



## **INSTITUT MEDITERRANEEN D'OCEANOLOGIE**

---

### **MASTER OCÉANOGRAPHIE**

**Spécialité : Océanographie Physique et Biogéochimique**

*Cyril Dutheil*

*Caractérisation de l'environnement océanique et atmosphérique d'atolls  
lors d'évènements dystrophiques dans les lagons*

**Rapport de Stage réalisé au sein des laboratoires :**

*UMR 227 Coreus, UMR 182 LOCEAN*

**Sous la Direction de :**

**Dr. Serge Andréfouët, Dr. Christophe Menkes**

**Année Universitaire : 2012–2013**

## Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier Serge Andrefouët et Christophe Menkes, mes deux directeurs de stage qui ont toujours été là pour m'aider et me conseiller. Même si, Serge, tu as passé la plupart de ton temps à voguer sur les mers du Pacifique, merci d'avoir toujours répondu à mes sollicitations.

Je voudrais également remercier le GOPS (Grand Observatoire du Pacifique Sud) qui a financé cette étude à travers son projet CITADEL, sans qui je n'aurais pu réaliser ce stage.

Un grand merci également à Magali Teurlai et Swen Julien, les deux thésardes de notre grand bureau, pour toutes les questions que j'ai pu leur poser, et auxquelles elles ont toujours répondu avec le sourire.

Enfin, j'aimerais remercier tous les joyeux stagiaires présents à l'IRD et plus particulièrement ceux du loft, Lolo, Melissa, Manon, Blandine, Margaux, Marie-Léa, Françoise, Jean, Théo, Hugo, et Tom avec lesquels j'ai passé quatre mois de colocation remplies de souvenirs.

## Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Matériels et méthodes.....</b>	<b>7</b>
2.1 Site d'étude.....	7
2.2 Description des atolls considérés.....	8
2.3 Hypothèses de travail et démarche générale.....	8
2.4 Les données.....	9
2.4.1 Température de surface de la mer.....	10
2.4.2 Tension du vent.....	10
2.4.3 Sorties de modèles.....	10
2.5 Méthodes et analyses.....	12
2.6 Outils informatiques.....	12
2.6.1 Outils CDO et NCO.....	12
2.6.2 Ferret.....	13
2.6.3 R.....	13
<b>3. Résultats.....</b>	<b>13</b>
3.1 Séries temporelles.....	13
3.1.1 Séries brutes.....	13
3.1.2 Série filtrées.....	15
3.2 Corrélation temporelle.....	18
3.2.1 Houle.....	18
3.2.2 SST.....	20
3.3 Analyse multivariée .....	21
3.3.1 ACP.....	21
3.3.2 Clustering.....	25
3.3.3 Arbre de décision.....	28
<b>4. Discussion et Conclusion .....</b>	<b>28</b>
 <b>Bibliographie.....</b>	 <b>31</b>
 <b>Annexes.....</b>	 <b>33</b>
 <b>Résumé/Abstract.....</b>	 <b>35</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Localisation et carte de notre zone d'étude (Archipel des Tuamotu et Iles Cook) .....	7
<b>Figure 2:</b> Carte de la variabilité temporelle de la houle, des vagues, de la SST, et de la tension du vent durant la période entre 2001 et 2012 sur l'atoll de Ahe (données moyennées hebdomadairement).....	14
<b>Figure 3:</b> Carte de la variabilité temporelle de la houle, des vagues, de la SST, et de la tension du vent durant la période entre 2001 et 2012 sur l'atoll de Manihiki (données moyennées hebdomadairement).....	14
<b>Figure 4:</b> Anomalie saisonnière centrée sur l'atoll d'Ahe durant la période entre 2001 et 2012 pour nos trois variables (houle, SST, et tension du vent).....	15
<b>Figure 5:</b> Anomalie saisonnière centrée sur l'atoll de Manihiki durant la période entre 2001 et 2012 pour nos trois variables (houle, SST, et tension du vent).....	16
<b>Figure 6:</b> Graphique représentant la hauteur de la houle au niveau de l'atoll de Manihiki, mise à zéro lorsque sa direction se situe entre 300°N et 60°N sur deux périodes différentes (2001-2012 et début 2012).....	17
<b>Figure 7:</b> Graphique représentant la hauteur de la houle au niveau de l'atoll d'Ahe, mise à zéro lorsque sa direction se situe entre 300°N et 60°N sur deux périodes différentes (2001-2012 et début 2012).....	17
<b>Figure 8:</b> Carte de la corrélation temporelle de la houle centrée sur l'atoll d'Ahe pendant le mois d'avril 2012 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.....	19
<b>Figure 9:</b> Carte de la corrélation temporelle de la houle centrée sur l'atoll de Manihiki pendant le mois d'avril 2012 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.....	19
<b>Figure 10:</b> Carte de la corrélation temporelle de la SST centrée sur l'atoll d'Ahe pendant le mois d'avril 2004 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.....	20
<b>Figure 11:</b> Carte de la corrélation temporelle de la SST centrée sur l'atoll de Manihiki pendant le mois de janvier 2012 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.....	21
<b>Figure 12:</b> ACP des individus et des variables pour l'atoll d'Ahe, un an autour de l'événement de mai 2012.....	22
<b>Figure 13:</b> ACP des individus et des variables pour l'atoll de Manihiki, un an autour de l'événement de février 2012.....	23
<b>Figure 14:</b> ACP des individus et des variables pour l'ensemble des atolls, un an autour des événements.....	24
<b>Figure 15:</b> Dendrogramme regroupant l'ensemble des événements considérés dans cette étude (encadré en rouge la branche événement).....	25
<b>Figure 16:</b> Boîtes à moustaches réalisées sur l'ensemble de notre matrice, la classe « 1 » représente la branche événement du cluster (encadré rouge) et la classe « 0 » les autres points. Boîtes à moustaches pour les variables : A) houle ; B) SST ; C) tension du vent. Pour rappel les bornes du rectangle représentent le premier et le troisième quartile tandis que la ligne horizontale le coupant est la médiane. Les segments aux extrémités représentent 1.5 fois l'espace interquartile.....	26
<b>Figure 17:</b> Arbre de décision regroupant l'ensemble des événements considérés dans cette étude. Noté « 1 » correspond l'ensemble des points considérés dans l'encadré rouge du cluster (figure 19) les autres individus seront noté « 0 ». Le premier chiffre à l'intérieur des bulles et des rectangles correspond aux nombres d'individus appartenant à la classe « 0 », le deuxième correspond aux nombres d'individus appartenant à la classe « 1 », à cet endroit. Les bulles correspondent aux nœuds et les rectangles aux extrémités de l'arbre.....	27

## Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des atolls considérés .....	8
Tableau 2 : Tableau regroupant les caractéristiques de la matrice de données.....	12
Tableau 3: Commandes NCO et CDO utilisées pour la transformation des fichiers NetCDF. ....	13

## 1. Introduction

Ces vingt dernières années, différents cas de mortalité massive de poissons et d'organismes macrobenthiques ont été rapportés dans les atolls de Polynésie française et dans l'archipel des îles Cook. Ces événements restent mal connus et ont été jusque-là très peu étudiés en raison de leur rareté et de la difficulté à les identifier. En effet, les populations locales, malgré leurs rapports étroits avec l'écosystème, s'inquiètent et alertent souvent les autorités trop tard, ce qui empêche une étude sur place au moment le plus approprié. Malgré ces difficultés, de nombreux cas au cours de ces dernières décennies ont été rapportés, le plus ancien à notre connaissance étant Taiaro en 1906. Depuis cette date une quarantaine de cas ont été relevés se regroupant sur une vingtaine d'atolls. Les plus récents étant à ce jour les événements de 2012 à Ahe et Manihiki, ainsi qu'un événement de faible amplitude à Takapoto en début 2013. Le cas le mieux décrit dans la littérature est celui de Hikueru en 1994, où la population locale a constaté la mort de la quasi-totalité des espèces de cet atoll.

Suite à l'événement d'Hikueru, trois missions océanographiques ont été effectuées sur place afin d'en comprendre le mécanisme (P. Harris et R. Fichez, 1995), ce qui a débouché sur de nombreuses hypothèses concernant les causes de ce phénomène. Ces missions ont ainsi permis d'écarter l'hypothèse du bloom de dinoflagellés comme facteur déclenchant du processus de mortalité. L'autre hypothèse admise est une anoxie du milieu en raison d'une interruption du renouvellement de la colonne d'eau par les apports extérieurs, normalement assuré par l'action de la houle, des vagues, et du vent. L'association avec une forte température, et une géomorphologie particulière (lagon semi-fermé à fermé) pour les atolls touchés sont probablement des facteurs aggravants supplémentaires. Nous noterons également que certains cas de mortalités massives recensés jusqu'ici sont dus à une baisse du niveau de la mer couplée à de fortes températures (Addessi, 1999 et 2001).

Ces événements de mortalité massive des espèces benthiques et pélagiques lagonaires ont un impact bien plus important sur l'économie (perliculture, ressources vivrières) et sur la vie en général des populations locales concernées, que des processus plus « médiatiques » présentés généralement très à risques dans la littérature, tel que le blanchiment des coraux, la surpêche ou le changement climatique (tel que la montée des eaux par exemple). En fait, ces phénomènes dystrophiques sont très peu pris en compte de manière générale alors qu'ils ont un impact direct et immédiat, ce qui devrait les rendre incontournables en termes de gestion des risques.

Dans cette étude, et suite aux processus décrits pour Hikueru, nous avons donc essayé de relier directement des variables physiques (houle, vent, température) à l'occurrence des événements de mortalités lagonaires pour identifier l'hydroclimat type pouvant mettre un atoll semi-fermé dans une situation à risques. Pour ce faire nous avons à notre disposition des données satellites, de température de l'eau de surface (sea surface temperature, SST) et de tension du vent (wind stress, WS). De plus, nous avons utilisé des sorties du modèle WAVEWATCH III, notamment les variables de houle (hs1 : amplitude, th1 : direction), de hauteur des vagues (hs) et de mer du vent (hs1: amplitude, th0: direction).

La zone considérée est le quadrilatère : 135°W-170°W et 5°S-25°S, qui couvre une partie de la Polynésie française et des Îles Cook. Pour prendre en compte la géomorphologie des atolls étudiés, nous avons utilisé la classification mise en place par Andréfouët et al. (2001) à partir d'image SPOT HRV (Satellite Pour l'Observation de la Terre, Haute Résolution Visible). Les caractéristiques morphométriques principales des atolls sont regroupées au sein de l'Atlas des récifs coralliens de Polynésie Française (Andréfouët et Chauvin, 2005).

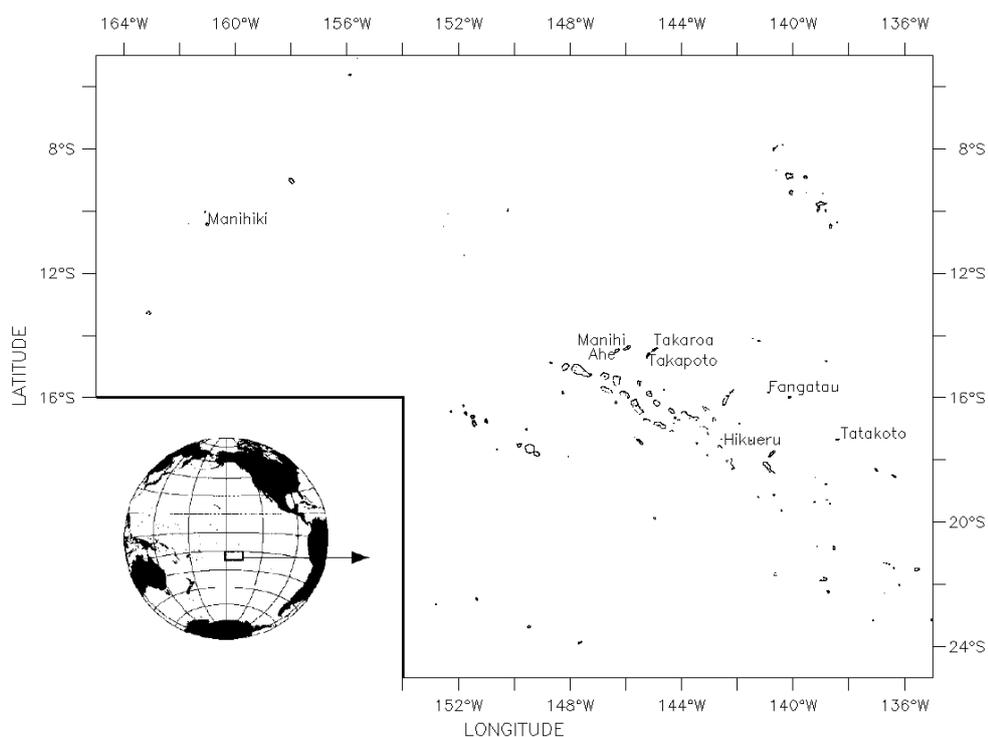
Notre étude de caractérisation de l'hydroclimat des événements de mortalité massive en milieux d'atolls s'est appuyée sur une approche statistique à partir de données de télédétection et de modélisation. Ce choix a été dicté par l'impossibilité de faire des missions de terrain pour

comprendre ces phénomènes, en raison du caractère exceptionnel de ces crises qui restent peu nombreuses. De plus, il est possible que des cas réels de dystrophies se soient produits, mais non reportés par les populations locales (on parlera de « faux négatif »).

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1 Site d'étude

Notre étude se situe dans la zone sud équatoriale du Pacifique et plus particulièrement entre 135°W-165°W et 5°S-25°S qui couvre une partie de la Polynésie française (archipel des Tuamotu) et l'archipel des îles Cook (figure 1). L'archipel des Tuamotu est composé de 77 atolls. Nous définirons un atoll par ses caractéristiques morphologiques et typologiques : « un atoll est un système isolé, important en taille, qui possède une structure périphérique annulaire dont la majeure partie est visible, enserrant ainsi un lagon » (S. Andréfouët et C. Chauvin, 2005. Atlas des récifs coralliens de Polynésie française). Un atoll est donc composé d'une couronne qui ferme un lagon, lequel possède souvent un complexe de massifs coralliens. Les atolls considérés dans cette étude ont la particularité d'être fermés ou semi-fermés, c'est-à-dire que la couronne enserrant le lagon est totalement close ou légèrement ouverte par la présence de passes et de hoas qui sont les lieux des échanges avec l'océan et qui ont un rôle essentiel dans le renouvellement de la colonne d'eau du lagon et la circulation générale du lagon (e.g. pour Ahe, Dumas et al., 2012).



**Figure 1:** Localisation et carte de notre zone d'étude (Archipel des Tuamotu et îles Cook)

## 2.2 Description des atolls considérés

L'évènement en 1994 à Hikueru a réveillé les consciences et mobilisé les scientifiques. Suite à Hikueru, des recensements historiques ont été faits pour les atolls de Polynésie et des îles Cook. Nous avons donc ici remis à jour l'ensemble des cas connus, qui ont été relevés pour la plupart par les populations locales et indirectement par des agents des services techniques en mission. Ce dernier point est un problème. En effet les acteurs locaux ont tendance à se manifester à partir du moment où ils retrouvent des poissons morts sur les plages, alors que bien souvent la crise s'est développée pendant les semaines précédentes avant d'en arriver à ce stade. Il y a donc une incertitude sur le début de l'évènement d'un point de vue hydro-biologique, en raison de l'isolement de ces populations et de leurs délais de réaction s'il n'y a pas de mortalité massive. Nous devons donc ici supposer que notre inventaire est probablement incomplet, et que des évènements non reportés ont pu exister (« faux négatifs »), pour les atolls du Tableau 2 mais aussi pour d'autres de morphologie similaire.

Nous avons retenu un petit nombre d'évènements dont nous sommes quasi certains de l'existence et de la date. Au final nous avons conservé 11 cas avérés ayant eu lieu sur 8 atolls (7 en Polynésie française et 1 dans les îles Cook) entre 1994 et 2012, période couverte par les données satellites et modèles. L'ensemble des cas considérés est présenté dans le tableau 2. L'ensemble de ces atolls de l'archipel des Tuamotu et des îles Cook sont de petite taille, avec une ouverture sur l'océan faible et orienté préférentiellement au Sud (Tableau 1). Nous pouvons tout de même les différencier, en effet Hikueru et Manihiki par exemple sont des atolls dits semi-fermés, avec de larges hoas fonctionnels (chenal peu profond entre deux motus qui permet une communication entre le platier externe, coté océan, et le lagon) au sud, tandis que Tatakoto et Fangatau sont presque totalement fermés (quelques hoas étroits fonctionnels au sud), et que Ahe, Takaroa et Manihi sont également presque fermés mais disposent d'une passe.

**Tableau 1:** Caractéristiques des atolls considérés

Caractéristiques Atolls	Position (en degré)		Surface (en km <sup>2</sup> )	Ouverture totale (en %)	Ouverture Nord (en %)	Ouverture Sud (en %)	Début événement	Type d'évènement
Hikueru	217,5°E	17,5°S	104,61	50,9	3,33	91,58	avr-94	bloom
Manihi	214°E	14,4°S	183,39	4,83	0,34	9,62	avr-1994 fev-1997 mar-1998	bloom
Manihiki	199°E	10,2°S	40	19	16	23	fev-2012	bloom
Takaroa	215°E	14,5°S	102,88	2,33	3,27	1,3	dec 1999 jan-2001	bloom
Tatakoto	221,7°E	17,3°S	34,29	12,07	0	24,44	fev-2009	bloom
Takapoto	214,8°E	14,6°S	49,5	2,83	1,42	4,46	mars-98	asséchage
Fangatau	219,1°E	15,8°S	16,42	6,37	0	11,7	fev-2004	bloom
Ahe	213,7°E	14,5°S	162,4	7,41	2,54	12,23	mai-12	bloom

## 2.3 Hypothèses de travail et démarche générale

A partir des 3 missions effectuées sur l'atoll d'Hikueru en 1994 (P. Harris et R. Fichez, 1995), à la suite de la crise dystrophique de grande ampleur évoquée en introduction, il a été émis deux hypothèses principales pour expliquer cet évènement.

La première hypothèse était une intoxication massive des organismes benthiques et pélagiques par des toxines présentes dans les organismes phytoplanctoniques. Les principaux organismes susceptibles d'être toxiques font partis de la famille des dinoflagellés. Il a donc été recherché une quelconque présence anormale de ces espèces dans les prélèvements effectués sur

place, après l'événement. Cette hypothèse a rapidement été écartée, les mesures n'ayant rien relevé de particulier.

La seconde hypothèse était une mortalité massive des espèces induite par une désoxygénation partielle ou complète de la colonne d'eau. Cette crise anoxique aurait eu pour cause principale une période de houle et de vent calme ainsi que de fortes températures favorisant l'apparition d'un bloom phytoplanctonique. Il faut noter que l'hydrodynamisme (renouvellement et circulation) de ce lagon comme celui de la plupart des atolls semi-fermés ou fermés est conditionné par les régimes de houle et de vent. Les observations sur cette période ont relevé une diminution et un changement de direction (orientation Nord - Nord-Ouest) des vents et de la houle au cours du mois de février ainsi qu'une augmentation de la SST, ce qui aurait permis l'apparition d'une stratification de la colonne d'eau, produisant un début d'anoxie en profondeur et un probable début de mortalité benthique. Les données recueillies révèlent en deuxième phase une reprise des régimes normaux de vent et de houle qui favorisent l'hydrodynamisme, mais qui ici ont possiblement répercuté la crise anoxique à toute la colonne d'eau en la mélangeant. En effet, la forte minéralisation de la matière organique détritique (due aux mortalités au fond) induit un relargage de sels minéraux. Le transfert (advection-diffusion) de ces derniers vers les zones oxygénées (en surface) combiné avec un fort ensoleillement a pu déclencher l'apparition d'un bloom phytoplanctonique de surface (les eaux colorées reportées par la population). Par la suite, la dégradation des algues mortes due aux fortes températures entraîne une augmentation de la consommation d'oxygène par les bactéries aérobies, et empêche également la production par photosynthèse, aggravant l'anoxie qui devient générale ce qui au final entraîne la mortalité de toutes les espèces benthiques et pélagiques du lagon.

Nous testerons donc dans notre étude si les crises dystrophiques sont en effet dues à une période de calme au niveau de la houle et du vent ainsi qu'à une augmentation de la température de surface de l'eau (saison chaude). Nous déterminerons si l'on retrouve des conditions communes à l'ensemble des atolls lors des événements que nous avons identifiés et quels seraient les seuils environnementaux déclencheurs de crise dystrophiques. Pour cela, nous appliquerons des méthodes statistiques classiques, telles que la classification hiérarchique ascendante (*hierarchical clustering*) ainsi que les arbres de décision (*regression trees*). La première méthode nous permettra d'identifier si les périodes autour desquelles nous situons l'ensemble des événements se retrouvent dans un groupe hydroclimatique particulier. Le second nous donnera les valeurs des variables température, houle et tension du vent lors du déclenchement de ces crises, et donc les seuils potentiels générateurs de crise.

Enfin, nous nous demanderons pourquoi un atoll subit une crise dystrophique tandis qu'un atoll à proximité présentant les mêmes paramètres géomorphologiques n'est pas touché. En effet, souvent, ces événements sont des singletons dans l'espace et le temps. Pour ce faire nous tracerons les cartes de corrélation pour chaque événement et chaque variable sur une période de un mois avant le début de la crise. Ceci indiquera, spatialement, le degré de similarité de la situation hydroclimatique d'un atoll avec son entourage lors des périodes dystrophiques.

## 2.4 Les données

L'ensemble des données décrites ci-dessous ont été récupéré au format NetCDF (Network Common Data Form) qui permet de stocker les données sous forme de tableaux de valeurs, et qui possède un en-tête décrivant les caractéristiques et la disposition des données. Ce format est couramment utilisé dans le partage de fichiers scientifiques, notamment dans les domaines océanographique, météorologique, climatologique ainsi que dans les systèmes d'information géographique (S.I.G).

Avant le traitement visuel et statistique, il est nécessaire d'effectuer quelques prétraitements et transformations sur les fichiers de données brutes. En effet, nous avons un dossier pour chaque pas de temps de la série considérée, nous devons donc les concaténer afin de pouvoir travailler sur

des séries temporelles complètes. Nous avons aussi dû extraire l'information pertinente pour notre zone d'étude, les fichiers étant pour la plupart fournis à l'échelle globale. Il était également nécessaire de moyenniser les données par jour et par mois, ainsi que d'effectuer des opérations telles que la conversion des unités de température par exemple (de Kelvin à Celsius)

### 2.4.1 La température de surface de la mer

Les données de SST téléchargées proviennent de radiomètres infra-rouge à très haute résolution (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) positionnés sur les satellites de l'administration nationale atmosphérique et océanique des Etats Unis (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

Les données de SST mensuelles ont été obtenues sur le site <http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov>. Elles sont téléchargeables à partir d'un serveur en accès direct (Live Access Server, LAS). Il suffit de choisir la période, la zone et le format voulus, ce qui est pratique car il ne nécessite pas l'écriture d'un script de récupération, en revanche le serveur limite la taille des fichiers à 200 mégaoctets ce qui empêche le téléchargement sur de très longues périodes. A partir de ce site nous avons récupéré les fichiers moyennés mensuellement de 1985 à 2012. Pour les fichiers journaliers nous avons fait un script Shell de récupération afin de télécharger les données sur un serveur FTP (File Transfert Protocol) de l'administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (National Aeronautics and Space Administration, NASA): [ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/ghrsst/data/L4/GLOB/NCDC/AVHRR\\_OI/](ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/ghrsst/data/L4/GLOB/NCDC/AVHRR_OI/).

### 2.4.2 Le tension du vent

Le tension du vent entre 1992 et 2000 avec une résolution spatiale de un degré provient du satellite Européen de télédétection (European Remote Sensing, ERS), et a été téléchargé sur le site [http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/ERS-2\\_IFREMER\\_L3\\_OW\\_MEAN\\_WIND\\_FIELDS](http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/ERS-2_IFREMER_L3_OW_MEAN_WIND_FIELDS). Ces données sont disponibles à l'échelle hebdomadaire.

Les données de tension du vent pour la période 2000-2009 avec un pas d'espace de 0.5 degré ont été récupérées sur le LAS (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov>), et proviennent du capteur Quick Scatterometer (QuickSCAT) qui mesure la vitesse et la direction du vent. La tension est par la suite calculée en fonction de la vitesse du vent (H. Lutz & D. Smith, 1997). Ces données sont journalières.

Enfin, les données de 2009 à 2012 proviennent du capteur Advanced Scatterometer (ASCAT) avec une résolution de 0.5 degré et téléchargées sur le serveur FTP de la NOAA (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/gridap/>), et les données sont journalières

L'ensemble de ces trois sources de données ne possédant pas la même résolution spatiale, nous avons donc dû interpoler les données sur une même grille de 1°x1° hebdomadaire avant de pouvoir faire tout traitement

### 2.4.3 Les sorties de modèles numériques

Les sorties de modèles numériques considérées sont la houle, les vagues et la mer de vent. Elles sont obtenues à partir du modèle spectral de régionalisation de WAVEWATCH III de la NOAA, implémenté par Fabrice Ardhuin de l'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer).

Nos données ont été téléchargées sur le serveur FTP de l'Ifremer (<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wavewatch3/HINDCAST/GLOBAL/>). Les sorties ont un pas temps de trois heures et une résolution spatiale d'un demi degré. Pour en faciliter

l'utilisation (après concaténation de l'ensemble des fichiers) nous avons calculé les moyennes journalières, hebdomadaires et mensuelles.

## 2.5 Méthodes et Analyses

Tout d'abord dans notre analyse nous avons considéré nos variables de manière indépendante, afin de voir si des anomalies ressortaient sur chacune d'entre elles durant la période autour de nos événements. Pour ce faire nous avons en premier lieu décidé de tracer les séries temporelles brutes des trois variables considérées (houle, SST, et tension du vent), afin de visualiser leur variabilité temporelle. Vu la faible variabilité journalière des variables, nous avons décidé d'effectuer des moyennes hebdomadaires. Par la suite nous avons retiré le cycle saisonnier afin de mettre en évidence les anomalies interannuelles.

Pour affiner notre analyse nous avons choisi de prendre en compte le paramètre géomorphologique (à partir des séries brutes moyennées hebdomadairement). Comme nous l'avons vu dans le tableau 2, l'ensemble de nos atolls sont ouverts au Sud et très peu au Nord (exception faite de l'atoll de Manihiki qui lui est ouvert au Nord-Ouest et totalement fermé à l'Est). Nous avons donc décidé de seuiller les houles venant de l'Est pour Manihiki (direction entre 30°N et 150°N) et du Nord (direction entre 300°N et 60°N) pour les autres atolls, afin de conserver uniquement les houles dont la direction a un réel impact sur le renouvellement de la colonne d'eau du lagon.

Nous voulions également déterminer une unité spatiale minimale pour laquelle il est possible d'observer des périodes de calme plat pour la houle et de forte SST autour d'un atoll pendant une période donnée (typiquement un mois). En d'autres termes nous voulions vérifier s'il est possible qu'une zone limitée expérimente une houle quasi-nulle et de très fortes températures de surface pendant un mois, alors que les domaines adjacents ont des conditions suffisamment dynamiques pour réoxygéner le lagon. Pour ce faire nous avons tracé les cartes spatiales de corrélation de nos variables, centrées sur nos atolls.

Dans une étape suivante, nous avons décidé de ne plus traiter nos variables séparément afin de montrer que l'occurrence de nos événements est due à leur effet combiné. Afin de réaliser des analyses statistiques multivariées, il est au préalable nécessaire de construire une matrice de données comme suit, pour tous les événements du tableau 2. Nous avons sélectionné toutes les variables, de six mois avant à six mois après l'évènement. Nos données étant moyennées hebdomadairement nous avons au total 52 semaines autour de chaque événement, et 11 événements, soit au total 548 lignes dans notre matrice (les deux événements de Takaroa se sont passés à un mois d'écart, et les événements de Manihi de 1997 et 1998 se passant sur deux années consécutives, les deux années ont été groupées, de juin 1996 à août 1998). Cette matrice inclut donc les trois variables quantitatives jugées les plus importantes (la houle, la tension du vent et la SST), et également deux identifiants. Le premier étant un identifiant qui repère nos points pré-événements dans l'arbre de classification hiérarchique (cluster) avec une couleur pour chaque période de un mois précédant les événements, afin de les visualiser plus facilement parmi les 548 points (couleur noir par défaut). Nous retrouvons ces informations dans le tableau 3. Le second identifiant est la variable réponse qui permet de construire l'arbre de décision, cette dernière a été créée d'après les observations faites à partir du cluster (la variable réponse est égale à 1 lorsque nos individus sont dans la branche événement du cluster, et égale à 0 dans les autres cas). Nos variables n'ayant pas la même unité et se trouvant sur des échelles difficilement comparables il est nécessaire de les centrer et de les réduire avant toutes analyses.

**Tableau 2 :** Tableau regroupant les caractéristiques de la matrice de données.

Atolls	début probable événement	numéros de semaine	Couleurs
Hikueru	avr-94	9 à 13	rouge
Manihi 1994	avr-94	61 à 65	bleu
Manihi 1997	févr-97	137 à 141	bleu
Manihi 1998	mars-98	194 à 198	bleu
Takapoto	mars-98	253 à 257	vert
Takaroa 2000	déc-00	301 à 305	rose
Takaroa 2001	janv-01	306 à 310	rose
Fangatau	févr-04	359 à 363	orange
Tatakoto	févr-09	412 à 416	gris
Ahe	mai-12	465 à 469	marron
Manihiki	févr-12	523 à 527	violet

La première analyse statistique multivariée est une analyse en composantes principales (ACP). L'ACP permet d'étudier les ressemblances entre individus (i.e. les différentes semaines considérées autour d'un événement) par rapport à l'ensemble de nos variables (ici au nombre de trois : houle, tension du vent, et SST) et de dégager les profils des événements en fonction des variables (graphe des individus). Elle permet également de faire un bilan des liaisons linéaires entre variables à partir des coefficients de corrélations (graphe des variables).

La deuxième analyse statistique réalisée ici, est une classification hiérarchique ascendante à partir de la fonction « agnes » (A. Struyf, 1997). Le but est de créer une hiérarchie entre les individus, et de les classer dans un arbre que l'on appelle dendrogramme. Cette classification regroupe les individus les plus similaires, pour ce faire elle nécessite le choix d'une distance entre individus et d'un indice d'agrégation. Ici nous avons classiquement utilisé la distance euclidienne ainsi que l'indice de Ward. Ce dernier permet de regrouper des classes d'individus en cherchant à minimiser la distance entre les barycentres de chaque classe.

Enfin, nous avons réalisé un arbre de décision, qui permet de prédire une variable quantitative (arbre de régression) ou qualitative (arbre de segmentation) à partir de variables explicatives. Son algorithme est basé sur la méthode CART (Classification And Regression Trees) développé par Breiman et al. (1984), qui construit des classes d'individus afin que ces derniers soient les plus homogènes possibles à l'intérieur d'une classe. De plus il nous fournit les seuils, pour chaque nœud de l'arbre, qui lui ont permis de faire cette différenciation. C'est sur cette notion de seuil que notre intérêt se portera.

## 2.6 Outils informatiques

### 2.6.1 Outils CDO (Climate Data Operators) et NCO (NetCdf Operators)

Ces deux outils sont des applications qui permettent de visualiser et manipuler le contenu de fichiers au format NetCDF. Ils permettent d'accéder aux données et de les modifier ainsi que d'interagir entre plusieurs fichiers (opérations, concaténation, ajout de variables ...). L'outil CDO est très puissant car il permet de faire le même type de modifications mais sur plusieurs formats de fichiers (NetCDF, GRID, SERVICE, EXTRA, IEG), de plus on a également accès à une plus large palette d'outils d'analyses (régression, interpolation, statistique descriptive, ...) que l'outil NCO. L'ensemble des commandes utilisées est résumé dans le tableau 3:

**Tableau 3:** Commandes NCO et CDO utilisées pour la transformation des fichiers NetCDF.

Commandes	NCO	CDO
Concaténation	nccat	cat
Zoom	ncks -d lon -d lat	splitgrid
Moyenne journalière	-	daymean
Moyenne mensuelle	-	monmean
Opérations	ncks « opérations »	

### 2.6.2 Ferret

Ferret est un langage gratuit utile pour l’affichage et le traitement des données océanographiques et météorologiques ([www.pmel.noaa.gov/ferret](http://www.pmel.noaa.gov/ferret)). C’est un outil composé d’un ensemble de fonctions que l’on exécute par des lignes de commande dans un Shell. Il est également possible d’écrire des scripts dans le langage Ferret et de les exécuter avec la commande *go*. L’ensemble de ces fonctions en font un outil très rapide, puissant et complet.

### 2.6.3 R

R est un langage de programmation orienté vers le traitement de données et l’analyse statistique, dérivé du langage S développé par J. Chambers. C’est un logiciel libre et distribué gratuitement par le CRAN (Comprehensive R Archive Network). Il est utilisable sous différents systèmes d’exploitation, dont UNIX utilisé ici. Dans sa version de base une multitude de fonctionnalités sont disponibles, mais il peut être nécessaire de télécharger ce qu’on appelle des paquets pour une utilisation plus approfondie. Les différents paquets utilisés dans cette étude sont : *ade4*, *FactoMineR*, *ape*, *vegan*, *cluster*, *rpart*.

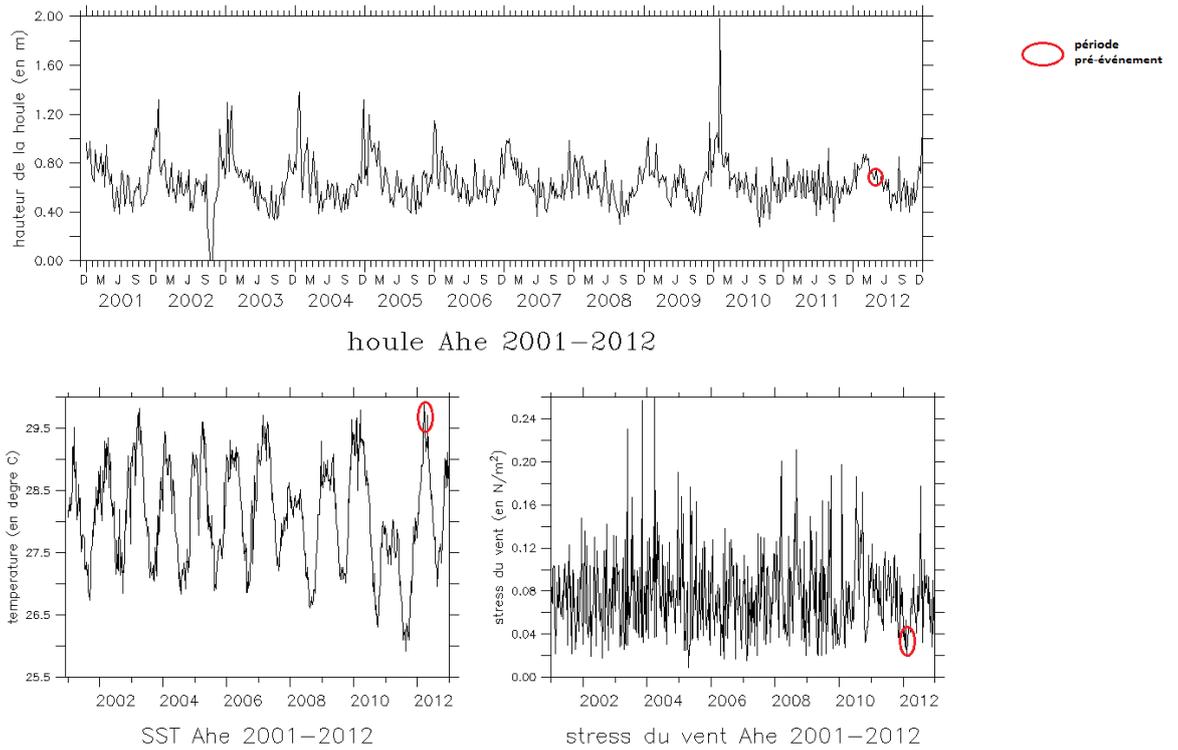
R a été utilisé pour le calcul des ACP, avec l’affichage des graphes des variables et des individus (paquets *ade4* ou *FactomineR*), ainsi que pour la classification hiérarchique ascendante (paquet *cluster*). Nous nous sommes également servis de R pour tracer des boîtes à moustache (fonction *boxplot*) ainsi qu’un arbre de décision (paquet *rpart*).

## 3. Résultats

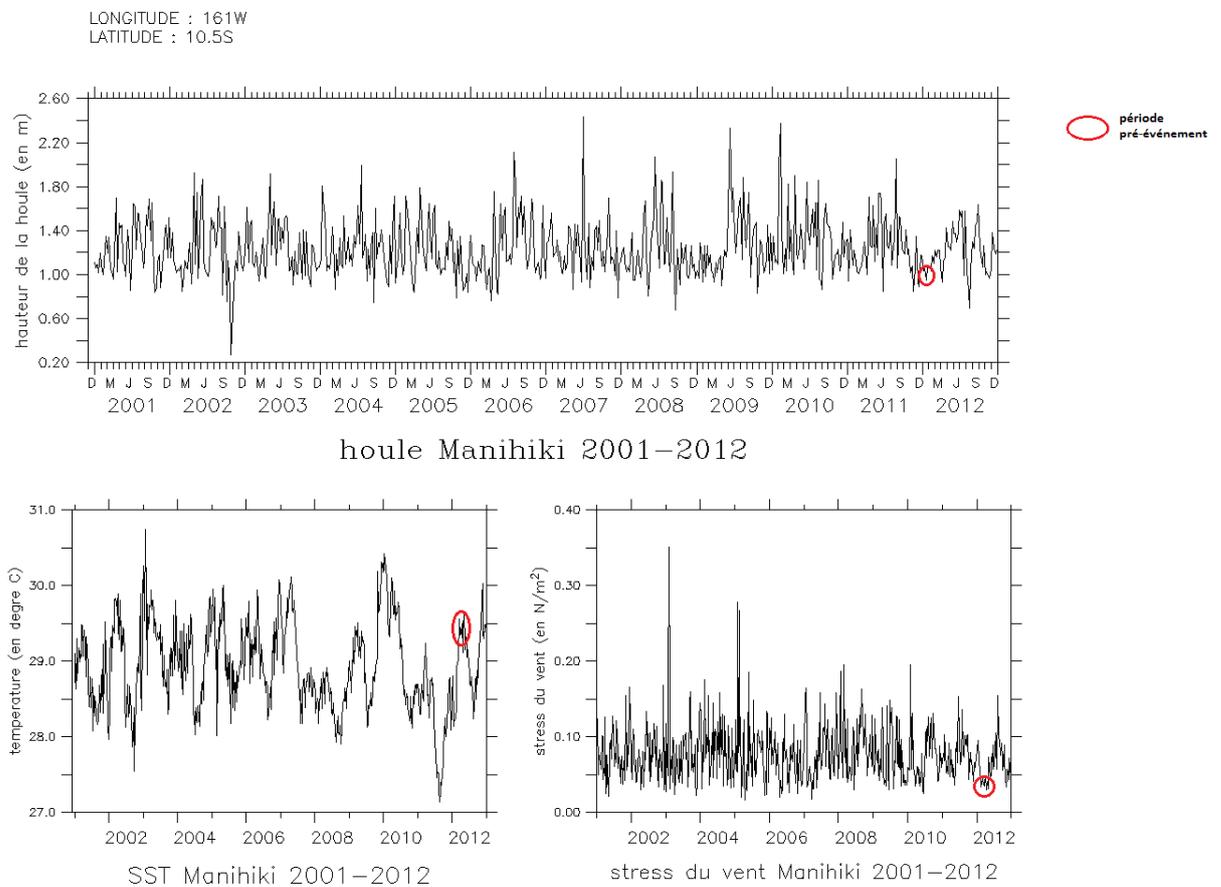
### 3.1 Séries temporelles

#### 3.1.1 Séries brutes

Les séries temporelles brutes, sans filtrage, ni aucune modification de nos variables (c’est-à-dire houle, tension du vent, et SST), sont examinées afin de nous rendre compte de leur variabilité temporelle. Ici, on décrit seulement deux atolls Ahe, et Manihiki à titre démonstratif. Ce choix de sites étant justifié par leur présence dans deux zones géographiques différentes. De plus ils représentent les deux types d’atolls considérés, Manihiki étant semi-fermé (ouverture de 19%) et Ahe fermé (ouverture de 7%).



**Figure 2:** Carte de la variabilité temporelle de la houle, des vagues, de la SST, et de la tension du vent durant la période entre 2001 et 2012 sur l'atoll d'Ahe (données moyennées hebdomadairement).



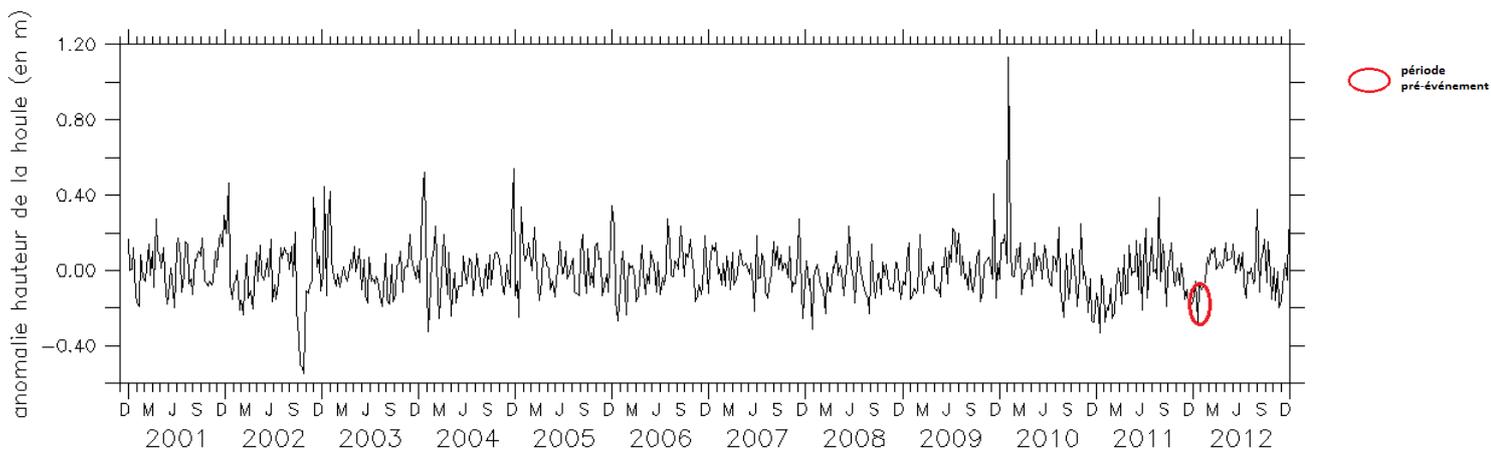
**Figure 3:** Carte de la variabilité temporelle de la houle, des vagues, de la SST, et de la tension du vent durant la période entre 2001 et 2012 sur l'atoll de Manihiki (données moyennées hebdomadairement).

Sur ces différents graphiques on peut noter une variabilité saisonnière plus ou moins marquée en fonction des variables. En effet, nous voyons une très forte variabilité pour la houle, et la SST, en revanche pour la tension du vent le cycle saisonnier est moins évident. De plus, si nous regardons la période légèrement avant nos événements (entourée en rouge) pour chacun de nos atolls nous ne notons pas d'anomalie particulière par rapport au reste de la série temporelle. Pour la suite, ce cycle saisonnier a été filtré afin d'observer les anomalies par rapport à cette tendance.

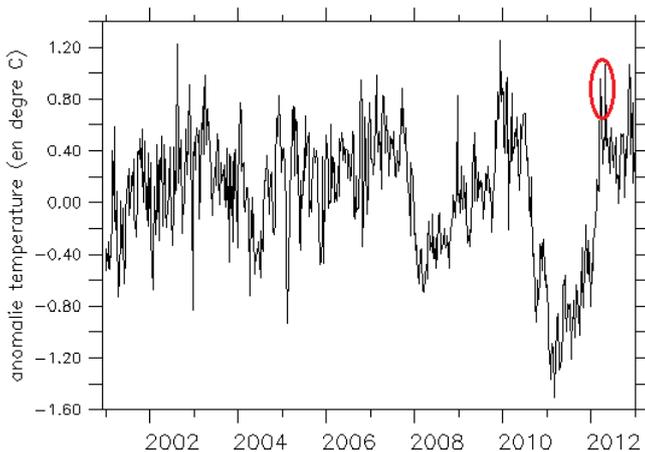
### 3.1.2 Séries filtrées

- Séries temporelles sans le cycle saisonnier

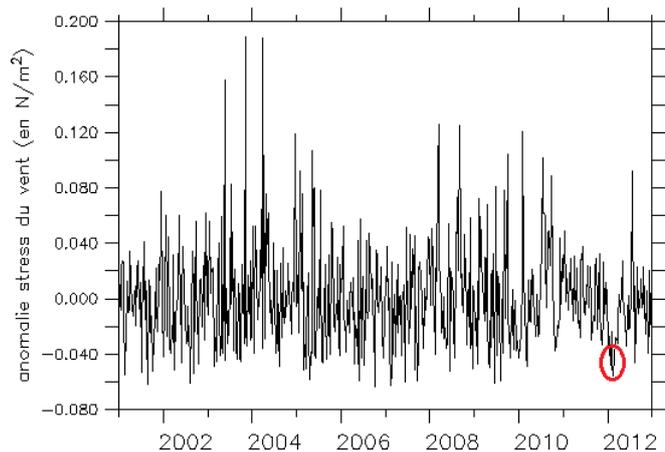
LONGITUDE : 146.5W  
LATITUDE : 14.5S



anomalie houle Ahe 2001–2012

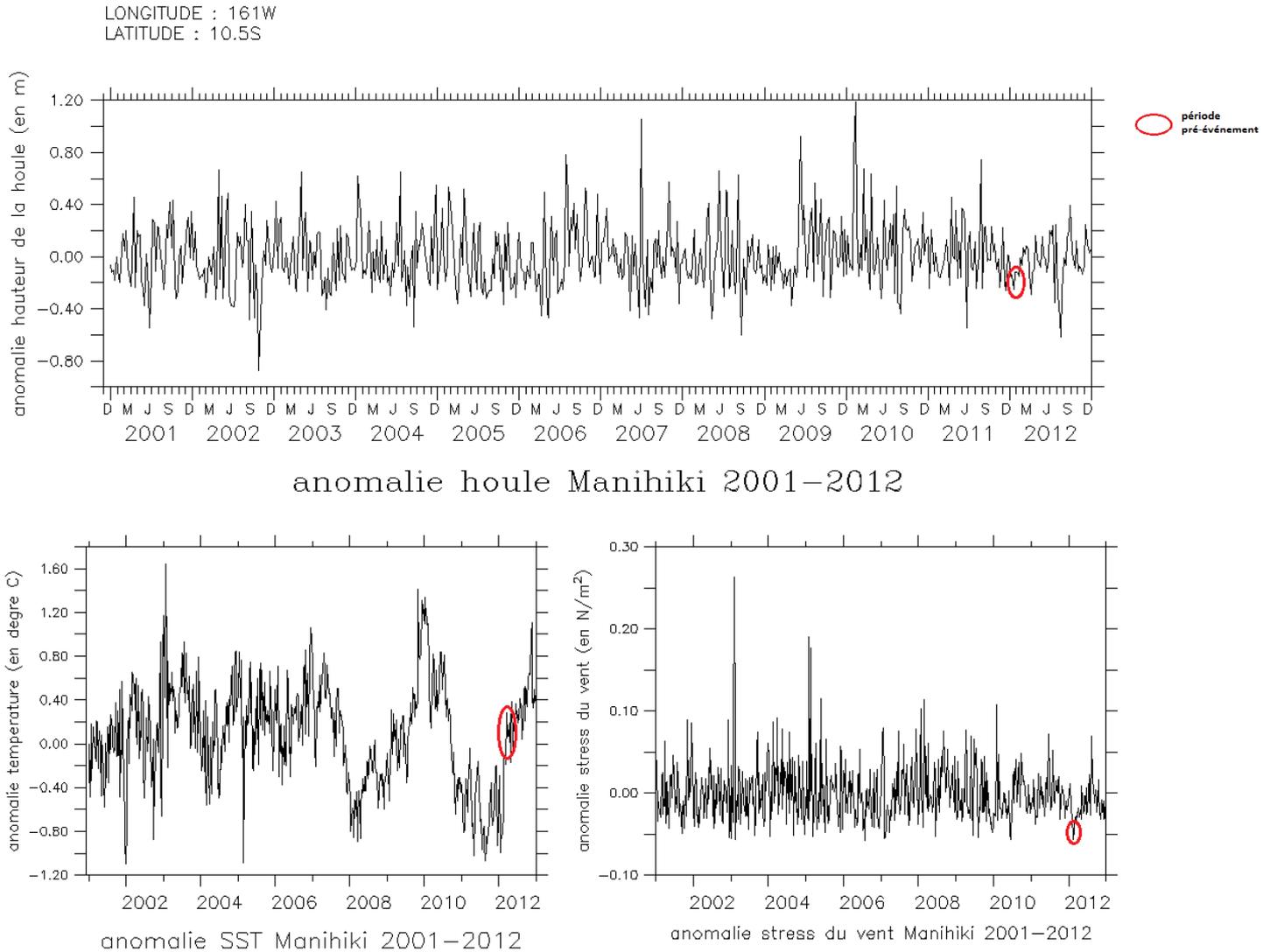


anomalie SST Ahe 2001–2012



stress du vent Ahe 2001–2012

**Figure 4:** Anomalie saisonnière centrée sur l'atoll d'Ahe durant la période entre 2001 et 2012 pour nos trois variables (houle, SST, et tension du vent).

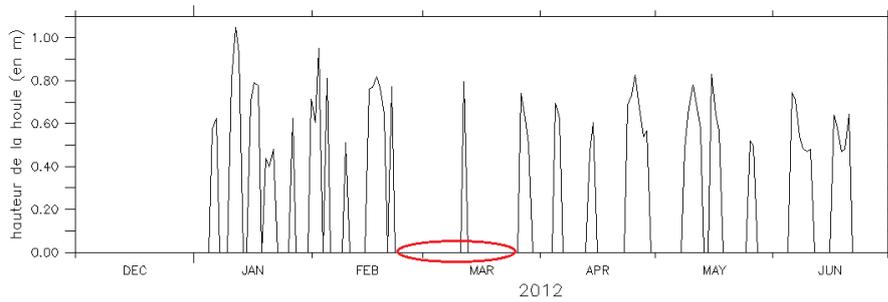
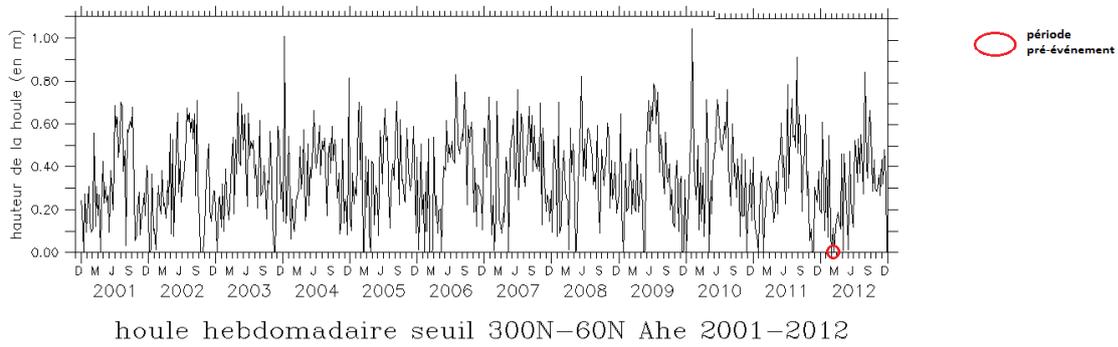


**Figure 5:** Anomalie saisonnière centrée sur l'atoll de Manihiki durant la période entre 2001 et 2012 pour nos trois variables (houle, SST, et tension du vent).

Ce filtrage permet d'observer les anomalies saisonnières sur l'ensemble de nos séries temporelles considérées. Sur l'atoll d'Ahe pour la période avant notre événement (qui se déroule en avril 2012, tableau 2) nous observons des anomalies saisonnières de  $-0.2\text{m}$  de houle, de  $+1^\circ\text{C}$  de SST, et de  $-0.05\text{N/m}^2$  de tension du vent. Nous pouvons remarquer le même type d'anomalie pour l'ensemble de nos atolls sur la période précédant notre événement, c'est-à-dire des valeurs négatives de houle, de tension du vent, et des valeurs positives de SST, ce qui confirme nos hypothèses hydroclimatiques de départ. En revanche, ces anomalies ne sont pas exceptionnelles, en effet nous retrouvons plusieurs fois de telles valeurs sur une période d'environ dix ans.

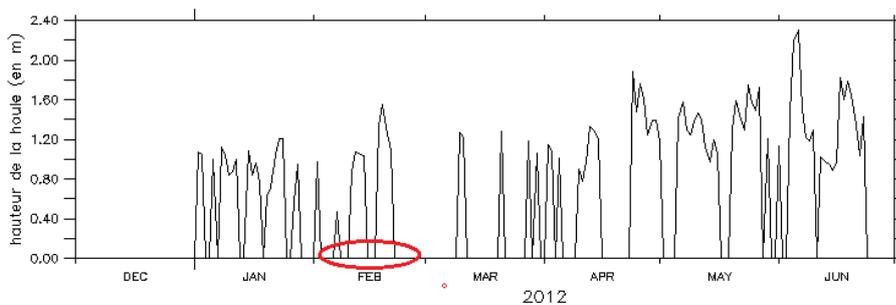
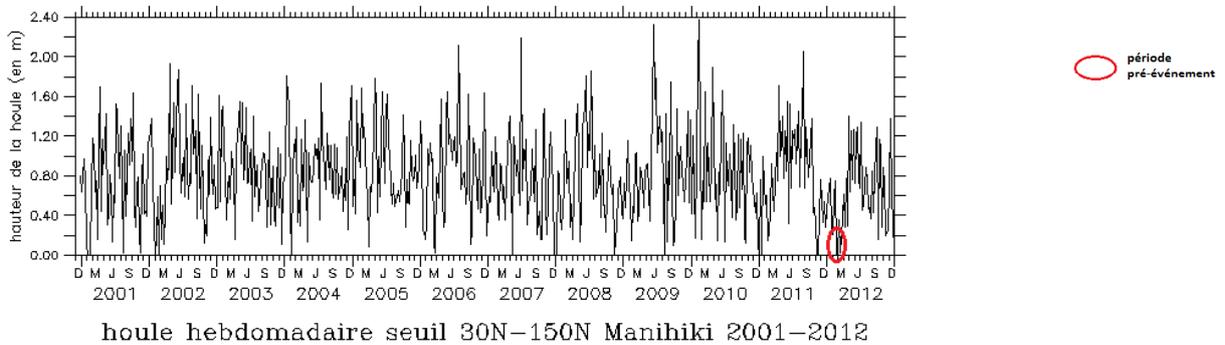
- Houle de direction défavorable seuillée

LONGITUDE : 146.5W  
 LATITUDE : 14.5S



**Figure 6:** Graphique représentant la hauteur de la houle au niveau de l’atoll de Manihiki, mise à zéro lorsque sa direction se situe entre 300°N et 60°N sur deux périodes différentes (entre 2001 et 2012 et début 2012).

LONGITUDE : 161W  
 LATITUDE : 10.5S



**Figure 7:** Graphique représentant la hauteur de la houle au niveau de l’atoll d’Ahe, mise à zéro lorsque sa direction se situe entre 300°N et 60°N, sur deux périodes différentes (entre 2001 et 2012 et début 2012).

Sur les deux graphiques de début d'année 2012 nous observons pour le mois précédant nos événements (le mois de mars-avril pour Ahe, le mois de février pour Manihiki) une période où la houle est à zéro pendant plusieurs semaines, ce qui correspond à des houles de direction comprise dans le quadrant  $300^{\circ}\text{N} - 60^{\circ}\text{N}$  pour Ahe et  $30^{\circ}\text{N} - 150^{\circ}\text{N}$  pour Manihiki. Pour Ahe, cet épisode a duré quasiment un mois sans interruption. Comme nous l'avons dit précédemment au vu de la géomorphologie de ces atolls les houles de direction Nord (Est pour Manihiki) n'ont aucun impact sur le renouvellement du lagon. Nous notons une bonne corrélation entre ces périodes de houle de Nord (Est pour Manihiki) et nos événements. De plus, pour l'atoll d'Ahe nous pouvons observer sur les onze années considérées que ces périodes de houle venant du Nord durant la période estivale ne sont pas fréquentes même si elles ne sont pas uniques. L'incertitude quant à la connaissance de la totalité des événements ne nous permet pas de conclure ici, mais il est très probable que ce paramètre soit primordial. Le cas de Manihiki est néanmoins bien moins explicite, et nous oblige à nuancer nos conclusions à ce stade de l'analyse. Cet atoll étant semi-fermé, et sans passe, la houle devrait donc être le moteur principal du renouvellement du lagon (Callaghan et al., 2006)

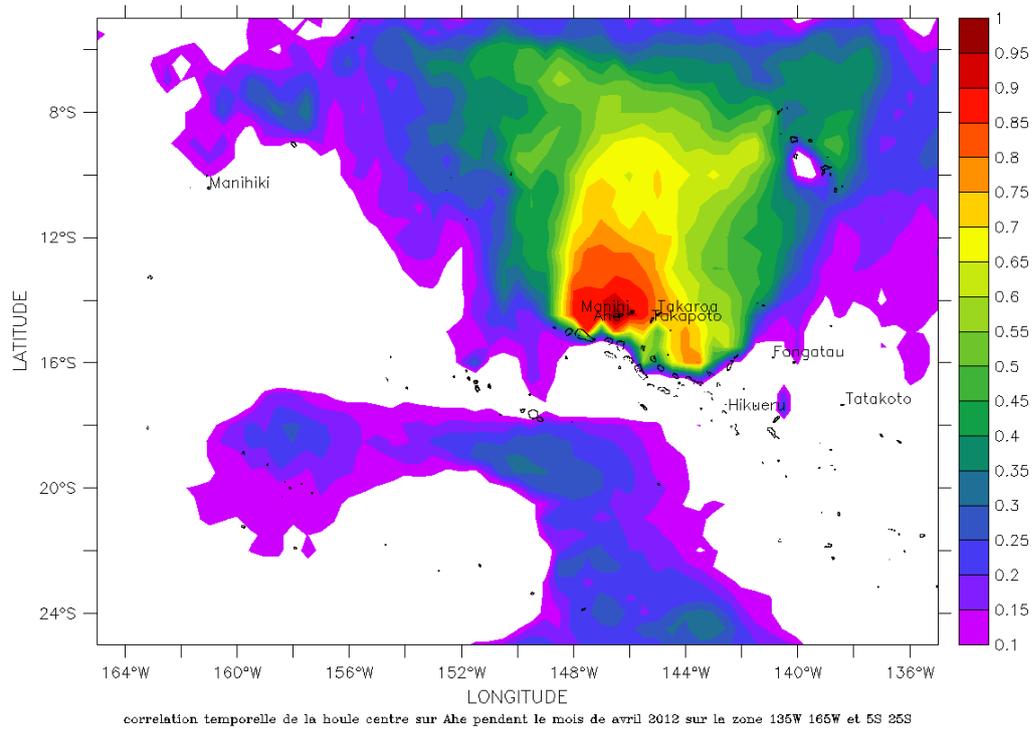
### 3.2 Corrélation temporelle

Les cartes de corrélations suivantes sur la houle et la SST ont été réalisées sur une période d'un mois avant le début de l'événement, avec des données journalières. Prenant un point de référence (un des atolls durant un événement), nous effectuons la corrélation temporelle en chaque point alentour de la série de l'Atoll extraite avec la série équivalente du point considéré, sur une période de un mois précédant le début de l'événement. Nous ne présenterons pas les corrélations de la tension du vent car elles sont homogènes horizontalement et n'apportent pas d'information discriminante spatialement. Cette homogénéité est due aux échelles horizontales importantes du régime d'Alizés dans une zone à l'orographie peu mouvementée.

Dans l'analyse des cartes nous avons remarqué l'absence de fort coefficient de corrélation négatif, ce qui est intuitif puisque l'on ne s'attend pas a priori, à voir apparaître des anti-corrélations entre un point et un point alentour à ces échelles journalières. Afin donc d'augmenter les contrastes, j'ai restreint l'échelle du coefficient de corrélation entre 0,1 et 1 (les parties en blanc représentent donc les zones où ce dernier est inférieur à 0,1).

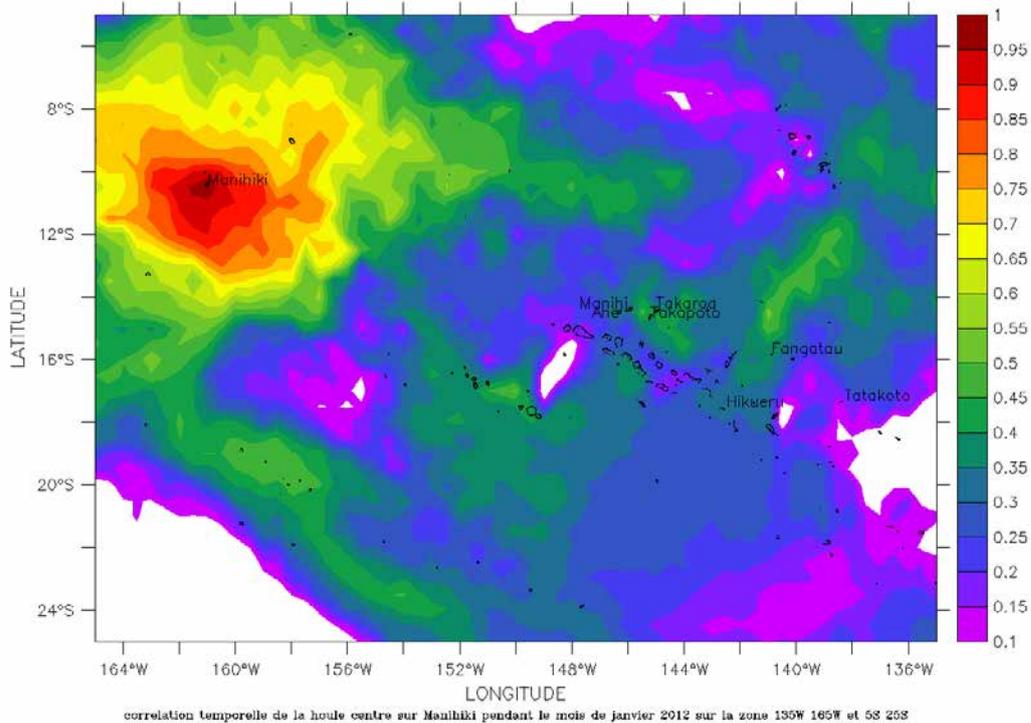
### 3.2.1 Houle

TIME : 31-MAR-2012 09:00 to 30-APR-2012 09:00



**Figure 8:** Carte de la corrélation temporelle de la houle centrée sur l'atoll d'Ahe pendant le mois d'avril 2012 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.

TIME : 31-DEC-2011 09:00 to 10-FEB-2012 09:00



**Figure 9:** Carte de la corrélation temporelle de la houle centrée sur l'atoll de Manihiki pendant le mois d'avril 2012 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.

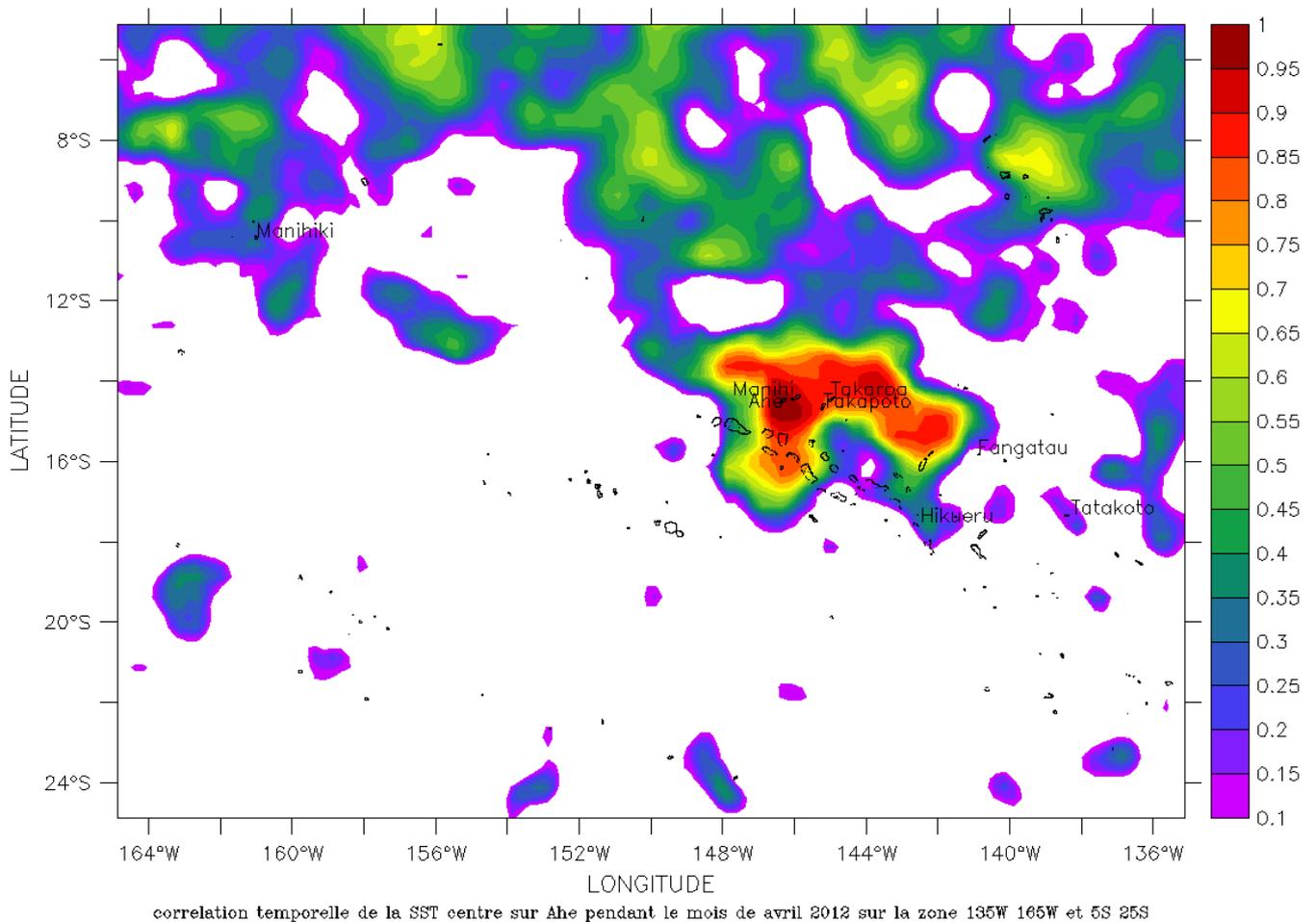
L'étude de corrélation a été faite sur 30 points dans le temps (un point par jour). Le calcul du coefficient d'autocorrélation sur les séries de houle, nous a informé sur le nombre de degré de liberté de ces séries temporelles, nous avons ainsi pu en déduire un seuil de significativité (pour un indice de confiance de 0.95) à partir de la table du coefficient de corrélation (R.A Fisher et F. Yates, 1963). Pour la série d'Ahe, ce seuil est de 0.66, tandis que pour Manihiki on obtient 0.48. Nous regarderons ensuite les zones où notre coefficient de corrélation est supérieur à 0.9 (coefficient significatif puisque supérieur aux seuils).

Nous pouvons voir pour l'atoll de Manihiki que la zone où le coefficient de corrélation est supérieur à 0.9 s'étend sur un domaine d'un degré de rayon, ce qui représente environ une centaine de kilomètres. Pour l'atoll d'Ahe la zone de très forte corrélation est également très restreinte (un degré de rayon au maximum).

Dans l'ensemble ce qui est frappant est la faible étendue spatiale de la zone de bonne corrélation autour de l'atoll considéré (environ 100km de rayon), ce qui peut être la première explication de la présence de crises dystrophiques dans certains atolls et pas nécessairement dans les atolls alentours.

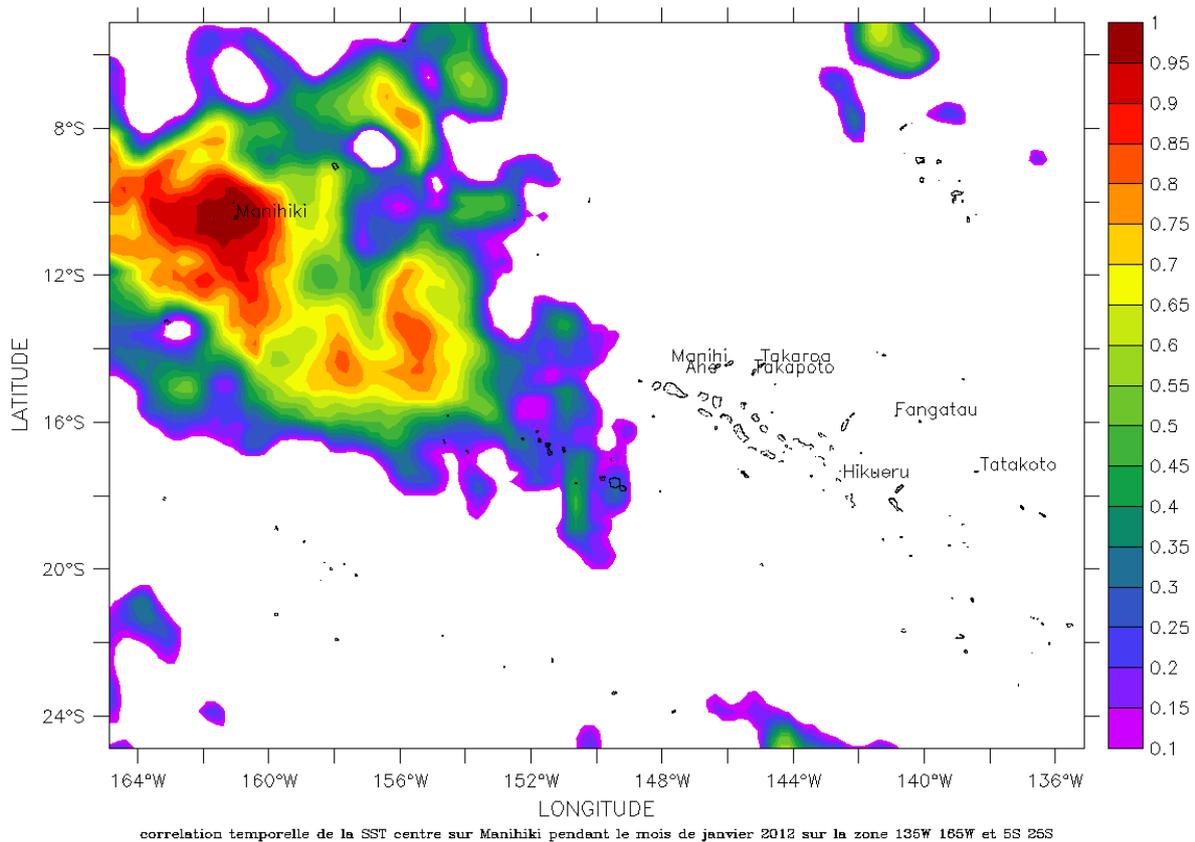
### 3.2.2 SST

TIME : 31-MAR-2012 12:00 to 30-APR-2012 12:00



**Figure 10:** Carte de la corrélation temporelle de la SST centrée sur l'atoll d'Ahe pendant le mois d'avril 2004 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.

TIME : 31-DEC-2011 12:00 to 10-FEB-2012 12:00



**Figure 11:** Carte de la corrélation temporelle de la SST centrée sur l'atoll de Manihiki pendant le mois de janvier 2012 sur la zone 135°W-165°W et 5°S-25°S.

Les seuils de significativité (à partir des séries temporelles de SST sur une période d'un mois avant l'événement, et pour un indice de confiance de 0.95) sont : 0.66 pour Ahe et 0.88 pour Manihiki.

Sur l'ensemble de ces cartes nous pouvons noter une zone de forte corrélation (coefficient compris entre 0.9 et 1) limitée dans l'espace, à peu près dans les mêmes proportions que pour la houle. En revanche, nous pouvons souligner que l'atoll de Manihiki a le domaine de forte corrélation le plus restreint pour la houle, et le plus étendue pour la SST. Nous pouvons donc supposer que la combinaison de ces deux facteurs est responsable de l'occurrence de ces événements. Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons décidé de ne plus analyser les variables séparément, mais d'effectuer des analyses multivariées.

### 3.3 Analyses multivariées

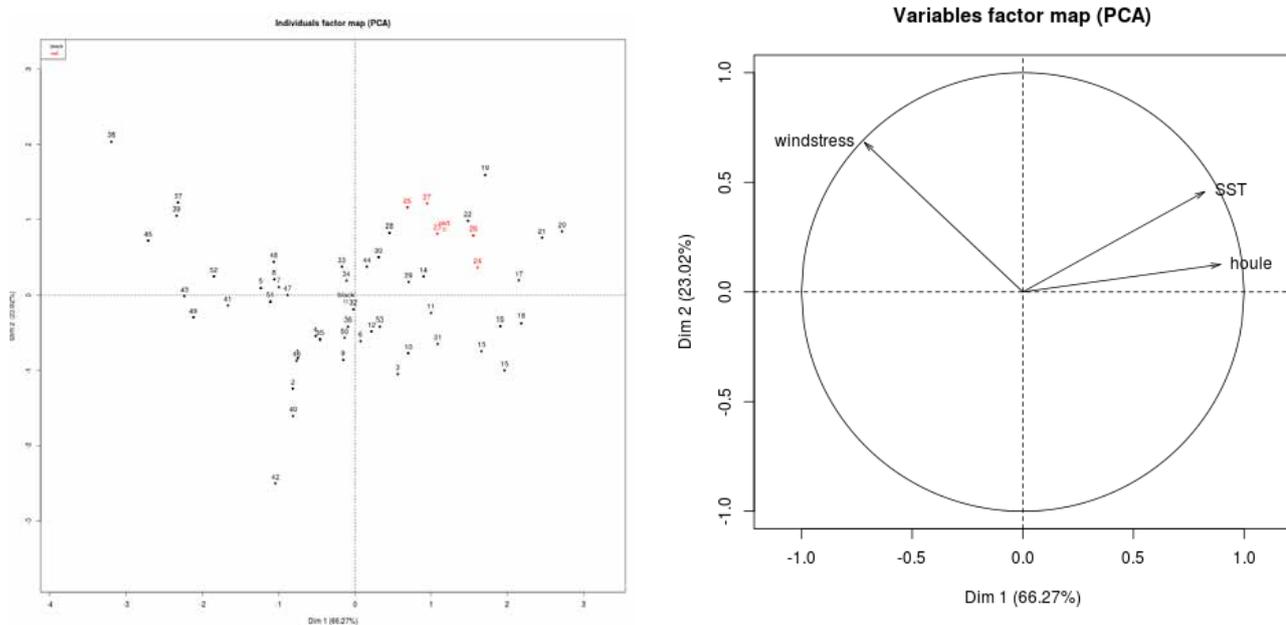
#### 3.3.1 Analyse en composante principale

L'ACP peut se résumer à un changement de référentiel, les deux axes principaux de ce nouvelle base représentant le maximum de dispersion des variables initiales (houle, SST, stress du vent), le deuxième devant être orthogonal au premier (les autres axes sont construits de la même façon, c'est-à-dire qu'ils doivent être orthogonaux entre eux et représenter le maximum de dispersion). Notre espace vectoriel de départ (ici de dimension 3) est ramené à un espace à deux dimensions par projection dans ce nouveau référentiel (nous regarderons ici les deux axes principaux seulement, car ils contiennent la majorité de l'information). Le graphe des variables (qui est une projection des vecteurs unitaires de notre référentiel de départ dans notre nouvelle base) représente les relations entre ces dernières. Le cosinus entre les vecteurs (houle, SST, et stress du

vent) et les axes du graphique des variables approche la valeur du coefficient de corrélation qu'il y a entre eux (de même pour le cosinus entre deux vecteurs). Ainsi si un vecteur se confond avec l'un des axes (ou avec un autre vecteur), leur corrélation est égale à 1. Le graphe des individus (qui est la projection des individus dans cette nouvelle base) permet de visualiser la distribution de nos points par rapport aux deux axes principaux.

Nous avons effectué deux types d'ACP, tout d'abord sur un événement unique afin de voir la distribution des semaines précédant notre événement et leur relation avec nos variables. Dans cette première étude nous avons considéré une période de un an autour de l'événement et nous regardons donc la disposition des 5 semaines avant la crise par rapport à l'ensemble des points. Pour déterminer la relation qu'il y a entre cette répartition et la valeur de nos paramètres il est nécessaire de regarder conjointement le graphe des variables (graphe de droite) et des individus (de gauche). Nous présentons ici les résultats des deux atolls Manihiki, et Ahe pour exemple. Par la suite nous montrerons les résultats sur la matrice de tous les événements, afin de pouvoir comparer les événements entre eux et de visualiser les ressemblances.

- Ahe

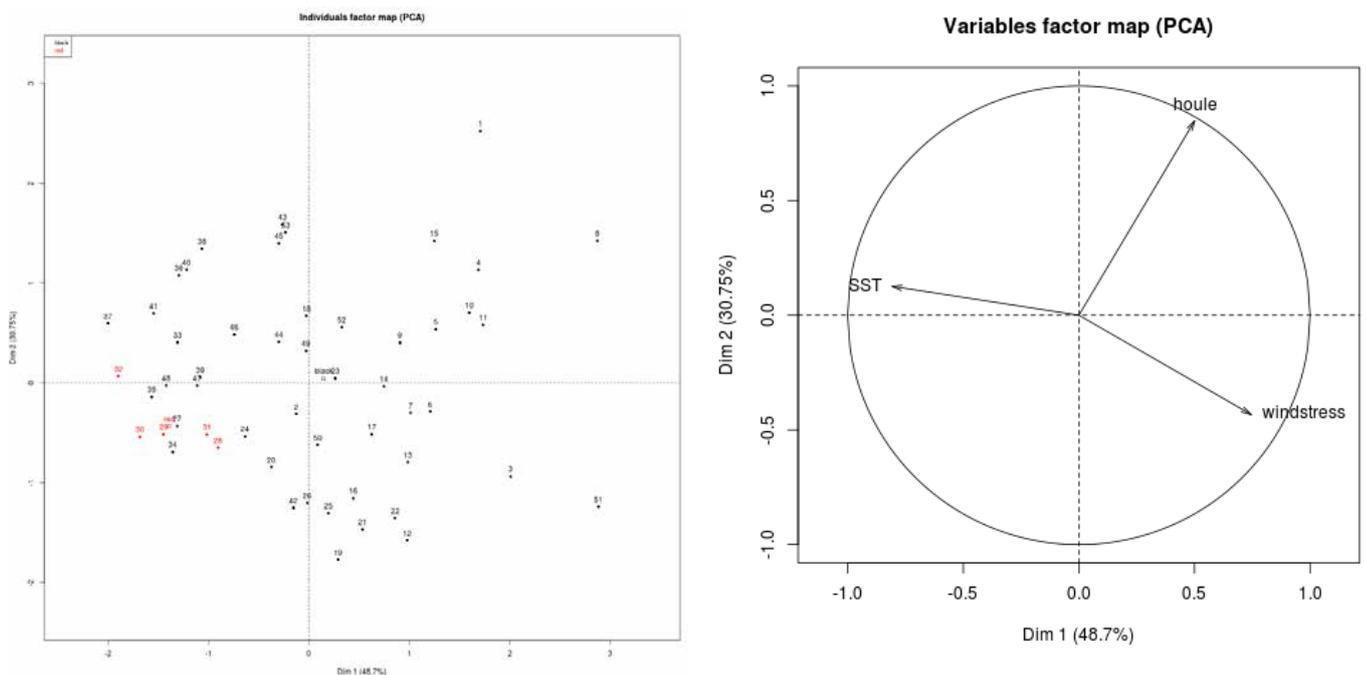


**Figure 12:** ACP des individus et des variables pour l'atoll d'Ahe, un an autour de l'événement de mai 2012.

Sur ces deux graphiques, la première remarque que nous pouvons faire est que la somme des deux axes principaux représente un peu plus de 89% de la variance de l'ensemble du signal (l'axe 1 66.27% et l'axe 2 23.02%). Il n'est donc pas nécessaire de regarder d'autres axes, 90% des informations se regroupant dans ce plan. Le graphe des variables nous indique que la houle et la SST sont bien corrélées, tandis que la tension du vent est décorrélée de la SST, et légèrement anti-corrélée avec la houle. A partir du graphique des individus, nous notons un fort rapprochement des points en rouge (qui représentent les 5 semaines précédant notre événement), nous pouvons dire dès lors que les conditions de houle, SST, et de tension du vent étaient similaires durant ces 5 semaines. La lecture conjointe de ce graphe avec le graphe des variables nous indique que ces points sont disposés ainsi car ils ont en commun une tension du vent faible, ainsi qu'une houle et une SST plus forte que la moyenne. En effet, si nous reportons le vecteur SST sur le graphe des individus nous pouvons noter que le cosinus de l'angle entre ce vecteur et le segment formé par l'origine du repère et nos points en rouge est proche de 1 (de même pour le vecteur houle). En revanche, si nous effectuons la même manipulation pour le vecteur de tension du vent nous notons que nos points sont décorrélés de cette variable ou faiblement anti-corrélés. Pour deux de ces variables les résultats

attendus sont donc présents, en revanche pour la houle ce résultat est surprenant. Toutefois, nous observons sur la série temporelle de la houle brute (figure 2) que les valeurs ne dépassent jamais les 0.9m durant la période considérée pour cette ACP. Une telle hauteur de houle est négligeable ou a très peu d'impact dans le renouvellement de la colonne d'eau (Andréfouët et al. 2001) et représente bien le régime à faible houle typique de cet atoll protégé par ses voisins (Andréfouët et al. 2012). Elle a donc peu d'influence dans ce cas précis, sur l'ensemble de la période. De plus nous pouvons voir que la flèche la plus longue est celle du stress du vent, ce qui signifie que la position de nos points est plus influencée par cette variable, ce qui est en accord avec ce que nous avons dit précédemment.

- Manihiki



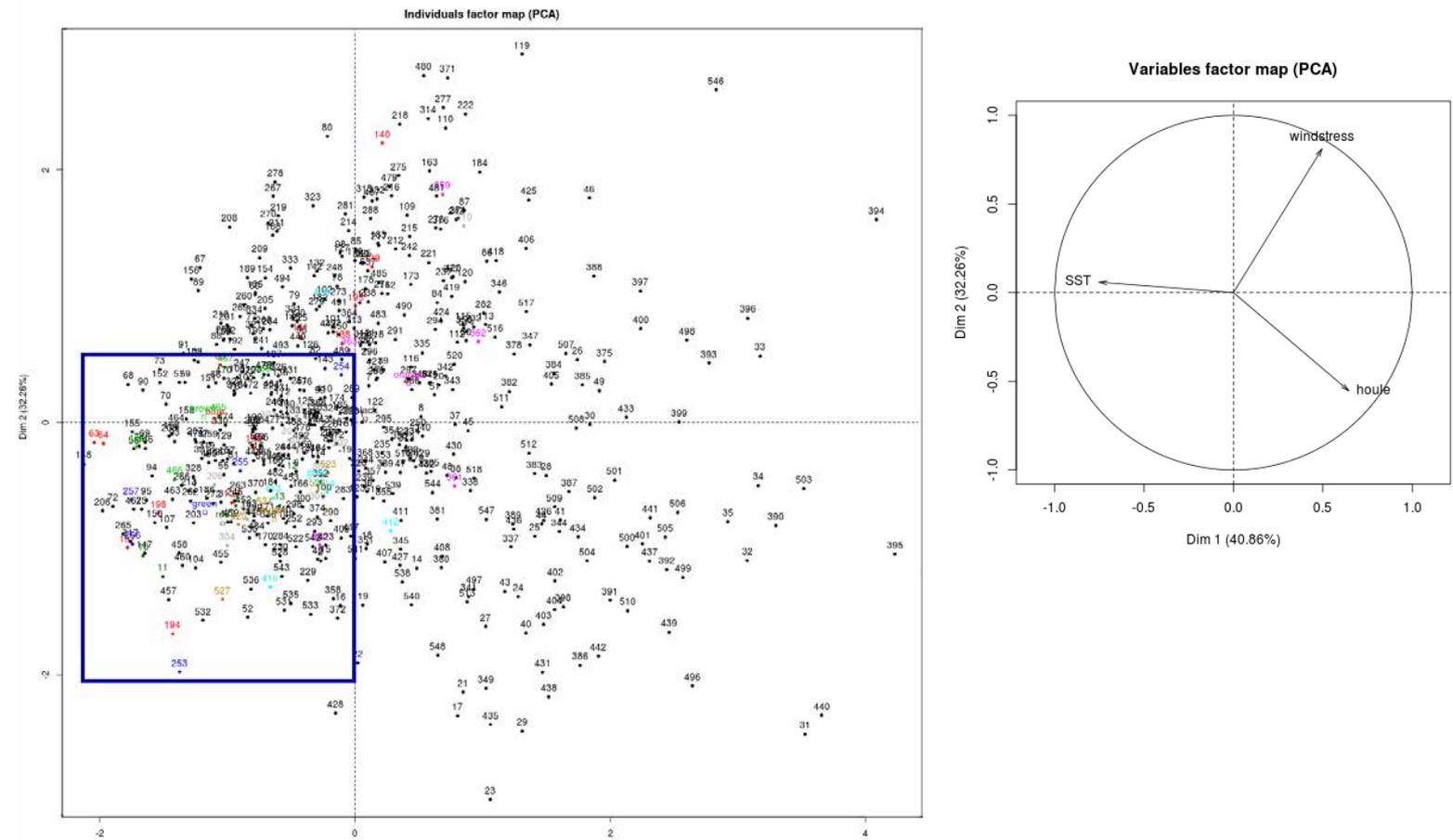
**Figure 13:** ACP des individus et des variables pour l'atoll de Manihiki, un an autour de l'événement de février 2012.

Dans le cas de cette ACP, nous pouvons noter que les deux axes principaux représentent quasiment 80% de la variance totale, nous regarderons donc uniquement ces derniers. Le graphe des individus nous indique que nos cinq semaines avant l'événement sont bien regroupées et qu'elles possèdent donc les mêmes caractéristiques. Le graphe des variables nous apprend que la SST et la tension du vent sont corrélées négativement, et également que la houle et la tension du vent sont décorrélées.

De plus, nos points rouges ont comme caractéristiques une SST forte, ainsi qu'une houle et une tension du vent faibles par rapport à la moyenne. Cette fois-ci nos trois variables, sur notre période précédant l'événement, sont en accord avec les hypothèses. Nous pouvons noter que Manihiki est un atoll semi-fermé (ouverture de 19%), ce qui rend l'effet de la houle sur le renouvellement du lagon beaucoup plus important. En effet, nous voyons que la longueur de la flèche « houle » est la plus importante, ce qui traduit l'impact de cette variable sur la répartition de nos points. Le dernier point que nous voulions éclaircir, était de savoir s'il y avait des conditions similaires au déclenchement de ces événements dystrophiques sur l'ensemble de nos atolls touchés, afin de déterminer des seuils sur nos variables permettant de prévoir dans le futur la possibilité ou non d'une telle crise. Pour ce faire, la matrice regroupant l'ensemble de nos événements est analysée.

Dans cette matrice, nous avons considéré une période de un an autour de notre événement afin de ne pas trop disperser nos points. Deux approches sont possibles : une ACP comme précédemment ou alors un arbre de classification hiérarchique. Cette dernière méthode sera abordée dans la prochaine partie.

- ACP générale sur l'ensemble des individus



**Figure 14:** ACP des individus et des variables pour l'ensemble des atolls, un an autour des événements.

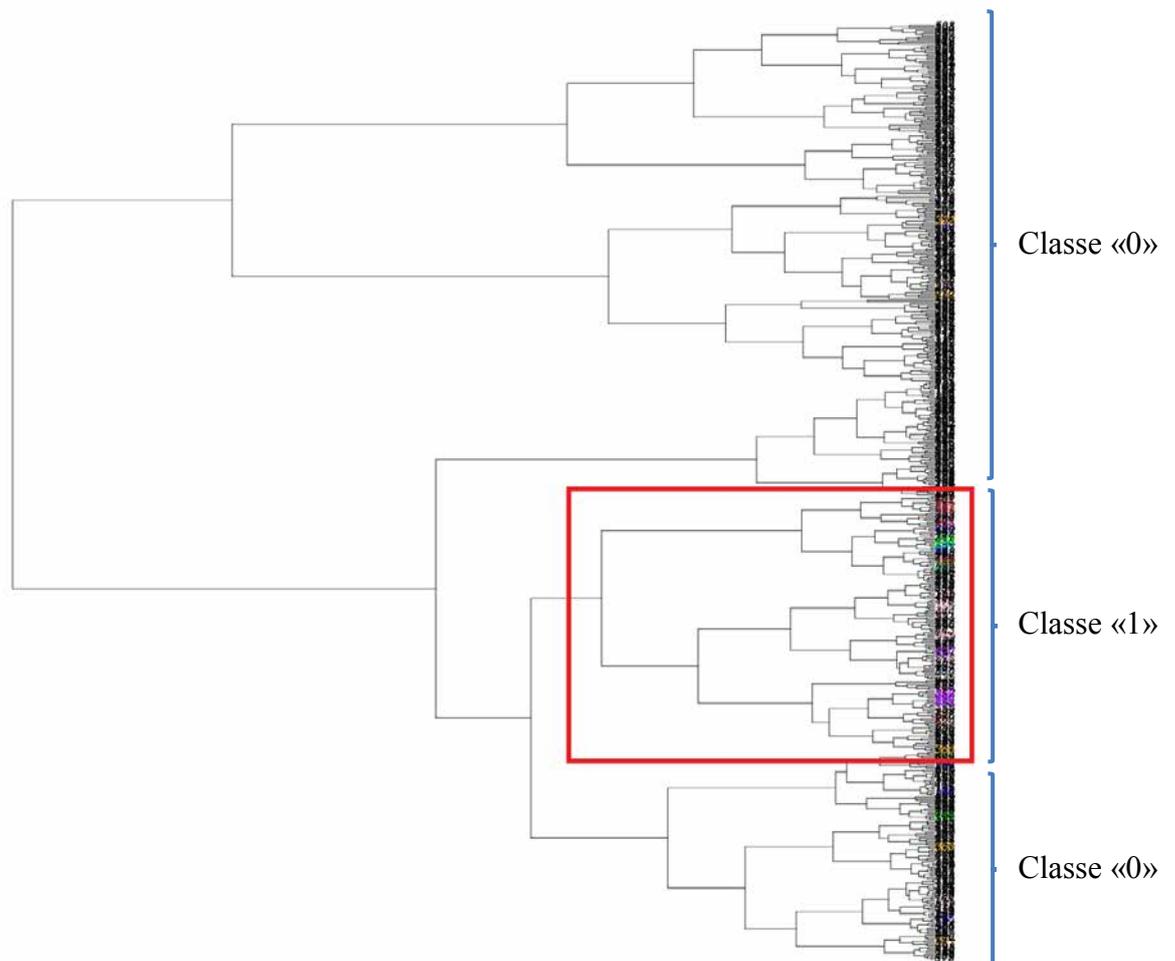
Sur ces deux graphes nous notons que 73% de la variance (40.9% sur l'axe 1 et 32.3% sur l'axe 2) est représenté par les deux axes principaux de l'ACP.

Sur le graphe des individus nous notons un fort regroupement (encadrement en bleu) de nos points colorés (représentant les cinq semaines précédant l'événement pour chaque atoll). Sur 55 points colorés seulement 13 sont vraiment excentrés, ce qui signifie que quasiment 80% des points pré-événements se regroupent dans la même zone. Il existe donc bien des conditions environnementales similaires pour la majorité des périodes avant un événement. Pour les 20% restant, il est possible que l'incertitude sur la longueur de notre période pré-événement soit partiellement responsable de cette dispersion. En effet, nous avons pris par défaut 5 semaines pour chaque événement, mais il se peut dans certains cas que cela soit inférieur.

D'après le graphe des variables nous notons que la houle et la SST sont quasiment corrélées négativement, et que la houle et la tension du vent sont totalement décorrélées. De plus, l'ACP nous permet d'affirmer que nos 42 points situés dans notre zone de regroupement possèdent comme caractéristiques une houle et une tension du vent faibles couplées à une forte SST. Ceci confirme statistiquement nos hypothèses de départ.

Pour augmenter la robustesse des analyses, nous présentons maintenant l'analyse en classification hiérarchique.

### 3.3.2 Arbre de classification hiérarchique ascendante (clustering)

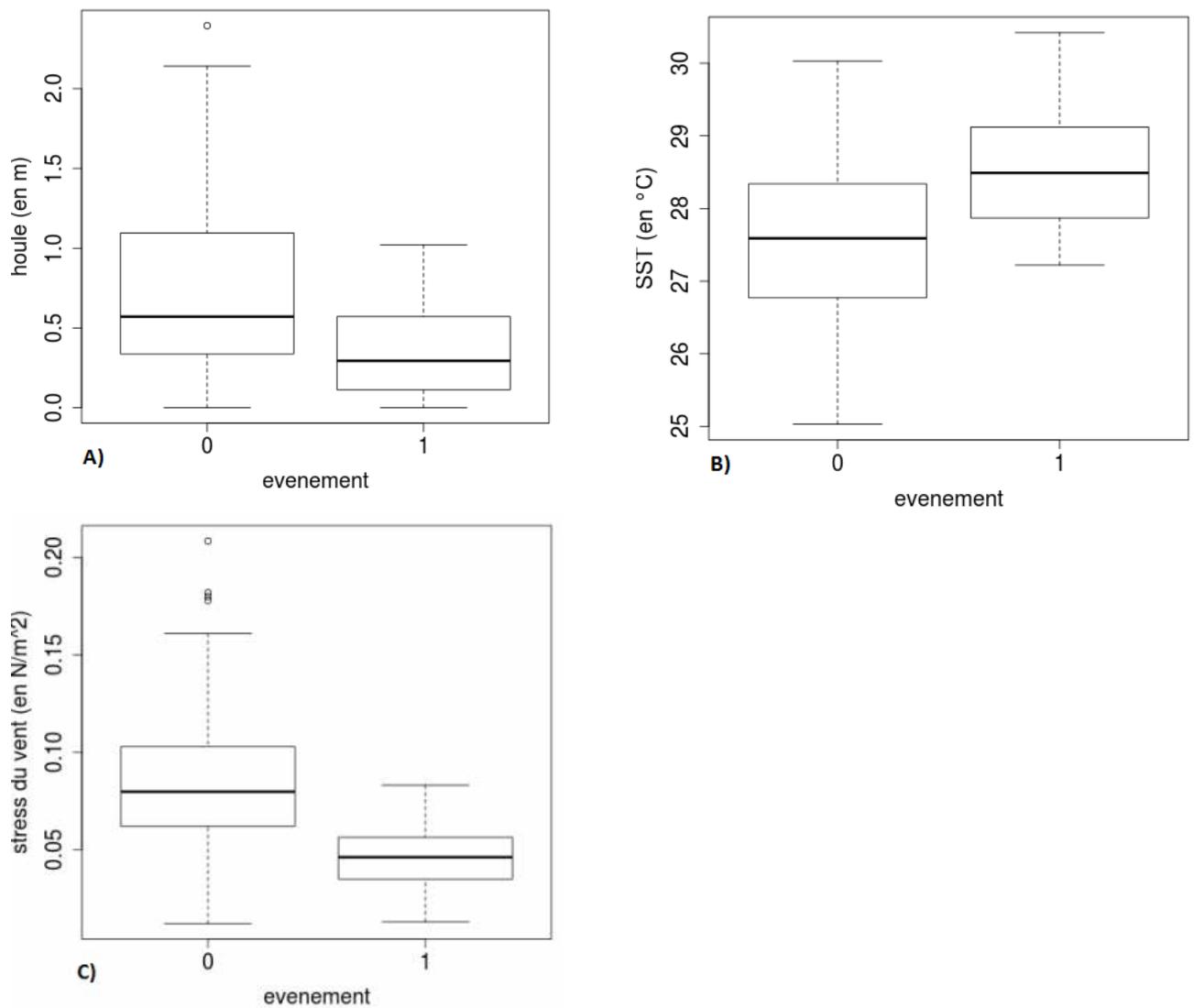


**Figure 15:** Dendrogramme regroupant l'ensemble des événements considérés dans cette étude (la branche événement est encadrée en rouge).

La matrice utilisée est celle décrite plus haut regroupant l'ensemble de nos atolls, avec les identifiants indiqués au Tableau 3. Cette matrice regroupe au total 548 semaines, dont seulement 55 ont une couleur qui représente les quelques semaines avant nos événements, soit environ 10% du nombre total de semaines.

Nous pouvons raisonnablement conclure que les semaines un mois avant les événements rencontrent des conditions de houle, de tension du vent et de SST similaires, à savoir, comme nous l'a indiqué les ACP, des valeurs faibles pour les deux premières variables citées et fortes pour la température de l'océan en surface.

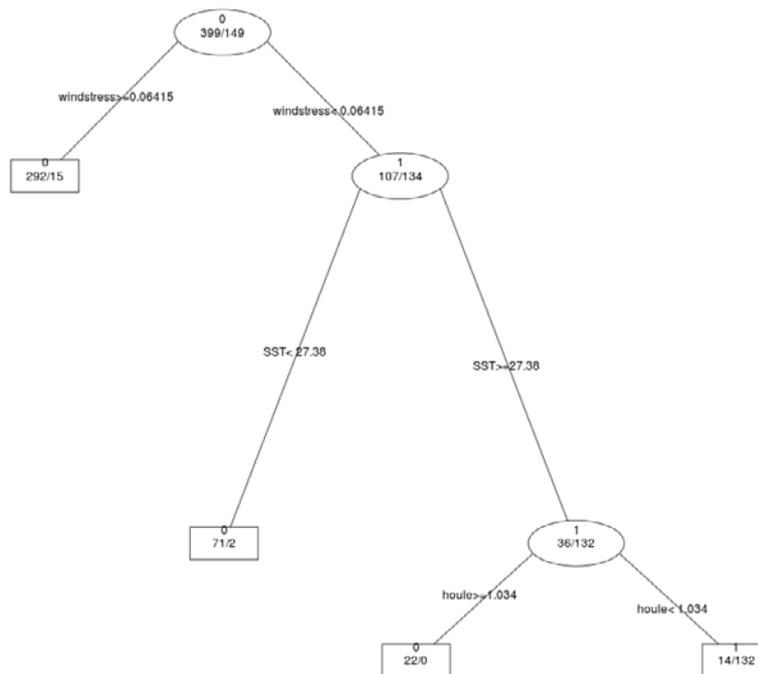
Pour finir, nous avons caractérisé les conditions générales de la branche incluant 39 semaines d'événements (mais 149 semaines au total) pour la comparer à celles de toutes les autres (399 semaines), à partir de boîtes à moustaches (boxplots) représentant la dispersion de nos variables pour chaque cas. Ici la classe événement (encadré rouge dans le cluster) sera noté « 1 » et la classe non-événement « 0 ».



**Figure 16:** Boîtes à moustaches réalisées sur l'ensemble de notre matrice, la classe « 1 » représente la branche événement du cluster (encadré rouge) et la classe « 0 » les autres points. Boîtes à moustaches pour les variables : A) houle ; B) SST ; C) tension du vent. Pour rappel les bornes du rectangle représentent le premier et le troisième quartile tandis que la ligne horizontale le coupant est la médiane. Les segments aux extrémités représentent 1.5 fois l'espace interquartile.

D'après ces trois boîtes nous notons des différences flagrantes entre nos deux classes pour l'ensemble des trois variables. Nous pouvons voir que la position des médianes de la classe « 1 » pour chacune des variables par rapport à la classe « 0 » est cohérente avec nos hypothèses de travail. En effet, la médiane de la classe « 1 » pour la houle et la tension du vent est inférieure à celle de la classe « 0 », tandis que pour la SST la médiane de la classe « 1 » est supérieure à celle de la classe « 0 ». On retrouve le même type de remarques pour les autres points caractéristiques de la boîte à moustaches (premier quartile, troisième quartile, valeurs extrêmes). Nous pouvons également relever que l'écart de position, entre la boxplot de la classe « 1 » et de la classe « 0 » est la plus grande pour la tension du vent. Ceci implique que pour cette variable nous avons une très bonne différenciation entre les valeurs de la classe événement, et tous les autres points.

### 3.3.3 Arbre de décision



**Figure 17:** Arbre de décision regroupant l'ensemble des événements considérés dans cette étude. Les points considérés dans l'encadré rouge du cluster (figure 16) sont notés « 1 », les autres individus sont notés « 0 ». Les bulles correspondent aux nœuds et les rectangles aux extrémités de l'arbre. Le chiffre en haut des bulles et des rectangles correspond à la classe majoritaire en ce point de l'arbre. Les deux nombres séparés par un slash à l'intérieur des bulles et des rectangles correspondent pour le premier aux nombres d'individus appartenant à la classe « 0 », pour le deuxième aux nombres d'individus appartenant à la classe « 1 ».

Cette analyse reprend les deux groupes analysés précédemment, et identifie séquentiellement les seuils des variables qui rendent compte des différences inter-groupes.

La classe « 1 » de départ regroupe 149 points (cadre rouge du cluster), et la classe « 0 » 399 individus (le reste de l'arbre), la somme des deux correspond aux 548 individus de notre matrice. Au vu de la Figure 17, 132 points de la classe « 1 » ont des conditions similaires de houle, de SST, et de tension du vent. En effet, ces 132 points ont tous en commun une tension du vent inférieure à  $0.064 \text{ N/m}^2$ , une SST supérieure à  $27.38^\circ\text{C}$  et une houle inférieure à 1.034 m. Nous noterons également que 17 de nos points sont classés différemment (tension du vent supérieure à  $0.064 \text{ N/m}^2$  ou SST inférieure à  $27.38^\circ\text{C}$ ).

Les seuils obtenus par cette analyse caractérisent quantitativement la houle et la tension du vent faible, ainsi que les fortes SST donnant naissance à des événements de mortalité en milieux d'atolls semi-fermés. Il est important de noter que la valeur maximale pour la houle (environ 1m), et minimale pour la SST (environ  $27.3^\circ\text{C}$ ), correspondant aux extrémités des segments dans les boîtes à moustaches de la classe « 1 », correspondent aux seuils trouvés dans cette analyse. La valeur du troisième quartile de la classe « 1 » pour la tension du vent (environ  $0.06 \text{ N/m}^2$ ) est également proche du seuil obtenu. Pour cette variable, le seuil ( $0.064 \text{ N/m}^2$ ) n'est pas identique à la valeur maximale des segments de la boîte à moustaches (environ  $0.08 \text{ N/m}^2$ ), sûrement en raison de la présence d'encre 107 points de la classe « 0 » à ce nœud de l'arbre de décision.

Nous relèverons que la différenciation est d'abord contrainte par le stress du vent et ensuite par la SST et la houle (ce qui est cohérent avec les remarques faites à propos de la figure 16). Ce qui peut s'expliquer par le fait que nos atolls étant pour la plupart totalement fermés ou presque, la circulation du lagon est régie majoritairement par l'action du vent. Son absence est nécessaire pour induire une stratification du lagon, étape première d'un processus dystrophique. Nous notons également que seulement 14 des 399 points de la classe « 0 » se retrouvent dans cette branche de l'arbre

## 4. Discussion et conclusion

Tout d'abord comme nous l'avons souligné en introduction, nous avons opté pour une approche statistique à partir de données de télédétection et de modélisation en raison du caractère exceptionnel de ces crises et des incertitudes concernant les « faux négatifs ». Les populations n'étant pas formées à la détection, aux mesures et aux prélèvements de terrain, il nous est impossible de savoir si des événements se sont produits, en dehors de ceux connus à l'heure actuelle. Dans la plupart des cas le signe visible d'une crise dystrophique est une efflorescence algale qui se caractérise par une coloration de l'eau. Même si ce type d'indice peut être théoriquement relevé facilement par les populations sur place, il n'en est souvent rien. En effet, les gens commencent uniquement à s'inquiéter lorsqu'ils retrouvent des poissons morts sur la plage (comme ce fut le cas à Hikueru en 1994), étape ultime d'une dystrophie majeure. La plupart des événements détectés l'ont été par des exploitants de nacre relevant une mortalité importante dans leur culture. A partir de cette constatation nous pouvons nous demander si les semaines qui ne sont pas considérées comme des événements, mais que l'on retrouve dans notre branche événements du cluster, ne sont pas des semaines où un événement se serait produit sans qu'on en ait connaissance. Pour ce faire, nous pourrions regarder si elles sont éloignées dans le temps par rapport aux crises connues; mais aussi si l'on retrouve des semaines consécutives dans cette branche, sachant qu'il faut au minimum approximativement trois semaines de conditions stables pour qu'un événement puisse se déclencher.

Notre étude s'est donc portée sur onze événements sûrs, regroupés sur 8 atolls dans l'archipel des îles Cook (Manihiki) et des Tuamotu. A la vue des séries temporelles brutes et après avoir retiré le cycle saisonnier, il est impossible d'expliquer complètement le phénomène car on ne distingue pas à l'œil des conditions semblables et répétées qui caractérisent les événements recensés. En revanche, l'intégration du paramètre géomorphologique sur l'impact de la houle a commencé à nous donner des réponses. En effet, nous avons pu voir qu'il y avait une bonne corrélation entre des épisodes (quelques semaines) de houle dont la direction était opposée à l'ouverture de ces atolls (houle d'Est pour Manihiki et de Nord pour les autres). Même si ces résultats étaient concluants, il paraissait évident qu'ils ne pouvaient expliquer à eux seuls le déclenchement des crises dystrophiques. D'autant plus que la majorité des atolls considérés sont fermés, ce qui implique que l'hydrodynamisme du lagon est régi principalement par l'action du vent. Afin de prendre en compte cette observation, nous avons créé une matrice de données où la variable houle est seuillée en fonction de sa direction. De cette manière nous avons minimisé artificiellement l'impact de la houle lorsque la direction est défavorable au renouvellement du lagon.

La matrice de données utilisée regroupe tous nos événements sur une période de six mois avant et après la crise. A partir de cette dernière nous avons fait trois types d'analyses statistiques multivariées (ACP, clustering, et arbre de décision).

De l'analyse en composantes principales nous avons observé des relations entre nos variables durant la période précédant nos événements (ici un mois) ainsi que sur les caractéristiques des points « pré-événements ». En considérant les événements de manière distincte tout d'abord, nous avons pu remarquer que les cinq semaines précédant le début de nos événements possédaient des paramètres quasi-identiques, condition nécessaire à l'établissement d'un régime stable ne permettant pas l'oxygénation du lagon. De plus, pour la plupart des événements, les valeurs de houle, de SST, et de tension du vent de nos points pré-événements étaient cohérentes avec nos hypothèses de travail. Afin de voir si le regroupement de ces points se confirmait pour l'ensemble de nos atolls, nous avons considéré tous les événements en même temps. Une fois encore ce groupement est bien visible, même si certains points dérogent à la règle. Plusieurs hypothèses sont dès lors possibles pour l'expliquer.

Tout d'abord, même s'il est nécessaire de maintenir des conditions stables pendant quelques semaines afin de créer les conditions favorables au déclenchement d'une crise dystrophiques, il est possible que ces conditions varient pendant deux ou trois jours faussant ainsi les moyennes

hebdomadaires mais ne permettant pas une amélioration de la teneur en oxygène dans le lagon. Deuxièmement, la période nécessaire au déclenchement de ces crises n'est pas connue et a été déduite ici à partir des meilleurs regroupements observés. En aucun cas, nous pouvons dire que la période de cinq semaines choisie ici est une référence absolue, il est fort probable que pour certains atolls deux ou trois semaines de calme et de fortes températures soient suffisantes au développement d'un cas de mortalité de masse des espèces. Ce paramètre est certainement régi en partie par la géomorphologie du lagon (surface, profondeur, ouverture sur l'océan, ...), il est donc difficile de décider d'une période commune à tous les atolls qui soit exacte. C'est pourquoi nous avons choisi cinq semaines, période qui nous paraissent regrouper le plus de semaines pré-événements.

Afin de mettre en évidence les regroupements observés sur les graphes des individus, nous avons décidé de tracer des arbres de classification hiérarchique ascendante. A partir du dendrogramme réalisé avec l'ensemble de notre matrice de données nous observons effectivement un regroupement important de nos points pré-événements à l'intérieur d'une branche bien distincte (encadré rouge figure 15), 70% de nos individus (à savoir 39 semaines sur 55) se retrouvent dans cette partie de l'arbre. Le regroupement observé dans le graphe des individus est donc mis en évidence ici. Il reste néanmoins des points en dehors de cette branche, et en regardant de plus près ces derniers, nous pouvons remarquer que quatre points pré-événement de Fangatau se retrouvent en dehors de cette branche, ainsi que deux pour Takapoto. Or, pour ce dernier nous savons que le phénomène est différent, puisque le lagon a subi un assèchement et de fortes températures pendant cinq mois (Addessi, 1999 et 2001), tandis que pour l'atoll de Fangatau nous avons une incertitude quant au type d'événement qui s'y est produit. En effet, il est possible que les mortalités observées dans le lagon soient dues uniquement à une baisse localisée du niveau de la mer (Andrefouët et al., 2005). En conséquence il serait normal de ne pas retrouver ces points dans notre branche événements. Le clustering nous a permis de mettre en évidence ce regroupement mais ne permet pas de déterminer les conditions communes à l'ensemble de ces points. Pour ce faire il est nécessaire de réaliser ce que l'on appelle un arbre de décision qui détermine les seuils sur nos variables ayant mené à ce regroupement. Avant ce traitement nous avons réalisé des boxplots pour chacune de nos variables en distinguant les points de notre branche événements (noté « 1 ») des autres (noté « 0 »), afin d'avoir un premier aperçu de la dispersion de nos deux classes. Nous notons à partir de ces graphes une répartition comparable à celle attendue d'après nos hypothèses et sous-entendue dans l'interprétation de notre graphe des individus. Nous remarquons que le maximum de dispersion entre nos deux classes est obtenu pour la tension du vent, ce qui sous-entend que cette variable est très discriminante dans la répartition des individus.

Pour confirmer cette hypothèse nous avons tracé un arbre de décision, en maintenant la répartition en deux classes, précédemment effectuée pour les boîtes à moustaches. Cet arbre nous a permis de confirmer définitivement nos hypothèses de départ. Nous retrouvons que plus de 88% des points de notre branche événements ont des seuils communs (une tension du vent inférieure à  $0.064 \text{ N/m}^2$ , et une SST supérieure à  $27.34^\circ\text{C}$  et une houle inférieure à  $1.03\text{m}$ ). Les valeurs de ces seuils (pour la houle et la SST) correspondent respectivement aux valeurs maximales et minimales (approximativement) obtenues à partir des boxplots. Ce qui est cohérent puisque seulement 16 points de la classe « 0 » se retrouvent dans les conditions énoncées ci-dessus, et 34 avec une houle supérieure à  $1.03\text{m}$ . En revanche pour la tension du vent le seuil ( $0.064 \text{ N/m}^2$ ) n'est pas identique à la valeur maximale de la boîte à moustaches (environ  $0.08 \text{ N/m}^2$ ), sûrement en raison de la présence d'encore 107 points de la classe « 0 » à ce nœud de l'arbre de décision.

Nous noterons également que le premier paramètre discriminant dans la répartition des individus est la tension du vent puis la SST et en dernier la houle. Ce résultat vient appuyer le fait que la majorité des atolls sont fermés, et donc que leur circulation et le mélange de la colonne d'eau est régi d'abord par l'action du vent. La SST a aussi un rôle important dans l'apparition de bloom phytoplanctonique, il n'est donc pas anormal de retrouver ce paramètre en deuxième place dans l'ordre de discrimination de nos variables. En revanche, une augmentation de la SST, et de la salinité (due à l'évaporation pendant de longues et fortes périodes d'ensoleillement), diminuent la

solubilité de l'oxygène dans l'eau, ce qui aurait probablement tendance à accroître l'anoxie du milieu.

Finalement, la dernière question en suspens était de comprendre pourquoi certains atolls développent ces crises tandis que des atolls similaires (même géomorphologie) et à proximité ne subissent pas ce type d'événements. L'hypothèse était que la zone d'espace où l'on retrouve les conditions favorables au déclenchement de ces crises était très restreinte. Pour estimer cette échelle nous avons tracé des cartes de corrélation sur notre zone d'étude, en centrant notre référence sur l'atoll considéré par la crise, et sur une période de un mois avant le début de l'événement de mortalité de masse des espèces lagunaires. Les résultats obtenus montrent que la zone de forte corrélation (coefficient de corrélation supérieure à 0.9) pour la variable houle et SST s'étend au maximum sur une zone de 100km de rayon, ce qui est très localisé par rapport à la dispersion des atolls de l'archipel des Tuamotu et des îles Cook. En revanche, et comme on pouvait s'y attendre, le même type de carte pour la tension du vent nous donne des zones de forte corrélation très étendues. En effet, aucune barrière physique ne freine le vent dans cette région, il est donc logique de retrouver les mêmes conditions de vent sur une zone très vaste. Même si la tension du vent apparaît comme le paramètre le plus discriminant dans l'occurrence de ces crises, l'explication la plus probable quant à l'apparition de ces événements dans des zones restreintes est certainement la mise en place de conditions favorables de houle et de SST (houle faible et SST forte) sur une échelle très réduite, combinées à des valeurs de tension du vent faible sur la même période. De plus, les valeurs de SST relevées par les capteurs satellite sur notre zone, sont certainement inférieures à celle présentes à l'intérieur du lagon, ce qui favoriserait d'autant plus nos phénomènes. Ainsi, l'apparition de crises dystrophiques localisées géographiquement nécessite la combinaison de ces trois facteurs.

La préoccupation des populations locales par rapport à ce risque est importante, et il se pose alors la question de la prédiction de ces événements. Suite à notre étude nous avons pu déterminer les paramètres déclenchant des crises connues. En revanche la présence de « faux négatifs » ne nous permet pas de fournir un modèle fiable de prédiction. Il serait donc nécessaire de mettre en place un suivi, à partir de mesures *in-situ*. Nous pourrions imaginer tout un système de capteurs avec des bouées en mer permettant la mesure de la houle aux abords de ces atolls, de la SST dans le lagon, des stations météo sur place captant la vitesse du vent, et l'ensoleillement, ou encore des mesures biochimiques dans le lagon. Dans le cadre de notre projet et à la demande du Grand Observatoire du Pacifique Sud (GOPS) qui finance ce stage, nous avons créé un programme (annexe) permettant de récupérer automatiquement les données satellitaires ainsi que les sorties de modèles numériques sur notre zone d'intérêt, afin de connaître les périodes à risques et ainsi se renseigner sur la présence ou non de tels événements. Une meilleure connaissance sur la présence ou non de ces événements nous permettrait d'éliminer un grand nombre de faux négatifs et ainsi une amélioration de la précision des seuils ainsi que l'élaboration d'un modèle de prédiction.

## Bibliographie

- Fisher, R. A., Yates, F., Ed. 1963. Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research. Oliver & Boyd, Edinburgh and London 1963. X, 146 pp.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J., 1984. Classification and regression trees Wadworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software.
- Harris, P., Fichez, R., 1995. Observations et mécanismes de la crise dystrophique de 1994 dans le lagon de l'atoll d'Hikueru (Archipel des Tuamotu, Polynésie Française), *Notes et Documents Océanographique ORSTOM Tahiti*, 25p.
- Lutz, H., Smith, S.D., 1997. Local Sea Surface Wind, Wind Stress, and Sensible and Latent Heat Fluxes. *Journal of Climate*, **10**, 2711–2724.
- Struyf, A., Hubert, M., Rousseeuw, P., 1997. Clustering in an Object-Oriented Environment. *Journal of Statistical Software*, **1**, 4.
- Adessi, L., 1999. Les principaux bivalves de l'atoll de Takapoto (Polynésie française) sont-ils des compétiteurs trophiques de l'huître perlière? Approche écophysiological. Université de la Polynésie française, Papeete, Tahiti, pp. 205.
- Adessi, L., 2001. Giant clam bleaching in the lagoon of Takapoto atoll (French Polynesia). *Coral Reefs*, **19**, 220.
- Adjeroud, M., Andréfouët, S., Payri, C., 2001. Mass mortality of macrobenthic communities in the lagoon of Hikueru atoll (French Polynesia). *Coral Reefs*, **19**, 287-291.
- Andréfouët, S., Pages, J., Tartinville, B., 2001. Water renewal time for classification of atoll lagoons in the Tuamotu Archipelago (French Polynesia). *Coral Reefs*, **20**, 399-408.
- Andréfouët, S., Claereboudt, M., Matsakis, P., Pagès, J., Dufour, P., 2001. Typology of atolls rims in Tuamotu Archipelago (French Polynesia) at landscape scale using SPOT HRV images. *International Journal of Remote Sensing*, **22**, 6, 987-1004.
- Andréfouët, S., Gilbert, A., Yan, L., Remoissenet, G., Payri, C., Chancerelle, Y., 2005. The remarkable population size of the endangered clam *Tridacna maxima* assessed in Fangatau atoll (Eastern Tuamotu, French Polynesia) using in situ and remote sensing data. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, **62** (6), 1037-1048.
- Andréfouët, S., Chauvin, C., 2005. Atlas des récifs coralliens de la Polynésie française.
- Callaghan, D.P., Nielsen, P., Gourlay, M.R., Ballock, T.E., 2006. Atoll lagoon flushing forced by waves. *Coastal Engineering*, **53**, 691-704.
- Tolman, H. L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. *MMAB Technical Note*, **276**, 194 pp.
- Andréfouët, S., Ardhuin, F., Queffelec, P., Le Gendre, R., 2012. Island shadow effects and the wave climate of the Western Tuamotu Archipelago (French Polynesia) inferred from altimetry and numerical model data. *Marine Pollution Bulletin*, **65**, 415-424.

Dumas, F., Le Gendre, R., Thomas, Y., Andrefouët, S., 2012. Tidal flushing and wind driven circulation of Ahe atoll lagoon (Tuamotu Archipelago, French Polynesia) from in situ observations and numerical modelling. *Marine Pollution Bulletin*, **65**, 425-440.

## Annexe

```
#####
##### script de récupération des données de SST #####
#####
```

```
### variable d'entrée
```

```
y0=$1 ## année de début
y1=$2 ## année de fin
m0=$3 ## mois de début
m1=$4 ## mois de fin
d0=$5 ## jour de début
d1=$6 ## jour de fin
```

```
lon=$7 ## longitude
lat=$8 ## latitude
```

```
### conversion des mois
```

```
xm[1]=jan
xm[2]=feb
xm[3]=mar
xm[4]=apr
xm[5]=may
xm[6]=jun
xm[7]=jul
xm[8]=aug
xm[9]=sep
xm[10]=oct
xm[11]=nov
xm[12]=dec
```

```
### création de la variable date pour la visualisation
```

```
date=$(eval echo "$d0-${xm[$m0]}-$y0:$d1-${xm[$m1]}-$y1")
```

```
### boucle pour le téléchargement
```

```
for years in $(eval echo {$y0..$y1})
do
```

```
    echo $years
    for months in $(eval echo {$m0..$m1})
    do
        for days in $(eval echo {$d0..$d1})
        do
```

```
            wget -c ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/OI-daily-v2/NetCDF/\${years}/AVHRR/avhrr-only-v2.\${years}\${months}\${days}.nc.gz ## téléchargement
            done
```

```
        done
    done
```

#### opération sur les fichiers téléchargés

```
rm AVHRR.nc ## suppression du précédent fichier
gunzip -f *.gz ## décompression des fichiers
cdo cat avhrr-only-v2.*.nc AVHRR.nc ## concaténation des fichiers
gzip -f avhrr-only-v2*.gz ## compression des fichiers
```

#### lancement du script de visualisation

```
ferret -script visualisation_AVHRR_GOPS.jnl $lon $lat $date
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!! script Ferret de visualisation des données de SST !!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
use AVHRR.nc !! utilisation du fichier AVHRR.nc
go coast.jnl !! lancement du script pour le trait de côte
```

!!! carte 2D de la zone moyenné sur la période !!!

```
shade/t=$3 sst[d=1,l=@ave]
PLOT/VS/LINE/OVER/COLOR=BLack/NOLABEL 360+lon[d=2],lat[d=2] !!tracé du trait de côte
frame/file=shade_avhrr_$3.gif !! enregistrement
```

!!! tracé de la série temporelle aux coordonnées précédemment choisies !!!

```
plot/x=$1/y=$2 sst[d=1]
frame/file=plot_avhrr_$1_$2.gif !! enregistrement
```

## Résumé

Notre étude s'est portée sur la caractérisation des conditions atmosphériques et océaniques responsables de l'apparition de crises dystrophiques dans les lagons d'atolls. Notre zone d'étude comprend l'archipel des îles Cook et des Tuamotu (135°W-165°W et 5°S-25°S).

Une base de données a été créée comprenant trois variables environnementales (la houle, la température de surface de la mer et le stress du vent), sur une période comprise entre 1994 et 2012. Nous avons également réalisé un inventaire des événements connus et relevés sur cette période. Nous avons considéré 11 crises regroupées sur 8 atolls.

Les analyses statistiques nous ont permis de mettre en évidence des conditions similaires de houle, stress du vent, et SST durant le mois précédant l'apparition de ces crises. Nous avons pu ainsi déterminer des seuils pour l'ensemble de nos variables, au-delà desquels nous retrouvons la majorité des événements considérés. Il a été également montré que le paramètre le plus discriminant dans l'apparition de ces événements, est un stress du vent faible. De nombreuses incertitudes demeurent, principalement sur la connaissance exacte de l'ensemble de ces crises.

## Abstract

Our study focused on the characterization of the atmospheric and oceanic conditions that trigger dystrophic crises in atoll lagoons. Our study area includes the Cook Islands and Tuamotu Archipelago (135°W-165°W and 5°S-25°S).

A database of three environmental variables (swell, sea surface temperature and wind stress) has been created, over the 1994 to 2012 period. We also conducted an inventory of the known and identified events during this period. We considered 11 crisis that have occurred on eight different atolls.

Statistical analysis allowed us to identify similar conditions of wind stress, swell, and SST during the month preceding the onset of these crises. We were able to determine thresholds for all our variables that seems to characterize environmental conditions before the events. The most discriminating parameter in the occurrence of these events is a low wind stress. Many uncertainties remain, due to lack of accurate knowledge of the past occurrences of all crises.