l'été austral 2015-2016. Les données de température de surface de la mer (SST) acquises par satellites et disponibles sur le site de « Coral Reef Watch » de la NOAA montrent que les récifs autour des récifs de Nouvelle-Calédonie baignaient dans des eaux dont la température variait entre 27 ° C et 31 ° C de janvier à mai 2016 ; les températures les plus chaudes étant enregistrées en février, pour redescendre en dessous de 25 ° C en juin (Figure 4a). Ces chiffres peuvent ne pas paraitre significatifs par rapport à la moyenne mensuelle climatique. Le « Coral Bleaching HotSpot » de la NOAA permet de visualiser, pour une date donnée, où se situe les SST les plus chaudes par rapport aux températures mensuelles les plus élevées. Une valeur HotSpot de 1,0 ° C est considérée comme un seuil pour le stress thermique conduisant au blanchissement des coraux. Les valeurs de HotSpot pour la première moitié de l'année 2016 autour de la Nouvelle-Calédonie montrent que les températures de l'eau en février 2016 étaient supérieures de 1 à 2 ° C à la moyenne mensuelle (Figure 4b), donc plus que suffisantes pour provoquer la décoloration des organismes récifaux symbiotiques. Ce n'est pas seulement l'anomalie SST qui est considérée comme importante pour la détection du blanchissement corallien, mais aussi le stress thermique cumulé dans le temps. L'indice de stress thermique appelé « Degree Heating Week » (DHW) est calculé en mesurant l'accumulation de stress

thermique au cours des 12 dernières semaines (3 mois). Il est basé sur l'hypothèse que des températures supérieures à 1 ° C au-dessus du maximum estival habituel sont suffisantes pour causer un stress thermique aux coraux symbiotiques conduisant éventuellement à leur blanchissement (https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/dhw.php)

Selon la littérature, les valeurs DHW atteignant « 4 ° C-semaines » correspondent aux événements de blanchissement. Au-delà de 8 ° C-semaines, un blanchissement généralisé et une mortalité potentielle élevée induits par le blanchissement des coraux sont attendus. Si l'on considère les valeurs DHW du premier semestre 2016 à la Figure 4c, autour de la Nouvelle-Calédonie, il est évident qu'un stress thermique cumulé important atteignant et dépassant le seuil de 4 ° C affecte les organismes coralliens entre février et mi-mai, avec les valeurs les plus élevées enregistrées en mars et avril (dépassant 8 ° C-semaines).

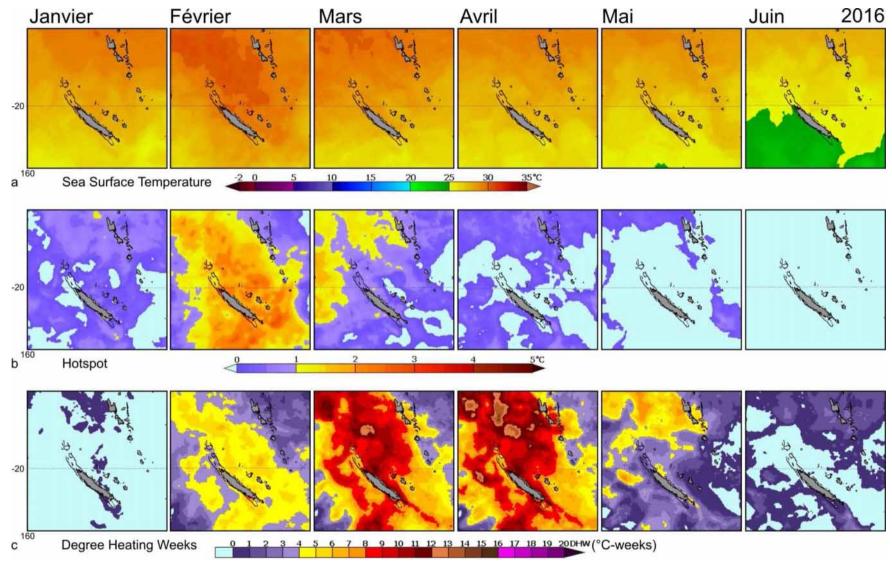


Figure 4 Cartes de la Température de surface de la mer (a), du HotSpot de blanchissement (b) et du « *Degree Heating Week* » autour de la Nouvelle-Calédonie au premier semestre 2016 (données pour le 15ème jour de chaque mois) (https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/bleaching5km/index.php).

Quantification de l'événement de blanchissement 2016: un effort collaboratif pour documenter le phénomène à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie

Les premiers cas de décoloration et de blanchissement massifs des coraux remontent au début de février 2016 sur les récifs frangeants du lagon sud de la Grande Terre (C. Payri et A. Gilbert, comm. pers) Ce qui a conduit à une étude exploratoire réalisée par les scientifiques de l'IRD pour évaluer la réelle ampleur du phénomène dans la zone. Les données photographiques et les observations collectées sur les frangeants, les récifs lagonaires et les récifs-barrières externes ont mis en évidence un phénomène affectant plusieurs espèces de coraux durs et d'autres invertébrés récifaux symbiotiques, représentant une grande partie des surfaces coralliennes vivantes de plusieurs récifs (17-18 février 2016 : Baie des Citrons, Nouville, Baie Maa, llot Sainte Marie, Récif Tamanu, llot Maître, llot Larégnère, llot Amédée, Récif-barrière Dumbéa).

Entre mars et avril 2016, grâce à la collaboration entre l'IRD (projet BLANCO) et l'association Pala Dalik, les opérateurs publics (NC Gouvernement, Province Sud, Université de Nouvelle-Calédonie) et privés (BIOCENOSE Marine, CORTEX, DEXEN, GINGER SOPRONER), et la population locale, le phénomène de blanchissement a été documenté à l'aide de 336 observations géoréférencées autour de la Grande Terre, aux îles Loyauté, aux récifs d'Entrecasteaux et à l'Ile des Pins. Selon la source, le type de données collectées vont des données de présence à celles sur le % de couvertures blanchies (Figure 1). Une partie des données de présence a été collectée par des observations aériennes (voir le chapitre sur la méthodologie pour plus de détails). Au total, le blanchissement des récifs a été signalé pour 87% des sites évalués (n =

292). Aucune observation n'est disponible pour l'événement de blanchissement 2016 des récifs de Chesterfield et de Bellona

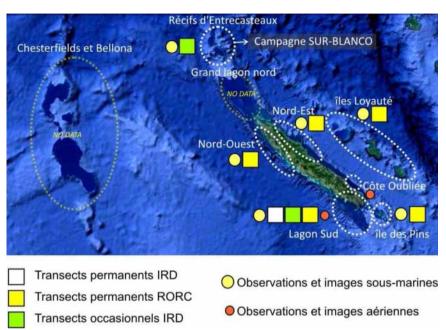


Figure 5 Image Google Earth montrant la Nouvelle-Calédonie et les zones où des prospections et des observations ont été réalisées durant l'épisode de blanchissement entre mi-février et avril 2016. Les différents types d'observations sont détaillés dans la légende.

L'ensemble des données de présence / absence a été reporté à la Figure 5, avec deux couches différentes d'information. La première couche contient les typologies d'habitats récifaux du projet Millenium (Figure 5a, b) (http://umrentropie.ird.nc/index.php/home/ressources/mcrmp). La seconde représente l'indice de stress thermique « *Degree Heating Weeks* »de blanchissement des coraux pour la mi-février 2016 (Figure 4c, d).

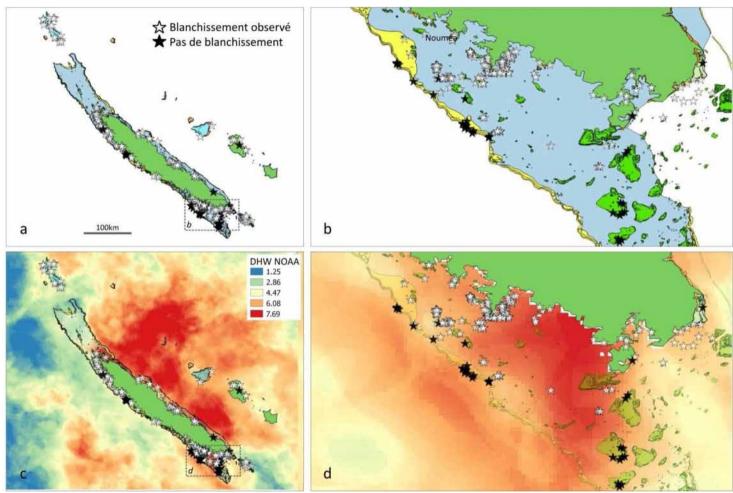


Figure 6 Position des 336 observations géoréférencées de blanchissement, réalisées entre mars et avril 2016 en Nouvelle-Calédonie (a et c) et dans le lagon sud (b et d). Les observations ont été reportées sur des couches montrant les types de récifs (a et b: carte du Millenium Coral Reef Mapping Project) et le DHW en ° C-semaines, à la mi-février 2016 (c et d: NOAA 50-km SST Anomaly Product). Chaque étoile correspond à une observation. Les étoiles pleines noires n'indiquent aucune observation de blanchissement, les étoiles blanches indiquent la présence de blanchissement.

Le blanchissement des coraux a été observé dans chacune des différentes régions accessibles et prospectées. Cependant, la fréquence du blanchissement observé variait entre les zones et les types de récifs. Une analyse de la fréquence des observations de blanchissement réalisées par l'IRD et issues du suivi participatif (Figure 6) a montré un gradient net, entre la côte et le récif externe, dans le lagon sud de la Grande Terre qui abrite par ailleurs une diversité récifale élevée et des conditions environnementales variées.

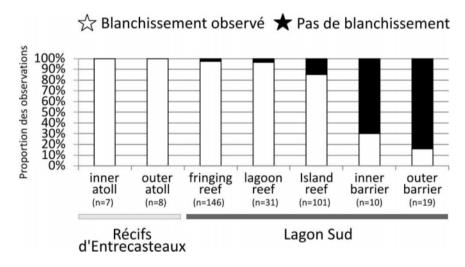


Figure 7 Pourcentage des observations effectuées sur différents types de récifs qui ont permis (colonnes pleines blanches) ou non (colonnes pleines noir) de détecter le blanchissement entre mars et avril 2016 en Nouvelle-Calédonie. n = nombre total d'observations par type de récif.

Globalement, le blanchissement a été observé dans plus de 90% des sites correspondant aux récifs frangeants et lagonaires, plus de 80% sur les récifs d'ilots, alors que seulement 30% de la barrière interne et 16% des récifs barrière externes (Figures 6b, 6). La fréquence la plus basse

signalée sur les sites de pentes externes est reliée aux eaux océaniques plus fraiches (Figure 7). Cependant, les coraux des récifs océaniques d'Entrecasteaux, où les conditions environnementales et la géomorphologie récifale différent nettement de celles de la Grande Terre, blanchissent sur 100% des sites d'étude aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des atolls (études SUR-BLANCO en mars 2016).

Les données quantitatives collectées le long des transects (voir section méthodologie) ont permis de quantifier la couverture corallienne vivante et la proportion de couverture corallienne vivante décolorée sur 8 et 13 sites respectivement du lagon sud (Figure 7) et des récifs d'Entrecasteaux (Figure 8) lors de l'événement de blanchissement 2016. Les sites étudiés couvraient une gamme assez large d'assemblages benthiques allant des communautés à forte couverture corallienne, dominées par des Porites massifs (par exemple Baie de Citrons) ou composées principalement d'Acroporidés branchus et de Pocilloporidés (par exemple Roche Blanche). Les récifs coralliens extérieurs présentaient globalement des pourcentages plus faibles en couverture corallienne vivante, mais aussi des proportions plus faibles de corail blanchi par rapport aux récifs lagonaires et frangeants (Figures 8-9). Ainsi, les valeurs les plus élevées de couverture de coraux blanchis ont été enregistrées dans les mêmes types de récifs que ceux pour lesquels la fréquence d'observations de blanchissement était la plus élevée. La variabilité du blanchissement entre sites par rapport à la couverture totale en coraux vivants s'explique en partie par la variabilité des conditions environnementales entre différents types de récifs, mais aussi par l'identité et la morphologie des taxons coralliens dominant les assemblages benthiques.

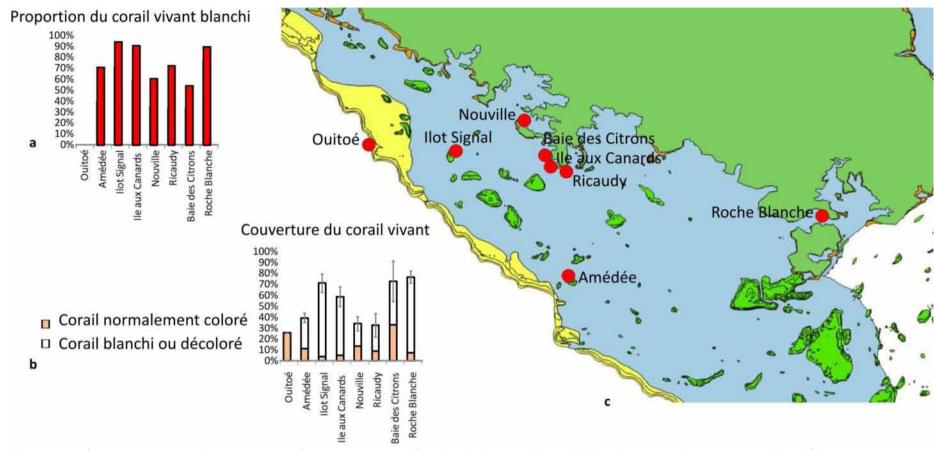


Figure 8 Données quantitatives sur la couverture corallienne vivante recueillies dans le lagon sud durant le blanchissement de 2016 en Nouvelle-Calédonie : a : proportion moyenne de coraux blanchis par rapport à la couverture corallienne vivante sur chaque site; b, couverture moyenne en pourcentage de coraux normalement colorés (rose clair) et blanchis (blancs) (± dev.st.); c, position des sites de relevés mentionnés en a et b.

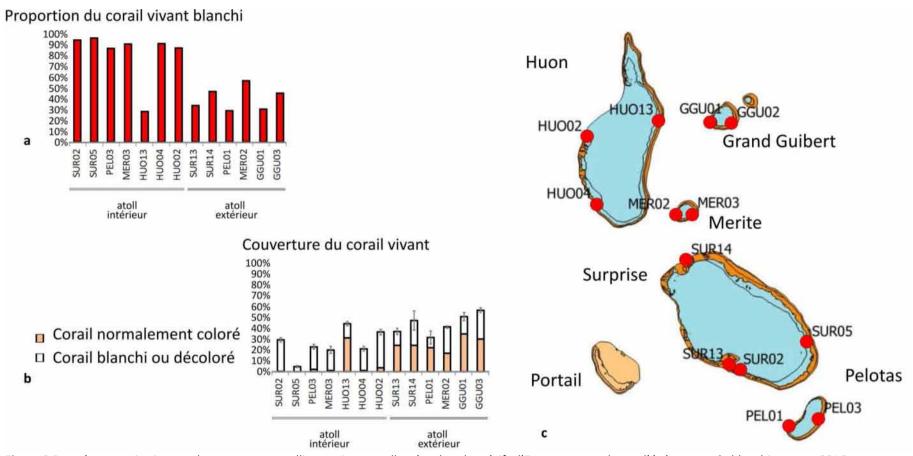


Figure 9 Données quantitatives sur la couverture corallienne vivante collectées dans les récifs d'Entrecasteaux durant l'événement de blanchissement 2016 en Nouvelle-Calédonie (mission SUR-BLANCO): a, proportion moyenne de blanchissement par rapport à la couverture totale du corail vivant sur chaque site; b, couverture moyenne en pourcentage de coraux normalement colorés (rose clair) et blanchis (blancs) (± dev.st.); c, position des sites de relevés mentionnés en a et b.

La plus grosse difficulté rencontrée dans l'évaluation, la description et la quantification de l'événement de blanchiment massif de 2016 en Nouvelle-Calédonie a été de prendre en compte cette variabilité inhérente. Le couplage de photographies aériennes prises avant et pendant le blanchissement avec des observations in situ sous l'eau a permis de collecter des données illustrant la diversité des coraux et des assemblages affectés par le phénomène au même site et le long d'un gradient perpendiculaire à la côte à l'Ilot Signal (Figure 10).

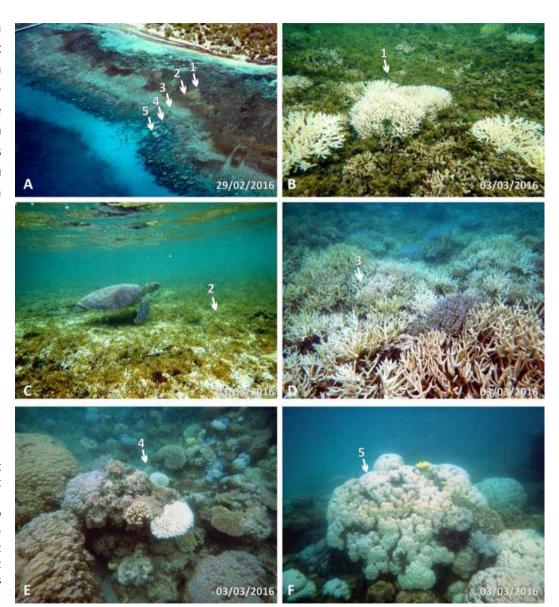


Figure 10 A, Vue aérienne de la côte et du récif autour de l'Ilot Signal (à droite du ponton) prise le 29/02/2016, les flèches 1 à 5 indiquent différents types d'assemblages benthiques le long d'un transect perpendiculaire au rivage et représenté de B à F (suivi sous-marin effectué le 03/03/2016); B, colonies dispersées d'Acropora (blanchies) et Montipora (normalement colorées); C, zone dominée par les macroalgues; D, zone d' Acropora branchus fortement blanchis; E, zone dominée par des Porites massifs pour la plus part colorés et des Acroporidés blanchis; F, grands Porites massifs blanchis.

Livrable 2. Guide méthodologique pour réaliser les observations et le suivi du phénomène

Objectifs de la méthode de surveillance proposée

Cette section décrit la méthode proposée pour documenter les événements de blanchissement corallien survenus en Nouvelle-Calédonie, dans le cadre du projet Blanco. La méthode combine différentes techniques permettant de:

- 1 évaluer le phénomène à différentes échelles (récif, communauté, population, colonie)
- 2 évaluer la durée du phénomène
- 3 détecter les changements de composition et de structure engendrés par la mortalité des coraux suite au blanchissement

Une partie du protocole est pleinement conforme aux suivis réalisés sur les récifs aux échelles locales, régionales et internationales. Une autre partie nécessite des opérateurs qualifiés pour l'acquisition et l'interprétation des résultats.

Bien que ce protocole permette d'évaluer le blanchissement de tous les invertébrés récifaux, il se concentre actuellement principalement sur les coraux scléractiniares-zooxanthellés. D'autres organismes zooxanthellés récifaux (par exemple des anémones, des coraux de feu, des coraux mous) peuvent également être pris en compte.

Documenter l'occurrence du phénomène

1 - Expertise basique (Low tech) et large échelle: tout le monde peut contribuer (le suivi participatif)

La manière la plus simple, bien qu'informative, de documenter l'occurrence d'un phénomène de blanchissement et son importance est d'acquérir des observations dans le temps et géoréférencées. Il est à noter que les observations sur l'absence de blanchissement sont tout aussi importantes que celles de sa présence pour comprendre l'étendue et la structure de l'événement.

Type de données recueillies

Les données recueillies grâce à cette méthode de faible technologie et à grande échelle est basée sur des données de présence ou non de blanchissement (oui / non) pour un site et une date donnés. Des observations qualitatives et / ou quantitatives peuvent également être collectées sur le même site en suivant d'autres méthodes décrites ciaprès. A vrai dire, n'importe laquelle des méthodes détaillées ci-après peut fournir l'information pour cette première méthode.

Outils et méthodes

Lors du blanchissement de 2016 en Nouvelle-Calédonie, l'ampleur réelle de l'événement à l'échelle du pays a pu être évaluée principalement grâce aux observations de bénévoles et de citoyens concernés par l'événement qui ont communiqué leurs observations aux scientifiques et aux collectivités en charge de l'environnement.

Cependant, cette expérience a montré que le recueil et la gestion uniformisés de ce type de données peuvent devenir rapidement chaotiques et chronophages sans une réflexion préalable dans la configuration des données. Ainsi, afin de proposer un outil en ligne simple et convivial permettant à tout citoyen de signaler un futur événement de blanchissement, une page de « suivi participatif » a été mise en ligne sur le site de l'IRD ENTROPIE (Figure 11) où chacun peut reporter l'observation d'un blanchissement corallien sur un site donné et à une date donnée, avec la possibilité de laisser des commentaires plus détaillés et de déposer des images de l'événement:

http://umr-entropie.ird.nc/index.php/home/ressources/suiviparticipatif-blanchissement-corallien-nouvelle-caledonie

Les informations de base à collecter pour toute observation du phénomène, au-delà du nom et du contact de l'observateur, sont les suivantes:

- Date de l'observation
- Position du récif blanchi (Latitude et Longitude). Dans le formulaire en ligne une carte interactive est fournie permettant de placer l'observation sur Google maps (Figure 10)
- Moyen d'observation (Options: De la surface; En plongée; En PMT; En survol). Si l'observation a été effectuée en plongée autonome ou en PMT, la profondeur peut être indiquée

Traitement des données

Les données sont saisies dans une feuille de calcul où chaque ligne est une observation et les colonnes représentent les différentes informations collectées (date, latitude, longitude, présence de blanchissement, moyen d'observation, profondeur, etc.). Cet ensemble de données peut ensuite être corrélé à différentes couches d'information (p. ex. voir la Figure 6) et fournir un outil simple mais efficace pour documenter l'occurrence du phénomène de blanchissement et détecter sa fréquence par rapport aux différents facteurs environnementaux. Par exemple les images de la figure 6, ont été ainsi construites en utilisant le système d'Information Géographique Libre et Open Source Q SIG (https://www.qgis.org/fr/site/).

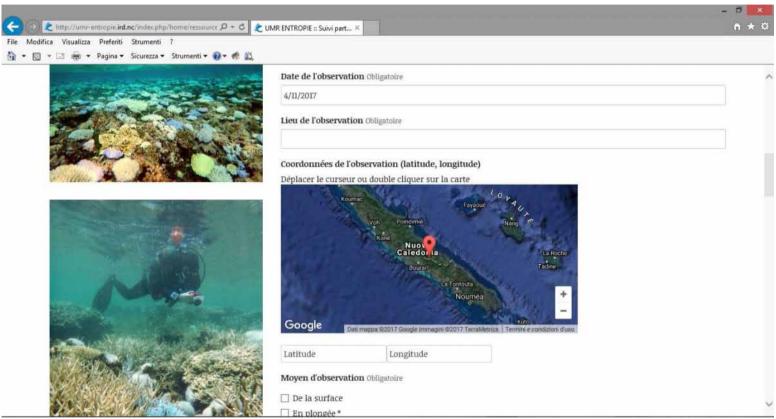
Avantages, inconvénients et remarques

Cette méthode permet d'acquérir un grand nombre de données à faible coût et de couvrir ainsi de vastes zones de récifs et de documenter l'importance de l'événement de blanchissement. Bien que les données collectées sur le même site soient qualitatives (par exemple le type principal de corail blanchi) ou quantitatives (par exemple% de surface corallienne vivante blanchie), elles ne sont pas strictement obligatoires et cette méthode nécessite de fait de collecter des informations très basiques.

La possibilité de déposer des images sous-marines documentant l'événement peut s'avérer particulièrement intéressante parce qu'elles fournissent un enregistrement objectif et permanent de l'événement. Par ailleurs, les spécialistes peuvent y puiser des informations importantes (par exemple les genres de coraux dominants et / ou affectés) pour le site, conduisant à une caractérisation plus détaillée des communautés affectées (ou de celles qui ne l'étaient pas).

N'importe qui peut contribuer à ce suivi. Cependant, pour que l'information soit aussi largement que possible récoltée auprès d'un

large public et couvre autant de récifs que possible, il est important que les médias locaux couvrent le phénomène de blanchissement et fassent phénomène auprès du public et cela a certainement contribué à l'évaluation de l'événement à l'échelle du pays.



connaître l'outil en ligne pour les bénévoles puissent rapporter leurs observations. En 2016, la presse et la radio locales se sont fait l'écho du

Figure 11 Impression d'écran de http://umr-entropie.ird.nc/index.php/home/ressources/suivi-participatif-blanchissement-corallien-nouvelle-caledonie, la fiche qui permet de signaler des observations de blanchissement des coraux dans le lagon Calédonien.

2 - High tech et large échelle: relevés aériens

Les relevés aériens sont de plus en plus utilisés pour détecter, quantifier et décrire les événements de blanchissement de masse. Par exemple, dix jours de relevés aériens ont permis de couvrir l'événement de blanchissement massif de 2016 sur la Grande Barrière australienne et ont fourni des données qui peuvent ensuite être vérifiées sur des sites sélectionnés où le blanchissement peut être quantifié par des observations in situ (Hughes et al. 2017). En Nouvelle-Calédonie, deux vols ont été effectués, après le début de l'événement, pour observer le blanchissement des coraux sur les récifs du lagon sud-ouest. Le premier a été organisé par l'IRD avec l'Aéroclub Calédonien Henri Martinet (le 29/02/16). Le second était un survol d'hélicoptère organisé par la province du Sud (le 11/04/2016) (Figure 12). Au total, 5h de vol ont permis d'évaluer le blanchissement sur 109 sites.

Type de données recueillies

Pendant le vol, les données brutes collectées sont constituées d'images numériques et des métafichiers associés.

A partir des images et de leur analyse, des donnés qualitatives (type de récif, formes de croissance corallienne dominante: par exemple Figures 2-3) et des informations quantitatives (présence de blanchissement, pourcentage de surface de récif blanchie) peuvent être alors recueillies.

Outils et méthodes

Le photographe documentant les récifs de l'hélicoptère ou de l'avion doit échantillonner avec un appareil photographique numérique idéalement équipé d'un filtre polarisant afin de réduire la réflexion par la surface de la mer, et une carte mémoire suffisamment grande surtout si les images sont prises en format brut. Idéalement, les images doivent être prises autant que possible perpendiculairement à la surface du récif (plus facile à partir d'un hélicoptère). Dans le cas de suivis répétés (par exemple, étude répétée des récifs déjà imagés et analysés à partir d'épisodes précédents), il est recommandé de faire référence à l'emplacement des points (Figure 13) afin de maximiser les chances de prendre des images comparables.



Figure 12 La photographe (F. Benzoni) prend des images d'un récif frangeant blanchi sur le côté nord de l'Anse Vata (l'héliport Méridien est visible à l'arrière-plan).

Traitement des données

La présence de blanchissement sur les différents types de récifs a été évaluée sur les photographies géopositionnées (la procédure est expliquée à la Figure 13).

Avantages, inconvénients et remarques

L'avantage de cette méthode est la grande surface de récifs qui peut être couverte en un temps relativement court, la grande quantité d'observations et de photographies qui peuvent être collectées pour documenter l'apparition du blanchissement (ou son absence). Si les photographies sont traitées pour obtenir des données quantitatives, le temps et les ressources humaines nécessaires doivent être pris en compte car la méthode peut être chronophage.

Le principal inconvénient de cette méthode et qui en limite l'application est, bien entendu, le coût du temps de vol (avion / hélicoptère; pilote et

carburant compris). De plus, la méthode est particulièrement efficace en cas de blanchissement massif, mais peut ne pas convenir pour détecter des événements à plus petite échelle n'affectant qu'un nombre limité d'espèces benthiques et / ou un faible pourcentage de couverture corallienne.

Malgré l'importance des observations aériennes pour couvrir de vastes zones de récifs, la vérification de terrain demeure importante pour calibrer et valider les informations recueillies à partir de photographies aériennes. Le couplage de l'observation aérienne avec des observations sous-marines s'est avéré particulièrement utile pour établir la correspondance entre l'apparence d'un récif blanchi vu du ciel aux données réelles sous-marines et au type de communautés coralliennes affectées (Figure 9).

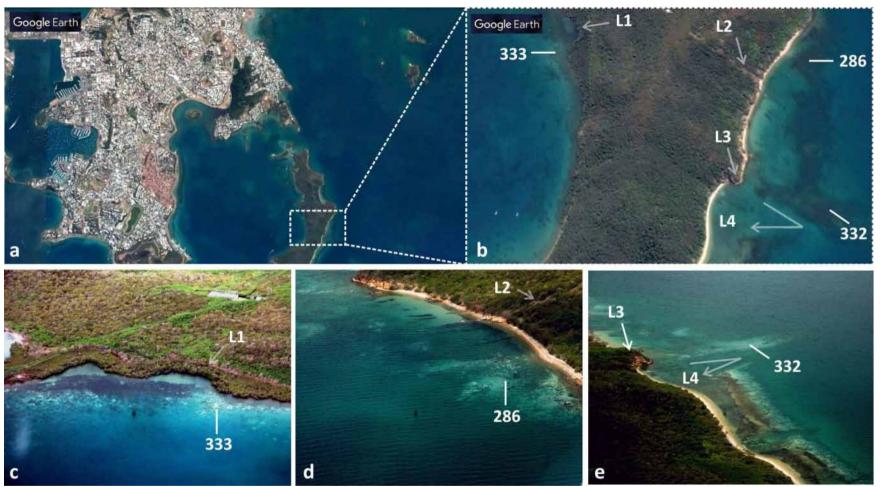


Figure 13 Représentation schématique de la méthode utilisée pour géoréférencer les caractéristiques (récifs blanchis) à partir d'images aériennes et obtenir des données sur les occurrences de blanchissement. Dans cet exemple, il s'agit des récifs autour de l'Ilot St. Marie, Nouméa. A partir des images de Google Earth (a-b) la zone de suivi est relocalisée; les entités proéminentes (L1-3) ou récif (L4) pris comme repères (L) peuvent être reconnus sur les photographies aériennes (c-e). Une fois que le récif blanchi sur les photo aériennes est localisé sur l'image de Google Earth, il reçoit un numéro de station (286, 332, 333) sur les deux supports visuels et sa position en latitude et longitude est prise à partir du point Google Earth.

3 - Un outil largement répandu: technique quantitative de recensement visuel sous-marin

La méthode du Point Intercept Transect (PIT) proposée est une modification de la méthode de base déjà largement utilisée dans le monde pour suivre l'évolution dans le temps de la composition (ou de la santé) des assemblages benthiques (Stoddart et Johannes, 1978; Kingsford et Battershill, 1998, Bianchi et al., 2003, Hill et Wilkinson, 2004) et localement en Nouvelle-Calédonie (par exemple, le Réseau d'observation des récifs coralliens de Nouvelle-Calédonie, RORC). L'efficacité de la méthode pour caractériser la composition des assemblages benthiques récifaux et détecter des changements majeurs dans le temps a été évaluée par différentes études scientifiques (Ohlhorst et al., 1988, Rogers et al., 2002, Brown et al., 2004).

Grâce au partenariat avec l'association Pala Dalik, au cours de l'événement de 2016, les chercheurs de l'IRD ont pu effectuer des relevés récifaux sur certains des sites suivis en routine dans le cadre du RORC (Figure 13). Cependant, deux problèmes majeurs concernant la détection et la quantification d'un événement de blanchissement ont été détectés dans le protocole du RORC / Reef Check (http://www.reefcheck.fr/wp-content/rapports/Rapport-NC-2013-2014.pdf). Le premier tient au fait que le protocole standard ne tient pas compte de l'origine du blanchissement (S. Job, com. pers). En fait, la même catégorie est utilisée pour indiquer les colonies de coraux blanchies en raison de la récente mortalité (par ex. La prédation par l'étoile de mer corallivore *Acanthaster plancii*) ou parce qu'elles sont encore vivantes mais touchées par le blanchissement entraînant la perte totale de la coloration. La deuxième question concerne le fait que seules les colonies complètement blanchies sont notées alors que les

colonies partiellement décolorées ou décolorées (voir les exemples de la figure 13) n'ont pas été prises en compte. Ainsi, alors que dans le premier problème soulevé les données collectées ne permettent pas de distinguer la part de mortalité récente résultant d'un événement de blanchissement, le second problème limitait la quantification du blanchissement aux seules colonies complètement blanchies réduisant en cela significativement le pourcentage de couverture de corail affecté par le blanchissement et détecté par la méthode.

Ici, nous proposons donc un protocole modifié qui conserve l'acquisition des données dans les suivis de routine vise en notant plus particulièrement la présence de blanchissement sous toutes ses formes (y compris le blanchissement partiel et la décoloration des colonies coralliennes).

Type de données collectées

En général, les méthodes de transect permettent la collecte de données de couverture en pourcentage pour les organismes récifaux remarquables (par ex coraux scléractiniaires, coraux mous, macroalgues) et pour les types de substrat (par ex sédiment, roche). Dans le cas de suivis ciblant la quantification d'un événement de blanchissement, le pourcentage de couverture en coraux blanchis et normalement colorés peut être obtenu en ajoutant aux descripteurs standards (English et al., 1997) les codes de coloration ci-après.

Outils et méthode

Une ligne transect de 20m de long (normalement un décamètre en fibre de verre) doit être placée à la profondeur fixée en suivant autant que possible la surface du substrat et parallèlement à la côte. Comme le

pourcentage le plus élevé de coraux blanchis est généralement enregistré dans les petits fonds, la profondeur recommandée pour le suivi est comprise entre 2 et 5 m. Si le temps et les moyens le permettent, la méthode peut être répétée à 10-15 m de profondeur. Les deux extrémités du transect doivent être fixées au substrat afin d'en limiter son déplacement par rapport à la position d'origine sous l'effet du courant ou d'autres mouvements de l'eau. Des piquets de métal, des crochets ou des poids fixes aux extrémités peuvent être utiles à cet effet. Quatre réplicas au hasard doivent être effectués sur chaque site. Une fois les transects en place, l'opérateur parcourt la longueur du transect et enregistre sur une ardoise la catégorie de communauté benthique située directement sous le transect à des points spécifiques espacés le long du transect (voir English et al., 1997 pour les formes de croissance standard pour le corail qui peuvent être complétées par des informations sur le genre et / ou l'espèce). Le nombre total de points doit être défini en fonction d'un bon compromis entre la vitesse d'échantillonnage et la représentativité de l'échantillon. Le point intercepte standard du protocole Reef Check de 50 cm est proposé. En cas de blanchissement, les catégories de Hill et Wilkinson (2004) (Tableau 1) doivent être enregistrées pour chaque colonie de coraux sous l'interception du transect afin d'obtenir le pourcentage de couverture des coraux blanchis.

Dans le cas d'un événement de blanchissement, cette méthode devrait idéalement être utilisée pour étudier une sélection de types différents de récifs (frangeants, lagonaires, extérieurs) afin d'évaluer la variabilité de l'événement en fonction du récif. La priorité devrait être donnée aux sites où des données sur la couverture corallienne ont déjà été collectées et / ou des enregistreurs de température ont été placés.

Table 1 Catégories et description des colonies blanchies (modifiées de Hill and Wilkinson, 2004).

Catégorie	Description
0	Pas de blanchissement apparent (coloration normale) (Figure 14a "normale")
1	Partiellement blanchie (surface/pointes) ou pale mais pas blanchie (Figure 14a "décolorée")
2	Blanchie (Figure 14a "blanchie")
3	Blanchie et partiellement morte (Figure 14b "blanchie et partiellement morte")
4	Récemment morte

Traitement des données

Le pourcentage de corail vivant détecté sous la ligne de transect est obtenu comme suit:

Le pourcentage de couverture de x (rx%) est obtenu en divisant le nombre de points où x a été trouvé (Px) par le nombre total de points le long du transect (Ptot):

$$rx \% = Px/Ptot \times 100$$

Ceci permet d'obtenir pour chaque transect le pourcentage de couverture d'une catégorie donnée (par exemple le corail blanchi) pour chaque réplict et de calculer la moyenne et l'écart-type pour le site.



Figure 14 Un transect (line jaune) à Ricaudy le 04/04/2016, a, et l'opérateur (S. Job) acquérant les données à l'aide de la méthode du point intercept le long du transect, b.

Avantages, inconvénients et remarques

Cette méthode de recensement visuel est peu coûteuse en termes d'outils, fournit des résultats immédiats, permet l'étude sous l'eau de zones relativement étendues, peut être répétée et n'a aucun impact sur l'écosystème.

Les principaux inconvénients de cette méthode sont le risque d'erreur dans l'identification taxonomique des organismes au niveau du genre ou de l'espèce et / ou de la subjectivité dans la caractérisation de l'état de blanchissement d'une colonie. Généralement, une formation de l'observateur est nécessaire notamment quand s'il s'agit de volontaires ou de débutants. De plus, le travail sous-marin peut prendre du temps.

Une amélioration proposée pour résoudre les limites ou les doutes des observateurs sous l'eau est de compléter la collecte des données sur l'ardoise avec des photographies numériques prises à distance constante de la ligne du transect et perpendiculairement à celle-ci. Cela peut être fait lorsque l'opérateur n'est pas familier avec la taxonomie ou l'état de blanchissement d'une colonie donnée. La photographie peut ensuite être présentée à des spécialistes pour l'identification taxonomique finale ou la désignation de l'état de coloration.

Les transects pour les recensements visuels peuvent être fixes ou aléatoires. Les transects fixes peuvent détecter plus précisément le changement au cours du temps et nécessitent moins de réplicas pour détecter un changement spécifique que dans le cas de transects aléatoires. Cependant, ces derniers sont plus rapides à mettre en place, n'ont pas de coûts de maintenance et nécessitent pas de temps pour retrouver l'emplacement du transect d'un suivi à l'autre. Par exemple,

en Nouvelle-Calédonie, les transects du RORC sont fixes car l'objectif principal est d'obtenir une quantification aussi précise que possible des changements de la couverture corallienne vivante et de la composition de la communauté au cours du temps. Dans le cas d'un événement de blanchissement, si l'objectif est d'étudier autant de récifs que possible, la méthode des transects aléatoires peut toujours être une option.

4 - Relevés photographiques le long de transects en ligne permanents

Cette méthode permet de passer du relevé de blanchissement du niveau de la communauté à l'échelle de la colonie et de suivre le devenir des colonies prises une à une pendant et après l'événement. Les données de couverture en pourcentage comparables et compatibles avec celles collectées avec la méthode précédente peuvent être collectées le long de la ligne a posteriori sur les photos numériques. L'approche innovante de cette technique est l'acquisition de données de référence sur la coloration et la vitalité des colonies coralliennes sur des sites permanents et avec une fréquence élevée dans le temps. En utilisant des transects permanents comme référence, cette méthode de relevés photographiques permet de marquer et de suivre dans le temps des colonies de coraux identifiées à l'espèce et de détecter d'éventuels changements (coloration, vitalité, croissance).

Type de données collectées

Les données recueillies sur la bande de transect avec cette méthode sont notamment le pourcentage de colonies coralliennes appartenant à une catégorie donnée (par ex. blanchie ou normalement colorée). Les données sur la taille des colonies peuvent également être collectées à partir des images. Des données de couverture en pourcentage peuvent être obtenues en appliquant la méthode précédente aux photos numériques du transect de référence. L'identification de la colonie peut aller de la forme de croissance à un degré élevé de précision taxonomique.

Outils et méthode

Cette méthode nécessite que des transects fixes soient positionnés comme décrit dans la section précédente (4 réplicas de 20m de long). Dans ce cas, il est cependant conseillé de placer un piquet permanent au milieu (à 10m) de chaque transect afin de faciliter le repositionnement exact de la ligne. Le transect est ensuite imagé par l'opérateur en utilisant un appareil photo sous-marin numérique et en réalisant une série continue de photos chevauchantes prises à distance constante de la ligne de transect et perpendiculairement à celle-ci. Idéalement, la séquence de photos doit permettre la reconstruction d'une bande de 20 m de long et de 50 cm de large avec la ligne de transect au milieu. Cela permet d'identifier et de classer chaque colonie présente dans les quatre réplicas.

En cas de blanchissement, il est conseillé de répéter le suivi tous les mois pendant le pic de l'événement afin de détecter sa durée et la dynamique de rétablissement et / ou de mortalité des communautés. Après l'événement, le suivi devra être répété au moins une fois tous les deux mois jusqu'à ce qu'une année se soit écoulée depuis le début de l'événement. Cela permet de décrire la mortalité induite par le blanchissement et le devenir des colonies de coraux morts dans le temps.

Une fois de retour sur le terrain, les images doivent être téléchargées et rangées dans des dossiers distincts par transect et pur chaque réplicat et affecté d'un code unique incluant le nom du site, le numéro du réplica et la date d'échantillonnage. L'analyse des données peut alors commencer. La première étape consiste à étiqueter chaque colonie numérisée dans la bande de transect photographiée afin de construire une base de données de colonies de référence. Cette opération prend du temps, mais elle n'est réalisée qu'une fois à l'issue du premier suivi. Afin de faciliter la visualisation du transect et le repérage des colonies étiquetées, une photo panoramique est reconstruite à partir des photos séquentielles représentant une zone benthique d'environ 3,5 m de long et 50 cm de large (Figure 15). Les montages panoramiques pour les Blanco ont été créés utilisant transects en Hugin (http://hugin.sourceforge.net/), un logiciel graphique gratuit pour l'assemblage de photos panoramiques. Une fois les colonies étiquetées, une feuille de calcul est créée contenant le code de chaque colonie, son identification (forme de croissance, genre, espèce) et ses codes de coloration et de vitalité au moment du suivi.

Pour chaque colonie, deux séries distinctes d'observations sont effectuées. Tout d'abord, la coloration est analysée pour détecter toute décoloration ou blanchissement, puis la vitalité de la colonie est évaluée visuellement.

En utilisant la couleur de la ligne transect comme référence de couleur (idéalement blanc), chaque colonie est affectée à l'une des quatre catégories suivantes:

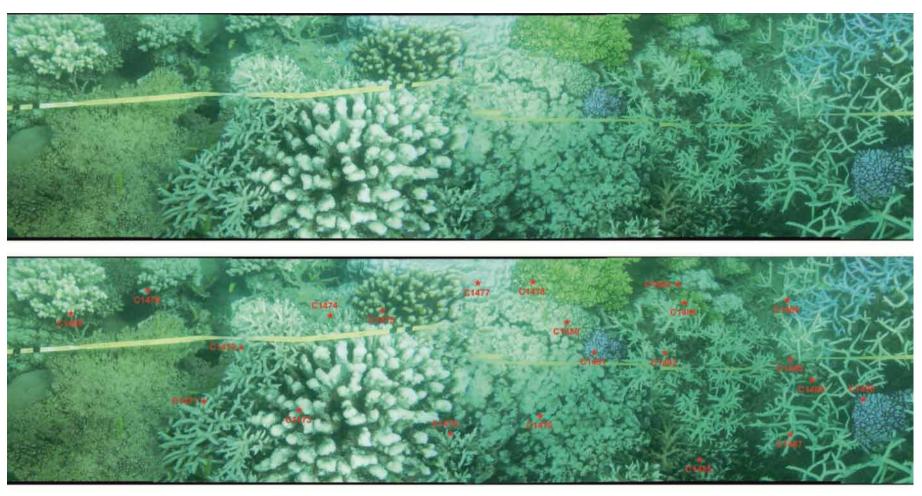
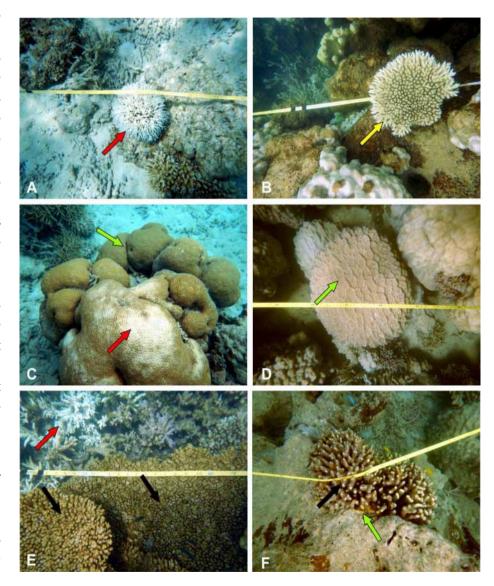


Figure 15 Un exemple d'un panorama assemblé à llot Canard (T0, réplicat 1) avant (au-dessus) et après l'étiquetage des colonies (dessous).

1) blanchie lorsque la coloration de la colonie vivante était blanche (Figure 16A), 2) décolorée lorsqu'un changement notable de la coloration de la colonie était observé, par exemple plus pâle, mais pas complètement blanche (Figure 16B), 3) partiellement blanchie lorsqu'une partie consistante de la colonie (> 35%) était blanchie, mais le reste présentait une coloration différente proche de la normale (Figure 16C) et 4) colorée lorsque la colonie semblait avoir une coloration normale (Figure 16D) par rapport aux photographies de la littérature (par exemple Veron, 2000) et à la banques de photographies de coraux de la base de données en ligne Lagplon (http://lagplon.ird.nc/). Afin de décrire la vitalité de chaque colonie, les catégories suivantes ont été définies: 1) morte lorsque toute la colonie était dépourvue de tissus vivants et / ou la croissance de gazon algal avait débuté, 2) partiellement morte quand seulement une partie de la colonie était morte tel que défini ci-dessus. Lorsqu'une colonie n'a pas pu être retrouvée sur les photographies pour une période d'échantillonnage donnée et après la première identification, son statut a été marqué comme "N / A" (Non Applicable). Après le premier suivi, l'échantillonnage photographique est répété de transect en transect pour détecter les changements de coloration (Figure 17) et de vitalité (Figure 18) pour chaque colonie étiquetée et retrouvée.

Figure 16 Exemples de différents état de coloration et de vitalité observes pendant ou après un événement de blanchissement: A: *Seriatopora hystrix* blanchie; B, *Acropora* décolorée, C, *Dipsastraea* partiellement blanchie, la flèche rouge montre la partie blanchie du tissu corallien, la flèche verte montre le tissu de corail normalement coloré; D, *Porites* normalement colorées; E, *Acropora* mort (flèches noires) et blanchi (flèche rouge); F, *Stylophora pistillata* partiellement mort (la flèche noire pointe vers le corail mort, la flèche verte pointe vers le tissu corallien coloré)



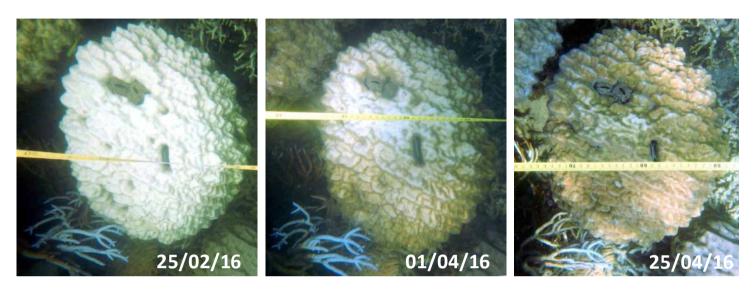


Figure 17 La même colonie de *Porites* massif échantillonnée à la Baie des Citrons lors de trois relevés consécutifs montrant le blanchissement et la récupération du corail.

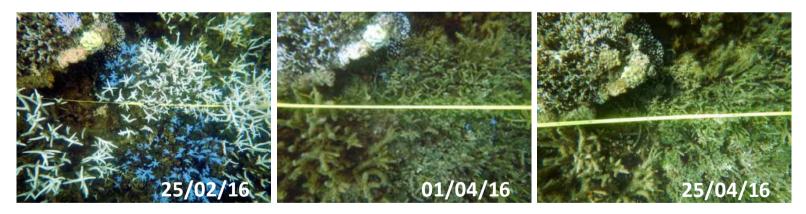


Figure 18 Le même assemblage de *Montipora* encroutant et d'*Acropora* branchu échantillonné à la Baie des Citrons lors de trois relevés consécutifs montrant le blanchissement et la récupération ou la mortalité du corail.

Pour les colonies qui étaient vivantes et étiquetées au début de l'étude, le suivi se poursuit même si la mortalité survient afin de vérifier si la structure restante du squelette persiste après la mort ou si elle se décompose entraînant ainsi des changements dans la structure tridimensionnelle du récif. Dans ce cas, la catégorie "cassée" est ajoutée dans les observations.

Traitement des données

Les données recueillies pour chaque suivi sont analysées pour quantifier le pourcentage de colonies attribuées à l'une ou l'autre des catégories de coloration ou de vitalité pour une forme de croissance ou une espèce donnée. Les données des suivis successifs peuvent donc être comparées pour analyser les changements potentiels survenus dans le pourcentage de colonies vivantes pour une catégorie donnée. Cela permet 1 /de quantifier le phénomène de blanchissement à l'échelle de la colonie, 2 /d'évaluer les différences d'état de blanchissement entre formes coralliennes ou espèces, 3 /d'évaluer la tendance dans la coloration et la vitalité dans le temps permettant ainsi d'évaluer la résistance, la résilience ou la mort des colonies.

Avantages, inconvénients et remarques

Cette méthode est relativement rapide à mettre en œuvre sous l'eau une fois que les piquets permanents bornant les transects sont repérés. De plus, la collection permanente d'images numériques permet a posteriori l'identification des coraux et une description de son état de santé. Par conséquent, l'opérateur sous-marin n'a pas besoin d'une formation spécifique en identification corallienne ou en détection

visuelle du blanchissement. En revanche, la personne qui extrait les informations des photographies a besoin, elle, de ces compétences et les analyses peuvent demander beaucoup de temps. Par conséquent, si cette méthode est appliquée, le temps de traitement au bureau pour un opérateur spécialisé devrait être pris en compte dans le plan d'échantillonnage. Enfin, un grand volume de données numériques est produit par suivi et les images doivent être correctement organisées et stockées. Une ou plusieurs sauvegardes de l'ensemble de données sont recommandées.

Le repositionnement du transect au même endroit que le relevé précédent peut s'avérer particulièrement difficile. Pour cette raison, les différentes vues panoramiques sous-marines de chaque réplica ont été imprimées sur des papiers A4, plastifiées et emmenées sous l'eau pour aider à positionner le transect à chacun des suivis.

5 - High tech à l'échelle de la colonie: le suivi physiologique des colonies

Sur chacun des sites sélectionnés, un suivi physiologique à haute fréquence à l'échelle des colonies coralliennes a été réalisé. L'objectif de ce suivi physiologique était de pouvoir déterminer quelles espèces ont été les plus affectées par ce phénomène de blanchissement, quelles sont celles qui ont été les plus résilientes et comment cela s'est traduit au niveau de leur composition tissulaire.

Type de données collectées

Pour chacun des sites, 5 espèces de coraux ont été sélectionnées. Pour chacune des espèces, 10 colonies ont été marquées. 5 mesures d'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) ont été prises sur chacune des colonies. Pour chaque colonie et chaque temps de mesure, une moyenne d'efficacité photosynthétique est obtenue. Cette moyenne est comprise entre 0 et 0,8. Les valeurs entre 0 et 0,2 signifient que les photosystèmes sont gravement endommagés; les valeurs entre 0,2 et 0,4 signifient que les performances photosynthétiques sont très réduites ; les valeurs entre 0,4 et 0,5 sont des valeurs correctes mais non optimales et des valeurs supérieures à 0,5 sont des valeurs correctes. Des petits apex ont également été prélevés sur chacune des colonies trois fois au cours de l'année pour pouvoir suivre l'évolution des concentrations en chlorophylles et les densités en zooxanthelles. Pour chacune des colonies 3 fragments sont prélevés et deux moyennes sont calculées, une exprimée en nombre de zooxanthelles par cm⁻² de surface de squelette et l'autre en µg chlorophylles par cm⁻².

Outils et méthode

LA PAM (pulse amplitude modulation) fluorimétrie est une technique de mesure de la photosynthèse. Le principe repose sur la mesure de la fluorescence de la chlorophylle a du photosystème II qui permet de déterminer l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm). Le diving-PAM détecte sélectivement les variations de fluorescence des *Symbiodinium* grâce à une lumière de mesure à pulsations d'amplitude modulée. Il permet des mesures in situ rapides et fiables de l'efficacité photosynthétique des coraux. Les signaux lumineux (lumière de mesure, flash saturant, fluorescence) sont transportés entre l'appareil et l'échantillon par une fibre optique souple (Figure 19).



Figure 19 Mesures *in situ* réalisées avec un diving-PAM fluorimètre (Walz, Allemagne) constitué d'un caisson immergeable et d'une fibre optique

permettant de mesurer la fluorescence émise par les algues symbiotiques, en réponse aux différents pulses de lumière émis par la fibre optique.

Pour les dosages effectués sur le tissu, les fragments prélevés sur chacune des colonies sont rapidement congelés à -20°C dès le retour au laboratoire. Les mesures de chlorophylles et de densité en zooxanthelles dans les tissus coralliens nécessitent ensuite d'extraire ce tissu par la technique de l'air-pick, de séparer les zooxanthelles du tissu animal par centrifugation et ensuite d'extraire les chlorophylles dans l'acétone.

Traitement des données

Les moyennes et déviations standard pour chaque espèce et chaque temps de collecte sont obtenues pour les valeurs d'efficacité photosynthétique et les concentrations en chlorophylles et zooxanthelles. Les variations de ces paramètres au cours de l'année sont représentées.

Avantages, inconvénients et remarques

Le fait de prélever des petits fragments de colonies pour les analyses de densités en zooxanthelles et pour les concentrations en chlorophylles perturbe les colonies, qui se trouvent déjà dans un état fragilisé par le phénomène de blanchissement. Pour les futurs suivis, il semble donc

préférable de se contenter de réaliser uniquement des mesures d'efficacité photosynthétique avec le diving PAM qui est une technique non intrusive. Cet appareil permet de collecter très rapidement et de façon non destructive des données sur les performances photosynthétiques des zooxanthelles. Cette mesure permet de détecter de façon à anticiper un éventuel stress des coraux. Il a déjà été mis en évidence qu'une diminution de cette efficacité photosynthétique était observée avant même une diminution de l'oxygène produit par la photosynthèse et une diminution de la croissance. De plus, grâce au suivi mené en 2016, au cours duquel variations de Fv/Fm et densités en zooxanthelles ont été menées en parallèle, les futures mesures obtenues de Fv/Fm pourront être mises en lien avec les densités en *Symbiodinium* dans les colonies (sans avoir à impacter les colonies par des prélèvements).

Pour davantage de faisabilité (pour permettre de retrouver plus facilement les colonies coralliennes) par rapport au suivi précédent, les coraux sélectionnés pour les mesures d'efficacité photosynthétique, réalisées avec le diving-PAM, devront être identifiés directement sur les transects décrits précédemment. Ces colonies seront marquées avec des cerflex de différentes couleurs. 5 espèces (comprenant à la fois des espèces décrites comme résistantes et des espèces désignées comme sensibles au blanchissement) seront suivies sur chacun des sites : Stylophora sp., Pocillopora sp., Isopora sp., Porites sp., Acropora sp.

Livrable 3. Atlas des espèces de coraux scléractiniaires sensibles au stress thermique

L'estimation du nombre total de coraux scléractiniaires de Nouvelle-Calédonie fait encore l'objet d'études. Au cours de la dernière décennie, le nombre d'espèces recensées dans l'archipel est passé de 313 (Pichon, 2007) à 457 (Fenner, 2013). Cependant, compte tenu des changements considérables dans la taxonomie corallienne et de l'effort d'échantillonnage récent sur le territoire, l'estimation actuelle de la diversité spécifique basée sur des spécimens existants et / ou des illustrations in situ atteint un total de 390 (F. Benzoni, comm.).

Au total, au moins 12 familles, 47 genres et 145 espèces de coraux ont montré des signes de blanchissement en Nouvelle-Calédonie début 2016. En d'autres termes, plus de 38% des coraux zooxanthellés des eaux calédoniennes ont été affectés à des degrés divers par l'événement. En particulier, ont été concernées les espèces les plus abondantes et qui ont un rôle écologique significatif dans la construction de la trame récifale et dans la vitalité des communautés coralliennes.

Alors que certaines espèces étaient systématiquement affectées et complètement blanchies, d'autres présentaient des signes de blanchissement (complet ou partiel) et / ou de décoloration sur certains sites mais étaient normalement colorées dans d'autres. De plus, nous avons observé côte à côte des colonies complètement blanchies et

d'autres normalement colorées de la même espèce ou d'une espèce différente. Une telle variabilité intra et interspécifique des patrons de blanchissement couplée à une variabilité entre sites et dans le même site rendait difficile la description de ce phénomène.

Cet atlas des espèces affectées par l'évènement de blanchissement 2016 a un double objectif. Il fournit d'une part une archive photographique attestant du fait que plusieurs espèces ont été affectées par le phénomène de blanchissement, et d'autre part l'occasion d'illustrer plus en détail les différents scenarios de blanchissement et de documenter la variabilité des réponses corail / zooxanthelles au niveau des polypes (par exemple, planche XIIe), des colonies (par exemple, Planche Ii), de la population (par exemple, Planche VIa).

Pour les 18 planches qui suivent, lorsqu'une identification est fournie sans autre remarque, le corail représenté est considéré comme blanchi. Sinon, les abréviations suivantes ont été utilisées:

- b. = blanchie
- d. = décolorée
- p.b. = partiellement blanchie
- p.d. = partiellement décolorée
- n. = normalement colorée

Liste des Planches

Planche I Famille Acroporidae, genre *Acropora*Planche II Famille Acroporidae, genre *Acropora*Planche III Famille Acroporidae, genre *Acropora*

Planche IV Famille Acroporidae, genres Acropora et Isopora

Planche V Famille Acroporidae, genres Isopora, Alveopora, Astreopora, Montipora

Planche VI Famille Acroporidae, genre *Montipora*Planche VII Famille Acroporidae, genre *Montipora*

Planche VIII Famille Poritidae

Planche IX Famille Agariciidae

Planche X Familles Euphylliidae, Dendrophylliidae et *Incertae sedis*

Planche XI Famille Pocilloporidae

Planche XII Famille Fungiidae

Planche XIII Famille Lobophylliidae

Planche XIV Famille Merulinidae, genres Merulina, Scapophyllia, Astrea, Caulastrea,

Cyphastrea, Dipsastraea

Planche XV Famille Merulinidae, genres *Echinopora*, *Favites*, *Mycedium*

Planche XVI Famille Merulinidae, genres Hydnophora, Leptoria, Platygyra

Planche XVII Famille Merulinidae, genres Coelastrea, Goniastrea, Paragoniastrea,

Pectinia, Oulophyllia

Planche XVIII Familles Diploastreaidae, Psammocoridae, Coscinaraeidae, Incertae Sedis



Planche I Acroporidae



Planche II Acroporidae

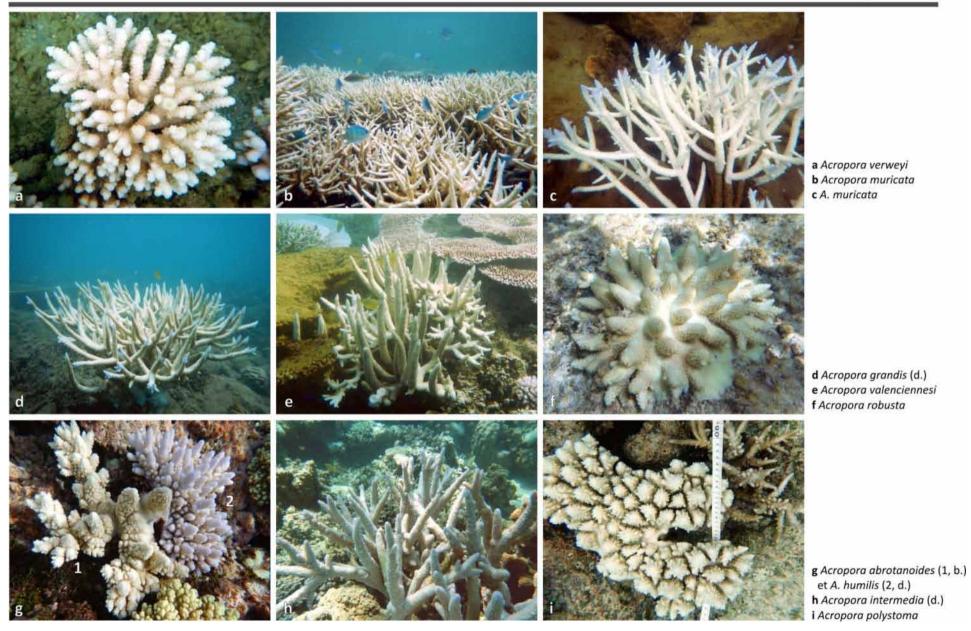
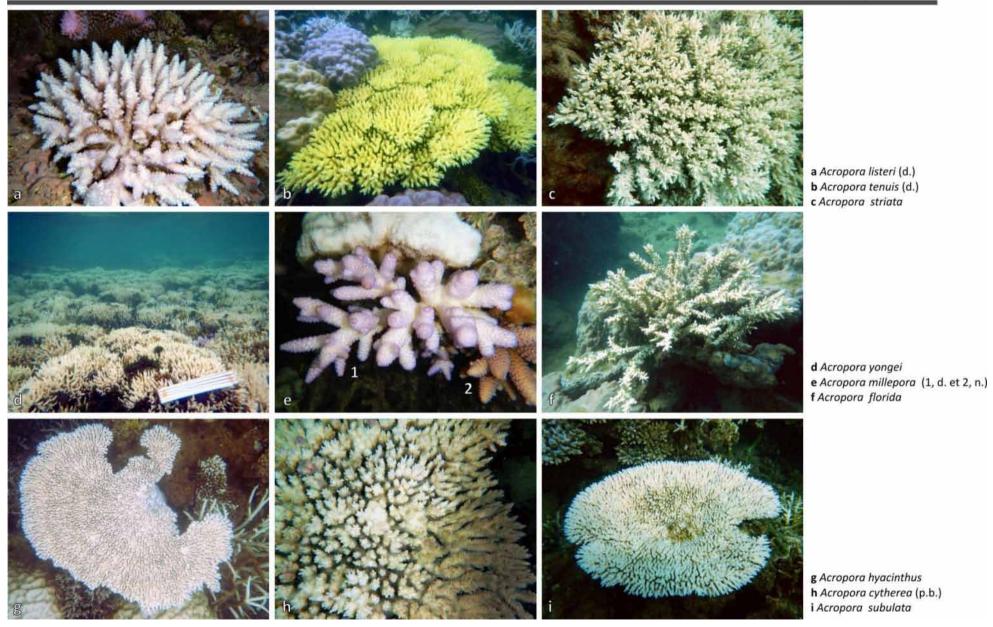


Planche III Acroporidae



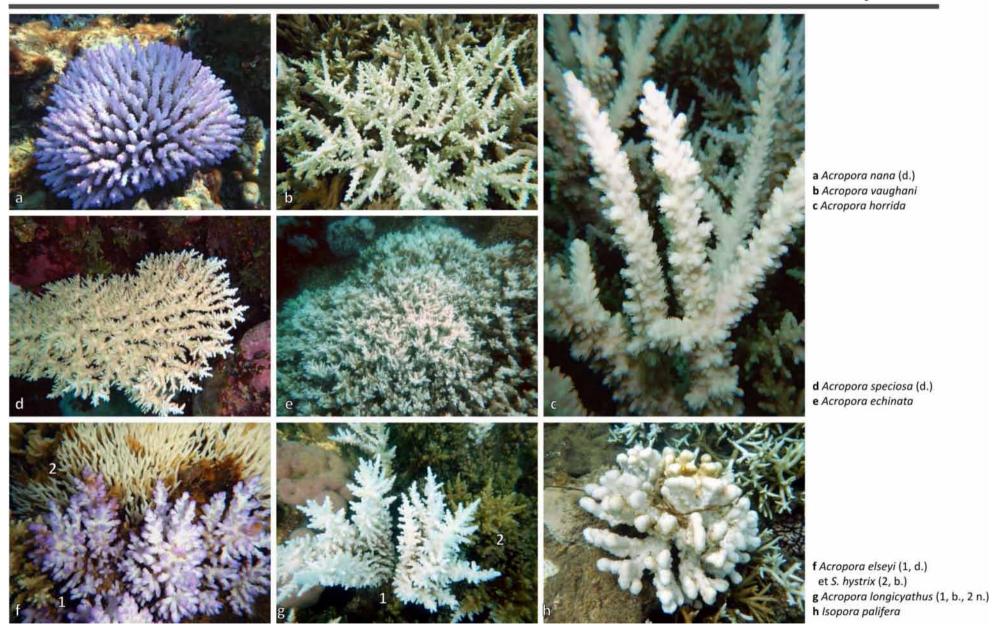


Planche V Acroporidae



Planche VI Acroporidae



Planche VII Acroporidae



Planche VIII Poritidae





Euphylliidae - Dendrophylliidae - Incertae sedis



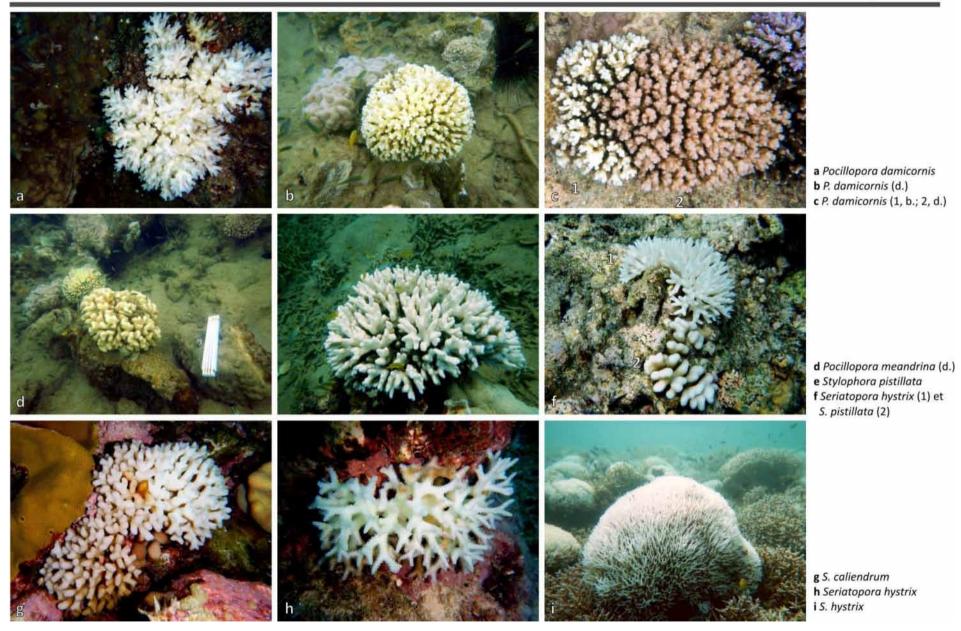


Planche XII Fungiidae



Planche XIII Lobophylliidae





Planche XV Merulinidae



Planche XVI Merulinidae



Planche XVII Merulinidae



Diploastreidae - Coscinaraeidae - Psammocoridae - Incertae sedis



Liste des espèces de coraux scléractiniaires touchées par le blanchissement de 2016 en Nouvelle-Calédonie

Cette liste comprend des espèces de coraux qui ont été directement observées sur le terrain pendant le phénomène de blanchissement et qui ont montré des signes de décoloration, de blanchissement total ou partiel. L'identification à l'espèce a été réalisée in situ ou en différé à partir d'images numériques. Les observations douteuses n'ont pas été inclues, en particulier pour les espèces avec de petits corallites (<1 mm de diamètre) et celles ayant des problèmes taxonomiques connus.

Les observations à l'origine de cette liste ont été réalisées dans le lagon sud de la Grande-Terre dans le cadre du projet BLANCO (février à avril 2016) et dans les récifs d'Entrecasteaux lors de la mission SUR-BLANCO (mars 2016). Cet atlas est conçu comme une référence et une documentation sur l'importance du phénomène en termes d'espèces affectées, et non pas comme une liste exhaustive.

Famille Acroporidae

Genre Acropora

Acropora abrotanoides

Acropora acuminata Acropora aspera

Acropora cerealis

Acropora clathrata

Acropora cytherea

Acropora digitifera

Acropora echinata

Acropora elseyi

Acropora florida

Acropora grandis

Acropora horrida

Acropora humilis

Acropora hyacinthus

Acropora intermedia

Acropora listeri

Acropora longicyathus

Acropora lutkeni

Acropora millepora

Acropora monticulosa

Acropora muricata

Acropora nana

Acropora nasuta

Acropora polystoma Acropora robusta

Acropora samoensis

Acropora sarmentosa

Acropora secale

Acropora solitaryensis

Acropora speciosa Acropora striata

Acropora subulata

Acropora tenuis

Acropora valenciennesi

Acropora valida

Acropora vaughani

Acropora verweyi

Acropora yongei

Genre Alveopora

Alveopora spongiosa Alveopora verrilliana Genre Astreopora

Astreopora myriophthalma

Genre Isopora

Isopora crateriformis

Isopora palifera

Genre Montipora

Montipora aequituberculata

Montipora australiensis

Montipora calcarea

Montipora caliculata

Montipora cf cocosensis

Montipora cf grisea

Montipora cf undata

Montipora crassituberculata

Montipora danae

Montipora digitata

Montipora efflorescens

Montipora foliosa

Montipora foveolata Montipora hispida

Montipora incrassata

Montipora informis Montipora nodosa Montipora stellata Montipora turgescens Montipora venosa Montipora verrucosa

Famille Agariciidae

Genre Gardineroseris
Gardineroseris planulata

Genre Leptoseris
Leptoseris mycetoseroides

Genre Pavona

Pavona cactus
Pavona decussata
Pavona duerdeni
Pavona explanulata
Pavona maldivensis
Pavona varians
Pavona venosa

Famille Coscinaraeidae

Genre Coscinaraea
Coscinaraea exesa

Famille Dendrophylliidae

Genre Turbinaria
Turbinaria reniformis
Turbinaria sp.

Famille Diploastreidae

Genre Diploastrea

Diploastrea heliopora

Famille Euphylliidae

Genre Euphyllia
Euphyllia cristata
Euphyllia glabrescens

Genre Galaxea
Galaxea astreata
Galaxea fascicularis

Famille Fungiidae

Genre Ctenactis
Ctenactis echinata

Genre Fungia Fungia fungites

Genre Lithophyllon
Lithophyllon repanda

Genre Lobactis

Lobactis scutaria

Genre Sandalolitha
Sandalolitha robusta

Famille Lobophylliidae

Genre Acanthastrea
Acanthastrea echinata
Acanthastrea rotundoflora

Genre Echinophyllia
Echinophyllia aspera

Genre Lobophyllia
Lobophyllia agaricia

Lobophyllia corymbosa Lobophyllia hemprichii Lobophyllia recta

Famille Merulinidae

Genre Astrea
Astrea curta

Genre Caulastrea
Caulastrea furcata

Genre Coelastrea
Coelastrea aspera

Genre Cyphastrea
Cyphastrea micropthalma
Cyphastrea serailia

Genre Dipsastraea
Dipsastraea favus
Dipsastraea pallida
Dipsastraea speciosa

Genre Echinopora
Echinopora gemmacea
Echinopora horrida
Echinopora lamellosa

Genre Favites
Favites abdita
Favites halicora
Favites magnistellata
Favites vasta

Genre Goniastrea Goniastrea pectinata Goniastrea retiformis Goniastrea stelligera

Genre Hydnophora
Hydnophora exesa
Hydnophora microconos
Hydnophora rigida

Genre *Leptoria Leptoria phrygia*

Genre Merulina Merulina ampliata Merulina scabricula

Genre Mycedium

Mycedium elephantotus

Genre Oulophyllia
Oulophyllia crispa

Genre Paragoniastrea
Paragoniastrea russelli

Genre Pectinia

Pectinia lactuca

Pectinia paeonia

Genre Platygyra

Platygyra daedalea Platygyra pini Platygyra sinensis

Genre Scapophyllia
Scapophyllia cylindrica

Famille Merulinidae

Genre Pocillopora

Pocillopora damicornis

Pocillopora meandrina

Pocillopora verrucosa

Genre Seriatopora
Seriatopora caliendrum
Seriatopora hystrix

Genre Stylophora
Stylophora pistillata

Famille Poritidae

Genre *Goniopora Goniopora spp.*

Genre Porites

Porites annae

Porites cylindrica Porites lichen Porites lobata Porites lutea

Famille Psammocoridae

Genre Psammocora
Psammocora contigua
Psammocora haimiana

Incertae sedis

Genre Leptastrea
Leptastrea purpurea
Leptastrea transversa

Genre Pachyseris
Pachyseris speciosa
Pachyseris rugosa

Genre Plesiastrea
Plesiastrea versipora

Livrable 4. Evolution des populations coralliennes post-blanchissement

Le présente livrable reprend les grandes lignes du guide méthodologique et consiste à :

- caractériser les communautés coralliennes au début de l'épisode de blanchissement massif et l'éventuel changement sur la communauté, suite à cet épisode
- quantifier le taux de survie des colonies coralliennes suite à cet épisode
- observer la dynamique des colonies en termes de résilience, c'est-à-dire les changements de coloration des colonies coralliennes
- observer la dynamique des colonies en termes de résistance, c'est-à-dire les changements de vitalité des colonies coralliennes

Ces observations sont réalisées sur quatre sites du lagon sud-ouest, le long de transects permanents avec un suivi photographique mensuel durant un an, documentant l'état des colonies coralliennes le long des transects, selon leurs genres et leurs formes de croissance et tel que décrit dans le guide méthodologique

Le suivi permanent à « haute fréquence »

Il s'agissait de suivre de manière régulière au cours du temps des colonies coralliennes avec des observations mensuelles que l'on qualifie de « haute fréquence » en comparaison avec d'autres suivis coralliens réalisés par ailleurs, ponctuels ou de l'ordre d'une observation par année (Van Woesik et al. 2011). Le choix est porté sur quatre sites du lagon de Nouméa, déjà équipés de thermographes ReefTEMPS/GOPS :

- un récif frangeant à exposition lagonaire (Baie des Citrons)
- deux récifs d'îlot à exposition lagonaire (Ile aux Canards, proche de la côte, et îlot Phare Amédée, proche du récif-barrière)
- un récif-barrière à exposition océanique, pente externe (Uitoé)

Sur chaque site, quatre transects de 20 m de long sont positionnés, tous à une même profondeur (environ 2 m) et à une même distance de la côte/îlot/crête pour constituer quatre réplicas. Chaque transect est balisé par deux piquets fixés de manière permanente au début et à la fin du transect et signalés par des petits flotteurs pour faciliter le repérage lors de chaque visite du site. Le suivi des peuplements coralliens est réalisé par des séries photographiques prises de manière à inclure une surface d'au moins 50 cm de large, tout le long de chaque transect. Cette méthode permet d'une part une récolte rapide de données par les opérateurs sous-marins, ne nécessitant pas la mobilisation de connaissances taxonomiques in situ, mais elle permet également de conserver l'image des assemblages benthiques à un temps d'observation donné, pour éventuellement y revenir ultérieurement et en extraire d'autres données, au-delà de cette étude.

Dès que le blanchissement massif fut constaté, ce suivi a été mis en place au plus tôt, et réitéré une fois par mois environ, pendant un an (10 relevés en 12 mois), afin de documenter de manière fine la dynamique dans le temps. Cela a mobilisé quatre plongeurs durant trois journées à la mer pour chaque temps d'observation. Les différents sites ont été visités de manière quasi simultanée, afin de pouvoir comparer

d'un site à l'autre les observations réalisées à un même temps T, généralement en fin de mois, à une semaine près (voir Tableau 2).

Seul le site de Uitoé n'a pas été visité aussi fréquemment que les autres, en raison de l'accès difficile de ce site sur pente externe, soumis directement à la houle du large. La récolte de données a ainsi pu y être menée uniquement aux temps T0, T3, T7 et T8.

Tableau 2 Correspondance entre les temps d'observation (T) et les dates calendaires.

Temps T d'observation	ТО	T1	T2	Т3	T4	T5	Т6	Т7	Т8	Т9
Mois 2016	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Sept.	Déc.	Janv.	Fév

La saisie de la donnée à partir des photographies

Les séries photographiques sont regroupées par site, par transect et par temps. Pour chaque transect, des panoramas ont été réalisés par montage des clichés pris à TO, afin de servir de base visuelle de référence. Sur ces panoramas, les colonies coralliennes à suivre dans le temps sont repérées par une étoile et un numéro d'identification (Figure 20). Une base de données est ensuite construite en saisissant les numéros de chaque colonie repérée et en les indexant par site et par transect. Puis chaque colonie est identifiée par forme de croissance, par genre et, lorsque cela est possible sur la base de l'observation des photographies, par espèces (English, Wilkinson & Baker; Veron, 2000). La saisie des données sur l'état des colonies est ensuite réalisée par une observation en parallèle du panorama de référence et de la série photographique pour le temps concerné, afin de repérer la colonie numérotée et de décrire son état, mois après mois, selon deux lectures : d'une part selon une lecture « vitalité » et d'autre part selon une lecture « coloration » (Tableau 3). Si une colonie n'est pas visible sur la photo (problème de perspective en trois dimensions ou trajectoire du transect parfois perdue), alors l'observation de l'état de la colonie ne peut pas être réalisée, et est annotée NA (Not Available), pour le temps concerné.

L'identification des colonies permet de quantifier les données : par formes de croissance et genres pour chaque site. Selon les genres le nombre de colonies identifiées jusqu'à l'espèce est limité (car nécessitant parfois d'observer jusqu'à la morphologie du squelette, non accessible par les photo-transects), notre étude se base donc principalement sur l'analyse des formes de croissance et des genres.



Figure 20 Exemples de panoramas photographiques d'une partie d'un transect à Baie des Citrons (a) et à Uitoé (b), pris à T0 pour servir de base de référence avec numérotation des colonies suivies dans le temps.

Tableau 3 Codes de coloration et de vitalité utilisés pour le suivi de l'état des colonies coralliennes.

	Code	Description			
uc	C1. Colorée	La colonie a conservé sa coloration normale			
Coloration	C2. Décolorée	La colonie présente une décoloration			
S	C3. Blanchies	La colonie présente un blanchissement			
	V1. Vivante	La colonie est entièrement vivante ; elle peut présenter différentes colorations (correspond aussi à C1, C2, C3)			
Vitalité	V2. Partielleme nt vivante	La colonie est partiellement vivante : elle peut présenter différentes colorations (de C à C3) et partiellement morte (recouverte d'un tapis d'algues « turf »)			
	V3. Morte	La colonie est totalement morte, recouverte d'un tapis d'algues « turf »			
	V4. Morte et cassée	L'emplacement de la colonie est bien visible sur la photo mais celle-ci n'y figure plus, elle a été cassée au cours de l'épisode			

Après analyse des transects photographiques, il apparaît que chaque transect compte environ 150 colonies coralliennes suivies. Au total, plus de 2000 colonies coralliennes ont donc été suivies dans le temps, durant les dix observations. Les données n'étant pas distribuées de façon normale, c'est le test non paramétrique de Wilcoxon pour séries appariées qui est utilisé.

Description fine de l'état des colonies au cours de l'épisode

Chaque colonie a été décrite selon des codes de coloration et de vitalité (Tableau 3) (Marshall & Baird 2000). Cependant, au cours de l'analyse des photos, la description plus détaillée de l'état des coraux a permis de mieux rendre compte de la complexité des dynamiques coralliennes au cours de l'épisode (Tableau 4). De plus, il apparait que certaines colonies coralliennes ont présenté un état combiné de coloration et de vitalité (e. g. partiellement vivante blanchie et partiellement morte), d'où les correspondances entre catégories. Cette description fine donne plus de détail mais l'analyse est plus difficile à représenter clairement pour l'ensemble des colonies, pour notre étude. Ce sont donc les codes habituels (Tableau 3) qui ont été conservés pour présenter la suite des résultats.

Tableau 4. Codes et déclinaison des états des colonies coralliennes suivies.

	Code	Déclinaisons détaillées du code
		C1a. Normalement colorée
C1	C1. Colorée	C1b. Partiellement colorée et décolorée
C1. Coloree		C1c. Partiellement colorée et morte (correspond aussi à V2)
on		C2a. Entièrement décolorée
Coloration	C2. Décolorée	C2b. Partiellement décolorée et morte (correspond aussi à V2)
ပိ		C3a. Partiellement colorée et blanchie
		C3b. Partiellement décolorée et blanchie
	C3. Blanchie	C3c. Entièrement blanchie
		C3d. Partiellement blanchie et morte (correspond
		aussi à V2)
		V1. Entièrement vivante, incluant les différentes
	V1. Vivante	colorations possibles (correspond aussi à C1ab,
		C2a, C3abc)
	V2.	
Vitalité	Partiellem	V2. Partiellement vivante et morte (correspond aussi
ita	ent 	à C1c, C2b, C3d)
>	vivante	\(\text{\tint{\text{\tint{\text{\tin}\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\ti}\xi}\\\ \text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\text{\tex{\tex
	V3. Morte	V3. Colonie totalement morte, recouverte d'un tapis d'algues « turf »
	V4. Morte et cassée	V4. Colonie morte et cassée, au cours de l'épisode

Vérification de la donnée

Dans un premier temps, nous souhaitons évaluer la quantité des données collectées dans le temps, par rapport à celle de référence collectée à T0. Pour ce faire, nous comparons pour chaque site, chaque transect et à chaque temps d'observation, le pourcentage de colonies effectivement retrouvées (en éliminant les observations non disponibles, NA), par rapport aux colonies marquées initialement à T0 (égal à 100%), puis nous calculons la moyenne et l'écart-type des quatre transects (Figure 21).

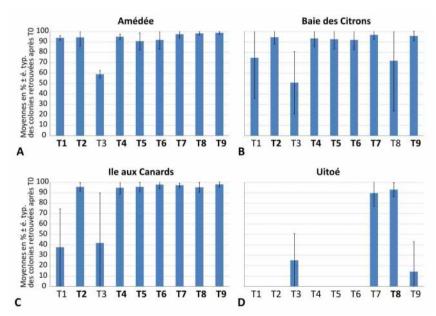


Figure 21 Pourcentage par transect de colonies suivies de T1 à T9, par rapport aux colonies initialement repérées à T0 (moyennes des transects et écart-type).

Il y a 16 transects permanents (4 par sites). Trois des sites ont été revisité 9 fois après T0, et un site a été re-visité 3 fois après T0, soit 120 transects relocalisés sur l'ensemble des sites entre T1 et T9. Pour évaluer le succès de la relocalisation totale ou partielle de ces transects : 58% des transects sont caractérisés par un taux de plus de 95% de colonies retrouvées (soit des transects comportant moins de 5% d'observations non disponibles) ; 68% des transects sont caractérisés par un taux de plus de 90% de colonies retrouvées

Le site Amédée présente globalement le suivi le plus complet, avec plus de 90% de colonies en moyenne qui ont pu être suivies à chaque temps, à l'exception de T3. Cela signifie que les quatre transects ont pu être relocalisés presque totalement à chaque temps d'observation, à l'exception de T3. Pour les sites Ile aux Canards et Baie des Citrons, on retrouve ce suivi incomplet à T3, mais également à T1 pour les deux sites, et à T8 pour Baie des Citrons. Enfin pour Uitoé, pente externe de récif-barrière, aux conditions d'accès difficiles, ce site n'a été re-visité que trois fois après T0, avec à T3 le même suivi incomplet. Cependant, les temps T7 et T8 présentent des proportions de suivi satisfaisantes (90% ou plus, en moyenne).

Situation de référence, au début de l'épisode

a) Proportion des formes de croissances

A T0, les trois sites lagonaires sont caractérisés par la prédominance de coraux branchus, contrairement à Uitoé, pente externe, qui présente en moyenne une répartition plus équilibrée de trois formes de croissance principales : branchues, digitées et massives, ainsi que, dans une moindre mesure, la forme encroûtante (Tableau 5).

Tableau 5 Formes de croissance prédominantes et leurs pourcentages, par site à TO (moyenne par transect et écart-type).

Sites	Formes de croissance prédominantes	Pourcentages à T0
Baie des Citrons	Branchue	40% ± 12
bale des Citions	Massive	40% ± 13
Ilo aux Canarda	Branchue	61% ± 9
Ile aux Canards	Massive	26% ± 3
	Branchue	46% ± 5
Amédée	Encroûtante	34% ± 5
	Corymbe	13% ± 3
	Massive	27% ± 4
Uitoé	Digitée	26% ± 4
	Branchue	26% ± 3
	Encroûtante	16% ± 3

Plus précisément, la Baie des Citrons est caractérisé par la prédominance de coraux branchus et massifs. L'Ile aux Canards présente une très forte prédominance de coraux branchus et dans une moindre mesure, des formes massives, encroûtantes et en hispidoses. Le site Amédée se caractérise par la prédominance des formes branchues et encroûtantes, et dans une moindre mesure, en corymbe.

b) Proportion des genres coralliens

Le site Baie des Citrons se caractérise par la prédominance des genres *Porites* puis *Acropora*, et dans une moindre mesure, *Montipora* (Tableau 6). Le site lle aux Canards présente une forte prédominance *d'Acropora* et dans une moindre mesure, de *Porites* et de *Stylophora*. Le site Amédée, présente une prédominance principalement *d'Acropora* et de *Montipora*, et dans une moindre mesure, de *Seriatopora*. Enfin, Uitoé est le site qui présente la plus grande diversité de genres, dominés par *Acropora*, *Stylophora* et *Goniastrea*.

Tableau 6 Genres prédominants et leurs pourcentages, pour chaque site à TO (moyenne par transect et écart-type).

Sites	Genres prédominants	Proportion à T0 : moyenne et écart-type
	Porites	39% ± 14
Baie des Citrons	Acropora	31% ± 8
	Montipora	13% ± 4
	Acropora	50% ± 12
lle aux Canards	Porites	10% ± 5
	Stylophora	9% ± 3
	Acropora	41% ± 9
Amédée	Montipora	33% ± 7
	Seriatopora	10% ± 2
	Acropora	29% ± 2
Uitoé	Stylophora	20% ± 2
	Goniastrea	13% ± 3

Impact du stress thermique

Pour une caractérisation rapide, tous genres et formes de croissance confondus, de l'impact du stress thermique, les taux de blanchissement et/ou décoloration à T0 sont calculés, ainsi que les taux de survie partielle ou totale entre T0 et T9 (Tableau 7).

Pour chaque site, le taux de survie est supérieur à 75% en moyenne, et augmente selon un gradient côte-large. C'est le site Uitoé qui présente le meilleur taux de survie des colonies (90% \pm 6), et également le plus faible taux de blanchissement-décoloration.

Tableau 7 Taux de blanchissement et décoloration à T0, février 2016, comparé au taux de survie entre T0 et T9, des colonies coralliennes (moyennes des transects et écart type).

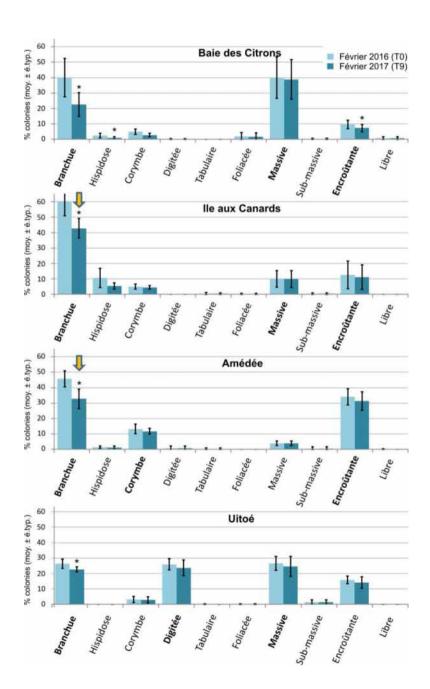
Site	Taux de blanchissement + décoloration à T0	Taux de survie entre T0 et T9
Baie des Citrons	61 % ± 10	75 % ± 10
lle aux Canards	79 % ± 9	75 % ± 4
Amédée	87 % ± 3	83 % ± 6
Uitoé	16 % ± 5	90 % ± 6

Comparaison de la vitalité des colonies entre début et fin de l'épisode

a) Changements de vitalité selon les formes de croissance

Pour les quatre sites, une diminution statistiquement significative est observée pour les formes branchues (Figure 22). Celle-ci est particulièrement marquée pour l'Ile aux Canards ainsi que pour Amédée, où le taux de mortalité totale des colonies branchues est de près de 30% (passant respectivement de $61\% \pm 9$, à $43\% \pm 6$ et de $46\% \pm 2$ à $33\% \pm 6$). Les autres formes de croissance ne présentent pas de diminution statistiquement significative, à l'exception des coraux en écouvillon « hispidose » pour la Baie des Citrons, dont la proportion chute de 37% (passant $2,5\% \pm 0,9$ à $1,6\% \pm 0,8$).

Figure 22 Proportions des formes de croissance par site, comparaison entre T0 et T9 (moyenne des transects et écarts-types). * = différence statistiquement significative (p<0,05). Parmi les *, lorsque les barres d'erreur ne se recoupent pas entre T0 et T9, elles sont marquées d'une flèche jaune pour mettre en évidence la forte diminution moyenne à T9, plus importante que les écart-types des échantillonnages, d'un transect à l'autre

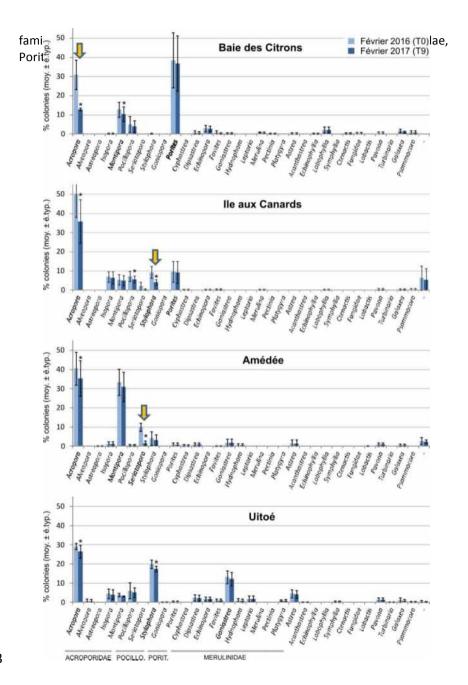


b) Changements de vitalité selon les genres

Dans les quatre sites, les *Acropora* sont parmi les coraux les plus affectés, avec un taux de mortalité moyen d'environ 60% à la Baie des Citrons. Ce même site, le genre *Montipora* est également fortement affecté. Le site de l'Ile aux Canards se caractérise par une diminution significative des genres *Acropora*, *Pocillopora* et *Stylophora*. Pour ce dernier, le taux moyen de mortalité totale est de plus de 55%, ce qui entraîne une modification dans la caractérisation de la communauté corallienne : il passe du 3e au 7e rang en termes de genre le plus représenté en abondance relative.

Au site Amédée les genres *Acropora* et *Seriatopora* sont fortement affectés avec un taux moyen de mortalité totale de près de 85% pour ce dernier, passant ainsi du 3e au 6e rang des genres représentés en abondance relative. Pour le site Uitoé, les genres *Acropora* et *Stylophora* présentent des diminutions significatives. Quel que soit le site, le genre *Porites* ne présente pas de perte significative de vitalité. (Figure 23).

Figure 23 Proportions des genres coralliens par site selon les genres, comparaison entre T0 et T9 (moyenne des transects et écarts-types). * = différence statistiquement significative (p<0,05). Parmi les *, lorsque les barres d'erreur ne se recoupent pas entre T0 et T9, elles sont marquées d'une flèche jaune pour mettre en évidence la forte diminution à T9, plus importante que les écart-types des échantillonnages, d'un transect à l'autre. Les quatre



Dynamique de l'état des colonies au cours de l'épisode

Comme présenté précédemment (Tableau 2), l'état des colonies coralliennes a été suivi mensuellement d'une part selon la vitalité et d'autre part selon la coloration de chaque colonie.

a) Dynamique de coloration des colonies coralliennes

Pour cette analyse, seules sont observées les colonies présentant une survie totale ou partielle au cours du temps. La coloration se décompose en colonies colorées normalement, colonies décolorées et colonies blanchies, selon un gradient de réponse au stress. Cette analyse inclut donc les colonies partiellement mortes, qui sont réparties vers les trois catégories selon la coloration de leur partie vivante. De TO à T9, la proportion de ces colorations est comparée pour chaque (Figure 24).

Les différents sites suivent les mêmes tendances de coloration coralliennes face au stress thermique. Les proportions de colonies coralliennes décolorées et blanchies sont les plus importantes au début de l'observation, en février 2016 (respectivement en jaune et rouge, Figure 24). Elles ont diminué fortement par la suite jusqu'à T3, en mai 2016, où la majorité des colonies vivantes a retrouvé une coloration normale.

On remarque pour le site Amédée, un très fort impact en février 2016 avec $87\% \pm 3$ de décoloration ou blanchissement. On observe une particularité pour Uitoé, avec globalement peu de blanchissement et décoloration, mais où les proportions de blanchissement les plus importantes sont en décembre 2016 - janvier 2017.

b) Dynamique de vitalité des colonies coralliennes

La lecture vitalité permet de comparer au cours du temps l'évolution des colonies selon quatre états de vitalité : vivantes (incluant les différentes colorations), partiellement mortes, totalement mortes ainsi que mortes et cassées (Figure 25).

L'évolution de la vitalité suit le même patron pour les quatre sites : une diminution progressive de la proportion de colonies totalement vivantes, même après l'épisode de blanchissement, et une augmentation progressive de la mortalité et de la casse, même sur la fin de la période d'observation. On remarque que le site de Uitoé semble moins impacté.

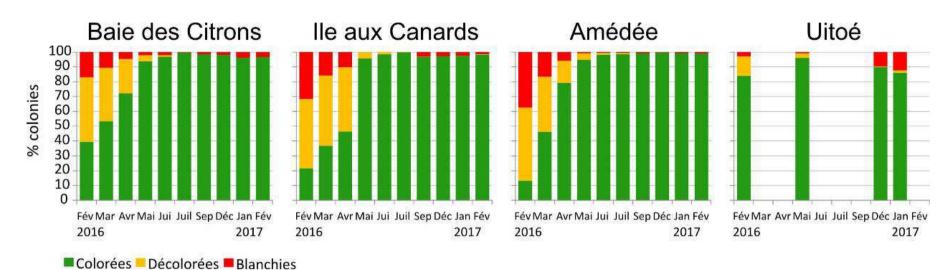
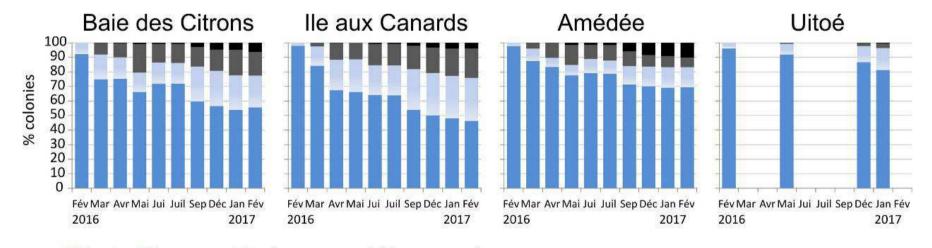


Figure 24 Dynamique de coloration des colonies coralliennes vivantes (totalement ou partiellement), pour chaque site (moyennes des transects).



■ Vivantes ■ Part. mortes ■ Totalement mortes ■ Mortes et cassées

Figure 25 Dynamique de la vitalité des colonies coralliennes, pour chaque site (moyennes des transects).

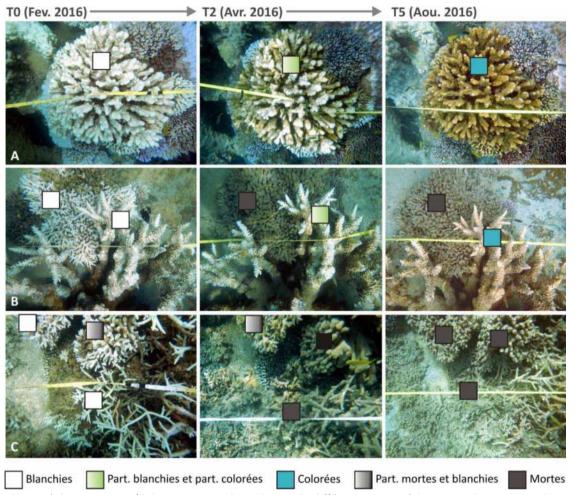


Figure 26 Changements de l'état de santé des coraux au fil du temps pour les colonies de différents genres à la station lle aux Canards. A : la même colonie d'*Isopora* palifera blanchie en février 2016, partiellement blanchie et partiellement colorée en avril puis colorée en août 2016. B : colonies d'*Acropora* de formes tabulaire et branchue (*A. florida*) montrant un état de santé contrasté dans le temps après le blanchissement. C : mortalité des colonies d'*Acropora* et *Stylophora* blanchies et perte de leur structure en trois dimensions.

Originalité du suivi Blanco

Dans la majorité des cas qui ont fait l'objet de publications et rapports, les épisodes de blanchissement coralliens sont souvent évalués par une seule phase d'observation au cours du blanchissement (e. g. l'Australie, ARC, 2017), ou bien par deux phases d'observation : avant/après à plusieurs années d'intervalle (e. g. le Japon, Loya et al. 2001/ la Polynésie, Trapon, Pratchett & Penin, 2011) ou encore pendant/après (e. g. les récifs français de l'Océan Indien, Marex, Espace-Dev & Entropie 2017).

L'approche adoptée par le projet Blanco pour le suivi de ce phénomène, se caractérise par :

- des observations mensuelles durant un an à partir du début de l'épisode de blanchissement ;
- une description précise de l'état des colonies qui distingue plusieurs états de réponse au stress (Tableau 3), enrichissant ainsi la méthode utilisée jusqu'alors par le réseau collaboratif du RORC en Nouvelle-Calédonie (Job & Guillemot 2014);
- une documentation multi-variable incluant les différents sites, formes de croissance et genres, à l'échelle des individus et également des assemblages coralliens ;
- des données recueillies par photo-transects.

A notre connaissance, c'est la première fois qu'un suivi d'assemblages coralliens dans un contexte de blanchissement est mis en place à si haute fréquence et durant aussi longtemps. Cette approche du suivi d'un épisode de blanchissement est originale et apporte un grand nombre de données permettant de comprendre la dynamique postblanchissement.

Resituer les résultats dans un contexte environnemental plus large

Cette étude constitue l'un des volets du projet Blanco, qui a été conçu pour documenter et comprendre cet épisode unique dans un ensemble géographique et thématique plus large, incluant également l'observation du blanchissement à l'échelle de l'archipel et des mesures de l'évolution physiologique des tissus coralliens (mesures de l'activité photosynthétique, quantification des protéines et des zooxanthelles). Ces résultats ne sont pas encore disponibles, mais ils seront confrontés avec les dynamiques de coloration montrées dans cette étude.

Le volet du projet Blanco concernant l'influence des facteurs environnementaux montre que l'été austral 2015-2016 a été marqué par l'un des plus forts phénomènes El Niño jamais enregistré (climate.org 2016) (voir Annexe 5), qui se traduit classiquement par un déplacement de la warm pool vers l'est du Pacifique (Menkès, 2013). Ceci se manifeste habituellement par des températures de l'eau de surface plus élevées que la normale dans la zone équatoriale-est du Pacifique (Polynésie), et non dans la zone ouest. Ainsi, la Nouvelle-Calédonie enregistre habituellement un refroidissement des eaux de surface au cours des phénomènes El Niño. Cependant, durant l'été austral 2016 en Nouvelle-Calédonie, après la phase de refroidissement attendue, c'est un réchauffement anormal des températures qui a été observé, entraînant l'épisode de blanchissement massif constaté. Celuici n'est donc pas dû directement à l'épisode El Niño, comme c'est le cas ailleurs, mais à un phénomène météorologique de réchauffement local (Mora, 2017).

Pour illustrer le stress thermique, un indicateur de stress est mesuré, le DHW: Degree Heating Week, mesurant le stress accumulé par les coraux sur les 12 dernières semaines. La Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. permet de comparer le stress accumulé par les coraux d'un site à l'autre, sur la base des données collectées par les thermographes in situ. La tendance globale est à la hausse à partir de fin janvier-début février 2016 pour l'ensemble des sites à l'exception de l'Anse Vata (anse voisine de la Baie des Citrons), qui augmente un mois plus tôt, et présente un niveau de DHW nettement supérieur aux autres sites.

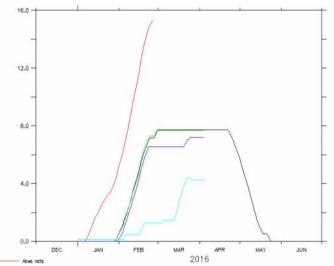


Figure 27 Comparaison de l'indice de stress "Degree Heating Week " pour les quatre sites suivis : Anse Vata en rouge (site voisin de la Baie des Citrons), lle aux Canards en vert, Amédée en indigo et Uitoé en bleu clair.

Le site de Uitoé présente un indice de stress nettement inférieur à celui de Phare Amédée, lui-même légèrement inférieur à celui d'Ile aux Canards. Ces observations sont d'importance car elles confirment et expliquent les tendances observées dans nos résultats, avec un gradient côte-large pour la vitalité des colonies coralliennes lors de cet épisode de blanchissement.

Leçons et résultats principaux du suivi Blanco

a) Qualité et validation de la donnée

La représentativité des données dépend de la proportion des transects relocalisés correctement d'une période à l'autre, par rapport au transect de référence, positionné à TO. A T3, il a été particulièrement difficile de localiser les transects. Ceci est expliqué par un changement d'opérateur en plongée sous-marine qui, moins familier de la manœuvre, n'a pas pu repérer l'emplacement exact de certains transects permanents. La série photographique ne correspond donc pas entièrement au transect de référence (Problème 1). Pour le site lle aux Canards on observe également un suivi incomplet à T1. Ce dernier, pourtant effectué par le même opérateur, pourrait être du à un suivi rendu plus difficile par la nature monospécifique de la communauté corallienne qu'il transect traverse (i. e. grands recouvrements d'Acropora branchus), limitant donc la prise de points de repère précis (Problème 2).

Le risque de biais dans la saisie de l'état de la colonie, lié au changement d'observateur des photographies (le stagiaire G. Garlasché pour la première moitié des temps d'observation et moi-même pour la seconde moitié), a été réduit le plus possible par une vérification de la cohérence et un lissage des deux saisies, entre les deux moitiés.

b) Genres et formes de croissance des coraux

Quel que soit le site, les résultats montrent qu'une diminution statistiquement significative de la vitalité est observée pour les formes de croissance branchues et pour le genre Acropora, tandis que le genre Porites et les formes de croissance massives ne présentent pas de diminution significative, sur la période du suivi. Ces observations sont en accord avec la caractérisation des colonies coralliennes qualifiées de « losers » ou bien de « winners » (Loya et al. 2001) selon leur résistance au stress thermique. De plus, les espèces coralliennes appartenant à la famille des Pocilloporidae sont décrites comme « losers » (Van Woesik et al. 2011) et dans notre étude, effectivement, les trois genres représentés dans cette famille : Pocillopora, Seriatopora et Stylophora, subissent une diminution statistiquement significative de la vitalité dans au moins un des guatre sites. La présence de cette famille de coraux dans les assemblages des récifs pourraient être particulièrement menacée si d'autres épisodes de stress intense se succèdent trop rapidement pour laisser aux colonies le temps de récupération nécessaire à leur pérennité (Van Woesik et al. 2011).

Pour notre suivi, il faut noter que nous avons deux observations contraires aux tendances décrites dans la littérature : d'une part une diminution significative de la vitalité des colonies de forme encroûtantes, à la Baie des Citrons, alors que cette forme de croissance

est plutôt caractérisée comme « winner » (Loya et al. 2001), et d'autre part la forme de croissance en corymbe ne subit pas de diminution significative, pour aucun des quatre sites (voir Figure 8), alors que cette forme est décrite comme l'une des plus fragile, à l'instar des formes branchues (Loya et al. 2001).

c) Gradient côte-large

Chaque site est localisé le long d'un gradient côte-large. Nous ne disposons que d'un seul site observé par type de localisation (Problème 3), faute de temps et de ressources pour multiplier l'effort d'échantillonnage. Nous ne pouvons donc pas analyser statistiquement ce gradient, mais il est possible d'observer une tendance. En effet, les taux de survie pour les quatre sites suggèrent assez bien ce gradient côte-large : les sites Baie des Citrons (récif frangeant) et île aux Canards (récif d'îlot à exposition lagonaire, proche de la côte) montrent des taux de survie plus faible que le site Amédée (récif d'îlot à exposition lagonaire, proche de la passe océanique). Mais c'est le site Uitoé (exposition océanique) qui présente le meilleur taux de survie des colonies et également le plus faible impact de blanchissement et décoloration. Ceci pourrait s'expliquer par la nature même du site, exposé à l'océan, donc bénéficiant d'un environnement hydrodynamique exposé à la houle et aux remontées d'eaux froides et donc moins sujet au stress thermique (Figure 12). Concernant les sites lagonaires, le taux de blanchissement et décoloration semble plutôt lié à la composition des assemblages coralliens. En effet on observe par exemple à Baie des Citrons une forte proportion de coraux du genre Porites (39% ± 14) (Tableau 5), résistants au stress thermique, qui expliquerait un plus faible taux de blanchissement et décoloration que les autres sites lagonaires.

d) Dynamique des colonies face au stress thermique

Le suivi à haute fréquence permet de mettre en évidence la dynamique fine de l'état des colonies face au stress thermique. Les Figures 24-26 permettent de visualiser l'évolution de la coloration et de la vitalité corallienne. On observe des patrons communs aux différents sites, qui sont :

- pour la coloration, les proportions de colonies coralliennes décolorées et blanchies sont les plus importantes au premier temps d'observation, en février 2016. On note que pour chacun des sites, les proportions de colonies décolorées sont plus importantes que celles de colonies blanchies, ce qui confirme l'intérêt de consigner également cette information de réponse au stress. Puis, elles diminuent fortement par la suite jusqu'en mai 2016, où la majorité des colonies vivantes a retrouvé une coloration normale ; ceci correspond à la fin de la période de températures de surface anormalement élevées dans le lagon. Le site de Uitoé présente une exception puisqu'il montre une proportion de colonies blanchies plus importante en fin de suivi (déc 2016 et janv. 2017), qu'en début de suivi (fév. 2016). Cela pourrait être imputé soit à un autre phénomène de blanchissement, qui pourtant n'aurait pas touché les autres sites dans le lagon, soit à une perte de coloration plutôt due à la perte de tissus par prédation ou broutage (étoiles de mer Acanthaster planci, drupes, autres).
- pour la vitalité, la proportion de colonies vivantes est la plus importante en début de suivi et on note une diminution progressive tout au long de la période d'observation. Ainsi, même après l'épisode de blanchissement, qui a duré de janvier à avril 2016, on continue à observer une progression du nombre de colonies totalement mortes et

des colonies mortes et cassées, et ce jusqu'à la fin de la période d'observation. Cela signifie que l'impact physiologique du stress thermique continue de se manifester sur une période longue. Ces observations originales, in situ, montrent l'intérêt de mener un suivi sur le long terme, et pas seulement à une ou deux périodes comme cela a été la norme ailleurs.

e) L'hypothèse d'adaptation et la Nouvelle-Calédonie

Les différences de résilience et résistance face au stress thermique dépendraient à la fois du corail en tant qu'animal mais également de la composition de son holobionte, incluant entre autres zooxanthelles et bactéries (Baird et al. 2009). En effet, il existe différents types de zooxanthelles, classés en clades, dont les seuils de tolérance aux maximums de températures peuvent varier. Les zooxanthelles de clade D confèreraient aux coraux une plus grande résistance en cas de températures élevées (Berkelmans, 2006). Après un épisode de blanchissement, un corail qui survit peut changer de clade de zooxanthelles, montrant ainsi une forme d'adaptation (« The bleaching adaptation hypothesis », Buddemeier et al., 2004), mais cette théorie est controversée (communication personnelle de Véronique Berteaux-Lecellier et Fanny Houlbrèque, UMR Entropie) et rôle des bactéries au sein du holobionte serait également à considérer (Ladrière, 2012). Ce paramètre est en cours d'étude dans le cadre du projet Blanco, mais les résultats ne sont pas encore disponibles.

4- Originalité et pérennisation de la méthode Blanco

La méthode haute fréquence adoptée par le projet Blanco pour ce suivi de l'épisode de blanchissement corallien a permis de mettre en évidence des dynamiques fines des réponses coralliennes mois après mois durant une année, par genres, formes de croissance et site. Ces résultats auraient été impossibles à acquérir par les méthodes classiques de suivis annuels et/ou ponctuels, à la suite d'un épisode de blanchissement. Mais ces avantages impliquent également des contraintes : un tel suivi nécessite des moyens matériels significatifs, et des moyens humains qualifiés sur le terrain et en laboratoire (e.g. expertise pour l'identification des colonies puis environ 2h par transect pour décrire l'état des colonies à chaque temps d'observation). Malgré ces coûts, l'approche à haute fréquence sur des transects permanents est donc à recommander pour la qualité et l'abondance des données générées, et ce y compris pour les gestionnaires d'autres collectivités d'outre-mer, dans le contexte de suivi corallien lorsqu'un épisode de stress est prédit comme imminent ou a déjà débuté. Ce type

Conclusion

Pour conclure, cette étude s'insérait dans l'ensemble du projet Blanco et a permis d'évaluer au niveau écologique, l'impact du premier épisode de blanchissement massif en Nouvelle-Calédonie. Les résultats présentés ici restent descriptifs, mais cette première étape de fond permet de bâtir plusieurs hypothèses sur le fonctionnement et la régulation des perturbations dans le lagon néo-calédonien sud,

d'approche peut-être combiné avec un suivi basse fréquence sur le long terme, tel que détaillé dans l'encadré ci-dessous. La méthodologie proposée est inspirée du succès du suivi Blanco, et consolidée par les retours d'expérience.

Cette stratégie « adaptative » est pensée pour ajuster le suivi aux aléas environnementaux, impliquant une certaine flexibilité en termes de moyens disponibles, notamment une flexibilité budgétaire. Néanmoins, la mise en œuvre de cette méthode, adaptée à un suivi sur le long terme et modulable en haute fréquence en cas de période de stress, permettrait de mettre en évidence les évolutions des assemblages coralliens. En effet, pour une gestion efficace de l'écosystème, il est indispensable de mener un suivi sur les changements d'assemblages et d'habitats coralliens (Trapon et al. 2011).

notamment vis-à-vis du gradient bio-physique de la côte au large. L'ensemble des données du projet Blanco sera nécessaire pour fournir un modèle de fonctionnement multi-échelle des communautés coralliennes face au réchauffement climatique. A une plus grande échelle encore, cette étude permet également d'apporter une contribution fine à la compréhension de la diversité des épisodes de blanchissement des récifs coralliens.

Livrable 5. Résultats sur le suivi physiologique des colonies coralliennes sélectionnées et évolution des symbiotes durant la phase de blanchissement et post-blanchissement

L'objectif de ce suivi physiologique était de pouvoir déterminer quelles espèces ont été les plus affectées par ce phénomène de blanchissement, quelles sont celles qui ont été les plus résilientes et comment cela s'est traduit au niveau de leur composition tissulaire.

Pocillopora damicornis

La plus importante perte de colonies de *P. damicornis* a été mesurée sur le site du Phare Amédée. En février 2016, lors du marquage des colonies, une mortalité partielle de 31% a été observée, 44% des colonies sont apparues blanchies. Après une année, il semble que ces colonies blanchies sont mortes pour atteindre un pourcentage de colonies mortes de 78% en février 2017. Les colonies présentent des densités faibles en *Symbiodinium* en février 2016 (1,35 \pm 0,25 x 10 6 cell cm $^{-2}$), elles parviennent à augmenter ces densités en Avril 2016 (1,60 \pm 0,15 x 10 6 cell cm $^{-2}$) pour redescendre à des densités équivalentes à celles de février 2016 en décembre 2016 (1,37 \pm 0,13 x 10 6 cell cm $^{-2}$).

Les colonies de P. damicornis du Phare Amédée ont du faire face à deux épisodes de stress : l'un en février 2016 et l'autre en fin d'année 2016, comme le confirme les données de Fv/Fm. L'efficacité photosynthétique des colonies présente en effet des valeurs minimales en février 2016 (0,31 \pm 0,07) et en août et décembre 2016 (0,25 \pm 0,11 et 0,29 \pm 0,17) révélant un stress des colonies à ces deux périodes.

Sur le site de l'îlot Canards, alors qu'en février 2016, 90% des colonies avaient blanchies, il semble que 41% des colonies aient retrouvé leur métabolisme normal. Les colonies qui, en février 2016 présentaient des

densités en *Symbiodinium* faibles $(0.8 \pm 0.3 \times 10^6 \text{ cell cm}^{-2})$ ont doublé leur densité $(2.0 \pm 0.2 \times 10^6 \text{ cell cm}^{-2})$. Ces colonies qui présentaient une efficacité photosynthétique quasi-nulle en février 2016 (0.22 ± 0.05) retrouvent des valeurs de Fv/Fm normales en décembre 2016 (0.53 ± 0.02) , supérieures au seuil de 0,5, signe de bonne santé de ces coraux.

En Baie des Citrons, 70% des colonies avaient blanchi en février 2016 et 26% de ces colonies ont repris leur état physiologique normal après un an. Comme pour le site de l'îlot canards, en février 2016, les colonies présentaient des densités en *Symbiodinium* extrêmement faibles (0.9 \pm 0,3 x 10 6 cell cm $^{-2}$) et ont retrouvé des densités normales de l'ordre de 2,3 \pm 0,3 x 10 6 cell cm $^{-2}$ à partir du mois d'avril 2016. A partir de ce mois d'Avril 2016, les valeurs mesurées par le diving-PAM confirment que les colonies survivantes ont retrouvé une efficacité photosynthétique normale de 0,52 \pm 0,07.

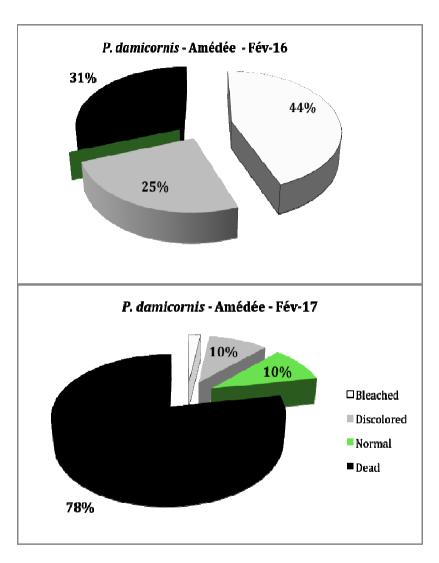


Figure 28 Pourcentage de colonies de *P. damicornis* mortes, blanchies, décolorées ou normales au Phare Amédée en février 2016 et février 2017.

2.5x10⁰⁶ 2.0x10⁰⁶ 2.0x10⁰⁶ 1.5x10⁰⁶ 1.0x10⁰⁶ 5.0x10⁰⁵

P. damicornis - Amédée

Figure 29 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *P. damicornis*, au Phare Amédée, sur trois différentes périodes de l'année.

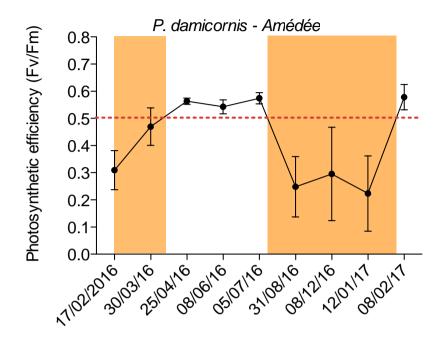


Figure 30 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *P. damicornis*, au Phare Amédée mesurées de février 2016 à février 2017.

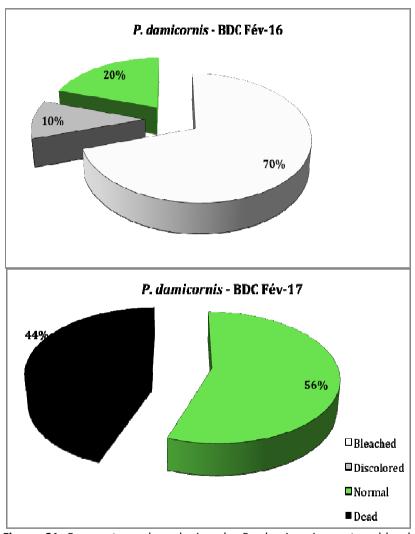


Figure 31 Pourcentage de colonies de *P. damicornis* mortes, blanchies, décolorées ou normales en Baie des Citrons en février 2016 et février 2017.

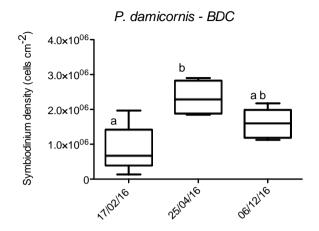


Figure 32 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *P. damicornis*, en Baie des Citrons, sur trois différentes périodes de l'année.

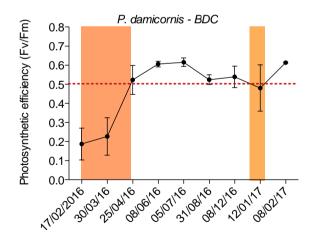


Figure 33 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *P. damicornis*, en Baie des Citrons de février 2016 à février 2017

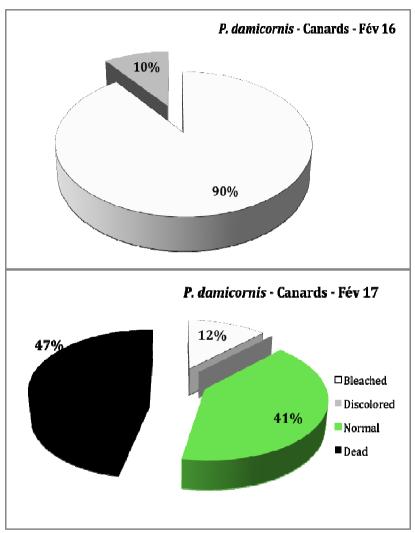


Figure 34 Pourcentage de colonies de *P. damicornis* mortes, blanchies, décolorées ou normales à l'ilot Canards en février 2016 et février 2017.

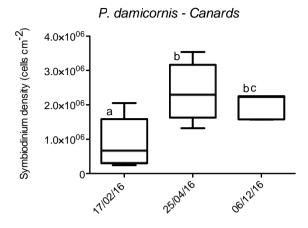


Figure 35 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *P. damicornis*, à l'ilot Canards, sur trois différentes périodes de l'année.

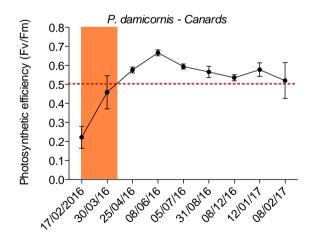


Figure 36 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *P. damicornis*, à l'ilot Canards de février 2016 à février 2017.

Stylophora pistillata

Pour les deux sites principaux : le Phare Amédée et l'îlot Canards, une perte de 79 à 82% des colonies suivies a été observée entre Février 2016 et Février 2017. S. pistillata constitue l'espèce suivie la plus sévèrement touchée par l'épisode de blanchissement. Pour le site du Phare Amédée, 82% des colonies marquées étaient blanchies lors du démarrage du suivi en février 2016 et la totalité de ces colonies (79%) sont mortes un an après. Le reste des colonies (21%) se trouvent être décolorées. Le fort pourcentage de colonies blanchies (82%) en février 2016 est confirmé par de très faibles densités en Symbiodinium à cette date $(0.52 \pm 0.29 \times 10^6 \text{ cell cm}^{-2})$, les colonies restantes se reprennent et présentent des densités 3 fois plus grandes en avril 2016 (1,40 ± 0,42 x 10⁶ cell cm⁻²). En décembre 2016, les densités en Symbiodinium des quelques colonies restantes sont de nouveau très faibles (0,90 ± 0,24 x 10⁶ cell cm⁻²) démontrant que ces colonies ont subi un deuxième épisode de blanchissement lors de l'été austral 2016-2017. Ce deuxième épisode de blanchissement au cours de l'été 2016-2017 est confirmé par le suivi de l'efficacité photosynthétique, montrant des valeurs de Fv/Fm extrêmement faibles comprises entre 0.10 ± 0.04 et 0,15 ± 0,06 en février et mars 2016, mais également en janvier 2017 (Fv/Fm =0,30 \pm 0,13). Le suivi effectué avec le diving-PAM fluorimètre a ainsi permis de mettre en évidence, qu'alors que les colonies survivantes réussissent, dès Avril 2016, à retrouver une efficacité photosynthétique optimale (Fv /Fm > 0,5) (0,56 \pm 0,02) elles subissent un nouvel épisode de stress dès le mois d'Août 2016 avec des valeurs minimales atteintes en Janvier 2017 (0,30 \pm 0,13). Au niveau du site de l'îlot Canards, aucune colonie d'aspect 'normal' n'a été marquée. En effet, toutes les colonies étaient soient blanchies (à 67%), soit

partiellement mortes (23%), soit décolorées (10%). La totalité des colonies blanchies sont mortes à l'issue du suivi (Février 2017, 82%), à cette date seul un très faible pourcentage des colonies (5%) présente un aspect 'normal'. A la différence du site du Phare Amédée, les colonies restantes après l'épisode de blanchissement de février 2016 récupèrent très progressivement leurs Symbiodinium et retrouvent une densité 'normale' $(1.38 \pm 0.43 \times 10^6 \text{ cell cm}^{-2})$ en Décembre 2017. Après l'épisode de blanchissement de Février 2016, où les Symbiodinium perdent toute efficacité photosynthétique (Fy /Fm = 0.12 ± 0.05 et 0.00 ± 0.00 respectivement en février et Mars 2016), les quelques colonies survivantes se reprennent (Fv /Fm = 0.63 ± 0.04 en Avril 2016) et conservent ce niveau optimal d'efficacité photosynthétique tout au long de l'année suivante (Fv/Fm = 0.62 ± 0.01 en février 2017). L'évolution des colonies de S. pistillata au niveau de la Fausse Passe de Uitoé présente un 'pattern' différent des sites de l'ilot Canards et du Phare Amédée. En effet, en Février 2016, seul 10% des colonies marquées sont blanchies, le reste des colonies présentent une coloration 'normale'. Ces données sont confirmées par les valeurs de densité en Symbiodinium mesurées sur ce site. Les densités en Symbiodinium de S. pistillata mesurées en Février 2016 (1.88 ± 0.86 x 10⁶ cell cm⁻²) sont deux fois plus importantes que sur les deux autres sites. Ces densités doublent encore jusqu'en avril 2016 (2,93 ± 1,25 x 10⁶ cell cm⁻²). Comme pour le site du Phare Amédée, les colonies de S. pistillata semblent subir un deuxième stress (ici plus modéré) durant l'été austral 2016-2017 avec des densités en Symbidiodinium deux fois plus faibles $(0.92 \pm 0.35 \times 10^6 \text{ cell cm}^{-2} \text{ en Décembre 2016})$ par rapport à celles mesurées en février 2016 (1,88 ± 0,86 x 10⁶ cell cm⁻²) et des valeurs d'efficacité photosynthétique qui passent en dessous du seuil de 0.5 en Décembre 2016 (Fv /Fm = 0.45 ± 0.04).

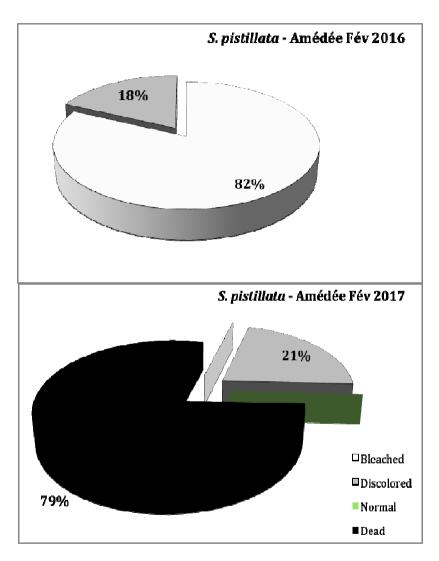


Figure 37 Pourcentage de colonies de *S. pistillata* mortes, blanchies, décolorées ou normales à au Phare Amédée en février 2016 et février 2017.

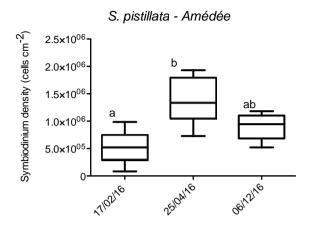


Figure 38 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *S. pistillata*, au Phare Amédée, sur trois différentes périodes de l'année.

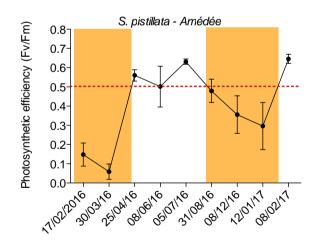


Figure 39 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *S. pistillata*, au Phare Amédée mesurées de février 2016 à février 2017

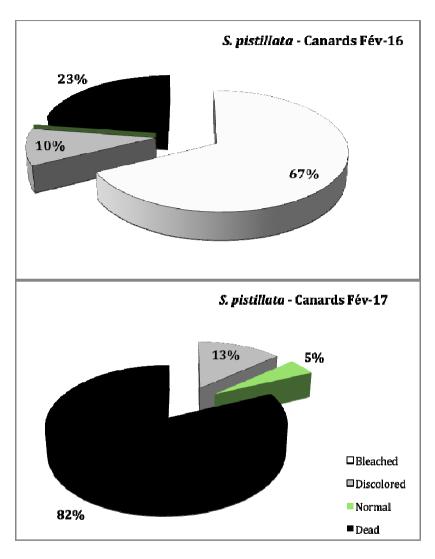


Figure 40 Pourcentage de colonies de *S. pistillata* mortes, blanchies, décolorées ou normales à l'ilot Canards en février 2016 et février 2017.

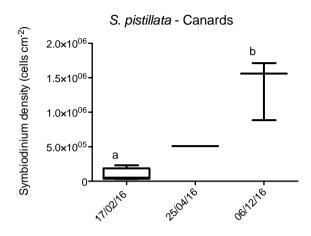


Figure 41 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *S. pistillata*, à l'ilot Canards, sur trois différentes périodes de l'année.

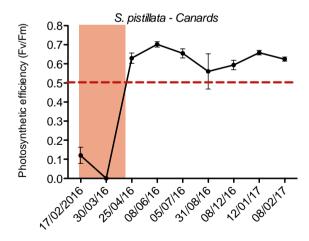


Figure 42 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *S. pistillata*, à l'ilot Canards de février 2016 à février 2017.

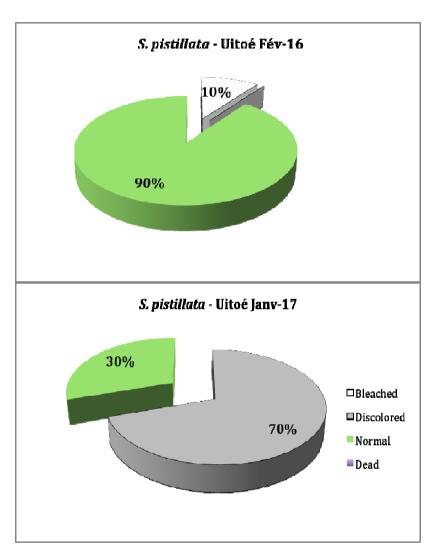


Figure 43 Pourcentage de colonies de *S. pistillata* mortes, blanchies, décolorées ou normales à la fausse passe de Uitoé en février 2016 et janvier 2017.

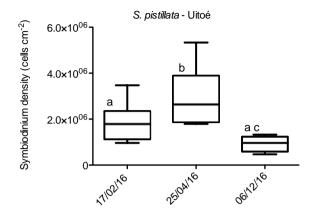


Figure 44 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *S. pistillata*, à la fausse passe de Uitoé, sur trois différentes périodes de l'année.

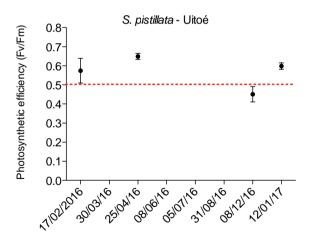


Figure 45 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *S. pistillata*, à la fausse passe de Uitoé de février 2016 à février 2017.

Porites lutea

L'espèce *Porites lutea* apparaît comme l'espèce 'winner' de ce suivi car aucune perte de colonies marquées n'a été enregistrée un an après l'évènement de blanchissement de février 2016.

Sur les sites du Phare Amédée et de la Baie des Citrons, malgré des pourcentages de colonies blanchies de 45 et 50% respectivement, aucune mortalité n'a été enregistrée tout au long de l'année de suivi.

En Baie des citrons, bien que 50% des colonies soient blanchies en Février 2016, 80% des colonies présentent un aspect 'normal' en février 2017 alors que les 20% restantes apparaissent seulement légèrement décolorées. Tout au long des mois de suivi, les colonies de P. lutea présentent des densités en Symbiodinium très variables d'un individu à l'autre mais qui ne sont pas significativement différentes au cours de l'année, elles varient entre 0.53 ± 0.56 et $1.05 \pm 0.75 \times 10^6$ cell cm⁻², respectivement pour les mois de février 2016 et décembre 2017. Le suivi de l'efficacité photosynthétique de ces colonies de P. lutea révèlent que, bien qu'elles ne soient pas blanchies, leur efficacité photosynthétique est médiocre entre février et juin 2016 et augmente légèrement au cours de cette période (de 0,33 ± 0,07 à 0,44 ± 0,03). Les valeurs enregistrées redeviennent correctes seulement en juillet 2016 $(Fv /Fm = 0.55 \pm 0.02)$. Les valeurs de $Fv/Fm 0.42 \pm 0.06$ enregistrées en août 2016, pourraient être liées à une pollution due à des travaux effectués en Baie des citrons à cette période. Par la suite les colonies retrouvent une efficacité optimum de 0,64 0,63 ± 0,01 enregistrée en février 2017.

Sur le site du Phare Amédée, malgré un pourcentage de 45% de colonies blanchies enregistré en février 2016, 80% des colonies présentent un aspect 'normal' en février 2017, tandis que les 20%

restantes sont décolorées. Les colonies marquées, partant d'une densité en *Symbiodinium* plutôt faible 0,80 \pm 1,57 x 10 6 cell cm $^{-2}$, parviennent à retrouver une densité en symbiontes tout à fait 'normale' en Décembre 2016 (1,23 \pm 0,15 x 10 6 cell cm $^{-2}$). Les valeurs d'efficacité photosynthétiques suivent cette même tendance, même si les valeurs de Fv/Fm sont faibles entre février et mars 2016 (respectivement 0,41 \pm 0,06 et 0,39 \pm 0,06), elles sont ensuite normales pour les mois d'avril et de juin 2016 (respectivement 0,58 \pm 0,04 et 0,52 \pm 0,03). Les colonies de *P. lutea* font ensuite face à un deuxième épisode de stress avec des valeurs en dessous de 0,5 pour les mois d'août et décembre 2016 (respectivement 0,43 \pm 0,02 et 0,37 \pm 0,02).

Sur le site de l'îlot Canards, en février 2016, aucun blanchissement des colonies de P. Iutea suivies n'est observé mais une décoloration des tissus pour 55% de ces colonies. Un an après en Février 2017, à la différence des autres sites, quelques colonies de P. Iutea semblent faire face à un épisode de stress modéré avec 11% des colonies suivies qui sont apparues légèrement blanchies. Alors qu'en Février 2016, les colonies présentent des densités en Symbiodinium qui ne sont pas significativement différentes tout au long de l'année de suivi (comprises entre $1,23 \pm 0,94$ et $1, \pm 0,62 \times 10^6$ cell cm⁻²). De la même manière, l'efficacité photosynthétique des colonies reste toujours supérieure à 0,5 (entre $0,50 \pm 0,01$ en février 2016 et $0,63 \pm 0,02$). Cependant, une légère baisse de l'efficacité photosynthétique est mesurée au niveau du dernier point d'échantillonnage, correspondant au léger blanchissement observé sur quelques colonies.

A la fausse passe de Uitoé, aucun blanchissement ni aucune décoloration des colonies marquées de *P. lutea* n'ont été observés tout au long du suivi.

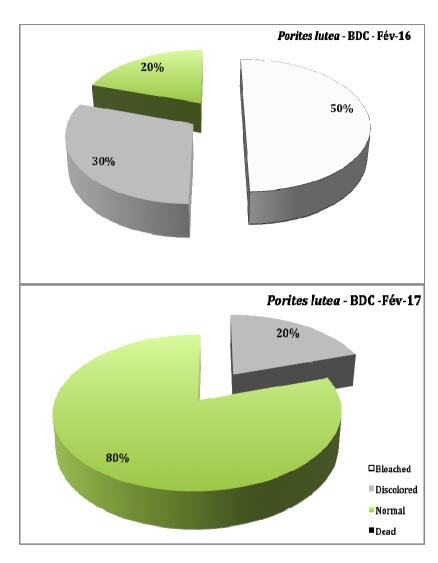


Figure 46 Pourcentage de colonies de *P. lutea* mortes, blanchies, décolorées ou normales en Baie des Citrons en février 2016 et février 2017.

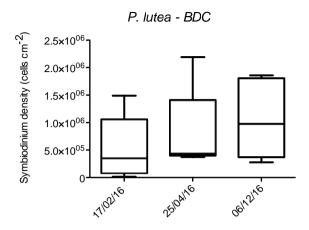


Figure 47 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *P. lutea*, en Baie des Citrons, sur trois différentes périodes de l'année.

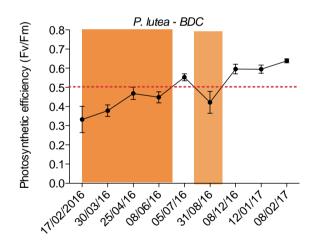


Figure 48 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *P. lutea* en Baie des Citrons de février 2016 à février 2017.

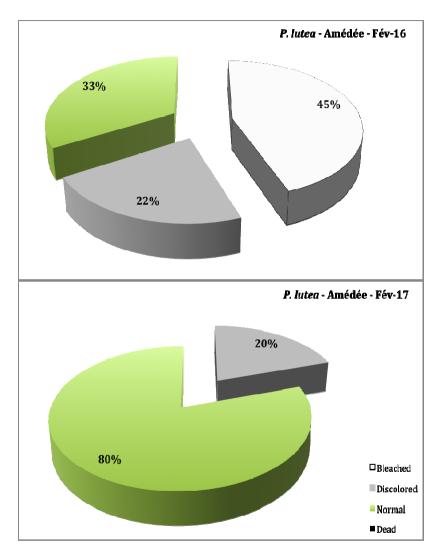


Figure 49 Pourcentage de colonies de *P. lutea* mortes, blanchies, décolorées ou normales au Phare Amédée en février 2016 et février 2017.

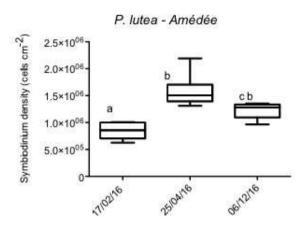


Figure 50 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *P. lutea*, au Phare Amédée, sur trois différentes périodes de l'année.

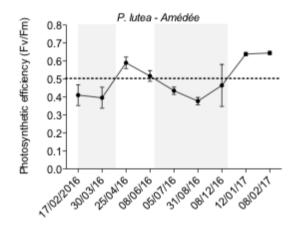


Figure 51 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *P. lutea* au Phare Amédée de février 2016 à février 2017.

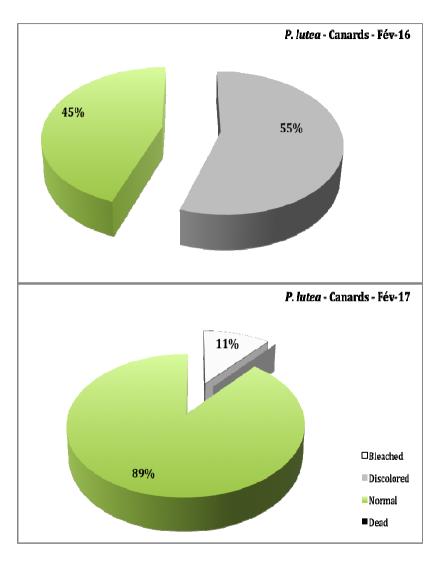


Figure 52 Pourcentage de colonies de *P. lutea* mortes, blanchies, décolorées ou normales à l'ilot Canards en février 2016 et février 2017.

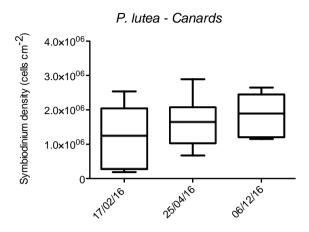


Figure 53 Densités en *Symbiodinium* exprimées en nombre de cellules par cm² (cells cm⁻²), des colonies de *P. lutea*, à l'ilot Canards, sur trois différentes périodes de l'année.

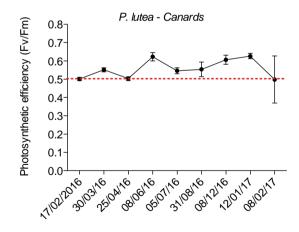


Figure 54 Variations de l'efficacité photosynthétique (Fv/Fm) des colonies de *P. lutea* à l'ilot Canards de février 2016 à février 2017.

Conclusion

Les plus importantes pertes de colonies ont été observées pour les deux espèces *S. pistillata* et *P. damicornis*, qui apparaissent donc comme les espèces 'losers' de ce suivi avec des pertes de 70 à 80 % des colonies suivies sur la majorité des sites.

L'espèce *Porites lutea* apparaît au contraire comme l'espèce 'winner' de ce suivi car aucune perte de colonies marquées n'a été enregistrée un an après l'évènement de blanchissement de février 2016.

Les mesures menées avec le diving-PAM ont montré que dès que les valeurs enregistrées d'efficacité photosynthétique passaient en dessous du seuil de 0,4, cela annonçait un épisode de stress pour les coraux avec un risque accru de blanchissement par la suite. Ainsi par exemple, pour le site du Phare Amédée, alors que les colonies survivantes retrouvent, dès avril 2016, une efficacité photosynthétique optimale (Fv /Fm > 0,5) (0,56 \pm 0,02), l'utilisation du diving-Pam a permis de révéler que ces colonies ont subi un nouvel épisode de stress dès le mois d'août 2016 avec des valeurs minimales atteintes en janvier 2017 (0,30 \pm 0,13).

Bibliographie

ARC, Centre of Excellence for Coral Reef Studies at James Cook University, https://www.coralcoe.org.au/media-releases/scientists-assess-bleaching-damage-on-great-barrier-reef page consultée le 22.08.2017

Baird, A.H., Bhagooli, R., Ralph, P.J., Takahashi, S. (2009) Coral bleaching: the role of the host. Trends in Ecology and Evolution, 24, 16–20.

Baker, A.C., Glynn, P.W., Riegl B. (2008) Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. Estuarine Coastal Shelf Science 80:435–471.

Barnston, A. (2016) Climate.org, July 2016, ENSO discussion: Enjoy neutral while it lasts!, site web < https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/july-2016-enso-discussion-enjoy-neutral-while-itlasts, page consultée le 23.08.2017

Benzoni, F., Garlasche, G., Payri, C. (2016) Project Blanco - Plan d'action rapide et adaptatif, en cas de blanchissement corallien : le cas de la Nouvelle-Calédonie épisode 2016. Note de synthèse sur l'état du phénomène à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie, octobre 2016. UMR ENTROPIE, IRD Nouméa, pp. 14

Berkelmans, R., Van Oppen, M.J.H. (2006) The role of zooxanthellae in the thermal tolerance of corals: a "nugget of hope" for coral reefs in an era of climate change. Proceedings. Biological sciences 273, 2305–12.

Bianchi, C.N., Pronzato, R., Cattaneo-Vietti, et al (2003) Hard bottoms. In: Gambi M.C., Dappiano M. (eds), Mediterranean marine benthos: a manual of methods for its sampling and study. Biologia Marina Mediterranea, Cap. 6. 11(1): 185–216

Brown, E., Cox, F., Jokiel, P., Rodgers, et al (2004) Development of Benthic Sampling Methods for the Coral Reef Assessment and Monitoring Program (CRAMP) in Hawai'i. Pacific Science, 58 (2):145–158.

Buddemeier, R.W., Baker, A.C., Faustin, D., Jacobs, J.R. (2004) The adaptive hypothesis of bleaching. Coral Health and Disease. (eds E. Rosenberg & Y. Loya), Chap. 24, pp 427–444. Springer-Verlag, Berlin.

Collins LB, (2011) Reef Structures. In: Hopley D, Encyclopedia of modern coral reefs Structure, form and process. The Netherlands, Springer. Encyclopedia of Earth science series. P. 896-902. ISBN: 978-90-481-2638-5

Done-a, T. (2011) Coral reef, definition. In: Hopley D, Encyclopedia of modern coral reefs Structure, form and process. The Netherlands, Springer. Encyclopedia of Earth science series. P. 896-902. ISBN: 978-90-481-2638-5

Done-b, T. (2011) Corals: environmental controls on growth. In: Hopley D, Encyclopedia of modern coral reefs Structure, form and process. The Netherlands, Springer. Encyclopedia of Earth science series. P. 896-902. ISBN: 978-90-481-2638-5

Downs, C.A., Woodley, C.M., Richmond, R.H. (2005) Shifting the paradigm of coral-reef "health" assessment. Marine Pollution Bulletin 51:486–494. doi: 10.1016/j.marpolbul.2005.06.028

English, S., Wilkinson, C., Baker, V. (1997) Survey Manual for Tropical Marine Resources, 2nd ed. ASEANAustralia Marine Science Project: Living Coastal Resources. Townsville Australian Institute of Marine Science, 390 pp.

Fenner D. (2013) Reef corals of the eastern lagoon (Touho-Ponerihouen) of Grande-Terre, New Caledonia. In: RAP Bulletin of Biological Assessment A Rapid Marine Biodiversity Assessment of the Northeastern Lagoon from Touho to Ponérihouen, Province Nord, New Caledonia. Conservation International: 141–160.

Great Barrier Reef Marine Park Authority, Australian Government, (2017) < http://www.gbrmpa.gov.au/managing-the-reef/threats-to-the-reef/climate-change/what-does-this-mean-forspecies/corals/what-is-coral-bleaching>, page consultée le 17.08.2017

Hill, J., Wilkinson, C. (2004) Methods for ecological monitoring of coral reefs. Australian Institute of Marine Science, Townsville, 117 pp.

Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, et al (2007) Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. Science, 318, 1737–1742.

Hughes T.P., Baird A.H., Bellwood D.R., et al (2003) Climate Change, Human Impacts, and the Resilience of Coral Reefs. Science (80-) 301:929–933.

Hughes T.P., T. Kerry J.T., Álvarez-Noriega M. et al. (2017) Global warming and recurrent mass bleaching of corals. Nature 543, 373–377 doi:10.1038/nature21707

IPCC (2013) Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Job, S. & Guillemot, N. (2014) Réseau d'Observation des Récifs Coralliens de Nouvelle-Calédonie (RORC)- Campagne de suivi 2013-2014., 48.

Kingsford, M., Battershill, C. (1998) Studying temperate marine environments. Canterbury University Press, Christchurch, 335 pp.

Knowlton, N., Brainard, R.E., Fisher, R., et al (2010) Coral reef biodiversity. In: McIntyre, A.D. (ed.), Life in the World's Oceans. Diversity, Distribution and Abundance, 65-77. Oxford: Wiley-Blackwell.

Ladrière, O. (2012) Etude pluridisciplinaire de l'implication bactérienne du phénomène de blanchissement des coraux Scléractiniaires (Indo-Pacifique). Thèse. Université de Liège, Liège, Belgique

Lough, J.M. (2011) Climate change and coral reefs. In: Hopley D, Encyclopedia of modern coral reefs Structure, form and process. The

Netherlands, Springer. Encyclopedia of Earth science series. P. 896-902. ISBN:978-90-481-2638-5

Loya, Y., Sakai, K., Yamazato, K., et al (2001) Coral bleaching: the winners and the losers. Ecology Letters, 4, 122–131.

Marex, Espace-Dev & Entropie. (2017) Projet Becoming 2016.

Marshall, P., Schuttenberg, H. (2006) Reef Manager's Guide to Coral bleaching. Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville, Australia. pp. 163

Menkes, C. (2012) Les grandes fluctuations des hydroclimats : le phénomène Enso. Atlas de la Nouvelle-Calédonie, IRD Editio (eds J. Bonvallot, J.-C. Gay & E. Habert), pp. 49–52. Marseille-Nouméa.

Miller, I. (2011) Acanthaster Planci. In: Hopley D, Encyclopedia of modern coral reefs Structure, form and process The Netherlands, Springer. Encyclopedia of Earth science series. P. 896-902. ISBN: 978-90-481-2638-5

Mora, S. (2016) Etude du blanchissement des coraux de Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage au sein de l'UMR Entropie, Nouméa, 1–27.

Ohlhorst, S.L., Liddel, W.D., Taylor, R.J., Taylor J.M. (1988) Evaluation of reef census techniques. Proc. 6th Int. Coral Reef Symp. 2: 319-324

Osborne, K., Dolman, A.M., Burgess, S.C., Johns, K.A. (2011) Disturbance and the dynamics of coral cover on the Great Barrier Reef (1995-2009). PLoS ONE, 6.

Payri, C. (2016) Projet Blanco, Plan d'action rapide et adaptatif, en cas de blanchissement corallien. UMR ENTROPIE, IRD Nouméa, 1–11.

Pichon, M. (2011) *Porites*. In: Hopley D, Encyclopedia of modern coral reefs Structure, form and process. The Netherlands, Springer. Encyclopedia of Earth science series. P. 896-902. ISBN: 978-90-481-2638-5

Pichon, M. (2007) Scleractinia of New Caledonia: check list of reef dwelling species. In: Compendium of marine species from New Caledonia: second edition. Payri Claude E. (ed.), Richer de Forges Bertrand (ed.), Doc. Sci. Tech. 117: 149–157.

Richer De Forges, B., Garrigue, C. (1997) First observations of a major coral bleaching in New Caledonia (Poster).

Rogers, C.R., Miller, J., Waara, R.J. (2002) Tracking changes on a reef in the U.S. Virgin Islands with videography and SONAR: A new approach. Proc. 9th Int. Coral Reef Symp., 2: 1065–1069.

Spencer, T. (2011) Temperature change: bleaching. In: Hopley D, Encyclopedia of modern coral reefs Structure, form and process The Netherlands, Springer. Encyclopedia of Earth science series. P. 896-902. ISBN: 978-90-481-2638-5

Stoddart D.R., Johannes R.E. (1978). Coral Reefs: research methods. UNESCO Monographs on Oceanographic Methodology 5, UNESCO, Paris, 581 pp.

Taîx, C. (2016) Australie : année noire pour la Grande Barrière de corail. Le monde, 30.11.2016. url :<http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/11/30/annee-noire-pour-la-grande-barriere-decorail_5040729_3244.html#>

Trapon, M.L., Pratchett, M.S., Penin, L. (2011) Comparative Effects of Different Disturbances in Coral Reef Habitats in Moorea, French Polynesia. Journal of Marine Biology, 2011, 1–11.

Van Woesik, R., Sakai, K., Ganase, A., Loya, Y. (2011) Revisiting the winners and the losers a decade after coral bleaching. Marine Ecology Progress Series, 434, 67–76.

Veron, J.E.N. (2000) Corals of the world. Vol 1-3. M. Stafford-Smith (Ed.) Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia. 1382 pp.