

ZoNéCo

PROGRAMME D'EVALUATION DES RESSOURCES MARINES
DE LA ZONE ECONOMIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

Définition d'indicateurs de suivi de l'état de santé des zones récifo-lagonaires de Nouvelle-Calédonie face au changement climatique.

- Rapport final d'opération ZONECO –

Sandrine Job, Sabrina Virly

– SOPRONER & Sabrina Virly Consultant –

Janvier 2009

Diffusion :

1 Original	ZONECO
1 Copie conforme	ZONECO
1 Original	ARCHIVE SOPRONER

N° DOSSIER	DATE	CHARGE D'AFFAIRES	CONTROLEURS
A001.07044.0001	Janvier 2009	JOB Sandrine	VIRLY Sabrina GUIGUIN Nicolas

Ce rapport comprend 193 pages de texte dont 20 pages d'annexe

**DEFINITION D'INDICATEURS DE SUIVI DE
L'ETAT DE SANTE DES ZONES RECIFO-
LAGONAIRES DE NOUVELLE-CALEDONIE
FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Rapport final

Le système qualité de SOPRONER est certifié ISO 9001-2000 par



BUREAU D'ETUDES - INGENIEURS CONSEILS
Eau – Environnement - Bâtiment
1, rue de La République
Immeuble "OREGON"
B.P. 3583 - 98846 NOUMEA Cedex
Tél 28.34.80 - Fax 28.83.44
E-mail : soproner@soproner.nc

*Sabrina Virly
Consultant*

Janvier 2009

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	6
1.1	CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	6
1.2	PRESENTATION DU RAPPORT	6
2	METHODOLOGIE	8
2.1	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	8
2.2	CONTACTS DE SPECIALISTES DE LA THEMATIQUE	8
2.3	ADMINISTRATION D'UN QUESTIONNAIRE.....	12
2.4	RESTITUTION A ZONECO DE LA SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	12
2.5	FICHES SYNTHETIQUES DES INDICATEURS APPLICABLES EN NOUVELLE-CALEDONIE	13
3	DEFINITION D'UN INDICATEUR	14
3.1	QU'EST-CE QU'UN INDICATEUR ?	14
3.1.1	<i>De l'indicateur à la notion de bio-indicateur</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Echelle de l'indicateur</i>	<i>15</i>
3.1.3	<i>Structure de l'indicateur</i>	<i>15</i>
3.1.4	<i>Indicateurs de pression et indicateurs de réponse.....</i>	<i>16</i>
3.1.5	<i>Caractéristiques des indicateurs.....</i>	<i>16</i>
3.2	UN INDICATEUR, POUR QUOI FAIRE ?	17
3.2.1	<i>Les besoins des gestionnaires en matière d'indicateurs.....</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Processus de sélection d'indicateurs</i>	<i>17</i>
4	LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	18
4.1	LES CAUSES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	18
4.2	LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES OBSERVES AU NIVEAU GLOBAL	22
4.2.1	<i>Les variations atmosphériques et climatologiques</i>	<i>22</i>
4.2.2	<i>Les variations océaniques.....</i>	<i>26</i>
4.2.3	<i>Les variations dans la cryosphère</i>	<i>38</i>
4.3	LE CHANGEMENT CLIMATIQUE OBSERVE DANS LE PACIFIQUE ET EN NOUVELLE-CALEDONIE.....	38
4.3.1	<i>Le changement climatique dans la région Pacifique.....</i>	<i>38</i>
4.3.2	<i>Le changement climatique en Nouvelle-Calédonie.....</i>	<i>40</i>
4.4	LES INDICATEURS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE DE L'ONERC APPLIQUES AU MILIEU MARIN.....	46
4.4.1	<i>Températures de surface de la mer dans les DOM-TOM.....</i>	<i>47</i>
4.4.2	<i>Température de la surface de la mer par télédétection haute résolution spatiale</i>	<i>48</i>
4.4.3	<i>Salinité de surface de la mer.....</i>	<i>49</i>
4.4.4	<i>Niveau de la mer marégraphique.....</i>	<i>50</i>
4.4.5	<i>Couleur de l'océan - Concentration en chlorophylle-a</i>	<i>51</i>
4.5	QUELQUES PREVISIONS POUR LES PETITS ETATS INSULAIRES.....	52
4.6	RECAPITULATIF SUR LES PARAMETRES CARACTERISANT LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	53

5	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ECOSYSTEMES RECIFO-LAGONAIRES	55
5.1	PREAMBULE	55
5.2	GENERALITES	55
5.2.1	<i>Réactions à différentes échelles</i>	<i>55</i>
5.2.2	<i>Effets directs et effets indirects</i>	<i>55</i>
5.2.3	<i>Variabilité des réactions aux stress</i>	<i>56</i>
5.3	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RECIFS CORALLIENS.....	57
5.3.1	<i>Préambule</i>	<i>57</i>
5.3.2	<i>Les effets de l'augmentation de la température de l'eau</i>	<i>57</i>
5.3.3	<i>Les effets de l'acidification des océans.....</i>	<i>61</i>
5.3.4	<i>Les effets de la variation des précipitations</i>	<i>63</i>
5.3.5	<i>Les effets de la variation du niveau de la mer</i>	<i>63</i>
5.3.6	<i>Les effets de la variation dans les événements climatiques extrêmes : cyclones et tempêtes.....</i>	<i>64</i>
5.3.7	<i>Synthèse.....</i>	<i>65</i>
5.4	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES HERBIERS.....	67
5.4.1	<i>Préambule</i>	<i>67</i>
5.4.2	<i>Les effets de l'augmentation de la température de l'eau</i>	<i>67</i>
5.4.3	<i>Les effets de l'acidification des océans.....</i>	<i>69</i>
5.4.4	<i>Les effets de la variation des précipitations</i>	<i>70</i>
5.4.5	<i>Les effets de l'augmentation du niveau de la mer et des inondations côtières.....</i>	<i>70</i>
5.4.6	<i>Les effets de la variation dans les événements climatiques extrêmes : cyclones et tempêtes.....</i>	<i>72</i>
5.4.7	<i>Synthèse.....</i>	<i>74</i>
5.5	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES MANGROVES.....	76
5.5.1	<i>Préambule</i>	<i>76</i>
5.5.2	<i>Les effets de l'augmentation de la température de l'eau</i>	<i>76</i>
5.5.3	<i>Les effets de l'augmentation du niveau de la mer.....</i>	<i>77</i>
5.5.4	<i>Les effets de la variation des précipitations</i>	<i>80</i>
5.5.5	<i>Les effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique.....</i>	<i>83</i>
5.5.6	<i>Les effets de la variation dans les événements climatiques extrêmes : cyclones et tempêtes.....</i>	<i>83</i>
5.5.7	<i>Synthèse.....</i>	<i>85</i>
5.6	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE PLANCTON.....	86
5.6.1	<i>Généralités</i>	<i>86</i>
5.6.2	<i>Les effets de l'augmentation de la température de l'eau</i>	<i>87</i>
5.6.3	<i>Les effets de l'augmentation des rayons ultraviolets.....</i>	<i>90</i>
5.6.4	<i>Les effets de l'augmentation de la variation des précipitations et des cyclones</i>	<i>91</i>
5.6.5	<i>Les effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique.....</i>	<i>91</i>
5.6.6	<i>Synthèse.....</i>	<i>92</i>
5.7	SYNTHESE DES INDICATEURS DE REPONSE DES ECOSYSTEMES RECIFO-LAGONAIRES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	93

6	LES INDICATEURS DE REACTION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ECOSYSTEMES RECIFO-LAGONAIRES.....	96
6.1	PREAMBULE	96
6.2	LES INDICATEURS DE REACTION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RECIFS CORALLIENS	97
6.2.1	<i>Les maladies coralliennes en rapport avec l'élévation de la température de l'eau.....</i>	97
6.2.2	<i>Le blanchissement corallien en rapport avec l'élévation de la température de l'eau et la dessalure</i>	99
6.2.3	<i>Le taux de micro-bioérosion en rapport avec l'acidification des océans.....</i>	103
6.3	LES INDICATEURS DE REACTION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES HERBIERS	105
6.3.1	<i>L'extension géographique des herbiers en rapport avec l'élévation de la température de l'eau</i>	105
6.4	LES INDICATEURS DE REACTION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES MANGROVES	106
6.4.1	<i>La position géographique des mangroves en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau</i>	106
6.4.2	<i>Le « Wetland Cover Index » en rapport avec la variation des précipitations</i>	107
6.4.3	<i>La position des marges terrestres (trait de côte) et maritimes en rapport avec l'augmentation du niveau de la mer</i>	108
6.5	LES INDICATEURS DE REACTION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA COLONNE D'EAU	109
6.5.1	<i>La concentration de chlorophylle lagonaire en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau</i>	110
6.5.2	<i>Le ratio pico/microplancton en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau, de la variation des précipitations et de l'activité cyclonique</i>	110
7	LES METHODES DE SUIVI DES INDICATEURS	111
7.1	GENERALITES	111
7.1.1	<i>Choix des stations de suivi</i>	111
7.1.2	<i>Choix de la localisation et du nombre de réplicas.....</i>	112
7.1.3	<i>Choix de la méthode de suivi</i>	113
7.1.4	<i>Echantillonnage aléatoire ou fixé.....</i>	113
7.1.5	<i>Etude pilote</i>	115
7.1.6	<i>Fréquence des suivis</i>	115
7.2	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « MALADIES CORALLIENNES »	115
7.2.1	<i>L'évaluation rapide.....</i>	115
7.2.2	<i>Le suivi détaillé</i>	116
7.3	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « BLANCHISSEMENT CORALLIEN »	119
7.3.1	<i>Différentes méthodes de suivi</i>	119
7.3.2	<i>Coûts impliqués dans les différents suivis</i>	121
7.4	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « TAUX DE MICRO-BIOEROSION »	122
7.4.1	<i>Choix des stations de suivi</i>	122
7.4.2	<i>Fréquence des suivis</i>	123
7.4.3	<i>Méthodologie de suivi</i>	123

7.4.4	<i>Limites</i>	123
7.4.5	<i>Perspectives</i>	124
7.5	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « REPARTITION GEOGRAPHIQUE D'UNE ESPECE »	124
7.6	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « WETLAND COVER INDEX »	125
7.6.1	<i>Méthodologie de suivi</i>	125
7.6.2	<i>Limites</i>	126
7.6.3	<i>Validation de l'indicateur</i>	127
7.6.4	<i>Perspectives</i>	127
7.7	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « POSITION DES MARGES TERRESTRES (TRAIT DE COTE) ET MARITIMES »	127
7.7.1	<i>Méthodologie de suivi</i>	127
7.7.2	<i>Exemples de programmes de suivi des mangroves développés dans le Pacifique</i>	130
7.8	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « CONCENTRATION EN CHLOROPHYLLE LAGONAIRE »	132
7.8.1	<i>Méthodologie de suivi</i>	133
7.8.2	<i>Limites</i>	134
7.8.3	<i>Perspectives</i>	134
7.9	LE SUIVI DE L'INDICATEUR : « RATIO PICO/MICROPLANKTON LAGONAIRE »	134
8	LES FICHES TECHNIQUES DES INDICATEURS	136
8.1	LES INDICATEURS DE PRESSION	136
8.2	LES INDICATEURS DE REACTION	146
9	LES PROGRAMMES DE SUIVI EXISTANTS EN NOUVELLE-CALEDONIE	163
10	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	166
11	ANNEXES	174

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Depuis quelques décennies, on constate une dégradation accélérée des zones récifales de part le monde liée aux phénomènes d'anthropisation du littoral, aux changements climatiques (réchauffement de la planète, montée des eaux, cyclones plus fréquents et plus sévères, etc.), ou à la surexploitation des ressources.

Les récifs de la Nouvelle-Calédonie, bien que globalement comptant parmi les plus sains de la planète à l'heure actuelle, ne seront probablement pas épargnés si le rythme des dégradations s'accélère. Afin de pouvoir réagir promptement à des perturbations, il est nécessaire de posséder des outils qui permettent d'évaluer précocement des changements dans l'écosystème : c'est le rôle des indicateurs.

L'objectif de la présente étude est d'identifier les indicateurs et les méthodologies associées permettant de suivre l'évolution de l'état de santé des différents habitats récifo-lagonaires face aux changements climatiques (réchauffement des eaux, montée du niveau de la mer, acidification des océans, etc.).

A l'heure actuelle, un certain nombre de références sont disponibles sur cette thématique, tant au niveau local qu'international. A titre d'exemple on peut citer les comptes rendus du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques), de multiples études réalisées par l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), le suivi de l'état de santé de la Grande Barrière de Corail Australienne face au réchauffement planétaire (AIMS et GBRMPA). Ces études (et d'autres), visant à déterminer des indices d'évolution des milieux naturels en rapport avec les changements climatiques, ont servi de référence au travail proposé.

La finalité de cette étude est de pouvoir mettre en place une démarche de suivi à long terme de l'état de santé des zones récifo-lagonaires de Nouvelle-Calédonie face au changement climatique, sur la base des indicateurs et des protocoles associés qui auront été sélectionnés consensuellement par les gestionnaires et les scientifiques.

1.2 Présentation du rapport

Le présent rapport s'articule comme suit :

- Introduction : contexte et objectifs de l'étude ; présentation du rapport ;
- Présentation de la démarche méthodologique mise en œuvre dans le cadre de l'étude ;
- Définition de la notion d'indicateur, de ses caractéristiques, de son rôle dans le cas présent et de son applicabilité ;
- Etat des connaissances sur le changement climatique global dans le monde, et particulièrement en Nouvelle-Calédonie ;

-
- Etat des connaissances relatif aux effets du changement climatique global sur les écosystèmes récifo-lagonaires dans le monde ; synthèse des indicateurs de réaction des effets du changement climatique sur les récifs, herbiers, mangroves et colonne d'eau ;
 - Description des indicateurs de réaction des effets du changement climatique sur les 4 composantes de l'écosystème récifo-lagonaire, sur la base d'une liste restreinte d'indicateurs choisis par les gestionnaires et la cellule ZoNeCo ;
 - Description des méthodes de suivi de ces indicateurs ;
 - Fiches techniques synthétisant les données du rapport. Une fiche technique par indicateur est fournie ;
 - Références bibliographiques ;
 - Annexes.

2 METHODOLOGIE

2.1 Synthèse bibliographique

La compilation bibliographique relative au sujet a représenté une étape clé dans la réalisation de cette étude. Elle a permis de collecter plus d'une centaine de références issues de base de données bibliographiques ou obtenues directement auprès des auteurs ou autres scientifiques (cf liste bibliographique).

Il s'agit pour l'essentiel de publications ou rapports scientifiques concernant :

- La notion d'indicateur ;
- Le changement climatique global ;
- Le fonctionnement des écosystèmes récifo-lagonaires et leurs réactions face au changement climatique ;
- Les méthodologies et protocoles développés dans le cadre de suivis des écosystèmes récifo-lagonaires, les instrumentations déjà mis en œuvre dans le monde ;
- Des cas d'études précis principalement en Australie et plus largement dans la zone Indo-Pacifique.

2.2 Contacts de spécialistes de la thématique

La synthèse bibliographique a été complétée par les avis, commentaires, et précisions de quelques experts contactés au cours de cette étude.

Une cinquantaine de scientifiques et experts nationaux et internationaux ont été contactés (Tableau 1) afin d'accéder à une bibliographie la plus récente et précise possible sur le sujet ainsi que pour soumettre un questionnaire (fourni en Annexe) qui a été rempli ou a servi de base à la discussion.

Tableau 1 : Liste des experts contactés dans le cadre de la présente étude

Nom	Prénom	Organisation	Thématique	Contact
Adjeroud	Mehdi	EPHE, UMR 8046 CNRS, Université de Perpignan, 66860 Perpignan Cedex, France	Ecologie récifale Blanchissement corallien	adjeroud@univ-perp.fr
Allenbach	Michel	UNC Nouméa - Laboratoire de Géologie	Indicateur et trait de côte	allenbach@univ-nc.nc
Alongi	Daniel	Australian Institute of Marine Science, PMB No. 3, Townsville MC, Queensland 4810, Australia	Mangrove et changement climatique	d.alongi@aims.gov.au
Beliaeff	Benoit	IFREMER Nouméa	Indicateurs	benoit.beliaeff@ifremer.fr
Berkelmans	Ray	Australian Institute of Marine Science	Blanchissement corallien	r.berkelmans@aims.gov.au
Buddemeier	Robert W.	Retraité de l'Université du Kansas	Blanchissement corallien	buddrw@ku.edu
Cabioch	Guy	IRD Nouméa	Paléoclimatologie	cabioch@noumea.ird.nc
Cazenave	Anny	CNES Toulouse	Niveau de la mer	anny.cazenave@cnes.fr
Creach	Ronan	SHOM Brest	Niveau de la mer - marées	ronan.creach@shom.fr
Delcroix	Thierry	CNES Toulouse	Changements océanographiques	Thierry.delcroix@legos.obs-mip.fr
Duke	Norman	Centre for Marine Studies/School of Integrative Biology, University of Queensland, St Lucia QLD 4072	Mangrove et Changement climatique	n.duke@uq.edu.au
Dupouy - Douchement	Cécile	IRD Nouméa	Colonne d'eau	dupouy@noumea.ird.nc
Eastwood	Paul	SOPAC - Secretariat of the Pacific Islands Applied Geoscience Commission, Private Mail Bag, GPO, Suva, Fiji Islands	Programme PI-GOOS	paul.eastwood@sopac.org
Ellison	Joanna	School of Applied Science, University of Tasmania, P. O. Box 1214, Launceston, Tasmania, 7250, Australia	Mangrove et Changement climatique	Joanna.Ellison@utas.edu.au

Fabricius	Katherine	Australian Institute of Marine Science, PMB No. 3, Townsville MC, Queensland 4810, Australia	Ecologie récifale	k.fabricius@aims.gov.au
Gilman	Eric	2718 Napuaa Place, Honolulu, Hawaii 96822, USA	Mangrove et Changement climatique	egilman@utas.edu.au
Goiran	Claire	IRD Nouméa	Biodiversité coraux	goiran@noumea.ird.nc
Gourdeau	Lionel	IRD Nouméa	Changements océanographiques	gourdeau@noumea.ird.nc
Hallock Muller	Pamela	College of Marine Science - University of South Florida	Foram index	pmuller@marine.usf.edu
Hardman-Mountford	Nick	UK	Indicateurs	nhmo@pml.ac.uk
Hendee	Jim	NOAA, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratories	Blanchissement corallien	Jim.Hendee@noaa.gov
Hughes	Terry	James Cook University	Coraux et changement climatique	terry.hughes@jcu.edu.au
Lal	Andrick	SOPAC - Secretariat of the Pacific Islands Applied Geoscience Commission, Private Mail Bag, GPO, Suva, Fiji Islands	Programme SPSLMP	andrick@sopac.org
Leborgne	Robert	IRD Nouméa	Colonne d'eau	leborgne@noumea.ird.nc
Lovelock	Catherine	Centre for Marine Studies/School of Integrative Biology, University of Queensland, St Lucia QLD 4072	Mangrove et Changement climatique	c.lovelock@uq.edu.au
MacClanahan	Timothy	Wildlife Conservation Society, Marine Programs, Bronx, New York, 10460 USA	Blanchissement et SST	tmccclanahan@wcs.org
McKinnon	David	Australian Institute of Marine Science, PMB No. 3, Townsville MC, Queensland 4810, Australia	Colonne d'eau	d.mckinnon@aims.gov.au
Maitrepierre	Luc	Météo France Nouvelle-Calédonie	Paramètres météorologiques	luc.maitrepierre@meteo.fr
Maes	Christophe	IRD Nouméa	Changements océanographiques	maes@noumea.ird.nc
Manzello	Derek	NOAA, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratories	Blanchissement corallien	Derek.Manzello@noaa.gov

Marchesiello	Patrick	IRD Nouméa	Changements océanographiques	marchesiello@noumea.ird.nc
Maynard	Jeff	Reef Temp - Australie	Blanchissement corallien	j.maynard@gbrmpa.gov.au
Ouillon	Sylvain	IRD Nouméa	Changements dans lagon	ouillon@noumea.ird.nc
Page	Cathie	James Cook University – Townsville, Australie	Maladies coralliennes	cathie.page@jcu.edu.au
Payri	Claude	IRD Nouméa	Algues et herbiers	payri@noumea.ird.nc
Petit	Michel	IRD France	Télédétection	michel.petit@ird.fr
Precht	William	NOAA	Coraux et changement climatique	PrechtW@Battelle.org
Raymundo	Laurie	University of Guam Marine Lab	Maladies coralliennes	lraymundo@gmail.com
Rice	Jake	Pêches et Océans Canada	Récif	Jake.Rice@dfo-mpo.gc.ca
Richardson	Anthony	CSIRO Australie	Colonne d'eau	Anthony.Richardson@csiro.au
Royer	Jean-François	CNRM/GMGEC/UDC, Equipe dynamique du climat	Climat	jean-francois.royer@meteo.fr
Short	Frederick	Seagrassnet, University of New Hampshire, Jackson Estuarine Laboratory, 85 Adams Point Road, Durham, NH 03824? USA	Herbier	fred.short@unh.edu
Solofa	Dean	PROE, Apia, Samoa	Changement climatique	deanS@sprep.org
Tribollet	Aline	IRD Nouméa	Colonne d'eau	aline@hawaii.edu
Whitehead	Rohan	Australian Bureau of Meteorology	Changement climatique	R.Whitehead@bom.gov.au
Yamano	Hiroya	Social and Environmental Systems Division, National Institute for Environmental Studies, Japan	Blanchissement et télédétection	hyamano@nies.go.jp

2.3 Administration d'un questionnaire

Un questionnaire a été préparé pour tenter d'obtenir des réponses standardisées sur cette thématique qui couvrent de si nombreux aspects. Il a également servi de base de discussion auprès des chercheurs contactés localement.

Le questionnaire soumis aux scientifiques a été administré de vive voix à ceux basés en Nouvelle-Calédonie et par internet à ceux travaillant hors du Territoire.

Le questionnaire a abordé, par des questions volontairement ouvertes, l'ensemble des thèmes (climat, changement climatique, écosystèmes récifo-lagonaires, réactions, indicateurs) et des écosystèmes (mangroves, colonne d'eau et vie pélagique, herbiers, récifs). Le questionnaire est fourni en annexe (Annexes 1 et 2).

Peu de retours de questionnaires remplis ont été constatés. En revanche, plus de 60% des personnes contactées par mail ont pris la peine d'apporter des informations sur la thématique et de fournir le cas échéant, des publications.

La majorité des scientifiques travaillant localement a consacré en moyenne une heure à nos requêtes et nous a fourni également des publications et des contacts complémentaires.

2.4 Restitution à ZoNéCo de la synthèse bibliographique

Le rapport intermédiaire rendu en mai 2008 a permis de présenter :

- D'une part, la compilation bibliographique faite sur le changement climatique et les réactions des écosystèmes récifo-lagonaires en vue d'un suivi de l'état de santé de ces écosystèmes ;
- D'autre part, une liste d'indicateurs, déjà validés ou non, en fonction des écosystèmes considérés.

Ces premiers résultats ont fait l'objet d'une présentation orale à ZoNéCo afin de mettre en place un dialogue avec les gestionnaires sur le choix et la pertinence des indicateurs pour mesurer et suivre l'état de santé des écosystèmes récifo-lagonaires.

Parallèlement, les prestataires ont attendu de cette réunion :

- une réaction des gestionnaires sur l'état de l'art en matière ;
- une sélection des indicateurs listés, sur la base d'une discussion sur :
 - o leur pertinence ;
 - o leur applicabilité en Nouvelle-Calédonie ;
 - o l'absence ou la disponibilité des mesures de ces paramètres en Nouvelle-Calédonie ;
 - o les besoins et les priorités des gestionnaires en termes de suivi.

Le compte-rendu de la réunion intermédiaire est présenté en Annexe 3.

Cette étape a permis d'aboutir à une sélection plus fine d'indicateurs qui ont fait l'objet d'une description détaillée dans le rapport final. Cette description est accompagnée des protocoles et instrumentations à mettre en œuvre pour mesurer dans le temps les indicateurs.

2.5 Fiches synthétiques des indicateurs applicables en Nouvelle-Calédonie

Dans le rapport final, chaque indicateur a été décrit et présenté sous forme de fiche synthétique pour une meilleure lisibilité des caractéristiques et protocoles associés.

Il est précisé :

- Le type de l'indicateur (pression ou réaction)
- Sa description sommaire
- La couverture de l'indicateur et les sources des données disponibles
- Les limites de l'indicateur et les perspectives

Les protocoles associés engloberont, outre la méthodologie :

- La fréquence de mesure ;
- Le niveau de technicité requis pour mesurer l'indicateur ;
- Le type de personnes pouvant réaliser les mesures (communautés, gestionnaires, bureaux d'études, scientifiques) ;
- Un niveau de coût.

3 DEFINITION D'UN INDICATEUR

3.1 Qu'est-ce qu'un indicateur ?

3.1.1 De l'indicateur à la notion de bio-indicateur

Le terme « indicateur » est largement utilisé en écologie et dans les processus d'aide à la décision. Sa définition varie selon la perspective adoptée.

D'une manière générale, un indicateur est un outil d'évaluation et d'aide à la décision (pilotage, ajustements et rétro-correction) grâce auquel on va pouvoir mesurer une situation ou une tendance à un instant donné, ou une évolution dans le temps et/ou l'espace. Un indicateur se veut être une sorte de *résumé* d'une information complexe offrant la possibilité à des acteurs différents (scientifiques, gestionnaires, politiques et citoyens) de dialoguer entre eux. Un indicateur ne peut jouer pleinement son rôle que s'il est associé à une grille de lecture, c'est-à-dire qu'il existe des points de référence ou des seuils connus auxquels on peut se référer (Beliaeff, comm. pers.).

Fichez *et al.* (2005) ont travaillé sur les impacts anthropiques sur les lagons de Nouvelle-Calédonie. Ils ont pour cela réalisé une synthèse bibliographique présentant les caractéristiques environnementales et biologiques pouvant être utilisées comme indicateurs des effets de trois grandes catégories d'apports exogènes dans les milieux récifo-lagonaires : particules, éléments nutritifs et métaux. Comme définition générale, ils ont retenu, dans ce cas précis, qu'un indicateur est un signe ou un signal qui transmet un message complexe, provenant potentiellement de plusieurs sources, d'une façon simplifiée et utile, et dont le rôle principal est de :

- caractériser l'état actuel d'un système
- mettre en évidence ou prédire un changement notable (Jameson *et al.*, 1998 in Fichez *et al.*, 2005 ; Linton *et al.*, 2003).

En écologie, les indicateurs peuvent être abiotiques (caractéristiques physiques telles que la température de l'eau par exemple) ou biotiques (concernant le domaine du vivant). Parmi les indicateurs biotiques, qui englobent l'ensemble des réponses biologiques à des conditions environnementales données, il existe une catégorie particulière appelée « bio-indicateur ».

Un bio-indicateur ou indicateur écologique est un taxon ou un ensemble de plusieurs taxons qui, par ses caractéristiques qualitatives et/ou quantitatives, témoigne de l'état d'un système écologique et qui, par des variations de ses caractéristiques, permet de détecter d'éventuelles modifications (Pérez *et al.*, 2000 in Sanchez, 2002 CoRéUs). Cela peut aller de la simple présence ou absence d'une espèce animale ou végétale à l'état de cette espèce (état de santé ou mortalité, état structurel, état fonctionnel), qui révèle certaines caractéristiques de l'environnement ou l'influence de pratiques ou de changements naturels. En effet, certaines espèces sont particulièrement informatives et suivre leur abondance peut offrir un indicateur pertinent pour évaluer l'état de santé d'un écosystème.

Certains auteurs parlent aussi d'indicateur de diversité biologique (Feral, 1998). Ce dernier désigne en général des attributs environnementaux souvent des espèces ou groupes d'espèces qui peuvent être échantillonnés et dont le changement dans le temps et dans l'espace serait le reflet d'un changement de la diversité biologique dans son ensemble.

3.1.2 Echelle de l'indicateur

Le plus souvent en écologie, les bio-indicateurs sont de multiples mesures de la santé d'un organisme à plusieurs niveaux d'organisation biologique et à différentes échelles de temps de réponse. Les bio-indicateurs vont de la réponse biomoléculaire à la réponse au niveau populationnel ou à celui des communautés. En effet, il existe des indicateurs applicables (Fichez *et al.*, 2005) :

- à l'échelle d'un individu tels que les bio-accumulateurs ou les bio-marqueurs ;
- à l'échelle d'une espèce tels que la présence/absence ou la densité ou la biomasse d'une espèce cible ou encore l'étendue géographique d'une espèce ;
- à l'échelle d'une communauté, tels que la structure des communautés (pourcentage de poissons corallivores par exemple) ;
- à l'échelle d'un écosystème tels que le pourcentage de recouvrement corallien.

La spécificité de ces indicateurs diminue en fonction de l'augmentation de la complexité biologique et écologique.

3.1.3 Structure de l'indicateur

Un indicateur peut être simple : à paramètre unique ; ou composite : combinaison de plusieurs paramètres à mesurer (Levrel, 2006). Une agrégation de plusieurs indicateurs est souvent nommée « indice ».

En écologie et particulièrement dans l'étude de la biodiversité, un indicateur à paramètre unique établit la valeur d'une grandeur – ici la biodiversité – à partir d'une unité de mesure unique. Cette unité peut être l'espèce, l'individu, le gène ou l'interaction. Dans les faits, la variabilité génétique est très peu renseignée de manière directe car cela implique des manipulations relativement lourdes, tout comme la diversité des interactions qui demande une connaissance trop précise du fonctionnement des écosystèmes. En fait, seule l'abondance d'espèces et d'individus est utilisée.

L'indicateur à paramètre unique le plus utilisé pour mesurer la biodiversité est la richesse spécifique qui se résume au nombre d'espèces présentes dans un écosystème ou à l'échelle de la biosphère. Le problème est qu'il existe aujourd'hui un consensus parmi les écologues pour dire que les indicateurs de richesse spécifique sont peu informatifs des dynamiques qui animent les écosystèmes et la biosphère de manière générale (Balmford *et al.*, 2005 ; Dobson, 2005).

L'indicateur composite est l'exact opposé de l'indicateur à paramètre unique puisqu'il implique l'utilisation d'au moins deux unités de référence (Levrel, 2006). La notion d'indicateur composite, souvent appelé indice, était déjà utilisée par Feral (1998) pour suivre la biodiversité avec l'indice de diversité biologique.

Compte tenu du niveau de connaissances disponibles, ces unités de référence vont être le nombre d'espèces et l'abondance au sein de chaque espèce. Ceci peut permettre notamment de calculer la diversité spécifique qui peut être approchée à partir des indices de Shannon ou de Simpson (Krebs, 2001 in Levrel, 2006).

3.1.4 Indicateurs de pression et indicateurs de réponse

Suivant le modèle développé par l'OCDE, les indicateurs sont classés en 3 catégories (Feral, 1998) : indicateur de pression, indicateur d'état et indicateur de réponses. L'indicateur d'état est dans ce cas le ou les paramètres qui caractérisent l'état d'un système après influence de la pression et l'indicateur de réponse caractérise la réponse que les acteurs voudront bien mettre en œuvre pour contrecarrer la pression.

Dans le cas de la présente étude et pour éviter toute confusion, nous retiendrons 2 types d'indicateurs :

- Indicateur de pression : il rend compte de la pression exercée par les activités humaines ou changement climatique sur l'environnement (exemple : émissions de CO₂ dans l'air, etc.). Cet indicateur est essentiellement un indicateur de processus et de catégories d'activités qui ont, ou qui pourraient avoir des effets négatifs importants sur la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique. L'indicateur mesure donc la pression elle-même.
- Indicateur de réponse : il mesure l'impact de la pression sur un écosystème ou un organisme dans un écosystème. Cela peut être des mesures d'un paramètre structural ou fonctionnel.

Pour pouvoir gérer correctement un système, il est essentiel de mesurer à la fois des indicateurs de pression et des indicateurs de réponse afin d'évaluer simultanément la cause et l'effet.

3.1.5 Caractéristiques des indicateurs

Un indicateur efficace doit répondre à plusieurs critères :

- Capacité à condenser l'information et simplifier l'approche de phénomènes environnementaux souvent complexes, ce qui en fait des outils de communication précieux ;
- Quantifiable ;
- Simple, compréhensible et utilisable par tous les acteurs (Protocole simple et applicable d'année en année) ;
- Robuste, fiable, précis : il doit refléter effectivement les variations de ce qu'il est censé synthétiser ; il doit présenter une variabilité naturelle minimale ;
- Sensible : il doit varier notablement en fonction de la pression exercée ; Mieux, il doit être capable de détecter les menaces le plus tôt possible ;
- Fondé sur d'excellents principes scientifiques afin d'être justifiables ;
- Issu de données réelles recueillies dans le cadre de programmes de surveillance (« suivi ») de divers types. D'où la nécessité d'avoir des séries temporelles. Ils servent à la collecte de données mais ne s'y substitue pas ;
- Epruvé et validé via notamment les programmes de surveillance mis en place.

Il est souvent précisé qu'il doit être peu coûteux à mettre en œuvre en termes d'instrumentation, de mesure et de suivi.

3.2 Un indicateur, pour quoi faire ?

3.2.1 Les besoins des gestionnaires en matière d'indicateurs

Le milieu récifal est complexe, ce qui rend difficile l'estimation des impacts, qu'ils soient naturels ou anthropiques, et l'évolution de leurs influences (Sanchez, 2002 : programme IRD COREUS). Pour une meilleure compréhension, cette complexité impose la nécessité de trouver des éléments capables de synthétiser toutes les informations concernant les milieux récifo-lagonaires.

L'indicateur présente plusieurs fonctions (Linton *et al.*, 2003) :

- Améliorer notre connaissance sur des problèmes critiques ;
- Evaluer des états mais également des tendances (prédictions) ;
- Comparer les conditions d'un système dans différentes zones géographiques ;
- Mesurer l'efficacité des politiques de gestion (actions et/ou de réglementations) suite à des prises de décisions des gestionnaires ;
- Informer les décisionnaires afin de mettre en place des plans d'actions en réponse aux perturbations observées.

Dans le cas de la présente étude, les gestionnaires souhaitent pouvoir suivre la réaction des écosystèmes récifo-lagonaires face aux changements climatiques mais également réagir suffisamment tôt. Ce sont les indicateurs de changement climatique (indicateurs de pression ici) qui devront jouer un rôle d'alarme précoce de problèmes environnementaux.

Parallèlement, les indicateurs de réponse serviront à évaluer l'ampleur d'un changement des écosystèmes récifo-lagonaires face au changement global ; ce sont eux qui permettront donc d'évaluer les impacts critiques et donc l'influencer les prises de décisions des gestionnaires grâce à une grille de lecture simple et compréhensible par les acteurs principaux.

3.2.2 Processus de sélection d'indicateurs

Les étapes recommandées du processus de sélection des indicateurs sont les suivantes (Feral, 1998) :

- Déterminer le public-cible (gestionnaires, scientifiques, communautés ?) ;
- Déterminer ses besoins en matière d'information (définir clairement l'objectif de la mise en œuvre d'un indicateur) ;
- Préciser les critères à mesurer ;
- Choisir les indicateurs convenables pour ces critères.

4 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Par changement climatique, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) entend toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines.

D'après le dernier rapport du GIEC, paru en Novembre 2007, il est désormais clair et sans équivoque que le système climatique mondial se réchauffe, ce qui a pu être observé et mesuré par l'augmentation des températures moyennes globales de l'atmosphère et de l'océan, la fonte généralisée des neiges et des glaces, ainsi que l'élévation du niveau moyen mondial de la mer.

A l'échelle des continents, des régions et des bassins océaniques, ce réchauffement accompagné de nombreux autres changements climatiques ont également été observés. Ils incluent des changements des températures et des glaces arctiques, des changements largement répandus dans les volumes de précipitations, la salinité de l'océan, les structures des vents et des aspects de phénomènes climatiques extrêmes, tels que les sécheresses, les fortes précipitations, les vagues de chaleur et l'intensité des cyclones tropicaux.

Les causes et les manifestations de ces changements climatiques sont exposées en détail dans les paragraphes qui suivent.

Il est important de souligner que les paragraphes qui suivent sont issus de quelques ouvrages de référence et notamment :

- Le Quatrième Rapport d'Evaluation sur les effets des changements climatiques (GIEC, 2007).
- Les changements climatiques en Nouvelle-Calédonie et l'atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie (Météo France, 2006 ; 2007).

4.1 Les causes du changement climatique

Au cours des 100 dernières années, le climat mondial a nettement changé. Entre le début et la fin du XX^e siècle, la température moyenne planétaire a gagné environ 0,7°C. De plus, selon les relevés climatologiques mondiaux des 140 dernières années, les années 1990 ont constitué la décennie la plus chaude.

Pourquoi les températures s'élèvent-elles?

Il existe un processus naturel qui conduit au réchauffement de l'atmosphère : l'effet de serre. Comme le montre la figure suivante, une grande partie des rayons du soleil qui atteignent la Terre sont absorbés. La partie qui n'est pas absorbée est renvoyée par réverbération sous forme de rayonnement infrarouge vers l'espace, mais se trouve en partie piégée par une couche de gaz située dans la basse atmosphère : celle-ci renvoie la chaleur vers la Terre et contribue à la réchauffer davantage. Grâce à ce phénomène, la température moyenne de l'air à la surface de la Terre est d'environ $+15^{\circ}\text{C}$, sans cela elle serait de -18°C , rendant la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui impossible sur Terre.

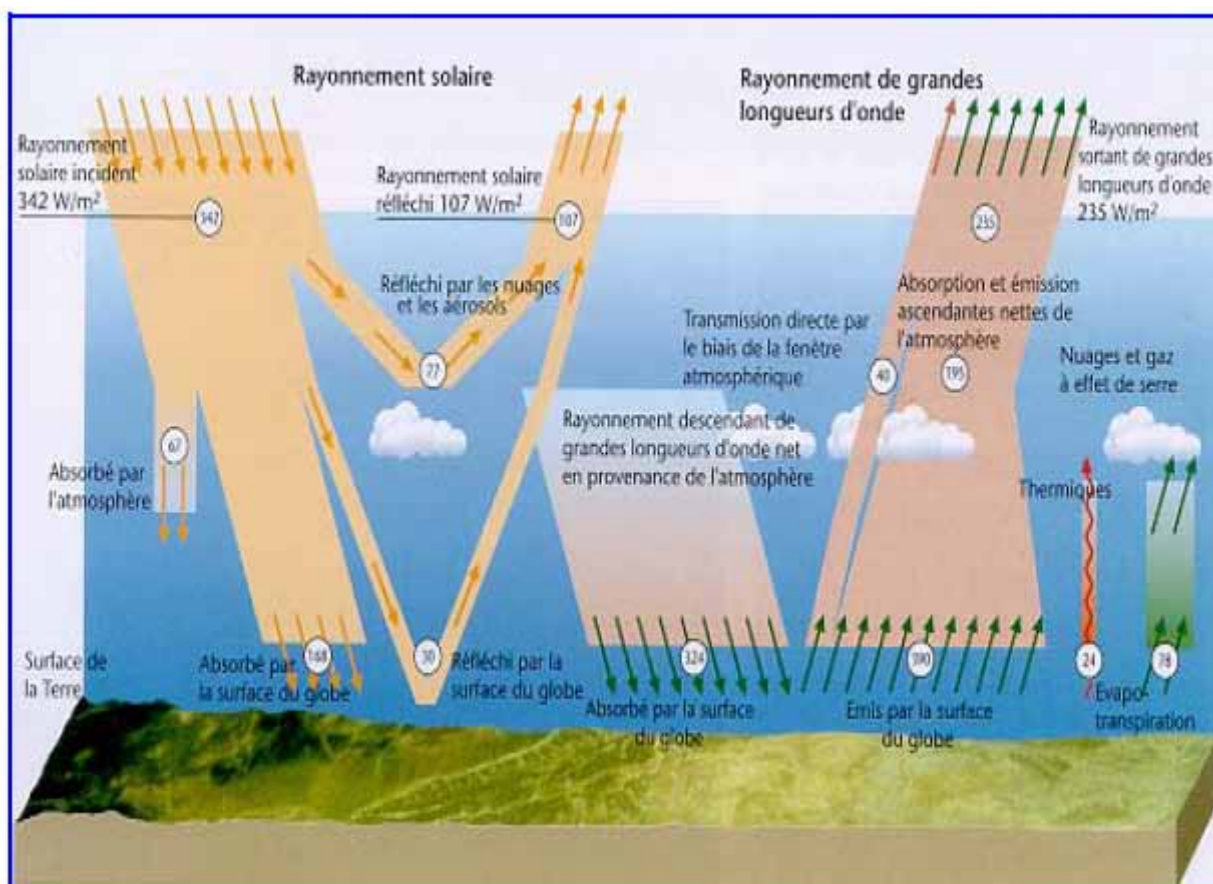


Figure 1. Schéma de l'effet de serre (tiré de Météo-France, 2006)

L'effet de serre résulte pour les deux tiers de l'absorption de chaleur par la vapeur d'eau et les nuages (qui évoluent entre le sol et 12 km d'altitude) et le troisième tiers résulte de l'interaction d'un certain nombre de gaz dits "à effet de serre" qui se situent environ à 15 km au-dessus du sol. L'origine de ces gaz est majoritairement naturelle, cependant la quantité de gaz d'origine anthropique ne cesse de s'accroître depuis le début de l'ère industrielle (1750). La composition de l'atmosphère influe directement sur la quantité d'énergie qui est piégée, ainsi plus la concentration des gaz à effet de serre augmente plus la température augmente.

C'est donc à l'augmentation des quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère que les spécialistes attribuent en grande partie le réchauffement observé au cours des 50 dernières années.

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat a recensé plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre. Les principaux sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote) (N_2O).

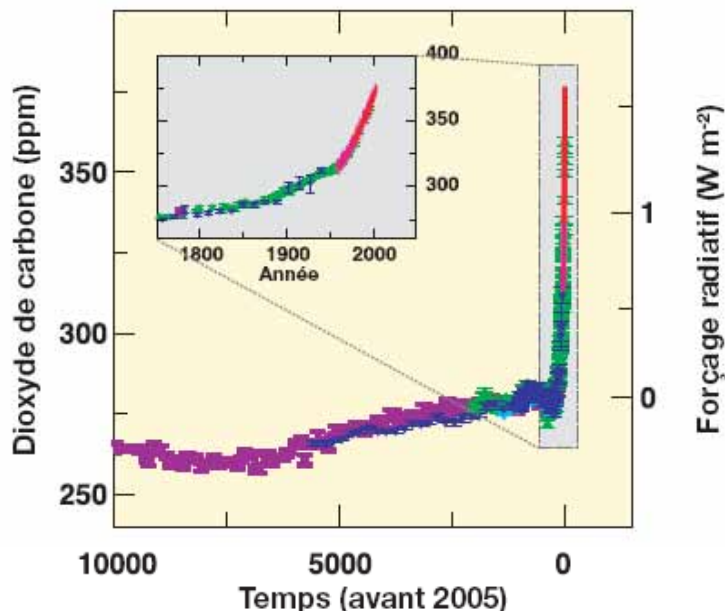


Figure 2. Concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, durant les 10 000 dernières années (grands panneaux) et depuis 1750 (inserts). Mesures déduites des carottes de glace (symboles de couleurs différentes pour diverses études) et d'échantillons atmosphériques (lignes rouges).

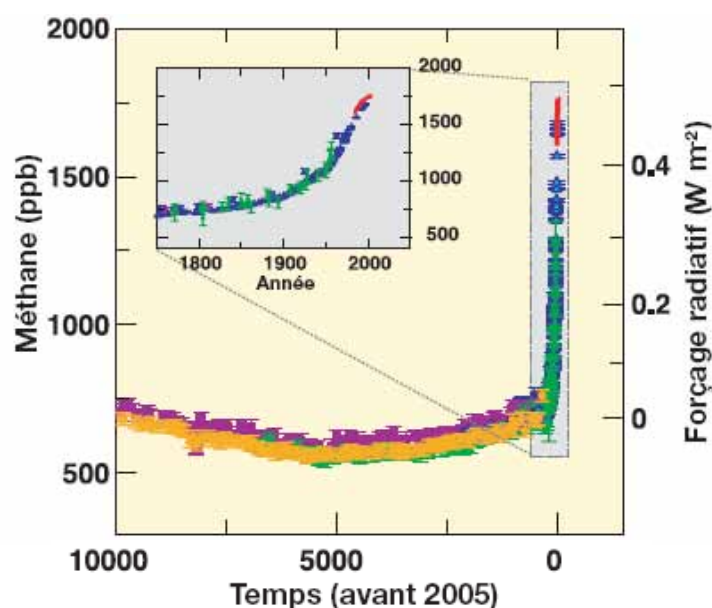
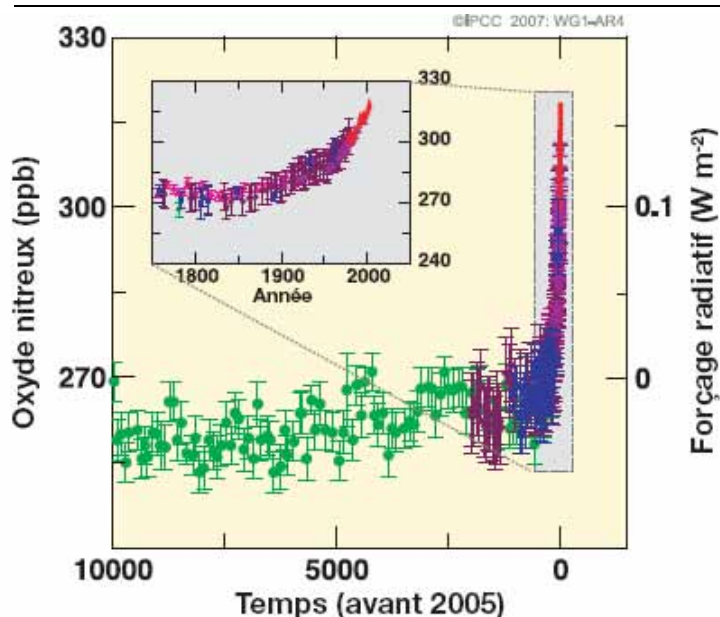


Figure 3. Concentrations atmosphériques de méthane, durant les 10 000 dernières années (grands panneaux) et depuis 1750 (inserts). Mesures déduites des carottes de glace (symboles de couleurs différentes pour diverses études) et d'échantillons atmosphériques (lignes rouges).

Le **dioxyde de carbone** est le plus important gaz à effet de serre d'origine anthropique. La concentration atmosphérique mondiale du dioxyde de carbone a augmenté d'une valeur préindustrielle d'environ 280 ppm à 379 ppm en 2005. D'après les analyses des carottes de glace, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone en 2005 dépasse largement les variations naturelles durant les 650 000 dernières années (180–300 ppm). Le rythme d'accroissement annuel de la concentration du dioxyde de carbone a été plus rapide au cours des 10 dernières années (1,9 ppm par an en moyenne pour 1995–2005) qu'il ne l'a été depuis le début des mesures directes atmosphériques continues (1,4 ppm par an en moyenne pour 1960–2005), bien qu'il y ait une variabilité d'une année sur l'autre du taux de croissance. La source principale de l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis l'époque préindustrielle provient de l'utilisation des combustibles fossiles, et les changements de l'affectation des terres constituant une autre contribution importante mais moins élevée.

La concentration atmosphérique mondiale du **méthane** a crû de 715 ppb à l'époque préindustrielle, à 1732 ppb au début des années 1990, et a atteint 1774 ppb en 2005. La concentration atmosphérique du méthane en 2005 dépasse de loin les variations naturelles durant les 650 000 dernières années (320 à 790 ppb), déduites des carottes de glace. Le taux de croissance a diminué depuis le début des années 1990, en cohérence avec les émissions totales (somme des sources anthropiques et naturelles) pratiquement constantes au cours de cette période. Il est très probable que l'augmentation observée de la concentration de méthane soit d'origine humaine, provenant essentiellement de l'agriculture et de l'utilisation des combustibles fossiles ; cependant, la contribution exacte de chaque source n'est pas bien déterminée.



La concentration atmosphérique globale d'**oxyde nitreux** est passée de 270 ppb à l'époque préindustrielle, à 319 ppb en 2005. Le taux de croissance est resté relativement constant depuis 1980. Plus du tiers des émissions totales des émissions d'oxyde nitreux est d'origine humaine et est essentiellement dû à l'agriculture.

Figure 4. Concentrations atmosphériques d'oxyde nitreux, durant les 10 000 dernières années (grands panneaux) et depuis 1750 (inserts). Mesures déduites des carottes de glace (symboles de couleurs différentes pour diverses études) et d'échantillons atmosphériques (lignes rouges).

L'élévation des températures n'explique pas à elle seule l'évolution du climat. À leur tour, ces températures plus chaudes ont des effets sur d'autres aspects du climat, tels les précipitations de pluie ou de neige, les vents, la fréquence des événements météorologiques extrêmes ou le déplacement des systèmes météorologiques. Ces points sont développés dans les chapitres suivants.

La mesure du taux de CO₂ dans l'atmosphère :

Le taux de CO₂ mondial est mesuré au niveau de 2 stations : une située à Hawaii (Mauna Loa), représentative des tendances mondiales des concentrations de dioxyde de carbone ; et l'autre au Canada (Alert), représentative de l'Extrême Arctique. Des données sont disponibles sur ces stations depuis 1958 (Mauna Loa) et 1975 (Alert).

La station de Mauna Loa (19° 32' N, 155° 35' O) se présente comme un champ de laves dénudé d'un volcan actif, à 3 397 m au-dessus du niveau moyen de la mer.

Les concentrations de dioxyde de carbone à Mauna Loa sont mesurées à l'aide d'un échantillonneur fonctionnant en continu et effectuant quatre prélèvements à l'heure (précisions supplémentaires sur les méthodes d'échantillonnage dans Keeling *et al.*, 1982). À chaque heure, les valeurs moyennes tant des concentrations de dioxyde de carbone que de la vitesse et de la direction du vent sont enregistrées et servent de critères pour la sélection des données. Il faut six heures consécutives de données horaires stables à 0,5 ppmv près pour obtenir une moyenne quotidienne.

Les données de Mauna Loa sont considérées comme un indicateur des concentrations mondiales de dioxyde de carbone parce que cette série chronologique constitue le plus long enregistrement en continu jamais effectué dans le monde et que la valeur annuelle moyenne du dioxyde de carbone y est presque identique à celle du globe. Le site de Mauna Loa est un emplacement propice pour mesurer l'air non perturbé; les méthodes et l'équipement sont restés

pratiquement les mêmes pendant toute la période de surveillance. Des protocoles très stricts d'assurance de la qualité sont appliqués à toutes les mesures effectuées à la station d'échantillonnage. La série de données sur Mauna Loa est considérée comme l'enregistrement le plus précis des tendances mondiales des concentrations de dioxyde de carbone.

4.2 Les changements climatiques observés au niveau global

4.2.1 Les variations atmosphériques et climatologiques

4.2.1.1 La température de l'air

Onze des douze dernières années (1995–2006) figurent au palmarès des douze années les plus chaudes depuis qu'on dispose d'enregistrements de la température de surface (depuis 1850), avec 1998 et 2005 qui furent les deux années les plus chaudes. Seule l'année 1996 a été épargnée par ces valeurs maximales. L'augmentation de la température moyenne globale a été de 0,74°C au cours des 100 dernières années (1906–2005), valeur supérieure à celle calculée lors du 3^{ème} rapport d'évaluation sur l'évolution du climat (IPCC, 2001), qui était alors de 0,6°C pour la période 1901–2000, à cause des récentes années chaudes. La vitesse moyenne du réchauffement au cours des 50 dernières années (0,13°C par décennie) a pratiquement doublé par rapport à celle des 100 dernières années.

Des changements largement répandus des températures extrêmes ont été observés au cours des 50 dernières années et sont en accord avec le réchauffement. Les journées froides, les nuits froides et le gel sont devenus moins fréquents (10% des jours ou des nuits les plus froides), tandis que les journées chaudes, les nuits chaudes et les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes (10% des jours ou des nuits les plus chaudes). Les changements les plus marqués s'observent pour les nuits froides, dont l'occurrence a baissé au cours de la période 1951 à 2003 pour toutes les régions où les données sont disponibles (76% des terres émergées). La durée des vagues de chaleur a augmenté à partir de la deuxième moitié du 20ème siècle. La vague de chaleur record sur l'Europe occidentale et centrale en été 2003 est un exemple d'un cas extrême exceptionnel récent.

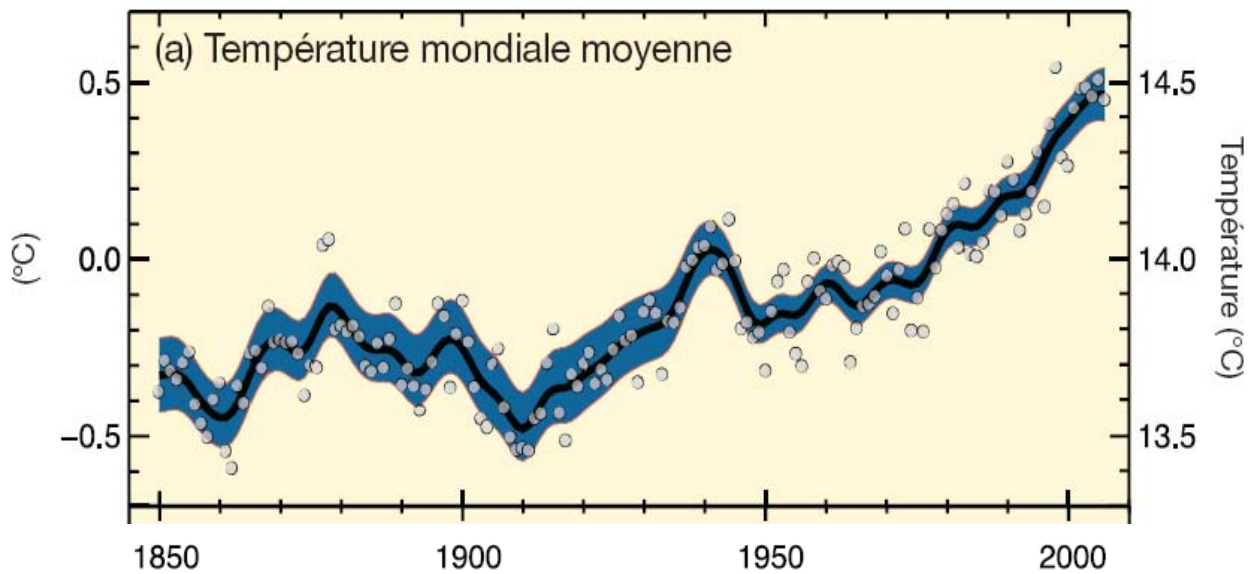


Figure 5. Changements observés sur la température en surface moyennée sur le globe. Tous les changements se rapportent aux moyennes correspondantes pour la période 1961–1990. Les courbes lissées représentent des moyennes décennales, tandis que les cercles indiquent les valeurs annuelles. Les zones ombrées indiquent les intervalles d'incertitudes estimés à partir d'une analyse complète des incertitudes connues (Source : IPCC, 2007).

Les températures de surface des régions continentales ont augmenté plus rapidement que sur les océans dans les deux hémisphères, pendant les deux décennies passées (de 0.27°C sur les terres contre 0.13°C par décennie sur les océans).

Bien que le réchauffement s'étende sur l'ensemble du globe, on observe des différences au niveau continental, comme montré dans la figure suivante. D'une manière générale il est plus important aux hautes latitudes du Nord. Le plus fort réchauffement apparaît pendant l'hiver de l'hémisphère Nord et au printemps.

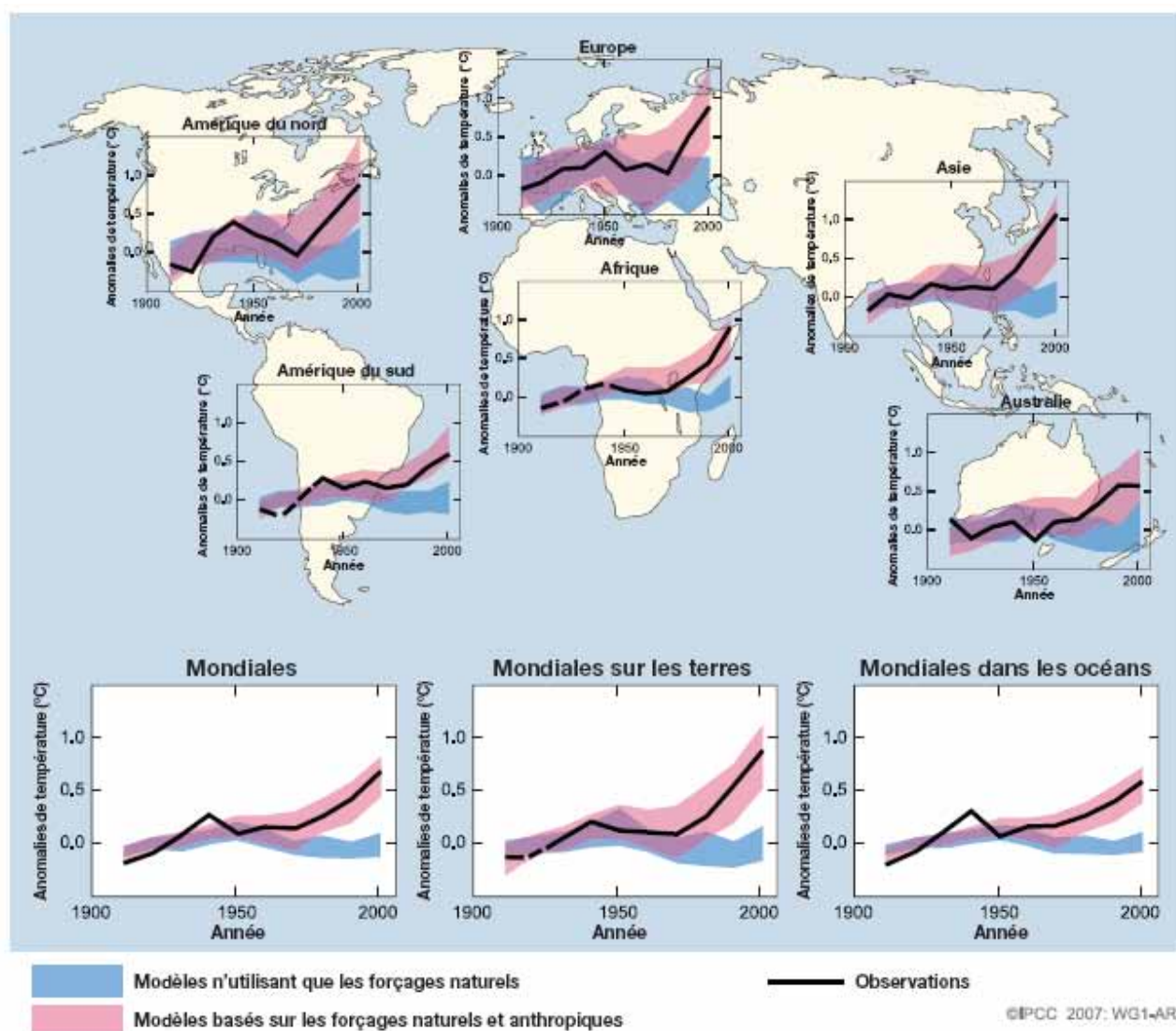


Figure 6. Comparaison des changements observés sur la température de surface aux échelles globale et continentale, avec les résultats de simulations de modèles climatiques utilisant les forçages naturels et anthropiques. Les moyennes décennales des observations sont montrées pour la période 1906–2005 (ligne noire) représentée selon le centre de la décennie et relative à la moyenne correspondante sur la période 1901–1950. Les lignes en pointillés sont utilisées quand la couverture spatiale est inférieure à 50 %. Les bandes bleues ombrées représentent l'intervalle de confiance 5–95% pour 19 simulations de cinq modèles climatiques qui n'utilisaient que les forçages naturels dus à l'activité solaire et aux volcans. Les bandes rouges ombrées représentent l'intervalle de confiance 5–95% pour 58 simulations provenant de 14 modèles climatiques utilisant des forçages à la fois les forçages naturels et anthropiques. (Source : IPCC, 2007)

4.2.1.2 Les précipitations

Les précipitations ont un caractère extrêmement variable dans l'espace et le temps, et les données sont limitées à quelques grandes régions. A titre d'exemple, des précipitations plus violentes ont été observées à l'Est de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud, au Nord de l'Europe et en Asie du Nord et en Asie centrale. Un assèchement a été observé au Sahel, dans le pourtour méditerranéen, au Sud de l'Afrique et dans certaines parties du Sud de l'Asie.

Il est très difficile d'établir des tendances sur le régime des précipitations. Cela dit, on a pu noter une augmentation des précipitations moyennes entre 30°N et 70°N et entre 0° et 70°S. Par contre, entre 0° et 30°N, on observe une baisse générale de la moyenne des précipitations.

Bien qu'aucun consensus ne soit adopté sur les changements dans le régime des précipitations, il apparaît que : 1) depuis les années 1970, des sécheresses plus sévères et plus longues ont été observées sur de larges étendues, en particulier dans les régions tropicales et subtropicales, liées à la hausse des températures de l'air ; 2) l'intensité des événements de fortes pluies a augmenté (ex. inondations à Townsville, Australie, en janvier 1998 ; aux Etats-Unis, les très fortes pluies (>50mm/jour) représentent actuellement 10% des précipitations annuelles, contre 8% au début du siècle ; et 3) la fréquence des événements extrêmes a augmenté.

Des augmentations substantielles d'événements de fortes précipitations ont été observées dans la plupart des zones terrestres depuis environ 1950, en cohérence avec le réchauffement et les accroissements observés de la vapeur d'eau atmosphérique, et ce même dans les régions qui ont vécu une réduction de la quantité des précipitations totales.

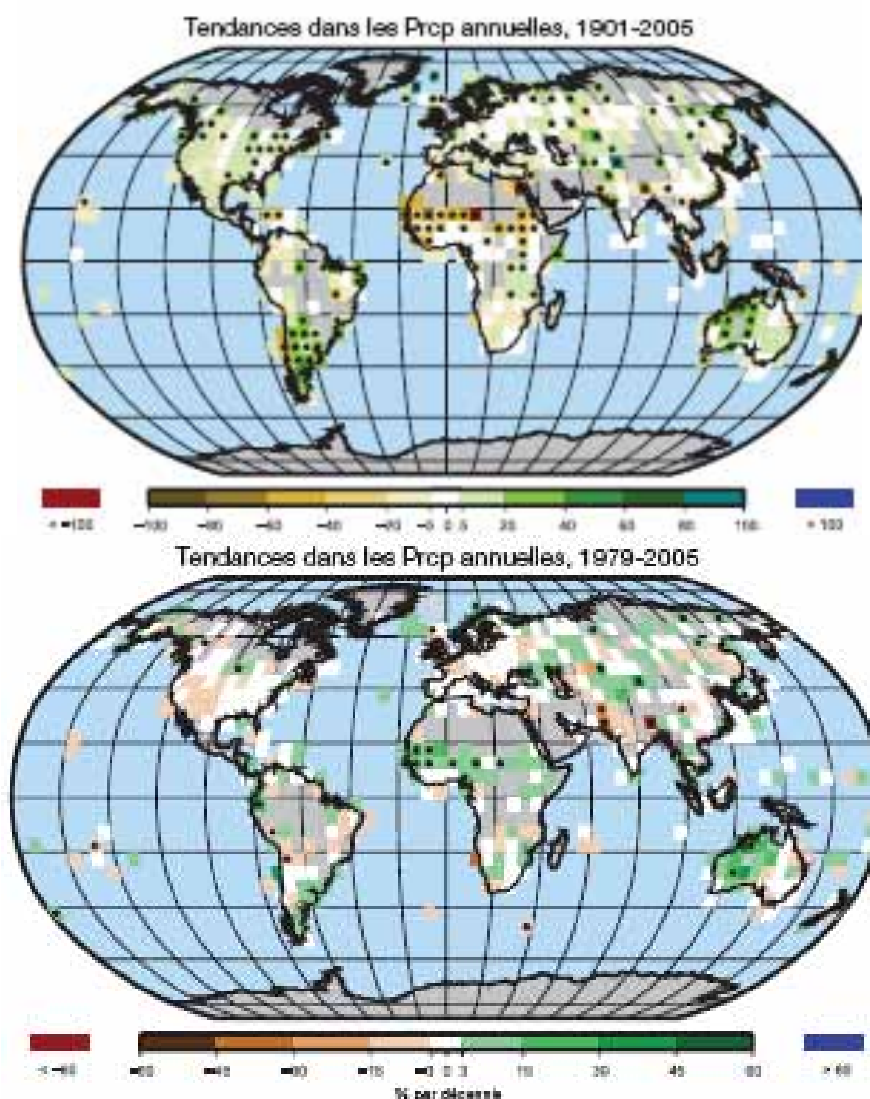


Figure 7. Distribution des tendances linéaires dans le volume des précipitations annuelles sur les terres dans la période 1901–2005 (% par siècle) et entre 1979 et 2005 (% par décennie). Les zones grisées indiquent qu'une insuffisance dans les données empêche de donner une tendance fiable. (Source : IPCC, 2007)

4.2.1.3 L'activité cyclonique

Les observations mettent en évidence une augmentation de l'activité des cyclones tropicaux intenses dans l'Atlantique Nord depuis 1970 environ, corrélée avec des augmentations de températures de surface de la mer sous les tropiques. La variabilité multi-décennale et la qualité des données sur les cyclones tropicaux avant les observations satellitaires régulières vers 1970, compliquent la détection des tendances à long terme de l'activité des cyclones tropicaux.

Il n'existe actuellement pas de tendance claire sur le nombre annuel de cyclones tropicaux. Les évaluations du potentiel de destruction des cyclones tropicaux suggèrent une tendance ascendante significative depuis le milieu des années 1970, avec une tendance vers des durées de vie plus longues et une plus grande intensité.

4.2.2 *Les variations océaniques*

4.2.2.1 La température de surface des océans

L'océan joue un rôle important dans le climat et le changement climatique. L'océan stocke la chaleur sur Terre bien mieux que les continents et bien plus que l'atmosphère. Les océans absorberaient plus de 80% de la chaleur ajoutée au système climatique. C'est une des raisons principales de la grande influence de l'océan sur le climat. De plus, les courants transportent de la chaleur. L'océan reçoit trop de chaleur dans les zones tropicales, en perd dans l'atmosphère dans les zones de hautes latitudes et il faut la transporter des zones tropicales vers ces zones de hautes latitudes. Ce sont les courants qui effectuent ce transport, contribuant ainsi à rendre notre planète habitable.

Alors que l'atmosphère se réchauffe, tous les océans du globe se réchauffent également, jusqu'à des profondeurs atteignant -700 m. Le réchauffement le plus important s'observe dans les 300 mètres supérieurs, et atteint en moyenne 0.31°C au cours des 50 dernières années (contre 0.06°C sur les 3000m supérieurs) (IPCC, 2001). L'Atlantique s'est réchauffé au Sud de 45°N. Le réchauffement pénètre plus profondément dans le bassin océanique Atlantique que dans le Pacifique, dans l'Océan Indien et l'Océan Austral, en raison de la cellule de circulation thermohaline profonde qui se produit en Atlantique Nord.

Un tel réchauffement entraîne la dilatation de l'eau de mer, contribuant à la montée du niveau des mers.

4.2.2.2 Le niveau moyen de la mer

4.2.2.2.1 Tendances

Le niveau global moyen de la mer s'est élevé à une vitesse moyenne de 1,8 mm par an entre 1961 et 2003. Cette vitesse a été supérieure entre 1993 et 2003, soit environ 3,1 mm par an (mesuré par le satellite d'altimétrie TOPEX/Poséidon). On ne sait pas précisément si cette vitesse plus rapide pour 1993–2003 correspond à la variabilité décennale ou à un accroissement de la tendance à long terme. En revanche, est presque certain que la vitesse d'élévation du niveau des

mers a été plus rapide du XIX^{ème} siècle au XX^{ème} siècle. L'élévation totale au XX^{ème} siècle est estimée à 0,17 m.

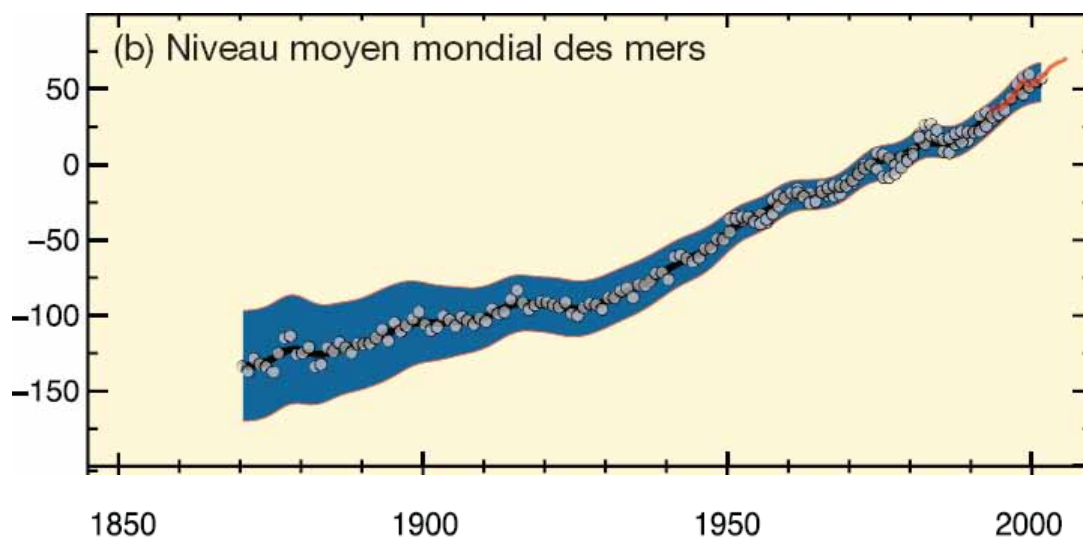


Figure 8. Changements observés sur l'élévation moyenne globale du niveau de la mer obtenue à partir de données provenant de marégraphes (bleu) et de satellites (rouge). Tous les changements se rapportent aux moyennes correspondantes pour la période 1961–1990. Les courbes lissées représentent des moyennes décennales, tandis que les cercles indiquent les valeurs annuelles. Les zones ombrées indiquent les intervalles d'incertitudes estimés à partir d'une analyse complète des incertitudes connues (Source : IPCC, 2007).

On observe une variabilité régionale du niveau de la mer. Dans certaines régions, les taux de montée pendant cette période ont représenté jusqu'à sept fois la moyenne mondiale, alors que dans d'autres régions le niveau de la mer descend. La plus importante montée de niveau de la mer depuis 1992 a eu lieu dans l'océan Pacifique occidental et dans l'océan Indien oriental. La quasi-totalité de l'océan Atlantique montre une montée du niveau de la mer au cours de la dernière décennie, tandis que le niveau de la mer dans l'océan Pacifique occidental et dans l'océan Indien oriental est descendu.

D'après discussion avec le Dr Anny CAZENAVE, membre de l'Académie des Sciences et chercheur au Centre national d'études spatiales (CNES) et Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS), le niveau de la mer est un très bon indicateur du changement climatique car il intègre toutes les composantes du système climatique (océans, glaces, etc.). En revanche, à l'échelle très locale, il y a beaucoup d'autres facteurs (anthropiques, tectoniques, etc.) qui doivent être pris en compte lorsqu'on regarde l'évolution de certains phénomènes.

4.2.2.2 Mesures du niveau de la mer

Mesurer le niveau de la mer n'est pas simple car, comme précisé précédemment, le niveau de la mer varie de façon différente selon la zone considérée en raison :

- des effets de la rotation de la terre ;
- des variations locales du littoral ;
- des changements dans les grands courants océaniques ;

- des mouvements verticaux de l'écorce terrestre ;
- des différences dans les caractéristiques des marées ;
- des densités différentes de l'eau de mer.

De nos jours, il existe deux principales approches pour mesurer le niveau de la mer :

- Utilisation d'instruments à terre ou en mer pour mesurer le niveau de la mer relatif, c'est-à-dire la hauteur de l'eau par rapport à la terre (marégraphes et bouées dérivantes). Il est à noter que l'utilisation de ces instruments de mesure implique de pouvoir appréhender les variations du niveau de la terre afin de pouvoir les soustraire à l'évolution observée et connaître précisément les variations de la hauteur d'eau absolue des océans.
- Mesure de la distance entre la surface de la mer et l'orbite du satellite par altimétrie satellitaire. En connaissant précisément la position du satellite, il est possible de mesurer la hauteur d'eau par rapport au centre de la Terre.

Les marégraphes

Au cours des 10 dernières années, un réseau de stations de suivi haute résolution a été mis en place dans la région du Pacifique Sud afin de fournir à la communauté scientifique des informations sur l'évolution du niveau de la mer. Les stations de suivi sont appelées SEAFRAME : Sea Level Fine Resolution Acoustic Measuring Equipment (voir Annexe 4).



Les stations SEAFRAME mesurent plusieurs paramètres : niveau de l'eau, pression barométrique, la direction et la vitesse du vent, les rafales et la température de l'eau et de l'air.

Toutes ces données sont nécessaires pour améliorer la valeur des mesures de hauteurs d'eau relative dans leur contexte local. Les épisodes El Nino peuvent engendrer des variations de niveau d'eau de 30 à 50 cm et des tempêtes jusqu'à 1 mètre. Les marégraphes standards offrent une précision de l'ordre du centimètre alors que les capteurs sur SEAFRAME mesurent la hauteur d'eau jusqu'au millimètre, précision nécessaire pour tenir compte de faibles variations.

Ces stations sont différentes des anciens marégraphes flottants par leur liaison à un système de position global continu (CGPS) qui tient compte des mouvements verticaux de la croûte terrestre tels que la subsidence ou les mouvements tectoniques à proximité de la station. Ainsi les données du niveau de la mer peuvent être ajustées pour compenser les mouvements de la terre au millimètre près, permettant ainsi de déterminer la hauteur d'eau absolue.

Au cours du siècle dernier, les changements globaux du niveau de la mer ont été estimés à partir des mesures issues de marégraphes sur des séries temporelles moyennées.

Bouées dérivantes



Un grand nombre de bouées dérivantes équipées de plusieurs capteurs, possédant une autonomie de 5 ans, ont été larguées dans l'océan (ex. bouées ARGO) dont les premières ont été déployées depuis 2000. Le parc atteint près de 3000 bouées depuis le milieu de l'année 2007.

Ces bouées peuvent mesurer la température, la salinité, la pression et la vitesse de déplacement des masses d'eau (en parallèle à la hauteur d'eau de surface depuis les données d'altimétrie satellitaire).

ARGO contribue au projet CLIVAR (*Climate Variability and Predictability Experiment*) ainsi qu'au projet GODAE (*Global Ocean Data Assimilation Experiment*).

La gamme ARGO fait également partie des systèmes GCOS/GOOS (*Global Climate Observing System / Global Ocean Observing System*).

Altimétrie satellitaire

Depuis 1992 la hausse du niveau de la mer est mesurée par altimétrie spatiale grâce aux satellites Topex-Poseidon et Jason-1 (Figure 9) :

- T/P a fourni des informations sur le niveau de la mer entre 1992 et 2005 ;
- Jason-1 mis en orbite en fin 2001 succédant à T/P continue ses enregistrements, fournissant une estimation du niveau moyen de la mer tous les 10 jours avec une précision de 3-4 mm.

Il apparaît qu'il existe une grande variabilité régionale des vitesses de variations.

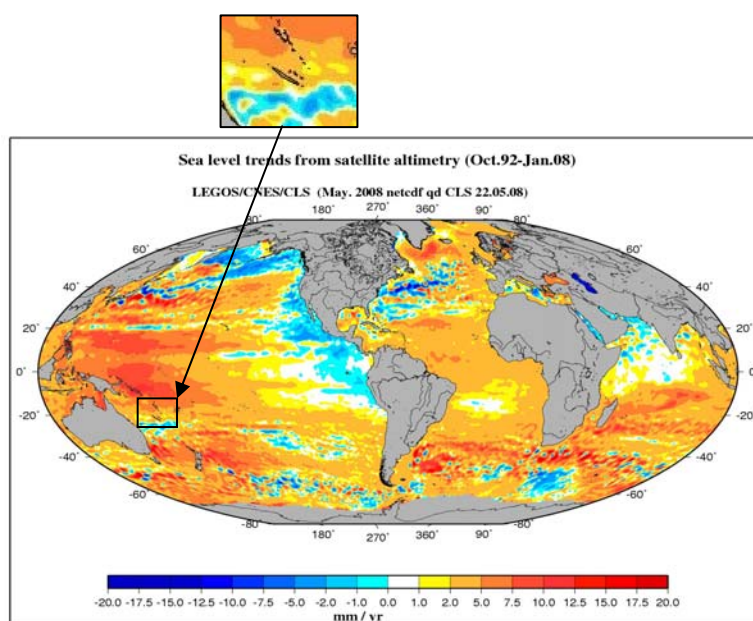


Figure 9. Distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2008 basées sur les données altimétriques multi-satellites (Source : Cazenave et al., 2008).

4.2.2.3 La salinité

Il est maintenant clairement établi que des changements de salinité des océans ont eu lieu à l'échelle des courants et des bassins depuis environ 1950. Les eaux proches de la surface dans les régions de plus forte évaporation augmentent en salinité dans presque tous les bassins océaniques. Ces changements de la salinité impliquent des changements du cycle hydrologique sur les océans. Dans les régions à haute latitude dans les deux hémisphères, les eaux de surface se refroidissent de manière générale, ce qui est en accord avec le fait que ces régions subissent de plus fortes précipitations, bien que le plus fort écoulement, la fonte des glaces, l'advection et les changements de la circulation thermohaline puissent également y contribuer. Les latitudes subtropicales dans les deux hémisphères sont caractérisées par une augmentation de la salinité dans les 500 m supérieurs.

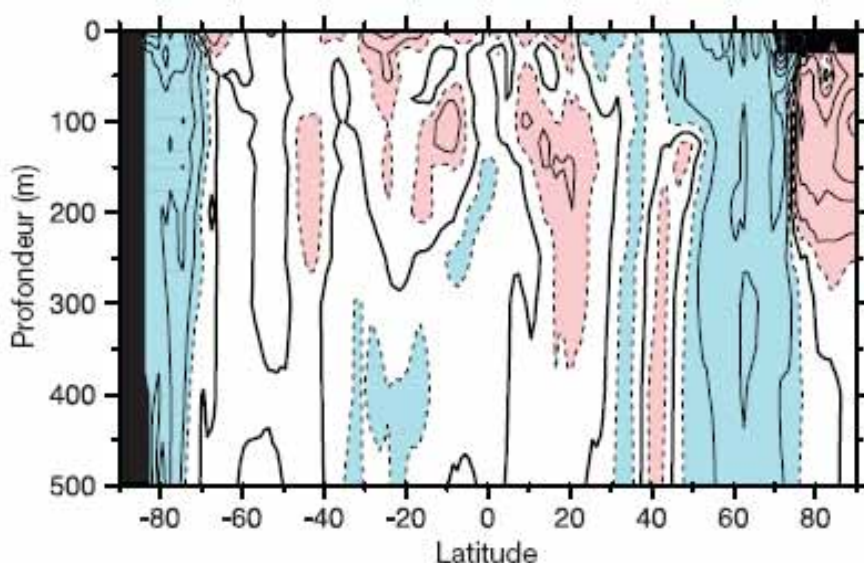


Figure 10. Tendances linéaires (1955–1998) de salinité moyenne zonale (échelle de salinité pratique) pour les océans mondiaux. Les courbes ininterrompues sont de 0,01 par décennie et les courbes pointillées sont de $\pm 0,005$ par décennie. La courbe pleine et sombre est la courbe zéro. Les rouges ombrés indiquent une valeur égale ou supérieure à 0,005 par décennie et les bleus ombrés indiquent une valeur égale ou inférieure à $-0,005$ par décennie (Source : IPCC, 2007).

Un satellite mesurera les taux de salinité des océans pour prévoir le changement climatique

Des scientifiques d'Argentine et de la NASA espèrent qu'un nouveau satellite de leur conception les aidera à mieux étudier le changement climatique dans le monde en mesurant les taux de salinité à la surface des océans du globe. Les chercheurs du monde entier ont approuvé jeudi 24 juillet 2008 la conception finale du satellite, qui devrait être lancé en 2010 et qui devrait fournir de nouveaux indices pour aider les scientifiques à mieux prédire les changements climatiques. Le taux de sel dans l'océan fournit des informations importantes à propos des températures terrestres et des courants des océans qui pourraient aider les scientifiques à mieux comprendre les effets du changement climatique. Les experts mesurent actuellement les taux de salinité de manière manuelle, en obtenant des échantillons directement dans la mer. Cependant, cette méthode manuelle signifie que 24% de la surface des océans n'ont jamais été testés pour leurs taux de salinité. Le nouveau satellite baptisé SAC-D Aquarius mesurera les taux de salinité dans le monde entier, une fois par mois pendant trois ans. « Nous ne pouvons pas mesurer assez de taux de salinité à partir des bateaux ou des bouées pour obtenir des prévisions climatiques correctes, c'est pourquoi la mesure de ces taux depuis l'espace transformera certaines de nos prévisions climatiques » a déclaré un océanographe de la NASA, Eric Lindstrom.

Un satellite mesurera les taux de salinité des océans pour prévoir le changement climatique (suite)

Tout changement des taux de salinité des océans pourrait donner de nouveaux indices concernant le comportement des courants des océans, qui en retour pourraient permettre de prévoir des changements climatiques importants, d'après ce que les scientifiques ont déclaré. Les scientifiques essaient de déterminer l'impact qu'aura le changement climatique sur les courants océaniques en perpétuel mouvement, qui agissent comme une courroie transporteuse, aidant à réguler les températures en déplaçant l'eau froide et l'eau chaude autour du globe. Ces courants peuvent être altérés si l'océan devient moins salin, et les changements des courants océaniques pourraient affecter les modèles climatiques. Le satellite de la NASA étudiera si les taux de salinité ont été affectés par exemple par les changements climatiques dans l'hémisphère nord qui ont fait fondre les glaciers et augmenter les précipitations, envoyant plus d'eau douce dans les océans. Ce sont des scientifiques argentins qui ont conçu le satellite, qui comprend des caméras haute sensibilité et des panneaux solaires, tandis que la NASA a construit le radiomètre micro-onde qui fera les mesures. Le satellite sera assemblé en Argentine.

<http://www.actualites-news-environnement.com/17286-satellite-taux-salinite-changement-climatique.html>

4.2.2.4 La composition chimique des océans

Les océans absorbent le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère. Ce faisant, l'océan joue un rôle de tampon, en absorbant le CO₂ en excès dans l'atmosphère. En particulier depuis 1750, la concentration en CO₂ liée aux activités humaines ayant considérablement augmentée, il a été reconnu que les océans ont absorbé la moitié de cet excès au cours des derniers 200 ans (Montaggioni, 2007). Plus les océans absorbent du carbone, plus ils deviennent acides, modifiant ainsi les équilibres chimiques de l'eau de mer, en particulier sur les couches de surface (<1000m de profondeur). Ainsi, on a noté une diminution moyenne du pH superficiel de 0,1 unités.

L'acidification des océans s'explique de la manière suivante : quand le CO₂ pénètre dans l'océan il réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique (H₂CO₃), ce qui entraîne une chute du pH. La majeure partie de cet acide se dissocie rapidement en bicarbonate (CO₃²⁻) puis en carbonate (HCO₃⁻). Ainsi le CO₂ atmosphérique se retrouve sous la forme de CO₃²⁻, HCO₃⁻, CO₂ dissous et acide carbonique. Le tableau suivant indique les proportions de chaque composé dans l'équilibre du carbone des océans.

Tableau 2. Proportions des différents composés carbonés dans l'océan (tiré de ISRS, 2007).

	Niveau pré-industriel	Niveau actuel	Niveau projeté si le taux de CO ₂ double
CO ₃ ²⁻	11%	9%	7%
HCO ₃ ⁻	88%	90%	93%
CO ₂ dissous et acide carbonique	1%	1%	négligeable

Les océans sont d'ores et déjà 30% plus acides qu'ils ne l'étaient au début de la révolution industrielle, et ils absorbent 22 tonnes de dioxyde de carbone chaque jour. A la fin du siècle, l'acidification pourrait être une fois et demie plus élevée. A l'origine, les scientifiques pensaient que

les océans pourraient apporter une solution à l'augmentation des gaz à effets de serre, car ils absorbent près d'un tiers du dioxyde de carbone émis dans le monde entier. Mais ils savent désormais que la chimie des océans a été tellement modifiée que les océans ne jouent désormais plus le rôle de « puits à carbone » qu'ils représentaient autrefois.

Il existe plusieurs moyens de suivre le taux de CO₂ dans l'eau de mer :

- Suivre l'alcalinité / le pH de l'eau de mer à grâce à des mesures sur échantillons ;
- Etudier l'évolution du cycle des carbonates grâce à des analyses potentiométriques sur des échantillons prélevés ;
- Suivre la pression partielle de CO₂ dans l'eau grâce à une sonde à enregistrement en continu.

L'acidification de l'océan est suivie par la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) depuis plusieurs années (<http://www.pmel.noaa.gov/co2/moorings/>). Cet organisme scientifique a mis en place plusieurs instruments en mer afin de mesurer la pression partielle de CO₂ :

Capteur fixé sur une bouée fixe en surface (Projet TAO - Tropical Atmosphere Ocean)

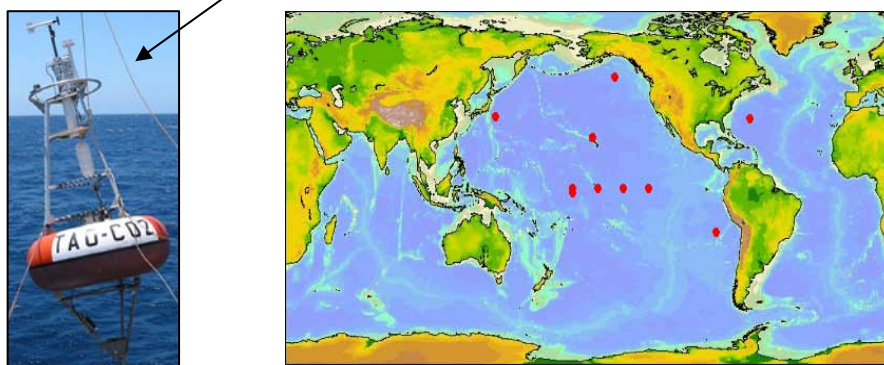


Figure 11 Répartition des bouées TAO dans l'océan mondial

Multi capteurs sur bouée fixe « Ocean Station Papa », déployée en 2007 à 700 miles au large de Seattle, qui suit les interactions océan-atmosphère et l'acidification des océans (NOAA). D'un diamètre de trois mètres, elle est équipée d'un ensemble de capteurs qui mesurent entre autres la quantité de dioxyde de carbone absorbée par le Pacifique Nord et le pH, le niveau d'acidité de l'océan. Ancrée par 1600 mètres de fond, la bouée retransmet ses informations aux scientifiques via un satellite. Selon les données issues de ces stations, de tous les océans, le Pacifique Nord pourrait être le plus vulnérable à l'acidification.



OCS Papa Mooring

Stations CREWS (*Coral Reef Early Warning System*), dans le cadre du réseau ICON (*Integrated Coral Observing Network*). Ce réseau est largement impliqué dans l'utilisation d'instrumentation de mesure d'acidification des océans et dans l'étude des effets du changement climatique sur la santé des récifs coralliens. Les stations à enregistrement continu de pCO₂ telles que les stations CREWS sont utiles pour mettre en évidence des variations à un endroit donné. L'utilisation de sondes à pCO₂ a un coût relativement élevé et nécessite l'intervention de plongeurs pour les déployer (Figure 12). Par ailleurs, leur calibration est une phase cruciale qui conditionne la fiabilité des données relevées. Un certain nombre de stations sont déjà déployées dans le monde entier, notamment dans les Caraïbes et en Australie (Figure 13).

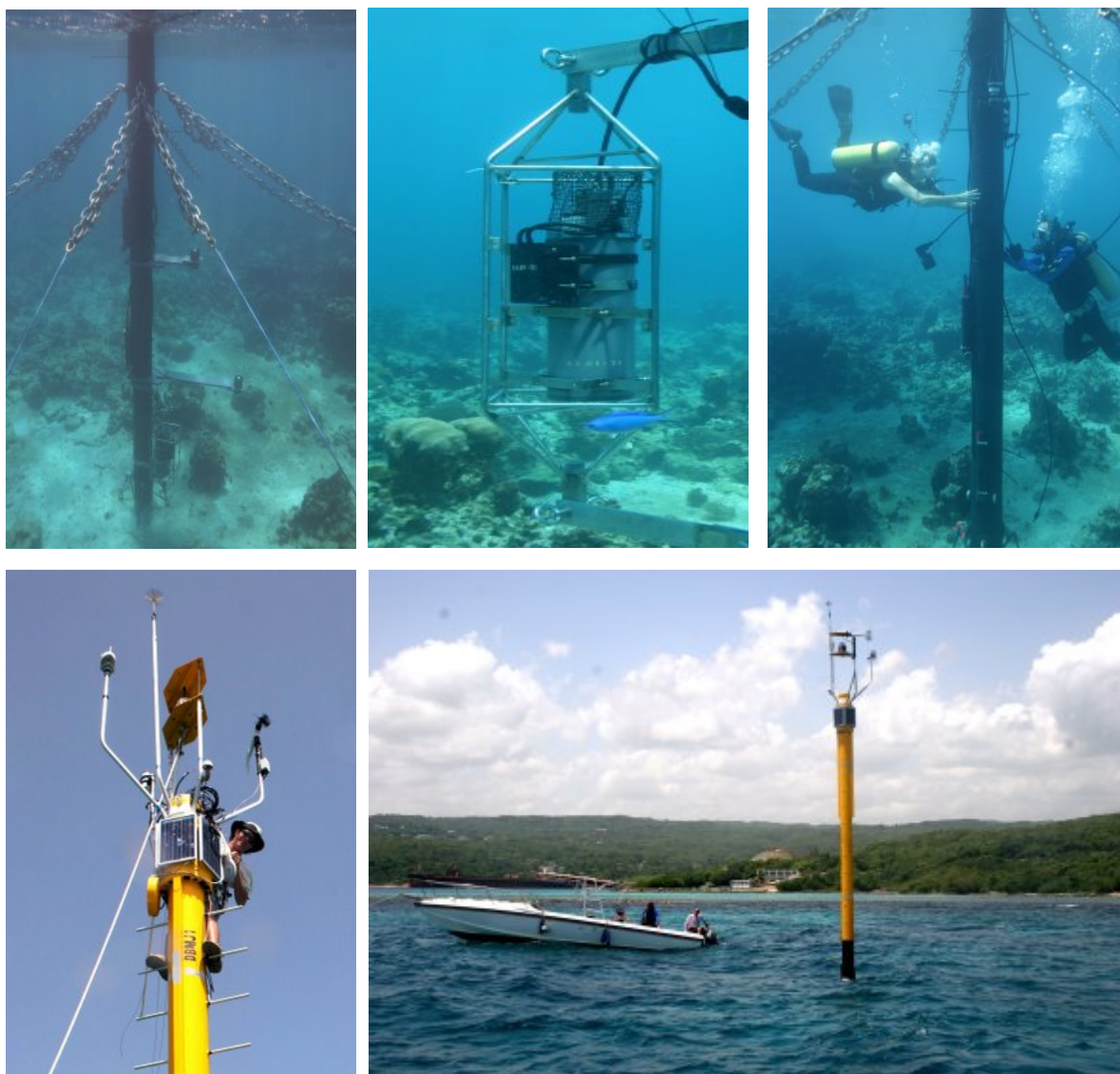


Figure 12. Station CREWS en Jamaïque (en haut, de la gauche vers la droite : Câbles de soutien - Capteur à $p\text{CO}_2$ - Pylône ancré ; en bas, de la gauche vers la droite : Partie émergée avec GPS et capteurs météorologiques - Vue générale)

Existing and Proposed CREWS* Station Sites,
fy 2001 through fy 2010

*CORAL REEF EARLY WARNING SYSTEM

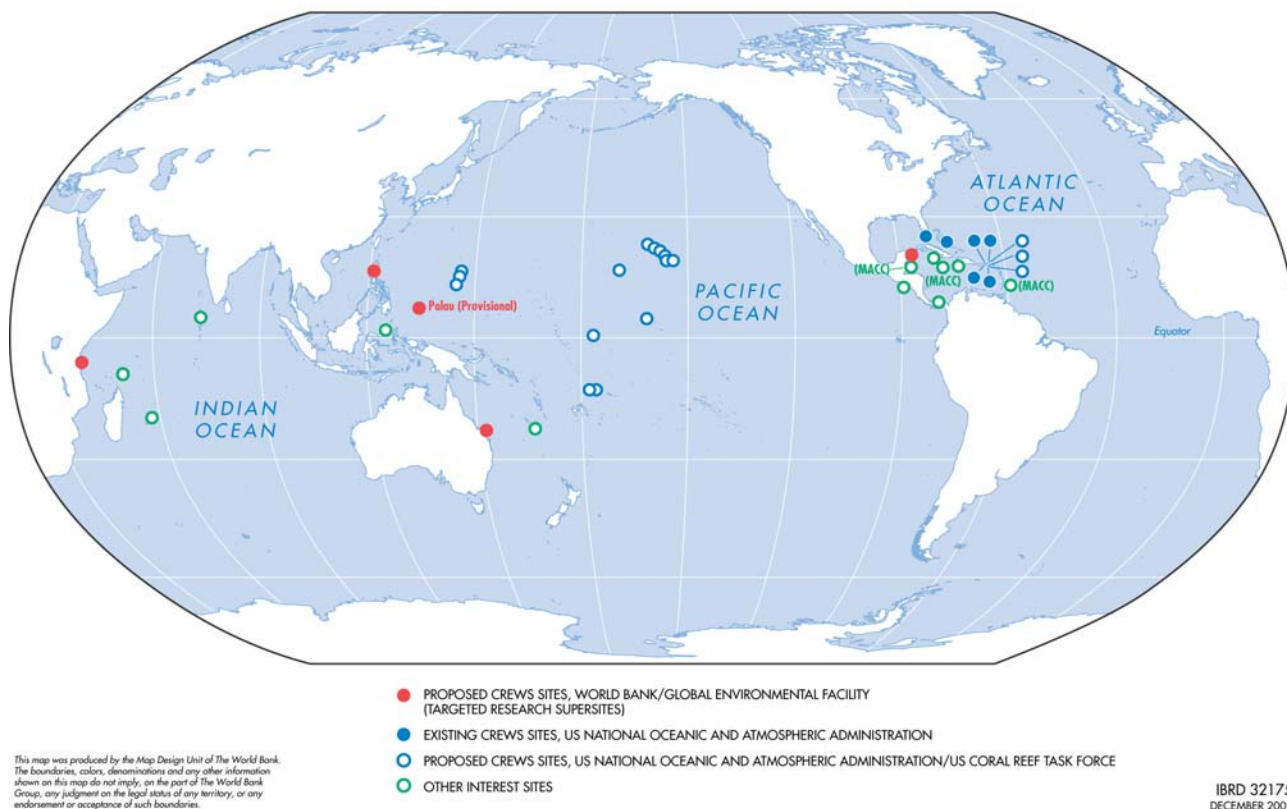


Figure 13. Répartition des stations CREWS existantes ou proposées

D'autres types de mesures existent, impliquant le prélèvement d'échantillons d'eau de mer. Il est bon de rappeler que l'acquisition de données sur la $p\text{CO}_2$ et/ou l'alcalinité/pH est cruciale pour définir l'état de saturation en aragonite de l'eau de mer afin d'appréhender les possibles effets sur les coraux vivants et les organismes micro-perforants (participant à l'érosion globale des récifs coralliens) à plus ou moins long terme.

La collecte des échantillons d'eau de mer est très facile à faire. La conservation des échantillons de mer pour analyse de l'alcalinité totale se fait au réfrigérateur avec du mercure (en faible quantité). Les échantillons d'eau destinés à la mesure de pH doivent être analysés le plus rapidement possible (sous 24/48h). Cela nécessite la disponibilité d'un laboratoire de biogéochimie des carbonates. Les mesures de pH et de l'alcalinité totale nécessitent un apprentissage au préalable ; l'interprétation des données afin de déterminer la $p\text{CO}_2$ de l'eau ainsi que l'état de saturation en aragonite de l'eau, requiert un niveau d'expertise élevé ou une formation d'au moins 1 an sur la biogéochimie des carbonates (Tribollet, comm. pers.). Les méthodes de mesures de l'alcalinité totale et des carbonates sont décrites ci-après.

Alcalinité (AT) - Carbone inorganique total (ΣCO_2)

Echantillonnage

L'eau de mer est prélevée dans des bouteilles Niskin dans un flacon en verre de 0,5 l avec bouchon à vis. Au moment de l'échantillonnage, les bouteilles Niskin sont munies d'un petit tuyau en silicone de façon que le remplissage des flacons se fasse par le fond. Après 2 rinçages, les flacons sont remplis en laissant déborder 1 à 2 fois leur volume. Les échantillons sont dosés à bord dans les 12 heures, en général. Au maximum dans les 48 heures. Ils sont conservés au frais et à l'obscurité lors de l'attente du dosage.

Mesure

On utilise une méthode potentiométrique adaptée de celle d'Edmond (1970) : l'eau de mer est considérée comme une base faible. En première approximation, son dosage, dans une enceinte étanche, par un acide fort (HCl 0,N) donne les 2 points équivalents de l'acide carbonique formé par le CO_2 dissous. L'alcalinité totale est proportionnelle au volume d'acide au deuxième point équivalent, la concentration en ΣCO_2 est proportionnelle à la différence des volumes aux 2 points équivalents. Pour être plus exact, le deuxième point équivalent correspond en fait à toutes les espèces alcalines présentes dans l'eau de mer, et en particulier à la plus importante après celle des carbonates : les borates. L'alcalinité ainsi dosée par cette méthode est l'alcalinité totale. Pour obtenir l'alcalinité des carbonates, il faut retrancher l'alcalinité apportée par les autres espèces alcalines (les borates, en particulier).

La courbe du potentiel en fonction du volume d'acide ajouté est enregistrée. Les 2 points équivalents sont calculés par la méthode préconisée par Dickinson (1991).

La reproductibilité de la méthode, évaluée par des mesures d'échantillons prélevés sur une même bouteille Niskin, est de l'ordre de 0,2 à 0,3 % pour les 2 paramètres.

Unités

Les résultats sont exprimés, conformément aux recommandations internationales, en micromoles par kg ($\mu\text{M kg}^{-1}$) pour le carbone inorganique total et en milliéquivalents par kg (meq kg^{-1}) pour l'alcalinité totale.

4.2.2.5 La modification des courants océaniques

La circulation océanique thermohaline joue un rôle important dans la régulation du climat en contrôlant la distribution de la chaleur et des gaz à effet de serre. La circulation océanique repose sur des différences de salinité et de températures entre les différentes masses d'eaux qui composent les océans (d'où son nom de circulation thermo-température, haline-salinité). De nombreux chercheurs s'accordent à penser que la circulation des masses d'eaux, que ce soit l'échelle régionale (phénomènes d'upwelling générés par les vents) ou globale (circulation thermohaline) sera affaiblie en raison des changements climatiques ; d'autres chercheurs doutent sur cette question. Il n'y a actuellement pas de consensus sur ce sujet (IPCC, 2001 ; 2007).

L'explication de ce ralentissement repose sur le fait que la modification du cycle hydrologique atmosphérique provoque des variations dans la salinité des eaux : les régions sub-tropicales à fort potentiel d'évaporation et très salées auront tendance à devenir encore plus salées (compte tenu du fait que la pluviométrie est censée diminuer dans ces régions) ; tandis qu'aux hautes latitudes, la pluviométrie est censée augmenter, provoquant une baisse de la salinité des eaux. A cela se rajoute la fonte des glaces arctiques qui entraînera des conséquences sur la salinité des eaux de l'Atlantique Nord. Ainsi, l'apport massif d'eaux douces déstabilisera la circulation thermohaline, se matérialisant par un ralentissement voire arrêt de la circulation globale (Montaggioni, 2007).

Une baisse de 0 à 40% de la circulation thermohaline est attendue à l'horizon 2100 (Buddemeier *et al.*, 2004 ; Montaggioni, 2007).

Un réchauffement plus important est attendu près des pôles, et pourra donc concerner plus particulièrement la mer de Norvège où plongent actuellement les eaux du Gulf Stream ; or si l'eau s'y réchauffe en surface elle deviendra moins dense. A terme la plongée des eaux du Gulf Stream pourrait donc avoir lieu à des latitudes moins élevées (voir Figure 14).

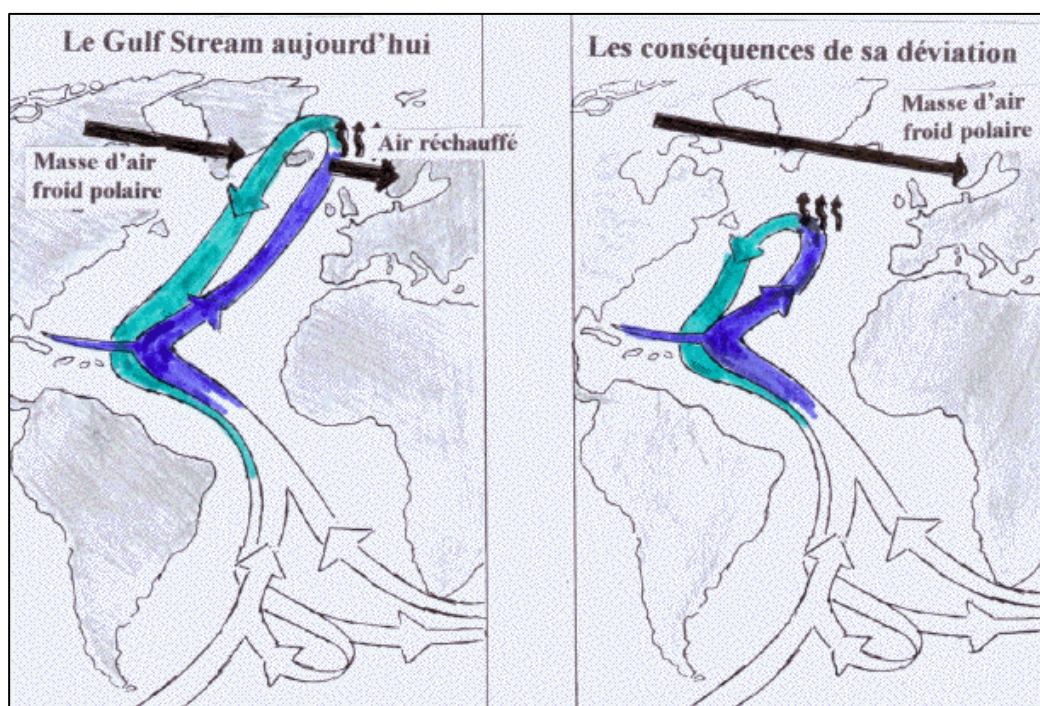


Figure 14. Un exemple de conséquence supposée de la déviation du Gulf Stream. La partie bleu foncée représente le courant de surface, et la partie bleu clair le courant profond en retour.

Où est passé le Gulf Stream ?

L'étude publiée par le très respecté magazine britannique *Nature* confirme, tout en énonçant quelques réserves, une information déjà connue : le Gulf Stream est perturbé. Ce courant marin évacue une partie de la chaleur du golfe du Mexique vers l'Atlantique nord. Son débit a diminué de 30% en cinquante ans. L'information n'est pas nouvelle car à l'époque où l'on commençait à beaucoup parler du réchauffement de la planète en raison des activités humaines et de leurs rejets polluants dans l'atmosphère, les scientifiques commençaient déjà à soupçonner une perte de vigueur du Gulf Stream dans l'Atlantique nord, pouvant conduire à un refroidissement local des climats, sur la façade atlantique de la France, et sur la rive ouest des pays scandinaves. Il y a une dizaine d'années, les Danois en particulier, n'avaient guère envie de parler de cette possible modification de leur climat, avec des effets prévisibles sur leur économie et leur société.

Aujourd'hui les scientifiques qui publient ces travaux, les plus récents, prennent bien soin de relativiser leurs résultats. Ils expliquent que les mesures effectuées, pour faire un bilan de ce courant marin, ont été réalisées sur une seule partie du Gulf Stream. De plus, les observations ont eu lieu sur une courte période d'environ un mois. Et *«rien ne dit que ces mesures auraient été les mêmes deux mois, ou un an plus tard»* commente un expert français. L'année de référence concernant le Gulf Stream est 1957. Cette année-là, les océanographes ont commencé à étudier ce courant marin, prenant des relevés de son débit et estimant la quantité de chaleur qu'il véhicule. Plus tard, en 1981 et en 1992, de nouvelles mesures furent prises à l'aide d'une série de sondes réparties dans l'océan Atlantique, du Maroc à la Floride. Le bilan de ces observations n'avait pas révélé de modifications significatives du Gulf Stream. En revanche, les dernières campagnes d'observation, en 1998, puis en 2004, ont montré des changements notables du comportement de ce courant marin. **Il véhicule moins d'eau chaude jusqu'au Groenland. Et dans l'autre sens, moins d'eau froide repart vers le sud, en provenance des latitudes polaires.** Avec le recul dans le temps qu'ils ont désormais sur le comportement du célèbre courant marin, les scientifiques peuvent établir quelques affirmations. Et pour la branche du Gulf Stream arrivant en face de l'Europe, **le débit est en régression.** Il était de 20 millions de tonnes par seconde en 1957, il est passé à 14 millions de tonnes par seconde en 2004. Conclusion : *«La chaleur qu'elle (cette branche) véhicule apporte une contribution substantielle au climat modéré de l'Europe maritime et continentale, et tout ralentissement de la circulation océanique aurait des implications profondes pour les changements climatiques (...) Nous avons été très surpris que les chiffres de la circulation océanique en 2004 soient si différents des estimations précédentes»*, a estimé le professeur Bryden, auteur de la toute dernière étude sur le Gulf Stream.

L'interruption de la circulation océanique dans l'Atlantique pourrait faire baisser de 4 degrés la température moyenne en Europe, indiquent encore les spécialistes. *«Ce ne sera pas une chose instantanée mais de l'ordre d'une décennie»*, a indiqué un autre chercheur britannique, après la publication de ces travaux. *«Nous ne parlons pas d'un nouvel âge glaciaire, mais d'hivers plus extrêmes et plus froids»*, a-t-il encore expliqué. Pourtant, les scénarios les plus récents concernant le réchauffement de la planète ne vont pas du tout dans ce sens puisqu'ils parlent de cultures d'orangers sur la Côte d'Azur, de plantations d'oliviers sur les rives de la Loire, et même de cultures de maïs au Danemark. Alors, qui croire ? Pour les scientifiques, c'est justement le commencement du réchauffement climatique qui provoque une transformation du Gulf Stream. *«Nous observons depuis longtemps d'importants changements de salinité dans l'Atlantique nord, et la difficulté qu'ont les eaux profondes à se former»*, explique une chercheuse française. La diminution de la salinité est généralement attribuée à un changement du régime des pluies. Les précipitations ont augmenté dans cette région du monde. L'eau douce supplémentaire vient de la fonte de la banquise et du rétrécissement de la calotte glaciaire qui entoure le Groenland. *«Ce qui complique les choses, c'est que vous avez un réchauffement climatique en cours. Si vous ralentissez la circulation océanique, vous provoquerez un refroidissement localisé, pas sur l'ensemble de la planète»*, explique encore un autre scientifique. Contre toute attente, les changements climatiques pourraient ainsi provoquer un refroidissement dans certaines zones très localisées.

http://www.rfi.fr/actufr/articles/072/article_40205.asp

4.2.3 Les variations dans la cryosphère

Les glaces couvrent actuellement 10% de la surface de la Terre en permanence, dont la grande majorité est représentée par les glaces de l'Antarctique et du Groenland. La glace couvre aussi approximativement 7% des océans en moyenne annuelle. En plein hiver, la neige couvre environ 49% de la surface terrestre dans l'hémisphère nord.

Une propriété essentielle de la neige et de la glace est leur grand albédo de surface : une quantité très importante (près de 90%) du rayonnement solaire est reflétée par la neige et les surfaces de glace, alors que seul 10% est reflété par l'océan et les terres boisées ; ainsi les modifications de la couche neigeuse et de la couverture de glace ont un rôle majeur dans l'évolution des climats. De plus, la cryosphère stocke environ 75% de l'eau douce mondiale. À l'échelle régionale, des variations dans la couverture neigeuse en montagne, les glaciers et des petites calottes glaciaires jouent un rôle crucial dans la disponibilité en eau douce.

La couverture de neige a diminué dans la plupart des régions, particulièrement au printemps, dans les 2 hémisphères. Le secteur maximal couvert par les sols saisonnièrement gelés a diminué de 7% dans l'hémisphère nord, depuis 1900, avec une diminution vernale de plus de 15%.

Il est maintenant clairement établi que la rétractation généralisée des glaciers et des calottes glaciaires (en particulier la diminution des inlandsis Groenlandais et de l'Antarctique) ont contribué à la montée du niveau des mers. Ce phénomène s'est accéléré depuis 1990.

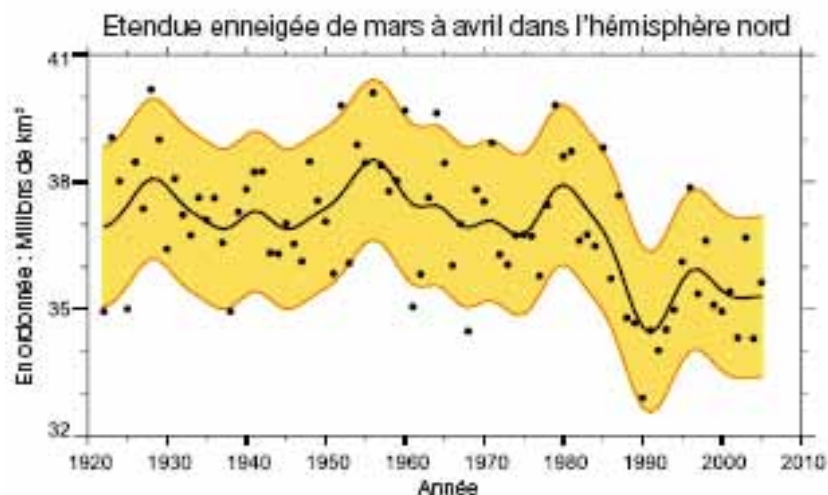


Figure 15. Etendue enneigée pendant la période avril–mars dans l'hémisphère nord à partir d'index de couverture nuageuse à une station (avant 1972) et de données satellitaires (pendant et après 1972). La courbe lisse montre des variations à l'échelle de la décennie avec une marge de données de 5 à 95 % ombrée en jaune (Source : IPCC, 2007).

4.3 Le changement climatique observé dans le Pacifique et en Nouvelle-Calédonie

4.3.1 Le changement climatique dans la région Pacifique

D'après la classification établie dans les rapports d'expertise du GIEC, la Nouvelle-Calédonie appartient à un ensemble d'îles et d'atolls dénommé « les petits états insulaires » (Small Islands States). Ils sont majoritairement situés dans les tropiques et les sous-tropiques et couvrent les régions du Pacifique, de l'Indien, de l'Atlantique ainsi que les Caraïbes et la Méditerranée. Les petits états insulaires présentent des caractéristiques communes : leur superficie réduite, ils sont entourés d'océans, leurs ressources naturelles sont limitées, ils sont susceptibles aux

catastrophes naturelles et événements extrêmes, ils subissent une isolation géographique, ils présentent une économie très ouverte et sensible aux chocs extérieurs, leurs populations sont importantes, denses et avec des taux de croissance élevés, les infrastructures y sont peu développées, et enfin les budgets, ressources humaines et compétences y sont limitées. De part leur nature, ces régions sont particulièrement sensibles aux variations du climat, à la montée du niveau de la mer et aux événements climatiques extrêmes (IPCC, 2007). Les ressources marines, l'agriculture, le tourisme, les ressources en eau, la sécurité énergétique et le milieu naturel, éléments essentiels de l'économie de ces pays, sont extrêmement dépendants du climat et vulnérables aux phénomènes climatiques dangereux. En outre, dans un monde de plus en plus interdépendant, les petits états insulaires ne peuvent plus vivre uniquement de leur propre production, ce qui explique que les conséquences économiques de l'ouragan Katrina, liées à l'augmentation du prix du pétrole, aient été aussi dramatiques pour les îles du Pacifique que ses conséquences matérielles directes. Un ouragan peut par ailleurs ravager des populations entières, comme ce fut le cas à Niue dans le Pacifique Sud en 2004 (OMM, 2006). Pour ces raisons, les petits états insulaires sont traités séparément dans l'étude de l'évolution du climat et des changements climatiques et des plans d'action adaptés à leurs inquiétudes et besoins sont encouragés afin de prendre en compte leurs spécificités.

En ce qui concerne le Pacifique Central, le climat des îles est influencé par la combinaison de plusieurs facteurs : le régime de l'alizé, les cellules de Hadley (circulation atmosphérique dans les tropiques), la circulation de Walker (cellule du Pacifique), des zones de convergence variant de manière saisonnière telles que la zone de convergence du Pacifique Sud et la zone de convergence inter-tropicale, les ceintures de hautes pressions sub-tropicales quasi-permanentes, et l'influence prédominante du phénomène El Niño qui entraîne des variations annuelles marquées dans le climat.

Comme au niveau global, les températures de l'air et de l'océan ont augmenté entre 1901 et 2004. Cependant il semblerait que cette augmentation ait été plus importante dans les régions des petits états insulaires qu'au niveau global. En effet, au niveau du Pacifique Sud, les températures de l'air et des océans auraient crû de 0,6 à 1°C depuis 1910. Les tendances observées entre 1961 et 2003 ont également montré un accroissement du nombre moyen de jours chauds et de nuits douces, accompagné d'une baisse du nombre moyen de jours frais et de nuits froides, particulièrement dans les années qui suivent les années marquées par El Niño. Les variations de l'activité cyclonique, typhons et tempêtes sont dominées par une variabilité décennale et par le phénomène El Niño, si bien que les cyclones tropicaux sont redistribués entre les différents bassins : lorsqu'on observe une augmentation des cyclones dans un bassin, l'autre bassin subit une diminution de son activité cyclonique. L'année cyclonique la plus active a été 1997, lorsqu'un très fort El Niño a débuté, suggérant que la température de surface de la mer a joué un rôle clé dans ces phénomènes. Il est clairement établi que le nombre de tempêtes atteignant les catégories 4 et 5 est globalement plus élevé depuis 1970. En revanche le nombre total de cyclones et leur durée semble avoir diminué sur tous les bassins. Les îles du le Pacifique Sud ont tendance à subir plus de cyclones pendant les années El Niño que pendant les périodes de La Niña.

Le Pacifique est doté de 27 stations de suivi du niveau de la mer. Les données récoltées depuis plus de 25 ans montrent une hausse moyenne de +0,77mm/an sur la totalité du bassin Pacifique. Cependant il existe des disparités régionales, comme le montre la figure suivante, issue des mesures réalisées dans le cadre du projet SPSLCMP (*South Pacific Sea Level & Climate Monitoring Project*), stations SEFRAME. A savoir que les valeurs citées représentent le niveau relatif de la mer net, c'est-à-dire auquel a été soustrait l'effet du mouvement vertical des plaques terrestres et l'effet de la pression barométrique.

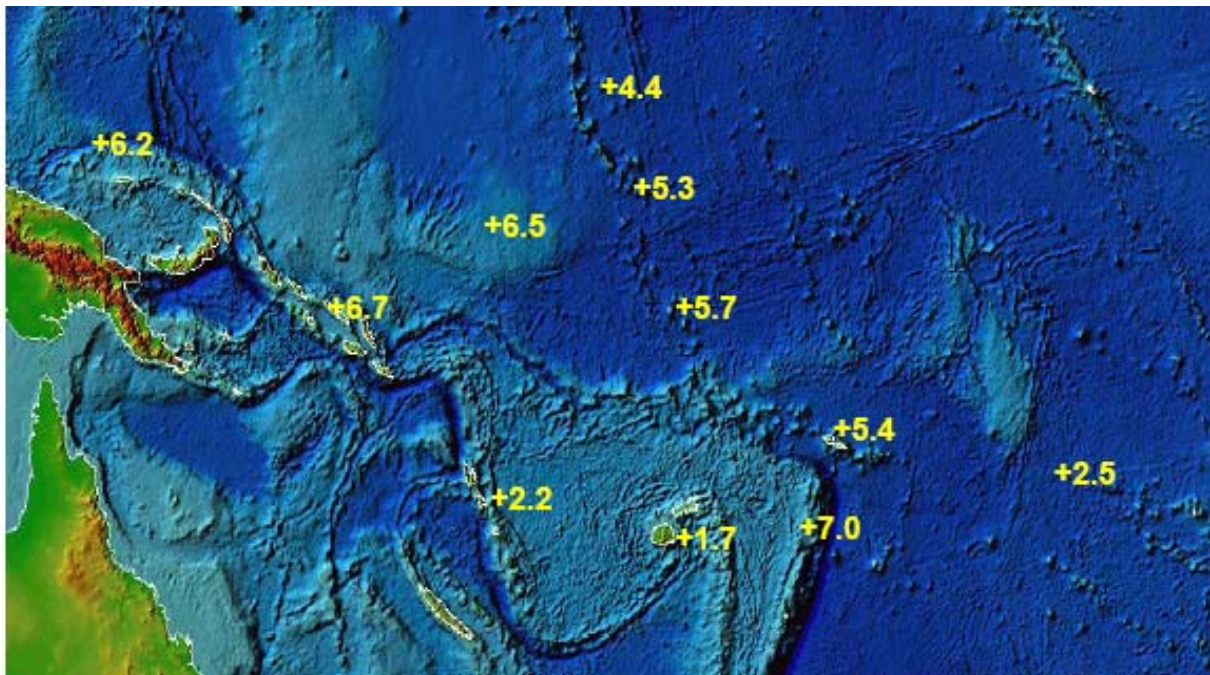


Figure 16. Evolution du niveau relatif de la mer net en mm/an, entre 1993 et 2006 (Source : SPSLCMP, 2006).

4.3.2 Le changement climatique en Nouvelle-Calédonie

4.3.2.1 Evolution de la température de l'air

Des études menées par les services météorologiques de Nouvelle-Zélande ont montré que la température de l'air a augmenté de 0,6-0,7°C depuis 1920 à Nouméa.

Des travaux récents menés par la NIWA (*New Zealand Institute of Water and Atmospheric Research*) ont également montré des changements notables dans certains aspects du climat dans le Pacifique Sud depuis le milieu des années 70 : l'Ouest de Kiribati, le Nord des îles Cook, Tokelau, et le Nord de la Polynésie française sont devenus plus humides ; tandis que la Nouvelle-Calédonie, Fidji, et Tonga sont devenus plus sèches. De même, Samoa, l'Est de Kiribati, Tokelau et le Nord de la Polynésie française sont devenus plus nuageux, avec des nuits plus chaudes ; tandis que la Nouvelle-Calédonie, Fidji, Tonga, le Sud des îles Cook, Tuvalu et l'Ouest de la Polynésie française sont devenus plus chaudes et plus ensoleillées.

D'après deux rapports récents de Météo-France Nouvelle-Calédonie (Météo France, 2006 et 2007), nous disposons d'un certain nombre de données climatiques sur le Territoire, dont les principaux points qui nous intéressent dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- La série de données météorologiques dont nous disposons sur le Territoire est de relative courte durée (depuis 1950).
- L'évolution à long terme des précipitations est difficile à mettre en évidence compte tenu d'une grande variabilité interannuelle. Certaines stations présentent toutefois des pentes positives (Nouméa, Plum, Yaté) et d'autres des pentes négatives (Koumac, Canala, La Tontouta, etc.) mais aucunes ne montrent d'évolution significative pour la période 1951-2005. Il y a cependant plus de postes dont l'évolution des précipitations annuelles est en baisse.
- L'élévation de la température moyenne est comprise entre +0,9°C et +1,0°C entre 1951 et 2005 (+0.019°C par an sur la période 1954-2003). Comme le montre le graphique ci-

après, après une période relativement fraîche de 1965 à 1969, les températures ont augmenté par paliers jusqu'à l'année record de 1998.

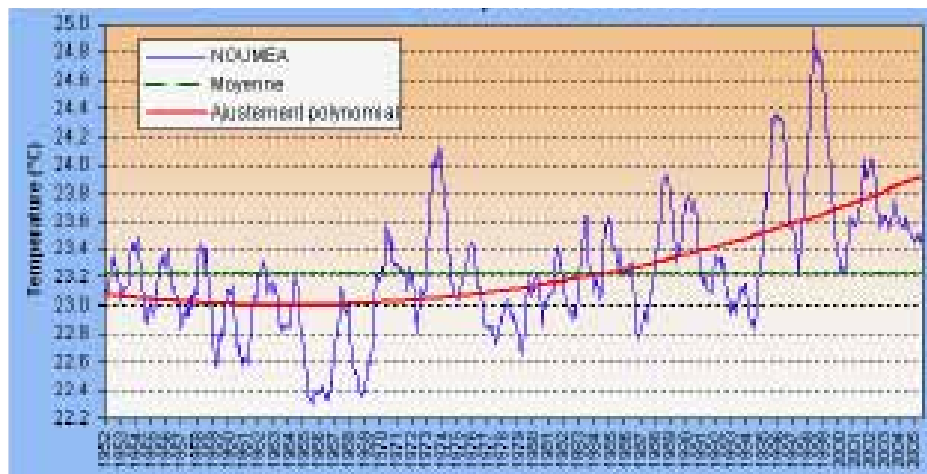


Figure 17. Evolution de la température de l'air à Nouméa moyennée sur 12 mois sur la période 1951-2005
(tiré de Météo France, 2006 ; 2007)

- On observe une augmentation du nombre de jours où la température maximale quotidienne a été supérieure à 30°C de façon notable puisque ce chiffre a quasiment doublé sur la période 1954-2005 (données sur Koumac). A l'inverse, le nombre de jours où la température minimale quotidienne a été inférieure à 16°C a fortement chuté, passant de plus de 60 jours par an à une quarantaine seulement ces dernières années. Cette tendance est observée pour tous les postes de référence (voir Figures 18 et 19).

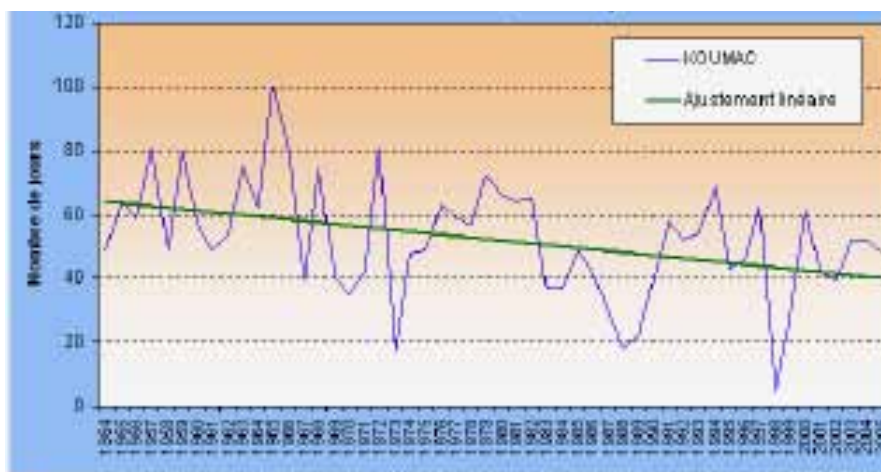


Figure 18. Nombre de jours où la température minimale à été <16°C, à Koumac, sur la période 1951-2005
(tiré de Météo France, 2006 ; 2007).



Figure 19. Nombre de jours où la température maximale a été >30°C, à Koumac, sur la période 1951-2005 (tiré de Météo France, 2006 ; 2007).

- Selon les estimations de Météo France Nouvelle-Calédonie, la température de l'air pourrait s'élever de 1,5 à 2 °C en saison fraîche comme en saison chaude. La quantité de pluie annuelle pourrait diminuer de 5 à 8%. La saison sèche pourrait être plus sèche qu'actuellement, tandis que la saison humide devrait rester identique à ce qu'elle est actuellement.

4.3.2.2 Evolution de la pluviométrie

L'évolution à long terme des précipitations est difficile à mettre en évidence compte tenu d'une grande variabilité interannuelle. Sur les 100 stations de relevés pluviométriques en Nouvelle-Calédonie, la majorité présentent une tendance à la baisse comme Koumac, Canal, La Tontouta. Si jusqu'à présent, il n'a pas été démontré de tendance significative du régime pluviométrique en Nouvelle-Calédonie pour la période 1951-2005, il est néanmoins programmé, au cours de l'année 2009, de saisir et d'homogénéiser les données antérieures à 1951 et remontant à 1870, et de les compiler avec les données 1951-2005 afin d'affiner le modèle (en terme de résolution spatio-temporelle) et de préciser la tendance pluviométrique.

Quoi qu'il en soit, avec les données disponibles aujourd'hui, Il est important de noter que la tendance de la pluviométrie est biaisée par le phénomène ENSO marqué dans le bassin Ouest Pacifique. Le changement climatique a tendance à engendrer des phénomènes Nino de plus en plus nombreux causant ainsi un déficit pluviométrique dans notre zone. La pluviométrie simulée au travers de modèles d'interpolation diminuerait d'environ 8 à 10% jusqu'en 2100.

4.3.2.3 Evolution de la température et de la salinité de surface de la mer

Selon les données disponibles de l'ONERC (cf § 4.4.1 et 4.4.2), la température moyenne de surface de la mer sur la région de la Nouvelle-Calédonie est en constante augmentation depuis 1870, avec une hausse plus prononcée depuis 1950 (voir Figure 21). Ceci se vérifie à la fois par les données issues de satellites (réseau SeasNet, depuis 1992) et les données reconstruites de températures de la mer (ERSST et HadISST).

Selon les données disponibles de l'ONERC (cf § 4.4.3), la salinité moyenne de surface de la mer sur la région de la Nouvelle-Calédonie est en baisse, de -0,1pss en 50 ans (voir Figure 25).

4.3.2.4 Source des données de température et de salinité de surface de la mer.

Les données d'océanographie physique (température de surface, température de la colonne d'eau, salinité de surface, salinité dans la colonne d'eau) sont collectées par l'IRD depuis 1959 en Nouvelle-Calédonie. Elles font l'objet d'une base de données gérée par le laboratoire d'océanographie physique du centre IRD de Nouméa au sein du programme ECOP. Les informations suivantes sont issues du site internet du programme ECOP (<http://www.ird.nc/ECOP>).

Ces données ont été collectées soit depuis des navires de commerce, soit depuis des stations côtières en plongée sous-marine.

Les différents moyens de collecte sont récapitulés ci-après :

- Relevés au seau météorologique soit depuis un navire de commerce, soit depuis une station côtière dès 1969
- Relevés par XBT à partir de navires de commerce, à partir de 1979 enregistrant toutes les 6 heures la température entre la surface et 700 m de profondeur
- Relevés de mesures automatiques par thermosalinographes installés sur des navires de commerce à partir de 1990

NAVIRES DE COMMERCE :

Relevés au seau météorologique

Depuis 1969 des navires de commerce sont sélectionnés par le laboratoire d'océanographie physique du centre IRD de Nouméa pour effectuer des prélèvements d'eau de surface à l'aide de seaux météorologiques. Ces échantillons sont ensuite analysés pour déterminer la température et la salinité de surface.

Ces données sont systématiquement visualisées et cartographiées le long des lignes de navigation. Ceci permet de détecter les valeurs aberrantes de manière qualitative, la détection étant basée sur des limites physiques et sur une comparaison de chaque valeur avec ses valeurs voisines.

L'accès aux données est possible via : http://www.ifremer.fr/orstom/sss/sss_dac/sss_dac.html

Relevés par XBT

Les réseaux de navires de commerce font partie du programme international *Ship Of Opportunity Programme* (SOOP) (http://www.gos.udel.edu/goos/SOOP_program_overview.htm).

Les profils de température correspondant sont transmis en temps réel via le système Argos.

Dans un premier temps les profils de température XBT sont visualisés et cartographiés afin de détecter les valeurs aberrantes de manière qualitative. Cette détection est basée essentiellement sur des limites physiques et sur une comparaison de chaque profil avec ses profils voisins le long de la ligne de navigation. Chaque valeur est ensuite comparée quantitativement avec une moyenne climatologique locale plus/moins un écart type, les valeurs climatologiques étant calculées sur la période 1979-1985. Des corrections sont effectuées si nécessaire. Les données validées à Nouméa sont ensuite transmises au centre de sub-surface de Brest qui procède à ses propres validations.

L'accès aux données est possible via : http://www.ifremer.fr/orstom/xbt/xbt_info.html

Relevés par thermosalinographes

Depuis 1990 des navires de commerce sont sélectionnés et équipés de thermosalinographes par le laboratoire d'océanographie physique du centre IRD de Nouméa. Ils effectuent des mesures de température et de salinité de surface le long de leur ligne de navigation. Les mesures correspondantes sont transmises en temps réel via le système GOES depuis la mi-1998.

Actuellement il existe deux types de données TSG: celles traitées en temps différé après chaque rotation du navire et celles transmises en temps réel via le système GOES.

- Données en temps différé: les données de température et de salinité de surface issues des thermosalinographes embarqués sont systématiquement visualisées et cartographiées le long des lignes de navigation. Cette première étape de validation permet de détecter les valeurs aberrantes de manière qualitative, la détection étant basée sur des limites physiques et sur une comparaison de chaque valeur avec ses valeurs voisines. Chaque valeur est ensuite comparée quantitativement avec une moyenne climatologique locale plus/moins un écart type, les valeurs climatologiques étant calculées sur la période 1979-1992 (cf. Delcroix, 1998). Les coefficients de pré- et post-calibration des thermosalinographes fournis par Seabird Inc. sont ensuite comparés et une correction est appliquée si nécessaire.
- Données temps réel: ATTENTION la validation de ces données est succincte et très grossière pour le moment.

L'accès aux données est possible via un CD-Rom " Three Decades of In Situ Sea Surface Salinity Measurements in the Tropical Pacific Ocean " 1969-1999.

STATIONS COTIERES

Depuis 1958 le laboratoire d'océanographie physique du centre IRD de Nouméa a développé un réseau de stations côtières dans le Pacifique tropical sud-ouest. Une partie de ces stations est gérée dans le cadre du programme ZoNéCo depuis 1992.

D'abord basées sur des prélèvements manuels d'eau de mer, presque toutes ces stations sont maintenant automatisées pour la mesure de la température de surface (entre 0 et 10 m). Deux stations (Uitoe et Wallis) font également l'acquisition de la salinité de surface.

Les appareils de mesure automatique (ONSET) sont remplacés à chaque relève des stations côtières, tous les 6 à 12 mois. La validation des données est réalisée par un contrôle de la température et de la salinité avant et après la période de mesure. Cette opération est réalisée dans des bacs spécialisés au laboratoire d'océanographie physique du centre IRD de Nouméa.

4.3.2.5 Evolution du niveau moyen de la mer

Les informations que nous avons obtenues sur l'évolution du niveau de la mer en Nouvelle-Calédonie sont contradictoires.

Selon l'ONERC, il n'y aurait pas d'évolution significative du niveau de la mer depuis 1967 sur la Nouvelle-Calédonie (voir Figure 26).

Selon les données du SHOM Brest, récoltées sur les marégraphes de Chaleix (1961-2005) et Numbo (2005-2008), le niveau de la mer semble montrer une tendance à la hausse. Il est toutefois important de noter que le SHOM dispose à Brest de données originales, de nombreuses informations et métadonnées, informations sur les instruments successifs, références utilisées et autres séries pour une étude complète de cette série de mesure mais il n'existe à priori aucun résultat publié concernant l'évolution du niveau de la mer en Nouvelle-Calédonie (R. Créach, comm. pers.). La figure suivante (Figure 20) montre un tracé rapide des niveaux moyens annuels disponibles. Un tracé correct et l'obtention de résultats exploitables demanderait une étude visant à assurer la continuité Chaleix - Numbo à étudier le décalage des niveaux moyens PSMSL-SHOM 1976-77-78-80-81, à effectuer un recalcul des niveaux moyens 1960-65, et à étudier les données GPS disponibles pour la stabilité. L'objet premier de la réalisation de ces mesures par le SHOM étant la prédiction de la marée, ces études ne sont pas à l'ordre du jour (R. Créach, comm. pers.).



Niveaux moyens annuels de la mer à Nouméa

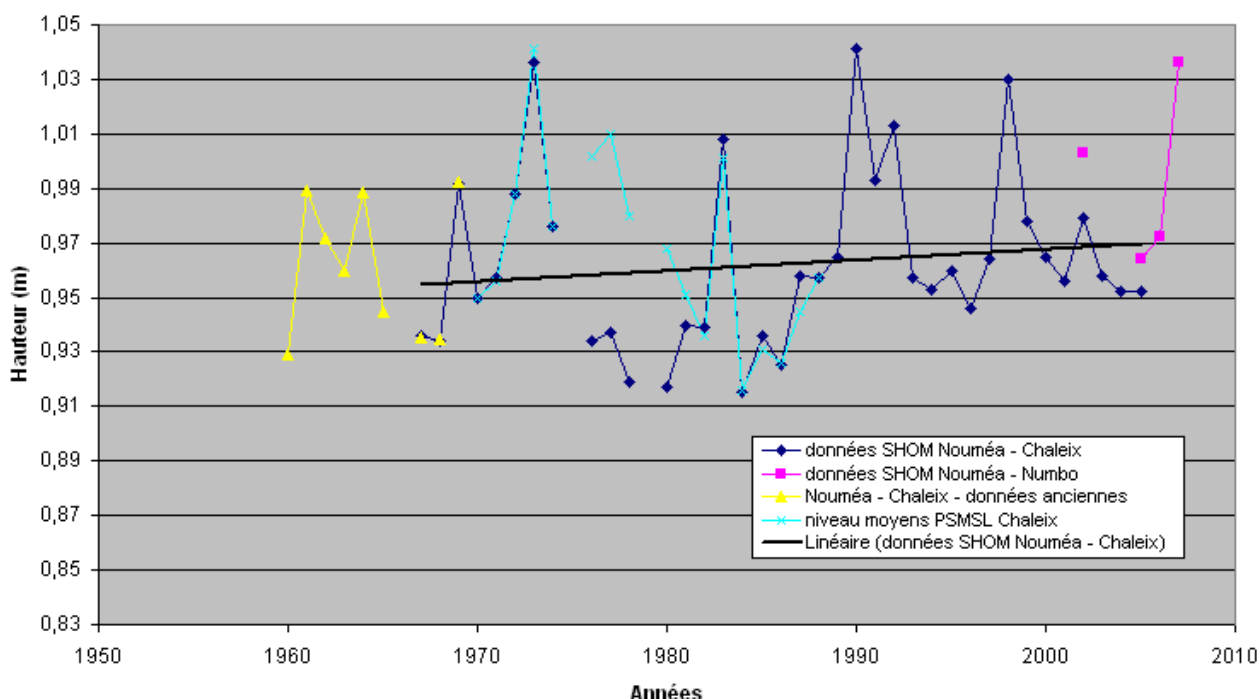


Figure 20. Niveaux moyens annuels de la mer à Nouméa mesurés par différents marégraphes depuis 1960
(Source : SHOM Brest).

Des mesures plus récentes réalisées par altimétrie spatiale (satellites Topex-Poseidon et Jason-1) ont également montré une hausse du niveau moyen de la mer dans la région de Nouvelle-Calédonie, qui serait de l'ordre de la hausse moyenne globale (environ 3 mm par an) au cours des 15 dernières années (Dr. Cazenave, comm. pers.) (voir Figure 9, encadré du haut).

4.4 Les indicateurs de changement climatique de l'ONERC appliqués au milieu marin

L'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), créé en 2001, a pour but de prendre en compte toutes les questions relatives aux effets du changement climatique en France métropolitaine et dans les DOM-TOM. En particulier, il s'agit de collecter et de diffuser les informations, études et recherches sur les risques liés au réchauffement climatique et aux phénomènes climatiques extrêmes. Il s'agit également de proposer une stratégie d'ensemble sur l'adaptation au changement climatique, qui pourra déboucher ultérieurement sur un programme de mise en œuvre.

L'ONERC a développé un certain nombre d'indicateurs du changement climatique, qui permettent un suivi quantitatif du changement climatique et de ses incidences en France métropolitaine et dans ses départements et territoires outre-mer. Il s'agit de résultats quantitatifs d'observations, attachés à un domaine géographique, à un paramètre et à un phénomène précis, suivi le plus souvent sur une base annuelle. La liste de ces indicateurs est accessible sur le site internet : <http://onerc.org/listAllIndicators.jsf>. A la date d'émission de ce rapport (septembre 2008), 21 indicateurs ont été listés et décrits par l'ONERC. Les données relatives aux indicateurs sont régulièrement actualisées. Selon l'ONERC, les indicateurs agissent comme des « signaux », ainsi leur suivi constitue une sorte de tableau de bord sur l'état du climat, auquel chacun peut se référer.

En ce qui concerne le suivi des zones marines et littorales des DOM-TOM, 5 indicateurs ont été spécifiquement développés :

- Les températures de surface de la mer dans les DOM-TOM
- Les températures de surface de la mer par télédétection haute résolution spatiale
- La salinité de surface de la mer
- Le niveau de la mer marégraphique
- La couleur de l'océan – la concentration en chlorophylle a

Une brève description de chaque indicateur et de son évolution en Nouvelle-Calédonie quand cela a été évalué, est donnée ci-dessous. La description complète de ces indicateurs est accessible sur le site internet de l'ONERC (<http://onerc.org/listAllIndicators.jsf>).

Dans le cadre de cette étude nous avons voulu distinguer les indicateurs de pression des indicateurs de réaction. Si l'on se réfère à la définition donnée au § 3.1.4, les 4 premiers indicateurs de l'ONERC peuvent être classés en tant qu'indicateurs de pression tandis que le dernier peut être classé en tant qu'indicateur de réaction.

¹ Loi n° 2001-153 du 19 février 2001 tendant à conférer à la lutte contre l'effet de serre et à la prévention des risques liés au réchauffement climatique la qualité de priorité nationale et portant sur la création d'un Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre-mer (JO du 20 février 2001).

4.4.1 Températures de surface de la mer dans les DOM-TOM

Cet indicateur présente l'évolution de la température de surface de la mer dans des zones géographiques de 2° de latitude par 2° de longitude situées au voisinage de la métropole et des Départements et Territoires français d'outre mer. Les unités sont en degrés Celsius (°C). Les données utilisées sont mensuelles, et dérivées de produits américains : ERSST (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, géré par le National Climatic Data Center) pour la période 1854-2005 ; et HadISST (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature, géré par le Met Office, le National Oceanography Center, Southampton et le Lamont-Doherty Earth Observatory) pour la période 1870-2005.

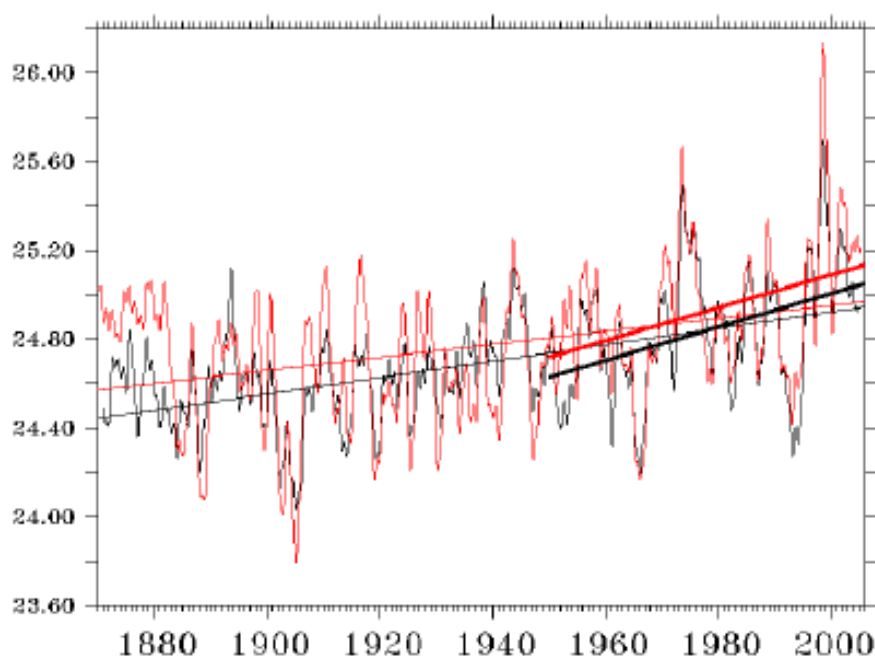


Figure 21. Variations de la température de surface en moyenne mensuelle filtrée par un filtre de Hanning sur 25 mois sur les carrés de 2° de longitude par 2° de latitude centré sur la Nouvelle-Calédonie.

L'évolution de la température de surface en Nouvelle-Calédonie est relativement représentative de l'évolution régionale dans le Pacifique tropical Sud-Ouest. Le réchauffement des températures est très net avec une augmentation prononcée aux cours des dernières décennies. Les années les plus chaudes depuis 1970 correspondent aux événements La Niña de 1974-75, 1985, 1988, 1996, 1998 et 2002.

4.4.2 Température de la surface de la mer par télédétection haute résolution spatiale

Cet indicateur présente l'évolution de la température de la surface de la mer (TSM) mesurée par satellite dans les régions océaniques.

L'ONERC dispose de données sur les températures de surface mesurées par satellite sur les zones couvertes par les 5 stations du réseau SEASnet (réseau de surveillance de l'environnement assistée par satellite, un partenariat IRD, Université de Las Palmas Gran Canaria, et Gouvernement de la Polynésie française/SPE), à savoir La Réunion, les Canaries, la Nouvelle-Calédonie (depuis 1997), la Guyane et la Polynésie (Figure 22).

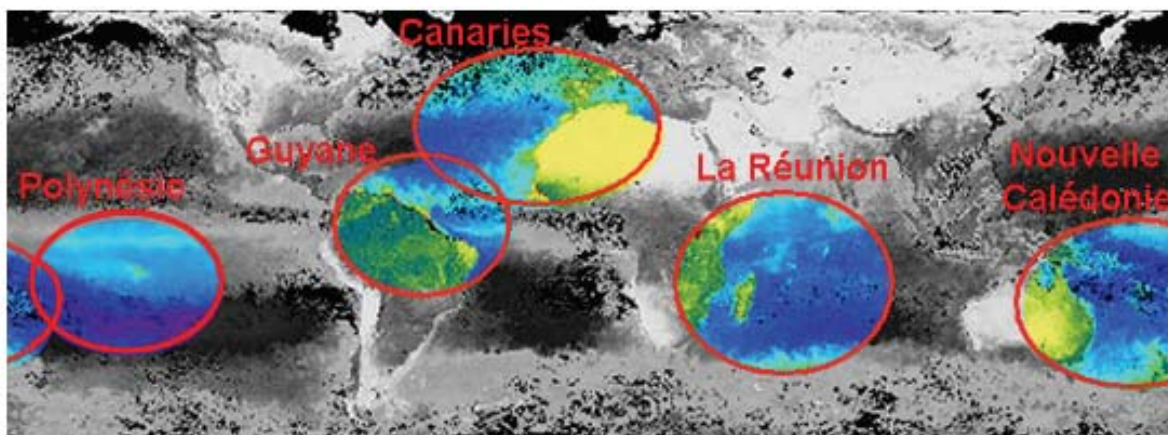


Figure 22. Localisation des sites de réception des données satellitaires du réseau SEASnet et représentation de leur zone de couverture.

Les figures ci-dessous sont données à titre d'exemple, comme illustration du traitement des données issues du suivi de cet indicateur.

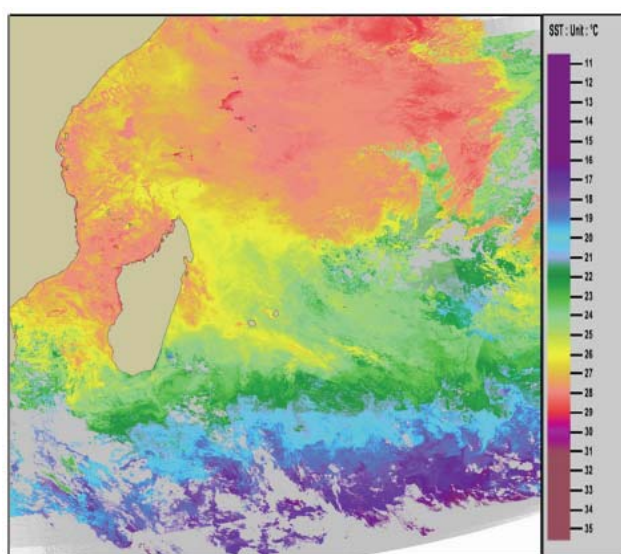


Figure 23. Image de TSM, synthèse centrée sur le 28/10/1999. Station de La Réunion

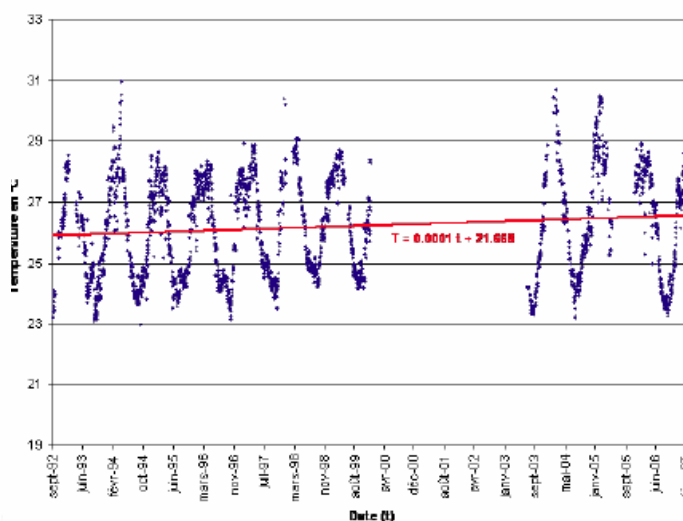


Figure 24. Evolution des moyennes des TSM-HR depuis 1992. Station de La Réunion.

4.4.3 Salinité de surface de la mer

Cet indicateur présente l'évolution de la salinité de surface de la mer dans des zones géographiques de 1° de latitude par 1° de longitude situées au voisinage de la métropole et de territoires français d'outre mer (Pacifique et Atlantique).

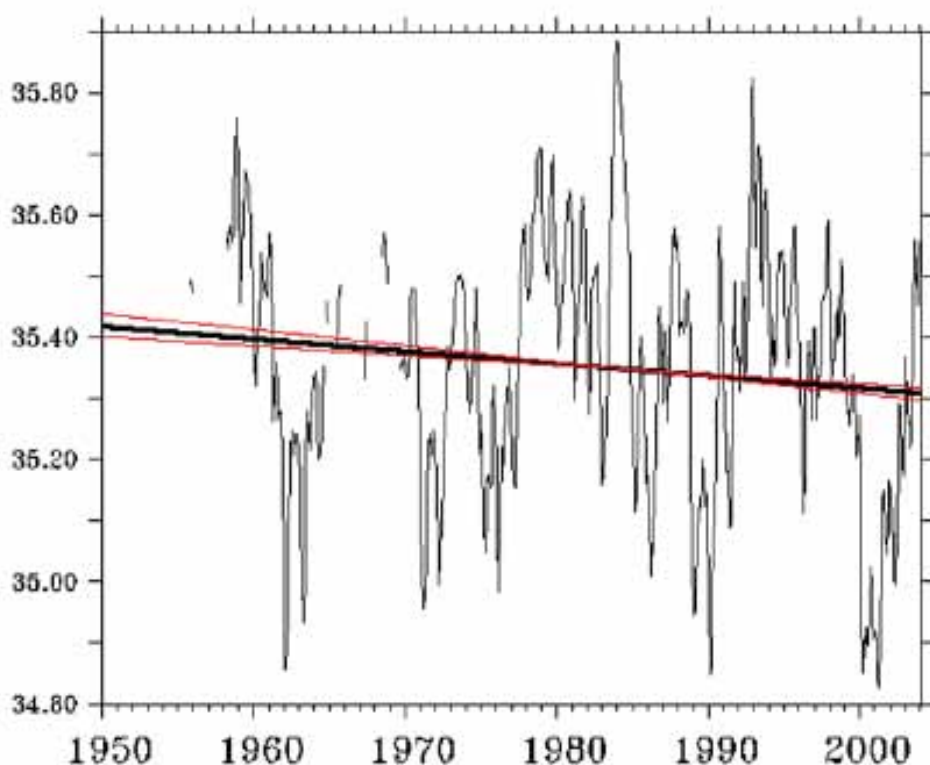


Figure 25. Variations de la salinité de surface en moyenne mensuelle sur un carré de 1° de longitude par 1° de latitude centré sur la Nouvelle-Calédonie entre 1950 et 2003.

L'évolution de la salinité de surface en Nouvelle-Calédonie est relativement représentative de l'évolution régionale dans le Pacifique tropical Sud-Ouest. La tendance à la baisse de salinité est très nette (-0.1 pss en 50 ans), en dépit de la salinisation relative qui apparaît aux cours des années El Niño (ex : 1972-73, 1982-83, 1987-88, 1992-94, 1997-98).

4.4.4 Niveau de la mer marégraphique

Cet indicateur présente l'évolution journalière du niveau de la mer mesurée par des marégraphes à une position précise (en l'occurrence à Nouméa), en distinguant les saisons et les années. La marée a été filtrée.

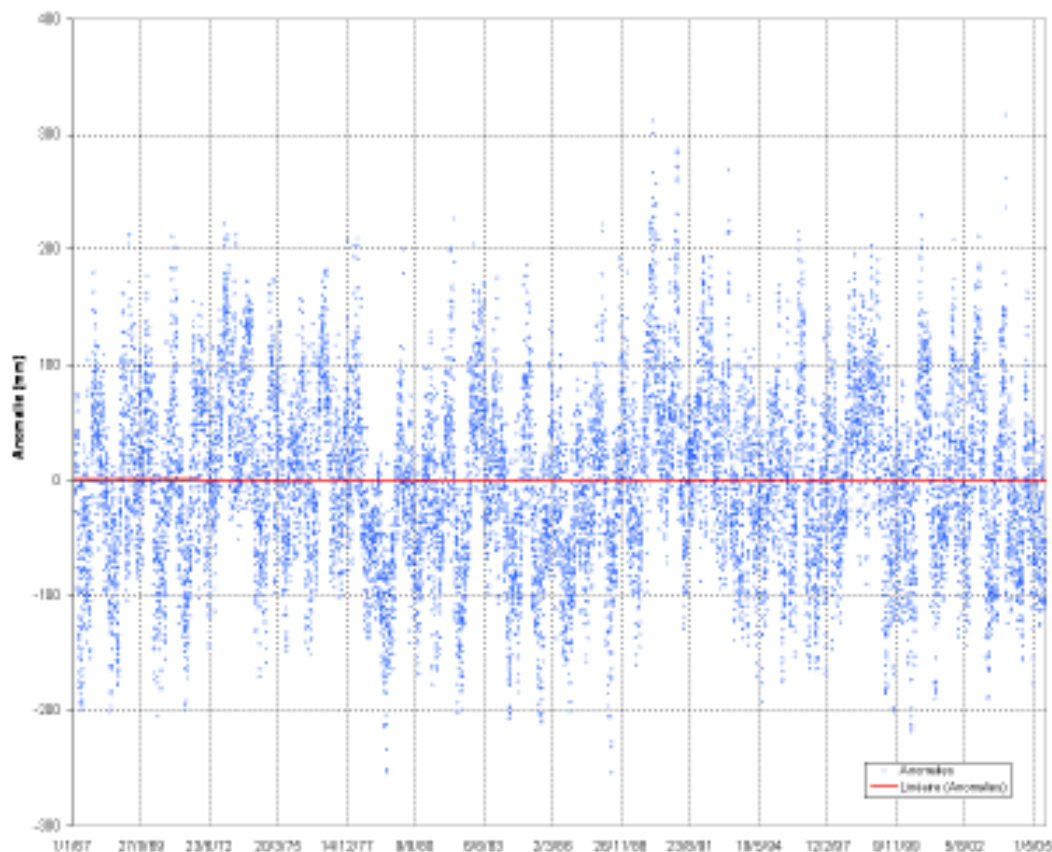


Figure 26. Anomalies du niveau de la mer détectées par le marégraphe de Nouméa (Nouvelle-Calédonie) entre 1967 et 2005.

L'évolution journalière du niveau de la mer au marégraphe de Nouméa est représentée sous la forme d'anomalies (c'est-à-dire sous forme d'écarts à un niveau moyen calculé sur toute la série chronologique). La tendance linéaire (droite en rouge sur le graphe) indique la tendance sur les trente huit années. Même si les variations de ces anomalies d'une année à l'autre sont importantes, la tendance sur les trente-huit années ne montre aucune tendance à l'élévation du niveau de la mer.

4.4.5 Couleur de l'océan - Concentration en chlorophylle-a

Cet Indicateur présente l'évolution des concentrations en chlorophylle-a (Chl-a) (pigment majeur des phytoplanctons) mesurées par satellite dans les régions océaniques.

La couleur des océans est le reflet de la concentration en phytoplancton marin. Ce dernier joue un rôle majeur dans le cycle du carbone total. Les organismes phytoplanctoniques, présentant des taux de renouvellement rapides, ont le potentiel d'absorber et de libérer du carbone beaucoup plus rapidement que la végétation terrestre, agissant comme des pompes à carbone et atténuant ainsi l'effet de serre atmosphérique. Il est estimé que près de 100 millions de tonnes de CO₂ sont absorbées chaque jour par le phytoplancton.

L'ONERC dispose de données sur les concentrations en Chl-a sur les zones couvertes par les 5 stations du réseau SEASnet, à savoir La Réunion (depuis 1997), les Canaries (depuis 1997), la Nouvelle-Calédonie (depuis 1998), la Guyane (depuis 1997) et la Polynésie (depuis 2004) (voir Figure 22).

Les figures ci-dessous sont données à titre d'exemple, comme illustration du traitement des données issues du suivi de cet indicateur.

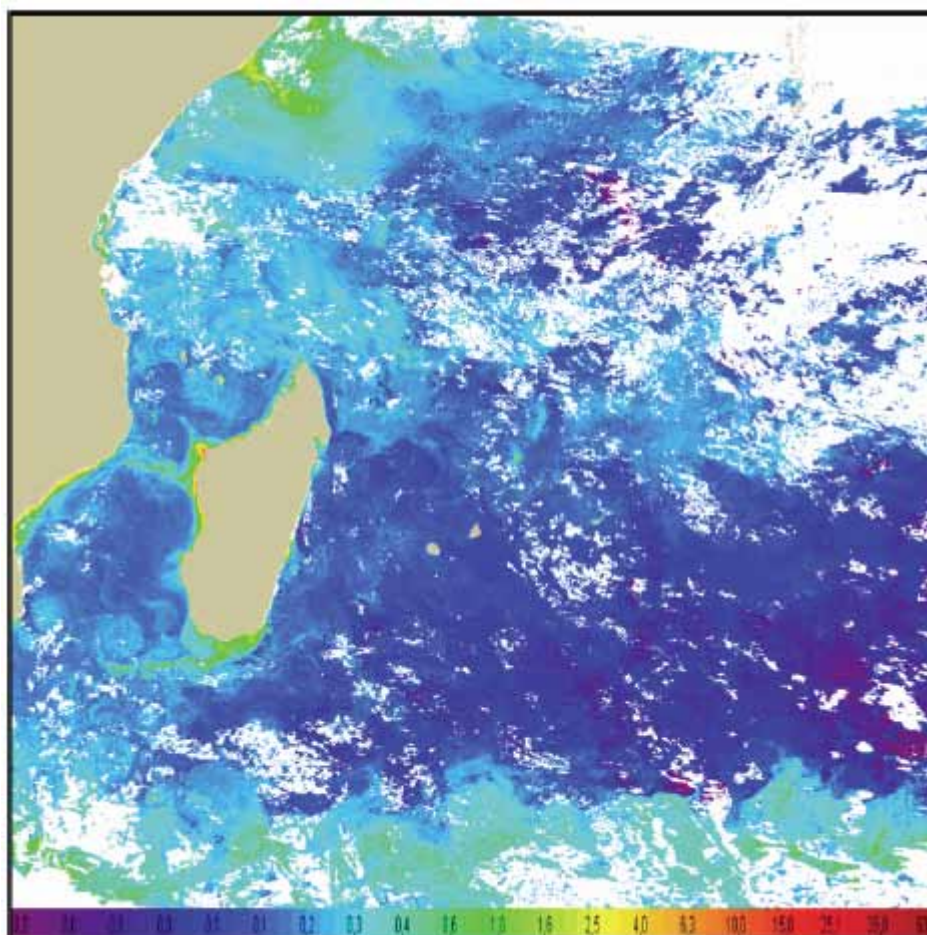


Figure 27. Carte de concentration en chlorophylle-a, synthèse du 08/10/2002 au 15/10/2002 - Station de La Réunion

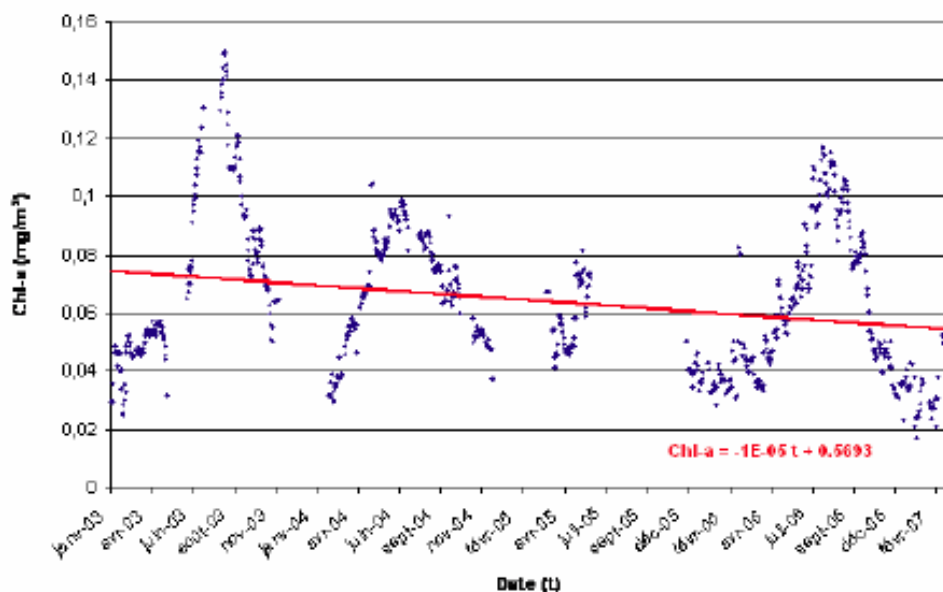


Figure 28. Evolution des concentrations en chlorophylle-a de la mer - Station de la Réunion

4.5 Quelques prévisions pour les petits états insulaires

La montée du niveau des mers tend très probablement à accroître les risques d'inondation des zones côtières, menaçant les infrastructures, les habitations, les facilités situées en bord de mer. Dans les Caraïbes et le Pacifique, plus de 50% de la population habite dans une zone côtière de 1,5 km. De plus de nombreux aéroports, routes et capitales se situent le long des côtes ou sur de très étroits îlots coralliens. Les changements climatiques en particulier liés à la hausse du niveau des mers peuvent ainsi engendrer des conséquences lourdes au niveau socio-économique.

Il est très probable que les ressources en eau soient sérieusement affectées par les changements climatiques, quel que soit le scénario considéré. La plupart des îles ayant déjà des ressources en eau limitées, des variations dans le régime des précipitations peuvent aggraver ce phénomène. La région Caraïbes serait particulièrement touchée par la baisse des précipitations et il est probable que dans le futur la demande en eau puisse être couverte. Dans le Pacifique, une réduction de 10% des précipitations (prévue d'ici 2050) entraînerait une réduction de 20% de la taille de la lentille d'eau douce à Tarawa (Kiribati).

Les changements climatiques affectent les récifs coralliens, les pêcheries et les ressources marines d'une manière générale. Des changements dans la fréquence et l'intensité du phénomène El Niño auront certainement des impacts sévères sur les pêcheries commerciales et artisanales. Les récifs coralliens et autres écosystèmes marins sont et seront particulièrement affectés par la hausse de la température de l'eau et du niveau de la mer, l'augmentation de la turbidité, de la charge en nutriments et en pollution chimique, par l'augmentation de la fréquence et/ou intensité des cyclones, par la réduction du taux de calcification liée aux changements dans la chimie de l'eau (augmentation du taux de CO_2 et diminution du pH de l'eau de mer). Ces impacts sont évidemment exacerbés par les perturbations non climatiques sur les systèmes côtiers.

4.6 Récapitulatif sur les paramètres caractérisant le changement climatique

Le tableau ci-dessous liste les différents paramètres atmosphériques, climatologiques et océanographiques qui varient avec le changement climatique. Une mention est donnée sur leur évolution actuelle, au niveau global et en Nouvelle-Calédonie lorsque cette information était disponible. Certains de ces paramètres seront susceptibles d'être utilisés comme indicateurs de pression des changements climatiques.

Cette liste est donnée à titre indicatif, basée sur une étude bibliographique conséquente et des discussions avec des spécialistes de ces domaines spécifiques. Elle est fournie comme base de réflexion et doit être sujette à discussion.

Tableau 3. Tableau synthétisant les paramètres caractérisant le changement climatique et leur évolution au niveau global et sur la Nouvelle-Calédonie.

Source des données	Milieu	Paramètre	Evolution du paramètre	
			Au niveau global	En Nouvelle-Calédonie
Environmental Sciences Division - Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) – Tennessee, Etats Unis	Atmosphérique	Concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère	Augmentation	Non mesuré en NC
Météo France		Température de l'air	Augmentation	Augmentation
Météo France		Précipitations	Variable selon les régions	Pas d'évolution significative mais tendance à la baisse
Météo France		Activité cyclonique	Pas de tendance claire mais tend à augmenter	Pas de tendance claire mais tend à augmenter
- IRD / Unité Espace - Réseau SEASnet (ONERC) - HadISST et ERSST (ONERC)	Océanique	Température de surface des océans - Par télédétection - A partir de valeurs filtrées	Augmentation	Augmentation
LEGOS/OMP (CNES, CNRS, IRD, UPS) (ONERC)	Océanique	Niveau moyen de la mer	Augmentation	Pas d'évolution notable
IRD/ ORE-SSS (ONERC)	Océanique	Salinité	Variable	Diminution
IRD / Unité Espace - Réseau SEASnet (ONERC)	Océanique	Composition chimique des océans (pH, CO ₂)	Acidification	Non mesuré en NC

5 LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ECOSYSTEMES RECIFO-LAGONAIRES

5.1 Préambule

Tout le monde s'accorde à dire qu'il est difficile, voire impossible, de distinguer les réactions des écosystèmes récifo-lagonaires liées aux perturbations naturelles (changement climatique, cyclones, proliférations d'*Acanthaster*, etc.) de celles liées aux perturbations anthropiques (développement urbain, touristique, pollution, enrichissement en nutriments, etc.), en raison de l'effet cumulatif de ces pressions sur l'écosystème (plusieurs pressions agissent en même temps) et de la difficulté d'attribuer précisément une origine à ces perturbations (ex. les invasions d'*Acanthaster* sont-elles liées à un cycle naturel ou induites par la pollution humaine?).

C'est pourquoi il est probable qu'un même indicateur permette à la fois de mesurer la réaction des écosystèmes récifo-lagonaires face au changement climatique et face à des pressions anthropiques.

Néanmoins, les indicateurs les plus pertinents pour mesurer de manière spécifique l'impact du changement climatique sur les récifs semblent être ceux que l'on pourra appliquer dans des zones éloignées de toute pression anthropique.

5.2 Généralités

5.2.1 Réactions à différentes échelles

Le changement climatique peut présenter des impacts directs ou indirects du fait de réponses en cascade, et ce à plusieurs niveaux de réponse :

- Au niveau de l'individu ;
- Au niveau de la communauté ;
- Au niveau de l'écosystème ;
- Au niveau inter-écosystémique.

Quel que soit l'écosystème considéré, les effets du changement climatique sont visibles aussi bien au niveau de l'individu que des communautés : dans le premier cas, il s'agit de modifications ou altérations des fonctions physiologiques (reproduction, croissance, etc.) ; dans le second cas, il s'agit de modification dans la structure des peuplements avec la disparition de certaines espèces plus sensibles au changement climatique ou la migration latitudinale d'autres espèces.

5.2.2 Effets directs et effets indirects

Comme il est évoqué dans le paragraphe précédent, le changement climatique peut entraîner des réactions en cascade :

- Soit parce que la réponse d'un individu implique la réaction de sa communauté, voire de l'écosystème auquel elle appartient (par exemple, le blanchissement de colonies d'*Acropores* branchus à un endroit donné lié au réchauffement de la température de l'eau peut aboutir à la mort de cette espèce à cet endroit qui aura des conséquences en termes

d'habitat pour l'ichtyofaune de cette zone et qui modifiera ainsi la composition des communautés donc de l'écosystème) ;

- Soit parce que la perturbation d'un écosystème peut engendrer la modification de l'état de santé d'un autre écosystème (par exemple, la dégradation d'un récif corallien frangeant liée au réchauffement de la température de l'eau peut engendrer la fragilisation du trait de côte plus exposé à l'érosion ou de la mangrove qui n'est plus aussi bien protégée de l'action des vagues du fait d'un récif dégradé).

De plus, il est possible de noter des effets cumulatifs ou antagonistes qui, in fine, peuvent respectivement amplifier ou diminuer la réaction des écosystèmes subissant le changement climatique global.

5.2.3 Variabilité des réactions aux stress

Quel que soit le facteur de stress (augmentation de température, augmentation du niveau de la mer, diminution du pH), les espèces au sein d'un écosystème peuvent réagir différemment.

Par exemple, les réactions des coraux au stress thermique lié au changement climatique sont variées et sont dépendantes de :

- Plusieurs facteurs d'exposition (courants et autres moteurs de mouvements de masse d'eau profondeur, durée d'exposition, quantité de lumière reçue, mais également d'autres facteurs de stress tels que la salinité, la qualité des eaux, etc.) (Berkelmans, *in press*) ;
- La sensibilité propre des espèces ;
- La sensibilité des algues symbiotes (Fabricius *et al.*, 2007).
- Par ailleurs, la sensibilité des coraux à un stress thermique varie dans l'espace mais également dans le temps. En effet, on observe une variabilité des réactions en fonction du site. Une étude menée en Polynésie Française a mis en évidence des réactions différentes des récifs suite à des blanchissements ou passage de cyclone : certains récifs voyaient leur couverture corallienne vivante augmenter, d'autres, diminuer, d'autres encore être stable (Adjeroud *et al.*, 2005). De plus, la comparaison des conditions environnementales ayant conduit à des événements de blanchissement sur la Grande Barrière de Corail australienne a montré que pour des conditions de stress similaires en 1992, 1994 et 2002, la réponse de l'écosystème récifal avait été différente, traduisant une acclimatation des espèces coralliennes au cours de ces événements (Berkelmans, *in press*).

Les réactions des coraux diffèrent en fonction des espèces (ou morphotypes) mais également de la nature du stress :

- Les coraux de forme branchue, au taux de croissance rapide et aux couches de tissus fines sont les plus sensibles au blanchissement alors que les coraux massifs à croissance lente et aux tissus épais semblent être moins sensibles et arrivent à se régénérer (Buddemeier *et al.*, 2004) ;
- Les formes branchues (*Acropora* et *Pocillopora*) sont plus sensibles à la destruction physique liée aux cyclones (Adjeroud *et al.*, 2005).

Enfin, la tolérance aux fortes températures est plus élevée chez des colonies qui ont toujours vécu dans un environnement à températures élevées (Fabricius *et al.*, 2007).

5.3 Les effets du changement climatique sur les récifs coralliens

5.3.1 Préambule

Certaines conditions environnementales sont nécessaires au maintien des populations de coraux et vont influencer leur distribution, il s'agit en particulier de la température, la salinité et la saturation de l'eau de mer en aragonite. Ces paramètres sont tous susceptibles de varier avec le changement climatique et entraîner des réactions désastreuses sur l'écosystème récifal. Les paragraphes qui suivent décrivent les stress induits par les variations du changement climatique sur les récifs.

5.3.2 Les effets de l'augmentation de la température de l'eau

Les récifs sont présents dans des eaux dont la température moyenne annuelle varie entre 18 et 30°C (Gattuso and Buddemeier, 2002 ; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Cependant certains récifs peuvent résister à des extrêmes de températures bien plus élevés, entre 16 et 34,4°C, avec des temps d'exposition à ces extrêmes relativement courts. Il s'agit en particulier des récifs du golfe persique et arabe (Gattuso and Buddemeier, 2002).

Les récifs sont considérés comme gravement menacés par le changement climatique car les coraux vivent très proches de leur limite de tolérance aux températures élevées, ainsi une variation minimale de la température des eaux peut engendrer de graves réactions (McClanahan *et al.*, 2007).

5.3.2.1 Le blanchissement corallien

Les récifs coralliens reposent sur une association symbiotique entre des algues et des coraux. Les coraux hermatypiques sont largement dépendants de cette symbiose car les algues leur fournissent jusqu'à 90% de leur demande en énergie (Marshall and Schuttenberg, 2006). Le terme de blanchissement se réfère à la perte ou à la réduction de la densité des algues symbiotiques (zooxanthelles) ou pigments algaux, qui donne un aspect blanchi à la colonie corallienne (Hendee, 1998 ; Berkelmans *et al.*, 2004 ; Buddemeier *et al.*, 2004 ; Manzello *et al.*, 2006 ; Marshall and Schuttenberg, 2006 ; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Ce phénomène est généralement une réponse à un stress donné, qui conduit à l'expulsion des algues et bien souvent à la mort massive des populations coralliennes (jusqu'à 90% des populations sur un récif donné). Le stress est généralement engendré par des conditions environnementales non favorables telles que la hausse des températures de l'eau, la baisse de la salinité, des infections virales ou bactériologiques ou autres (Hendee, 1998 ; Buddemeier *et al.*, 2004 ; Manzello *et al.*, 2006 ; Marshall and Schuttenberg, 2006). La hausse des températures de l'eau est souvent citée comme la première cause de blanchissement, associée à une période non ventée et/ou à de grandes marées basses. Ces conditions favorisent le réchauffement localisé de l'eau et augmentent la pénétration des radiations solaires (en particulier des UV) dans la colonne d'eau (Hendee, 1998 ; Marshall and Schuttenberg, 2006 ; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Il a été démontré que des niveaux élevés d'UV ont pu provoquer un blanchissement corallien sans même une hausse des températures.

Le blanchissement est un processus assez complexe qui dépend du micro-environnement tissulaire et du type de zooxanthelles présentes dans les tissus coralliens ainsi que du taxon et de l'environnement externe du corail hôte. Il a été démontré que les coraux étaient capables de s'adapter et s'acclimater au blanchissement, ainsi pour un même corail, la réponse à un même stress pourra être différente au cours de blanchissements successifs (Berkelmans, *in press* ; Buddemeier *et al.*, 2004).

Le tout premier cas de blanchissement documenté dans la littérature fut celui de 1911, au niveau du récif Bird Key, dans les Florida Keys, où un nombre important de colonies ont été affectées lors d'une période anormalement chaude et calme. En 1929, un blanchissement corallien fut noté sur la Grande Barrière de corail australienne (Low Isles), également lié à une période chaude et de grand calme. Il a ensuite fallu attendre 1961 pour qu'un phénomène soit à nouveau recensé, à Key Largo (Florida Keys) (Berkelmans *et al.*, 2004). Depuis les années 80, le nombre, l'étendue et l'intensité de ces événements dévastateurs ont dramatiquement augmenté et sont généralement corrélés avec des périodes où les températures sont élevées, le temps est clair et calme, résultant en une action combinée de la température et du rayonnement sur les récifs. Ces événements sont souvent associés à des conditions El Nino mais pas toujours. Le blanchissement le plus dévastateur a eu lieu en 1998 où tous les récifs mondiaux ont été touchés. La proportion de colonies coralliennes blanchies lors de ce seul événement a été estimée à 15% des récifs mondiaux ; dans le seul océan Indien, on estime qu'environ 45% des coraux ont disparu à la fin de cet épisode. En ce qui concerne la Nouvelle-Calédonie, seulement 2 cas de blanchissement ont été reportés à ce jour, le premier en 1996 (Garrigue, comm. pers.) et le second en ce début d'année (mars-avril 2008) sur la côte Est en particulier : à Hienghène, sur la Côte Oubliée (Sarraména, comm. pers.) et à Thio (Virly, comm. pers.).

Bien que la réponse des coraux aux températures élevées soit complexe, un certain nombre d'indicateurs ont été proposés pour expliquer ou prévoir des épisodes de blanchissement, notamment la température maximale mensuelle au-dessus d'un seuil local ou la quantité de chaleur accumulée lors d'épisodes de réchauffement (Berkelmans, *in press* ; Manzello *et al.*, *in press*). Ray Berkelmans, un éminent chercheur australien de l'AIMS, suggère que la température maximale mensuelle atteinte pendant 3 jours soit un bon indicateur du blanchissement corallien sur la Grande Barrière de Corail (Berkelmans *et al.*, 2004), indiquant clairement que l'exposition cumulée des coraux à des températures élevées caractérise les années de blanchissement. Le seuil de blanchissement fréquemment énoncé se situe à 1°C au-dessus des moyennes estivales saisonnières (Hoegh-Guldberg, 1999 ; Marshall and Schuttenberg, 2006 ; Manzello *et al.*, *in press*). Il est par ailleurs stipulé que le blanchissement tend à apparaître lorsque les températures maximales saisonnières excèdent 4DHW (Degree Heating Week), correspondant à une exposition de 4 semaines à une température supérieure d'un degré Celsius à la température maximale estivale enregistrée sur une longue période (Fabricius *et al.*, 2007).

L'intensité et la durée d'exposition des coraux aux températures élevées déterminent la sévérité du blanchissement (Buddemeier *et al.*, 2004 ; Marshall and Schuttenberg, 2006). Toutes les espèces ne réagissent pas de manière homogène au blanchissement, certaines sont plus susceptibles que d'autres. Ainsi, après un épisode de blanchissement, on observe souvent un changement dans la composition de la communauté corallienne : par exemple, sur les récifs de Palm Island (partie centrale de la Grande Barrière de Corail australienne), un déclin de 10 à 80% dans la couverture corallienne a été recensé, presque essentiellement dû à la mortalité des Acropores (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007).

Les coraux blanchis sont en état végétatif pendant les premiers temps, ils vivent mais leurs capacités de croissance, de reproduction, de réparation, de défense sont amoindries. Si le stress ne dure que peu de temps, les coraux sont alors capables de regagner un cortège d'algues symbiotiques et de survivre ; dans le cas contraire un stress prolongé conduit à une mort certaine (Marshall and Schuttenberg, 2006).

L'augmentation des températures a également le potentiel d'affecter les capacités de reproduction et le succès des phases de vie précoces des coraux. Un blanchissement corallien peut affecter la gamétogenèse en réduisant le nombre d'œufs et leur taille, réduisant ainsi la fécondité des coraux blanchis (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007 ; Job, comm.pers.). Les larves des colonies blanchies présentent moins de lipides, de protéines et de caroténoïdes comparées à leurs homologues en bonne santé (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007).

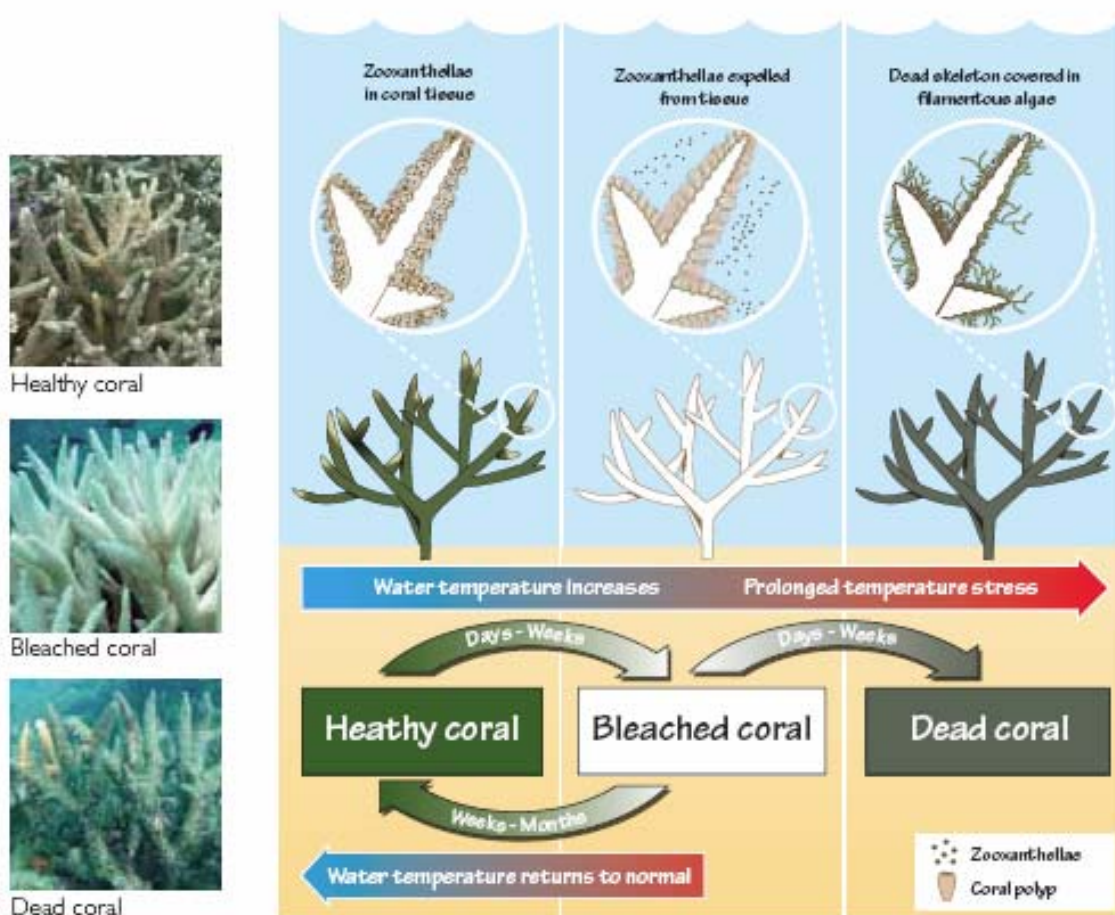


Figure 29. Différentes étapes du blanchissement corallien (tiré de Marshall and Schuttenberg, 2006).

5.3.2.2 La migration latitudinale des espèces

Tandis que la hausse des températures dévaste des récifs entiers, le réchauffement climatique peut engendrer une compensation, si mineure soit elle, par le déplacement des populations de coraux vers des zones autrefois trop froides pour assurer leur maintien (Buddemeier *et al.*, 2004). Une histoire communément citée dans la littérature (dans Buddemeier *et al.*, 2004 par exemple), illustre ce phénomène : « il y a 5 à 6000 ans, un tremblement de terre a soulevé une communauté corallienne hors de l'eau au Japon (Tateyama). Cette communauté contenait au moins 72 espèces de coraux, comparé aux 35 existantes actuellement sur cette zone. A cette époque la température de l'eau était 1,2 à 1,7°C plus élevée. Cela laisse à penser que des récifs peuvent migrer à des latitudes plus hautes en réponse au réchauffement planétaire. Bien entendu cela ne compenserait que très faiblement les pertes liées aux impacts écologiques et économiques, mais pourrait en partie répondre aux inquiétudes liées à la perte de biodiversité. Bien que cette comparaison soit intéressante, une donnée majeure et à prendre en considération dans nos temps modernes : à l'époque les impacts anthropiques sur la nature étaient négligeables alors que de nos jours, les coraux devraient avoir à migrer vers des zones densément peuplées et développées, où les eaux sont déjà tellement affectées par l'agriculture, la surexploitation des ressources, les constructions côtières, et autres artefacts sociaux qui rendent les eaux si inhospitalières pour les coraux ».

De plus, les coraux n'ont pas uniquement besoin d'eau chaude (>18°C) pour vivre mais également de fonds peu profonds (en rapport avec leurs besoins en lumière), avec une eau claire, un substrat dur pour se fixer et leur propagation dépend principalement des courants océaniques. Les côtes Ouest d'Amérique du Sud et du Nord, d'Europe et d'Afrique sont baignées par un

courant froid qui se dirige vers l'équateur, ces régions ne sont donc pas situées favorablement pour recevoir de potentielles sources de larves coralliennes. Au Sud-Est des Etats-Unis et à proximité de l'Amazonie, l'extension des récifs est limitée par la présence d'eaux boueuses. Seuls le Sud de la Chine, le Japon, et l'Afrique du Sud pourraient éventuellement bénéficier d'un effet de migration des récifs coralliens. De plus, le gradient de température de surface de l'eau est très important à l'approche des températures de l'ordre de 18°C (seuil minimal pour observer une survie des coraux), ainsi même un réchauffement des eaux conséquent (correspondant au doublement de la pression atmosphérique de CO₂) n'entraînerait qu'un déplacement minime de l'isotherme de 18°C, de quelques centaines de kilomètres uniquement (Buddemeier *et al.*, 2004) (voir Figure 30).

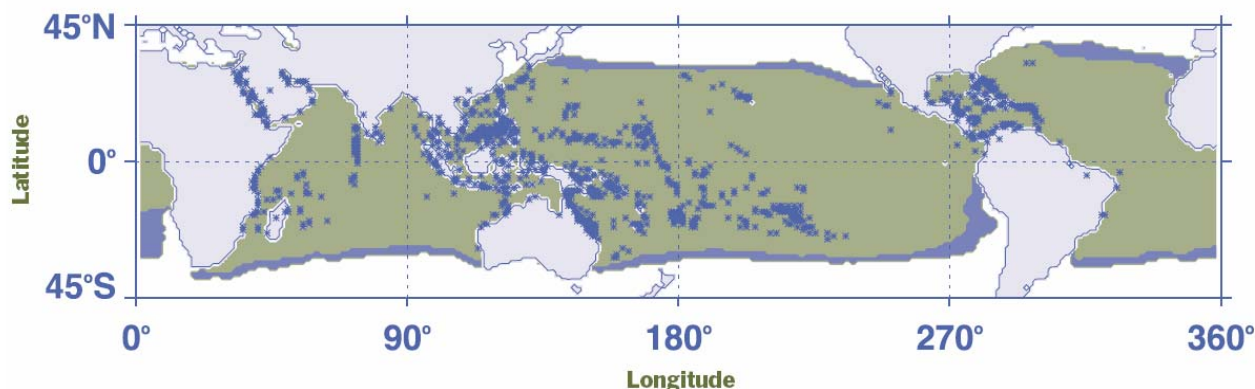


Figure 30. Le réchauffement climatique et la distribution des récifs coralliens. Actuellement les récifs (indiqués par des astérisques bleus) sont limités aux eaux où la température est supérieure à 18°C (zone grisée). Une augmentation de 2°C étendrait cette zone de quelques degrés de latitude (zone bleue foncée). Seules les régions présentant des profondeurs, substrats et conditions environnementales favorables pourraient éventuellement accueillir de nouveaux récifs (tiré de Buddemeier *et al.*, 2004).

Malgré toutes les limitations citées ci-dessus, des cas de migrations ont néanmoins été reportés dans la littérature :

- Des coraux cornes-de-cerfs (*Acropora cervicornis*) ont été observés pour la première fois en Floride (Fort Lauderdale) en 1988 (Bill Pretch, *Coral List*).
- Des branchus *Acopora palmata* ont été découverts en 2002 dans le Nord du golfe du Mexique.
- Des acropores ont été récemment observés dans le Nord des Bahamas, poussant sur des vestiges de récifs datant de l'Holocène.
- Des larves de coraux tropicaux ont été recensées à Shikoku (Japon – 33,5°N) (Shashank Keshavmurthy, *Coral List*).
- Des migrations ont été observées en Australie Occidentale (Ben Greenstein, *Coral List*).
- En Afrique du Sud, le recouvrement et la diversité corallienne ont augmenté, probablement en rapport avec l'augmentation de la température des eaux (Tom Goreau, *Coral List*).

5.3.2.3 Les maladies coralliennes

Un travail assez conséquent a été réalisé sur les maladies coralliennes des récifs des Caraïbes, ce n'est que récemment que l'on a commencé à s'intéresser aux maladies des récifs du Pacifique. A l'heure actuelle 7 maladies ont été identifiées dans l'Indo-Pacifique. Un nombre croissant d'observations de maladies coralliennes en rapport avec le réchauffement climatique ont été reportées. L'augmentation de la température des eaux a non seulement le potentiel d'affaiblir le corail hôte mais également augmente la virulence des pathogènes (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Des études poussées ont été menées en Australie, notamment sur l'évolution saisonnière de certaines maladies (*Black Band Disease*, *Brown Band Disease*, *White Syndrome*, érosion du squelette) en relation avec des anomalies de température (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007).

5.3.3 Les effets de l'acidification des océans

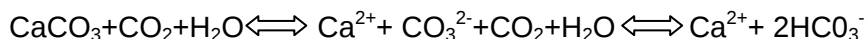
L'acidification des océans en réponse à l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique a récemment été mise en évidence, et il n'y a maintenant plus de doute à ce sujet.

Pour comprendre les effets sur les récifs, il est nécessaire de regarder plus en détail les réactions chimiques qui ont lieu lors de l'absorption de CO₂ par les océans (tiré de : Gattuso and Buddemeier, 2002 ; ISRS, 2007 ; Montaggioni, 2007) :

Lorsque le CO₂ pénètre dans l'océan, il réagit avec l'eau pour former l'acide carbonique selon la réaction : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$, ce qui entraîne une chute du pH. L'acide carbonique n'étant pas très stable dans l'eau de mer, il se dissocie rapidement en ions bicarbonates :

$\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$. Une partie des ions bicarbonate se dissocie ensuite en ions carbonate : $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$

Les carbonates de calcium présents dans l'eau de mer vont également participer aux interactions selon la réaction :



Le bilan net est un retrait des ions carbonates, une production d'ions bicarbonates et une baisse du pH, donc une acidification. L'acidification tend à augmenter la dissolution des carbonates de calcium et à produire encore plus d'ions bicarbonates tandis que de moins en moins d'ions carbonates sont disponibles dans les eaux (voir Figures 31 et 32).

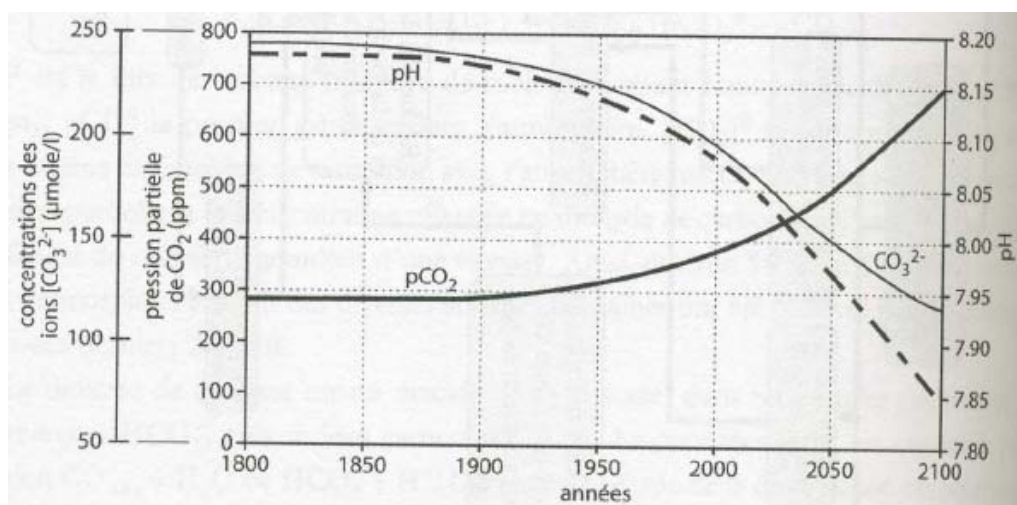


Figure 31. Relation entre les variations de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et les variations de pH et de teneurs en ions carbonates, depuis le début de la révolution industrielle (tiré de Montaggioni, 2007).

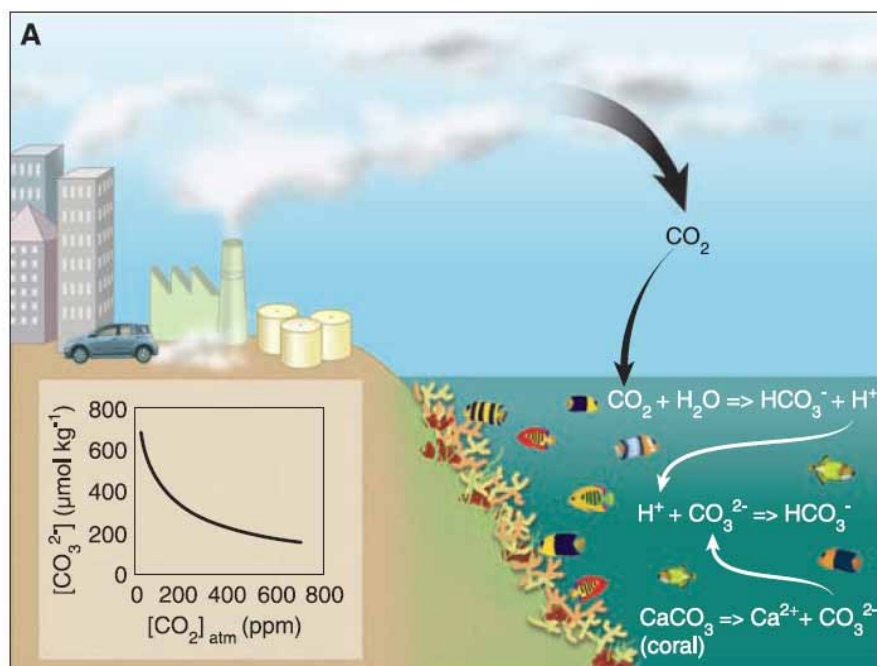


Figure 32. Relation entre l'accumulation de CO_2 atmosphérique et le ralentissement de la calcification corallienne liée à l'acidification des océans (tiré de Berkemans, 2002).

L'acidification des eaux a pour conséquence une baisse du taux de croissance des organismes à squelette calcaire tels que les coraux mais aussi les algues calcaires, les organismes planctoniques comme les coccolithophoridés (phytoplancton) et les foraminifères (Pitcock, 1999 ; Buddemeier *et al.*, 2004 ; Montaggioni, 2007 ; Le Borgne, comm. pers.). Une baisse de 21 à 40% du taux de calcification corallienne est communément projetée pour la période 1880-2065 (Berkemans, 2002 ; Montaggioni, 2007). Elle s'exprime de différentes manières : (1) par une diminution de la croissance linéaire (2) par la formation d'un squelette de moindre densité et/ou (3) par l'investissement d'une quantité plus importante d'énergie dans la calcification au détriment de la reproduction ou réparation de tissus lésés. Ainsi, on peut s'attendre à une compétition accrue des algues au détriment des coraux dans l'occupation des substrats, à un retard dans la maturité sexuelle des colonies coralliennes puisqu'elles doivent atteindre une certaine taille avant de pouvoir commencer à produire des gamètes, à une érosion (biologique ou mécanique) accrue des squelettes calcaires, à une vulnérabilité plus grande lors de passages de cyclones et d'une manière générale à une perte de résilience du système récifal (Montaggioni, 2007 ; Gattuso and Buddemeier, 2002 ; Berkemans, 2002). De plus, tous les organismes encroûtants permettant de consolider les trames calcaires (par précipitation de ciments calcaires dans les cavités intrasquelettiques et les pores intergranulaires des sédiments associés) seront également touchés. Enfin, l'augmentation du taux de CO_2 déclenche aussi la dissolution des squelettes calcaires. A terme la croissance récifale serait dans l'incapacité de compenser l'érosion. A titre d'exemple, le taux d'extension linéaire des récifs de la Grande Barrière de Corail a chuté de 1% et la densité du squelette de 0,36% au cours des 16 dernières années (Berkemans, 2002).

Les variations de pH ont également une influence sur les ressources marines en éléments nutritifs, en particulier sur la nature des composés phosphorés et azotés. L'acidification des eaux provoque une modification de la teneur en ions azotés et phosphorés, entraînant une eutrophisation des eaux. La croissance des coraux est perturbée en conditions eutrophes tandis que celle des macro-algues est favorisée.

La communauté scientifique reconnaît que le problème de l'acidification des océans présente certainement les effets les plus critiques lié au changement climatique. Alors que le réchauffement global peut se traduire, dans un second temps, par un refroidissement, la décalcification des organismes semble inexorable car on ne connaît pas de mécanisme de rétroaction (feed-back) comme c'est le cas pour d'autres facteurs climatiques. Plus la teneur en CO_2 augmente et plus le

pH diminue et la calcification avec. S'il y a décalcification et baisse de la calcification, une quantité moindre de CO₂ est piégée dans l'océan. Par voie de conséquence si le piégeage est moindre, la teneur en CO₂ dans l'atmosphère continue d'augmenter avec les émissions polluantes (Leborgne, comm. pers.).

5.3.4 Les effets de la variation des précipitations

Le réchauffement climatique joue sur le cycle hydrologique résultant en l'accroissement des phénomènes d'évaporation, générant des pluies plus importantes pour maintenir l'équilibre global de l'humidité. Il a été montré que les précipitations tendront à augmenter aux hautes latitudes, tandis qu'au niveau des tropiques les précipitations seront plus variables. En régions tropicales (10°N-10°S), la pluviosité a augmenté de 0,2 à 0,3% par décennie pendant le siècle dernier (Montaggioni, 2007). L'intensité des pluies risque également de s'accroître : des épisodes de fortes pluies seront plus fréquents (Pittock, 1999 ; Montaggioni, 2007).

L'augmentation des pluies agit sur les récifs coralliens de plusieurs manières (Pittock, 1999 ; Buddemeier *et al.*, 2004 ; Montaggioni, 2007) :

- en générant une dessalure des eaux de surface, pouvant conduire au blanchissement corallien ;
- en augmentant la turbidité des eaux via l'érosion des côtes, d'où un ralentissement de la croissance corallienne jusqu'à l'étouffement des polypes si la quantité de particules terrigènes est trop importante pouvant léser les tissus ou conduire à leur mort ;
- en augmentant la concentration en éléments nutritifs via l'érosion des bassins versants, d'où des phénomènes d'eutrophisation favorables au développement d'algues au détriment des coraux ;
- ou en drainant des pollutions depuis les côtes habitées.

5.3.5 Les effets de la variation du niveau de la mer

L'effet de la hausse du niveau de la mer sur les récifs coralliens reste encore assez flou à l'heure actuelle. En effet, théoriquement les coraux devraient pouvoir s'adapter à cette élévation (1 à 2 mm/an, soit 0,1 à 0,9 m à la fin du siècle) par leur taux de croissance (en moyenne 1 à 10 mm/an et jusqu'à 20 cm/an pour les espèces branchues les plus rapides). De plus l'effet pourrait être bénéfique pour les récifs situés dans des milieux très peu profonds (platiers frangeants régulièrement émergés à marée basse). En outre, les larves coralliennes, extrêmement mobiles, devraient pouvoir rapidement coloniser les nouveaux substrats disponibles (Pittock, 1999 ; Gattuso and Buddemeier, 2002 ; Buddemeier *et al.*, 2004 ; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007 ; Montaggioni, 2007).

En revanche, la capacité d'un récif à croître et à occuper de nouveaux espaces dépend largement de sa vitalité. En effet, compte tenu de tous les stress affectant les récifs de nos jours (augmentation de la température, diminution du taux de saturation en aragonite, pollutions diverses, eutrophisation, et bien d'autres), il n'est pas assuré que les récifs soient en mesure de compenser l'élévation du niveau de la mer, si lente soit-elle (Pittock, 1999 ; Montaggioni, 2007).

L'effet probablement le plus néfaste réside dans le fait que la hausse du niveau des mers va accroître les phénomènes d'érosion des côtes, remettant en suspension des sédiments meubles et mal consolidés de la zone littorale. Ce phénomène sera d'autant accentué sur les îles basses du Pacifique, en particulier les atolls, où les barrières récifales ne pourront plus remplir leur rôle de

protection des côtes (Gattuso and Buddemeier, 2002 ; Buddemeier *et al.*, 2004 ; Montaggioni, 2007).

L'élévation du niveau de la mer pourrait également être nuisible pour les récifs marginaux profonds, déjà situés proche de leur limite maximale de profondeur (Gattuso and Buddemeier, 2002 ; Buddemeier *et al.*, 2004).

Enfin, il est important de souligner que même si on peut considérer que la hausse actuelle du niveau de la mer ne représente pas une menace significative pour le maintien des populations coralliennes, si cette élévation venait à s'accélérer, dépassant la vitesse d'accrétion minérale des coraux, et que le pire des scénarios venait à se réaliser (la fonte rapide des glaces du Groenland provoquant une hausse de 6 à 10 m au dessus du niveau actuel), il est fort probable que peu de coraux en réchappent (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007).

5.3.6 *Les effets de la variation dans les événements climatiques extrêmes : cyclones et tempêtes*

Les dépressions et les cyclones tropicaux participent au cycle naturel de développement des récifs, en aidant par exemple à maintenir une certaine diversité et éviter la monopolisation de l'espace par une espèce dominante (théorie de la perturbation intermédiaire, Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007 ; Buddemeier *et al.*, 2004). La théorie de la perturbation intermédiaire n'est valide que si la fréquence des perturbations est suffisamment faible pour que les récifs aient le temps de se régénérer entre deux perturbations. En revanche, si la fréquence des cyclones est trop importante (ce qui est prévu pour les décennies à venir), la régénération naturelle des récifs n'aura pas le temps de s'opérer, la résilience du récif s'en trouvera affectée, conduisant progressivement l'écosystème récifal à se modifier en des états alternatifs non désirés, dominés par des communautés d'algues par exemple ou par des substrats meubles (débris non consolidés) qui laissent peu de chance à une recolonisation par les larves coralliennes.

Au niveau de l'intensité des cyclones le postulat reste le même : si l'intensité est modérée, la régénération du récif pourra se faire par la croissance de fragments générés par l'impact du cyclone, ou par la reproduction sexuée à partir de colonies adultes encore en vie ; en revanche si l'intensité est trop importante, et qu'il ne reste plus d'organismes vivants pour aider à la régénération, la recolonisation devra se faire par le jeu des courants qui apportera des larves coralliennes issues d'un récif avoisinant, si elles trouvent un substrat favorable où se fixer.

Les récifs peuvent également être affectés par les effets secondaires de l'intensification du régime cyclonique, en particulier les déversements de particules terrigènes (associés aux fortes pluies accompagnant les cyclones) et la remise en suspension des sédiments, à des échelles pouvant atteindre plusieurs centaines de km, et persister pendant des semaines après le passage d'un cyclone (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007 ; Gattuso and Buddemeier, 2002).

5.3.7 Synthèse

Tableau 4. Tableau récapitulatif des réactions des récifs aux variations de paramètres environnementaux relatifs au changement climatique et indicateurs ou descripteurs potentiels associés

Paramètre du changement climatique	Réaction globale	Effets détaillés	Indicateurs/descripteurs potentiels
Augmentation de la température de surface de l'eau	Blanchissement corallien	• Ralentissement de la croissance • Diminution de la fécondité • Modification de la composition des populations • Diminution dans le succès de phases de vie précoces des larves • Mortalité sélective ou massive • Perte de résilience du système	• Taux de croissance • Taux de fécondité • Composition spécifique • Taux de recrutement • Indice de blanchissement
	Migration des coraux	• Extension de l'aire géographique de distribution de certaines espèces • Occupation de nouveaux espaces	• Extension géographique des espèces • Couverture corallienne et composition spécifique
	Augmentation de l'occurrence de maladies coralliennes	• Lésion des tissus coralliens • Erosion du squelette calcaire • Mortalité	• Taux de nécrose • Occurrence de maladies • Taux de mortalité
Augmentation du taux de CO ₂ océanique	Acidification des océans	• Ralentissement du taux de croissance linéaire • Formation d'un squelette de moindre densité • Investissement d'énergie dans la calcification au détriment d'autres fonctions vitales • Retard dans la maturité sexuelle • Vulnérabilité accrue lors de perturbations : perte de résilience • Augmentation de la dissolution des squelettes calcaires • Variation dans la composition en éléments azotés et phosphorés • Développement algal favorisé au détriment des coraux	• Taux de croissance • Densité des squelettes • Gamétogénèse • Ratio algues/coraux
Augmentation des précipitations	Blanchissement corallien (lié à la dessalure des eaux)	• Ralentissement de la croissance • Diminution de la fécondité • Modification de la composition des populations • Diminution dans le succès de phases de vie précoces des larves • Mortalité sélective ou massive	• Taux de croissance • Taux de fécondité • Composition spécifique • Taux de recrutement • Indice de

		• Perte de résilience du système	blanchissement
	Accroissement de l'érosion côtière	• Accroissement de la turbidité : ralentissement de l'activité photosynthétique (fonctions vitales amoindries), étouffement des polypes, lésions, mortalité • Augmentation de la concentration en éléments nutritifs : eutrophisation : développement d'algues favorisé • Augmentation de la pollution marine	• Taux de croissance, de mortalité, de nécrose • Ratio algues/coraux • Occurrence de maladies
Hausse du niveau de la mer	Migration des coraux	• Colonisation de nouveaux espaces émergés • Mortalité de récifs marginaux profonds	• Couverture corallienne sur les récifs nouvellement émergés • Taux de mortalité sur les récifs profonds
	Accroissement de l'érosion côtière	• Accroissement de la turbidité : ralentissement de l'activité photosynthétique (fonctions vitales amoindries), étouffement des polypes, lésions, mortalité • Augmentation de la concentration en éléments nutritifs : eutrophisation : développement d'algues favorisé • Augmentation de la pollution marine	• Taux de croissance, de mortalité, de nécrose • Ratio algues/coraux • Occurrence de maladies
Augmentation de l'intensité et de la fréquence des cyclones	Turbulence des masses d'eaux	• Destructions mécaniques accrues • Etats alternatifs non désirés (où les algues dominent) • Non régénération des récifs après impact • Augmentation de la diversité spécifique par création de nouveaux espaces à coloniser et en évitant le monopole d'espèces dominantes	• Taux de mortalité • Ratio algues/coraux • Taux de recolonisation • Composition spécifique
	Accroissement de l'érosion côtière par augmentation des pluies associées au passage des cyclones	• Accroissement de la turbidité : ralentissement de l'activité photosynthétique (fonctions vitales amoindries), étouffement des polypes, lésions, mortalité • Augmentation de la concentration en éléments nutritifs : eutrophisation : développement d'algues favorisé • Augmentation de la pollution marine	• Taux de croissance, de mortalité, de nécrose • Ratio algues/coraux • Occurrence de maladies

5.4 Les effets du changement climatique sur les herbiers

5.4.1 Préambule

Les herbiers sont des plantes à fleurs qui présentent plus de caractéristiques communes avec les plantes terrestres qu'avec d'autres macrophytes marines telles que les algues. Il existe dans le monde environ 55 espèces d'herbiers différentes réparties en 5 familles. On peut trouver des herbiers dans des milieux présentant des conditions très différentes de température ou de taux de CO₂, ainsi différentes espèces montrent des tolérances différentes aux changements de conditions environnementales (Waycott *et al.*, 2007).

D'une manière générale, les herbiers requièrent de la lumière, des nutriments, du CO₂, un substrat pour s'accrocher, des conditions de salinité, température et pH adéquates pour survivre. Si ces facteurs viennent à manquer on assiste à la mortalité des herbiers.

Certaines espèces marginales sont capables de survivre et de croître dans des milieux peu éclairés, en particulier du genre *Halophila*, que l'on va rencontrer sur des fonds profonds ou eaux turbides. Excepté ces espèces, la plupart des herbiers ont besoin d'un éclairage minimum pour survivre. La productivité des herbiers est souvent limitée par la disponibilité en nutriments. Le régime des perturbations physiques est particulièrement important pour déterminer la composition d'un assemblage d'herbier et sa survie. La composition du peuplement est souvent affectée par l'action du broutage par les dugongs, ou par les mouvements de sédiments ou entrées d'eaux pendant les événements cycloniques ou de tempête. Là encore différentes espèces d'herbier peuvent montrer des seuils de tolérance différents à ces perturbations. Les herbiers poussent généralement dans des eaux où la salinité est proche de 35‰, bien qu'ils aient été observés dans des milieux où la salinité variait entre 4 et 65‰. Là encore certaines espèces sont plus tolérantes que d'autres aux variations de salinité : *Halophila ovalis* est l'espèce la mieux adaptée à ces fluctuations. La température est un facteur critique à la survie de toutes les plantes, marine ou terrestres, et elle contrôle également le pH et le taux de CO₂ dissous dans la colonne d'eau. Les optimums de température-pH-CO₂ sont spécifiques à chaque espèce et contrôlent la distribution spatiale des espèces. La température influence également le taux de croissance et l'état de santé des organismes. Là encore les réponses sont spécifiques à chaque espèce.

Il a été établi que la menace la plus sérieuse des changements climatiques sur les herbiers réside dans l'augmentation de la température des eaux, en particulier sur les habitats peu profonds (Waycott *et al.*, 2007).

Les paragraphes qui suivent décrivent la réaction des herbiers face au changement climatique, en particulier les effets du réchauffement global, de la hausse du niveau des mers, de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique et océanique et de la fréquence et intensité des événements climatiques extrêmes. Ces changements ont été décrétés comme les plus sévères sur la distribution et la croissance des herbiers (GIEC, 2007 ; Waycott *et al.*, 2007 ; Duarte *et al.*, 2008).

5.4.2 Les effets de l'augmentation de la température de l'eau

L'effet de l'augmentation de température sur les herbiers a été peu étudié comparativement à celui du blanchissement du corail. Toutefois on a pu recenser un certain nombre d'informations dans les quelques documents consultés (en particulier Short and Neckles, 1999 ; Duarte *et al.*, 2008 ; Waycott *et al.*, 2007).

La température de l'eau est le facteur majeur contrôlant l'activité photosynthétique des herbiers et des températures élevées augmentent généralement l'activité photosynthétique des herbiers tropicaux. Un seuil de tolérance existe toutefois, variant selon les espèces, ainsi qu'un optimum de température pour lequel la croissance, la photosynthèse et la respiration sont

maximales (Short and Neckles, 1999). Il est communément décrété, par analogie aux plantes terrestres, que lorsque la température augmente jusqu'à 38°C, le taux de photo-respiration augmente en conséquence réduisant l'activité photosynthétique pour un taux de CO₂ donné. Entre 38 et 42°C, l'activité de transport des électrons est perturbée via l'inactivation de la production d'enzymes par les photosystèmes. Au-delà de 42°C, de nombreuses protéines sont simplement détruites et la photosynthèse est inhibée (Waycott *et al.*, 2007).

Certaines espèces sont plus sensibles que d'autres, ainsi des études expérimentales ont montré que les espèces *Cymodocea rotundata*, *Cymodocea serrulata*, *Halodule uninervis* et *Thalassia hemprichii* sont plus tolérantes à des exposition de courte durée (1 à 4h) à des températures élevées (35 à 45°C) que les espèces *Halophila ovalis*, *Zostera muelleri* et *Syringodium isoetifolium* (Waycott *et al.*, 2007).

Tout comme les coraux, de nombreux herbiers vivent déjà aux limites de leur tolérance thermique, ainsi une augmentation de température de quelques degrés pourrait avoir des conséquences dramatiques sur les populations d'herbiers. Certains herbiers vivent également à leur limite de latitude, ainsi une augmentation de la température implique la mort ou la migration de ces espèces (Duarte *et al.*, 2008).

L'augmentation de la température des eaux peut entraîner une destruction des herbiers par « brulage », en particulier s'ils sont situés dans des eaux claires, peu profondes et à hydrodynamisme faible (cf. site internet Reefutures.org). Ce phénomène a été observé en 2002 en Australie, dans le Queensland (îles Whitsundays et Baie de Shoalwater), à Green Island et Weipa, coïncidant avec l'épisode de blanchissement corallien qui a affecté la Grande Barrière de Corail australienne et de nombreux récifs de l'Indo-Pacifique en 2002. Ce phénomène est exacerbé lorsque les herbiers sont hors d'eau lors des grandes marées basses. La combinaison des facteurs températures élevées et dessiccation à l'air peut entraîner un changement dans la composition des peuplements, favorisant les espèces à taux de régénération rapide et de petite taille (limitant leur exposition durant les marées basses), telles que *Halophila* et *Halodule*.

Le taux de croissance des herbiers est perturbé par l'exposition aux températures élevées, en affectant directement le métabolisme des plantes. Cela a pour effet d'influencer l'abondance et la distribution saisonnière et géographique des différentes espèces, induisant des migrations d'espèces à la recherche d'un milieu correspondant à leur optimum environnemental (migration vers les pôles de nombreuses espèces tropicales et équatoriales).

La floraison des herbiers et la germination des graines peuvent également être affectées, générant une variation dans la composition et l'abondance des peuplements. La température joue un rôle essentiel dans le développement des fleurs, l'induction de la floraison et contrôle les processus de floraison (Short and Neckles, 1999 ; Waycott *et al.*, 2007). L'impact de l'élévation de la température sur les activités de reproduction et de floraison reste toutefois à être exploré plus en détail. Certaines espèces pourraient augmenter la durée de leur période de floraison, tandis que d'autres pourraient voir leur floraison perturbée.

Des effets positifs sont toutefois attendus comme l'augmentation de la diversité spécifique dans les régions sub-tropicales et l'extension de l'aire de distribution géographique de certaines espèces actuellement contraintes par les eaux froides (Duarte *et al.*, 2008).

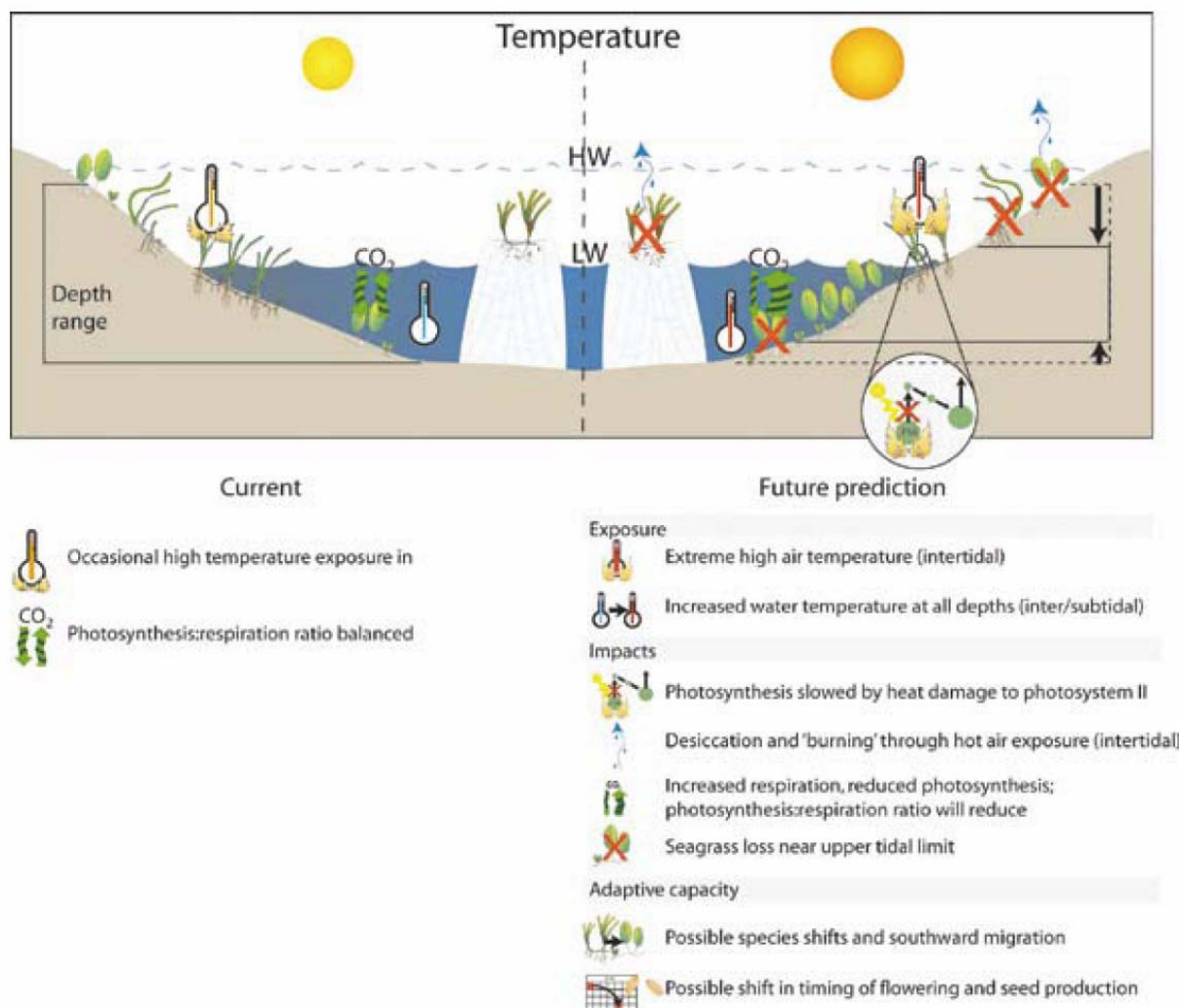


Figure 33. Impacts attendus de l'élévation de la température des eaux sur les populations d'herbiers (tiré de Waycott et al., 2007).

5.4.3 Les effets de l'acidification des océans

Tout comme pour l'élévation de la température, différentes espèces d'herbiers répondent de manière différente à l'acidification des océans.

Les herbiers absorbent les composés carbonés par la surface de leurs feuilles. Ils peuvent assimiler directement du CO_2 (par l'intermédiaire d'enzymes qui le rende assimilable) ou des ions bicarbonates HCO_3^- , selon les espèces. Les espèces qui assimilent directement le CO_2 (*Enhalus acoroides*, *Halodule wrightii*, *Cymodocea serrulata*) seront favorisées par l'acidification des océans. Les espèces utilisant les ions bicarbonates (*Halophila ovalis*, *Cymodocea rotundata*, *Syringodium isoetifolium*, *Thalassia testudinum*) pourraient également bénéficier d'un apport supplémentaire en CO_2 , en particulier en augmentant leur production, en améliorant leur activité photosynthétique et étendant leur aire géographique de distribution (Short and Neckles, 1999 ; Waycott et al., 2007). Toutefois il existe des seuils de tolérance au CO_2 , mais cela n'a pas encore été étudié avec précision.

Aucun changement notable n'est attendu quant à l'impact de l'acidification des océans sur les populations d'herbiers, au niveau de leur état de santé ou de leur distribution.

5.4.4 Les effets de la variation des précipitations

L'effet immédiat de l'augmentation des précipitations est la diminution de la salinité, en particulier sur les zones peu profondes ou baies relativement fermées. De plus, les pluies diluviennes associées aux cyclones et tempêtes peuvent entraîner le débordement des rivières, qui viennent ensuite se déverser dans les eaux marines et entraîner une dessalure importante. Ainsi les peuplements d'herbiers situés à proximité des embouchures de rivières et dans des eaux peu profondes à proximité des côtes sont les plus affectés par les variations de précipitation. De plus les pluies sont souvent accompagnées d'un déversement important de sédiments, drainés par les rivières ou les eaux de lessivage des bassins versants, affectant directement les herbiers en les étouffant ou en diminuant la clarté de l'eau. Des polluants peuvent également être drainés jusqu'aux eaux marines par le lessivage des sols (ex. herbicide, pollutions agricoles). L'état de santé et la croissance des herbiers sont susceptibles d'être perturbés par ces modifications.

Toutefois, à l'heure actuelle, et compte tenu du peu d'informations acquise à ce sujet, aucun cas de mortalité d'herbier n'a été documenté lié à la dessalure (Waycott *et al.*, 2007).

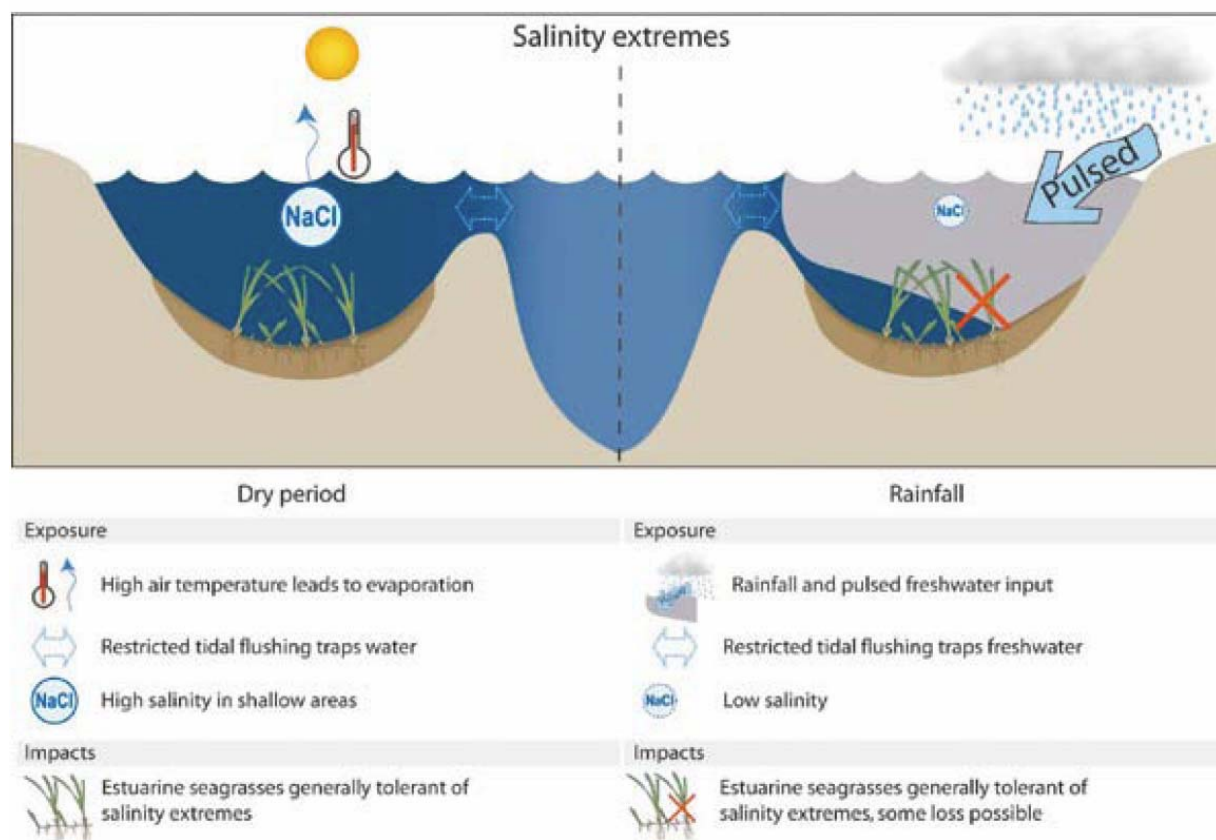


Figure 34. Impacts attendus de la variation de salinité sur les herbiers (tiré de Waycott *et al.*, 2007).

5.4.5 Les effets de l'augmentation du niveau de la mer et des inondations côtières

La distribution des herbiers est généralement limitée par la pénétration de la lumière. La hausse du niveau des mers (attendue entre 10 et 90 cm pour les 100 prochaines années) atténuera d'autant la pénétration de la lumière arrivant jusqu'aux herbiers. Chaque espèce d'herbier présente un seuil de profondeur maximale au-delà duquel elle ne peut pousser ni survivre : c'est la profondeur de compensation. De plus l'activité photosynthétique de certaines espèces (ex. *Halodule uninervis*) est contrôlée par la pression hydrostatique (Short and Neckles, 1999).

De plus, les inondations des zones côtières seront accrues avec la hausse du niveau des mers, drainant une quantité importante de particules terrigènes, accentuant ce phénomène d'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau (Waycott *et al.*, 2007). Ceci est d'autant plus vrai dans les zones tropicales où l'érosion des bassins versants est importante par la mauvaise utilisation des terres, par la déforestation des zones côtières et par l'urbanisation du littoral. La communauté scientifique s'accorde à dire que la première cause de perte des herbiers est la réduction de la clarté de l'eau, par une hausse de la charge en nutriments et une turbidité accrue (Duarte *et al.*, 2008). L'avancée de la mer sur les terres est généralement accompagnée par des mesures de protections côtières (murs, digues, etc.) impliquant une destruction des habitats occupés par les herbiers.

Les herbiers poussant à leur limite de profondeur seront les plus affectés par une diminution de la quantité de lumière reçue. Ainsi la distribution spatiale des herbiers pourraient être affectée. Dans le même temps, de nouveaux habitats, nouvellement inondés, pourraient être colonisés, si le substrat de fixation est acceptable (fonds meubles) (Short and Neckles, 1999 ; Waycott *et al.*, 2007). Un autre effet positif de la hausse du niveau des mers est la réduction du temps d'exposition à l'air des herbiers situés dans la zone intertidale (Short and Neckles, 1999).

Une étude expérimentale sur l'espèce *Zostera marina*, vivant sur des fonds peu profonds, a montré que pour une élévation de 50cm du niveau de la mer au cours des 100 prochaines années, la lumière disponible au niveau de l'herbier serait réduite de 50%, entraînant une diminution de 30 à 40% dans le taux de croissance de l'herbier (Short and Neckles, 1999).

A l'heure actuelle aucune mortalité d'herbiers liée à l'élévation du niveau de la mer n'a été documentée et aucune expérimentation n'a été testée pour appréhender à quelle vitesse les herbiers seraient capables de s'adapter à ces variations.

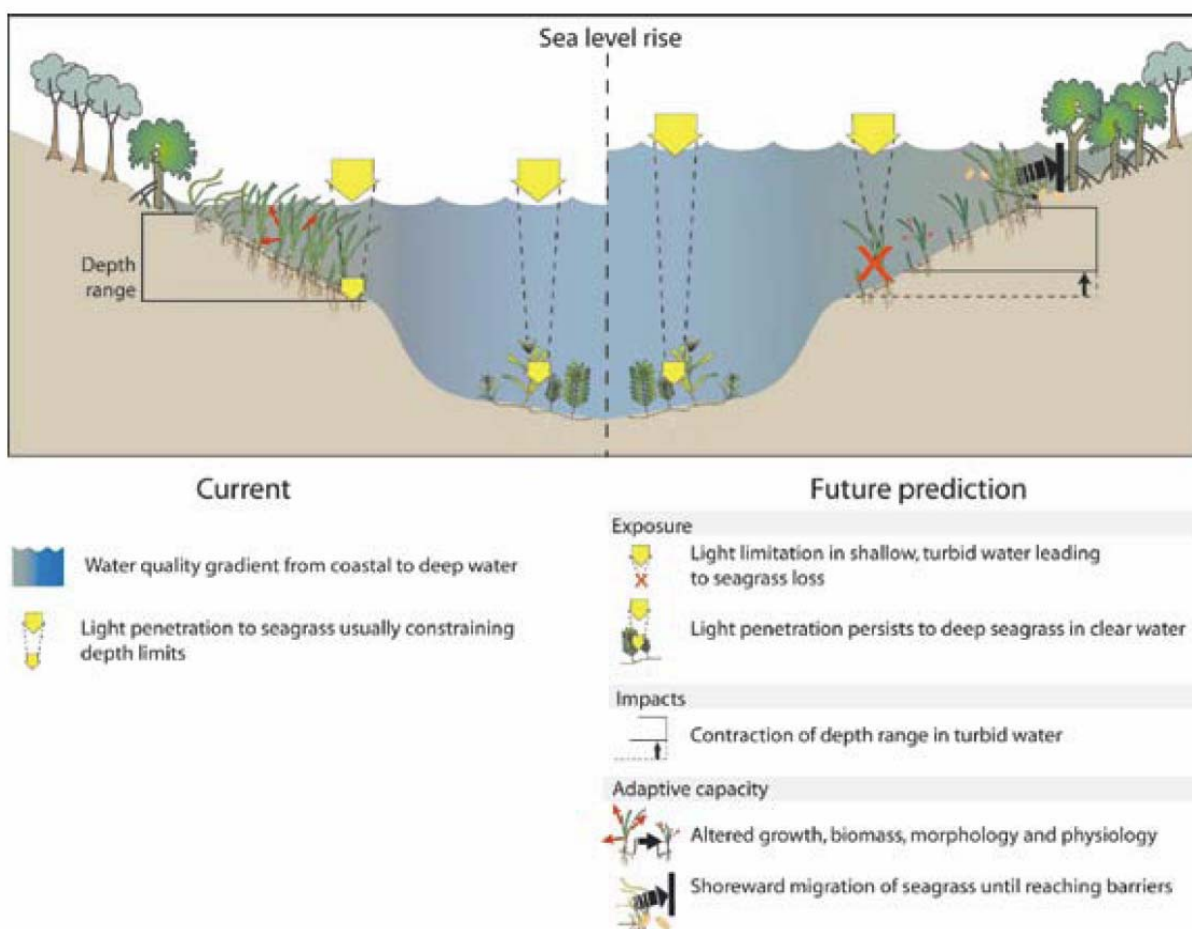


Figure 35. Impacts attendus de l'élévation du niveau de la mer sur les herbiers (tiré de Waycott *et al.*, 2007).

5.4.6 Les effets de la variation dans les événements climatiques extrêmes : cyclones et tempêtes

Trois types de menaces sur les herbiers existent en cas de passage d'un cyclone ou d'une forte tempête : la mise en suspension des sédiments (érosion et dépôt), des mouvements d'eaux turbulents, et l'élévation du niveau de la mer (phénomène de sur-côte).

Les impacts attendus sur les herbiers sont l'étouffement des individus (dépôt de sédiment sur les feuille et racines), le ralentissement de la croissance (diminution dans la pénétration de la lumière), et l'arrachage des plantes (forts mouvements d'eau) (Short and Neckles, 1999 ; Waycott *et al.*, 2007 ; Duarte *et al.*, 2008). Les herbiers les plus affectés seront bien entendu ceux situés à proximité des côtes et dans les eaux peu profondes. Toutefois, dans les Caraïbes, il a été reporté que des herbiers ont été affectés jusqu'à des profondeurs de -23m, arrachés par le passage d'un cyclone.

De nombreux cas de perturbation de zones d'herbiers par le passage de tempêtes ou de cyclones ont été reportés dans le monde (Short and Neckles, 1999 ; Waycott *et al.*, 2007): remise en suspension de sédiments, arrachage de plantes, de tapis d'herbiers ou de zones de stockage de graines et de propagules. Ces dégâts peuvent s'étendre sur des milliers de km² par le passage d'un seul cyclone.

Le passage d'un cyclone ou d'une tempête ralentit généralement le taux de croissance des herbiers, affecte leur survie, et implique la recolonisation du substrat perturbé par de nouvelles graines (Duarte *et al.*, 2008). En revanche, de telles perturbations peuvent également être bénéfiques pour l'écosystème, permettant un renouvellement des populations d'herbiers, empêchant les espèces dominantes de s'approprier tous les substrats, ouvrant des espaces à la colonisation pour des espèces opportunistes telles que *Halophila*, et maintenant par là même une certaine diversité des espèces (théorie de la perturbation intermédiaire) (Duarte *et al.*, 2008).

Les cyclones et tempêtes sont généralement associés à de fortes pluies, drainant des sédiments terrigènes dans les eaux marines par les rivières ou le lessivage des sols, et entraînant une dessalure (voir § 5.4.4). A titre d'exemple, le passage d'un cyclone accompagné de pluies diluviennes en Australie en 1992 a provoqué la destruction de 100 000 ha d'herbier à *Halophila* (Short and Neckles, 1999).

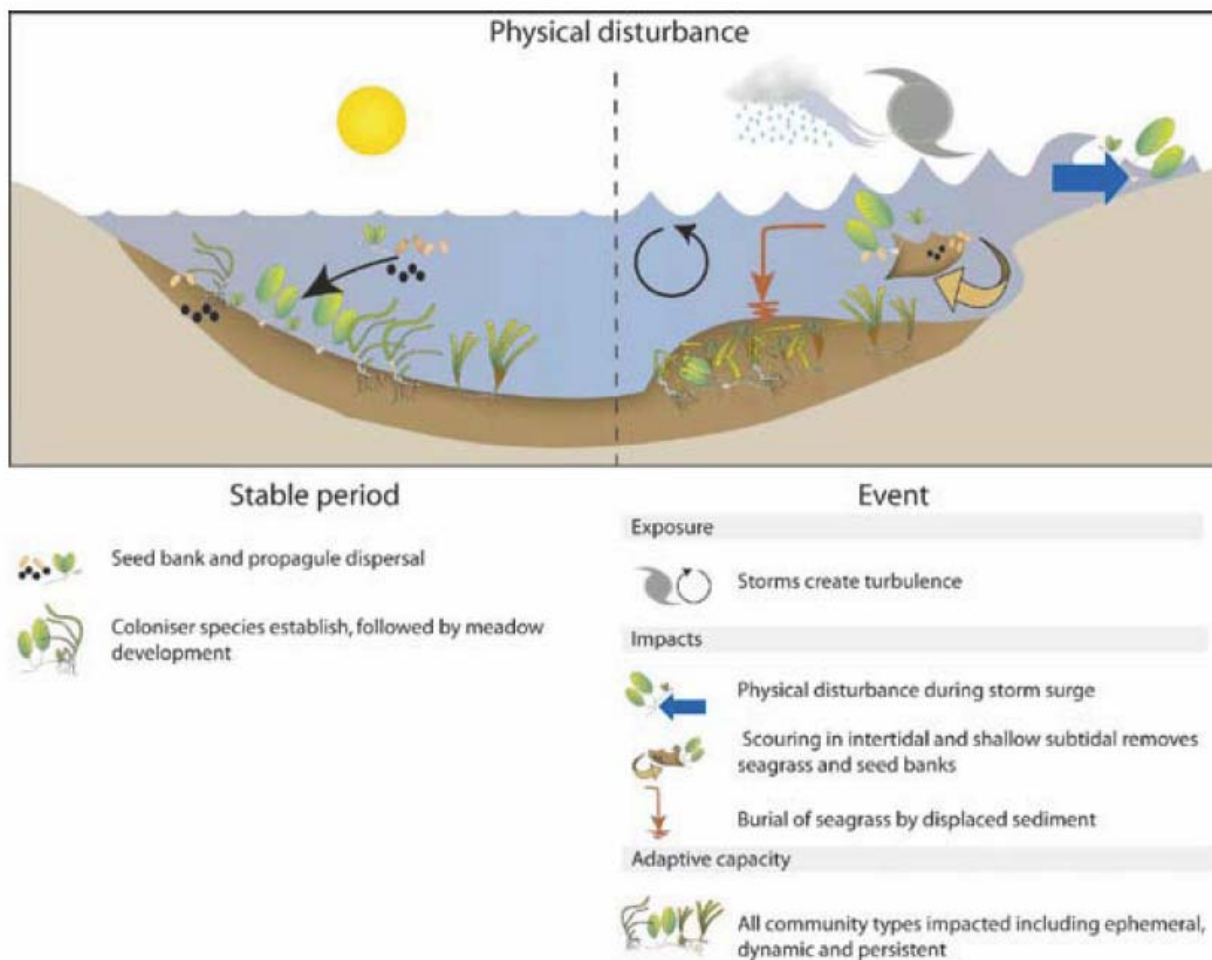


Figure 36. Impacts attendus du passage d'événements climatiques extrêmes sur les herbiers
(tiré de Waycott et al., 2007).

5.4.7 Synthèse

Tableau 5. Tableau récapitulatif des réactions des herbiers aux variations de paramètres environnementaux relatifs au changement climatique et indicateurs ou descripteurs potentiels associés

Paramètre du changement climatique	Réaction globale	Effets détaillés	Indicateurs/descripteurs potentiels
Augmentation de la température de surface de l'eau	Perturbation du métabolisme des plantes	• Ralentissement de la croissance • Perturbation dans la floraison et la germination des graines • Modification de la composition des populations • Augmentation de l'activité photosynthétique jusqu'à un certain seuil de tolérance • Mortalité sélective ou massive par brulage	• Taux de croissance • Période de floraison et de germination • Composition spécifique • Taux de mortalité
	Migration des herbiers	• Extension de l'aire géographique de distribution de certaines espèces • Occupation de nouveaux espaces • Augmentation de la diversité spécifique dans certains habitats	• Extension géographique des espèces • Couverture en herbier • Composition spécifique
Augmentation du taux de CO ₂ océanique	Acidification des océans	• Augmentation de l'activité photosynthétique • Augmentation de la production des herbiers • Extension de l'aire géographique des herbiers • Globalement pas d'effet notable	• Extension géographique des espèces
Augmentation des précipitations	Dessalure des eaux	• Ralentissement de la croissance • Mortalité possible mais non documentée à l'heure actuelle	• Taux de croissance • Taux de mortalité
	Accroissement de l'érosion côtière	• Accroissement de la turbidité : ralentissement de l'activité photosynthétique, étouffement des plantes, lésions, mortalité • Ralentissement de la croissance (par diminution de la pénétration de la lumière) • Augmentation de la pollution marine	• Taux de mortalité et de nécrose • Taux de croissance
Hausse du niveau de la mer	Migration des herbiers	• Colonisation de nouveaux espaces émergés • Mortalité des herbiers profonds	• Couverture en herbier sur de nouveaux espaces émergés • Taux de mortalité sur des récifs profonds
	Accroissement de l'érosion côtière	• Accroissement de la turbidité : ralentissement de l'activité photosynthétique, étouffement	• Taux de mortalité et de nécrose

		des plantes, lésions, mortalité • Ralentissement de la croissance (par diminution de la pénétration de la lumière) • Augmentation de la pollution marine	• Taux de croissance
Augmentation de l'intensité et de la fréquence des cyclones	Turbulence des masses d'eaux	• Arrachage des plantes, propagules et stocks de graines • Augmentation de la diversité spécifique par création de nouveaux espaces à coloniser et en évitant le monopole d'espèces dominantes	• Taux de mortalité post- événement cyclonique • Composition spécifique avant et après événement
	Accroissement de l'érosion côtière par augmentation des pluies associées au passage des cyclones	• Accroissement de la turbidité : ralentissement de l'activité photosynthétique, étouffement des plantes, lésions, mortalité • Ralentissement de la croissance (par diminution de la pénétration de la lumière) • Augmentation de la pollution marine	• Taux de mortalité et de nécrose • Taux de croissance

5.5 Les effets du changement climatique sur les mangroves

5.5.1 Préambule

Les mangroves ont une répartition mondiale comprise entre 25°N et 25°S. Les communautés les plus riches se trouvent dans des zones où la température de l'eau est supérieure à 24°C au cours du mois le plus chaud de l'année (Mc Leod *et al.*, 2006). La température est le facteur environnemental qui contrôle la distribution latitudinale des mangroves dans le monde.

Du point de vue plus régional, d'autres facteurs environnementaux conditionnent la présence ou l'absence des différentes espèces de palétuviers ainsi que la structure des formations. Il s'agit de la salinité ou encore de la pluviométrie :

- Une pluviométrie élevée (cf Nord Queensland) engendre le développement d'une forêt haute (supérieure à 40 m), très productive et à la canopée dense et fermée ;
- Une faible pluviométrie qui augmente le stress hydrique et le stress lié à la salinité, engendre le développement d'une forêt basse (1 à 5 m) peu productive et à la canopée souvent ouverte.

Depuis les cinquante dernières années, plus d'un tiers des mangroves du monde entier a disparu (Alongi, 2002 in Mc Leod *et al.*, 2006). Les impacts anthropiques qui incluent principalement la surexploitation de cet écosystème, sa conversion à des fins agricoles, aquacoles, forestière ou d'extraction de sel, le développement urbain littoral et sa modification pour l'irrigation, en sont en grande partie responsables. Parmi les impacts anthropiques, l'établissement des fermes de crevettes est considéré comme la plus grande menace sur cet écosystème (Primavera, 1997 in Mc Leod *et al.*, 2006).

En plus des menaces directes d'origine humaine, les mangroves subissent également les impacts liés au changement climatique. Le changement global menace non seulement les mangroves mais également leur résilience (McLeod *et al.*, 2006).

5.5.2 Les effets de l'augmentation de la température de l'eau

Les mangroves ne seront pas affectées de façon irréversible par une augmentation de la température.

Deux processus clés qui conditionnent la productivité sont particulièrement sensibles à l'augmentation de la température : il s'agit de la photosynthèse et de la respiration (Lovelock *et al.*, 2007). Une augmentation de 2°C pourrait engendrer une augmentation de la respiration d'environ 20% au niveau du sol et des plantes (Lovelock *et al.*, 2007) ; il en résulterait une perte de gain de carbone.

En général, face à l'augmentation de la température, les mangroves voient souvent leur productivité augmenter et leurs caractéristiques phénologiques changer comme la durée de floraison ou de fructification (Gilman *et al.*, in press). Toutefois, lorsque la température de l'air dépasse 35°C, le stress thermique affecte la structure des racines et l'établissement des plantules ; au-delà de 38 - 40°C, la photosynthèse n'a pratiquement plus lieu (Clough *et al.*, 1982 in Mc Leod *et al.*, 2006).

La plupart des mangroves produisent une densité maximale de pousses lorsque la température de l'air augmente jusqu'à 25°C et arrêtent de produire des feuilles lorsque la température descend en dessous de 15°C. Certaines espèces montrent une baisse du taux de production des feuilles au-delà de 25°C.

Par ailleurs, certains scientifiques pensent que les mangroves vont migrer vers les pôles face à une augmentation de la température (Ellison, 2005 in Mc Leod *et al.*, 2007), à condition qu'elles ne soient pas limitées par le manque de propagules ou par l'absence de conditions physiographiques favorables (Gilman *et al.*, in press).

5.5.3 Les effets de l'augmentation du niveau de la mer

La principale menace du changement climatique sur les mangroves est l'augmentation du niveau de la mer. Les mangroves sont particulièrement sensibles à l'augmentation de la fréquence et de la durée d'immersion liée à l'élévation du niveau de la mer (Lovelock *et al.*, 2007).

Le niveau de la mer a beaucoup varié, avec des fluctuations de plusieurs dizaines de mètres depuis plus de 10 000 ans. Les mangroves ont donc de tout temps subi des élévations de la mer et elles ont pu s'y adapter lorsque :

- le niveau de la mer a augmenté suffisamment lentement ;
- il existait un espace suffisant pour s'étendre ;
- d'autres conditions environnementales étaient réunies.

Elles présentent donc une certaine résilience qui est définie comme la capacité que présente un système à répondre à des changements et des perturbations tout en maintenant ses fonctions (Carpenter *et al.*, 2001).

Les mangroves peuvent donc s'adapter aux changements du niveau de la mer, soit en grandissant vers le haut, soit en s'étendant vers l'intérieur des terres ou vers la mer (Mc Leod *et al.*, 2006 ; Figure 37). On parle alors de déplacement zonal ou « zonal shift » (Duke *et al.*, 2003).

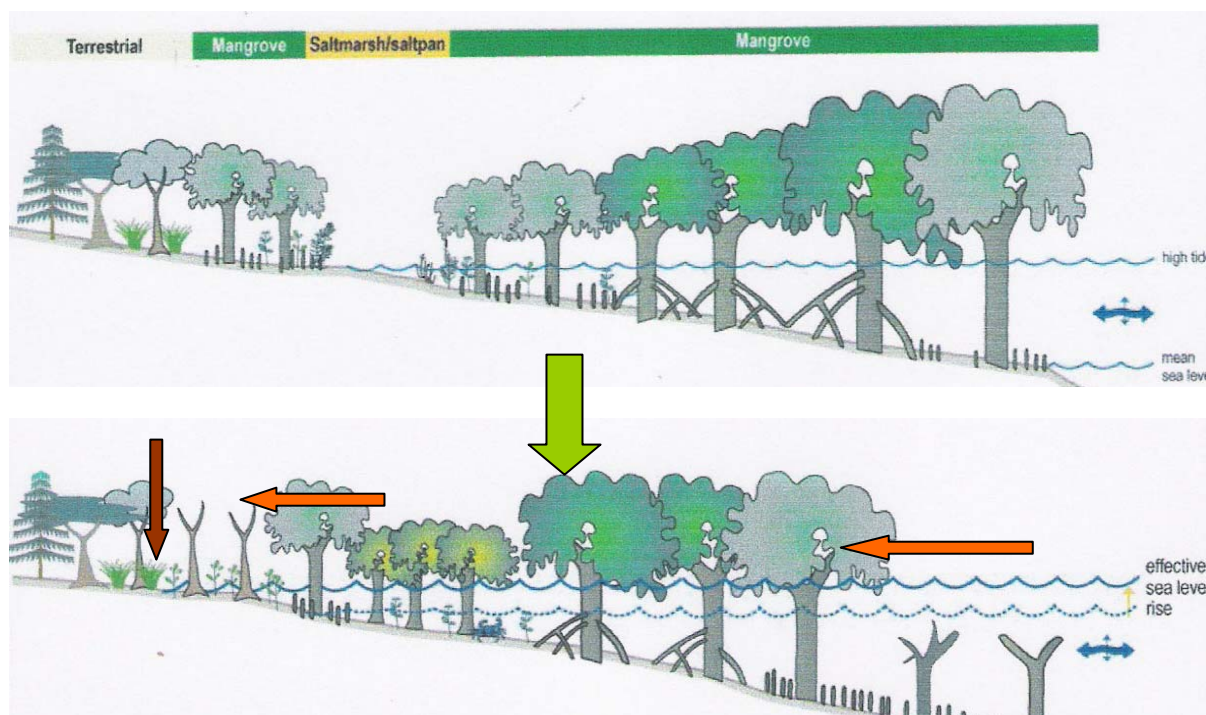


Figure 37. Déplacement zonal d'une mangrove suite à l'élévation du niveau de la mer (source : Duke *et al.*, 2003 :
flèche marron : mortalité ; flèches rouges : déplacement)

Les mangroves produisent de la tourbe (couche organique acide) par le processus de dégradation de la litière, de la croissance des racines ainsi que par le piégeage des sédiments. Cette production de tourbe qui contribue à l'accrétion des sédiments aide les mangroves à faire face à l'élévation du niveau de la mer si le taux d'accrétion est supérieur ou égal au taux d'élévation du niveau de la mer. En conditions normales, le taux d'accrétion observé dans les mangroves va à la même vitesse que l'augmentation du niveau de la mer (Alongi, 2007). Mais lorsque ce dernier dépasse celui de l'accrétion, les mangroves se retrouvent face à des problèmes d'érosion du substrat, de stress lié à l'inondation ou à l'augmentation de la salinité (Figure 38). Une mortalité sur la façade maritime peut alors se produire.



Figure 38. Erosion de la marge maritime et apparition de trouées (source : Gilman *et al.*, 2006)

Le déplacement zonal peut donc être considéré comme un indicateur important et quantifiable de réponse des zones humides face au changement du niveau de la mer (Duke *et al.*, 2003).

Les seuils de tolérance des mangroves à l'élévation du niveau de la mer et leur résilience dépendent cependant d'une série de facteurs locaux qui interagissent, dont les caractéristiques géomorphologiques, la topographie, le niveau de marée, l'accrétion, la subsidence, le taux de croissance des arbres et la composition spécifique ainsi que la présence ou pas d'infrastructures en amont (Lovelock *et al.*, 2007) :

- Une faible pente, la présence d'une barrière anthropique en amont, une subsidence forte, un faible marnage sont autant de facteurs qui rendent une zone de mangrove plus sensible à l'élévation du niveau de la mer (Gilman *et al.*, in press).
- A contrario, une zone de mangrove riche en sédiments (comme des mangroves estuariennes et fluviales) et à fort marnage aura tendance à mieux survivre à l'élévation du niveau de la mer.

Ces facteurs, particulièrement la topographie (Figure 39), le niveau des marées (Figure 40) et l'apport en sédiments (balance entre accrétion et subsidence/érosion : Figure 41) doivent donc être pris en considération dans la réponse de la mangrove à l'élévation du niveau de la mer (Mc Leod *et al.*, 2006). Ce sont donc des descripteurs importants à mesurer.

Il est important de noter que bien que l'apport en sédiments soit un facteur critique pour que les mangroves survivent, un apport excessif peut entraîner un étouffement des pneumatophores et la mort des arbres (Ellison et Stoddart, 1991 in Mc Leod *et al.*, 2007).

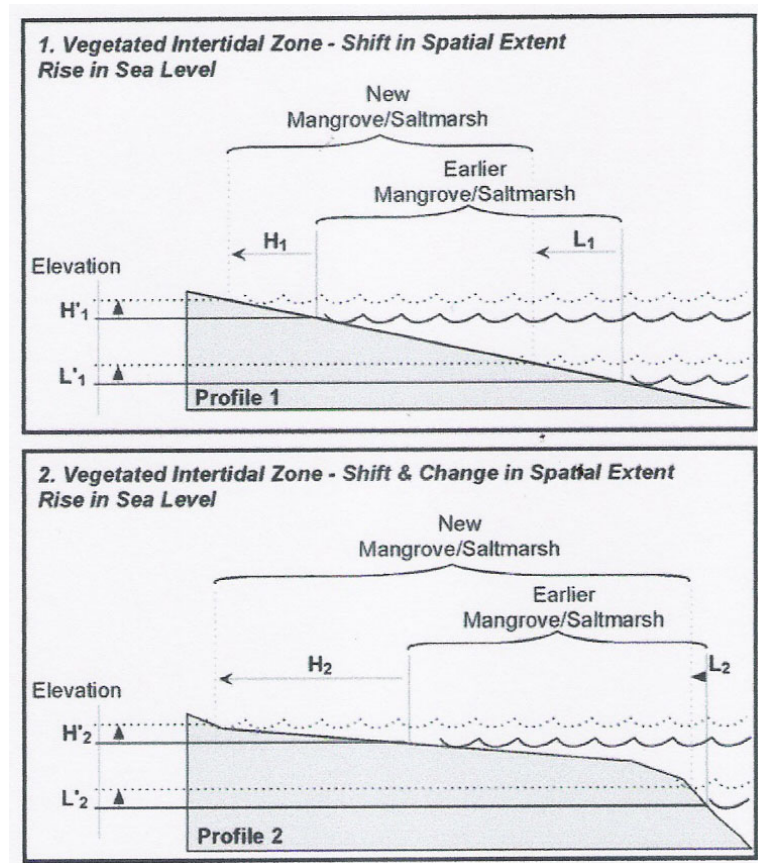
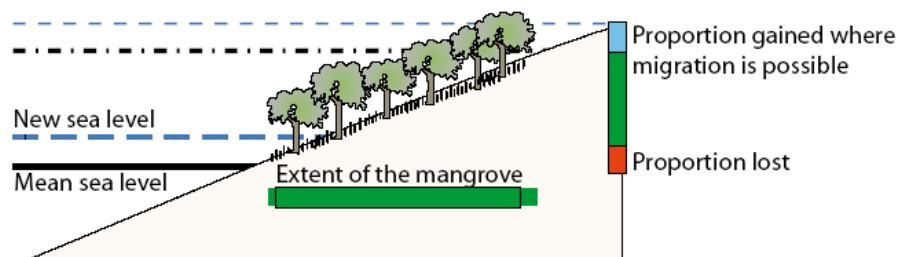


Figure 39. Importance de la nature de la pente sur le déplacement zonal des mangroves
(Source : Duke et al., 2003)

MACROTIDAL



MICROTIDAL

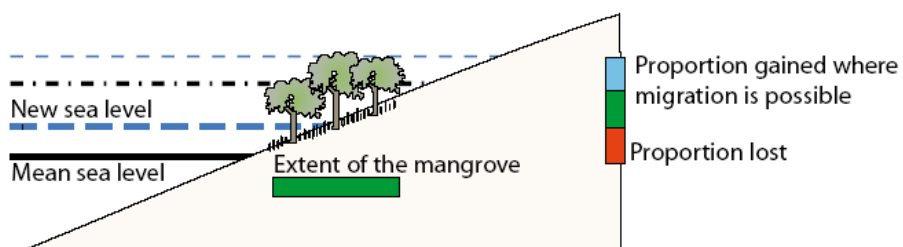


Figure 40. Importance de la nature de la marée sur le déplacement zonal des mangroves
(Source : Lovelock et al., 2007)

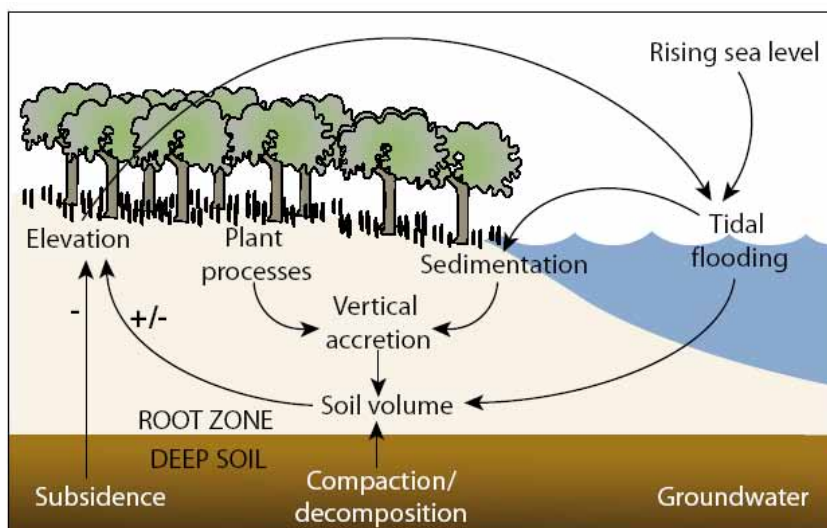


Figure 41. Modèle simplifié des phénomènes d'accrétion/subsidence dans une mangrove
(Source : Lovelock et al., 2007).

Comme pour les coraux, certaines espèces sont plus sensibles que d'autres aux changements des conditions environnementales du fait de leurs différents niveaux de tolérance à ces conditions de l'environnement. Ainsi, certaines zones seront plus résistantes et plus résilientes à l'élévation du niveau de la mer.

- Des résultats issus d'études paléontologiques ont montré que la famille des Rhizophoraceae a eu tendance à dominer au cours des périodes passées d'élévation du niveau de la mer (Lovelock et al., 2007).
- Certaines espèces peuvent s'adapter mieux que d'autres grâce au fait qu'elle peuvent coloniser de nouveaux espaces plus rapidement que d'autres (Semeniuk, 1994 in McLoed et al., 2007 ; Gilman et al., in press).

Enfin, le trait de côte qui se situe sur la frange terrestre de la mangrove et évolue avec le niveau de la mer, peut être considéré comme indicateur de suivi de la distribution des mangroves (Blasco et al., 1996).

Lorsque les mangroves ne peuvent s'adapter à la hausse du niveau de la mer parce que les conditions environnementales locales ne sont pas réunies, la croissance des palétuviers a tendance à baisser et des zones de mortalité peuvent apparaître.

5.5.4 Les effets de la variation des précipitations

Les changements climatiques et particulièrement l'augmentation de la pluviométrie dans certaines régions du monde peuvent affecter la mangrove principalement à deux niveaux (Gilman et al., in press) :

- l'étendue géographique des palétuviers ;
- la croissance des palétuviers.

Un changement de régime pluviométrique engendre une modification de la couverture relative des différentes strates végétales de la mangrove et l'étendue des tannes (Duke *et al.*, 2003). Une augmentation des précipitations favorise la migration et donc la compétition pour l'espace des palétuviers avec la végétation des tannes (Harty, 2004 In Mc Leod *et al.*, 2006). On aborde ici la notion de changement d'écotone ou « Ecotone shift » (Duke *et al.*, 2003 ; Figure 42).

Le concept **d'écotone** traduit un passage rapide, abrupt, entre deux communautés végétales du fait de la variation rapide des conditions du milieu (habitat terrestre et aquatique, contact entre deux roches très différentes, activité humaine...). Son existence est donc liée à la possibilité de distinguer deux communautés végétales et à la variation d'un facteur du milieu contraignant (niveau hydrique, pH, salinité, lumière, ...).

Dès 1984, une définition de vulgarisation (Grand Larousse, 1984) insiste sur la notion de changement d'échelle et sur les rôles fondamentaux de l'écotone dans les transferts d'énergie et de matière : *“Zone de transition et de contact entre deux écosystèmes ou de deux communautés écologiques voisines. L'écotone peut être de taille et de structure très variées selon que l'on s'adresse à la zone de transition entre deux biomes, tels la forêt boréale de conifères et la toundra, à la lisière d'une forêt ou aux zones situées entre l'eau libre d'un étang et sa rive. Du fait de la multiplicité des niches écologiques sur ces petits espaces, les écotones sont généralement plus riches en espèces et ont une diversité plus importante que les écosystèmes voisins. Ces écotones jouent donc un rôle fondamental dans le maintien des écosystèmes et assurent les transferts d'énergie et de matière entre ceux-ci.”*

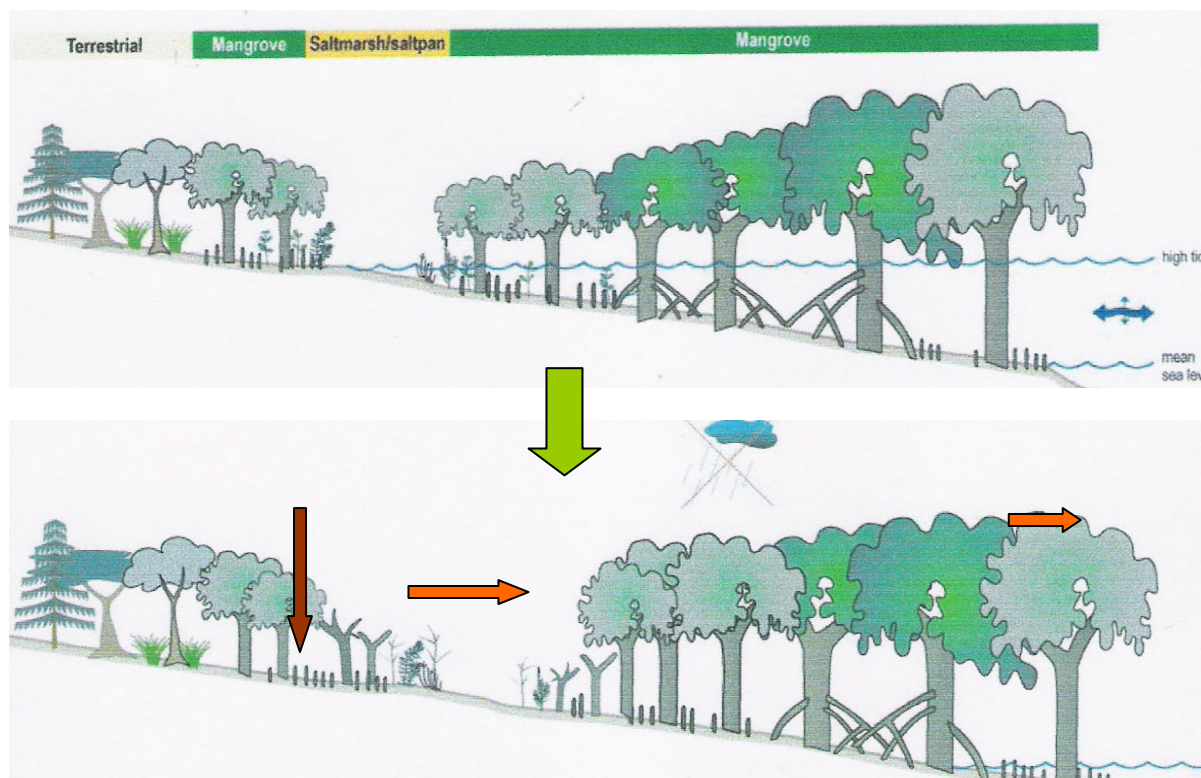


Figure 42. Modification de la mangrove ou « ecotone shift » suite à une augmentation de la pluviométrie (source : Duke *et al.*, 2003 ; flèche marron : mortalité ; flèches rouges : déplacement)

Fosberg (Fosberg, 1961 in Duke *et al.* 2003) a noté une nette relation entre l'étendue des tannes et le climat au niveau des estuaires de la côte nord-est de l'Australie. Cette relation a pu être confirmée en comparant la pluviométrie moyenne annuelle avec l'indice de couverture de zones humides. Cet indice « Wetlands Cover Index » ou WCI correspond, à un endroit donné, au ratio entre la superficie de la mangrove arbustive et la superficie totale de mangrove en incluant les tannes et les marais. La raison pour laquelle ces habitats ont été regroupés ainsi est parce qu'ils partagent la même niche écologique.

Comme le note Fosberg, chaque strate est capable d'occuper l'ensemble de la zone de mangrove si les conditions climatiques, notamment la pluviométrie, sont favorables au développement de cette espèce.

La relation entre la pluviométrie moyenne annuelle et l'indice WCI a été mise en évidence à partir de données issues de 14 sites du Nord du Queensland (Figure 43) : la régression linéaire est hautement significative ($P < 0,001$) et montre une tendance positive entre les 2 paramètres :

- Sur les sites à la pluviométrie < 1400 mm, il y a moins de mangrove arbustive et plus de tannes et marais salants ;
- Sur les sites à la pluviométrie > 2200 mm, les mangroves arbustives occupent tout l'espace et les tannes sont absentes.

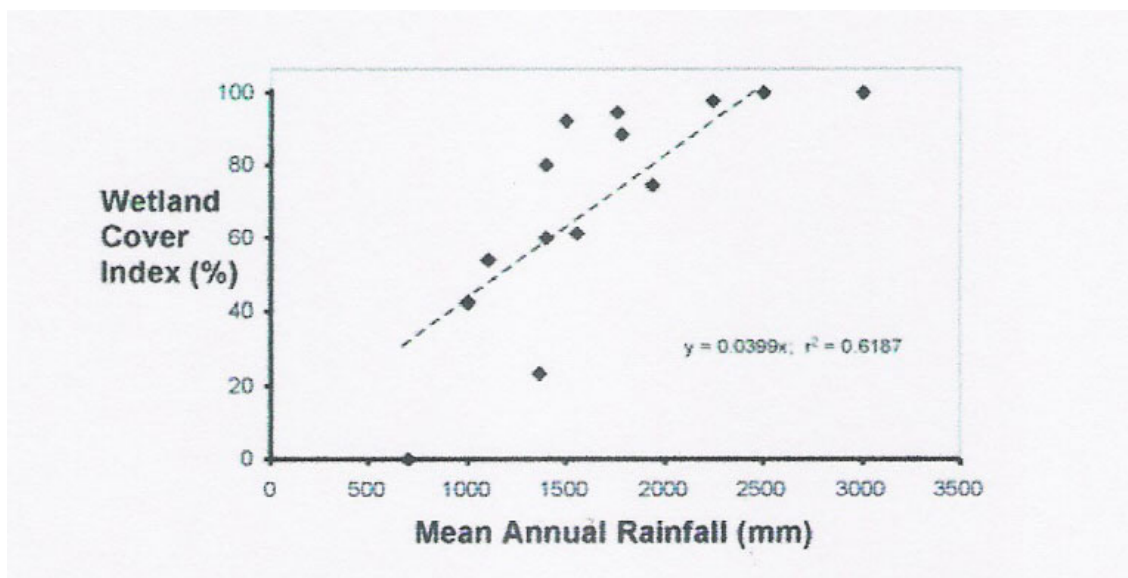


Figure 43. Relation entre la pluviométrie moyenne annuelle et le WCI

L'indice WCI est considéré comme un indicateur pertinent qui, lorsqu'il est utilisé pour une évaluation de l'évolution de la couverture végétale des mangroves, fournit une mesure rétrospective des conditions climatiques passées ainsi que des tendances à long terme (Duke *et al.*, 2003).

5.5.5 Les effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique

Les mangroves qui captent le CO₂ sous forme gazeuse par les stomates des feuilles pour réaliser la photosynthèse, sont sensibles aux concentrations de CO₂ atmosphérique. Face à l'augmentation du CO₂, les mangroves voient également leur productivité augmenter (Lovelock *et al.*, 2007).

Toutefois, il y a peu d'études concernant l'impact de l'augmentation de CO₂ atmosphérique sur les mangroves.

Les quelques résultats disponibles montrent une amélioration de la croissance et de la photosynthèse lorsque le CO₂ atmosphérique augmente. En effet, il a déjà été observé que l'augmentation du niveau de CO₂ entraîne une augmentation de la photosynthèse et du taux de croissance moyen de 2 espèces de palétuviers *Rhizophora stylosa* et *R. apiculata* mais seulement lorsqu'elles poussent dans des conditions de salinité peu élevée (Ball *et al.*, 1997 in McLoed *et al.*, 2007).

Les espèces à croissance rapide et moins tolérantes au sel sont plus sensibles à l'élévation du CO₂. Les effets d'un doublement de CO₂ dans l'atmosphère sont donc limités lorsque la croissance est elle-même limitée par la salinité (Lovelock *et al.*, 2007).

Parallèlement, l'augmentation de CO₂ ayant un impact sur les récifs (ralentissement de la croissance, voire dégradation des récifs), aura un impact indirect négatif sur les mangroves qui dépendent des récifs qui leur fournissent une protection contre l'action de la houle et des vagues.

5.5.6 Les effets de la variation dans les événements climatiques extrêmes : cyclones et tempêtes

Les ouragans importants ou les cyclones, les vents forts et les vagues conséquentes engendrent des dommages et des dépérissements précoces dans la mangrove jusqu'à la mort des arbres (Duke *et al.*, 2003).

Parmi les conséquences de ces phénomènes météorologiques ayant des dégâts notables dans une mangrove, les inondations peuvent être remarquables. Une inondation, combinée à l'augmentation du niveau de la mer peut aboutir à la destruction d'une forêt du fait d'une baisse de la photosynthèse et de la survie (Ellison, 2000 in Mc Leod *et al.*, 2006). Une longue immersion des lenticelles des racines aériennes peut conduire à une diminution des concentrations d'oxygène qui entraîne la mort des palétuviers (Ellison, 2004).

L'échelle des impacts varie considérablement en fonction de l'ampleur des phénomènes, depuis la simple perte de quelques arbres dans une formation jusqu'à la destruction complète de vastes zones de mangroves.

Toutefois les pertes les plus communes liées aux orages sont les petites trouées d'une vingtaine d'arbres dues à l'impact d'un éclair.

Ainsi, il est probable que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes et cyclones prévue dans le changement climatique global engendre une augmentation du nombre et de la taille de trouées dans les mangroves subissant de tels phénomènes météorologiques.

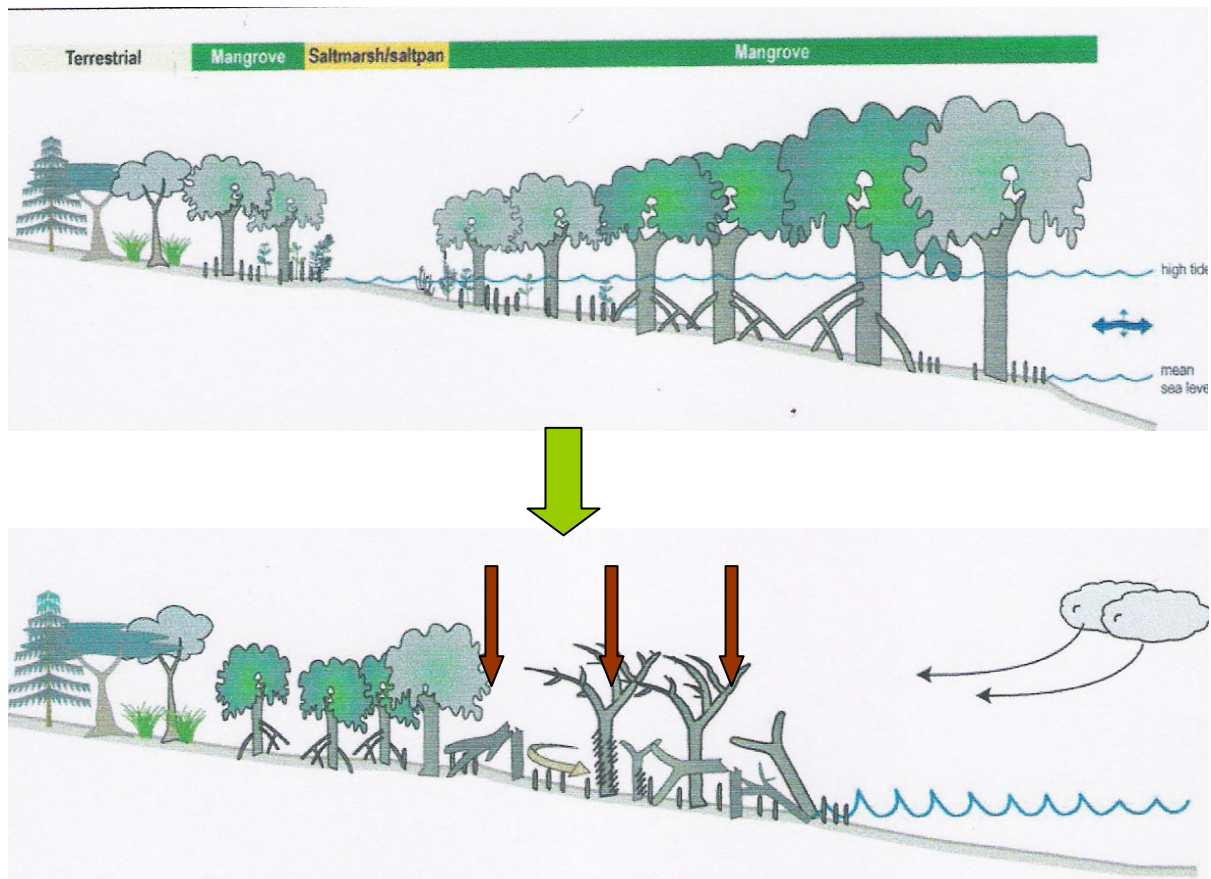


Figure 44. Modification de la mangrove suite à un ouragan (Source : Duke et al., 2003 : flèches marrons : mortalité)

Cahoon et al. (2003 in Mc Leod et al., 2006) ont montré qu'une mortalité massive de palétuviers au Honduras due à un ouragan a engendré un affaissement de tourbe qui a ralenti le processus de régénération suite au phénomène climatique.

Des simulations basées sur des études de modélisation suggèrent qu'une augmentation de l'intensité des ouragans dans les 100 ans à venir engendre une diminution de la taille moyenne des mangroves (Ning et al., 2003 in Mc Leod et al., 2006).

Enfin, il est possible que les fortes tempêtes conduisent à modifier la structure des communautés du fait de réponses différentes des espèces végétales à la tempête.

5.5.7 Synthèse

Tableau 6. Tableau récapitulatif des réactions des mangroves aux variations de paramètres environnementaux relatifs au changement climatique et indicateurs ou descripteurs potentiels associés

Paramètre du changement climatique	Réaction globale	Effets détaillés	Indicateurs/descripteurs potentiels
Augmentation du niveau de la mer (augmentation de la fréquence et de la durée d'immersion)	« Zonal shift » : Modification de zonation Dépendant de topographie, niveau des marées et apports en sédiments	Si taux d'accrétion > taux élévation du niveau de la mer : - Dépérissement (« Dieback ») ou mortalité de certaines espèces à un endroit donné - Déplacement des limites des strates végétales de l'ensemble d'une formation Si taux d'accrétion < taux élévation du niveau de la mer : - Mortalité de la formation - Erosion au niveau de la façade maritime	- Perte ou gain de végétation au niveau des marges terrestres et marines d'une formation - Position du trait de côte Superficie de zone d'arbres morts (descripteur non spécifique)
Augmentation de la température de surface de l'eau		- Augmentation de la productivité (jusqu'au seuil de tolérance) - Changements de caractères phénologiques - Migration vers les pôles	- Biomasse végétale <i>in situ</i> - Position géographique des formations
Augmentation de la pluviométrie	« Ecotone Shift » : Déplacement latitudinal des espèces	« Dieback » - Mortalité de certaines espèces par bande dans la mangrove - Recrutement de certaines espèces dans la zone de tannes - Diminution de l'étendue des tannes	Wetland Cover Index : caractérise les déplacements des écotones par bande de mortalité ou de recrutement de certaines espèces
Augmentation du CO ₂ atmosphérique	Augmentation de la productivité et des processus physiologiques	- Augmentation de la productivité - Amélioration de la croissance et de la photosynthèse	- Leaf Area Index (<i>in situ</i> ou par télédétection) - Biomasse végétale <i>in situ</i>
	Affaiblissement, voire destruction des récifs frangeants	Diminution de la barrière de protection face aux vagues et à la houle	Apparition de mortalité sur la façade maritime
Augmentation de la fréquence et de l'intensité des ouragans et cyclones	Mortalité et changements structuraux dus aux inondations	« Dieback » - Mortalité - Augmentation du nombre et de la taille des trouées - Changement de la structure des communautés - Modification de la hauteur de la canopée d'une forêt	- Nombre et taille des trouées - Déplacement des limites de strates - Hauteur de canopée <i>in situ</i> / Structure de canopée par télédétection

5.6 Les effets du changement climatique sur le plancton

5.6.1 Généralités

5.6.1.1 Différentes communautés

Le plancton est un terme générique qui décrit les organismes qui ont des capacités de locomotion limitées et présentent une diversité de tailles allant des virus femtoplancton de moins de 0,2 µm aux grandes méduses ou mégazooplancton de plus de 200 mm (McKinnon *et al.*, 2007).

Des études sur la distribution du phytoplancton sur la Grande barrière de Corail ont montré un gradient espèces-dépendant de la côte vers le large. Les communautés proches de la côte sont plutôt dominées par des diatomées du fait d'une disponibilité et d'un apport régulier et conséquent en sels nutritifs provenant de sources terrigènes (McKinnon *et al.*, 2007). Cette prédominance est atteinte rapidement du fait d'une croissance plus rapide que celle des cyanobactéries picoplanctoniques. A l'opposé, les communautés des eaux océaniques plutôt oligotrophes sont dominées par des cyanobactéries unicellulaires de la taille du picoplancton telles que les *Synechococcus* et les prochlorophytes (*Prochlorococcus*) accompagnées de cyanobactéries *Trichodesmium* fixatrices d'azote et d'assemblages caractéristiques de dinoflagellés océaniques (McKinnon *et al.*, 2007).

En Nouvelle-Calédonie, le picophytoplancton est prédominant dans le lagon où les eaux sont plutôt oligotrophes ; en revanche, le changement de conditions environnementales telles que les phénomènes de dessalure et d'apport en sels nutritifs favorisent la croissance des espèces de grandes tailles (Dupouy, comm. pers.).

Le tableau qui suit présente la taille des différentes communautés de plancton ainsi que des exemples d'organismes de chacune de ces communautés.

Tableau 7. Taille et organismes des différentes communautés de plancton marin

Catégories de plancton	Taille	Organismes
Femtoplancton	< 0.2 µm	Virus, Parasites
Picoplancton	0.2 - 2 µm	Bactérie, cyanobactérie (<i>Synechococcus</i>)
		Prochlorophytes (<i>Prochlorococcus</i>)
Nanoplancton	2 - 20 µm	Cyanobactérie, diatomée, flagellé
Microplancton	20 - 200 µm	Cilié (dont foraminifère), coccolithophores, diatomée, dinoflagellé, copépode juvéniles
Mesoplancton	0.2 - 20 mm	Amphipode, appendiculaires, chaetognathe, copépode,
		Cyanobactérie (<i>Trichodesmium</i> colonies), thaliacé (doliolides et salpes)
Macroplancton	20 - 200 mm	Euphausiidé, hétéropode, méduse, larve de poissons, ptéropode, salpe solitaire
Megaplancton	> 200 mm	Méduse, salpe colonial

5.6.1.2 Rôles du plancton

Le phytoplancton qui constitue approximativement la moitié de la production primaire globale, joue un rôle majeur dans le cycle du CO₂ atmosphérique.

Le microzooplancton et le mesozooplancton sont les maillons essentiels de la chaîne trophique des ressources côtières et océaniques. Le plancton représente la base alimentaire d'une grande variété de poissons planctonophages des récifs coralliens. Les alcyonaires sont reconnus comme des brouteurs de picoplancton des récifs coralliens tandis que les scléractiniaires représentent des zooplanctonophages non négligeables.

De plus, les poissons, invertébrés et macroalgues benthiques ont des stades de vie planctonique qui se dispersent par les courants.

5.6.1.3 Facteurs régulateurs des communautés planctoniques

L'abondance et la croissance des organismes planctoniques sont directement influencées par plusieurs paramètres variant avec le changement climatique global. La température de l'eau, la chimie de l'eau, la lumière, les radiations ultraviolets et l'enrichissement en sels nutritifs sont les principaux facteurs qui influencent la structure des communautés planctoniques. Bien que les connaissances sur la façon dont le changement climatique global influe sur le mélange et l'advection des masses d'eau en termes de lumière et d'enrichissement à des échelles locales ou régionales soient limitées, l'évaluation de ces paramètres physico-chimiques permet d'envisager plusieurs scénarii.

5.6.2 *Les effets de l'augmentation de la température de l'eau*

Le plancton est poïkilotherme : il est donc directement influencé par la température de l'eau, particulièrement sa croissance, son abondance, sa distribution et l'apparition des blooms planctoniques. Toutefois, les études sur le sujet ayant été menées en zones tempérées, leurs résultats sont à appliquer avec précaution en zones tropicales.

5.6.2.1 Baisse de productivité ?

Une étude récente, basée cependant que sur une dizaine d'années de données, a montré que des températures de surface de l'eau plus chaudes correspondaient à une biomasse océanique et une productivité plus faibles (Behrenfeld *et al.*, 2006). L'auteur précise que les changements de circulation océanique induits par le climat engendreraient une diminution de l'approvisionnement en sels nutritifs nécessaires à la photosynthèse nécessaire à la croissance du phytoplancton.

Doney (2006) confirme que la croissance du phytoplancton et donc la productivité dépendent de la température et de la disponibilité en lumière et en nutriments tels que l'azote, le phosphore, le silicium et le fer. Aux latitudes tropicales où le mélange vertical des eaux est limité du fait d'une stabilisation par la stratification thermique, le niveau de sels nutritifs est en effet naturellement faible ; limite en effet la croissance du phytoplancton. Le réchauffement climatique a tendance à amplifier le phénomène car il inhibe le mélange des eaux réduisant d'autant l'approvisionnement en sels nutritifs vers les couches supérieures : la baisse de productivité en est accentuée (Figure 45).

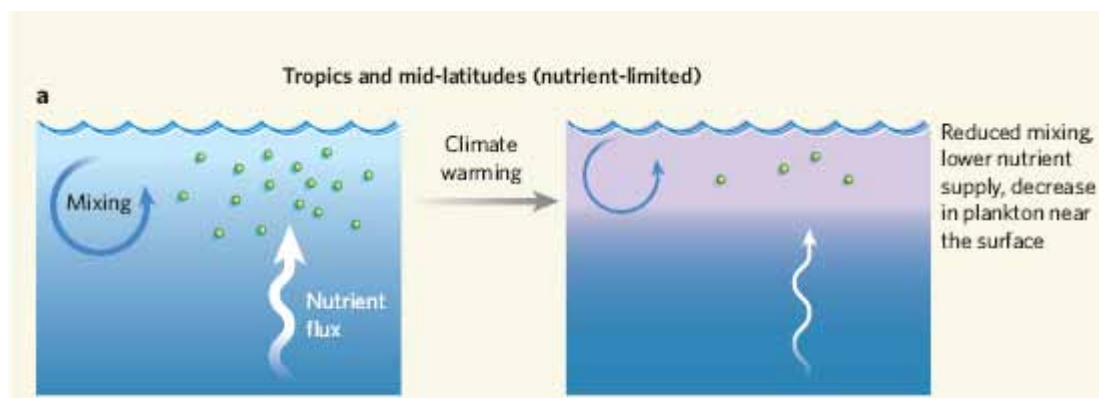


Figure 45. Réponse du phytoplancton à l'augmentation des températures de l'eau en zone tropicale
(Source : Doney, 2006).

Il rajoute que les baisses de productivité observées sont bien corrélées avec les augmentations de température de surface et des gradients thermiques verticaux des océans.

5.6.2.2 Que se passe t-il au niveau des cellules planctoniques ?

Comme chaque espèce de plancton a un optimum thermique au-delà duquel sa croissance est limitée, le réchauffement induit des effets différents sur la croissance qui sont fonction de l'espèce. Le changement de température affecte plutôt directement les processus métaboliques comme la croissance et la respiration que la biomasse des communautés.

Les observations concernant la baisse de productivité ont pu être menées à partir de capteurs sur satellites mesurant la couleur de l'eau qui est corrélée aux communautés phytoplanctoniques. En effet, la biomasse et les taux de croissance du phytoplancton peuvent être estimés depuis l'espace en mesurant la chlorophylle car cette dernière qui représente le principal pigment photosynthétique du phytoplancton absorbe mieux la lumière dans le bleu et dans le rouge que dans le vert.

Les concentrations en chlorophylle sont donc considérées comme de bons estimateurs des stocks et de la productivité du phytoplancton au sein de la couche photique supérieure (Behrenfeld *et al.*, 2006) (Figure 46).

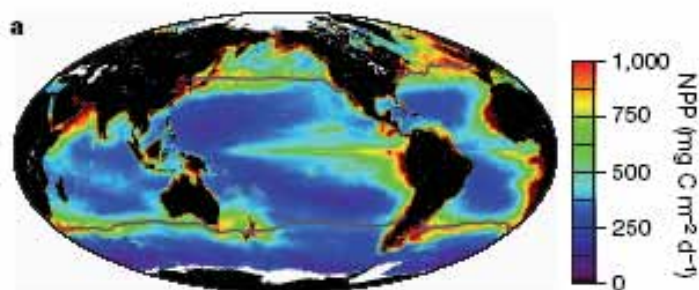
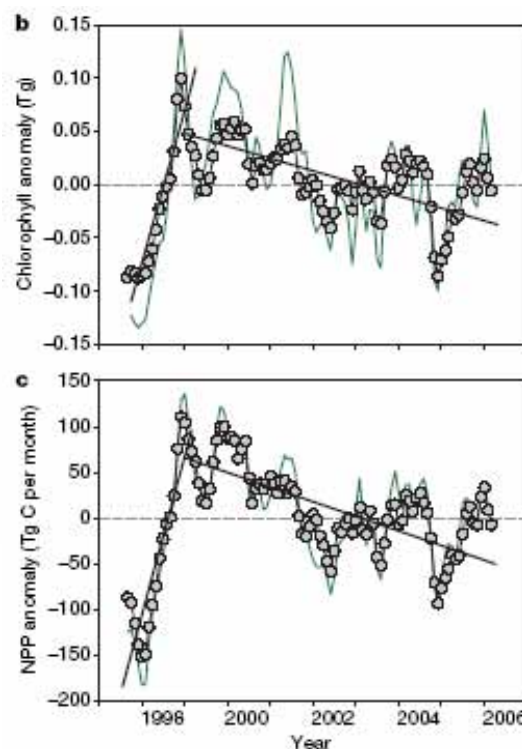


Figure 46. Distribution et tendance de la productivité phytoplanctonique NPP et de la chlorophylle dans l'océan mondial
(Source : Behrenfeld *et al.*, 2006).



Plusieurs programmes de suivi de la couleur de l'eau ont été mis en œuvre dont le système européen ESA (<http://www.globcolour.info/>) fondé sur 4 bases de mesures dont SeaWiFS et MODIS, satellite opérationnel depuis 2002.

Des données de couleur de l'eau sont disponibles quotidiennement et gratuitement via internet ainsi qu'un logiciel pour le traiter (<http://oveancolour.gsfc.nasa.gov>). Un programme d'étude sur la Nouvelle-Calédonie est en cours d'élaboration et des images satellitales montrent des tendances très marquées notamment en période Nina sur la figure 47 (Dupouy, comm. pers.).

L'image montre une couleur de l'eau plus intense entre la côte Est et les Iles Loyauté au cours du mois de février, correspondant à une pluviométrie plus importante de ce mois liée au phénomène La Nina présent autour de la Nouvelle-Calédonie. Elle pourrait correspondre à un apport plus conséquent en sels nutritifs lié à l'augmentation de fréquence des pluies du mois de février 2008 (Dupouy, comm. pers.).

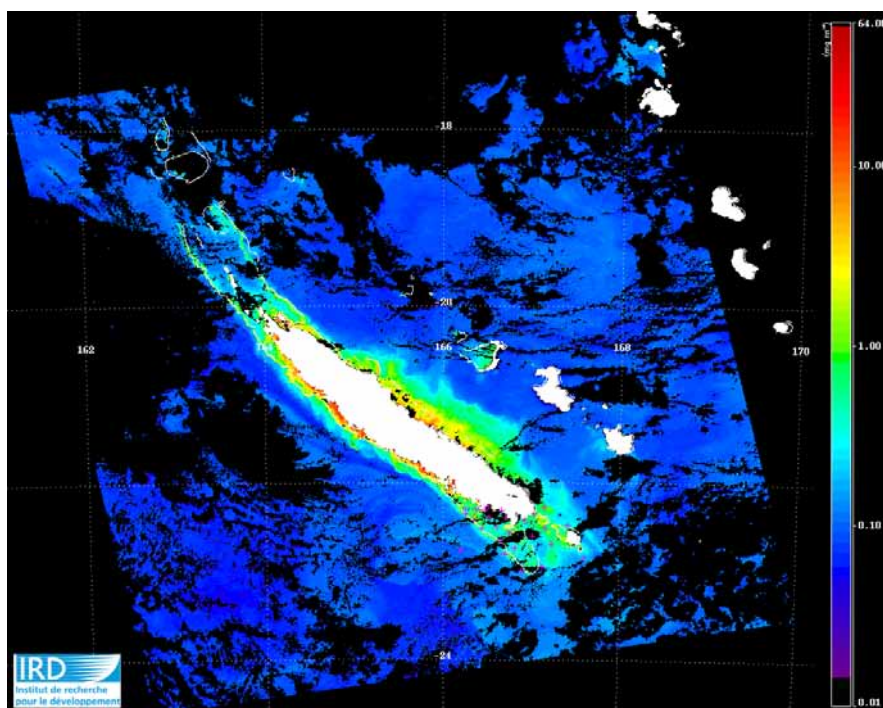


Figure 47. Couleur de l'eau (concentrations en chlorophylle) autour de la Nouvelle-Calédonie issue du satellite MODIS (Source : Dupouy, IRD).

Pour certains scientifiques, bien que la surveillance de la productivité marine par les satellites a été, est et sera toujours utile pour observer de près la vitalité des océans, il est toutefois prématuré à ce stade et sur la base d'une dizaine d'années de données, de parler d'une baisse de la productivité océanique sous l'effet du réchauffement climatique. D'autant que des études plus longues sur l'Atlantique Nord (Raitos 2005, cinquante ans de données) ou sur l'océan austral (Hirawake 2005, trente-huit ans de données) ont conclu à une hausse de cette même productivité du phytoplancton, alors que les températures des océans supérieurs s'élevaient déjà au cours de ces décennies.

5.6.2.3 Migration latitudinale

Un des impacts du réchauffement climatique sur le zooplancton est la migration latitudinale de certaines espèces ou assemblages d'espèces vers les pôles, au même titre que les changements d'abondance et de structure des communautés (Richardson in McKinnon *et al.*, 2007).

5.6.2.4 Changement des communautés

Dans la colonne d'eau, différentes particules phytoplanctoniques peuvent réagir à une perturbation des conditions environnementales, notamment de la chimie des eaux.

Une augmentation de température de l'eau, de la pluviométrie ou des événements cycloniques peut engendrer un changement des communautés car ces changements des conditions physiques induisent une variation des concentrations en sels nutritifs dans la couche supérieure, comme cela a été décrit précédemment.

Ainsi, une augmentation de température de l'eau qui a tendance à induire une diminution des nutriments dans l'eau, favorise le développement préférentiel de picoplancton alors qu'une augmentation des pluies et des cyclones aura tendance à favoriser la croissance de plancton de plus grosse taille tel que les diatomées (Figure 48).

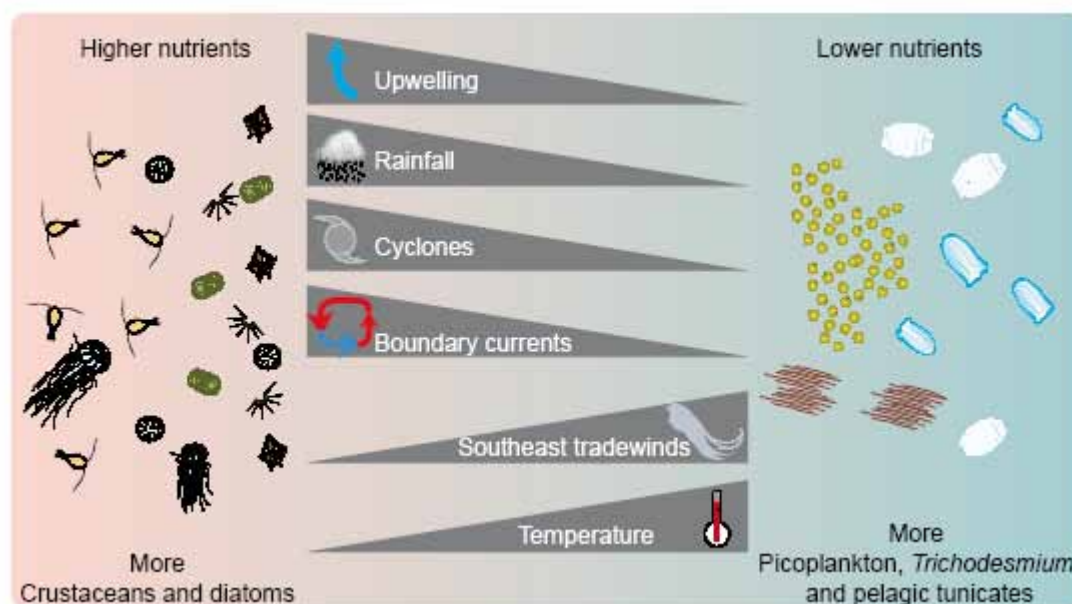


Figure 48. Influence de facteurs climatiques et océanographiques sur la structure des communautés planctoniques
(Source : McKinnon *et al.*, 2007).

5.6.3 Les effets de l'augmentation des rayons ultraviolets

5.6.3.1 Changement des communautés

Dans la colonne d'eau, différentes particules phytoplanctoniques peuvent réagir à une perturbation des conditions environnementales, notamment de la chimie des eaux.

Par exemple, l'augmentation des ultraviolets peut engendrer une modification des communautés phytoplanctoniques, du fait d'une adaptation de certains taxa au détriment d'autres,

qui produisent des amino-acides leur conférant une protection contre les dommages pouvant être causés par les UV (McKinnon *et al.*, 2007).

Plusieurs espèces tolérantes aux UV se développent en booms denses de surface dont certains sont toxiques. L'augmentation des UV pourrait donc induire une augmentation de l'incidence des blooms toxiques de surface.

5.6.3.2 Augmentation des pigments

Ainsi, une augmentation d'UV peut engendrer un changement de la couche de surface et une adaptation phytoplanctonique à la quantité d'UV dans l'eau : le phytoplancton peut s'adapter et se protéger en augmentant leurs pigments (Dupouy, comm. pers.).

Ainsi, mesurer les pigments pourrait servir d'indicateur d'augmentation des UV.

5.6.4 Les effets de l'augmentation de la variation des précipitations et des cyclones

Comme résumée précédemment dans la figure 48 et développée ici dans la figure 49, une augmentation de la pluviométrie ou des cyclones entraînant dans certains cas une augmentation en sels nutritifs dans le milieu jusqu'aux récifs éloignés (comme cela peut être le cas en Nouvelle-Calédonie, notamment sur la côte Est en période La Nina par exemple), peut induire un changement des communautés en favorisant la croissance des espèces de grandes tailles (diatomée, dinoflagellés) (Dupouy, comm. pers.).

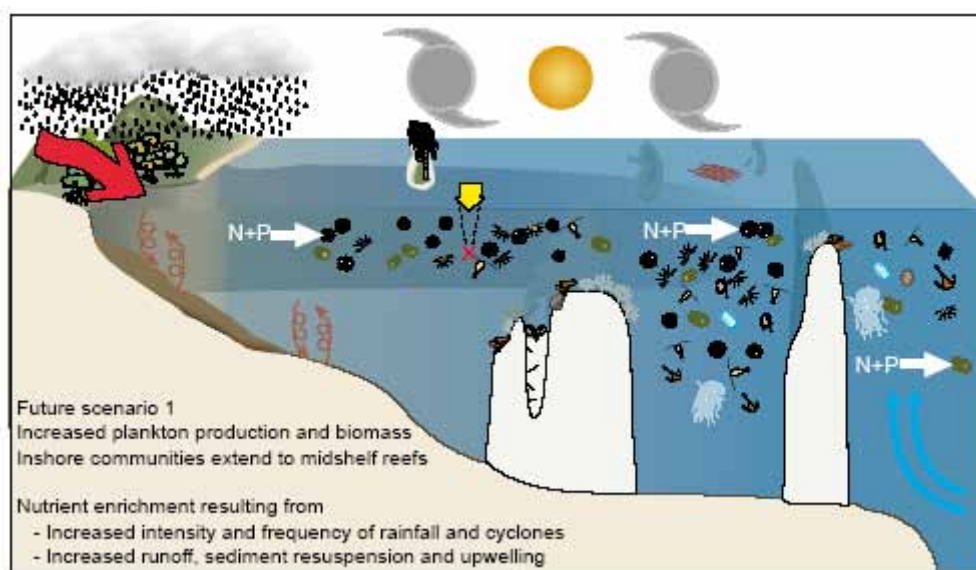


Figure 49. Effets de l'augmentation de la pluviométrie et des cyclones sur les communautés planctoniques (tiré de McKinnon *et al.*, 2007).

5.6.5 Les effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique

Le plancton constitué d'une structure en carbonate de calcium est plus sensible à l'acidification des océans. Sa sensibilité est même dépendante de la forme cristalline du carbonate de calcium : La calcite présente en effet une plus grande stabilité que l'aragonite à la dissolution. Ainsi, les coccolithophoridés et les foraminifères qui produisent de la calcite, ont tendance à voir

leur pourcentage d'individus malformés augmenter face à une hausse de la pression de CO₂ dans l'eau.

L'effet direct de l'acidification de l'océan est la dissolution partielle du test calcaire du zooplancton calcifié, demandant de l'énergie supplémentaire pour entretenir le test et réduisant d'autant la croissance (McKinnon *et al.*, 2007).

5.6.6 Synthèse

Tableau 8. Tableau récapitulatif des réactions du plancton marin aux variations de paramètres environnementaux relatifs au changement climatique et indicateurs ou descripteurs potentiels associés

Paramètre du changement climatique	Réaction globale	Effets détaillés	Indicateurs/descripteurs potentiels
Augmentation de la température	Modification du métabolisme des espèces (respiration, photosynthèse)	• Migration vers les pôles • Baisse de productivité ? • Changement des communautés	• Extension géographique de certaines espèces planctoniques • Concentrations en chlorophylle • Ratio picoplancton / plancton de grande taille
Augmentation des ultraviolets		• Changement des communautés (blooms de surface) • Augmentation des pigments dans le phytoplancton	• Apparition de blooms toxiques de surface • Mesure des pigments
Augmentation de la pluviométrie et des cyclones	Dessalure et augmentation des sels nutritifs	• Changement des communautés par prédominance des espèces de grande taille	• Ratio picoplancton / plancton de grande taille
Augmentation du CO ₂	Acidification de l'océan	• Dissolution des tests calcaires du zooplancton calcifié • Malformation du zooplancton calcifié	• Nombre et forme des coccolithophoridés et foraminifères – réduction d'espèces calcifiées

5.7 Synthèse des indicateurs de réponse des écosystèmes récifo-lagonaires face au changement climatique

Le tableau suivant liste les indicateurs ou descripteurs potentiels de chaque composante de l'écosystème récifo-lagonaire, susceptibles de varier avec certains paramètres atmosphériques ou océanographique caractérisant le changement climatique. Une mention est faite sur leur applicabilité, à savoir : ces indicateurs ont-ils déjà été testés dans le cadre des recherches sur le changement climatique ?

Il est important de souligner que ce tableau n'est donné qu'à titre indicatif, pour avancer dans la réflexion de l'application d'indicateurs pour mesurer l'état de santé des récifs de Nouvelle-Calédonie face au changement climatique. Ce tableau sera revu, corrigé, approfondi et détaillé dans le cadre du rapport final. Il donne toutefois quelques premières informations comme base de discussion lors de la réunion intermédiaire.

Tableau 9. Tableau récapitulatif des indicateurs ou descripteurs de réponse des différentes composantes de l'écosystème récifo-lagonaire face au changement climatique

Ecosystème	Paramètre du changement climatique	Indicateurs/descripteurs potentiels	Applicabilité
RECIF	Augmentation de la température de surface de l'eau	Indice de blanchissement	Déjà testé
		Taux de croissance	Déjà testé
		Taux de fécondité	Déjà testé
		Composition spécifique	A tester
		Taux de recrutement	A tester
		Extension géographique des espèces	A tester
		Taux de nécroses et mortalité	Déjà testé
		Occurrence de maladies coralliennes	A tester
	Augmentation du taux de CO ₂ océanique	Taux de croissance des organismes calcaires	Déjà testé
		Taux de micro-bioérosion	En cours
		Densité des squelettes	Déjà testé
		Gamétogénèse	?
		Ratio algues/coraux	?
	Augmentation des précipitations	Taux de croissance	?
		Taux de fécondité	?
		Composition spécifique	?
		Taux de recrutement	?
		Indice de blanchissement	?
		Taux de mortalité et de nécrose	?

		Ratio algues/coraux	?
		Occurrence de maladies coralliennes	?
	Hausse du niveau de la mer	Couverture corallienne sur les récifs nouvellement émergés	A tester
		Taux de mortalité sur les récifs profonds	?
		Taux de croissance, de mortalité et de nécrose	?
		Ratio algues/coraux	?
		Occurrence de maladies	?
	Augmentation de l'intensité et de la fréquence des cyclones	Taux de mortalité par destruction mécanique	Déjà testé
		Ratio algues/coraux	Déjà testé
		Taux de recolonisation	Déjà testé
		Composition spécifique	?
		Occurrence de maladies	?
HERBIER	Augmentation de la température de surface de l'eau	Taux de croissance	?
		Période de floraison et de germination	
		Composition spécifique	
		Taux de mortalité	
		Extension géographique des espèces	
	Couverture en herbier		
	Augmentation du taux de CO ₂ océanique	Extension géographique des espèces	?
	Augmentation des précipitations	Taux de croissance	?
		Taux de mortalité et de nécrose	
	Hausse du niveau de la mer	Couverture en herbier sur de nouveaux espaces émergés	?
		Taux de mortalité sur des récifs profonds	
		Taux de croissance	
	Augmentation de l'intensité et de la fréquence des cyclones	Taux de mortalité post- événement cyclonique	?
		Composition spécifique avant et après événement	

MANGROVE	Augmentation du niveau de la mer (augmentation de la fréquence et de la durée d'immersion)	Position des marges terrestres et marines d'une formation Position du trait de côte Superficie de zone d'arbres morts	Déjà testé Déjà testé A tester
	Augmentation de la température de surface de l'eau	Biomasse végétale <i>in situ</i> Position géographique des formations	? En cours
	Augmentation de la pluviométrie	Wetland Cover Index : caractérise les déplacements des écotones par bande de mortalité ou de recrutement de certaines espèces	En cours
	Augmentation du CO2 atmosphérique	Leaf Area Index (<i>in situ</i> ou par télédétection) Biomasse végétale <i>in situ</i> Apparition de mortalité sur la façade maritime	A tester ? A tester
	Augmentation des ouragans et cyclones	Nombre et taille des trouées Déplacement des limites de strates Hauteur de canopée <i>in situ</i> / Structure de canopée par télédétection	A tester Déjà testé ?
PLANKTON	Augmentation de la température de l'eau	Extension géographique de certaines espèces planctoniques Concentrations en chlorophylle Ratio picoplancton / plancton de grande taille	A tester En cours En cours
	Augmentation des ultraviolets	Apparition de blooms toxiques de surface Mesure des pigments	En cours En cours
	Augmentation de la pluviométrie et des cyclones	Ratio picoplancton / plancton de grande taille	En cours
	Augmentation du CO2 atmosphérique	Nombre et forme des coccolithophoridés et foraminifères – réduction d'espèces calcifiées	?

Le « ? » signifie qu'à l'heure actuelle les prestataires n'ont pas encore trouvé de références bibliographiques ou rencontrés d'experts leur permettant d'affirmer ou infirmer que ces descripteurs/indicateurs sont applicables ou non. Cela sera l'objet de la réflexion menée pour le rendu du rapport final.

6 LES INDICATEURS DE REACTION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ECOSYSTEMES RECIFO-LAGONAIRES

6.1 Préambule

La liste d'indicateurs potentiels présentés dans le tableau 9 a été exposée aux gestionnaires et au comité ZoNéCo (voir compte-rendu de la réunion intermédiaire – Annexe 3). Compte tenu notamment de l'avancement des recherches dans chaque domaine d'expertise (validité scientifique), de la sensibilité, spécificité et applicabilité dans le contexte de la Nouvelle-Calédonie de chaque indicateur potentiel, un nombre restreint d'indicateurs a été sélectionné. Pour chacun d'entre eux sera fournie dans les paragraphes qui suivent une description détaillée des méthodologies à employer pour suivre leur évolution face aux changements climatiques.

Les indicateurs de réaction sélectionnés sont présentés ci-après par type d'habitat.

Au niveau des récifs coralliens :

- Indice de blanchiment / blanchissement en rapport avec l'augmentation de la température ou la dessalure
- Occurrence de maladies coralliennes en rapport avec l'augmentation de la température
- Densité du squelette calcaire en réponse à l'acidification des océans*

Au niveau des herbiers :

- Extension géographique des herbiers en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau

Au niveau des mangroves :

- Position géographique des mangroves en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau
- Wetland Cover Index : ratio tannes/superficie totale des formations en rapport avec la variation des précipitations
- Positionnement des marges terrestres et maritimes en rapport avec la hausse du niveau de la mer
- Positionnement du trait de côte en rapport avec la hausse du niveau de la mer

Au niveau du plancton :

- Concentration en chlorophylle lagonaire en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau
- Ratio pico/microplancton en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau, de la variation des précipitations et de l'activité cyclonique

* Après consultation de la littérature existante, il apparaît que très peu de données existent à l'heure actuelle sur ce descripteur, ne permettant pas de le proposer comme un indicateur de changement climatique fiable en l'état des connaissances. En revanche il est remplacé par le taux de micro-bioérosion sur les récifs par la microflore perforante en réponse à l'acidification des océans.

6.2 Les indicateurs de réaction des effets du changement climatique sur les récifs coralliens

6.2.1 Les maladies coralliennes en rapport avec l'élévation de la température de l'eau

Des cas de maladies coralliennes ont été identifiés et décrits depuis 1973 dans les Caraïbes, communément considérées comme le foyer mondial des maladies coralliennes. A l'heure actuelle 29 maladies affectant les coraux ont été recensées, la plupart dans les Caraïbes ; seules 12 maladies ont été répertoriées dans l'Indo-Pacifique, dont 7 sur la Grande Barrière de Corail Australienne (Figure 50) et 5 autres dans le reste de l'Indo-Pacifique (Tableau 10). Dans cette région les études et observations menées ont été très dispersées, elles ont toutefois permis de déceler la présence des maladies suivantes :

Maladie	Hôte affecté	Localisation
Bande Noire (Black Band Disease)	32 espèces dont Acropores branchus>	GBR Australie
Bande d'érosion du squelette (Skeletal Eroding Band)	31 espèces dont Acropores et Pocillopores>	GBR Australie
Bande Blanche (White Band Disease)	17 espèces	GBR Australie
Bande Brune (Brown Band Disease)	16 espèces	GBR Australie
Syndrome de la Nécrose Noire (Black Necrosing Syndrome)	Gorgones	GBR Australie
Tumeurs	4 espèces	GBR Australie
Points Roses (Pink Spots)	Porites	GBR Australie
Bande Jaune (Yellow Band Disease)	10 espèces dont Acropores et Porites>	Golfe Arabique
Points Blancs (White Spot Disease)	Porites	Philippines
Association champignons-algues	<i>Porites lobata</i>	Polynésie française
Cyanobactéries	<i>Porites lutea</i>	Océan Indien
Bactéries	Algues calcaires	Cook, Fidji, Salomon, Papouasie Nlle-Guinée, GBR Australie

Tableau 10. Liste des maladies recensées dans l'Indo-Pacifique (tiré de Willis et al., 2004).

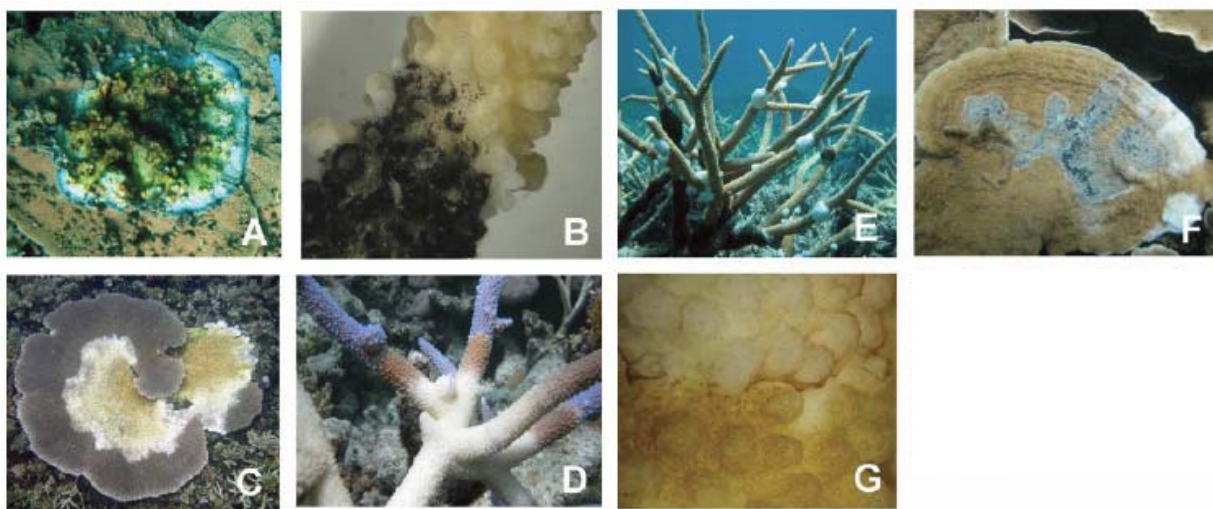


Figure 50. Maladies affectant les coraux de la Grande Barrière de Corail (A) Bande noire sur un *Montipora* ; (B) Bande d'érosion du squelette sur un *Acropora branchu* ; (C) Syndrome blanc sur un *Acropora tabulaire* ; (D) Bande brune sur un *Acropora branchu* ; (E) Anomalie de croissance sur un *Acropora branchu* ; (F) Nécrose sur un *Montipora* ; (G) Autre syndrome cyanobactérien sur un *Pocillopora*. Photos par B. Willis.

Les conditions climatiques sont susceptibles de modifier les processus écologiques. En particulier, on s'est rendu compte que des températures anormalement élevées pouvaient influencer la sévérité et la dynamique des maladies infectieuses en agissant à la fois sur la susceptibilité de l'hôte (en altérant la capacité du corail à se battre contre l'infection) et la virulence de l'agent pathogène (Harvell *et al.*, 2002 ; Lafferty & Holt, 2003). Cela se confirme en ce qui concerne les épidémies humaines (exemple le choléra), chez les plantes et animaux terrestres mais également chez les coraux (Kushmaro *et al.*, 1998 ; Willis *et al.*, 2004 ; Miller, 2006 ; Bruno *et al.*, 2007). En effet, des observations de terrain à petite échelle ont permis de mettre en évidence une recrudescence des maladies coralliennes lors des mois les plus chauds de l'année. Pour étudier ces phénomènes à plus grande échelle, des chercheurs australiens ont conduit une étude portant sur 6 ans de données de suivi des maladies coralliennes au niveau de 48 récifs répartis sur 1500km de linéaire le long de la GBR. Des données de température des eaux ont également été consultées, provenant de satellites haute résolution. Les résultats de cette enquête ont permis de mettre en évidence la prévalence de la maladie du Syndrome Blanc, endémique de la région Indo-Pacifique, en relation avec la fréquence d'anomalies de températures élevées. Ce phénomène n'a toutefois été observé qu'au niveau de récifs présentant un fort recouvrement corallien (>50% de couverture vivante) (Bruno *et al.*, 2007). Ainsi la densité de l'hôte jouerait un rôle important comme seuil de déclenchement de l'explosion d'une maladie.

D'autres études et observations de terrain ont permis de déceler un lien entre des températures élevées et l'apparition de maladies coralliennes, à savoir (tiré de Raymundo *et al.*, 2008) :

- La mortalité massive des gorgones suite à l'épisode El Niño de 1998.
- Les explosions récurrentes des 2 maladies les plus sévères et virulentes affectant les récifs des Caraïbes : la peste blanche et la tache jaune, qui se développent pendant le mois les plus chauds de l'année depuis ces dernières années à Porto Rico et dans les îles vierges américaines.
- Des tendances très marquées à l'augmentation de l'apparition des maladies lors des suivis estivaux sur la Grande Barrière de Corail, sur toutes les grandes familles de coraux, comme par exemple une augmentation des maladies 15 fois supérieure chez les Acropores, 12 fois chez les Favides et double chez les Pocillopores.

6.2.2 Le blanchissement corallien en rapport avec l'élévation de la température de l'eau et la dessalure

6.2.2.1 Alertes de blanchissement

Pourquoi produire des alertes de blanchissement ?

- Objectif scientifique : pour étudier le phénomène de blanchissement pendant sa phase mortelle plutôt qu'après.
- Objectif de communication : pour maintenir le public, les utilisateurs, les politiciens, informés de ces phénomènes.
- Objectif de gestion : pour aider à la gestion des récifs en mettant en place des mesures de préservation des récifs menacés pour limiter l'impact du blanchissement (ex. fermer les zones menacées aux activités humaines pour éviter d'exacerber le phénomène).

6.2.2.2 Coral Reef Watch Satellite Bleaching Alert System

La NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) a développé un système d'alerte de blanchissement corallien, basé sur le suivi de paramètres de température de l'eau obtenus par satellite : *Coral Reef Watch Satellite Bleaching Alert System*. Lorsqu'une alerte est déclenchée, elle est aussitôt disséminée via internet à tous les gestionnaires, scientifiques et autres personnes intéressées inscrites sur le site Web de Coral Reef Watch. Ces alertes sont opérationnelles depuis juillet 2005. A l'heure actuelle il existe 24 stations qui sont suivies en permanence, le niveau de stress thermique des récifs de chaque station étant réévalué 2 fois par semaine. Une station est définie comme un carré de 50km de côté entourant ou à proximité des récifs dénommés. Les stations sont situées dans l'Atlantique (6 stations), Dans le Pacifique (12 stations) et dans l'Indien (6 stations). Malheureusement la Nouvelle-Calédonie ne fait pas partie à l'heure actuelle de ce réseau de surveillance et la station la plus proche se situe à Fidji (récif de Beqa).

Il existe 5 niveaux de stress thermique, comme le montre le tableau ci-dessous :

Niveau de stress thermique	Valeur thermique correspondante
Pas de stress	HotSpot<0
Blanchissement possible	0<HotSpot<1
Blanchissement probable	HotSpot>1 et 0<DHW<4
Alerte de blanchissement 1	HotSpot>1 et 4<DHW<8
Alerte de blanchissement 2	HotSpot>1 et DHW>8

L'existence d'un « HotSpot » indique qu'un stress thermique peut potentiellement se produire dans une zone particulière, la valeur du « HotSpot » quantifie l'intensité du stress thermique (i.e. le nombre de degrés Celsius excédant la valeur maximale mensuelle de température de l'eau en ce site donné). Les cartes de DHW (Degree Heating Week, exprimé en degré Celsius par semaines) représentent l'accumulation de stress thermique sur une période de 12 semaines consécutives. Un stress thermique se définit lorsque la température de l'eau excède de 1°C la valeur maximale mensuelle de température pour un site donné. 1 DHW est équivalent à 1 semaine pour laquelle la température de surface de l'eau est supérieure de 1°C à la température maximale mensuelle. 2 DHW est équivalent à 2 semaines consécutives pour lesquelles la température de surface de l'eau

est supérieure de 1°C à la température maximale mensuelle, ou à 1 semaine pour laquelle la température de surface de l'eau est supérieure de 2°C à la température maximale mensuelle. A partir de 4 semaines consécutives où la température de l'eau excède de 1°C la température maximale mensuelle (ou 1 semaine à 4°C au-dessus de la température maximale mensuelle), une alerte de blanchissement est produite (« blanchissement probable »).

6.2.2.3 Autres systèmes d'alertes

La NOAA et le Laboratoire Météorologique et Océanographique de l'Atlantique travaillent en collaboration avec l'Institut Océanographique de Floride pour mettre en place un réseau de surveillance des paramètres océanographiques dans le sanctuaire marine des Florida Keys, appelé SEAKEYS (*Sustained Ecological Research Related to Management of the Florida Keys Seascape*) (Hendee, 1998). Cette action vient compléter un réseau déjà existant de stations de suivi météorologique constitué de bouées enregistrant les données suivantes: vitesse du vent moyen et des rafales, température de l'air, pression atmosphérique, humidité relative. Les stations SEAKEYS permettent d'enregistrer les données complémentaires suivantes : température de l'eau, radiation photosynthétique active, salinité, fluorométrie, densité optique. Toutes ces données sont traitées en temps réel pour fournir des interprétations journalières (système d'intelligence artificielle) destinées aux scientifiques, pêcheurs ou gestionnaires du Sanctuaire Marin, afin de renseigner notamment sur des conditions environnementales pouvant conduire au blanchissement corallien.

Les alertes sont basées sur le postulat suivant : dans la plupart des cas de blanchissement observé, les facteurs impliqués sont une température de l'eau élevée, combinée à des vents faibles qui favorisent un réchauffement local et une plus grande pénétration des rayonnements solaires. Ainsi ces 3 paramètres – température de l'eau, vitesse du vent et radiation photosynthétique active – sont pris en compte pour déterminer si des conditions environnementales sont favorables au blanchissement corallien.

Un système d'alerte similaire est en place en Australie, sur la Grande Barrière de Corail, constitué de 7 stations météorologiques automatiques, dont la fonction est de fournir des données utiles pour la science et la gestion des récifs (Berkelmans *et al.*, 2002). Les stations appartiennent et sont gérées par AIMS (*Australian Institute of Marine Science*) et GBRMPA (*Great Barrier Reef Marine Park Authority*). Les données récoltées sont : la température de l'eau, la vitesse du vent, la radiation photosynthétique active et la pression atmosphérique, au rythme d'une donnée par demi-heure ; ces 4 variables environnementales permettant d'expliquer une grande part des événements de blanchissement corallien (Berkelmans, 2002). Comme pour le cas précédent, les conditions favorables au blanchissement corallien sont définies comme une température de l'eau élevée résultant de longues périodes d'ensoleillement et de ciel dégagé (rayonnement solaire important), associée à une mer calme (régime de vent faible).

Les données sont interprétées par un logiciel (intelligence artificielle) qui produit des alertes sous la forme de blanchissement « presque certain », « probable » ou « possible ». Les alertes sont gardées en mémoire pendant 7 jours. Si aucune nouvelle alerte n'est déclenchée pendant ce laps de temps l'alerte est stoppée ; si une nouvelle alerte est déclenchée, elle est envoyée à un réseau d'utilisateurs (gestionnaires, chercheurs) via le web (<http://www.coral.noaa.gov/gbr/es>). Des missions de terrain sont ensuite organisées pour vérifier l'extension et la sévérité du blanchissement, permettant en outre d'affiner le modèle de prédiction. Ces missions de terrain ont révélé la justesse de ce modèle dans certains cas, en revanche sur certains récifs où des alertes avaient été produites aucun blanchissement n'a pu être observé. Ceci souligne notre connaissance encore limitée des relations de cause à effet entre des variables physiques et leurs réactions sur des processus biologiques.

6.2.2.4 Analyse de la météorologie

Si ces systèmes d'alerte ne sont pas disponibles dans une région concernée, comme c'est le cas en Nouvelle-Calédonie, il est possible de déterminer des alertes de blanchissement par une analyse simple de la climatologie régionale et des bulletins météorologiques, comme le montre le graphe ci-dessous :

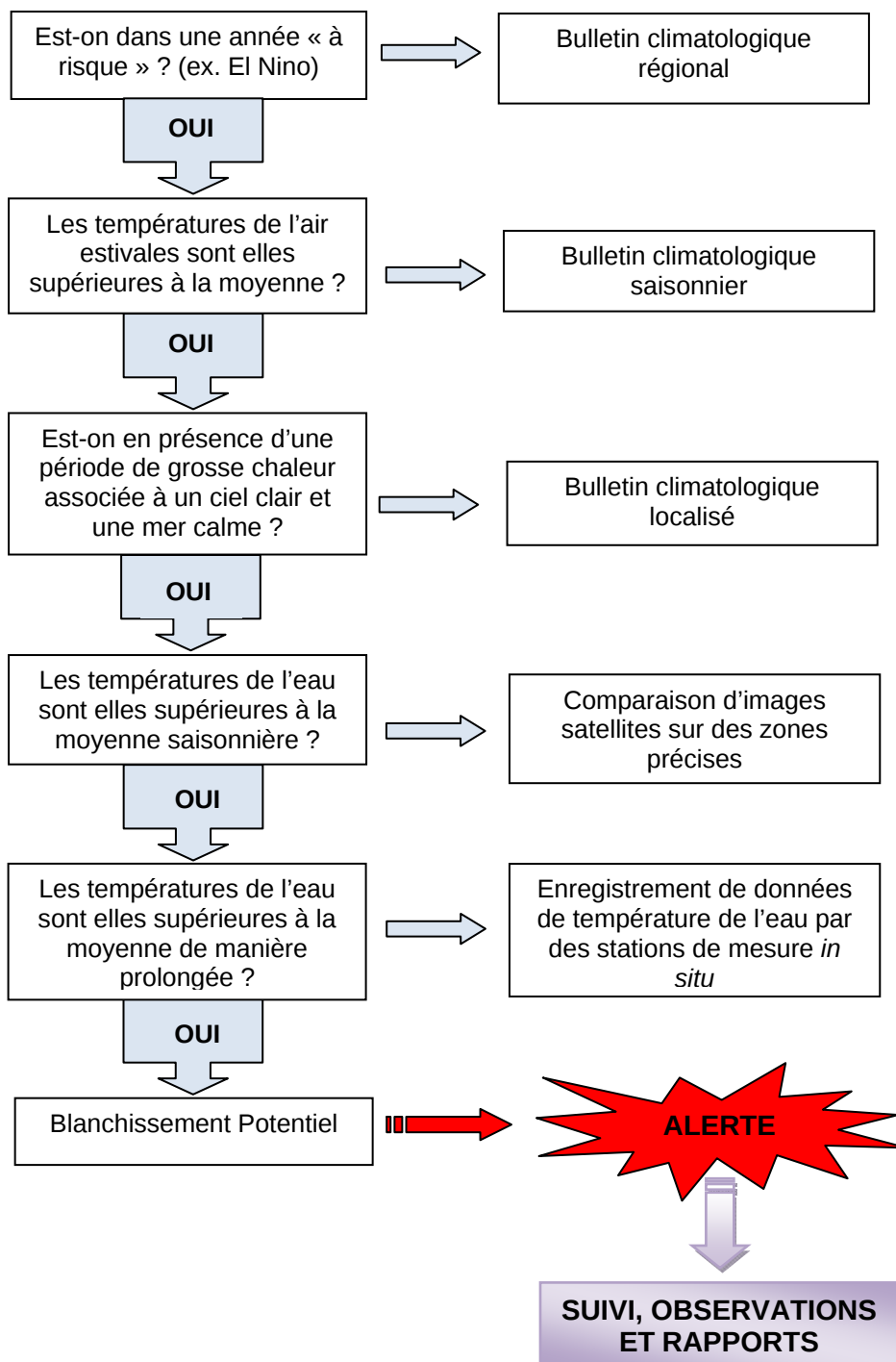


Figure 51. Conditions environnementales et sources d'informations qui peuvent être utilisées pour estimer un risque de blanchissement (Source : Marshall & Schuttenberg, 2006).

6.2.2.5 Seuils de blanchissement

En théorie, un seuil de blanchissement est défini pour chaque espèce corallienne sur un récif donné, fonction de la température absolue, de la lumière et du temps d'exposition (Berkelmans, *in press*). Idéalement il devrait aussi prendre en compte d'autres variables stressantes telles que la salinité, la qualité de l'eau, ou des variables atténuantes telles que l'agitation de l'eau. Cependant construire et appliquer un modèle qui prenne en compte tous ces paramètres pour prédire des événements de blanchissement est problématique et impraticable pour plusieurs raisons : la difficulté d'établir un modèle pour chaque espèce, d'appliquer des valeurs obtenues en laboratoire sur le terrain et d'obtenir des données représentatives des conditions réelles pour chaque variable. Ainsi, la plupart des seuils proposés dans la littérature sont basés sur des études empiriques qui mettent en relation des événements de blanchissement et des conditions environnementales (voir également la liste d'exemples pratiques fournie ci-dessous). Quelques exemples en sont les moyennes mensuelles de température des eaux de surface, les anomalies au-dessus d'une température moyenne mensuelle (« HotSpots »), le nombre de semaines au-dessus d'une température donnée (« Degree Heating Weeks »), ou une température maximale atteinte pendant 3 jours consécutifs (« maximum 3-day temperature », Berkelmans *et al.*, 2004). Les données utilisées pour le calcul de ces seuils étant obtenues via des données satellites. D'autres indices sont dérivés de données *in situ* : la température maximale journalière de l'eau, la moyenne mensuelle, les anomalies et moyennes hebdomadaires, le nombre de jours au-dessus d'une certaine température (Manzello *et al.*, *in press*) ou des courbes de température-temps (nombre de jours cumulés où les coraux sont exposés à une certaine température) (Berkelmans, 2002 ; Berkelmans *et al.*, 2004 ; Berkelmans, *in press*).

Chaque indice a ses limites d'utilisation, les échelles spatiale et temporelle étant un facteur prépondérant dans le choix de l'indicateur à utiliser. Par exemple, des indices tels que « HotSpots » et « Degree Heating Weeks » fournissent des données fiables au niveau global, en revanche ils sont peu fiables au niveau local. D'un autre côté, des indices tels que les courbes de température-temps permettent d'obtenir des données très fiables sur des conditions environnementales et réponses locales mais offrent une vision spatiale réduite de l'ensemble du phénomène. Combinées, ces 2 méthodes peuvent générer des prédictions intéressantes sur le blanchissement et la mortalité corallienne.

L'étude des phénomènes de blanchissement répétitifs sur la Grande Barrière de Corail (1998, 2000, 2002, 2004 et 2005) a permis de mettre en évidence les limites de l'utilisation des seuils de blanchissement. En effet, ces dernières années, le stress thermique a dépassé celui de 1998 ou 2000 sans toutefois qu'il n'y ait de blanchissement sur les récifs concernés. Il semblerait que les coraux se soient adaptés à un stress répété, cette variable n'étant pas prise en compte dans les modèles de prédiction actuels. Ce même phénomène d'adaptation au stress thermique a été observé au cours de l'étude de blanchissements coralliens répétitifs en Polynésie française (Adjeroud *et al.*, 2005).

Pour toutes ces raisons, il apparaît très complexe de déterminer précisément des valeurs seuils de blanchissement. Cependant, des approximations sont utilisées à l'heure actuelle, dont les méthodes sont décrites ci-dessous :

- Seuils basés sur les températures maximales : C'est l'approche la plus simple. Il s'agit d'une comparaison des températures actuelles avec les températures passées afin de calculer des anomalies de températures. Il suffit de se procurer des données de températures sur le long terme (une dizaine d'années au minimum) et de comparer la tendance sur le long terme aux températures actuelles. Des anomalies de 1 ou 2°C durant des jours ou des semaines peuvent conduire au blanchissement corallien.
- Seuils basés sur des événements de blanchissement passés : Si des événements de blanchissement ont été reportés dans le passé, il s'agit de mettre en concordance les paramètres de l'environnement ayant conduit à cette situation (température de l'eau,

pluies) et leurs répercussions sur le récif. L'intensité du phénomène et la durée d'exposition aux paramètres environnementaux doivent être pris en considération.

- Seuils basés sur des données expérimentales : C'est le travail que réalisent actuellement les chercheurs de l'AIMS en Australie. D'une manière simpliste, il s'agit d'exposer les coraux à des températures différentes et de reporter ensuite le nombre de jours au bout duquel les premiers signes de blanchissement ont lieu. Ces observations conduisent à l'élaboration de courbes de température par rapport au temps.

6.2.2.6 Implication des populations locales dans le déclenchement d'une alerte

Un système d'alerte par les communautés (*BleachWatch*) a été mis en place en Australie pour répondre aux exigences d'une surface récifale très étendue et la présence de récifs très isolés. Les récifs de Nouvelle-Calédonie répondent à ces mêmes contraintes. Il est difficile dans ces cas là de détecter quand un blanchissement a lieu et d'autant plus de mesurer ses effets sur les récifs.

Il s'agit d'un réseau de surveillance dont les observateurs sont des bénévoles, tous des usagers du lagon : pêcheurs, plongeurs, etc. Un questionnaire a été mis en place afin de collecter des informations basiques sur les conditions environnementales (nuage, température, ensoleillement...), la condition du récif (principaux types de coraux, couverture corallienne vivante), et le blanchissement éventuellement observé (couverture corallienne blanchie, sévérité, types affectés...). Ce questionnaire est ensuite envoyé ou chargé sur le site web de GBRMPA qui assure la collecte et la gestion de ces informations.

Quelle que soit la méthode d'alerte mise en place (par imagerie satellite, analyse des bulletins climatologiques ou des seuils des différents paramètres environnementaux, ou par la participation des usagers), une fois l'alerte déclenchée, il convient de mettre en place un suivi des sites affectés et de prendre les mesures de gestion appropriées. Les différents types de suivi pratiqués à ce jour sont présentés au paragraphe 7.3.

6.2.3 *Le taux de micro-bioérosion en rapport avec l'acidification des océans*

Le maintien des récifs coralliens résulte de l'effet de forces constructives (croissance d'organismes récifaux et calcification), en équilibre avec des forces destructives (majoritairement la bioérosion réalisée par la microflore perforante, les macro-perforeurs et les brouteurs). De nos jours, il est indéniable que les récifs sont menacés par de nombreuses sources de perturbations telles que les pollutions, la sédimentation et le changement climatique, résultant en une augmentation de la mortalité corallienne. Les bio-érodeurs agissent à la fois sur les substrats vivants et morts, mais leur colonisation est plus intense sur les substrats morts. L'augmentation du nombre de substrats morts sur les récifs favorise donc l'action des bio-érodeurs, fragilisant d'autant les récifs déjà perturbés. Lorsque le taux de bioérosion dépasse celui de l'accrétion, la dégradation de la structure récifale est accélérée et les récifs deviennent davantage susceptibles aux perturbations- notamment aux cyclones et autres tempêtes, tel un cycle infernal (Tribollet et al., 2006).

La microflore perforante ou euendolithe joue un rôle clé dans le fonctionnement des récifs coralliens du fait de son rôle majeur dans l'érosion des squelettes calcaires, la production de sédiments, de nutriments et de métabolites utilisables par les coraux et en tant que producteurs primaires (source importante de nourriture pour les herbivores). La micro-bioérosion est la résultante de l'activité chimique directe des micro-organismes euendolithes sur les substrats calcaires (Figure 52). Le mécanisme de dissolution reste à déterminer mais différentes hypothèses ont été proposées, en particulier la présence de pompes à calcium au niveau de la cellule terminale des filaments euendolithiques. La production de CO₂ qui accompagne la respiration des euendolithes contribue sans doute aussi à la dissolution des carbonates sur les récifs.

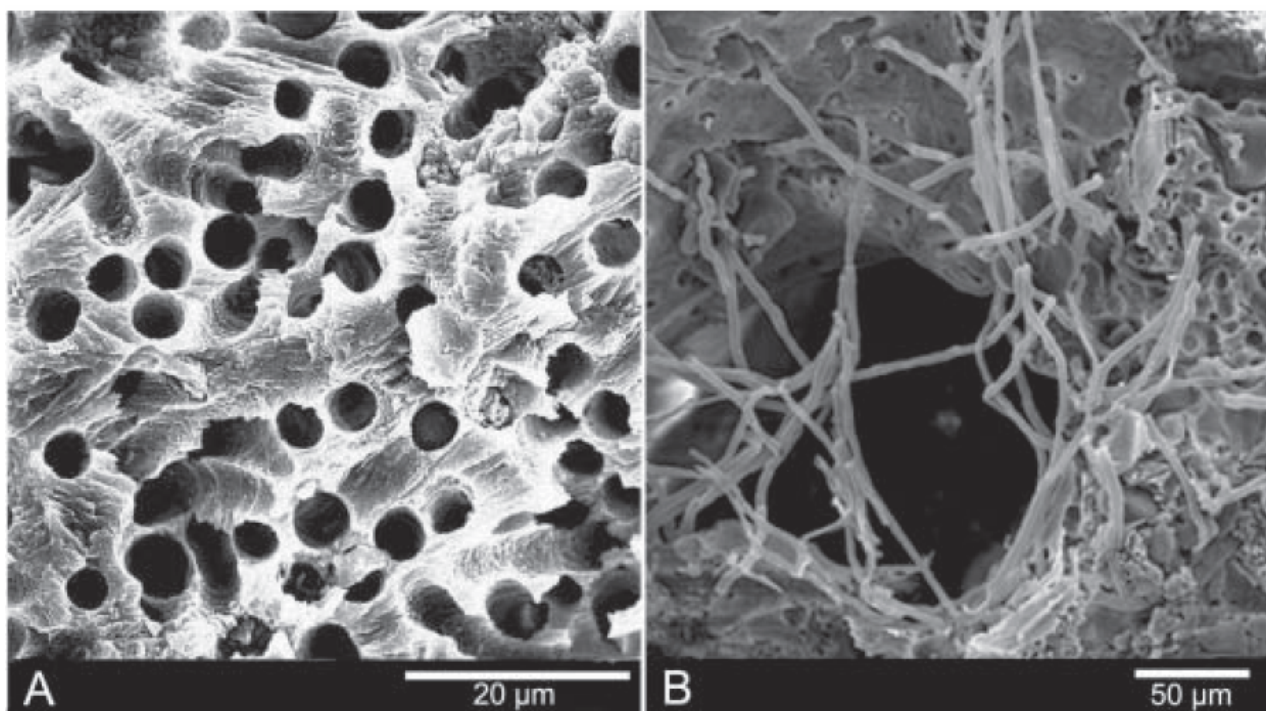


Figure 52. Photographies de la surface de coraux morts montrant des traces de micro-bioérosion due aux filaments d'*Oestrobium queketti* (photo A) et filaments d'*Oestrobium queketti* (photo B) (Tiré de Tribollet, 2008).

La microflore perforante comprend des cyanobactéries, des algues (chlorophytes, rhodophytes) et des champignons. Ces organismes sont présents partout : sur divers types de substrats (carbonate, foraminifères, coquilles de mollusques, algues calcaires, coraux, granite, verre...), sous différents types de climats (tempérés, froids, tropicaux...), au sein de divers écosystèmes (terrestres, eaux douces, eaux marines), et en diverses régions marines (Mer Adriatique, Mer Méditerranée, Antarctique, mers tropicales). Leur abondance peut atteindre jusqu'à un demi million d'organismes par centimètre carré.

Si les prévisions de l'IPCC se révèlent vraies, la pression partielle de CO₂ devrait doubler d'ici 2065-2100 (jusqu'à 700-750 ppm), diminuant la concentration des ions carbonates (CO₃²⁻) de 30% ainsi que l'état de saturation de l'aragonite dans l'eau de mer, tandis que la concentration en HCO₃⁻ augmenterait (cf. acidification des océans § 5.3.3). Une baisse du taux de calcification de 30 à 35% en moyenne est attendue dans les 100 prochaines années (Kleypas *et al.* 1999, 2006). Tribollet *et al.* (2008, *in press*) ont récemment mis en évidence que l'augmentation de la pCO₂ dans l'eau augmente les taux de dissolution des squelettes coralliens morts de 48%. Cette augmentation est due à la croissance en profondeur des filaments euendolithiques d'*Ostreobium quekettii* dans les substrats coralliens morts. Cette chlorophyte perforante ne posséderait pas de mécanismes de concentration du carbone et serait donc dépendante de la concentration en CO₂ dans l'eau de mer. Les conséquences d'une telle augmentation des taux de microbioérosion sur l'état de santé des récifs coralliens dans un futur proche peuvent s'avérer majeures, surtout dans les zones perturbées par d'autres facteurs environnementaux.

6.3 Les indicateurs de réaction des effets du changement climatique sur les herbiers

6.3.1 *L'extension géographique des herbiers en rapport avec l'élévation de la température de l'eau*

Certains auteurs ont évoqué le fait que la distribution géographique des herbiers serait affectée par le changement climatique, en particulier l'élévation de la température (Short and Neckles, 1999 ; Green and Short, 2003 ; Duarte *et al.*, 2008). Ceci se comprend aisément si on considère que la température joue un rôle majeur dans le métabolisme des herbiers et dans le maintien d'un équilibre positif du carbone. En particulier la température agit sur la photosynthèse, la respiration et la croissance des herbiers. De plus, elle a un effet direct sur la floraison et la germination des graines (Short and Neckles, 1999).

En revanche, bien que la relation de cause à effet reliant la température de l'eau et l'extension géographique des herbiers soit indéniable, aucune étude à notre connaissance ne s'est penchée sur la formulation de ce phénomène en tant qu'indicateur du changement climatique.

A l'heure actuelle, dans de nombreuses régions du monde, force est de constater que l'extension géographique des herbiers au niveau global comme au niveau local, est loin d'être connue (Green and Short, 2003). Dans la plupart des pays, tout comme en Nouvelle-Calédonie, la distribution des herbiers n'est connue que par des observations ponctuelles. Aucune cartographie de l'extension des herbiers n'est actuellement disponible et opérationnelle pour permettre l'observation de l'évolution de cet écosystème. Il n'existe ainsi pas de point de référence sur lequel se baser pour apprécier les effets du changement climatique sur cet écosystème (Payri, comm. pers.).

Toutefois, en Nouvelle-Calédonie, des données biogéographiques ont été collectées sur les herbiers ces dernières années (données IRD), mais la plupart n'ont pas encore été publiées. Le traitement et la publication de ces données pourrait conduire à l'établissement d'un état de référence qui permettrait par la suite d'appréhender des changements dans la répartition géographique de certaines espèces d'herbiers (Payri, comm. pers.).

Pour les raisons évoquées ci-dessus, auxquelles s'ajoutent le fait que de nombreuses incertitudes et débats scientifiques existent sur l'identification taxonomique des différentes espèces d'herbiers (Green and Short, 2003 ; Payri, comm. pers.) et que les effets du changement climatique soient longs à se faire ressentir sur les populations d'herbiers et difficiles à discerner compte tenu de toutes les autres sources de perturbations auxquelles ils sont soumis, il est sans doute encore trop tôt pour proposer l'extension géographique des herbiers comme indicateur du changement climatique.

6.4 Les indicateurs de réaction des effets du changement climatique sur les mangroves

6.4.1 La position géographique des mangroves en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau

Les mangroves sont un écosystème tropical avec quelques exceptions dans les latitudes plus sub-tropicales, notamment dans le Sud de la Floride, l'Afrique du Sud, le Victoria ou encore le Sud du Japon (Tomlinson, 1986). Ces formations exceptionnelles sont la conséquence de la présence de courants chauds provenant de régions où la mangrove est bien développée et fournit une source en constante renouvellement de propagules. En limite de distribution latitudinale, les formations se présentent généralement sous forme buissonnante et souvent monospécifique, comme c'est le cas par exemple à Corner Inlet dans le Victoria (Australie) avec des formations dominées par des buissons d'*Avicennia*.

La distribution globale des mangroves est limitée par la tolérance de chaque espèce aux faibles températures (Duke *et al*, 1998). Elle apparaît clairement corrélée à la température de surface de l'eau et les limites latitudinales des formations de mangrove sont fortement corrélées à l'isotherme 20°C (Duke *et al*, 2003) (Figure 53).

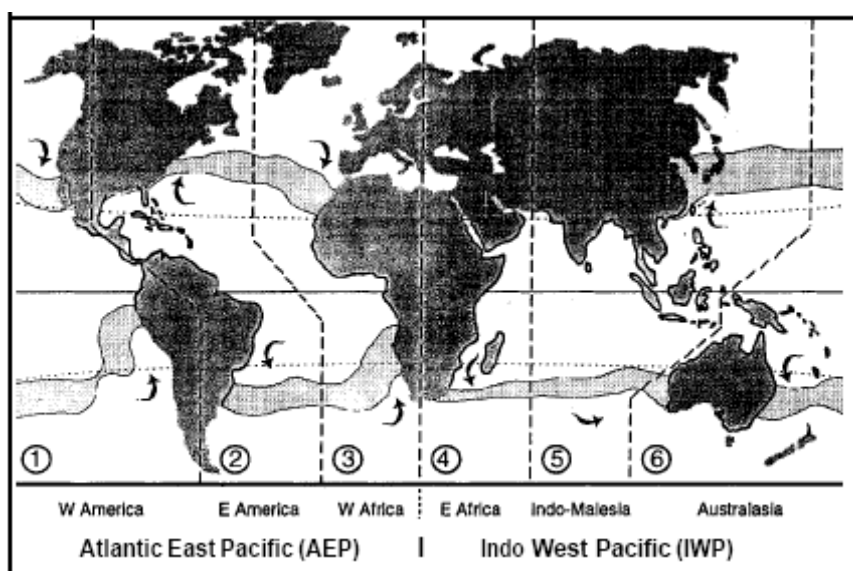


Figure 53 : Répartition des mangroves dans l'océan mondial (d'après Duke *et al*, 2003).

Le principal effet de l'augmentation des températures de l'eau sur les mangroves est la modification de la répartition géographique à grande échelle de cet écosystème ainsi que la modification de la structure des communautés :

- une extension des limites de distribution latitudinale de chaque espèce végétale vers les pôles (Duke, comm. pers.) ;
- une augmentation de la diversité spécifique des mangroves dans les latitudes les plus hautes.

L'indicateur « répartition géographique des mangroves » est intéressant lorsqu'il s'agit de suivre l'évolution de ces dernières à grande échelle (mondiale, voire régionale). En revanche, à

l'échelle locale (dans c'est le cas en Nouvelle-Calédonie), cet indicateur n'est pas pertinent car l'écosystème mangrove est déjà présent du Nord au Sud du pays.

Ainsi, lorsqu'il s'agit de suivre la réponse des mangroves face à l'augmentation de la température de l'eau au sein d'un pays de petite superficie (tel que la Nouvelle-Calédonie), il est préférable de se focaliser sur des espèces présentant un gradient de répartition marqué. En effet, la migration d'une espèce vers les pôles sera clairement visible si cette espèce ne couvre pas déjà l'ensemble des formations du pays. Ainsi, l'indicateur à suivre et applicable à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie sera davantage la « répartition géographique d'une espèce » plutôt que la « répartition géographique des mangroves ».

6.4.2 Le « *Wetland Cover Index* » en rapport avec la variation des précipitations

Les mangroves subissent des modifications structurales dès lors qu'elles sont soumises à des changements des conditions pluviométriques car la biodiversité, la biomasse et l'abondance sont directement et positivement corrélées à la pluviométrie (Duke *et al*, 2003).

Comme précisé dans le chapitre 5, l'indice WCI, qui représente le rapport de la superficie des strates arbustives et arborescentes de mangrove sur la superficie totale de la mangrove, reflète les modifications observées dans la structure des formations de mangrove face à un changement de pluviométrie puisque généralement, les zones qui étaient dénudées telles que les tannes peuvent devenir colonisées par la flore adjacente de palétuviers du fait notamment d'un apport d'eau. Ainsi, l'indice WCI a tendance à augmenter lorsque la pluviométrie augmente.

Bien que la pluviométrie soit un paramètre qui présente de faibles variations, comme c'est le cas en Nouvelle-Calédonie, le WCI est toutefois sensible à ces variations, si minimes soient elles. Il semblerait que de faibles variations dans le régime des pluies, en particulier dans les zones à haut risque (définies comme celles présentant des moyennes annuelles de pluviométrie de 1300 à 1700 mm), pourraient affecter la couverture végétale de manière significative (Duke, comm. pers.). Une augmentation ou une baisse de 200 mm/an pourrait entraîner une modification des strates de la zone côtière, entre la mangrove et les zones de tannes.

De plus, les changements passés ne reflètent pas nécessairement les changements futurs.

Un point essentiel à considérer est l'importance du WCI dans l'évaluation des risques pour les ressources naturelles (côtières et marines) : la variation du WCI donne une indication certaine des conditions passées de pluviométrie sur le long terme. De plus cette variation renseigne sur le devenir des formations de mangrove (avec des zones de tannes plus ou moins étendues) dans leur rôle protecteur vis-à-vis des zones récifales côtières (zone tampon contre les effets de la houle, habitat pour de nombreux poissons, nurserie, rétention de sédiments, nutriments et composés chimiques). Si la pluviométrie diminue, on peut s'attendre à une augmentation dans l'étendue des tannes aux dépens de formations arbustives et arborescentes, le WCI tendra donc à diminuer.

6.4.3 La position des marges terrestres (trait de côte) et maritimes en rapport avec l'augmentation du niveau de la mer

Des déplacements zonaux (« zonal shifts ») sont classiquement observés au sein des mangroves face à une augmentation du niveau de la mer (Duke *et al*, 2003). Ils peuvent différer selon les caractéristiques pédologiques (nature du sol), géologiques (nature du sous sol) ou encore géomorphologiques (pente notamment) de la zone dans laquelle elle s'est développée. Les indicateurs retenus dans le cadre de cette étude pour suivre l'évolution de la mangrove face à l'élévation du niveau de la mer sont la position de la marge maritime et la position de la marge terrestre (ou trait de côte).

Face à l'augmentation du niveau de la mer, les mangroves ont tendance à se déplacer vers des niveaux topographiquement plus hauts pour survivre. La position finale des contours d'une formation de mangrove sous influence de l'augmentation du niveau de la mer est en fait issue d'un déplacement résultant de plusieurs processus tels que :

- Le niveau d'accrétion/érosion des sols (lié à la disponibilité en sédiments) ;
- Le niveau d'élévation/subsidence des sols ;
- la vitesse d'augmentation du niveau de la mer.

Ainsi, les mangroves ne se déplacent pas systématiquement vers l'intérieur des terres face à une augmentation du niveau de la mer : elles dépendent du niveau relatif de la mer compte tenu des processus cités précédemment (Figure 54). Quatre cas peuvent être observés :

- A – Pas de changement dans le niveau relatif de la mer car les processus se compensent : pas de migration des mangroves ;
- B – Baisse du niveau relatif de la mer : les mangroves auront tendance à migrer vers la mer mais également latéralement ;
- C – Augmentation du niveau relatif de la mer : les mangroves auront tendance à migrer vers l'intérieur des terres et des zones de mortalité vont apparaître sur la frange maritime ;
- D - Augmentation du niveau relatif de la mer couplée avec la présence d'ouvrages littoraux formant une barrière anthropique à la migration des mangroves : les mangroves auront tendance à devenir une simple bande côtière.

Ce déplacement vers l'intérieur des terres (C) est néanmoins celui principalement observé dans la majorité des cas.

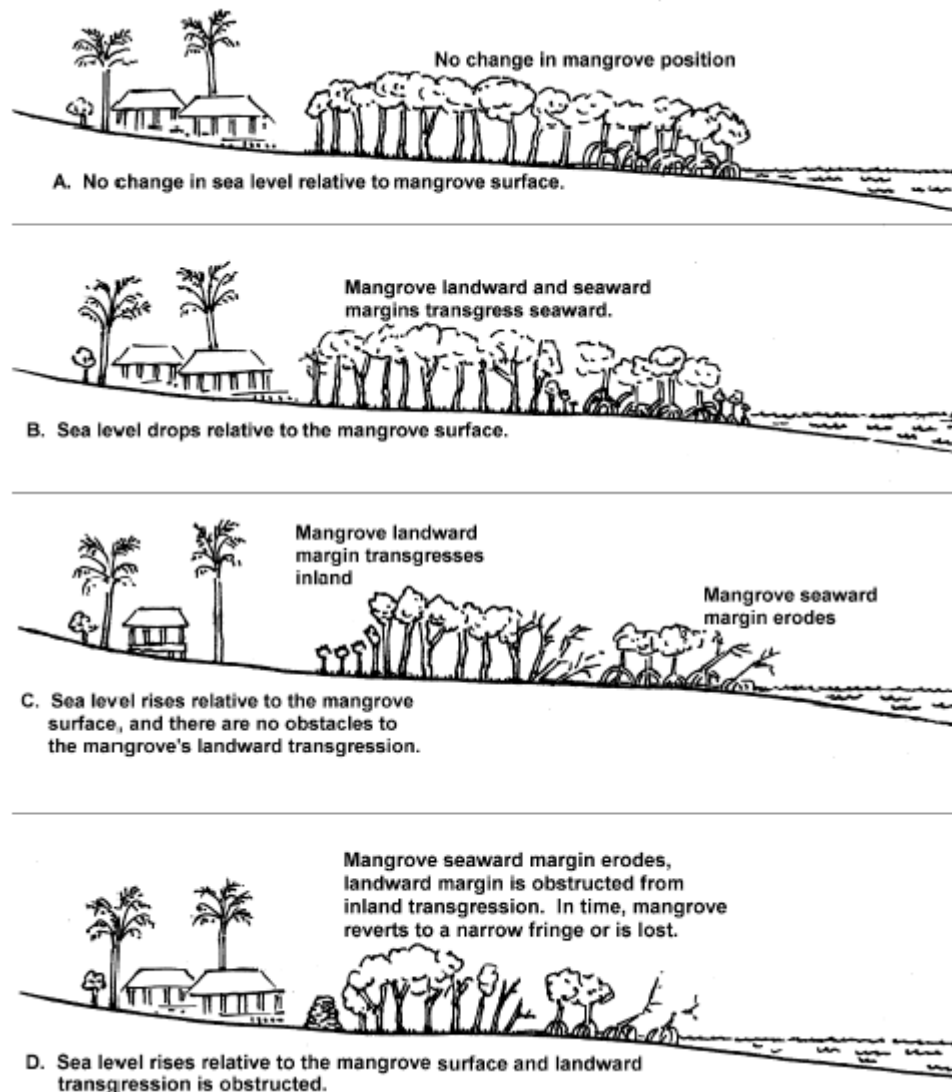


Figure 54. Différents scénarii de réponses des mangroves à l'évolution du niveau de la mer (tiré de Gilman et al., 2007).

La réponse des mangroves face à l'augmentation du niveau de la mer est donc variable selon les régions et dépendra de l'évolution locale du niveau de la mer et de la disponibilité en sédiments nécessaires à l'établissement de palétuviers à ce même endroit (Semeniuk, 1994 ; Woodroffe, 1999 In Kathiresan *et al*, 2001). Par exemple, les plantules dans les mangroves des Caraïbes sont très sensibles à la faible disponibilité en sédiments, laissant supposer que ces mangroves ne pourront survivre sur les îles coralliennes de l'archipel si le niveau de la mer augmente comme cela a été prévu (Ellison, 1996).

6.5 Les indicateurs de réaction des effets du changement climatique sur la colonne d'eau

6.5.1 *La concentration de chlorophylle lagonaire en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau*

La présence d'organismes photosynthétiques tels que les algues microscopiques qui composent le phytoplancton affecte la manière dont la lumière est réfléchiée par la couche supérieure des mers et des océans. La couleur de l'océan prend en compte les variations spectrales de la lumière réfléchiée : elle peut ainsi varier d'un bleu profond pour les eaux pures, à des verts sombres dans les eaux riches en phytoplancton ou à des verts 'laiteux' dans les eaux riches en certains sédiments.

Toutes les algues microscopiques qui composent le phytoplancton contiennent de la chlorophylle-a. Ce pigment, présent dans tous les organismes photosynthétiques, présente une absorption relativement forte et faible respectivement dans les fenêtres spectrales bleues et vertes. L'utilisation de cette propriété physique a conduit au calcul de la concentration en chlorophylle-a à partir d'observations satellitaires. Ainsi, en mesurant avec précision la couleur des océans par l'intermédiaire de satellites spécifiques, il est possible d'obtenir une bonne estimation de la concentration en phytoplancton dans la colonne en eau. La variabilité spatiale et temporelle de cette concentration peut être étudiée à des échelles régionale ou globale.

L'ONERC propose un indicateur de couleur de l'eau pour l'océan du large correspondant à une concentration en chlorophylle-a, pigment majeur de phytoplancton. Il est basé sur des mesures par télédétection du satellite SeaWiFS, mais peut être étendu avec le satellite MODIS, qui a une meilleure résolution spatiale (actuellement la couverture est optimale avec les 2 capteurs). Avec ses huit canaux, du vert au proche infra-rouge, le satellite SeaWiFS analyse avec une grande précision les composants de l'eau et leurs concentrations. Le canal 1 est utilisé pour distinguer les substances jaunes ; les canaux 2, 3, 4 pour calculer la concentration en pigments chlorophylliens ; et les canaux 6, 7, 8 pour évaluer la turbidité et corriger les effets atmosphériques.

6.5.2 *Le ratio pico/microplancton en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau, de la variation des précipitations et de l'activité cyclonique*

La taille du phytoplancton est un indicateur de réaction à un changement en nutriments (dessalure, température, apports nutritifs d'origines variées, atmosphériques ou terrestres). En effet, la composition du phytoplancton peut changer, ce qui va se traduire par le remplacement du picoplancton par les grandes classes de taille avec l'apparition ou adaptation d'espèces formant des efflorescences, toxiques ou non.

Les grandes familles de phytoplancton n'ayant pas les mêmes besoins en sels nutritifs, elles peuvent réagir différemment aux changements de conditions nutritives ou de température induits par les changements climatiques. Enfin, des groupes peuvent se remplacer ; par exemple les diatomées coloniales et les cyanobactéries filamenteuses peuvent remplacer les espèces de petite taille suivant les conditions.

Il a été montré que la taille du phytoplancton augmentait en réponse aux apports en sels nutritifs dans le lagon de Nouvelle-Calédonie (Dupouy, comm. pers. ; Jacquet *et al.*, 2006 ; Faure *et al.*, 2006 ; Tenorio *et al.*, 2005 ; Torretton *et al.*, 2007 ; Neveux *et al.*, 2008) avec passage du picoplancton vers le microplancton (différentes familles).

7 LES METHODES DE SUIVI DES INDICATEURS

7.1 Généralités

Dans ce chapitre, différentes méthodologies vont être présentées, permettant de répondre à différents objectifs de suivi. Un suivi peut être spécifique ou général, et différentes méthodes peuvent être utilisées en fonction des moyens (humains, techniques, budgétaires) mis en œuvre pour y arriver, des ressources disponibles, et du public à qui s'adresse ce suivi.

Ainsi seront présentées un panel de méthodes, toutes reconnues et utilisées par la communauté scientifique internationale, avec leurs avantages et inconvénients, classées selon 3 catégories :

- Niveau 1 : « suivi communautaire » : niveau de détail faible mais permettant de suivre de larges zones en peu de temps et à bas coûts. Très intéressant pour alerter de manière précoce sur des changements à grande échelle, car permet de couvrir de larges zones en un minimum de temps. De plus cela permet d'impliquer des équipes de terrain possédant un faible niveau d'expertise tout en les formant et les sensibilisant. Ce type de suivi permet d'indiquer où des études plus détaillées devraient être conduites.
- Niveau 2 : « suivi de gestion » : niveau de détail plus élevé, ajoutant des coûts et un niveau d'expertise de la part des observateurs, prends plus de temps à réaliser, généralement impliquant une surface expertisée plus restreinte.
- Niveau 3 : « suivi scientifique » : données très détaillées, coûts plus élevés, concernant généralement des zones très restreintes et un niveau d'expertise élevé de la part des observateurs.

Dans les paragraphes qui suivent sont exposées quelques recommandations basiques applicables à tous types de suivi, de manière à ce que ces points ne soient plus abordés par la suite mais valables pour toutes les méthodologies présentées ci-après.

7.1.1 Choix des stations de suivi

Lors de la sélection de stations de suivi, il faut garder en mémoire que l'ensemble des zones expertisées doit être représentative de la zone générale. Cela permet ainsi d'extrapoler les conclusions tirées de l'étude des zones échantillonnées à l'ensemble du récif. Plusieurs sources de données peuvent être consultées afin de sélectionner les stations de suivi : les images satellites, les photographies aériennes, les cartes marines, la connaissance locale et des investigations de terrain par manta-tow (Oliver *et al.*, 2004).

Les récifs peuvent être divisés en zones distinctes, sous l'influence de conditions environnementales différentes qui agissent sur les communautés benthique : l'arrière-récif, le platier récifal, la crête récifale, le front récifal et la pente récifale (voir figure 55). Dans la mesure du possible tous les différents types d'habitats seront étudiés.

Dans le contexte précis de cette étude, où les effets du changement climatique sur les écosystèmes récifo-lagonaires sont mesurés, il apparaît judicieux de choisir des stations de suivi éloignées (autant que possible) de toute source d'impact anthropique.

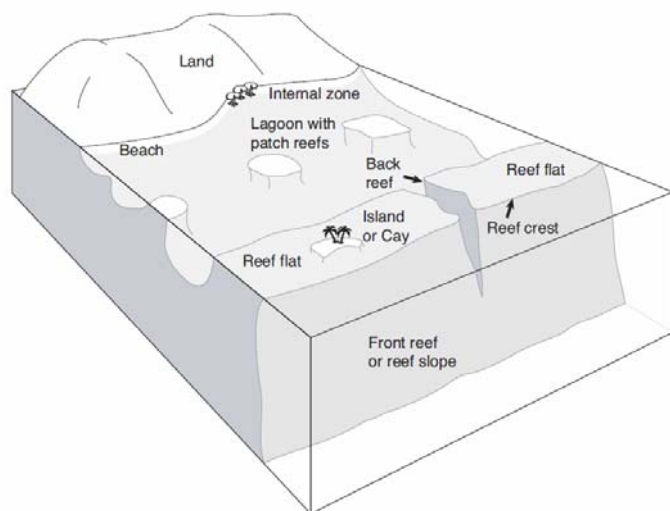


Figure 55. Coupe schématique d'un récif montrant les majeures zones (tirée de Wilkinson & Hill, 2004).

7.1.2 Choix de la localisation et du nombre de répliques

Les récifs sont très variables dans le temps et dans l'espace. Pour prendre en compte cette variabilité, et ainsi collecter des informations qui soient représentatives du récif concerné, il est nécessaire de répéter plusieurs fois la même mesure sur un site donné. Les répliques sont définies comme ces mesures additionnelles et leur utilisation est appelée la réplication.

Un nombre de 3 répliques est communément avancé comme étant minimal mais suffisant, si le site est relativement homogène. Si les ressources le permettent, un nombre de 6 répliques par site est optimal dans la plupart des cas. Le nombre de répliques doit être le même pour tous les sites suivis. Les répliques ne doivent pas se chevaucher et doivent être indépendants (pas de relation de cause à effet) sous peine d'erreur statistique.

La figure ci-dessous illustre une stratégie d'échantillonnage communément utilisée dans l'étude des fonds marins, permettant une vision globale d'un phénomène (blanchissement, occurrence d'une maladie, etc.) à l'échelle d'une île dans sa totalité, la comparaison de zones récifales (plusieurs sites par zones) et la comparaison de sites (plusieurs répliques par site).

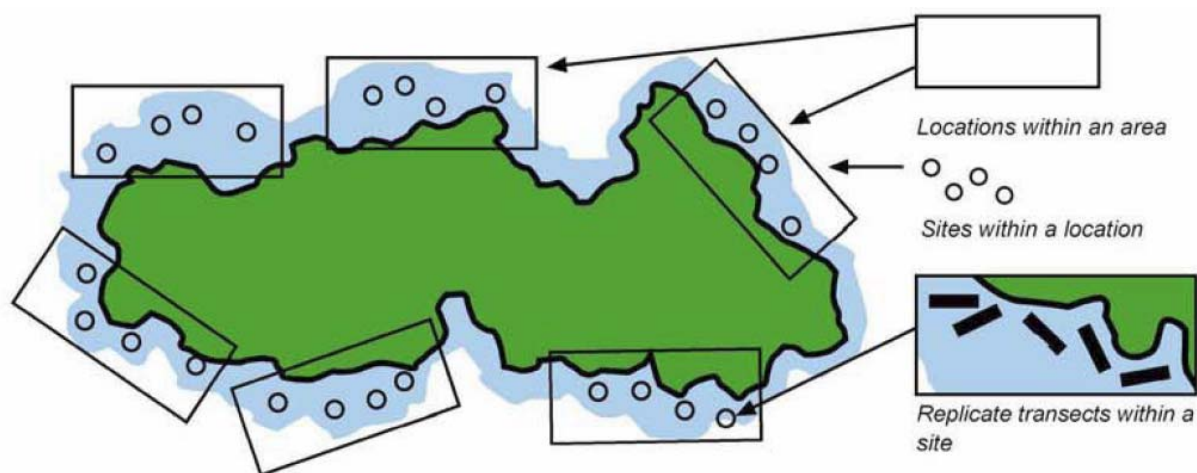


Figure 56. Exemple de localisation de zones, stations et répliques de suivi (tiré de Oliver et al., 2004).

7.1.3 Choix de la méthode de suivi

Selon les objectifs, la réalité logistique, les contraintes de temps, humaines et financières, différentes méthodes peuvent être appliquées. Il est recommandé de choisir la méthode la plus adaptée aux conditions locales, et qu'elle soit appliquée de manière constante sur tous les sites suivis. Le tableau 12 décrit les différentes méthodes communément utilisées dans l'étude des écosystèmes récifo-lagonaires, au niveau international.

7.1.4 Echantillonnage aléatoire ou fixé

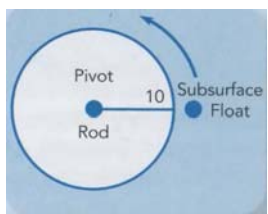
Pour s'assurer de la représentativité d'un échantillonnage, les zones expertisées devraient être choisies de manière aléatoire. Une méthode pour choisir de manière aléatoire un site ou un réplique consiste à utiliser des tables de calcul aléatoire. Elles sont bien souvent ignorées en biologie marine car longues à mettre en œuvre. Une méthode aléatoire communément pratiquée consiste à choisir les sites de comptage (placement des quadrats, des transects) depuis le bord de l'embarcation, sans voir le récif. Les sites peuvent aussi être choisis avant l'apparition d'un blanchissement ou d'une maladie pour limiter les biais d'échantillonnage, qui ont souvent tendance à surestimer les dégradations d'un récif.

Dans le cas où l'étude consiste à suivre l'évolution d'une maladie, d'un blanchissement, ou de la régénération d'un récif, il est utile d'implanter des stations de suivi de manière permanente. Ces stations sont initialement placées de manière aléatoire puis expertisées lors de chaque suivi. Idéalement elles sont placées avant qu'un événement dégradant n'arrive sur le récif pour limiter les biais d'échantillonnage. Le tableau 11 liste les avantages et inconvénients de ces méthodes.

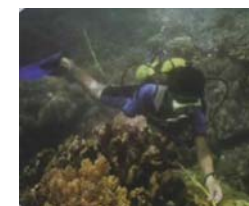
Tableau 11. Avantages et inconvénients des échantillonnages fixes et aléatoires (tiré de Oliver et al., 2004).

	Echantillon fixe	Echantillon aléatoire
Avantages	• Permet de détecter des changements précis au cours du temps • Nécessite moins de répliques pour détecter des changements	• Plus rapide à mettre en œuvre • Permet de réaliser plus de comptages en un temps d'immersion donné • Pas de coûts d'entretien • Pas de temps passé à localiser les marques permanentes • Pas de marques laissées sur le récif
Inconvénients	• Nécessite du temps passé à installer les marques permanentes • Nécessite du temps passé à localiser les marques permanentes avant comptages • Les marques doivent être entretenues et remplacées si besoin (coût) • Les marques peuvent ne pas être acceptées sur des zones touristiques ou de réserve • Le placement aléatoire initial peut ne plus être représentatif au cours du temps • La perte de marques permanentes entraîne la perte de données ou des biais dans l'analyse des données • Les transects fixes ne peuvent jamais être exactement placés au même endroit à chaque suivi, ainsi l'échantillon n'est jamais exactement le même à chaque suivi	• Estimations beaucoup moins précises des changements au cours du temps

Tableau 12. Descriptions de méthodes de suivi communément utilisées en biologie marine (tiré de Raymundo et al., 2008).



Méthodes de suivi	Description de la méthode
Manta-tow	Un observateur est tiré par un bateau à l'aide d'un bout à une vitesse faible et constante.
Nage pendant un temps déterminé	Un plongeur nage un temps déterminé en déroulant un décamètre, à une même profondeur. Expertise de 2m de large le long de cette ligne.
Aires circulaires	Un fer à béton est utilisé pour déterminer le point central de l'aire. Un décamètre est attaché au fer et tendu sur 10m. Le plongeur nage avec le décamètre, tout ce qui est à l'intérieur de l'aire est expertisé.
Transect à largeur fixe	Un décamètre est tendu et tous les coraux sains et malades présents sur une largeur donnée de chaque côté du décamètre sont recensés. D'autres types de données peuvent être reportés : taille des colonies, recouvrement corallien, % de mortalité.
Transect linéaire	Un décamètre est tendu et tous les coraux sains et malades présents sur le trajet du décamètre sont recensés. D'autres types de données peuvent être reportés : taille des colonies, recouvrement corallien, % de mortalité.
Transect linéaire à points d'intersection	Même méthode que la précédente mais seul un point tous les XX cm du décamètre est expertisé.
Quadrat	Des quadrats de différentes tailles sont placés de manière aléatoire ou fixe le long de transects ou sur le récif. Dans chaque quadrat est évalué : le % de couverture en différentes espèces et le type de substrat.
Quadrat photographique	Des quadrats de petite taille (<1m ²) sont photographiés en utilisant des appareils photo haute résolution ou des vidéos. Les photos sont ensuite analysées à l'aide de logiciels spécialisés.



7.1.5 Etude pilote

Il est recommandé de réaliser une étude pilote avant de mettre en place un programme de suivi sur le long terme. Un petit nombre d'échantillons, à chaque échelle différente, seront collectés et utilisés pour calculer la variance des données sur chaque type de variable mesurée (analyse statistique). Cette étude permet de calculer de manière précise et rigoureuse le nombre d'échantillons nécessaire pour tirer des conclusions avec certitude.

7.1.6 Fréquence des suivis

La fréquence des suivis dépend encore une fois de l'objectif du suivi. En ce qui concerne l'apparition de maladies sur un récif, il est judicieux de réaliser des suivis fréquents (au moins une fois tous les 3 mois), afin d'éviter de manquer une explosion malade (les maladies affectant les coraux sur une période de temps relativement courte). Des suivis trop espacés ne permettent pas de conclure à une cause de mortalité si elle est observée.

7.2 Le suivi de l'indicateur : « maladies coralliennes »

L'apparition d'une maladie sur un récif peut être décelée selon différentes sources : par les utilisateurs des récifs (pêcheurs, plongeurs, baigneurs, etc.) – cela implique que des campagnes de sensibilisation soient menées auprès des différents groupes d'usagers afin de pouvoir identifier les maladies coralliennes – ou par le suivi régulier des récifs à grande échelle (« évaluation rapide »), en particulier pendant la période de l'année où la probabilité d'observer des maladies est plus importante.

L'évaluation rapide peut être menée afin de couvrir de larges surfaces de récif en un temps relativement court. Elle pourra permettre de déceler de manière précoce l'apparition d'une maladie sur le récif, si elle est largement étendue. Dans ce cas, un suivi plus détaillé pourra être mis en place pour définir l'extension et l'évolution de la maladie.

7.2.1 L'évaluation rapide

Sites visités : en fonction des moyens et ressources disponibles, le plus grand nombre d'habitats différents seront expertisés sur chaque récif. Si les moyens et ressources sont limités, seuls les sites présentant une couverture corallienne élevée seront expertisés (probabilité plus importante de déceler des maladies et risque de contamination au sein de la population plus grand par les maladies infectieuses).

Fréquence des suivis : annuelle, au cours de la période où la température des eaux est chaude et augmente (entre novembre et mars).

Méthodes recommandées :

- Manta-tow pour déceler une infection invasive éventuelle
- Nage pendant un temps déterminé
- Transects à largeur fixe

} Sur des sites choisis
aléatoirement

Types de données récoltées :

- Manta-tow : Estimation qualitative sur l'état de santé du récif et semi-quantitative en évaluant le recouvrement en corail mort, vivant, affecté par des maladies. Evaluation quantitative précise non possible.
- Nage pendant un temps déterminé et transects à largeur fixe sur des sites choisis aléatoirement : pas de données quantitative sur la prévalence ou l'incidence des maladies. Données semi-quantitatives sur l'abondance d'une maladie sur une surface de récif.

7.2.2 Le suivi détaillé

Sites visités : les récifs où une maladie a été décelée, présentement ou dans le passé.

Fréquence des suivis : varie selon la vitesse de propagation de la maladie (une fois par mois pour la maladie de la Bande Noire par ex.).

Méthodes recommandées :

- Aires circulaires
 - Transects à largeur fixe
 - Transects linéaires
 - Quadrats ou quadrats photographiques
- } Sur des sites fixes (permanents) où une infection aura été décelée

Types de données récoltées :

Estimation quantitative de :

- La prévalence de la maladie : proportion de colonies infectées par rapport à la population totale expertisée.

$$P = (\text{nombre de colonies infectées} / \text{nombre total de colonies}) * 100$$

- L'incidence de la maladie : nombre de nouvelles infections dans la population sur une période de temps ; permet d'évaluer l'évolution temporelle de la maladie.

$$I_T = [(\text{nombre total de colonies infectées} - \text{nombre de colonies infectées à } T-1) / \text{nombre total de colonies}] * 100$$

- La mortalité : proportion de colonies mortes sur le site.

$$M = (\text{nombre de colonies mortes} / \text{nombre total de colonies}) * 100$$

- La progression de la maladie : pour chaque type de maladie, choisir 5 individus de chaque espèce infectée et marquer la démarcation du tissu infecté puis réaliser un suivi par photographie ou par mesure directe :

$$\text{Progression} = \text{distance parcourue par l'infection} / \text{durée entre 2 suivis}$$

Pour davantage de précisions sur le suivi détaillé de l'extension et de l'impact d'une maladie, se référer à l'encadré suivant.

**COMMENT QUANTIFIER UNE INFECTION EN TERMES D'EXTENSION ET
D'IMPACT ?**

Notes complémentaires utiles pour un suivi détaillé

1. Description initiale du site affecté : composition benthique, profondeur, type d'habitat, espèces dominantes, clarté de l'eau, direction et force du courant, proximité de différentes sources potentielles de stress, etc.
2. Description des lésions
3. Liste des taxons infectés
4. Marquage des colonies infectées pour suivre l'évolution spatiale de la maladie
5. Limite géographique de la zone infectée et sa démarcation
6. Recherche de zones infectées aux alentours en s'éloignant progressivement du point d'infection maximal
7. Mise en place d'un protocole de suivi pour évaluer l'évolution de la maladie
8. Récolte d'échantillon et analyse microbiologique et histologique en laboratoire
9. Collecte de toutes les données environnementales disponibles sur le site (température, pluviométrie, turbidité, courants, marées, etc.) afin de mettre en relation les paramètres de l'environnement et l'occurrence d'une maladie.

La figure suivante synthétise et hiérarchise ces descriptions.

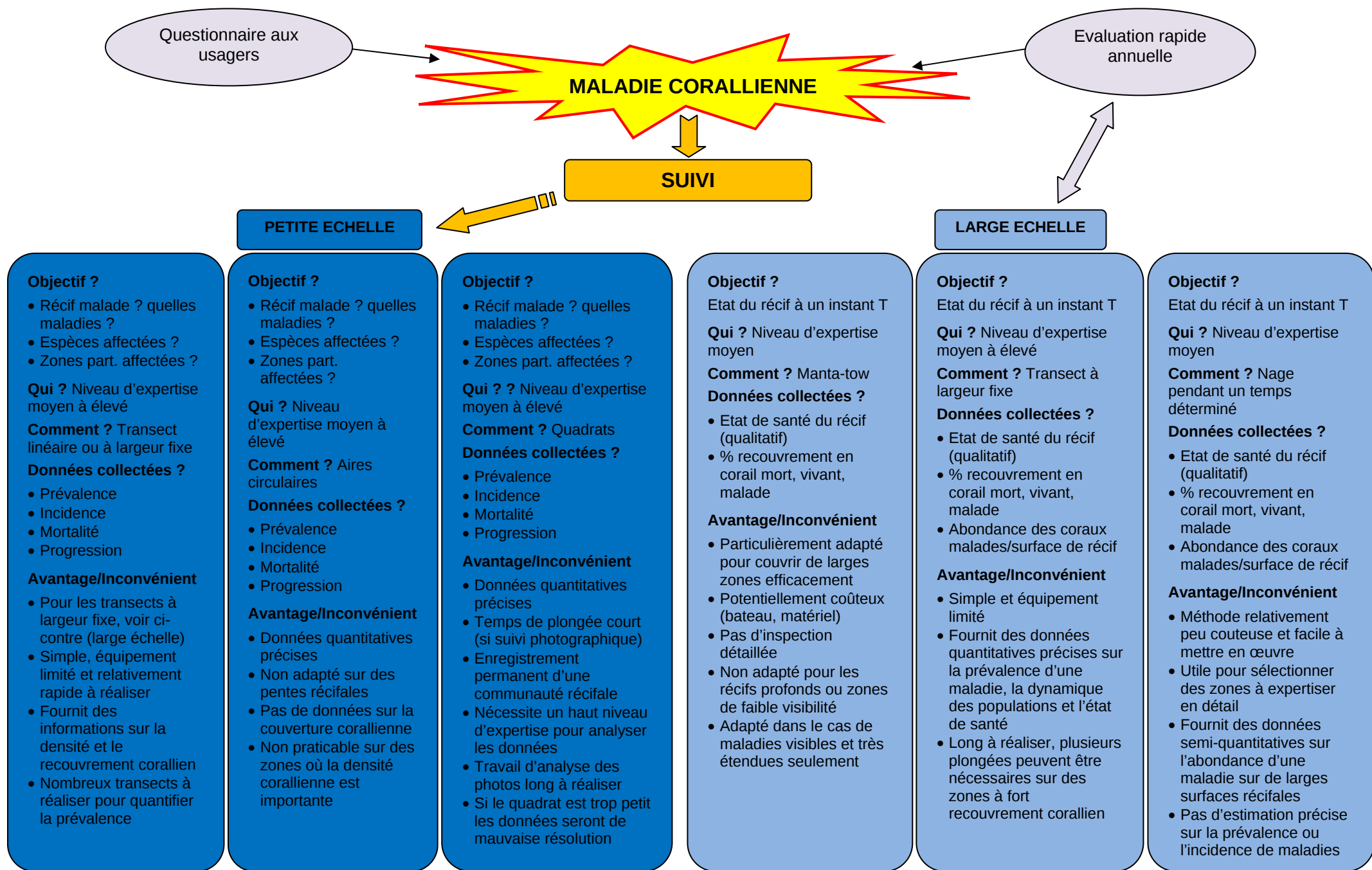


Figure 57. Déclenchement d'un suivi et méthodes de suivi de l'apparition d'une maladie corallienne sur un récif

7.3 Le suivi de l'indicateur : « blanchissement corallien »

7.3.1 Différentes méthodes de suivi

Selon les ressources disponibles et les moyens mis en œuvre, différents types de suivi sont possible une fois l'alerte de blanchissement déclenchée (voir § 6.2.2 pour les alertes de blanchissement). Se référer à la figure 58 pour plus amples informations sur les différentes méthodes à mettre en place selon l'échelle de suivi du blanchissement.

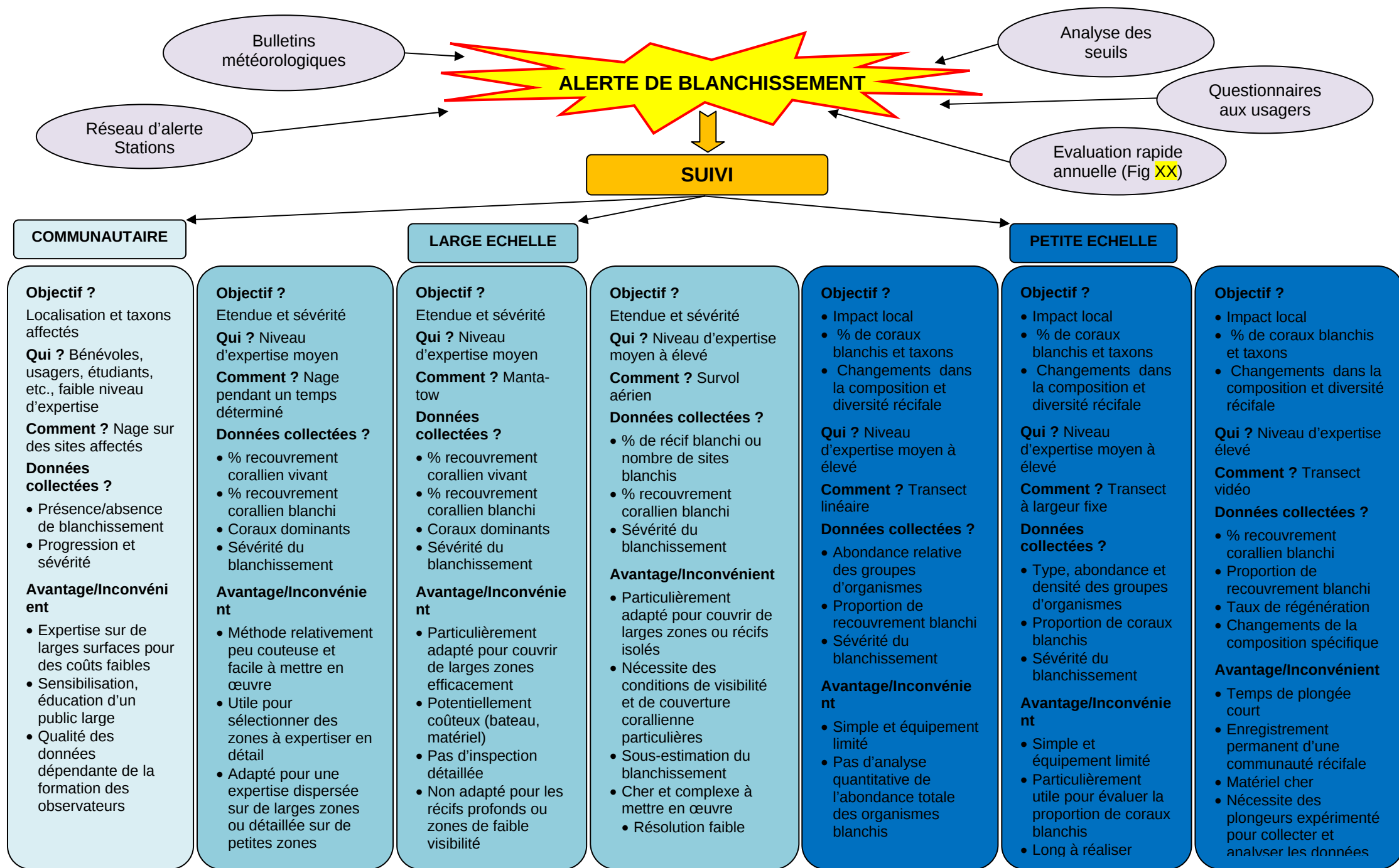
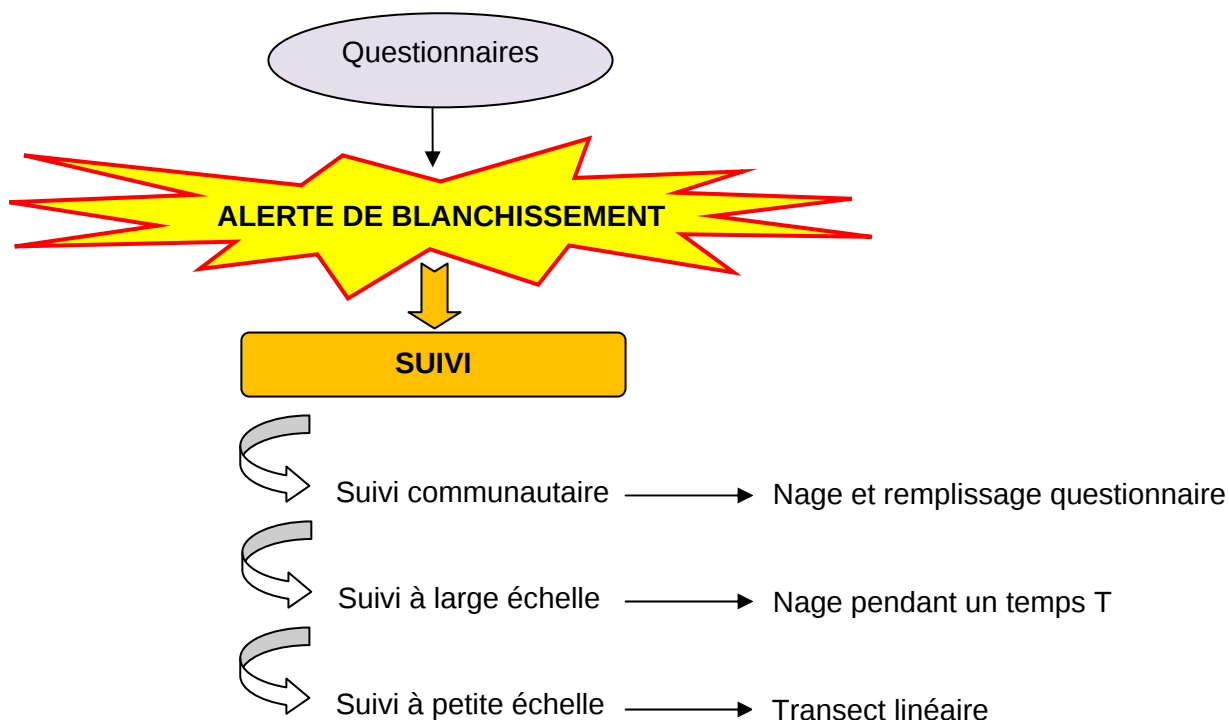


Figure 58. Déclenchement d'un suivi et méthodes de suivi d'un épisode de blanchissement corallien sur un récif

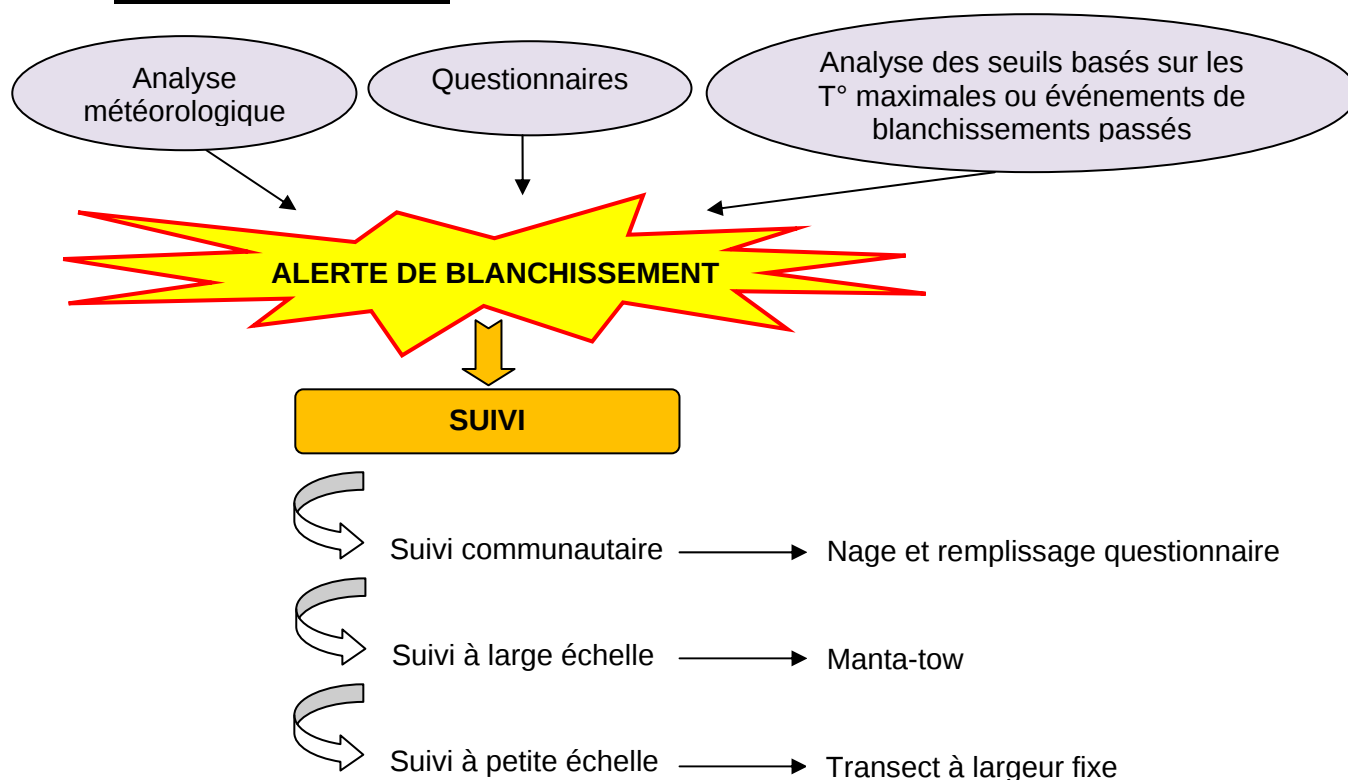
7.3.2 Coûts impliqués dans les différents suivis

Le suivi d'un événement de blanchissement peut également être classé selon le coût impliqué dans les études :

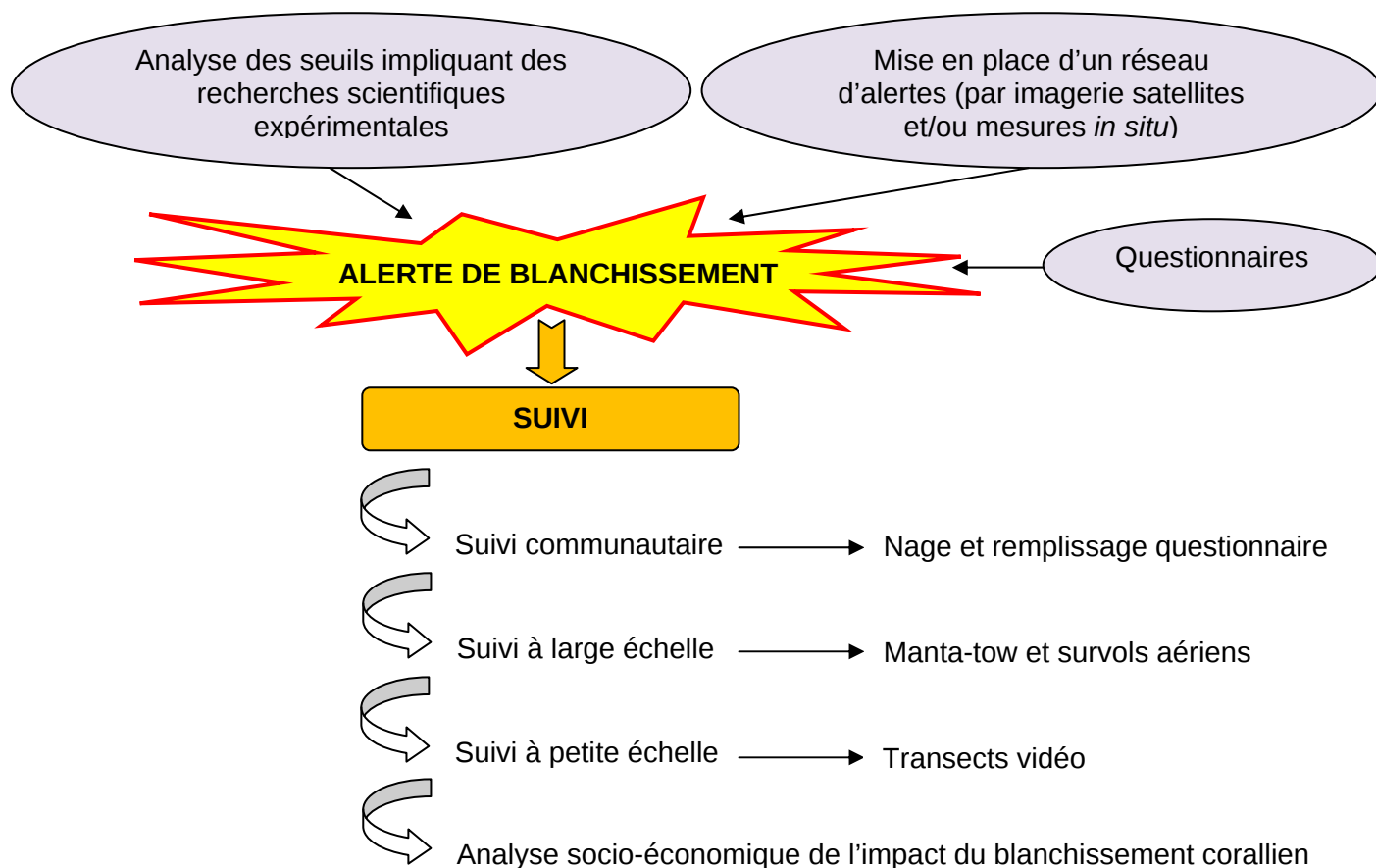
Méthode à bas coût :



Méthode à coût moyen :



Méthode à coût élevé :



Des mesures de gestion doivent être prises immédiatement la sévérité du phénomène mesurée, par la réduction des activités potentiellement stressantes sur les récifs affectés : activités de loisirs, de développement côtier, régulation de la qualité des eaux...

7.4 Le suivi de l'indicateur : « taux de micro-bioérosion »

7.4.1 Choix des stations de suivi

Les stations de suivi seront préférentiellement choisies sur des zones isolées de l'impact anthropique, notamment des zones eutrophisées (l'eutrophisation ayant le même effet positif sur la micro-bioérosion que l'acidification, l'effet de l'eutrophisation pourrait masquer celui de l'acidification, ou l'amplifier) et présentant un recouvrement en coraux morts assez conséquent (en effet la colonisation en micro-perforants étant plus importante au niveau des substrats morts, les mesures en sont d'autant facilitées).

Il conviendrait d'effectuer des suivis temporels sur des sites marqués de manière permanente. Afin de procéder à une phase de test de validation de cet indicateur, il serait judicieux de mener une étude préliminaire qui consisterait à choisir un minimum de 6 stations de suivi dans le lagon de Nouméa pour évaluer la variation spatiale des réponses de la microflore perforante à l'acidification dans des conditions *in situ* et affiner la méthodologie de suivi de cet indicateur à une échelle spatiale plus large (sur la totalité du lagon de Nouvelle-Calédonie).

7.4.2 Fréquence des suivis

Il s'agirait de suivre les taux de micro-bioérosion au niveau saisonnier et annuel dans un premier temps pour déterminer s'il y a une variation importante dans le temps. Si les variations s'avèrent importantes, il serait alors intéressant de faire des suivis à des pas de temps plus court (ex : mesures mensuelles) pour affiner la variabilité temporelle des taux de micro-bioérosion. Sachant que la détermination des taux de micro-bioérosion et l'étude de la microflore peut s'avérer consommatrice de temps, une échelle de temps assez grande dans un premier temps est préconisée (saison, année).

7.4.3 Méthodologie de suivi

La méthode de suivi du taux de micro-bioérosion consiste à prélever aléatoirement des débris coralliens (au moins une dizaine de débris pour avoir une bonne représentation des communautés de micro-perforants à un endroit donné) afin de déterminer la composition spécifique de la microflore perforante, son abondance et d'évaluer son métabolisme (taux de production primaire et taux de dissolution des carbonates). Il est possible de réaliser ces mesures en laboratoire ou *in situ*. L'avantage de la méthode en laboratoire est le contrôle total des conditions environnementales. En revanche l'approche *in situ* permet une meilleure représentativité des processus qui se déroulent dans la nature.

Les mesures *in situ* sont réalisables à l'aide de petites chambres d'incubation (cloche en plexis transparent de quelques litres d'eau). Dans un premier temps un prélèvement d'eau est réalisé pour servir de référence (composition chimique de l'eau de référence : pH et alcalinité). Puis de l'eau de mer est piégée dans une chambre d'incubation avec des débris colonisés par la microflore perforante. L'eau de mer doit être constamment remuée (agitateur magnétique) afin de permettre le prélèvement d'un échantillon d'eau de mer homogène dans la chambre d'incubation en fin d'expérience. Cette technique repose sur le fait que la chimie de l'eau varie sous l'effet de l'activité métabolique de la microflore perforante (photosynthèse, respiration et dissolution des carbonates par voie chimique), la différence observée entre les 2 mesures donne ainsi une indication de l'activité de la micro-bioérosion.

Dans un deuxième temps, les débris coralliens sont amenés au laboratoire pour analyse (lame mince, microscopie) de la composition spécifique de la microflore perforante (en termes d'abondance et de diversité). La détermination de la composition spécifique de la microflore perforante est cruciale car en fonction des espèces les taux de micro-bioérosion sont plus ou moins importants et varieront plus ou moins en fonction des facteurs du changement global. Une étude menée en mésocosmes (conditions totalement contrôlées) a pu en effet montrer que certaines espèces de microflore perforante répondaient plus particulièrement à l'élévation de la pCO_2 dans l'eau de mer.

7.4.4 Limites

Aucune méthodologie de suivi n'a pour l'instant été mise en place en Nouvelle-Calédonie ou dans le monde. Les seuls travaux disponibles présentant des taux de micro-bioérosion ont été réalisés à l'île de la Réunion, aux Bahamas, à Hawaï, à Belize, en Polynésie française et à Hawaï. Bien que très prometteurs, ces travaux se placent encore à l'heure actuelle comme des études à caractère expérimental (travaux réalisés en laboratoire, en conditions contrôlées) et purement scientifique (non appliquées dans un contexte de gestion). Néanmoins, il a été prouvé en laboratoire que le taux de CO_2 a un effet positif sur l'érosion des squelettes calcaires due à la microflore perforante et compte tenu de l'importance de l'action des bioérodeurs dans le maintien de l'équilibre d'un récif, et de l'acidification certaine des océans, ces avancées méritent d'être

testées *in situ* et pourraient se révéler de très utiles outils de gestion des récifs face aux changements climatiques.

7.4.5 Perspectives

Compte tenu de l'absence de données locales, il serait intéressant de mettre en place un programme scientifique permettant de commencer à construire une base de données sur la diversité, l'abondance et le métabolisme de la microflore perforante à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie. Des collaborations avec les chercheurs américains (Hawaii), australiens et de Polynésie française pourraient être recherchées afin de compléter les données acquises sur le Pacifique et favoriser les transferts de connaissance en la matière.

La Nouvelle-Calédonie bénéficie à l'heure actuelle, et pour les 2 prochaines années, de la présence d'un chercheur de l'IRD spécialisé dans le domaine de la bioérosion des récifs, et plus particulièrement de l'effet de l'acidification des océans sur le taux de micro-bioérosion par la microflore perforante. Il est important de souligner qu'à l'heure actuelle l'IRD n'est pas équipé pour ce type de mesures (du matériel est en cours d'acquisition), en particulier il serait nécessaire de mettre en place un laboratoire d'analyse du pH et de l'alcalinité de l'eau de mer pour déterminer les taux de production primaire et de dissolution. Compte tenu du caractère expérimental de ces manipulations, il conviendrait en parallèle de monter une plate-forme d'expérimentation en milieu contrôlé en Nouvelle-Calédonie (aquarium ou centre IRD, Tribollet, comm. pers.) ou de se rapprocher de l'Université de Hawaï (Hawaii Institute of Marine Biology) qui dispose déjà de tout le matériel nécessaire.

7.5 Le suivi de l'indicateur : « Répartition géographique d'une espèce »

Etant donné que les mangroves toutes espèces confondues s'étendent naturellement du Nord au Sud du pays, l'indicateur retenu et applicable en Nouvelle-Calédonie est la « répartition géographique d'une espèce » qui présente un gradient de distribution latitudinale. Ainsi, face à une augmentation de température de l'eau, cette espèce aura tendance à s'étendre vers le Sud.

Habituellement, la méthodologie préconisée est de suivre 2 approches complémentaires :

- une approche par télédétection qui permette de cartographier les limites de distribution latitudinale des formations de mangroves sans distinction d'espèces ;
- une approche de terrain par des relevés de limite de distribution de chaque espèce au moyen d'un GPS.

Pour les raisons citées précédemment, la première approche n'est pas très pertinente en Nouvelle-Calédonie. En revanche, le suivi de la distribution de certaines espèces telles que le palétuvier *Cerriops tagal* par exemple, qui n'a été observé que dans la partie Nord de la Nouvelle-Calédonie ainsi qu'à Ouvéa, serait plus pertinent en tant que bio-indicateur.

Si suivre la distribution géographique d'une espèce est relativement facile à mettre en œuvre, l'interprétation des résultats n'en reste pas moins délicate car d'autres facteurs peuvent influencer la distribution latitudinale d'une espèce, tels que la pluviométrie ou encore la disponibilité en propagules. Par ailleurs, les données existantes sur la distribution latitudinale de

chaque espèce sont incomplètes et ne peuvent en aucun cas constituer un état initial exhaustif, ce qui constitue une contrainte supplémentaire pour réaliser un suivi.

Il est donc nécessaire de réaliser au plus vite des investigations de terrain couvrant la totalité des formations de mangrove afin de cartographier à un instant T l'ensemble des limites de distribution de toutes les espèces présentes en Nouvelle-Calédonie. Cela constituerait un état de référence à partir duquel l'évolution dans la répartition géographique de certaines espèces bio-indicatrices serait suivie dans le temps, en rapport avec des facteurs environnementaux traduisant le changement climatique.

La périodicité préconisée pour un tel suivi est de 5 ans après la réalisation de l'état initial (Duke, comm. pers.). Une durée de 1 à 2 mois d'investigation par voies terrestre et maritime devrait être suffisante à chaque campagne pour suivre la distribution géographique de plusieurs espèces bio-indicatrices.

Cette expertise requiert des compétences en reconnaissance d'espèces ainsi qu'un savoir-faire en cartographie et SIG.

7.6 Le suivi de l'indicateur : « Wetland Cover Index »

Le WCI représente le ratio entre la superficie de mangrove arbustive et la superficie totale de mangroves (arbres + tannes). Les bases scientifiques de cet indicateur sont établies, l'indicateur a déjà été testé et a prouvé sa sensibilité (Duke *et al*, 2003).

7.6.1 Méthodologie de suivi

Il existe deux approches complémentaires pour suivre les mouvements des écotones au sein des mangroves subissant une augmentation de la pluviométrie (Duke, comm. pers.) :

- Par un suivi à l'aide d'imageries satellitaires ou aériennes :
 - o pertes ou des gains de surface de chaque strate végétale arborescente, arbustive, ou nue
 - o déplacement des contours des strates végétales arborescentes, arbustives, ou nues
- Par suivi sur le terrain : au niveau de transects permanents, il est important de noter :
 - o l'apparition de bandes de végétation qui dépérissent au sein d'une strate végétale ou le long de la zone de tannes
 - o le recrutement de palétuviers arbustifs ou arborescents dans la zone de tannes

Il est en effet préconisé de compléter l'approche télédétection - SIG par des investigations *in situ*, plus fines, qui permettent de voir à une échelle de temps humaine, des invasions de certaines espèces de palétuviers dans les zones de tannes, aussi petites et localisées soient elles. Il est suggéré de réaliser des transects de la terre vers la côte dans des formations de mangrove présentant différentes strates végétales incluant les tannes, une pente relativement faible et loin

de tout impact anthropique. L'utilisation d'enregistreurs de paramètres physico-chimiques tels que la température, l'humidité relative, etc. est recommandée.

S'agissant du travail cartographique, afin de pouvoir détecter des changements de contours de strates végétales, les photographies utilisées doivent être scannées entre 600 et 1200 dpi avant d'être interprétées par digitalisation. Ensuite, elles doivent être interprétées par digitalisation afin de pouvoir cartographier les différentes strates végétales des mangroves.

La périodicité préconisée du suivi est à minima annuelle.

Ce suivi nécessite une expertise en botanique pour la reconnaissance des espèces, la structure des communautés et les relevés des paramètres physico-chimiques d'une part et des compétences en cartographie et SIG.

7.6.2 Limites

Cet indice a toutefois des limites :

- Il est moins performant dans des régions de latitudes proche de l'équateur ;
- Il est peu efficace lorsqu'il s'agit de mettre en évidence des mouvements d'écotones à une échelle régionale du fait que les traits caractéristiques des tannes sont variables et la période d'étude trop courte.

En Nouvelle-Calédonie, l'atlas des mangroves réalisé dans le cadre du programme ZoNéCo en 2008 a permis de créer une base de données comportant les superficies des différentes strates végétales de l'ensemble des formations présentes dans le pays. Toutefois, ces données sont issues de l'interprétation de photographies aériennes prises entre 1976 et 2006. Cela signifie que s'il y a eu un changement de la structure des communautés lié à une variation de la pluviométrie pendant cette période, les données issues de cette base de données ne pourront pas le mettre en évidence.

En revanche, tout changement d'écotone lié aux variations pluviométriques, qui peut se produire après cette période 1976-2006 au cours de l'année T+1 pourra être mis en évidence en comparant la cartographie issue de la base de données ZoNéCo et celle qui sera réalisée à partir d'une photographie de l'année T+1. Il est important de prendre en compte dans l'analyse diachronique l'année T de réalisation de la photographie ayant servi à la cartographie initiale de la zone étudiée ; en effet, les changements d'écotone qui pourront être observés entre T et T+1 dans une zone donnée seront différents selon que la photographie initiale ait été prise en 1976 ou en 2006. A priori les changements seront plus notables entre 1976 et T+1 que entre 2006 et T+1 si la zone étudiée est sensible aux variations pluviométriques.

C'est pourquoi la base de données établie dans le cadre du programme ZoNéCo offrant une image « instantanée » de la période 1976-2006 pourra toujours servir de référence pour comparer la superficie des tannes et des mangroves arbustives de cette période avec celles des années à venir.

7.6.3 Validation de l'indicateur

Cet indicateur a déjà été utilisé dans le cadre du suivi des zones de mangroves dans les régions de Port Curtis, de l'estuaire de la rivière Fitzroy et de Moreton Bay dans le Queensland en Australie (Duke *et al*, 2003.). Ce projet a développé une méthodologie basée uniquement sur l'analyse diachronique de photographies aériennes des zones d'étude, qui a abouti la production de cartes mettant en évidence les changements observés dans la structure des formations de mangrove. A Moreton Bay par exemple, plusieurs auteurs ont reporté une invasion de palétuviers et leur expansion vers l'intérieur des terres au dépens des tannes (Flood and Grant, 1984 ; Wetherall, 1993, Morton, 1993 ; Manson *et al*, in press ; In Duke *et al*, 2003). Cette migration indique généralement la présence d'un environnement plus chaud et plus humide.

En 2008, Duke (comm. pers.) a mis en place un nouveau projet qui utilise une méthodologie de suivi des mangroves australiennes basée sur le modèle de mouvement d'écotones (« ecoton shift model ») afin d'analyser les relations entre les différentes tendances de variabilité de pluviométrie et le couvert végétal des mangroves. Le plan d'échantillonnage emboîté est basé sur l'analyse des données météorologiques qui a permis de distinguer 3 scénarii de changement climatique à long-terme :

- Sec (3 endroits): Fitzroy (Qld) ; Burnett (Qld) ; Exmouth (WA);
- Humide (3 endroits): Broome (WA) ; Darwin (NT) ; Liverpool (NT) ;
- Variable ou sans tendance (3 endroits): Moreton Bay (Qld) ; Flinders' Gulfs (SA) ; Daintree (Qld).

Trois répliques ont été retenus pour chaque tendance pluviométrique autour de l'Australie. Quatre sites avec 4 transects ont été choisis pour chaque endroit. Le choix des sites est basé sur les variations naturelles de biodiversité, conditions d'habitat et conditions de marée. Le plan hiérarchique emboîté consiste donc en 16 transects par endroit, 48 par tendance pluviométrique, soit 144 transects au total.

7.6.4 Perspectives

En Nouvelle-Calédonie, le suivi du WCI nécessite une étape préalable pour s'assurer de la fiabilité de l'indicateur, qui est de mettre à jour la base de données actuelle du programme ZoNéCo, en remplaçant l'interprétation des photos les plus anciennes par les nouveaux runs réalisés entre 2006 et 2008.

7.7 Le suivi de l'indicateur : « Position des marges terrestres (trait de côte) et maritimes »

7.7.1 Méthodologie de suivi

7.7.1.1 Suivi des délimitations des formations de mangrove

Le meilleur moyen de suivre ces indicateurs est encore une fois d'utiliser les images satellitaires ou aériennes de haute résolution afin de pouvoir détecter tout changement aussi minime soit il, face à l'élévation du niveau de la mer. Il est possible que la position finale d'un contour de mangrove diffère peu de sa position avant élévation du niveau de la mer du fait de

processus antagonistes qui minimisent, voire annulent, leurs effets (accrétion / érosion par exemple). De ce fait, il est nécessaire de travailler à partir de photographies de haute résolution pour observer les moindres déplacements (Gilman *et al*, 2007).

La délimitation régulière de la marge terrestre des mangroves en utilisant un GPS est nécessaire pour mettre en évidence le moindre déplacement de cette marge, fournissant ainsi des informations fondamentales pour déterminer la tendance dans chaque mangrove étudiée (Gilman *et al*, 2006 ; Gilman, comm. pers.). L'interprétation à partir de télédétection (photographies aériennes ou images satellites) peut être utilisée pour délimiter la marge maritime mais un complément avec des relevés au GPS peut s'avérer utile.

7.7.1.2 Suivi des processus dynamiques du sol par rapport au changement du niveau de la mer

Parallèlement, il est nécessaire de comprendre la dynamique de variations de hauteur du sol de mangrove (processus et vitesse) et la comparer à celle de l'augmentation du niveau de la mer afin de déterminer la direction et le sens de déplacement de la formation étudiée, correspondant à la résultante des différents processus (Figure 59). Cette composante peut être étudiée *in situ*, grâce à la mise en œuvre d'instruments de type marqueurs d'horizon SET-MH (Set Elevation Table – Marker Horizon).

Pour acquérir les informations nécessaires relatives à la pente et aux processus dynamiques, il est nécessaire d'avoir accès à :

- des données sur l'accrétion / l'érosion et la subsidence / élévation au moyen de marqueurs d'horizons SET-MH afin de calculer le mouvement résultant indiquant le sens de déplacement possible de la formation ;
- des données topographiques afin de déterminer la pente de la zone potentiellement colonisable qui jouxte la façade terrestre de la formation et estimer le taux de migration possible de la formation vers l'intérieur des terres.

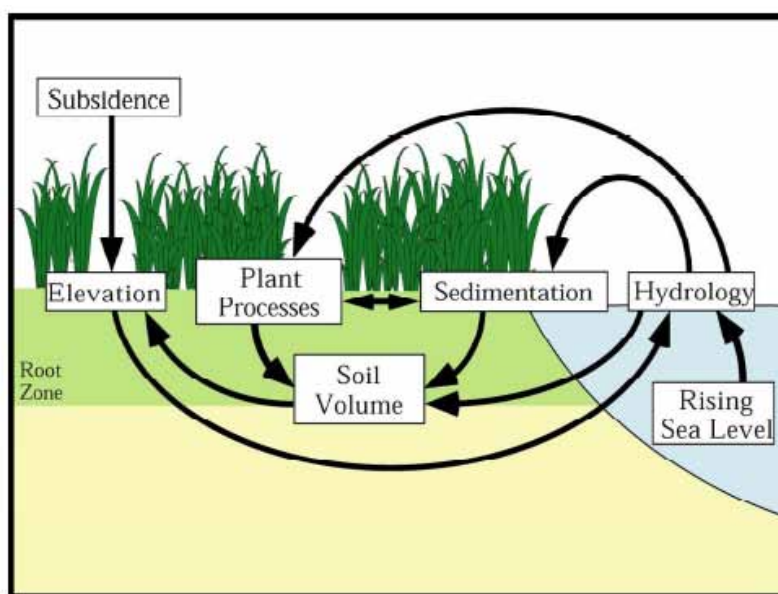


Figure 59. Processus influençant le niveau du sol dans un marais de mangrove (Issu de Saintilan *et al*, 2006).

Enfin, il est nécessaire de suivre les variations du niveau de la mer (indicateur de pression) proche des zones d'étude des mangroves grâce à la mise en place d'un marégraphe à proximité de la zone d'étude, étant donné la possible variabilité de ce paramètre d'un endroit à un autre à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie.

La méthode mettant en œuvre les tables d'élévation - marqueurs d'horizons SET-MH permet de comprendre la relation entre la hauteur de la surface du sol et le niveau de la mer car la hauteur de surface du sol ainsi que l'accrétion verticale sont mesurées directement et simultanément (Cahoon *et al*, 2006). L'influence concomitante sur le niveau du sol des processus de sub-surface ayant lieu entre le marqueur d'horizon et le bas de la perche de la SET est calculée de la façon suivante (Figure 60) :

- Accrétion verticale (A) – variation de hauteur (E) = subsidence (SS) si la variation de hauteur est négative
- Accrétion verticale (A) – variation de hauteur (E) = expansion (SE) si la variation de hauteur est positive

La subsidence ou l'expansion peuvent être calculées à différentes profondeurs en fonction du type de SET utilisé (perche inférieure à 6 m, perche de 6 à 9 m, perche supérieure à 9 m).

Si $E < A$, la subsidence liée à la compaction des sédiments et/ou la décomposition contrôle les tendances de la hauteur du sol.

Si $E > A$, l'expansion liée à une accumulation de matière organique (croissance des racines > décomposition) contrôle les tendances de la hauteur du sol.

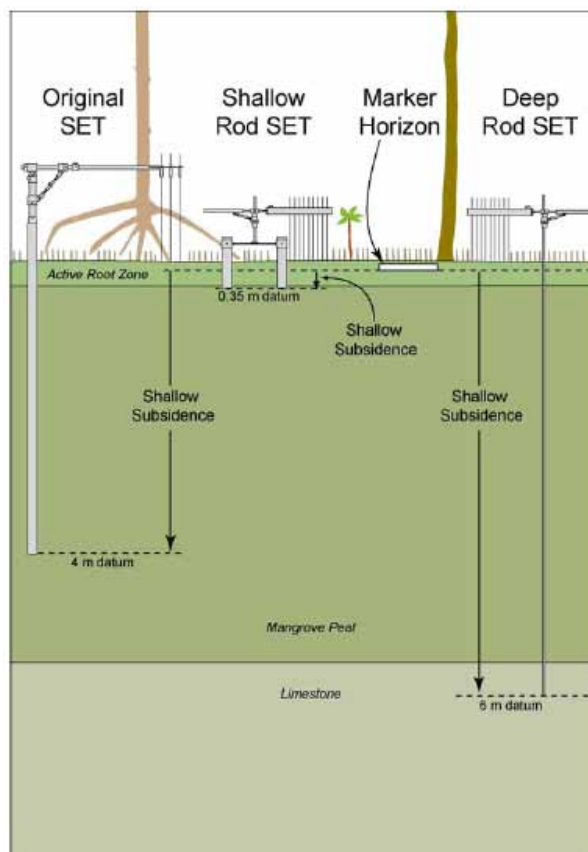


Figure 60. Relation entre les mesures des variations du sol et de l'accrétion verticale faites au moyen de tables d'élévation – marqueur d'horizon SET-MH (issu de Cahoon *et al*, 2006).

7.7.1.3 Applicabilité

Ces indicateurs peuvent être mis en œuvre immédiatement sans recherche complémentaire ; néanmoins, il est suggéré de commencer par l'étude de sites pilotes aux caractéristiques différentes pouvant influencer le déplacement des palétuviers (niveau de pente de la terre, processus dynamiques possibles).

La fréquence préconisée pour un suivi des positions des marges terrestres et maritimes via télédétection est comprise entre 1 et 5 ans suivant l'intensité du phénomène d'augmentation du niveau de la mer (Duke, comm. pers.).

La périodicité pour les investigations de terrain au GPS dépend du contexte local mais également de la façon dont les impacts anthropiques peuvent influencer le développement ou non de la mangrove (construction d'une barrière anthropique en amont pouvant bloquer la migration de la mangrove vers l'intérieur des terres).

7.7.2 *Exemples de programmes de suivi des mangroves développés dans le Pacifique*

7.7.2.1 Programme d'évaluation des capacités de suivi des mangroves

Un programme d'évaluation des capacités de suivi des mangroves face à l'élévation du niveau de la mer a été développé au niveau de 10 pays et Etats insulaires du Pacifique (Figure 61). Un certain nombre d'informations ont été collectées dans le cadre de ces programmes afin d'identifier les données manquantes pour lesquelles il est nécessaire de mettre en place un programme de suivi, notamment (Tableau 13) :

- Le pas des enregistrements de marégraphes ;
- La distance entre le marégraphe et les formations de mangroves étudiées ;
- La couverture topographique ;
- La délimitation et la cartographie des contours des mangroves ;
- Les mesures d'accrétion / érosion des sédiments dans les zones de mangrove.

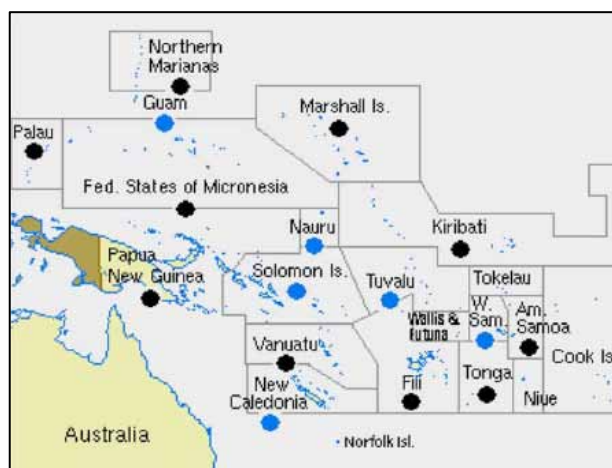


Figure 61. Localisation des pays du Pacifique impliqués dans l'étude des capacités de suivi des mangroves face à l'élévation du niveau de la mer (rond noir) (tiré de Gilman et al, 2006).

Tableau 13. Résumé des caractéristiques techniques requises pour le suivi des mangroves face à l'élévation du niveau de la mer (tiré de Gilman et al, 2006).

Technical and Institutional Capacity Attribute	Country or Territory									
	American Samoa	Fiji	Kiribati	Marshall Islands	Federated States of Micronesia	Northern Mariana Islands	Palau	Papua New Guinea	Tonga	Vanuatu
Length of tide gauge record through Dec. 2005 (years) ^a	56.2	31.2	11.0	58.5	47.7	23.1	33.8	39.7	13.4	10.9
Largest distance between tide gauge and mangrove (km)	6.5	800	Not known	Not known	563	10	700	500	17	Not known
Percent of mangrove boundaries delineated and mapped	100	80	22	0	21	100	99	Not known	90	0
Year of most recent mangrove boundary survey ^b	2002	1993	1998	Not applicable	2002	1989	1971	1993	2000	Not applicable
Percent of mangrove islands with topographic map coverage	100	100	22	0	100	100	87.5	86	0	100
Percent of mangrove islands with maps showing buildings, roads, and other development	100	100	25	20	100	100	0	0	33	100
Year of most current map showing location of development ^b	2001	1993	1998	2004	2004	1999	Not applicable	NA	1998	Not known
Date of earliest imagery showing mangrove margin (aerial photos, satellite imagery, maps) ^b	1961	1954	1960	2004	1944	1940	1946	1971	1995	1980
Have mangrove sediment erosion/accretion rates been measured?	Yes	No	No	No	Yes	No	No	No	No	No
Is there a mangrove monitoring program	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No	No	Yes	No

Le PNUE, le PROE et le Western Pacific Regional Fishery Management Council ont financé une étude relative à la capacité des pays du pacifique à évaluer la vulnérabilité des mangroves face au changement climatique. Dix sur 16 pays ont participé à cette étude, ce qui représente 84% de la superficie totale des mangroves dans la zone. Il en ressort 7 priorités techniques :

- Déterminer des projections de tendance du niveau moyen relatif de la mer ainsi que la fréquence et l'intensité d'évènements extrêmes.
- Mesurer les tendances des changements de la hauteur de la surface des mangroves pour déterminer comment le niveau de la mer varie relativement à l'élévation de la surface des mangroves.
- Etablir un état initial des formations de mangroves et suivre les changements graduels à l'aide de méthodes standardisées à travers un réseau régional. Cela est nécessaire pour mettre en évidence les différences spécifiques à chaque pays.
- **Evaluer comment la position des marges de mangrove a changé au cours de plusieurs dizaines d'années à partir d'observations de séries temporelles historiques acquises par télédétection.**
- Produire des cartes mettant en évidence les contours des mangroves, les informations topographiques et la localisation des ouvrages construits sur le littoral pour évaluer la vulnérabilité de chaque formation de mangrove face à l'augmentation du niveau de la mer.

7.7.2.2 Etude relative à l'évaluation de la réponse des mangroves face à l'augmentation du niveau de la mer aux Samoa américaines

Cette étude qui a été menée aux Samoa Américaines (Gilman *et al*, 2007) a mis en œuvre à la fois des marégraphes proches des mangroves étudiées et l'utilisation d'une série temporelle de photographies aériennes de 1961 à 1994 puis des images Ikonos et Quickbird de 2001 à 2004.

Le logiciel ArcGis a été utilisé pour calculer la superficie entre la façade maritime de chaque formation et une ligne fixe en mer.

Des analyses statistiques (régressions linéaires) ont été réalisées pour voir s'il y avait une corrélation significative entre la variation de la superficie de mangrove due au mouvement de la façade maritime et les variations du niveau de la mer relatif. Les 3 sites étudiés ont en effet montré un déplacement des mangroves respectivement de 3 m sur une période de 42 ans, soit respectivement sur chacun des sites de 63,9 mm/an, 24,5mm/an et 72,3 mm/ an. La corrélation entre la montée des eaux et la migration de la mangrove vers l'intérieur des terres est très significative pour 2 des 3 sites (Gilman *et al*, 2007).

7.7.2.3 Etude relative à l'évaluation de la réponse des mangroves face à l'augmentation du niveau de la mer en Australie du Sud

Une méthode utilisant des tables SET a été mise en œuvre sur plusieurs sites entre Brisbane et Hobart afin de comprendre les tendances de hauteurs de surface de sol (Saintilan *et al*, 2006).

Les résultats montrent que la hauteur du sol de marais est avant tout influencée par les processus existants en sous-sol sur une courte période. Sur une plus longue période, une corrélation existe entre l'invasion des palétuviers vers les tannes et l'augmentation du niveau de la mer.

7.8 Le suivi de l'indicateur : « Concentration en chlorophylle lagonaire »

Cet indicateur, proposé par Dupouy (IRD) et basé sur celui de l'ONERC, présente l'évolution de 3 concentrations, mesurées par satellites dans les régions océaniques :

- la concentration en chlorophylle-a (Chl-a) (pigment majeur du phytoplancton) (unité de mesure : mg/m^3) ;
- la concentration en matière en suspension totale (unité de mesure : g/m^3) ;
- la concentration en matière organique colorée dissoute (unité de mesure m^{-1}), qui est une fraction du carbone organique dissout réfractaire, résultant de la dégradation de la matière organique (en principe plus concentrée en milieu lacustre, mangroves, rivières anthropisées).

La quantification de ces trois constituants en milieu lagonaire requiert l'acquisition de nombreuses données de terrain afin d'obtenir des modèles locaux suffisamment performants mais qui, de fait, sont assez peu génériques. Les recherches sont actives dans ce sens aussi bien en ce qui concerne les algorithmes de calcul, qu'en ce qui concerne la définition de nouveaux capteurs plus performants pour les milieux côtiers qui abritent l'essentiel de la population mondiale. La durée de vie conséquente du capteur SeaWiFS (1997 – présent) a généré une série de données

homogènes et fiables (Dupouy *et al.* 2000 ; 2004), ce qui est primordial dans ce domaine de la télédétection marine qui requiert une grande précision et une grande stabilité de la calibration (*idem* pour MODIS (2002 - présent). Par contre, le premier capteur Coastal Zone Color Scanner qui a fonctionné entre 1978 et 1984 et qui a donné les premières images de chlorophylle de la Nouvelle-Calédonie (Dupouy, 1990 ; 1992) doit être utilisé avec précaution car moins bien calibré.

7.8.1 Méthodologie de suivi

La méthodologie utilisée présente l'avantage de permettre l'homogénéisation des jeux de données sur l'ensemble des sites de réception et dans le temps. Une seule portion d'orbite MODIS permet une vue de la totalité du lagon de Nouvelle-Calédonie, des Iles Loyauté et des îles du Sud du Vanuatu. Ainsi, on obtient en une seule image les données en milieu lagunaire sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie, mais également des points de référence dans l'océan.

S'agissant des données CZCS, SeaWiFS et MODIS, un logiciel de traitement gratuit est disponible sur internet : <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (SeaDas).

Néanmoins, il est nécessaire de faire appel à un expert en télédétection pour mettre en œuvre la méthodologie, afin :

- D'homogénéiser les jeux de données multi-satellites ;
- De calibrer les images grâce aux relevés *in situ* réalisés historiquement dans les eaux autour de la Nouvelle-Calédonie (programme DIAPAZON IRD, 2001-2003) ;
- De calibrer les images grâce aux relevés en milieu lagunaire (programme CAMELIA IRD, 2000 - présent).

Le calcul de la concentration en Chlorophylle-a, à partir des données SeaWiFS, repose sur le système SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) élaboré par la NASA (site internet de SeaDAS : <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>). Le système d'analyse de données de SeaWiFS (SeaDAS) offre un moyen d'analyse d'images comprenant le traitement, l'affichage, l'analyse, et le contrôle de qualité des données satellites de couleur d'océan. Les images, prises indépendamment sont souvent entachées de nuages et ne couvrent qu'une partie de la zone. Pour y remédier, on a recours à des synthèses centrées glissantes sur 5 ou 7 jours. La synthèse consiste à prendre pour chaque pixel la valeur moyenne centrée sur une période.

L'ONERC dispose de données de concentrations en Chl-a sur les zones couvertes par les 5 stations du réseau SEASnet, à savoir La Réunion (depuis 1997), les Canaries (depuis 1997), la Nouvelle-Calédonie (depuis 1998), la Guyane (depuis 1997) et la Polynésie (depuis 2004). Le réseau SEASnet se base sur les données issues du capteur SeaWiFS qui a vu le jour en 1997 et est toujours en activité. Depuis 2002 a été mis en service le satellite MODIS qui remplace et double en ce moment SeaWiFS. Le réseau SEASnet permet d'accéder à des données satellitaires dont la résolution spatiale est de 1 km. La résolution spatiale des données est de 1 km et la fauchée (bande observée à la surface de la terre lors du passage du satellite) du capteur est de 2800 km. La fréquence de relevé est journalière. L'accès aux produits se fait via le site www.seasnet.org. L'accès est libre depuis octobre 2007. Les données du réseau SEASnet appartiennent à l'Unité Espace de l'IRD. Les données MODIS sont disponibles sur internet gratuitement et couvre l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie à une résolution de 1 km et avec 2 jours de répétitivité par ciels clairs (accès direct archivage NASA : il existe une souscription pour la couverture complète sur la Nouvelle-Calédonie ; Dupouy, comm. pers).

Le niveau d'expertise requis pour calibrer, traiter, analyser et interpréter ces données est élevé (niveau chercheur).

Le coût est essentiellement lié aux traitements et à l'archivage des données sur la Nouvelle-Calédonie (CZCS-MODIS, 1978-20..).

7.8.2 Limites

Les principales sources d'erreur peuvent provenir des corrections atmosphériques. Il faut garder en mémoire que les calculs des concentrations de Chl-a sont précis pour les eaux du large, en revanche, il faut se méfier des mesures réalisées près des côtes, ou près des estuaires. Dans le cas des eaux du large, la couleur de l'eau dépend essentiellement de la concentration chlorophyllienne. En revanche, pour les eaux côtières, l'interprétation des mesures radiométriques est plus complexe en raison de la présence simultanée des particules minérales provenant des bassins versants ou de la remise en suspension des sédiments, de la matière organique dissoute, et enfin, en certains endroits des lagons, de la couleur du fond (Dupouy *et al.*, 2008).

7.8.3 Perspectives

Pour le milieu lagonaire, il est urgent d'obtenir une méthode de déconvolution de la couleur du fond dans le signal global de la couleur de l'eau et un algorithme s'appliquant au lagon (Minghelli-Roman *et al.*, 2007 - projet PNTS Valhybio, incluant l'unité Espace (IRD), l'université de Bourgogne, l'université de Méditerranée, de Dupouy, comm. pers.). Pour le milieu pélagique (en dehors des barrières coralliennes), il existe déjà une application des algorithmes classiques aux séries temporelles depuis 1978.

Il est nécessaire de constituer l'archive sur la Nouvelle-Calédonie, une fois les algorithmes appliqués. La seconde étape consistera à comparer les sorties de modélisation couplée biogéochimique (modèle Eco3M couplé à Mars 3D Pinazo/Douillet, collaboration LOPB Marseille/IRD)

Ce travail nécessite 1 à 2 ans, ce qui pourrait faire l'objet d'un sujet pour un étudiant en thèse.

7.9 Le suivi de l'indicateur : « Ratio pico/microplancton lagonaire »

Jusqu'à présent, des données relatives à la taille du plancton ont été acquises en écosystème pélagique (programme Diapazon, Chenal des Loyauté, 2001-2003).

Il existe des données concernant le milieu lagonaire de Nouvelle-Calédonie de 2003 à 2004 (Torreton, Faure, Jacquet) et 2006, 2007 et 2008 (Neveux) archivées dans la base de données CAMELIA de l'IRD (P. Douillet) et au BNDO (IFREMER/INSU, Brest). Les deux dernières campagnes couvrent également, en plus du lagon Sud-Ouest, les lagons Sud jusqu'à l'île des Pins incluant le chenal de la Havannah.

Pour suivre le phytoplancton dans le temps, il est nécessaire :

-
- de prélever des échantillons d'eau de façon mensuelle sur différentes stations types à définir avec des experts ;
 - de mesurer la taille et l'abondance du phytoplancton au moyen d'une instrumentation lourde. Il s'agit de spectrophotométrie, observations au microscope à épifluorescence et mesures de pigments par spectrofluorométrie.

Ces suivis nécessitent un niveau d'expertise élevé pour l'interprétation des données, l'analyse en laboratoire pouvant être réalisée par un technicien confirmé formé à cet effet.

Du fait de l'utilisation d'une instrumentation lourde, le coût est élevé car certains appareils n'existent pas en Nouvelle-Calédonie et nécessite l'envoi d'échantillons en métropole pour certaines analyses.

8 LES FICHES TECHNIQUES DES INDICATEURS

8.1 Les indicateurs de pression

Le tableau ci-dessous liste les différents paramètres atmosphériques, climatologiques et océanographiques qui varient avec le changement climatique que nous avons abordés dans les chapitres précédents (en particulier au niveau du chapitre 4). Un rappel est fourni quant au suivi de ces paramètres en Nouvelle-Calédonie et sur leur évolution au niveau local (colonne « observations »). Enfin des perspectives concernant l'application de ces paramètres en Nouvelle-Calédonie sont développées (colonne « perspectives »). Compte tenu de la définition d'un indicateur (Cf. Chapitre 3), un code couleur a été appliqué à chaque paramètre, permettant de distinguer ceux qui peuvent d'ors et déjà être considérés comme des indicateurs de pression pertinents et opérationnels sur le Territoire (en rouge), de ceux qui sont intéressants à considérer mais nécessitent des recherches complémentaires (en orange) et enfin des paramètres qui ne sont pas pertinents dans le cadre de cette étude (en vert). Seuls les indicateurs océanographiques figurant dans les deux premières catégories font ensuite l'objet d'une fiche technique.

Tableau 14. Tableau synthétisant les paramètres caractérisant le changement climatique, leur suivi et leur évolution sur la Nouvelle-Calédonie ainsi que leurs perspectives d'application.

Paramètres	Observations	Perspectives
Température de surface des océans	Suivi par l'ONERC et IRD Nouméa Séries temporelles longues : 1854 (données ONERC) et 1969 (IRD) et données de stations côtières depuis 1958 (IRD) dont une partie est gérée par le programme ZoNéCo depuis 1992 (12 stations en NC) Augmentation	Mise en place d'un réseau de mesures <i>in situ</i> dans le lagon de NC Prise en compte du gradient N/S et E/O : plusieurs stations de mesure à envisager Intégration de cette initiative à un réseau de mesure existant sur le Pacifique (programme SPSLCM) : installation de bouées SEAFRAME
Température de l'air	Données Météo France depuis 1950 Augmentation	Opérationnel (Météo France)
Salinité de surface de la mer	Suivi par l'ONERC et IRD Nouméa Séries temporelles longues : 1950 (données ONERC) et 1969 pour les thermosalinographes (IRD) et données de stations côtières depuis 1958 (IRD) dont une partie est gérée par le programme ZoNéCo depuis 1992 Diminution	Existe par l'IRD un réseau d'instruments de mesure de données d'océanographie physique dont la salinité : mesures automatiques par thermosalinographes à bord de navires de commerce depuis 1990 le long de leur ligne de navigation. Données transmises par le système GOES depuis 1998. Pérennisation du système et intégration des données à réseau régional ?
Niveau moyen de la mer	Suivi par l'ONERC : pas d'évolution notable en NC Marégraphes et satellites: hausse significative Controverse : à élucider	Mise en place d'un réseau de mesures <i>in situ</i> dans le lagon de NC Prise en compte des différences locales : plusieurs stations de mesure à envisager Intégration de cette initiative à un réseau de mesure existant sur le Pacifique (programme SPSLCM) : installation de

		bouées SEAFRAME
pH / CO ₂	Indicateur en cours d'élaboration Consensus scientifique sur l'acidification des océans Aucune mesure réalisée en NC	Mise en place d'un réseau de mesures <i>in situ</i> dans les eaux de NC (lagon et océan) Intégration de cette initiative à un réseau de mesure existant : installation de stations CREWS
Concentration en gaz à effet de serre	Non mesuré en NC – paramètre global	
Précipitations	Données Météo France Evolution temporelle variable	
Activité cyclonique	Données Météo France Evolution temporelle variable	

	Nom de l'indicateur	Température de surface de la mer
	Type d'indicateur	Indicateur de pression
	Couverture de l'indicateur et sources des données	L'ONERC a développé 2 indicateurs de température de surface de la mer : • Un basé sur des données mensuelles sur les années 1870-2005 (produit HadISST - Hadley Center Sea Ice SST data) et 1854-2005 (ERSST - Extended Reconstructed SST), disponibles de manière globale à une résolution spatiale de 1° de longitude par 1° latitude. Les données sont issues de mesures <i>in situ</i> (bateaux, balises, bouées, etc.). La Nouvelle-Calédonie est bien entendue incluse dans ce réseau de mesures, au niveau du point de coordonnées 21°30'S, 165°30'E. Les fournisseurs des données sont HadISST et ERSST. • Un basé sur des mesures par télédétection haute résolution spatiale, à partir de données journalières. Ce réseau de mesure, appelé SEASnet, a été mis en place depuis 1992 et comprend 5 régions : La Réunion, les Canaries, la Nouvelle-Calédonie, la Guyane et la Polynésie. La Nouvelle-Calédonie est incluse dans ce réseau depuis 1997. Le fournisseur des données est l'IRD/Unité Espace – Réseau SEASnet.
	Description de l'indicateur	Le premier indicateur présente l'évolution de la température de surface de la mer dans des zones géographiques de 2° de latitude par 2° de longitude situées au voisinage de la métropole et des Départements et Territoires français d'outre mer. Les unités sont en degrés Celsius (°C). L'indicateur permet également le calcul de la tendance linéaire sur les années 1950-2005. Les unités de la tendance sont en degrés Celsius par décade (°C/décade). Le deuxième indicateur présente l'évolution de la température de la surface de la mer (TSM) mesurée par satellite dans 5 régions océaniques, dont la Nouvelle-Calédonie. Les variations de la température de surface de la mer sont un des signes pertinents qui permettent de quantifier la variabilité du climat liée en partie au changement global. Il importe d'examiner en particulier l'évolution de la température de surface dans les régions tropicales qui sont les plus vulnérables. La représentation de la tendance linéaire des variations de température de surface sur une période suffisamment longue (> 50 ans) permet de filtrer les variations naturelles qui apparaissent aux échelles décennales (type Pacific Decadal Oscillation, North Atlantic Oscillation) et/ou interannuelles (type El Niño Oscillation Australe) et seraient à même de biaiser l'interprétation d'une tendance sur une période de temps réduite.
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	• Les données d'origine du produit HadISST sont obtenues sur des points de grille 1° de latitude par 1° de longitude alors que les données d'origine du produit ERSST sont calculées sur des zones géographiques de 2° de latitude par 2° de longitude. Afin de rendre les 2 jeux de données comparables, les valeurs mensuelles du produit HadISST ont été moyennées sur des carrés de 2° de latitude par 2° de longitude. Les variations mensuelles de température de surface issues des produits HadISST et ERSST sont filtrées par un filtre de Hanning sur 25 mois. Les tendances linéaires sont calculées à partir des valeurs mensuelles filtrées, sur les années 1950 à 2005, par ajustement d'une droite au sens des moindres carrés pour 27 sites ou territoires français situés

		dans l'océan global. La température de surface de la mer par télédétection haute résolution spatiale (TSM-HR) est actuellement calculée à partir des mesures du radiomètre AVHRR des satellites NOAA opérationnels qui captent l'émission infrarouge de la surface terrestre. A partir de cette émission, la température de la surface de la mer est calculée grâce à un algorithme qui intègre les lois physiques et l'expérience acquise en océanographie et télédétection. Pour plus amples détails se référer à la description de l'indicateur sur le site : http://onerc.org/listAllIndicators.jsf
	Fréquence de suivi	Mensuelle (1 ^{er} indicateur) et journalière (2 ^{ème} indicateur)
	Niveau de technicité requis	Elevé. Les données sont collectées et analysées par des scientifiques spécialisés dans ce type de traitement (IRD et autres).
	Coûts	Non applicable
	Perspectives et limites	Ces indicateurs fournissent des tendances très fiables sur le long terme et pourront donc potentiellement s'avérer très utiles comme points de référence par rapport à des valeurs récentes (pour calculer des anomalies de température par exemple). En revanche, elles sont représentatives du large (océan) et bien que les tendances soient similaires dans le lagon (T. Delcroix, comm.pers.), dans le cadre de cette étude précise (impact du changement climatique sur les récifs et écosystèmes associés), il serait judicieux de mettre en place un réseau de mesures <i>in situ</i> dans le lagon même de Nouvelle-Calédonie. Compte tenu des différences de température connues entre le Nord et le Sud, l'Est et l'Ouest, des stations de mesure pourraient être installées en divers endroits du lagon néo-calédonien, collectant à la fois des données de température de l'eau mais également d'autres variables de l'environnement permettant de quantifier le changement climatique. De tels systèmes sont déjà en place dans des pays voisins, notamment en Australie et dans diverses îles du Pacifique (Programme <i>South Pacific Sea Level and Climate Monitoring</i>), dont il conviendrait de s'inspirer. Il s'agit de systèmes instrumentaux permettant de mesurer des paramètres de l'environnement en rapport avec le changement climatique : le niveau de la mer, la température de l'eau et de l'air, la direction et vitesse du vent, la pression atmosphérique. Les stations de mesure sont appelées SEAFRAME (<i>Sea Level Fine Resolution Acoustic Measuring Equipment</i>). Pour plus de renseignements sur ce projet, se référer à l'Annexe 4.

	Nom de l'indicateur	Salinité de surface de la mer
	Type d'indicateur	Indicateur de pression
	Couverture de l'indicateur et sources des données	Cet indicateur a été développé par l'ONERC. Les données disponibles pour établir cet indicateur ont été obtenues au cours des années 1950 à 2003. Les données originales sont essentiellement situées le long de lignes de bateaux marchands et issues de campagnes océanographiques. Ces mesures ont été interpolées sur une grille régulière de 1 mois par 1° longitude par 1° latitude dans le Pacifique tropical (30°N-30°S ; 1950-2003) et l'Atlantique (50°N-30°S ; 1970-2002). La Nouvelle-Calédonie (21°30'S, 165°30'E) est bien entendue concernée par ces données. Le fournisseur des données est l'IRD (ORE-SSS : Observatoire de Recherche en Environnement dédié à la salinité de surface : http://www.legos.obs-mip.fr/observations/sss/)
	Description de l'indicateur	Cet indicateur présente l'évolution de la salinité de surface de la mer dans des zones géographiques de 1° de latitude par 1° de longitude situées au voisinage de la métropole et de territoires français d'outre mer (Pacifique et Atlantique). L'indicateur permet également le calcul de la tendance linéaire en salinité de surface sur les années 1950-2003 pour les sites du Pacifique et 1970-2002 pour les sites de l'Atlantique. Les variations de la salinité de surface de la mer sont un des signes pertinents qui permettent de quantifier la variabilité du climat et, en particulier, du cycle de l'eau liée aux variations naturelles et au changement global. Il importe d'examiner en particulier l'évolution de la salinité de surface dans les régions tropicales qui sont les plus vulnérables. La quantification de la tendance linéaire des variations de salinité de surface sur une période suffisamment longue (> 30-50 ans) permet de filtrer les variations naturelles qui apparaissent aux échelles décennales (type Pacific Decadal Oscillation, North Atlantic Oscillation) et/ou interannuelles (type El Niño Southern Oscillation) et seraient à même de biaiser l'interprétation d'une tendance sur une période de temps réduite.
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	Les mesures de salinité de surface sont interpolées par analyse objective sur des points de grille réguliers distants de 1 mois, 1° de latitude et 1° de longitude. Seules les valeurs sur les points de grille dont l'erreur normalisée est inférieure à 75% de l'écart type sont prises en compte. Les tendances linéaires sont calculées à partir des valeurs mensuelles sur les années 1950 à 2003 dans le Pacifique et 1970 à 2002 dans l'Atlantique, par ajustement d'une droite au sens des moindres carrés.
	Fréquence de suivi	Mensuelle
	Niveau de technicité requis	Elevé. Les données sont collectées et analysées par des scientifiques spécialisés dans ce type de traitement (IRD et autres).
	Coûts	Non applicable
	Perspectives et limites	Cet indicateur fournit une tendance très fiable sur le long terme et pourra donc potentiellement s'avérer très utile comme point de référence par rapport à des valeurs récentes (pour calculer des anomalies par exemple). En revanche, les données sont représentatives du large (océan) et

	bien que les tendances soient similaires dans le lagon (T. Delcroix, comm.pers.), dans le cadre de cette étude précise (impact du changement climatique sur les récifs et écosystèmes associés), il serait judicieux de mettre en place un réseau de mesures <i>in situ</i> dans le lagon même de Nouvelle-Calédonie. Compte tenu de l'étendue géographique du lagon néo-calédonien, des stations de mesure pourraient être installées en divers endroits du lagon, collectant à la fois des données de salinité de l'eau mais également d'autres variables de l'environnement permettant de quantifier le changement climatique.
--	---

	Nom de l'indicateur	Taux de CO₂ lagonaire
	Type d'indicateur	Indicateur de pression
	Couverture de l'indicateur et sources des données	Dans le Pacifique : - existence de stations CREWS (<i>Coral Reef Early Warning System</i>) dans le cadre du réseau ICON (<i>Integrated Coral Observing Network</i>) qui suivent la pCO₂ ; en revanche aucune station n'est implantée au niveau de la Nouvelle-Calédonie - existence de bouées dérivantes de type TAO ou de bouées fixes avec multi-capteurs dans le milieu pélagique.
	Description de l'indicateur	pCO ₂ dans l'eau de mer ; alcalinité totale ; pH
	Méthodologie	Il existe plusieurs moyens de suivre le taux de CO₂ dans l'eau de mer : - Suivre l'alcalinité / le pH de l'eau de mer à grâce à des mesures sur échantillons ; - Etudier l'évolution du cycle des carbonates grâce à des analyses potentiométriques sur des échantillons prélevés ; - Suivre la pression partielle de CO₂ dans l'eau grâce à une sonde à enregistrement en continu. Des données sur la pCO₂ et/ou l'alcalinité/pH sur des échantillons d'eau de mer sont très importantes car elles permettront de définir l'état de saturation en aragonite de l'eau de mer et les possibles effets sur les coraux vivants et les micro-perforants à plus ou moins long terme. La collecte des échantillons d'eau de mer est très facile à faire. La conservation des échantillons de mer pour analyse de l'alcalinité totale se fait au réfrigérateur avec du mercure (en faible quantité). Les échantillons d'eau destinés à la mesure de pH doivent être analysés le plus rapidement possible (sous 24 - 48h).
Suivi de l'indicateur	Fréquence de suivi	- Station CREWS : Enregistrement de la pression en continu - Station de prélèvement d'eau pour suivi des carbonates : journalière, puis saisonnière puis annuelle
	Niveau de technicité requis	L'interprétation des données afin de déterminer la pCO ₂ de l'eau ainsi que l'état de saturation en aragonite de l'eau, requiert un niveau d'expertise élevé ou une formation d'au moins 1 an sur la biogéochimie des carbonates (Tribollet, comm. pers.)
	Coûts	Elevé : 100 000 à 200 000 US dollars / station CREWS - Cycle des carbonates : Laboratoire de biogéochimie des carbonates à monter
	Perspectives et limites	<u>Limites :</u> Actuellement le réseau de stations CREWS ne couvre pas la Nouvelle-Calédonie. Parallèlement, il n'existe aucun autre moyen de suivre l'acidification de l'océan autour de la Nouvelle-Calédonie. <u>Perspectives :</u>

	• Mise en place d'une station de type CREWS en Nouvelle-Calédonie • Mise en place d'un suivi des carbonates dans la colonne par mesure potentiométrique sur des échantillons d'eau de mer sur plusieurs stations (Tribollet, comm. pers.) et parallèlement, observations des récifs par télédétection et observations sous marines (Le Borgne, comm. pers.). • 1 station océanique et 1 station lagonaire • Prélèvements d'eau à 5 profondeurs différentes • Fréquence variable de prélèvement : dans un premier temps pour déterminer la variabilité à court terme (diurne) puis dans un second temps la variabilité saisonnière (4 cycles dans une année) puis dans un troisième temps la variabilité interannuelle (éventuelle tendance) • En parallèle, relevés de la salinité, de la température et du pH, paramètres qui peuvent affecter l'alcalinité totale • Analyse des échantillons d'eau au laboratoire par méthode potentiométrique (nécessite un niveau d'expertise élevé)
--	---

Nom de l'indicateur	Niveau moyen de la mer
Type d'indicateur	Indicateur de pression
Couverture de l'indicateur et sources des données	Il existe 2 types de mesures différentes du niveau moyen de la mer : - Mesures issues de la télédétection (altimétrie spatiale Topex/Poseidon Jason-1), qui a donné lieu à un indicateur créé par l'ONERC : niveau de la mer marégraphique. Ces données disponibles au CNES et au LEGOS couvrant la Nouvelle-Calédonie - Mesures issues de données <i>in situ</i> collectée par le SHOM grâce aux marégraphes de Chaleix à Nouméa sur la période 1961-2005 et de Numbo sur la période 2005-2008. Les marégraphes appartenaient au SHOM 1961-1975, 2005-... et à l'Université de Hawaii 1975-2005. Les hauteurs horaires mesurées 1967-2003 sont accessibles via http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhsic/rqds.html Les hauteurs horaires plus récentes mesurées par le SHOM à Numbo sont accessibles via le portail SONEL www.sonel.org Par ailleurs, il existe un réseau de marégraphes SEAFRAME (Sea Level Fine Resolution Acoustic Measuring Equipment) dont la Nouvelle-Calédonie ne fait pas partie.
Description de l'indicateur	<u>Description :</u> L'indicateur issu des marégraphes présente l'évolution journalière du niveau de la mer mesurée par des marégraphes à une position précise (Papeete et Nouméa), en distinguant les saisons et les années. La marée a été filtrée. Unités : mm L'indicateur issu de la télédétection mesure les variations du niveau de la mer par altimétrie satellitaire : T/P a fourni des informations sur le niveau de la mer entre 1992 et 2005 ; Jason-1 mis en orbite en fin 2001 succédant à T/P continue ses enregistrements, fournissant une estimation du niveau moyen de la mer tous les 10 jours avec une précision de 3-4 mm. <u>Pertinence et Fiabilité :</u> Les données sont extraites de la base de données du Sea Level Center de l'Université de Hawaii qui procède à un contrôle qualité sur les données avant de les mettre à disposition sur leur site (http://www.soest.hawaii.edu/UHSLC/). Les observations de base sont les séries horaires et ont été moyennées à la journée. L'effet de la marée a été filtré par un filtre Demerliac. Pour être significative, la série doit être suffisamment longue (au minimum une dizaine d'année). Cette série peut être comparée à celle des satellites altimétriques (mais qui eux donneront une valeur moyennée sur une zone).

Suivi de l'indicateur	Méthodologie	2 méthodes principales : - Mesure par télédétection de la distance entre la surface de la mer et l'orbite du satellite par altimétrie satellitaire ; En connaissant précisément la position du satellite, il est possible de mesurer la hauteur d'eau par rapport au centre de la Terre. A partir des données horaires distribuées par le Sea Level Center de l'Université de Hawaii, un filtrage avec un filtre de Demerliac a été appliqué pour obtenir un signal basse fréquence : les effets de la marée sont ainsi filtrés. Les données sont ensuite moyennées par jour. La courbe obtenue représente les variations saisonnières et interannuelles. - Utilisation d'instruments à terre ou en mer pour mesurer le niveau de la mer relatif, c'est-à-dire la hauteur de l'eau par rapport à la terre (marégraphe et bouée dérivante) ; cependant, il est important de connaître précisément les variations du niveau de la terre avant de connaître comment la hauteur absolue des océans varie.
	Fréquence de suivi	Marégraphes : En continu et sur 20 ans minimum Altimétrie : journalière et sur de 30 ans minimum
	Niveau de technicité requis	Elevé pour l'acquisition et l'analyse
	Coûts	Elevé
	Perspectives et limites	<u>Perspectives</u> : Le SHOM dispose à Brest de données originales, de nombreuses informations et métadonnées, informations sur les instruments successifs, références utilisées et autres séries (exemple Thio, bien que plus courte) pour une étude complète de cette série. Un tracé correct et l'obtention de résultats exploitables demanderait une étude visant à assurer la continuité Chaleix - Numbo à étudier le décalage des niveaux moyens PSMSL-SHOM 1976-77-78-80-81 et à effectuer un recalcul des niveaux moyens 1960-65, à étudier les données GPS disponibles pour la stabilité... Ces études sont réalisées par ou avec le SHOM et généralement au travers de stages ou thèses. Mise en place d'une station SEAFRAME mesurant le niveau de la mer en continu. Nécessité d'avoir de longues séries temporelles pour distinguer les phénomènes saisonniers, annuels et interannuels (au moins 25 ans) <u>Limites</u> : Les données relevées <i>in situ</i> disponibles sont ponctuelles (1 source de données à Nouméa), côtières, et ne couvrent pas l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie

8.2 Les indicateurs de réaction

Le tableau ci-dessous liste les indicateurs de réaction retenus consensuellement dans le cadre de cette étude et qui varient avec le changement climatique. Ce tableau inclut les informations suivantes : le lien avec l'indicateur de pression environnemental, des observations concernant le suivi de ces indicateurs en Nouvelle-Calédonie et les perspectives concernant l'application de ces indicateurs en Nouvelle-Calédonie sont développées, en insistant sur leur niveau d'opérationnalité. Compte tenu de la définition d'un indicateur (Cf. Chapitre 3), un code couleur a été appliqué à chaque paramètre, permettant de distinguer ceux qui peuvent d'ores et déjà être considérés comme des indicateurs de pression pertinents et opérationnels sur le Territoire (en rouge), de ceux qui sont intéressants à considérer mais nécessitent des recherches complémentaires (en orange).

Tableau 15. Tableau synthétisant les indicateurs de réaction des écosystèmes récifo-lagonaires, leur suivi et leur évolution sur la Nouvelle-Calédonie ainsi que leurs perspectives d'application.

Paramètres	Lien avec indicateur de pression	Observations	Perspectives
Indice de blanchissement	Température de surface des océans	Aucun programme de suivi existant en continu sur la NC. Mesures ponctuelles et erratiques dans des suivis et observations passées. Plusieurs propositions formulées (de la surveillance par les usagers à des programmes scientifiques pluridisciplinaires à grande échelle).	Indicateur opérationnel (validé sur la GBR notamment) et facile à mettre en œuvre dont la mesure pourrait pertinemment s'intégrer dans des programmes de suivi existants. Recommandation pour la mise en place d'un réseau d'alerte de blanchissement.
Occurrence des maladies coralliennes	Température de surface des océans	Aucun programme de suivi existant sur la NC. Aucune maladie reportée à ce jour. Aucune équipe de recherche assignée à cette thématique sur la NC et en France. Plusieurs propositions formulées (de la surveillance par les usagers à des programmes scientifiques pluridisciplinaires à grande échelle).	Indicateur opérationnel (validé aux Philippines notamment) dont la mesure pourrait facilement s'intégrer dans des programmes de suivi existants. Recommandation pour la construction d'une base de données scientifique et recherche de collaborations internationales (transfert de connaissances).
Taux de microbioérosion	Taux de CO ₂ lagonaire	Des travaux et publications montrent que cette piste est intéressante.	Indicateur non opérationnel. La mise en place d'un programme de

			recherche validant cet indicateur <i>in situ</i> et sa méthodologie de suivi sont nécessaires.
Extension géographique des herbiers	Température de surface des océans	Des données sont existantes mais partielles ou non publiées, ne permettant pas à l'heure actuelle de disposer d'un état de référence sur lequel se baser pour apprécier l'évolution de l'indicateur.	Indicateur non opérationnel. Des efforts de recherche sont encore nécessaires afin de connaître la répartition géographique d'une/des espèces d'herbier permettant l'établissement d'un état de référence.
Répartition géographique d'une espèce de mangrove	Température de surface des océans	Aucune donnée disponible sur la NC. Approche par mesures de terrain (relevés GPS) de la distribution latitudinale d'une espèce bio-indicatrice.	Indicateur non opérationnel. Il serait nécessaire de (1) sélectionner une ou des espèces de palétuvier bio-indicatrices de l'élévation de la température de l'eau et (2) établir un état de référence (répartition initiale) afin de pouvoir suivre l'évolution de cet indicateur.
Wetland Cover Index	Précipitations	Les bases scientifiques sont établies et l'indicateur a déjà été testé et a prouvé sa sensibilité sur les mangroves australiennes. Ces travaux sont en cours de publication. Le suivi de cet indicateur permet de mesurer les pertes et gains des différentes strates végétales de mangrove.	Indicateur opérationnel. Il est néanmoins nécessaire au préalable de mettre à jour la base de données actuelle du programme ZoNéCo, en remplaçant l'interprétation des photos les plus anciennes par les nouveaux runs réalisés entre 2006 et 2008 ; et de réaliser des analyses diachroniques entre les données de 2006-2008 et les futures interprétations de photographies à réaliser tous les ans.
Position marges terrestres et maritimes	Niveau moyen de la mer	La mise en place de cet indicateur nécessite une instrumentation : tables d'élévation – marqueurs d'horizon SET – MH, déjà utilisé par 65 scientifiques dans le Pacifique	Indicateur opérationnel. Il est néanmoins nécessaire au préalable de mettre à jour la base de données actuelle du programme ZoNéCo, en remplaçant l'interprétation

			des photos les plus anciennes par les nouveaux runs réalisés entre 2006 et 2008 ; et de mettre en place une série de SET-MH sur des sites de mangroves différents (une cinquantaine de SET).
Concentration en Chlorophylle lagonaire	Température de surface des océans	Des données satellitaires de concentration en chlorophylle a océanique sont acquises et traitées par l'ONERC depuis 1997.	Indicateur non opérationnel. Des efforts de recherche sont nécessaires quant à l'obtention d'une méthode de déconvolution de la couleur du fond dans le signal global de la couleur de l'eau et un algorithme s'appliquant au lagon
Ratio pico/microplancton	Température de surface des océans, précipitations et activité cyclonique	Des données sont récoltées en NC sur le domaine océanique (2001-2003) et lagonaire (2003-2004) par l'IRD Nouméa.	Indicateur non opérationnel. Il est nécessaire d'acquérir un grand nombre de données dans le domaine lagonaire.

	Nom de l'indicateur	Maladies coralliennes
	Type d'indicateur	Indicateur de réaction - Récifs
	Couverture de l'indicateur et sources des données	A l'heure actuelle il n'existe aucun programme de surveillance des maladies coralliennes sur la Nouvelle-Calédonie. A notre connaissance aucun cas de maladie corallienne n'a été reporté à ce jour.
	Description de l'indicateur	De nombreux chercheurs ont établi un lien entre l'apparition de maladies coralliennes et la hausse de la température de l'eau, en particulier dans les Caraïbes où les maladies représentent une des causes les plus importantes de dégradation des récifs. Ces études en sont à leurs débuts dans le Pacifique, notamment sur la Grande Barrière de Corail Australienne. Les récifs sont très sensibles à la hausse de la température de l'eau ce qui se manifeste notamment par l'apparition de maladies, leur propagation sur les récifs, voire leur explosion lors des mois les plus chauds de l'année.
	Méthodologie	Lors des mois les plus chauds de l'année (novembre-mars), des suivis rapides fréquents permettent de déceler l'apparition éventuelle de maladies sur les récifs. Ces suivis peuvent être réalisés par différentes méthodes : Manta-tow, transects à largeur fixe ou nage pendant un temps déterminé ; avec une technique d'échantillonnage aléatoire. La participation de tous les usagers du lagon est judicieuse à ce stade, par le remplissage de questionnaires simples qui permettent de compléter ou apporter des informations sur des récifs non expertisés. Une fois détectés, les récifs malades sont suivis de manière plus détaillée, par les méthodes du transect linéaire, transect à largeur fixe, aire circulaire ou quadrats (simples ou photographique) ; sur des transects fixés de manière permanente sur les récifs malades.
Suivi de l'indicateur	Fréquence de suivi	La participation des usagers est recommandée tout au long de l'année, le plus fréquemment possible. L'évaluation rapide est recommandée au minimum annuellement, en pleine période chaude. Le suivi détaillé n'a lieu que si des zones infectées ont été décelées et sa fréquence dépend de la maladie considérée et de son ampleur.
	Niveau de technicité requis	<u>Participation des usagers</u> : niveau d'expertise faible, en rapport avec un questionnaire basique fourni et des explications sur les attentes des gestionnaires/scientifiques quant aux réponses au questionnaire. <u>Evaluation rapide</u> : niveau d'expertise moyen. <u>Suivi détaillé</u> : niveau d'expertise moyen à élevé selon les méthodes utilisées et le niveau d'information recherché par les gestionnaires.
	Coûts	Les coûts dépendent des méthodes et de la stratégie mise en place et du niveau d'information final attendu. <u>Méthode à bas coût</u> : • Participation des usagers (questionnaire) • Suivi détaillé sur les zones affectées : • suivi communautaire à large échelle (nage aléatoire) • suivi localisé par la méthode du transect linéaire <u>Méthode à coût moyen</u> : • Participation des usagers (questionnaire)

		• Evaluation rapide annuelle en saison chaude par les méthodes du manta-tow ou des transects à largeur fixe choisis aléatoirement • Suivi détaillé sur les zones affectées : • suivi communautaire à large échelle (nage aléatoire) • suivi localisé par les méthodes du transect à largeur fixe ou du quadrat <u>Méthode à coût élevé :</u> • Participation des usagers (questionnaire) • Evaluation rapide mensuelle en saison chaude par la méthode du manta-tow et des transects à largeur fixe choisis aléatoirement • Suivi détaillé sur les zones affectées : • suivi communautaire à large échelle (nage aléatoire) • suivi localisé par les méthodes du transect à largeur fixe ou du quadrat (simple ou photographique) • marquage et suivi individuel des colonies malades • programme scientifique impliquant la récolte d'échantillons et leur analyse microbiologique
	Perspectives et limites	Un programme de surveillance des maladies coralliennes de type « coût moyen » a été mis place depuis quelques années aux Philippines (L. Raymundo, comm.pers.) et semble bien adapté à la détection de maladies sur ces récifs et à leur suivi. Compte tenu de la surface des récifs de Nouvelle-Calédonie, il apparaît indispensable de mettre en place un réseau de surveillance basé sur les usagers du lagon, permettant à la fois de couvrir de larges zones récifales tout en minimisant les coûts des interventions par des experts et de sensibiliser le public aux impacts des changements climatiques sur les récifs. Si à l'avenir des maladies coralliennes sont détectées dans le lagon calédonien, il serait intéressant de mettre en place un programme scientifique permettant de commencer à construire une base de données sur les maladies coralliennes à l'échelle locale. Des collaborations avec les chercheurs australiens pourraient être recherchées afin de compléter les données acquises sur le Pacifique et favoriser les transferts de connaissance en la matière.

	Nom de l'indicateur	Blanchissement corallien
	Type d'indicateur	Indicateur de réaction - Récifs
	Couverture de l'indicateur et sources des données	A l'heure actuelle il n'existe aucun programme de surveillance et de suivi du blanchissement corallien sur la Nouvelle-Calédonie. A notre connaissance deux événements de blanchissement ont été reportés à ce jour (1996 et 2008), liés à la dessalure des eaux lors de fortes pluies.
	Description de l'indicateur	Une relation indéniable a été mise en évidence depuis plusieurs décennies entre des températures de l'eau élevées et le phénomène de blanchissement corallien (expulsion des algues symbiotiques des polypes coralliens, les zooxanthelles), souvent attribué au changement climatique. La dessalure a également été avancée comme cause de blanchissement mais les cas répertoriés sont plus rares et très localisés. Il s'avère qu'en Nouvelle-Calédonie les blanchissements observés ne semblent pas être liés au stress thermique mais davantage à une baisse de la salinité des eaux de surface. Quelles qu'en soient les causes, le blanchissement corallien est une des premières causes de dégradation à grande échelle des coraux, et son suivi s'impose dans une perspective d'avenir où les eaux se réchauffent incontestablement et où les épisodes de pluie (périodes el Nina en particulier) s'avèrent être plus marqués.
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	Il conviendrait dans un premier temps de mettre en place un système d'alerte de blanchissement. Ceci peut être réalisé de différentes manières : par analyse d'images satellites, par mesures <i>in situ</i>, par la participation des usagers du lagon (questionnaires), par l'analyse des bulletins météorologiques ou par la mise en place d'un réseau constitué de bouées enregistrant des variables environnementales conduisant au blanchissement corallien. Une fois l'alerte déclenchée, un suivi à large échelle peut être réalisé, impliquant les communautés ou des observateurs plus ou moins chevronnés. Les méthodes impliqués dans ce suivi sont diverses : nage aléatoire avec remplissage d'un questionnaire simple, nage pendant un temps déterminé, manta-tow ou survol aérien. Sur les zones les plus affectées, un suivi plus détaillé peut être mené, impliquant l'utilisation des méthodes suivantes : le transect linéaire, le transect à largeur fixe ou le transect vidéo.
	Fréquence de suivi	La participation des usagers est recommandée tout au long de l'année, le plus fréquemment possible. Le suivi à large échelle est recommandé au minimum annuellement, en pleine période chaude, et lors du déclenchement d'une alerte. Le suivi détaillé (à petite échelle) n'a lieu que si des zones blanchies sont décelées et sa fréquence dépend de la sévérité du blanchissement et du niveau d'information recherché par les gestionnaires.
	Niveau de technicité requis	<u>Participation des usagers</u> : niveau d'expertise faible, en rapport avec un questionnaire basique fourni et des explications sur les attentes des gestionnaires/scientifiques quant aux réponses au questionnaire. <u>Suivi à large échelle</u> : niveau d'expertise moyen à élevé selon les méthodes utilisées (en particulier le survol aérien nécessite un niveau de technicité supérieur). <u>Suivi détaillé</u> : niveau d'expertise moyen à élevé selon les méthodes utilisées et le niveau d'information recherché.

Coûts		Les coûts dépendent des méthodes et de la stratégie mise en place et du niveau d'information final attendu. <u>Méthode à bas coût :</u> • Alerte : • Participation des usagers (questionnaire) • Suivi à large échelle : • Suivi communautaire (nage aléatoire) • Nage pendant un temps déterminé • Suivi localisé par la méthode du transect linéaire <u>Méthode à coût moyen :</u> • Alerte : • Participation des usagers (questionnaire) • Analyse des bulletins météorologique • Analyse des seuils basés sur des événements passés • Suivi à large échelle : • suivi communautaire (nage aléatoire) • Manta-tow • Suivi localisé par la méthode du transect à largeur fixe <u>Méthode à coût élevé :</u> • Alerte : • Participation des usagers (questionnaire) • Analyse des seuils par expérimentation scientifiques • Mise en place d'un réseau d'alerte • Suivi à large échelle : • Suivi communautaire (nage aléatoire) • Manta-tow et survol aérien • Suivi localisé par la méthode du transect vidéo • Analyse socio-économique des impacts du blanchissement corallien
Perspectives et limites		Des programmes de surveillance des épisodes de blanchissement corallien sont en place dans de nombreux pays voisins (notamment en Australie) dont il conviendrait de s'inspirer. Les indicateurs de blanchissement sont maintenant suffisamment élaborés pour être utilisés au sein d'un réseau d'alerte (R. Berkelmans, comm. pers.) bien qu'ils nécessitent d'être ré-affinés au fil des blanchissements observés. Des extrapolations de données sont sans doute possible avec les récifs australiens, permettant de bénéficier de leur large expérience dans ce domaine et de favoriser le transfert des connaissances. Des collaborations scientifiques pourraient être envisagées. Compte tenu de la surface des récifs de Nouvelle-Calédonie, il apparaît indispensable de mettre en place un réseau de surveillance basé sur les usagers du lagon, permettant à la fois de couvrir de larges zones récifales tout en minimisant les coûts des interventions par des experts et de sensibiliser le public aux impacts des changements climatiques sur les récifs.

	Nom de l'indicateur	Microflore perforante – Taux de microbioérosion
	Type d'indicateur	Indicateur de réaction - Récifs
	Couverture de l'indicateur et sources des données	A l'heure actuelle il n'existe aucun programme de surveillance des taux de microbioérosion sur la Nouvelle-Calédonie et plus généralement dans le monde.
	Description de l'indicateur (pertinence écologique, sensibilité, bases scientifiques)	Quelques études récentes ont montré que les taux de microbioérosion (dissolution des carbonates récifaux tels que les squelettes coralliens) varient de manière importante en fonction de la sédimentation, de l'eutrophisation et de l'acidification des océans. La microflore perforante jouant un rôle majeur dans la destruction des récifs coralliens, il apparaît plus qu'urgent d'établir un programme de suivi des taux de microbioérosion dans les récifs. Le maintien des récifs coralliens résulte de l'équilibre entre la bioérosion récifale (principale force destructrice des récifs) et la croissance/calcifaction récifale (essentiellement due aux coraux et aux algues calcaires). Lorsque la bioérosion est plus importante que la croissance récifale, il y a perte physique de récifs et donc de biodiversité et de ressources alimentaires et économiques pour les populations dépendantes de ces écosystèmes.
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	La méthodologie pour le suivi dans l'espace et dans le temps des taux de microbioérosion reste à mettre en place. Cependant, des pistes sont proposées comme : - la collecte de débris pour étudier la composition en microflore perforante (diversité, abondance) - des mesures <i>in situ</i> du métabolisme de cette microflore
	Fréquence de suivi	Annuelle à bi-annuelle Des mesures mensuelles peuvent être nécessaires si les variations annuelles et bi-annuelles s'avèrent trop importantes.
	Niveau de technicité requis	La phase de terrain nécessite la participation d'au minimum un ingénieur de niveau scientifique élevé (chercheur IRD) assisté de techniciens plongeurs. Les analyses en laboratoire seront réalisées par un ingénieur de niveau scientifique élevé (chercheur IRD).
	Coûts	Les coûts sont pour l'instant difficiles à évaluer. Ils dépendront notamment de la stratégie des gestionnaires des récifs de Nouvelle-Calédonie (Provinces, Gouvernement et organismes de recherche) à s'impliquer dans un programme de suivi basé localement ou à l'étranger (envoi d'échantillons, déplacement des équipes de recherche).
	Perspectives et limites	Il serait intéressant de mettre en place un programme scientifique permettant de commencer à construire une base de données sur la diversité, l'abondance et le métabolisme de la microflore perforante à l'échelle locale (Nouvelle-Calédonie). Des collaborations avec les chercheurs américains (Hawaï), australiens et de Polynésie française pourraient être recherchées afin de compléter les données acquises sur le Pacifique et favoriser les transferts de connaissance en la matière.

	Nom de l'indicateur	Répartition géographique d'une espèce
	Type d'indicateur	Indicateur de réaction - mangroves
	Couverture de l'indicateur et sources des données	Quelques données de présence/absence de quelques espèces de palétuviers sont disponibles auprès des différents laboratoires de botanique de Nouvelle-Calédonie. D'autres données issues d'observations de personnes non spécialistes sont disponibles mais n'ont pas été forcément vérifiées auprès de spécialistes.
	Description de l'indicateur	Il est clairement établi que la présence de mangrove est limitée par la tolérance de chaque espèce aux faibles températures. Leur distribution apparaît clairement corrélée à la température de surface de l'eau et les limites latitudinales des formations de mangrove sont fortement corrélées à l'isotherme 20°C Ainsi, le suivi de la migration d'une espèce bio-indicatrice pourrait se révéler un indicateur très utile en rapport avec l'élévation de la température des eaux.
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	La méthodologie généralement utilisée est de suivre 2 approches complémentaires : • une approche par télédétection qui permet de cartographier les limites de distribution latitudinale de certaines formations de mangroves spécifiques. • une approche de terrain par des relevés de limite de distribution d'une espèce bio-indicatrice au moyen d'un GPS.
	Fréquence de suivi	5 ans après le premier état initial.
	Niveau de technicité requis	Expertise en reconnaissance des espèces et en cartographie SIG.
	Coûts	Coût moyen - équivalent à ceux d'une campagne de terrain tous les 5 ans d'une durée de 2 mois.
	Perspectives et limites	La première approche n'est pas très pertinente en Nouvelle-Calédonie étant donné que les quelques espèces de mangroves susceptibles d'être bio-indicatrices et visibles par télédétection sont distribuées du Nord au Sud couvrant l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie. En revanche, le suivi de la distribution de certaines espèces telles que le palétuvier <i>Ceriops tagal</i> par exemple, qui n'a été observé que dans la partie nord de la Nouvelle-Calédonie ainsi qu'à Ouvéa, serait plus pertinent en tant que bio-indicateur. Cette espèce n'est pas identifiable par télédétection (formation trop restreinte ou en formation mixte), elle ne pourra donc être suivie que par des mesures de terrain. Si cet indicateur « distribution géographique d'une espèce » est facile à mettre en œuvre et à suivre, l'interprétation des résultats n'en reste pas moins délicate car d'autres facteurs peuvent influencer la distribution latitudinale d'une espèce, tels que la pluviométrie ou encore la disponibilité en propagules. Par ailleurs, les données existantes sur la distribution latitudinale de chaque espèce sont incomplètes et ne peuvent en aucun cas constituer un état initial exhaustif, ce qui constitue une contrainte supplémentaire pour réaliser un suivi. Il est donc nécessaire de réaliser au plus vite des investigations de terrain couvrant l'ensemble des formations de mangrove afin de cartographier à un instant t l'ensemble des limites de distribution de l'ensemble des espèces présentes en Nouvelle-Calédonie.

	Nom de l'indicateur	Wetland cover index
	Type d'indicateur	Indicateur de réaction - mangroves
	Couverture de l'indicateur et sources des données	En Nouvelle-Calédonie, l'atlas des mangroves réalisé dans le cadre du programme ZoNéCo en 2008 a permis de créer une base de données comportant les superficies des différentes strates végétales de l'ensemble des formations présentes dans le pays. Toutefois, ces données sont issues de l'interprétation de photographies aériennes prises entre 1976 (pour les plus anciennes) à 2006 (pour les plus récentes). Cela signifie que s'il y a eu un changement de la structure des communautés lié à une variation de la pluviométrie pendant cette période, les données issues de cette base de données ne pourront pas le mettre en évidence. Cette base de données sert néanmoins de référence pour comparer la superficie des tannes et des mangroves arbustives de cette période avec celles des années à venir
	Description de l'indicateur	Le WCI est le ratio de superficie de mangrove arbustive sur la superficie totale de mangroves (arbres + tannes). Les bases scientifiques sont établies et l'indicateur a déjà été testé et a prouvé sa sensibilité. En cours de publication par Norman Duke.
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	Il existe deux approches complémentaires pour suivre les mouvements des écotones au sein des mangroves subissant une augmentation de la pluviométrie : Par suivi sur le terrain : au niveau de transects permanents, il est important de noter : • l'apparition de bandes de végétation qui dépérissent au sein d'une strate végétale ou le long de la zone de tannes • le recrutement de palétuviers arbustifs ou arborescents dans la zone de tannes Par un suivi à l'aide d'imageries satellitaires ou aériennes : • pertes ou des gains de surface de chaque strate végétale arborescente, arbustive, ou nue • déplacement des contours des strates végétales arborescentes, arbustives, ou nues Puis cartographie des différentes strates végétales des mangroves.
	Fréquence de suivi	Annuelle à minima
	Niveau de technicité requis	Expertise en reconnaissance des espèces, structure des communautés et relevés de paramètres physico-chimiques et en cartographie SIG
	Coûts	Coûts d'une campagne annuelle de 2 semaines et d'un travail de cartographie précise des zones étudiées Coût d'achat d'enregistreurs multi paramètres
	Perspectives et limites	<u>Limites :</u> • Il est moins performant dans des régions de latitudes proche de l'équateur ; • Il est peu efficace lorsqu'il s'agit de mettre en évidence des

	mouvements d'écotones à une échelle régionale du fait que les traits caractéristiques des tannes sont variables et la période d'étude trop courte. <u>Perspectives :</u> 1ière étape : Mettre à jour la base de données actuelle du programme ZoNéCo, en remplaçant l'interprétation des photos les plus anciennes par les nouveaux runs réalisés entre 2006 et 2008. 2ième étape : Réaliser des analyses diachroniques entre les données de 2006-2008 et les futures interprétations de photographies à réaliser tous les ans.
--	---

	Nom de l'indicateur	Positionnement des marges terrestres et maritimes des mangroves
	Type d'indicateur	Indicateur de réaction - mangroves
	Couverture de l'indicateur et sources des données	En Nouvelle-Calédonie, l'atlas des mangroves réalisé dans le cadre du programme ZoNéCo en 2008 a permis de créer une base de données comportant les positions de l'ensemble des formations présentes dans le pays. Toutefois, ces données sont issues de l'interprétation de photographies aériennes prises entre 1976 (pour les plus anciennes) à 2006 (pour les plus récentes). Cela signifie que s'il y a eu un changement de position pendant cette période, les données issues de cette base de données ne pourront pas les mettre en évidence. Cette base de données sert néanmoins de référence. Aucune instrumentation de type SET-MH n'est mis en œuvre en Nouvelle-Calédonie. En revanche, plus de 65 scientifiques ont déjà déployé ce type d'instruments dans plusieurs pays du Pacifique.
	Description de l'indicateur	• La délimitation régulière de la marge terrestre des mangroves en utilisant un GPS est nécessaire pour mettre en évidence le moindre déplacement de cette marge, fournissant ainsi des informations fondamentales pour déterminer la tendance dans chaque mangrove étudiée (Gilman <i>et al</i>, 2006 ; Gilman, comm. pers.). L'interprétation à partir de télédétection (photographies aériennes ou images satellites) peut être utilisée pour délimiter la marge maritime mais un complément avec des relevés au GPS peut s'avérer utiles. • La méthode mettant en œuvre les tables d'élévation - marqueurs d'horizons SET-MH permet de comprendre la relation entre la hauteur de la surface du sol et le niveau de la mer car la hauteur de surface du sol ainsi que l'accrétion verticale sont mesurées directement et simultanément (Cahoon <i>et al</i>, 2006). Elle est donc complémentaire à la méthode précédente permettant la délimitation des marges terrestres et maritimes pour préciser le sens de déplacement des marges.
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	• Suivi des délimitations des formations de mangroves par investigations de terrain (GPS et observations) et par analyses d'imageries satellitaires ou aériennes à haute résolution. • Suivi des processus dynamiques du sol par rapport au changement du niveau de la mer par mise en place de tables d'élévation – marqueurs d'horizon SET-MH et analyse des résultats des différents processus dynamiques. La méthode mettant en œuvre les tables d'élévation - marqueurs d'horizons SET-MH permet de comprendre la relation entre la hauteur de la surface du sol et le niveau de la mer car la hauteur de surface du sol ainsi que l'accrétion verticale sont mesurées directement et simultanément.
	Fréquence de suivi	Ces indicateurs peuvent être mis en œuvre immédiatement sans recherche complémentaire ; néanmoins, il est suggéré de commencer par l'étude de sites pilotes aux caractéristiques différentes pouvant influencer le déplacement des palétuviers

		(niveau de pente de la terre, processus dynamiques possibles). La fréquence préconisée pour un suivi des positions des marges terrestres et maritimes via télédétection est comprise entre 1 et 5 ans suivant l'intensité du phénomène d'augmentation du niveau de la mer (Duke, comm. pers.). La périodicité pour les investigations de terrain au GPS dépend également du contexte local mais également de la façon dont les impacts anthropiques peuvent influencer le développement ou non de la mangrove (construction d'une barrière anthropique en amont pouvant bloquer la migration de la mangrove vers l'intérieur des terres).
	Niveau de technicité requis	• Moyen pour compétences en botanique et SIG • Elevé pour la mise en œuvre des SET - MH
	Coûts	Coûts d'une campagne annuelle de 2 semaines et d'un travail de cartographie précise des zones étudiées Coût d'achat de SET-MH et coût d'interprétation par un expert
	Perspectives et limites	<u>Perspectives :</u> 1^{ière} étape : Mettre à jour la base de données actuelle du programme ZoNéCo, en remplaçant l'interprétation des photos les plus anciennes par les nouveaux runs réalisés entre 2006 et 2008. 2^{ième} étape : installer une série de SET-MH sur des sites de mangroves différents (une cinquantaine de SET)

Nom de l'indicateur	Concentration en chlorophylle lagonaire
Type d'indicateur	Indicateur de réaction – colonne d'eau
Couverture de l'indicateur et sources des données	L'ONERC propose un indicateur de couleur de l'eau pour l'océan du large correspondant à une concentration en chlorophylle a, pigment majeur de phytoplancton. Il est basé sur des mesures par télédétection du satellite SeaWiFS depuis 1997, mais peut être étendu avec MODIS depuis 2002, qui a une meilleure résolution spatiale, (actuellement la couverture est optimale avec les 2 capteurs). L'ONERC dispose de données de concentrations en Chl-a sur les zones couvertes par les 5 stations du réseau SEASnet, à savoir La Réunion (depuis 1997), les Canaries (depuis 1997), la Nouvelle-Calédonie (depuis 1998), la Guyane (depuis 1997) et la Polynésie (depuis 2004). La fréquence de relevé est journalière. L'accès aux produits se fait via le site www.seasnet.org. L'accès aux données est libre depuis octobre 2007. Les données du réseau SEASnet appartiennent à l'Unité Espace de l'IRD. Les données MODIS sont disponibles sur internet gratuitement et couvre l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie à une résolution de 1 km et avec 2 jours de répétitivité par ciels clairs (accès direct archivage NASA : il existe une souscription pour la couverture complète sur la Nouvelle-Calédonie, PI Cécile Dupouy)
Description de l'indicateur	Cet indicateur présente l'évolution des concentrations en chlorophylle-a (Chl-a) (pigment majeur du phytoplancton) mesurées par satellite dans les régions océaniques. Unité de mesure : mg/m^3, Deux autres indicateurs sont également issus des capteurs couleur de l'eau. D'une part, la concentration en matière en suspension totale. Unité de mesure g/m^3, et enfin la concentration en Matière Organique Colorée Dissoute. Unité de mesure m^{-1}, qui est une fraction du carbone organique dissout réfractaire, résultant de la dégradation de la matière organique (en principe plus concentré en milieu lacustre, mangroves, rivières anthropisées, etc.). La quantification de ces trois constituants en milieu lagonaire demande de nombreuses données de terrain afin d'obtenir des modèles locaux suffisamment performants mais qui, de fait, sont assez peu génériques. Les recherches sont actives dans ce sens aussi bien en ce qui concerne les algorithmes de calcul, qu'en ce qui concerne la définition de nouveaux capteurs plus performants pour les milieux côtiers qui abritent l'essentiel de la population mondiale. La durée de vie conséquente du capteur SeaWiFS (1997 – présent) a généré une série de données homogènes et fiables (Dupouy <i>et al.</i> 2000, 2004), ce qui est primordial dans ce domaine de la télédétection marine qui requiert une grande précision et une grande stabilité de la calibration (idem pour MODIS (2002-présent). Par contre, le premier capteur Coastal Zone Color Scanner qui a fonctionné entre 1978 et 1984 et qui a donné les premières images de chlorophylle de la Nouvelle-Calédonie (Dupouy, 1990 ; 1992) doit être utilisé avec précaution car moins bien calibré (mais les données re-traitées sont disponibles au même site que SeaWiFS et MODIS et accessibles aux seuls PI).
Suivi de l'indicateur	Méthodologie La méthodologie utilisée présente l'avantage de permettre l'homogénéisation des jeux de données sur l'ensemble des sites de réception et dans le temps. Une seule portion d'orbite MODIS permet une vue de la totalité du lagon de Nouvelle-Calédonie, des Iles Loyauté et des îles sud du Vanuatu, Ainsi, on obtient en une

		seule image les données en milieu lagonaire mais également des points de référence dans l'océan. S'agissant des données CZCS, SeaWiFS et MODIS, un logiciel de traitement gratuit est disponible sur internet : http://oceancolor.gsfc.nasa.gov (SeaDas). Néanmoins, il est nécessaire de faire appel à un expert en télédétection pour mettre en œuvre la méthodologie : • homogénéiser les jeux de données multi-satellites • calibrer les images grâce aux relevés in situ réalisés historiquement dans les eaux autour de la Nouvelle-Calédonie (programme DIAPAZON IRD, 2001-2003) • calibrer les images grâce aux relevés en milieu lagonaire (programme CAMELIA IRD, 2000-présent)
	Fréquence de suivi	L'acquisition des images satellites est journalière. Il est nécessaire d'acquérir des données sur plusieurs décennies (la NASA l'assure depuis 1978 avec la suite Coastal Zone Color Scanner, SeaWiFS et MODIS)
	Niveau de technicité requis	Expert pour calibration et validation des images satellite, traitement et interprétation.
	Coûts	Traitement et archivage des données sur la Nouvelle-Calédonie (CZCS-MODIS, 1978-20..)
	Perspectives et limites	<u>Limites :</u> Les principales sources d'erreur peuvent provenir des corrections atmosphériques. Il faut garder en mémoire que les calculs des concentrations de Chl-a sont précis pour les eaux du large, en revanche, il faut se méfier des mesures réalisées près des côtes, ou près des estuaires. Autre point essentiel : dans le cas des eaux du large, la couleur de l'eau dépend essentiellement de la concentration chlorophyllienne. En revanche, pour les eaux côtières, l'interprétation des mesures radiométriques est plus complexe en raison de la présence simultanée des particules minérales provenant des bassins versants ou de la resuspension des sédiments, de la matière organique dissoute, et enfin, en certains endroits des lagons, de la couleur du fond. Certains scientifiques émettent l'hypothèse (Behrenfeld <i>et al.</i>, 2006, Raitsos, 2005 avec 50 ans de données, Hirawake, 2005 avec 38 ans de données) qu'il y a une hausse de la productivité plutôt qu'une baisse de la productivité en réponse au réchauffement climatique. Il est peut être prématuré sur la base d'une trentaine d'années de données (si on utilise le CZCS des années 1978-84) de dire que la productivité diminue quand la température augmente. Ces indications divergent car non seulement le phytoplancton peut varier en concentration globale (détectée par la chlorophylle satellitale) mais également dans sa composition (voir indicateur suivant). <u>Perspectives :</u> Pour le milieu lagonaire, urgence d'obtenir une méthode de déconvolution de la couleur du fond dans le signal global de la couleur de l'eau et un algorithme s'appliquant au lagon (Minghelli-Roman <i>et al.</i>, 2007, projet PNTS Valhybio, incluant Unité Espace, Université de Bourgogne, IRD, Université de Méditerranée, de

	Dupouy, comm. pers.). Pour le milieu pélagique (en dehors des barrières coralliennes), application des algorithmes classiques aux séries temporelles depuis 1978. Constitution de l'archive sur la Nouvelle-Calédonie, une fois les algorithmes appliqués. Ensuite, comparaison avec les sorties de modélisation couplée biogéochimique (modèle Eco3M couplé à Mars 3D Pinazo/Douillet, collaboration LOPB Marseille/IRD) Nécessité 1 à 2 ans de travail (typiquement sujet pour un étudiant de thèse)
--	---

	Nom de l'indicateur	Ratio pico/microplancton
	Type d'indicateur	Indicateur de réaction – colonne d'eau
	Couverture de l'indicateur et sources des données	Jusqu'à présent, des données ont été acquises en écosystème pélagique (programme Diapazon, Chenal des Loyauté, 2001-2003). Données lagon de Nouvelle-Calédonie de 2003 à 2004 (Torreton, Faure, Jacquet) et 2006, 2007 et 2008 (Neveux) archivées dans la base de données CAMELIA de l'IRD (P. Douillet) et au BNDO (IFREMER/INSU, Brest). Les deux dernières campagnes couvrent également, en plus du lagon sud-ouest, le lagon sud jusqu'à l'île des Pins incluant le Chenal de la Havannah.
	Description de l'indicateur	La taille du phytoplancton est un indicateur de réaction à un changement en nutriments (dessalure, température, apports nutritifs d'origines variées, éoliens ou terrestres). En effet, la composition du phytoplancton peut changer, remplacement du picoplancton (< 2 µm) par les grandes classes de taille, avec apparition ou adaptation d'espèces formant des efflorescences, toxiques ou non. Les grandes familles de phytoplancton n'ayant pas les mêmes besoins en sels nutritifs, elles peuvent réagir différemment aux changements de conditions nutritives ou de température induits par les changements climatiques. Enfin, des groupes peuvent se remplacer, par exemple les diatomées coloniales et les cyanobactéries filamenteuses peuvent remplacer les espèces de petite taille suivant les conditions. Il a été montré que la taille du phytoplancton augmentait en réponse aux apports en sels nutritifs dans le lagon de Nouvelle-Calédonie avec passage du picoplancton vers le microplancton (différentes familles).
Suivi de l'indicateur	Méthodologie	Instrumentation : spectrophotométrie, observations au microscope à épifluorescence, mesures de pigments par spectrofluorométrie
	Fréquence de suivi	Mensuel en quelques stations types
	Niveau de technicité requis	expert
	Coûts	Envoi des échantillons par avion en France (1/an) Mesures et observations au centre IRD de Nouméa
	Perspectives et limites	<u>Perspectives</u> : Démarrage du projet : Etudiant de thèse (partie <i>in situ</i> du projet de thèse plutôt orienté « satellite ») + technicien localement Technicien par la suite pour l'échantillonnage et observations (même personne)

9 LES PROGRAMMES DE SUIVI EXISTANTS EN NOUVELLE-CALEDONIE

Le tableau ci-après récapitule l'ensemble des programmes existants qui suivent les écosystèmes récifo-lagonaires de Nouvelle-Calédonie soit dans le cadre d'objectifs particuliers (comme par exemple l'inscription des récifs au Patrimoine Mondial de l'UNESCO), soit dans le cadre d'étude d'impacts ou de projets miniers. Malheureusement ce tableau n'est pas exhaustif malgré de nombreux contacts pris avec les personnes impliquées dans ces programmes. Il est à noter que ces programmes n'étudient pas spécifiquement l'impact du changement climatique sur les écosystèmes récifo-lagonaires mais englobent l'étude des impacts anthropiques à l'exception des zones vierges de tout impact. Par ailleurs, il est important de souligner que ces programmes ne suivent généralement pas les indicateurs qui ont été sélectionnés dans le cadre de cette étude mais contribuent à l'acquisition d'informations qui peuvent être utiles au suivi de ces indicateurs.

Tableau 16. Programmes de suivis environnementaux existants en Nouvelle-Calédonie

Programme	Responsable & description	Localisation	Ecosystème	Principaux paramètres mesurés	Méthode	Indicateur potentiellement concerné								
						Extension géographique des herbiers	Maladies coralliennes (récif)	Blanchissement corallien	Taux de micro-bioérosion	Répartition géographique d'une espèce de mangrove	Wetland Cover Index	Position des marges terrestres et maritimes des mangroves	Concentration en chlorophylle lagonaire	Ratio pico/micro plancton
ORC puis RORC (ReefCheck)	Aquarium 													

Programme	Responsable & description	Localisation	Ecosystème	Principaux paramètres mesurés	Méthode	Indicateur potentiellement concerné								
						Extension géographique des herbiers	Maladies coralliennes (récif)	Blanchissement corallien	Taux de micro-bioérosion	Répartition géographique d'une espèce de mangrove	Wetland Cover Index	Position des marges terrestres et maritimes des mangroves	Concentration en chlorophylle lagonaire	Ratio pico/micro plancton
CAMELIA	IRD – Caractérisation et modélisation des échanges dans les lagons sous influences terrigènes et anthropiques	Lagon Sud-Ouest	Colonne d'eau et fonds meubles	Physico-chimie et biogéochimie des Sédiments / biocénoses pélagiques et chlorophylle / Bioaccumulateurs de métaux	Mesures sur stations ponctuelles									
COREUS	IRD - Approche écosystémique des communautés récifales et de leurs usages	NC	Récifs coralliens	Diversité / densité / biomasse poisson, invertébrés LIT	Transect 50 m									
Programme ECOTROPE	IRD - Suivi des baies de Nouméa- 1997-1999	Baie de Ste Marie	Récifs frangeants	Poissons	Transects									
		Grande Rade												
	IRD- Suivi des herbiers et algueraies 1996		Herbier et Algueraies											
		Ste Marie-Canard-Magenta		Poissons										
Programme LAGON	IRD- Suivi des mangroves, fonds meubles et récifs de St Vincent- 1989	Baie de ST Vincent	Mangrove	Poissons	Filets									
			Fonds Meubles											
			Récif											
Suivi KNS	KNS - Depuis 2000 : suivi des récifs coralliens, de la colonne d'eau et des mangroves	Zone VKP	Récif corallien (lagon et pente externe)	Diversité / densité / biomasse poisson, invertébrés LIT / MSA	Transect 50 m									
			Mangrove	Limites strates végétales / bioindicateurs animaux	Cartographie									
			Colonne d'eau	Physico-chimie	Stations ponctuelles									
Suivi Goro	GNI	Baie de Prony	Récif corallien	Diversité / densité / biomasse poisson, invertébrés LIT	Transect 20 m									

Programme	Responsable & description	Localisation	Ecosystème	Principaux paramètres mesurés	Méthode	Indicateur potentiellement concerné								
						Extension géographique des herbiers	Maladies coralliennes (récif)	Blanchissement corallien	Taux de micro-bioérosion	Répartition géographique d'une espèce de mangrove	Wetland Cover Index	Position des marges terrestres et maritimes des mangroves	Concentration en chlorophylle lagonaire	Ratio pico/micro plancton
Etude biodiversité et typologies des mangroves	ZONECO : 2006-2008 sur des données photo 1976-2006	NC	Mangrove	Limites strates végétales /	aléatoire									
PROCFISH	CPS	NC	Récif corallien	Diversité / densité / biomasse poisson, LIT, MSA, invertébrés	Transect 50 m									
Indicateurs des effluents aquacoles	IFREMER pour Zonéco 2004-2005	Baies de Chambeyron et de Teremba	Colonne d'eau	Physico-chimie et biologie	Transects Mesures ponctuelles et en continues									
Impact des effluents aquacoles	IFREMER – IRD 1995 - 1998	Baie de Chambeyron	Benthos	Diversité / densité / biomasse	Points									
Impact des effluents aquacoles sur la mangrove	ZONECO : 2005 sur des données photo 1954 - 2004	3 sites (Chambeyron, Teremba et Pouaco)	Mangrove	Limites strates végétales	Cartographie									

10 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adjeroud M., Chancerelle Y., Schrimm M., Perez T., Lecchini D., Galzin R., Salvat B., 2005. Detecting the effects of natural disturbances on coral assemblages in French Polynesia: A decade survey at multiple scales. *Aquatic Living Resource* 18: 111–123.
2. AIMS, 2006. Coral reef and climate change. A summary of AIMS' research into climate change and the GBR was presented at Greenhouse 2005 (November 2005, Melbourne): 3 p.
3. Alongi D.M., 2007. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* Volume 76, Issue 1, 1 January 2008: 1-13.
4. Andréfouët S., Berkelmans R., Odriozola E.L., Done E.T., Oliver J. and E.F. Müller-Karger, 2002. Choosing the appropriate spatial resolution for monitoring coral bleaching events using remote sensing. *Coral Reefs* (2002) 21: 147–154
5. Andréfouët S., Maritorena S. & L. Loubersac, 2000. Un bilan de la télédétection appliquée aux milieux coralliens. *Océanis* • vol. 26 no 3 : 311-349.
6. AusAID, 2006. Pacific country report on sea level and climate – their present state – Fiji. June 2006: 35 p.
7. Beenaerts N., Vanden Berghe E., 2005. Comparative Study of Three Transect Methods to Assess Coral Cover, Richness and Diversity. *Western Indian Ocean J. Mar. Sci.* Vol. 4, No. 1, pp. 29–37, 2005.
8. Behrenfeld M.J., O'Malley R.T., Siegel D.A., McClain C.R., Sarmiento J.L., Feldman G.C., Milligan A.J., Falkowski P.G., Letelier R.M. & E.S. Boss, 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* vol 444, 7 dec 2006: 752-755.
9. Berkelmans R., 2002. Time-integrated thermal bleaching thresholds of reefs and their variation on the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, volume 229: 73-82.
10. Berkelmans R., in press. Bleaching and mortality thresholds: how much is too much? Chapter 9.
11. Berkelmans R., De'ath G., Kininmonth S. and W. J. Skirving, 2004. A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: spatial correlation, patterns and predictions. *Coral Reefs* 23: 74-83.
12. Berkelmans R., Hendee J.C., Marshall P.V., Orpin A.R. and D. Irvince, 2002. Automatic weather stations: tools for managing and monitoring potential impacts to coral reefs. *MTS Journal*, volume 36, n°1: 29-38.
13. 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 of the Royal Society B.*, 273: 2305-2312.
14. Blasco F., Saenger P. and E. Janodet, 1996. Mangroves as indicators of coastal change. *Catena* 27: 167-178.
15. Bruno J.F., Selig E.R., Casey K.S., Page C.A., Willis B, Harvell C.D., Sweatman H., and A.M. Melendy, 2007. Thermal Stress and Coral Cover as Drivers of Coral Disease Outbreaks. *PLOS Biology*. Vol 5(6):1:8.
16. Bryant D., Burke L., McManus J. and M. Spalding, 1998. Reef at risk: A map based indicator of the threat to the world's coral reefs. *World Resources Institute report*: 60 p.
17. Buddemeier R.W., Kleypas J.A. and R.B. Aronson, 2004. Coral reefs and global climate change – Potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems. Feb 2004: 42 p.
18. Buddemeier R.W., Baker A.C., Fautin D.G., and Jacobs J.R., XXXX. The adaptative hypothesis of bleaching. p. 429-444.

19. Burke L.A., Kura Y., Kassem K., Revenga C., Spadling M. and D. McAllister, 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystem - Coastal Ecosystem. World Resource Institute: 77 p.
20. Cahoon D.R. and P.F. Hensel, 2006. High resolution global assessment of mangrove responses to sea level rise: a review. In Gilman E. (Ed.) - Proceedings of the Symposium on mangrove responses to relative sea level rise and other climate change effects, 13 July 2006. Western Pacific regional Fishery Management Council in cooperation with SPREP and UNEP, Cairns, Australia, 9-14 July 2006: 9-17.
21. Cane M.A., 2005. The evolution of El Nino, past and future. *Earth and Planetary Science Letters* 230: 227-240.
22. Cazenave, A., Lombard, A., & Llovel, W. (2008). Present-day sea level rise: a synthesis. *Geoscience*.
23. Corrège T., Quinn T., Delcroix T., Le Cornec F., Récy J. and G. Cabioch, 2001. Little ice age sea surface temperature variability in the southwest tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*, vol. 28, n°18: 3477-3480.
24. Crevison H.I. and P.A. Hallock, 2007. Anomalous features observed on tests of live archaean foraminifera from the Florida Keys, USA. *Journal of Foraminiferal Research*, volume 37 n°3, July 2007: 223-233.
25. Crosby, M.P., G.R. Gibson, and K.W. Potts (eds). 1996. A Coral Reef Symposium on Practical, Reliable, Low Cost Monitoring Methods for Assessing the Biota and Habitat Conditions of Coral Reefs, January 26-27, 1995. Office of Ocean and Coastal Resource Management, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD.
26. Crosby, M.P. and E.S. Reese. 1996. A Manual for Monitoring Coral Reefs With Indicator Species: Butterflyfishes as Indicators of Change on Indo Pacific Reefs. Office of Ocean and Coastal Resource Management, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD: 45 pp.
27. Done T., 1999. Coral Community Adaptability to Environmental Change at the Scales of Regions, Reefs and Reef Zones. From the Symposium Coral Reefs and Environmental Changes—Adaptation, Acclimation, or Extinction presented at the annual Meeting of the Society for Comparative and Integrative Biology. 3-7 January 1998. at Boston, Massachusetts. *American Zool.* 39: 66-79
28. Done T., 2001. Scientific Principles for Establishing MPAs to Alleviate Coral Bleaching and Promote Recovery. *Coral bleaching and Marine Protected Area*: 7 p.
29. Done T., Whetton P., Jones R., Berkelmans R., Lough J., Skirving W. and S. Wooldridge, 2003. Global Climate change and coral bleaching on the Great Barrier Reef. Queensland Government Department of Natural Resources and Mines, July 2003: 55 p.
30. Doney S.C., 2006a. The dangers of ocean acidification. *Scientific American*, vol. 294, n°3, March 2006: 1-9.
31. Doney S.C., 2006b. Plankton in a warmer world. *Nature*; vol 444, 7 Dec 2006: 695-696.
32. Douville E., Paterne M., Cabioch G., Isnard H., Chartier F., Bouman C., Juillet-Leclerc A. et N. Caillon, 2006. Abrupt pH Changes of sea Surface Waters in the sub-Equatorial Pacific Ocean at the end of the Younger Dryas (YD): MC-ICPMS Analysis of Boron Isotopes in Reef Corals. *Projet soumis*.
33. Duarte C.M., Borum J., Short F.T. and D.I. Walker, 2008. Seagrass ecosystem: their global status and prospects. *Aquatic Ecosystems*, ed. N. Polunin. Published by Cambridge University Press. ^a Foundation for Environmental Conservation 2008: 281-294.
34. Duke, N. C., Ball, M. C. and Ellison, J.C., 1998. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7, 27-47.
35. Duke N. C., P. Lawn, C.M. Roelfsema, S. Phinn, K.N. Zahmel, D. Pedersen, C. Harris, N. Steggles and C. Tack., 2003. Assessing historical change in coastal environments. *Port Curtis, Fitzroy River Estuary*

- and Moreton Bay regions. Historical Coastlines Project, Marine Botany Group, Centre for Marine Studies, The University of Queensland, Brisbane: 258 p + appendices.
36. Dupouy C., Minghelli-Roman A., Despinoy M., Röttgers R., Neveux J., Ouillon S., C. Pinazo C., and M. Petit, 2008. MODIS/Aqua chlorophyll monitoring of the New Caledonia lagoon: the VALHYBIO project. In Proceedings /SPIE-Asia Pacific Remote Sensing Conference/, Nouméa, 17-21 novembre 2008.
 37. Elvidge C.D., Dietz E.J.B., Berkelmans R., Adréfouët S., Skirving W., Strong A.E. and E.B. Tuttle, 2004. Satellite observation of Keppel Islands (Great Barrier Reef) 2002 coral bleaching using IKONOS data. *Coral Reefs* (2004) 23: 123–132.
 38. European Environment Agency, 2007. Climate change: the cost of inaction and the cost of adaptation. Copenhagen, EEA Technical report n°13/2007: 72 p.
 39. EPA, 2007. EPA's 2007 Report on the environment: Highlights of National Trends Peer review and public comment draft, august 2007 : 40 p.
 40. Fabricus K, Hoegh-Guldberg O., Johnson J., McCook L. and J. Lough, 2007. Vulnerability of coral reef in Great Barrier Reef to climate change. Chapter 17: 515-554. In *Climate Change and the Great Barrier Reef*, eds. Johnson JE and Marshall PA. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia.
 41. Feral J.P., 1998. Indicateurs de la biodiversité marine et côtière de la mer Méditerranée. 32p.
 42. Ferraris J. et G. Bouvet, 2002. Indicateurs et ressources vivantes en milieu corallien. Compte rendu de l'Atelier Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 22-26 juillet 2002: 52 p.
 43. Fisher W.S., 2007. Stony coral rapid bioassessment protocol. U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/R-06/167, july 2006 : 72 p.
 44. Fichez R., Adjeroud M., Bozec Y-M., Breau L., Chancerelle Y., Chevillon C ; Douillet P., Fernandez J-M., Frouin P., Kulbicki M., Moreton B., Ouillon S., Payri C., Perez T., Sasal P. and J. Thébault, 2005. A review of selected indicators of particle, nutrient and metal inputs in coral reef lagoon systems. *Aquat. Living Resour.* 18 : 125–147
 45. Frich P. Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A. M. G. and T. Peterson, 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Inter-Research Clim Res.* 19 : 193-212
 46. Gattuso J-P. and R. W Buddemeier, 2002. Coral Reefs: an Ecosystem Subject to Multiple Environmental Threats. In : *Encyclopedia of Global Environmental Change* (T. Mum Ed.), Volume 2, The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change : 232–241.
 47. GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques. Résumé à l'attention des décideurs. Contribution du groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : 22 p.
 48. GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Impacts, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'attention des décideurs. Contribution du groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : 20 p.
 49. GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : l'atténuation des changements climatiques. Résumé à l'attention des décideurs. Contribution du groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : 36 p.
 50. GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Synthèse. Résumé à l'attention des décideurs. Contribution du groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : 25 p.
 51. Gilman E., H. Van Lavieren, J. Ellison, V. Jungblut, L. Wilson, F. Areki, G. Brighthouse, J. Bungitak, E. Dus, M. Henry, I. Sauni Jr., M. Kilman, E. Matthews, N. Teariki-Ruatua, S. Tukia, K. Yuknavage. 2006.

- Pacific Island Mangroves in a Changing Climate and Rising Sea. UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 179. United Nations Environment Programme, Regional Seas Programme, Nairobi, KENYA: 70 p.
52. Gilman E., Ellison J., Duke N.C. and C. Field, in press. Threats to mangroves from climate change and adaptation options. *Aquat. Bot.* (2008): xxx-xxx.
53. GRBMPA, 2006. Great Barrier Reef Coral bleaching Response Plan 2006-07. Climate change response Programme: 34 p.
54. GRBMPA, 2007. Great Barrier Reef Climate Change Action Plan 2007-2011. 14 p.
55. Green, E.P. & Short, F.T., eds (2003) *World Atlas of Seagrasses*. Chapter 1. Global Overview. (p. 5-26). Berkeley, CA, USA: University of California Press: 286 pp. Disponible sur internet, moteur de recherche Google.
56. Hallock P., Barnes K'w. and E.M. Fisher, 2004. Multi-scale approach to environmental monitoring and risk assessment of coral reefs. *Environmental Micropaleontology, Microbiology and Meiobenthology*, 2004, Vol.1: 11-39.
57. Hallock P., Lidz B.H., Cockey-Burkhard E.M. and K.B. Donnelly, 2003. Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring: the foram index. *Environmental Monitoring and Assessment* 81: 221-238, 2003.
58. Hansen L., xxxx. Increasing the resistance and resilience of tropical marine ecosystems to climate change. IN WWF - Buying time: a user's manual for building resistance and resilience to climate change in natural systems. Chapter 6 tropical marine: 157-176.
59. Hardman-Mountford N.J., Allen J.I., Frost M.T., Hawkins S.J., Kendall M.A., Mieszkowska N., Richardson K.A and P.J. Somerfield, 2005. Diagnostic monitoring of a changing environment: An alternative UK perspective. *Marine Pollution Bulletin* 50 (2005) 1463-1471
60. Hardman-Mountford N.J. & J. M. Huthnance, 2006. The development of useful indicators for marine processes and climate (MPC) and underwater sound. Prepared for GOOS Action Group (GOOS-AG) of the Interagency Committee for Marine Science and Technology (IACMST), march 2006 : 97 p
61. Harvell CD, Mitchell CE, Ward JR, Altizer S, Dobson AP, Ostfeld RS, Samuel MD, 2002. Climate warming and disease risk for terrestrial and marine biota. *Science* 296:2158-2162
62. Healthy Reefs, 2005. Indicators of healthy reef.
63. Hendee J.C., 1998. An expert system for marine environmental monitoring in the Florida Keys National Marine Sanctuary and Florida Bay, Proceedings of the Second International Conference on Environmental Coastal Regions, ed. C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications/WIT Press, Southampton: 57-66.
64. Herrens Schmidt J.B., Juncker M., 2006. Revue bibliographique sur les indicateurs d'impacts des changements climatiques adaptés aux réalités du Pacifique Sud – Nouvelle-Calédonie, Wallis et Futuna, Polynésie Française. IRD Nouméa, Unité Espace : 92 p.
65. Hoegh-Gulberg O., 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Greenpeace, Mar. Freshwater Res.* 50: 839 -866.
66. Hoegh-Gulberg O., Mumby P.J., Hooten A.J., Steneck R.S., Greenfield P., Gomez E., Harvell C.D., Sale P.F., Edwards A.J., Caldeira K., Knowlton N., Eakin C.M. Iglesias-Prieto R., Muthiga N., Bradbury R.H., Dubi A. and M.E. Hatziolos, 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, volume 318, 14 dec 2007: 1737-1742.
67. Hoegh-Gulberg O., Anthony K., Berkemans R., Dove S., Fabricus K., Lough , Marshall P., Van Oppen M.J.H., Negri A., and Willis B., 2007. Vulnerability of reef-building corals on the Great Barrier Reef to climate change. Chapter 10: 271-308. In *Climate Change and the Great Barrier Reef*, eds.

- Johnson JE and Marshall PA. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia.
68. Hodgson G. and J. Liebeler, 2002. The global coral reef crisis – trends and solutions. Reef Check Foundation: 80 p.
69. IFRECOR Nouvelle-Calédonie, 2005. Etude de faisabilité de la méthode « Reef at Risk ». Rapport de stage Elodie Lédée : 43 p + annexes.
70. INSU, 2007. Les recherches françaises sur le changement climatique : 20 p.
71. ISRS, 2007. Coral Reefs and Ocean Acidification. Briefing Paper 5, International Society for Reef Studies, pp. 8.
72. Jameson S.C. and R.A. Kelty, 2004. A review of indicators of land-based pollution stress on coral reefs: 77 p.
73. Jameson S.C., Erdmann M.V., Gibson G.R. and Jr. and K.W. Potts, xxxx. Development of biological criteria for coral reef ecosystem assessment: 80 p.
74. Jupiter S.D., Potts D.C., Phinn S.R. & N.C. Duke, 2007. Natural and anthropogenic changes to mangrove distributions in the pioneer River Estuary (QLD, Australia). *Wetlands Ecol. Manage*; 15: 51-62.
75. Keeling, C.D., Bacastow, R.B. et T.P. Whorf, 1982. Measurements of the concentrations of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii. In Clark, W.C. (dir.). *Carbon Dioxide Review*, 1982, pp. 377–385. New York, Oxford University Press.
76. Kinzie III R.A., 1999. Sex, Symbiosis and Coral Reef Communities. *Amer. Zool.*, 39: 80-91.
77. Kleypas, J. A. *et al.*, 2006. Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research. Rep. of a workshop held 18-20 April 2005, 1-88, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S. Geological Survey
78. Kleypas J.A., Buddemeier R.W. and J-P Gattuso, 2001. The future of coral reefs in an age of global change. *Int. J. Earth Sciences* 90: 426-437.
79. Kushmaro A, Rosenberg E, Fine M, Ben Haim Y, Loya Y, 1998. Effects of temperature on bleaching of the coral *Oculina patagonica* by *Vibrio* AK-1. *Mar Ecol Prog Ser* 171:131-137
80. Lafferty K.D., and R.D. Holt, 2003. How should environmental stress affect the population dynamics of disease? *Ecology Letters*, 6: 654–664.
81. Levitus S., Antonov J. and T. Boyer, 2005. Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophysical Research Letters*, vol. 32, L02604: 4 p.
82. Levrel H., 2006. Biodiversité et développement durable : quels indicateurs ? Thèse pour l'obtention du titre de docteur de l'EHESS, spécialité Economie Ecologique, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales : 406 p.
83. Linton D.M. and G.F. Warner, 2003. Biological indicators in the Caribbean coastal zone and their role in integrated coastal management. *Ocean and Coastal management* 46 : 261-276.
84. Lovelock C.E. and J. Ellison, 2007. Vulnerability of mangroves and wetlands of the Great Barrier Reef. Chapter 9. p. 237-269. In *Climate Change and the Great Barrier Reef*, eds. Johnson JE and Marshall PA. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia.
85. Maes C., Vegas A. and J. Sudre, 2006. Hydroclimatic conditions in the southwest Pacific Ocean. *IN Payri et Richer de Forges* (Editeurs): *Copendium of marine species of New Caledonia*, IRD, Doc. Sc. Tech. II7 Volume special: 49-59.

-
86. Maitrepierre L., 2006. Impact du réchauffement global en Nouvelle-Calédonie. Météo-France Nouméa : 17 p.
 87. Manzello D.P., Berkelmans R., and J.C. Hendee, *in press*. Coral bleaching indices and thresholds for the Florida Reef Tract, Bahamas and St. Croix, US Virgins Islands., Mar. Pollut. Bull. xxx (2007) : xxx-xxx.
 88. Manzello D.P., Brandt M., Smith T.B., Lirman D., Hendee J.C. and R.S. Nemeth, 2007. Hurricanes benefit bleached corals. PNAS July 17, 2007, vol. 104 no. 29 : 12035 –12039.
 89. Manzello D.P., Hendee J.C., Ward D., and Hillis-Starr Z., 2006. An Evaluation of Environmental Parameters Coincident with the Partial Bleaching Event in St. Croix, U.S. Virgin Islands 2003. Submitted to ICERS.
 90. Marshall P. and H. Schuttenberg, 2006. A reef manager's guide to coral bleaching. GBRMPA and IUCN: 178 p.
 91. McClanahan T.R., Ateweberhan M., Muhando C.A., Maina J. and M.S. Mohammed, 2007. Effects of climate and seawater temperature variation on coral bleaching and mortality. Ecological Society of America, Ecological Monographs, 77(4): 503-525.
 92. McClanahan T.R., Ateweberhan M., Sebastian C.R., Graham N.A.J., Wilson S.K., Bruggemann J.H. and M.M.M Guillaume, 2007. Effects of climate and seawater temperature variation on coral bleaching and mortality. Predictability of coral bleaching from synoptic satellite and in situ temperature observations, Coral Reefs (2007) 26: 695–701.
 93. McClanahan T.R., Ateweberhan M., Graham N.A.J., Wilson S.K., Sebastian C.R., Guillaume M.M.M and J.H. Bruggemann, 2007. Western Indian Ocean coral communities: bleaching responses and susceptibility to extinction. Marine Ecology Progress series, vol. 337: 1-13.
 94. McClanahan T. R., Maina J., Moothien-Pillay R. and A. C. Baker, 2005. Effects of geography, taxa, water flow, and temperature variation on coral bleaching intensity in Mauritius; Mar Ecol Prog Ser 298 : 131–142.
 95. McKinnon A.D., Richardson A.J., Burford M.A. & M. J. Furnas, 2007. Vulnerability of Great Barrier Reef plankton to climate change. Chapter 6: 122-152. In Climate Change and the Great Barrier Reef, eds. Johnson JE and Marshall PA. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia.
 96. McLean R.F. and A. Tsyban, 2001. Coastal Zones and Marine Ecosystems. IPCC: 344-379.
 97. McLeod E. and R.V. Salm, 2006. Managing mangrove for resilience to climate change. IUCN, Switzerland: 64 p.
 98. Miller J., 2006. Coral bleaching and disease combine to cause extensive mortality on reefs in US Virgin Islands. Coral Reefs.
 99. Mimura, N., L. Nurse, R.F. McLean, J. Agard, L. Briguglio, P. Lefale, R. Payet and G. Sem, 2007: Small islands. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK : 687-716.
 100. Montaggioni L., 2007. Le réchauffement climatique et l'avenir des récifs coralliens. In : Coraux et récifs, archives du climat. Société Géologique de France, Editions Vuibert, collection « Interactions » : 249-287.
 101. Mumby P.J., Chisholm J.R.M., Edwards A.J., Clark C.D., Roark E.B., Andrefouet S. and J. Jaubert, 2001. Unprecedented bleaching-induced mortality in *Porites* spp; at Rangiroa Atoll, French Polynesia. Marine Biology 139: 183-189.

-
102. Munday P.L., Jones G.J., Sheaves M., Williams A.J. and G. Goby, 2007. Vulnerability of fishes of the Great Barrier Reef to climate change. Chapter 12: 357-392. In *Climate Change and the Great Barrier Reef*, eds. Johnson JE and Marshall PA. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia.
 103. Nicet J.B. and T. Delcroix, 2000. ENSO-related precipitation changes in New Caledonia, Southwestern Tropical Pacific: 1969-98. Notes and correspondence, august 2000: 6 p.
 104. Oliver J., Marshall P., Setiasih N., and L. Hansen, 2004. A global protocol for assessment and monitoring of coral bleaching. WFC-WWF Indonesia (eds). 50p.
 105. ONERC, 2007. Fiches Indicateurs ONERC. Disponibles sur le site : <http://onerc.org/listAllIndicators.jsf>
 106. Organisation Météorologique Mondiale, 2006. Nouvelles du climat mondial – Climat et petits états insulaires en développement. N°28, janvier 2006. 12 p.
 107. Ourbak T., Correge T., Malaize B., Le Cornec F., Charlier K. and J. P. Peypouquet, 2006. ENSO and interdecadal climate variability over the last century documented by geochemical records of two coral cores from the South West Pacific. *Advances in Geosciences*, 6: 23-27.
 108. Parker B.B., 1992. Sea level as indicator of climate and global change. Condensed paper from a paper published in *Marine Technology Society Journal*, Vol. 25, No. 4: 10 p.
 109. Perks H., xxxx. Future effects of climate change on Coral reefs and mangroves in South Asia: 167-175.
 110. Pittock A.B., 1999. Coral reefs and environmental change: Adaptation to what? *Amer. Zool.* 39 : 10-29.
 111. Precht W.F. and R.B. Aronson, 2004. Climate flickers and range shifts of reef corals. *The Ecological Society of America, Review*: 307-314.
 112. Raymundo L.J., Couch C.S. and C.D. Harvell, 2008. Coral disease handbook: Guidelines for assessment, monitoring and management. CRTR (ed.) ISBN 9781921317019. 131p.
 113. Rice J., 2003; Environmental health indicators. *Ocean and Coastal management* 46: 235-259.
 114. Royer J.F., xxxx. Simulations des changements climatiques et de leurs impacts dans le Pacifique. *Equipe Dynamique du Climat de CNRM*: 22-28.
 115. Saintilan N. and K. Rogers, 2006. Coastal wetlands elevation trends in Southeast Australia. In Gilman E. (Ed.) - *Proceedings of the Symposium on mangrove responses to relative sea level rise and other climate change effects*, 13 july 2006. Western Pacific regional Fishery Management Council in cooperation with SPREP and UNEP, Cairns, Australia, 9-14 july 2006 : 42-55.
 116. Sammarco P.W., Hallock, P., Lang, J.C. and R. S. LeGore, 2007. Roundtable Discussion Groups Summary Papers : Environmental Bio-Indicators in Coral Reef Ecosystems: The Need to Align Research, Monitoring, and Environmental Regulation', *Environmental Bioindicators*, 2:1 : 35 - 46
 117. Sheaves M., Brodie J., Brooke B. Dale P., Lovelock C., Waycott M., Gehrke P., Johnston R. and R. Baker, 2007. Vulnerability of coastal and estuarine habitats in the Great Barrier Reef to climate change. *GBRMPA, part III chap. 19*: 593-620.
 118. Short F.T. and H.A. Neckles, 1999. The effects of global climate change on seagrasses. *Aquatic Botany* 63: 169-196.
 119. Strong A.E., Liu G., Kimura T., Yamano H., Tsuchiya M., Kakuma S. and R. Van Woesik, xxxx. Detecting and monitoring 2001 coral reef bleaching events in Ryukyu Islands, Japan, using satellite bleaching hotspot remote sensing technique 3 p.
 120. Tribollet A., Atkinson M.J. and C. Langdon, 2006. Effects of elevated pCO₂ on epilithic and endolithic metabolism of reef carbonates. *Global Change Biology* 12: 2200-2208.

-
121. Tribollet A., Atkinson M., and Langdon C. (2008) Carbonate dissolution by euendolithic microorganisms increases with rising pCO₂. 11th Int. Coral Reef Symp. Florida, USA.
 122. Tribollet A. (2008) The boring microflora in modern coral reefs: a review of its roles. Wisshak M, Tapanila L (eds) Current Developments in Bioerosion. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 67-94
 123. Tribollet A, Godinot C, Atkinson M, and Langdon C (in press) Effects of elevated pCO₂ on dissolution of coral carbonates by microbial euendoliths. *Global Biogeochem. Cycles*
 124. Turner J., 2000. Initial considerations on methods to survey reef status and recovery: 4 p.
 125. Waycott M., Collier C., McMahon K., Ralph P., McKenzie L., Udy J. and Grech A., 2008. Vulnerability of seagrass in the Great Barrier Reef to climate change. Chapter 8: 193-239. In Climate Change and the Great Barrier Reef, eds. Johnson JE and Marshall PA. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia.
 126. Wilkinson C. and J. Hill, 2004. Methods for ecological monitoring of coral reefs: a resource for managers. AIMS (ed.) ISBN 0642322376. 123p.
 127. Willis B., Page C.A., and E.A. Dinsdale, 2004. Coral diseases on the Great Barrier Reef. p. 69-104.
 128. World Heritage Centre, 2006. Predicting and managing the effects of climate change on world heritage. Joint report from the WHC, its advisory bodies and a broad group of experts to the 30th session of World heritage Committee, Vilnius 2006: 38 p.
 129. Yamano H. and M. Tamura, 2004. Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing: simulation and data analysis. Remote sensing of Environment 90: 86-103.

11 ANNEXES

Annexe 1. Questionnaire (version française)

Annexe 2. Questionnaire (version anglaise)

Annexe 3. CR de la réunion intermédiaire du 11 juin 2008

Annexe 4. Les programmes sur le changement climatique existants – Focus sur la région Pacifique

Annexe 5. Programme de la Barbade

Annexe 6. *Island Climate Update* (février 2008)

ANNEXE 1 - QUESTIONNAIRE SUR LES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

1. Quelles sont les caractéristiques essentielles d'un indicateur du changement climatique ?
2. Quels sont selon vous des indicateurs d'état du changement climatique ?
3. Quels sont selon vous des indicateurs de réponse sur les écosystèmes marins tropicaux (récifs, mangroves, herbiers) et/ou paramètres physico-chimiques de l'eau de mer ?
4. Pour chaque indicateur pouvez-vous fournir :
 - a. Une brève description de sa réaction au changement climatique
 - b. Une échelle de temps minimale sur laquelle se baser pour voir une évolution de l'indicateur (durée minimale de suivi) et la fréquence à laquelle cet indicateur devrait être suivi
 - c. Une brève description de la méthode à employer et/ou de l'instrumentation à mettre en place pour suivre l'indicateur
5. Parmi les indicateurs cités ci-dessus, quels sont selon vous ceux qui sont prêts à être utilisés et ceux qui nécessitent encore des recherches ?
6. Selon votre connaissance de la zone Indo-Pacifique, pensez-vous que les indicateurs cités en 5. soient applicables en Nouvelle-Calédonie ?
7. Quels seraient les indicateurs qu'il conviendrait de développer dans le futur ? et pourquoi ?
8. Pouvez-vous nous fournir des références bibliographiques sur les exemples que vous avez cités ?

ANNEXE 2 - QUESTIONNAIRE ON CLIMATE CHANGE INDICATORS

1. What are the essential characteristics of an indicator of climate change?
2. Given the definition above, what are *state indicators* of climate change?
3. Given the definition above, what are *response indicators* to climate change on tropical marine ecosystems (reefs, mangroves, seagrass beds) and/or seawater physical, chemical and biological parameters?
4. For each indicator cited in 2. & 3., could you provide:
 - a. A brief description of its reaction to climate change
 - b. The minimum time-scale at which we should monitor the indicator to see a change in its state (minimum duration of monitoring) and the frequency at which the indicator should be monitored.
 - c. A brief description of the method and/or instrumentation to implement to monitor the indicator.
5. Among the indicators cited 2. & 3., which are the ones that are readily applicable? And which ones need further research to be implemented?
6. Owing your knowledge about the Indo-Pacific region, do you think that the indicators cited in 5. are applicable in New Caledonia, where none major bleaching event have been documented?
7. To your mind, which state or response indicators should be developed in the future? And why? Which area of expertise in this field needs further research?
8. Could you please provide scientific or technical references on the examples you cited?

ANNEXE 3 – COMPTE RENDU DE LA REUNION INTERMEDIAIRE DU 11 JUIN 2008

Ont participé à cette réunion, dans l'ordre alphabétique :

- Monsieur Jean-Claude ANGUE, Chargé de Mission Recherche et Technologies au HAUT-COMMISSARIAT DE LA REPUBLIQUE ;
- Monsieur Pablo CHAVANCE, ADECAL, Ingénieur halieute du programme ZoNéCo ;
- Monsieur Nathaniel CORNUET, Responsable de la filière pêche, Direction du Développement Economique et de l'Environnement de la Province NORD ;
- Monsieur Emmanuel COUTURES, Responsable Environnement Marin à la Direction de l'Environnement de la Province SUD ;
- Monsieur François DEVINCK, Chargé de mission Patrimoine Mondial - Province SUD ;
- Monsieur Régis ETAIX-BONNIN, du Service de la Marine Marchande et des Pêches Maritimes ;
- Monsieur Richard FARMAN, Directeur de l'Aquarium des lagons de Nouvelle-Calédonie et coordinateur scientifique du Programme ZoNéCo ;
- Madame Marie GAYRAUD, directrice de SOPRONER Ingénierie ;
- Monsieur Frédéric GUILLARD, de la Direction des Technologies et des Services de l'Information ;
- Mademoiselle Sandrine JOB, ingénieur environnement, consultante auprès de SOPRONER Ingénierie ;
- Monsieur Adrien RIVATON, Chargé de mission à l'ADECAL ;
- Mademoiselle Sabrina VIRLY, ingénieur halieute, consultante auprès de SOPRONER Ingénierie ;

Etaient absents, excusés

- Mlle Marjorie WEJIEME, Service de l'Environnement et de l'Energie – PROVINCE DES ILES LOYAUTES ;

I. En préambule, il a été précisé ce qui suit :

La finalité de cette étude « Proposition d'indicateurs et de protocoles associés pour le suivi de l'évolution de l'état de santé des zones récifo-lagonaires face au changement climatique » financée dans le cadre du programme ZoNéCo 2007 est de pouvoir mettre en place une démarche de suivi à long terme de l'état de santé des zones récifo-lagonaires de Nouvelle-Calédonie face au changement climatique, sur la base d'indicateurs et de protocoles associés qui auront été sélectionnés consensuellement par les gestionnaires et les scientifiques.

Cette réunion a pour but de présenter l'état d'avancement de l'opération et de sélectionner, avec les gestionnaires des collectivités locales, une liste restreinte et pertinente d'indicateurs de réaction aux changements climatiques, pour lesquels les prestataires proposeront des protocoles et des méthodes de suivi pour la NC. Pour cela, un travail important d'analyse bibliographique et de consultation d'experts scientifiques locaux et internationaux a permis de dresser une large liste d'indicateurs, pour servir de base aux discussions en séance.

Il a en conséquence été précisé à certains collègues et partenaires scientifiques, impliqués dans cette thématique, et consultés en tant qu'experts par les prestataires, que leur présence était souhaitée d'avantage pour la restitution finale que pour cette étape intermédiaire. Ils seront cependant destinataires des points d'avancement afin que les différentes initiatives sur la thématique du changement climatique puissent être menées autant que possible de manière concertée.

II. Présentation des prestataires

Les prestataires présentent les premiers résultats de cette étude, consignés dans un rapport intermédiaire préalablement envoyé à ZoNéCo et aux gestionnaires concernés par cette opération. La présentation est réalisée à l'aide du logiciel PowerPoint, dont les diapositives sont jointes en Annexe.

La présentation couvre les différents aspects suivants :

- Introduction : contexte et objectifs de l'étude, plan du rapport intermédiaire ;
- Présentation de la démarche méthodologique mise en œuvre dans le cadre de l'étude ;
- Définition de la notion d'indicateur, de ses caractéristiques, de son rôle dans le cas présent et de son applicabilité ;
- Etat des connaissances sur le changement climatique global dans le monde, et particulièrement en Nouvelle-Calédonie ;
- Etat des connaissances relatif aux effets du changement climatique global sur les écosystèmes récifo-lagonaires dans le monde ;
- Présentation succincte d'indicateurs de pression et d'indicateurs de réaction, comme base de réflexion lors de la restitution orale du présent rapport au comité ZoNéCo.

III. Réponses, attentes et commentaires du comité ZoNéCo et des gestionnaires

Sont listés ici les remarques et commentaires émis en séance par les participants. Ces différents points seront pris en compte par les prestataires pour la préparation du document final.

- Dans le rapport final, il faudrait préciser la durée minimale de suivi de chaque indicateur afin qu'il donne une indication fiable.
- Pour les indicateurs de pression, il serait judicieux de séparer les indicateurs lagonaires des indicateurs océaniques et de préciser plus en détail les sources des données (Météo France, SHOM, etc.).
- La modification des courants océanique est elle citée par le GIEC et autres experts comme un effet du changement climatique ? Il serait bien de rajouter un paragraphe à ce sujet dans le rapport final.
- Le problème de la consultation des métadonnées climatiques et océaniques acquises par l'IRD est abordé. Le CMRT compte proposer une réunion impliquant l'IRD afin de clarifier les rôles de chacun et résoudre ce problème.
- Pour le taux de CO₂ dans l'atmosphère, il n'apparaît pas utile de le mesurer en NC compte tenu de l'existence d'une station de mesure à Hawaï qui fournit des informations sur le Pacifique.
- Les prestataires doivent se renseigner auprès du MOP et des Phares et Balises des données acquises sur la Nouvelle-Calédonie sur l'élévation du niveau de la mer.
- Attention à ne sélectionner que des indicateurs qui soient reconnus au niveau scientifique internationalement, connus et déjà validés.
- Préciser, dans le tableau synthétique 3 (paramètres caractérisant le changement climatique), les références justifiant le choix des paramètres de même que la source des mesures de l'évolution de ce paramètre quand elles existent.
- En complément de la description d'indicateurs et de leurs protocoles de suivi associés, il est demandé aux prestataires de réfléchir sur les indicateurs qu'il conviendrait de

développer dans le futur, dans le contexte de la Nouvelle-Calédonie, en proposant des pistes de réflexion sur des recherches à développer.

IV. Indicateurs de réactions sélectionnés à l'issue du processus de consultation

Pour chaque type d'habitat (récifs ; herbiers ; mangroves ; plancton (colonne d'eau) et pour différents paramètres caractérisant le changement climatique, sont présentés une liste d'indicateurs de réaction potentiels.

Sur la base notamment de leur validité scientifique (déjà validé ou en cours), de leur applicabilité à la NC et aux réseaux de mesures et informations déjà existantes en NC, les participants (principalement les gestionnaires des différentes collectivités locales) ont sélectionné une liste restreinte d'indicateurs pertinents, sur lesquels les prestataires entameront un travail approfondi relatif à leurs méthodes de suivi.

Les indicateurs de réaction sélectionnés sont présentés ci-après par type d'habitat.

Au niveau des récifs coralliens :

- Indice de blanchiment / blanchissement en rapport avec l'augmentation de la température ou la dessalure
- Occurrence de maladies coralliennes (sous réserve que suffisamment de données puissent être obtenues sur cette thématique, dans la bibliographie ou après consultation d'experts) en rapport avec l'augmentation de la température, de la dessalure ou de la hausse du niveau de la mer (érosion côtière)
- Densité du squelette calcaire en réponse à l'acidification des océans

Au niveau des herbiers :

- Extension géographique des herbiers en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau – sur ce point les prestataires doivent se renseigner sur l'étude en cours menée par Claude PAYRI

Au niveau des mangroves :

- Position géographique des mangroves en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau
- Wetland Cover Index : ratio tannes/superficie totale des formations en rapport avec la variation des précipitations
- Positionnement des marges terrestres et maritimes en rapport avec la hausse du niveau de la mer
- Positionnement du trait de côte en rapport avec la hausse du niveau de la mer

Au niveau du plancton :

- Concentration en chlorophylle lagonaire en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau
- Ratio pico/microplancton en rapport avec l'augmentation de la température de l'eau, de la variation des précipitations et de l'activité cyclonique

Sur la base de cette liste, le travail des prestataires va se poursuivre en vue d'une restitution du rapport final au mois de Septembre 2008. A cette restitution finale seront conviés les partenaires scientifiques du programme et les experts locaux consultés dans le cadre de ce travail.

Clôture de la réunion à 12h.

ANNEXE 4 - LES PROGRAMMES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EXISTANTS : FOCUS SUR LA REGION PACIFIQUE

Pour répondre aux attentes et spécificités des petits états insulaires, la communauté internationale a adopté en 1994 le Programme d'Action de la Barbade pour le développement durable des petits états insulaires en développement (PEID) (Annexe 5). Dans le domaine du climat, ce dernier préconise la création de programmes et de projets d'échelle régionale (ou le renforcement de ceux qui existent déjà) destinés, d'une part, à contrôler et à améliorer les moyens de prévision concernant l'évolution et la variabilité du climat et l'élévation du niveau de la mer et, d'autre part, à évaluer les incidences des changements climatiques sur les ressources marines, les ressources en eau douce et la production agricole. Dans ce sens, la communauté internationale encourage vivement les actions en faveur de PEID visant à développer des systèmes de recherche, de surveillance, de levé topographique, de collecte de données et d'évaluation pour toutes les questions d'intérêt essentiel comme le rôle des océans dans la régulation du système climatique, les variations du niveau de la mer ou l'intrusion d'eau salée dans les réserves d'eau douce. Les engagements pris à la Barbade ont été renouvelés à la conférence de Maurice en 2005 lors de l'examen décennal de la mise en œuvre du Programme d'Action (OMM, 2006).

Depuis, un certain nombre de projets ont vu le jour, parmi lesquels le Island Climate Update (www.niwasience.co.nz/ncc/icu), un bulletin climatologique régional mensuel qui donne une vue d'ensemble du climat actuel dans chaque île du Pacifique Sud, avec l'évolution probable pour les mois à venir (un exemple est fourni en Annexe 6), le projet du Système Mondial d'Observation du Climat (SMOC) pour les îles du Pacifique (www.pigcos.org) et le Projet de prévision climatique pour les îles du Pacifique (www.bom.gov.au/climate/picpp/). Le Pacific ENSO Applications Centre mis en place par le Service météorologique national relevant de l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA) (lumahai.soest.hawaii.edu/Enso/index.html) fournit des informations et des prévisions climatologiques pour les PEID et les territoires ayant des liens avec les États-Unis d'Amérique.

SYSTEME MONDIAL D'OBSERVATION DU CLIMAT POUR LES ILES DU PACIFIQUE (PI-GCOS)

Le Système Mondial d'Observation du Climat (SMOC) pour les îles du Pacifique (PI-GCOS), a été initié en 2000 à Apia, Samoa. Il s'agit d'une collaboration entre le programme GCOS (Global Climate Observing System, ou SMOC en français, Système Mondial d'Observation du Climat) déjà existant depuis 1992 et SPREP (South Pacific Regional Environment Programme). PI-GCOS a pour finalité de développer un système d'observation du climat et de la variabilité climatique en rapport avec les besoins de la région Pacifique. Le programme GCOS, financé par l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO), la Commission Intergouvernementale Océanographique de l'UNESCO (IOC), le Programme Environnement des Nations Unies (UNEP) et le Conseil International des Sciences (ICSU), a pour finalité de s'assurer que toutes les observations et informations relatives au changement climatique soient obtenues et accessibles aux différents utilisateurs (communauté scientifique, populations locales, gouvernements, etc.). Ainsi, le GCOS a pour but de développer un système opérationnel basé sur les utilisateurs, capable de fournir des observations compréhensibles sur tous les domaines touchant le suivi du système climatique. Cela implique notamment la détection et l'attribution des causes du changement climatique afin d'évaluer les impacts de la variabilité climatique et de soutenir les recherches pour une meilleure compréhension des phénomènes, leur modélisation et leur prédiction. Le GCOS focalise sur les mesures *in situ*, les observations par satellite étant souvent insuffisantes pour comprendre la

totalité des phénomènes, notamment au niveau régional. De plus certaines données ne peuvent être mesurées par satellite : la biodiversité, les ressources en eau dans les sols, la séquestration du carbone, etc.

SOUTH PACIFIC SEA LEVEL & CLIMATE MONITORING PROJECT (SPSLCMP)

En réponse aux inquiétudes des petites îles du Pacifique, concernant en particulier l'élévation du niveau de la mer et les changements climatiques, le gouvernement australien a lancé un programme de suivi de l'évolution du niveau de la mer dans les îles du Pacifique, identique à celui mené sur les côtes australiennes : il s'agit du projet SPSLCMP (South Pacific Sea Level & Climate Monitoring Project). Ce projet est financé par l'organisme australien d'aide aux pays en développement AusAID. Ainsi, une douzaine d'îles du Pacifique ont été dotées d'un système instrumental appelé SEAFRAME (Sea Level Fine Resolution Acoustic Measuring Equipment) permettant de mesurer les paramètres suivants : le niveau de la mer, la température de l'eau et de l'air, la direction et vitesse du vent, la pression atmosphérique. Les stations ont été installées dans les pays suivants : les îles Cook, les états fédérés de Micronésie, Fidji, Kiribati, les îles Marshall, Nauru, la Papouasie Nouvelle-Guinée, Samoa, les îles Salomon, Tonga, Tuvalu et Vanuatu. La grande majorité des stations sont opérationnelles depuis 1994, seule la station de Micronésie a été installée en 2001. Chaque station a été couplée avec un système de mesure du mouvement vertical des plaques terrestres (CGPS - Continuous Global Positioning System) afin de pouvoir appréhender de manière précise et fiable l'évolution nette du niveau de la mer.

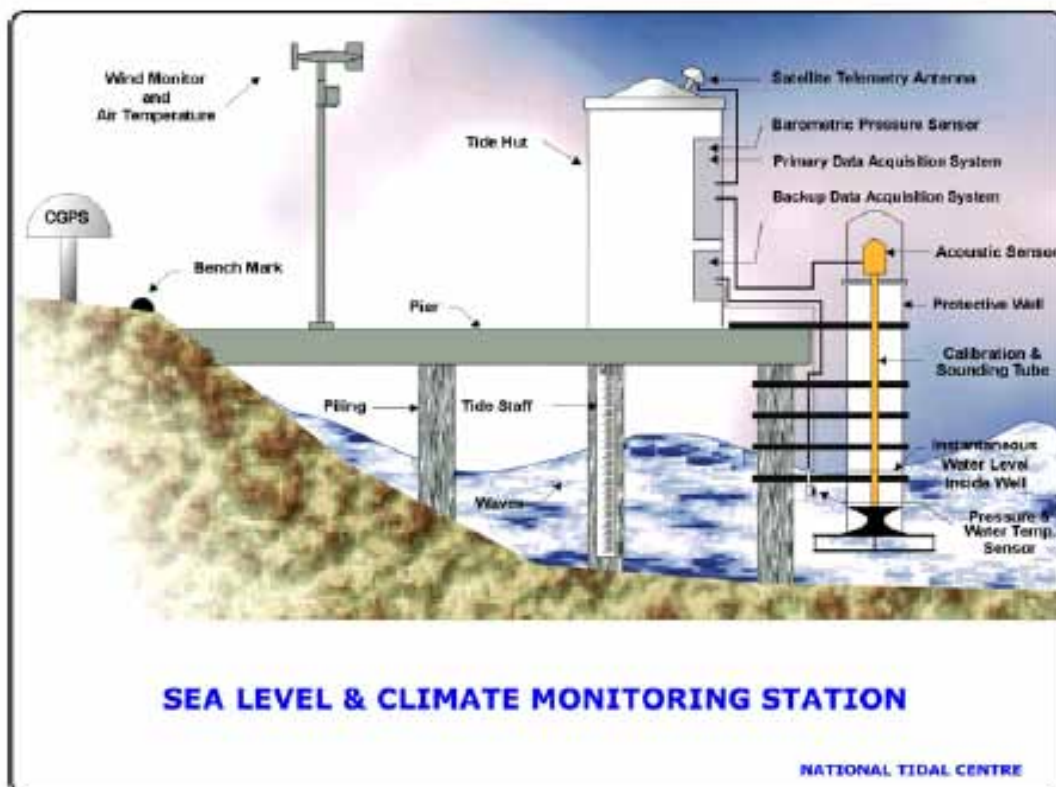
Les données issues des stations de mesure sont envoyées par satellite au bureau de météorologie australien, où elles sont traitées et analysées puis communiquées aux pays insulaires et au large public sous la forme de rapports mensuels ou annuels. Les données brutes horaires ne sont accessibles qu'à un certain nombre d'utilisateurs restreint ou sur requête spécifique. La SOPAC contribue à ce projet en tant que coordinateur local auprès des différentes îles du Pacifique concernées.

Les données issues de ce projet sont particulièrement utiles pour évaluer la variabilité climatique et le changement climatique dans les îles du Pacifique, permettant de dégager des tendances au niveau local (sur chacune des îles) mais également au niveau régional (sur l'ensemble du Pacifique Sud).

Pour l'heure il semble que ces données ne soient utilisées que pour produire des systèmes d'alerte d'ordre climatologique (avis de tempêtes, tsunamis, etc.). D'après discussion avec le coordinateur local du projet à la SOPAC, M. Andrick Lal, aucune de ces données n'a pour l'instant été utilisée pour produire des signaux d'alerte liés à l'état de santé des récifs.



Pays participant au réseau SPSLCMP, dans lesquels des systèmes de mesure SEAFRAME et CGPS ont été installés
(Source : <http://www.bom.gov.au/pacificsealevel/technologies.shtml>).



Positionnement des stations de suivi du niveau de la mer et du climat dans le cadre du projet South Pacific Sea Level and Climate Monitoring.

ANNEXE 5 - PROGRAMME DE LA BARBADE



En 1992, à la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, la communauté mondiale a adopté le programme Action 21. Ce programme reflète un consensus mondial et un engagement politique au niveau le plus élevé sur la coopération en matière de développement et d'environnement. La coopération de tous les États est en effet indispensable pour la réalisation des objectifs énoncés dans l'Action 21. Elle doit tenir compte des situations et des vulnérabilités particulières des différents pays en s'exprimant selon des modalités appropriées.

La Conférence mondiale sur le développement durable des petits États insulaires en développement est la première conférence mondiale sur le développement durable et l'application d'Action 21. Action 21 représente un document de synthèse ayant fait l'objet de négociations délicates et devrait être considéré comme un tout chaque fois qu'il en est question dans le présent programme d'action.

La Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement affirme que les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Les actions entreprises en faveur du développement dans les petits États insulaires en développement devraient être définies en corrélation avec les besoins et les aspirations des êtres humains d'une part et les responsabilités qu'ils ont à assumer à l'égard des générations présentes et futures d'autre part. Les petits États insulaires en développement possèdent de précieuses ressources, notamment les océans, les littoraux, la diversité biologique et surtout les ressources humaines. Ce potentiel est connu, mais la difficulté pour les petits États insulaires en développement est de faire en sorte qu'il soit exploité de manière viable pour le bien-être des générations présentes et futures. Outre qu'ils se trouvent en butte à des difficultés économiques et confrontés à des impératifs de développement analogues à ceux des pays en développement en général, les petits États insulaires en développement possèdent des vulnérabilités et des caractéristiques qui leur sont propres, et qui rendent particulièrement graves et complexes les obstacles auxquels ils se heurtent lorsqu'ils cherchent à assurer un développement durable.

Des dimensions réduites entraînent bien des inconvénients, exacerbés par le fait que nombre d'États insulaires, non seulement sont petits, mais sont eux-mêmes composés d'un certain nombre d'îlots. Parmi ces inconvénients, on peut citer une gamme limitée de ressources, ce qui oblige à une spécialisation trop poussée; une dépendance excessive par rapport au commerce international et de ce fait la vulnérabilité face aux événements mondiaux; une forte densité démographique, ce qui accroît la pression sur les ressources déjà réduites; la surutilisation des ressources et leur épuisement prématuré; des complexes hydrographiques relativement limités et des ressources en eau douce vulnérables; une administration publique et une infrastructure (y compris transports et communications) coûteuses; et des capacités institutionnelles et des marchés intérieurs limités, trop réduits pour permettre de bonnes économies d'échelle, alors que le faible volume des exportations, en provenance parfois de points éloignés, entraîne des coûts de fret élevés et une réduction de la compétitivité. Les petites îles tendent à avoir des degrés d'endémisme et des niveaux de biodiversité élevés mais, en raison de la population relativement réduite de chaque espèce, les risques d'extinction sont élevés et des mesures de protection s'imposent.

Du fait des dimensions réduites des petits États insulaires en développement, développement et environnement sont étroitement liés et interdépendants. On trouve dans l'histoire récente de l'humanité des cas où des îles entières sont devenues inhabitables parce que leur environnement a été détruit à cause de facteurs externes; les petits États insulaires en développement sont pleinement conscients du fait que les conséquences écologiques d'un développement mal conçu peuvent avoir des effets catastrophiques. Un développement non viable menace non seulement le gagne-pain de la population, mais les îles elles-mêmes et les cultures qu'elles rendent possibles. Le changement climatique, la variabilité climatologique et l'élévation du niveau de la mer sont autant de problèmes gravement préoccupants. De même, l'exploitation à grande échelle des ressources marines et terrestres menace les ressources biologiques dont sont tributaires les petits États insulaires en développement.

Nombre de petits États insulaires en développement sont, en totalité ou en grande partie, des entités côtières. Étant donné les dimensions réduites, l'isolement et la fragilité des écosystèmes insulaires, la diversité biologique pour laquelle ils sont si connus est parmi l'une des plus menacées du monde. Cela exige que, lorsque l'on cherche à assurer le développement, on accorde une attention particulière à la protection de l'environnement et aux moyens de subsistance des populations. Cela exige aussi une gestion intégrée des ressources.

Dans certains petits États insulaires en développement, le taux de croissance démographique dépasse le taux de croissance économique, ce qui exerce une pression grave et croissante sur la capacité de ces pays à assurer les services de base à leurs populations et impose en particulier une lourde charge aux femmes

qui dirigent des ménages. Bien que leur densité démographique soit parfois élevée, les petits États insulaires en développement ont souvent une population réduite en termes absolus, insuffisante pour réaliser des économies d'échelle dans plusieurs domaines, et donc des possibilités assez limitées de faire plein usage de certaines connaissances spécialisées. La migration, surtout de ressources humaines qualifiées, est très forte, ce qui non seulement grève lourdement les établissements de formation, mais en outre force ces États à importer à grands frais des connaissances de l'étranger.

Du fait qu'il n'est guère possible de réaliser des économies d'échelle et que leur base de ressources est limitée, la production totale des petits États insulaires en développement se réduit souvent à une gamme étroite de cultures, de minéraux et d'industries dans le secteur manufacturier et dans celui des services. Tout fait préjudiciable qui se produirait concernant ces secteurs de production, que ce soit en raison des facteurs du marché ou de contraintes naturelles ou écologiques, risque de provoquer de fortes réductions de la production, une chute des recettes en devises et une augmentation du chômage.

En partie du fait de leurs dimensions réduites et en partie du fait de leur vulnérabilité face aux catastrophes naturelles et écologiques, on classe la plupart des petits États insulaires en développement parmi les entités à risque élevé, le résultat étant qu'ils ne peuvent pas obtenir d'assurance ou de réassurance, ou alors à des prix exorbitants, et que cela à son tour affecte négativement les investissements, les coûts de production, les finances publiques et l'infrastructure.

Du fait que le revenu par habitant des petits États insulaires en développement tend à être plus élevé que celui des pays en développement en tant que groupe, leur accès aux ressources à des conditions privilégiées a tendance à être limité. Mais l'analyse de la performance économique de ces États montre que les revenus courants sont souvent le fait d'envois de fonds de travailleurs migrants, de l'accès préférentiel au marché de certaines exportations importantes et de l'assistance de la communauté internationale. Ces sources ne sont ni endogènes ni sûres. En outre, les revenus n'ont généralement pas été stables dans le temps : les catastrophes naturelles ou causées par l'homme, les difficultés dont pâtissent certains produits sur le marché international et la récession dans certains pays développés réduisent souvent considérablement les revenus des petits États insulaires en développement, réduction allant parfois jusqu'à 20 ou 30 % du produit intérieur brut (PIB) en une seule année.

Comme les possibilités de développement des petits États insulaires en développement sont limitées, la planification et la réalisation du développement durable leur posent des problèmes particuliers. Pour les résoudre, les ressources humaines constituent leur atout le plus précieux. Il faut leur donner la possibilité de réaliser pleinement leur potentiel et de contribuer de manière significative au

développement national, régional et international conformément aux dispositions de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement et d'Action 21. Les petits États insulaires en développement auront beaucoup de mal à surmonter leurs difficultés sans la coopération et l'aide de la communauté internationale. Leur développement durable exige des mesures qui tiennent compte des contraintes au développement citées ci-dessus. Il faudrait notamment tenir compte des considérations environnementales, des objectifs de conservation des ressources naturelles et des aspects liés aux rôles respectifs des hommes et des femmes, conformément aux dispositions de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement et d'Action 21, lorsqu'on élabore des politiques de développement économique et social dans le cadre des programmes de coopération internationale, régionale, sous-régionale et/ou bilatérale touchant les îles.

Dans les petits États insulaires en développement, il faudrait pleinement reconnaître la contribution essentielle des femmes au développement durable et l'importance du rôle des jeunes pour le succès à long terme d'Action 21. Par conséquent, les jeunes devraient être encouragés à contribuer au processus de prise de décisions et il faudrait éliminer tous les obstacles qui empêchent les femmes de contribuer, sur un pied d'égalité, à ce processus afin de permettre aux jeunes comme aux femmes de participer au développement durable des sociétés auxquelles ils appartiennent et d'en partager les fruits.

Les petits États insulaires en développement partagent la même aspiration au développement économique et à un meilleur niveau de vie, et sont décidés à ne pas laisser la recherche des avantages matériels saper leurs valeurs sociales, religieuses et culturelles ou causer un dommage permanent à leurs populations ou aux ressources terrestres et marines qui, pendant des siècles, ont permis aux îles de vivre. Dans Action 21, la communauté internationale s'est engagée à :

- (a) Adopter des plans et programmes qui contribuent au développement durable des petits États insulaires en développement et à l'utilisation de leurs ressources marines et côtières en préservant leur biodiversité ainsi qu'en répondant aux besoins essentiels des peuples insulaires et en améliorant la qualité de leur vie;
- (b) Adopter des mesures qui permettent aux petits États insulaires en développement de faire face aux changements écologiques de façon efficace, novatrice et durable, ainsi que d'en tempérer les effets et de réduire les menaces qui pèsent sur les ressources côtières et marines.

Ces engagements ont été par la suite incorporés dans la résolution 47/189 de l'Assemblée générale, en date du 22 décembre 1992, qui demandait la convocation d'une conférence mondiale sur le développement durable des petits États insulaires en développement.

chapitre 33 d'Action 21 et adopter des mesures de renforcement des capacités endogènes, en particulier pour valoriser les ressources humaines et promouvoir l'accès des petits États insulaires en développement à des techniques écologiquement rationnelles et à rendement énergétique élevé pour leur développement durable. Dans ce contexte, les organisations non gouvernementales et autres groupes importants devraient participer pleinement aux activités.

Le Programme d'action définit les domaines prioritaires et indique les mesures précises qu'il y a lieu de prendre pour faire face aux problèmes particuliers que rencontrent les petits États insulaires en développement. Pour appliquer ces mesures, on a identifié plusieurs domaines d'intervention intersectoriels, notamment le renforcement des capacités, y compris la mise en valeur des ressources humaines; le développement institutionnel aux niveaux national, régional et international; la coopération en matière de transfert de technologies écologiquement rationnelles; la diversification du commerce et de l'économie; et les finances.

En établissant la base d'un nouveau partenariat mondial pour le développement durable, les États ont reconnu qu'ils avaient des responsabilités communes mais différenciées dans la dégradation de l'environnement mondial comme on l'a énoncé dans le Principe 7 de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement. Le Principe 6 stipule que la situation et les besoins particuliers des pays en développement, en particulier des pays les moins avancés et des pays les plus vulnérables sur le plan de l'environnement, doivent se voir accorder une priorité spéciale. Aux termes de la section G du chapitre 17 d'Action 21, on reconnaît que les petits États insulaires en développement, de même que les îles sur lesquelles vivent de petites collectivités, constituent un cas particulier du point de vue tant de l'environnement que du développement, car ils sont écologiquement fragiles et vulnérables et que leur faible étendue, leurs ressources limitées, leur dispersion géographique et leur éloignement des marchés sont autant de handicaps économiques et empêchent les économies d'échelle.

Tel est le contexte dans lequel le présent programme d'action aborde les difficultés et obstacles particuliers auxquels doivent faire face les petits États insulaires en développement. Du fait que le développement durable est un processus et non pas un phénomène, le Programme se concentre sur les prochaines mesures que l'on pourra prendre sur la voie générale du développement durable, voie qui suivra les principes approuvés par les gouvernements lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement. Le Programme d'action contient une vue d'ensemble des mesures et politiques qui devraient être appliquées à court, à moyen et à long terme. Les rapports des réunions techniques régionales, organisées dans le cadre des préparatifs de la Conférence mondiale, demeurent un important point de référence puisqu'ils contiennent un large ensemble de mesures recommandées pour la réalisation du développement durable dans les petits États insulaires en développement.

Le Programme donne la base de l'action à entreprendre au titre de 14 domaines prioritaires agréés et définit un certain nombre de mesures et de politiques liées à la planification des activités environnementales et du développement que devraient entreprendre les petits États insulaires en développement avec la coopération et l'assistance de la communauté internationale. Les fonds nécessaires à sa mise en oeuvre seront généralement fournis par les secteurs publics et privés des pays concernés. On y propose des éléments nationaux à inclure dans les plans de développement durable à moyen et à long terme des petits États insulaires en développement, de même que les mesures requises pour renforcer la capacité endogène de ces États. On y recommande des approches régionales aux problèmes du développement durable et de l'environnement et la coopération technique pour le renforcement des capacités endogènes. Enfin, on y présente, dans les grandes lignes, le rôle de la communauté internationale, y compris son rôle pour assurer l'accès à des mécanismes financiers et à des ressources financières suffisantes, prévisibles, nouvelles et additionnelles, favoriser une utilisation optimale des ressources et des mécanismes existants, conformément au

rendement énergétique élevé jouent un rôle de premier plan dans l'atténuation des effets préjudiciables du changement climatique.

A. Action, politiques et mesures au niveau national

- (i) Signer sans tarder la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, le Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone⁴ et les autres instruments juridiques sur la question.
- (ii) Suivre l'évolution du changement climatique et l'élévation du niveau de la mer, étudier ces phénomènes et rassembler des données sur la question.
- (iii) Formuler des politiques globales d'ajustement et d'atténuation en ce qui concerne l'élévation du niveau de la mer dans le cadre de la gestion intégrée des zones côtières.
- (iv) Évaluer les effets des incidences socio-économiques du changement climatique, de la variabilité climatologique et de l'élévation du niveau de la mer sur les petits États insulaires en développement.
- (v) Établir des cartes des zones vulnérables à l'élévation du niveau de la mer et mettre au point des systèmes informatiques couvrant les résultats des études, évaluations et observations dans le cadre de l'élaboration de stratégies d'intervention adéquates, de politiques d'adaptation et de mesures visant à réduire le plus possible les effets du changement climatique, de la variabilité climatologique et de l'élévation du niveau de la mer.
- (vi) Aider le grand public et les milieux politiques à mieux comprendre les effets potentiels du changement climatique.
- (vii) Définir des stratégies et des mesures générales (notamment préparation, facilitation, collecte de l'information) qui aident à faire mieux comprendre l'ensemble des questions associées à la mise au point de moyens de faciliter l'adaptation aux changements climatiques.
- (viii) Promouvoir, dans le cadre de la planification du développement, l'utilisation plus efficace des ressources énergétiques et faire appel à des méthodes appropriées pour réduire au maximum les effets négatifs du changement climatique sur la mise en valeur durable de ces ressources.
- (ix) Renforcer la participation aux activités de recherche, d'évaluation, de surveillance et de cartographie des effets climatiques aux niveaux bilatéral,

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ÉLEVATION DU NIVEAU DE LA MER

Principes d'action

Les petits États insulaires en développement sont particulièrement vulnérables au changement climatique mondial, à la variabilité climatologique et à l'élévation du niveau de la mer. Comme la plus grande partie de leurs populations, terres agricoles et infrastructures se trouvent généralement dans la zone côtière, toute élévation du niveau de la mer aura des effets conséquents et profonds sur l'économie et les conditions de vie dans ces pays, et la survie même de certains pays de faible élévation serait menacée. L'inondation des îles périphériques et de terrains situés au-dessus de la laisse de haute mer peut invalider les droits économiques exclusifs sur de vastes superficies, détruire l'infrastructure économique et provoquer la disparition d'établissements humains. Le changement climatique mondial risque d'endommager les récifs de corail, de modifier la répartition des zones de remontée d'eau froide et d'affecter la production halieutique tant de subsistance que commerciale. En outre, il risque d'altérer la végétation, et l'intrusion d'eau salée peut porter préjudice aux ressources d'eau douce. La fréquence et l'intensité croissantes des tempêtes qui sont peut-être dues au changement climatique aura aussi de profonds effets à la fois sur l'économie et l'environnement des petits États insulaires en développement. Les petits États insulaires en développement doivent rassembler toutes les informations nécessaires disponibles concernant ces effets du changement climatique qui sont susceptibles d'influer sur leur aptitude à mettre au point et à appliquer des stratégies d'intervention appropriées.

Le processus établi par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques³ et les pourparlers en cours au Comité intergouvernemental de négociation représentent d'importantes mesures internationales qui visent à faire face à la menace du changement climatique, à atténuer les effets préjudiciables sur les petits États insulaires en développement et à les aider à s'adapter aux conséquences adverses. Il apparaît de plus en plus clairement que les engagements contenus au paragraphe 2, alinéas a) et b), de l'article 4 de la Convention-cadre, en particulier ceux qui concernent les émissions de gaz à effet de serre, seront sans doute insuffisants à long terme et qu'il faudra peut-être prendre de nouvelles mesures pour pouvoir véritablement avancer vers la réalisation des objectifs de la Convention-cadre. L'examen, à la première réunion des Parties à la Convention-cadre, de la question de savoir si toutes ces actions, en particulier celles qui visent à permettre l'adaptation, vont assez loin, revêt la plus grande importance pour les petits États insulaires et la communauté internationale. On considère que la mise en valeur et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables et la diffusion de technologies écologiquement rationnelles et à

et d'appliquer en temps opportun des stratégies d'adaptation, en reconnaissant la vulnérabilité particulière des petits États insulaires en développement et le coût disproportionné qu'ils supportent.

(iv) Améliorer l'accès aux informations provenant des activités effectuées afin de réduire les incertitudes du changement climatique, et faciliter l'échange de ces informations entre les îles.

(v) Permettre l'accès aux technologies écologiquement rationnelles et à rendement énergétique élevé afin d'aider les petits États insulaires en développement à économiser l'énergie et à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

(vi) Appuyer les activités des organisations régionales et sous-régionales visant à aider les petits États insulaires en développement à faire face de manière efficace et novatrice aux changements climatiques, à la variabilité du climat et à l'élévation du niveau de la mer, notamment par la mise en place de dispositifs permettant d'assurer de façon systématique et continue la recherche, la surveillance, l'étude, la collecte de données et l'évaluation dans ces domaines et en ce qui concerne le rôle des océans dans le climat mondial, les variations des marées et les intrusions d'eau salée.

(vii) Améliorer l'accès aux ressources financières et techniques en vue d'aider les petits États insulaires en développement, qui sont particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique, à faire face aux coûts qu'entraîne la mise au point de stratégies, mesures et méthodologies nationales et régionales propres à faciliter l'adaptation au changement climatique.

D'autres recommandations importantes concernent les domaines suivants : les déchets toxiques et dangereux ; les ressources côtières et marines ; les ressources en eau douce et ressources foncières ; l'énergie et le tourisme ; sont disponibles sur le lien suivant : <http://www.un.org/french/events/sidsprog.htm#five>

régional et mondial, y compris à l'adoption de programmes océanographiques et atmosphériques, et à l'élaboration de stratégies d'intervention.

B. Action au niveau régional

(i) Créer des programmes et des projets pour surveiller et améliorer les moyens de prévision concernant les changements climatiques, la variabilité du climat et l'élévation du niveau de la mer et pour évaluer les effets des changements climatiques sur les ressources de la mer, des cours d'eau et des lacs et la production agricole, y compris les ravageurs, et renforcer les programmes et projets de ce genre qui existent déjà.

(ii) Élaborer des mécanismes afin de faciliter l'échange d'informations et de données d'expérience entre les petits États insulaires en développement et de promouvoir les transferts de technologie et la formation dans ces États en ce qui concerne les changements climatiques, et renforcer les mécanismes de ce genre qui existent déjà.

(iii) Fournir une assistance technique afin d'aider les États à ratifier la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et aider les Parties qui l'ont ratifiée à s'acquitter des principales responsabilités qui leur incombent à ce titre.

(iv) Aider les pays à définir des stratégies et mesures d'adaptation aux changements climatiques et appuyer l'élaboration de directives et méthodes techniques propres à faciliter une telle adaptation.

C. Action au niveau international

(i) Appliquer immédiatement la résolution sur le démarrage rapide des activités, adoptée par le Comité intergouvernemental de négociation d'une convention-cadre sur les changements climatiques.

(ii) Aider les petits États insulaires en développement à répondre à l'appel du Groupe d'experts pour l'étude du changement climatique demandant aux nations côtières vulnérables d'élaborer des plans de gestion intégrée des zones côtières, notamment des mesures d'intervention adaptées pour faire face aux effets du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer.

(iii) Améliorer l'accès aux ressources financières et techniques nécessaires pour surveiller la variabilité du climat, les changements climatiques et l'élévation du niveau de la mer, afin d'évaluer les effets de ces phénomènes ainsi que d'élaborer

ANNEXE 6 – ISLAND CLIMATE UPDATE (FEBRUARY 2008)

Number 90, March 2008

The Island Climate Update

Collaborators

Pacific Islands National Meteorological Services

Australian Bureau of Meteorology

Meteo France

NOAA National Weather Service

NOAA Climate Prediction Centre (CPC)

International Research Institute for Climate and Society

European Centre for Medium Range Weather Forecasts

UK Met Office

World Meteorological Organization

MetService of New Zealand

February's climate

- South Pacific Convergence Zone (SPCZ) extends from northeast of Australia towards New Caledonia and northeast of New Zealand, displaced well southwest of normal
- Suppressed convection exists from Western Kiribati to Eastern Kiribati and about the Equator with low rainfall, especially near Nauru
- Below normal rainfall for several stations in Samoa, but very high rainfall in New Caledonia, and one record high recorded in Tonga.

El Niño/Southern Oscillation (ENSO) and seasonal rainfall forecasts

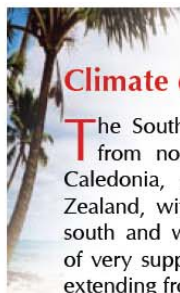
- The strong La Niña episode present in the Pacific has reached maturity, and the event is expected to persist into the Southern Hemisphere autumn
- Suppressed convection and average or below average rainfall is very likely along the equatorial Pacific encompassing the region from Western Kiribati to Eastern Kiribati, the Solomon Islands, the Society Islands, Tuamotu, and the Marquesas Islands. Near or below average rainfall is likely for the Northern Cook Islands and Wallis & Futuna, while average rainfall is likely for Samoa, Tonga, and Pitcairn Island.
- Enhanced convection is likely to continue along a southwest displaced SPCZ with average or above average rainfall for New Caledonia, the Southern Cook Islands, and the Austral Islands, while Papua New Guinea, Fiji, and Niue are expected to receive near or above average rainfall.

SOPAC

SPREP

nzaid

NIWA
Taihoro Nukurangi



Climate developments in February 2008

The South Pacific Convergence Zone (SPCZ) extended from northeastern Australia, over Vanuatu and New Caledonia, eastward of Tonga and northeast of New Zealand, with an overall displaced position much further south and west than normal for February. A large region of very suppressed convection persisted along the Equator extending from Western to Eastern Kiribati and the Tuamotu Islands, affecting the regions both north and south of the Equator, including the Northern Cook Islands, Tuvalu, and the Marquesas.

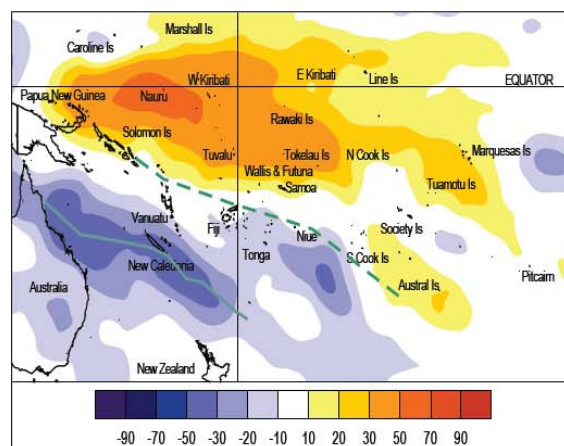
Rainfall was well above average in parts of Northern Australia, and also in parts of New Caledonia, northern New Zealand, Norfolk Island, and Tonga as a result of a southwest-displaced SPCZ. A new monthly rainfall total was recorded at Lupepau'u, Tonga (383.4mm). New Caledonia also reported a global station average rainfall of 169 % from normal, with a record monthly rainfall at Canala of 945 mm (347 % of normal) and a daily maximum of 279.6 mm on the 27th at that site.

In contrast February rainfall was near or below normal over much of Kiribati, French Polynesia, and parts of the Cook Islands, the Austral Islands and the Marquesas. Rainfall has been below average for each of the past 9 months in Kiribati, and above average during the past 5 months in Nadi, Fiji. Samoa also had multiple stations that recorded below normal rainfall for the month.

Country	Location	Rainfall (mm)	% of avg	Comments
Tonga	Lupepau'u	383.4	176	Record high
Kiribati	Kanton Island	0.3		Extremely low
Australia	Willis Island	533.8	270	Very high
New Caledonia	Canala	945	347	Record high
New Caledonia	Poindimie	729.8	206	Very high

February mean air temperatures above average in New Zealand, and were 0.5 °C or more above normal in New Caledonia, Samoa, and Tonga.

Tropical Southwest Pacific mean sea-level pressures were below average in the north Tasman Sea and to the west of New Caledonia. This pressure pattern produced more north easterlies with abundant rain into northern New Zealand, and heavy rainfall in New Caledonia and parts of northeastern Australia.



Outgoing Long-wave Radiation (OLR) anomalies, in Wm^2 are represented by hatched areas. High radiation levels (yellow) are typically associated with clearer skies and lower rainfall, while cloudy conditions lower the OLR (blue) and typically results in higher rainfalls. The February 2008 position of the South Pacific Convergence Zone (SPCZ), as identified from total rainfall, is indicated by the solid green line. The average position of the SPCZ is identified by the dashed green line.

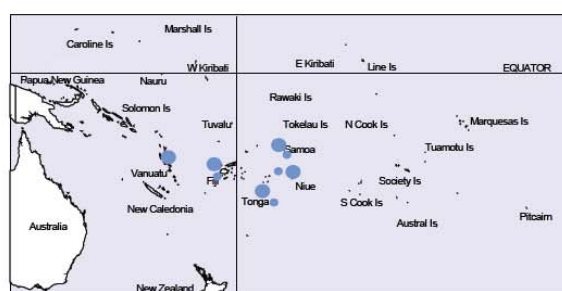
Soil moisture in February 2008

Estimates of soil moisture shown in the map (right) are based on monthly rainfall for one station in each country. Currently there are not many sites in the water balance model, but it is planned to include more stations in the future.

The information displayed is based on a simple water balance technique to determine soil moisture levels. Addition of moisture to the available water already in the soil comes from rainfall, with losses via evapotranspiration. Monthly rainfall and evapotranspiration are used to determine the soil moisture level and its changes.

Please note that these soil moisture calculations were made at the end of the month, and for practical purposes, generalisations were made about the available water capacity of the soils at each site.

Soils continued to be moist (at field capacity) for the time of year at Nadi (Fiji), Hanan Airport (Niue), Apia (Samoa), and in Tonga.



February 2008 February 2007

Wet Moderate Dry

Estimated soil moisture conditions at the end of February 2008, using monthly rainfall data.

El Niño/Southern Oscillation (ENSO)

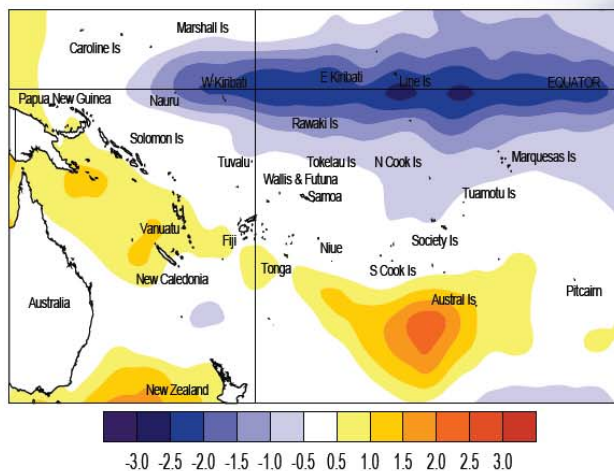
During February, the La Niña event that persisted from previous months has reached maturity, and conditions continued to spread into the western tropical Pacific. The Southern Oscillation Index (SOI) continued its strong movement upwards, indicating a further strengthening of the ocean-atmosphere coupling.

Below normal sea surface temperatures (SSTs) extend across most of the equatorial Pacific, with anomalies of -2.0°C or lower over the central equatorial region (Date Line to 120°W , approximately). The warm "horseshoe" is in evidence in the extra-tropics of both hemispheres but remains patchy in the Southern Hemisphere. The NINO3 anomaly was around -1.5°C in February (December-February average of 1.3°C) and NINO4 was around -1.6°C (December - February average -1.0°C). In the equatorial subsurface Pacific ocean, a strong east-west dipole is evident in the temperature anomalies, with the thermocline near the surface everywhere east of 120°W while the 0–300m heat content increases west of the Date Line.

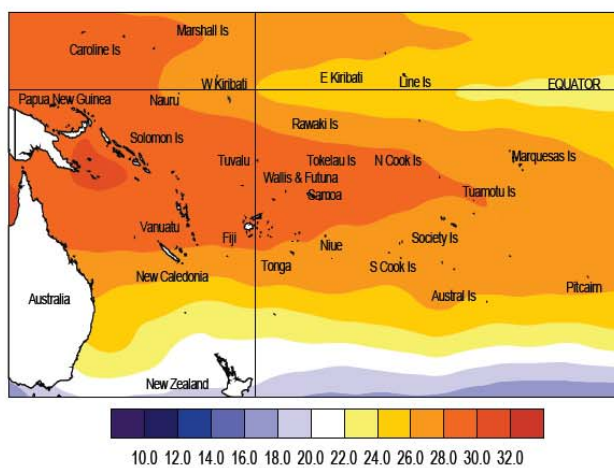
The easterly trade winds have remained enhanced in February across much of the tropical Pacific, though they have weakened recently near the South American coast. The SOI continues to rise and was near $+2.1$ in February (DJF average $+1.7$). This is the highest February SOI value on record for the data set which starts in 1871.

OLR anomalies show an east-west dipole with enhanced convection over Indonesia and suppressed convection from the Solomon Islands to east of the Date Line. The region of enhanced convection that was in the western Pacific has continued to shift westward during the past month. The SPCZ is still prominent but is shifted well to the southwest of its normal position.

The TRMM ENSO precipitation index was -1.3 in February, strengthening from a value of -0.4 in January. The Madden-Julian Oscillation is very weak at present.



Sea surface temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) for February 2008



Mean sea surface temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for February 2008

All models now indicate La Niña conditions, though some weaken to nearer a neutral state during autumn. Most models indicate La Niña conditions easing to neutral by the end of austral winter. The NCEP forecast indicates La Niña is likely to continue through April–June (though weaker). The IRI synthesis (20 February) suggests strong but weakening La Niña conditions through April (95% chance) with the probability of neutral conditions rising to 50% after June 2008.

Forecast validation: December 2007 to February 2008

A La Niña like pattern was expected, with a large region of suppressed convection along the equator from Kiribati, including Tuvalu, Tokelau, and Northern Cook Islands, and the Marquesas, Tuamotu, and Society Islands. Near average or below average rainfall was expected for Pitcairn Island. Enhanced convection was anticipated along a southwest-displaced SPCZ extending from Papua New Guinea through the Solomon Islands, Vanuatu, and New Caledonia eastward across Fiji, Wallis & Futuna, Niue, the Southern Cook and

Austral Islands, with average or above average rainfall expected in this region.

The rainfall outlook for the December 2007– February 2008 period was very similar to what was forecast, the 'hit' rate being 73%. Rainfall was lower than expected in Vanuatu and the Solomon Islands.



Tropical Pacific rainfall – February 2008

Territory and station name	February 2008 rainfall total (mm)	February 2008 percent of average
Australia		
Cairns Airport	535.6	117
Townsville Airport	560.4	192
Brisbane Airport	216.8	126
Sydney Airport	258.4	244
Cook Islands		
Penrhyn	99.4	29
Aitutaki	124.6	
Rarotonga Airport	276.6	137
Rarotonga EWS	203.2	101
Fiji		
Rotuma Island	163.9	51
Udu Point	190.5	77
Nadi Airport	528.6	181
Nausori	185.4	69
French Polynesia		
Hiva Hoa, Atuona	26.6	17
Bora Bora	123.2	52
Tahiti – Faa'a	55.6	26
Tuamotu, Takaroa	122	63
Gambier, Rikitea	183.8	105
Tubuai	140.4	70
Rapa	47.6	26
Kiribati		
Tarawa		
Kanton	0.3	
New Zealand		
Kaitia	46	56
Whangarei Airport	82.2	98
Auckland Airport	15	22
New Caledonia		
Ile Art, Belep	432	262
Koumac	284	187
Ouloup	254.6	128
Ouanaham	296	122
Poindimie	729.8	206
La Roche	231.6	109
La Tontouta	254.8	187
Noumea	158.8	128
Moue	248	138

Territory and station name	February 2008 rainfall total (mm)	February 2008 percent of average
Niue		
Hanan Airport	269	114
Liku	143.5	58
North Tasman		
Lord Howe Island	90	78
Norfolk Island	225	278
Raoul Island	192	130
Samoa		
Apia	206.2	56
Faleolo Airport	187.8	50
Nafanua	206.5	
Afimalu	244.5	
Maota	201.2	
Tonga		
Niuafo'o		
Mata'aho Airport	113	44
Lupepau'u	383.4	176
Salote Airport	267.1	138
Nuku'alofa	358.4	171
Fua'motu Airport	420	190
Tuvalu		
Nanumea	169.7	48
Nui Island	303.9	72
Funafuti	643.5	167
Nuilakita*	697.1	185
Vanuatu		
Sola	463.9	133
Pekoa	197.6	63
Lamap	110.5	43
Port Vila	282.4	106
Tanna/Whitegrass	115.9	
Bauerfield	83.3	39
Aneityum	68.2	23

Rainfall totalling 200% or more is considered well above average. Totals of 40% or less are normally well below average. Highlighted values are new records.

Data are published as received and may be subject to change after undergoing quality control checks. * denotes synoptic values.

The Island Climate Update, No. 90, March 2008

Page 4

Tropical rainfall outlook: March to May 2008

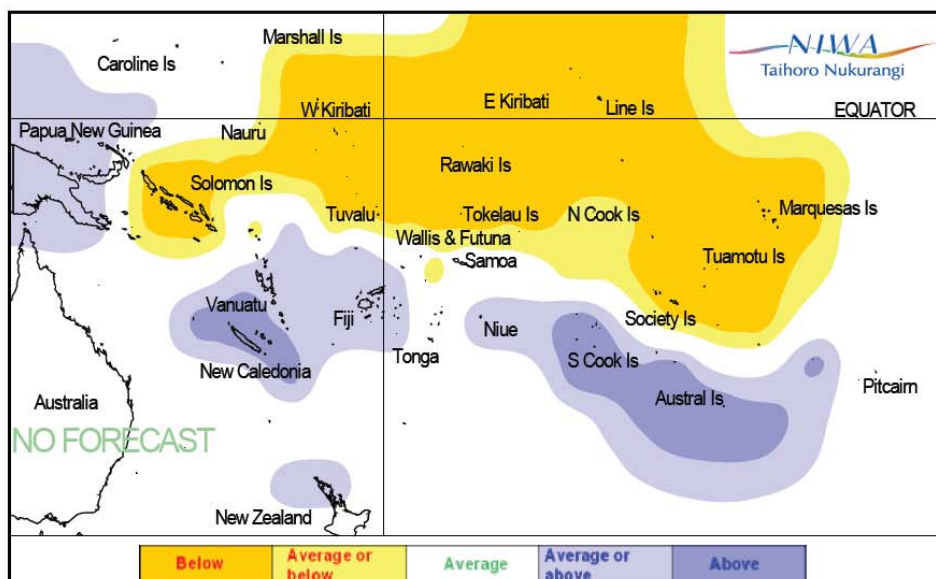
La Niña conditions are still very likely to influence rainfall patterns during this period, with a large area of suppressed convection very likely along the equatorial Pacific from Western Kiribati to Eastern Kiribati, including the Solomon Islands, Tuvalu, the Society Islands, Tuamotu, and the Marquesas Islands. Near or below average rainfall is likely for the Northern Cook Islands and Wallis & Futuna, while average rainfall is likely for Samoa, Tonga, and Pitcairn Island.

Enhanced convection with above average rainfall is likely in New Caledonia, the Southern Cook Islands, and the Austral Islands, while Papua New Guinea, Vanuatu, Fiji, and Niue are expected to receive near or above average rainfall.

The confidence in the forecast model skill for this seasonal outlook is moderate to moderately high for most Pacific Island countries. In the past, the average region-wide hit rate for forecasts issued in March is 63%, 3% higher than the long term average for all months combined.

NOTE: Rainfall estimates for Pacific Islands for the next three months are given in the table. The tercile probabilities (e.g., 20:30:50) are derived from the outputs of several global climate models. They correspond to the odds of the observed rainfall being in the lowest (driest) one third of the rainfall distribution, the middle one third, or the highest (wettest) one third of the distribution. On the long term average, rainfall is equally likely (33% chance) in any tercile.

Island Group	Rainfall Outlook	Outlook confidence
New Caledonia	20:35:45 (Above)	Moderate-High
Austral Islands	20:35:45 (Above)	Moderate-High
Cook Islands (Southern)	25:30:45 (Above)	Moderate
Niue	25:35:40 (Near or above)	Moderate-High
Vanuatu	25:35:40 (Near or above)	Moderate-High
Fiji	25:35:40 (Near or above)	Moderate
Pitcairn Island	30:35:35 (Near normal)	Moderate-High
Tonga	30:35:35 (Near normal)	Moderate-High
Papua New Guinea	35:35:30 (Near normal)	Moderate-High
Samoa	35:35:30 (Near normal)	Moderate
Society Islands	40:35:25 (Near or below)	Moderate
Wallis & Futuna	40:35:25 (Near or below)	Moderate-High
Solomon Islands	45:30:25 (Below)	Moderate
Marquesas	50:30:20 (Below)	Moderate-High
Tokelau	50:30:20 (Below)	Moderate
Tuamotu Islands	50:30:20 (Below)	Moderate-High
Cook Islands (Northern)	55:25:20 (Below)	Moderate
Tuvalu	55:25:20 (Below)	Moderate-High
Kiribati (Eastern)	60:25:15 (Below)	Moderate-High
Kiribati (Western)	60:25:15 (Below)	Moderate-High



Rainfall outlook map for March to May 2008

Tropical cyclones

One tropical cyclone (TC) affected the South Pacific region in February. TC Gene formed on the 27 January northeast of Fiji and tracked southwest toward New Caledonia, reaching Category 3 strength. Maximum sustained winds of 100 knots were reached late on 31 January. TC Gene subsequently swung to the southeast and deteriorated along a southeast exit path into the extra-tropics on 1 February. There was only one other major depression that developed in the South Pacific during the month, but it did not develop

into a cyclone. March is normally an active month for tropical cyclones, and the development of mature La Niña conditions at present will continue to influence tropical cyclones in several parts of the South Pacific region.



Climate change impacts on Pacific tuna fisheries

Dr. Andrew Lorrey, National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand

Climate change will likely affect Pacific Ocean fisheries through raising ocean surface temperatures and through increased inter-annual climate variability. Direct impacts of climate change are anticipated to affect the distribution of key commercial fish species in the Pacific, as well as their abundance and catchability, including tuna.

Tuna fisheries in the Pacific

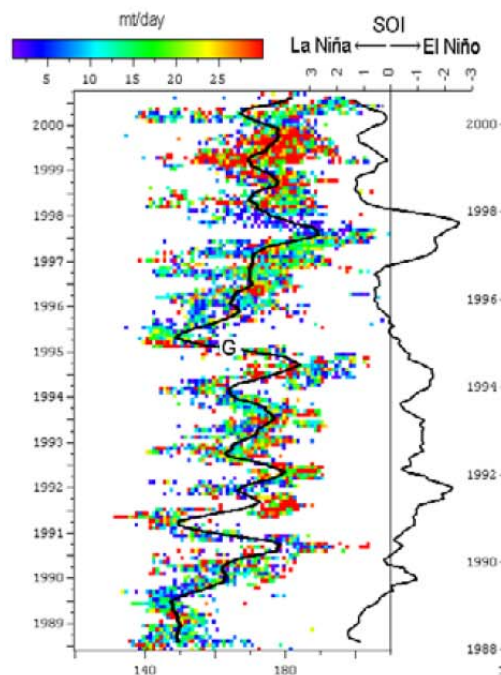
Nearly 70% of the world's tuna harvest comes from the Pacific Ocean. At present, 3.2 million tonnes are harvested from this region, and the catch is comprised mostly of skipjack tuna. Catches are highest in the western equatorial Pacific warm pool, which is characterised by low production rates and comprise the warmest surface waters of the world's oceans. This warm pool is fundamental to the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Earth's climate in general.

Changes in primary productivity

A decline in central and eastern Pacific primary productivity due to increased stratification between warm surface waters and colder deep water would reduce upwelling. This would result in a spatial redistribution of tuna resources to higher latitudes and toward the western equatorial Pacific. A decline in bigeye and adult yellowfin tuna populations might occur as a result of changes in primary productivity with possible impacts on the species targeted by longline fishing fleets. With an increased demand for sashimi and high quality fish world-wide, pressure on yellowfin tuna is expected to rise to compensate for decreased catch of bigeye tuna, and could potentially lead to an unsustainable population if the fish stocks are not well managed. However, the productivity rise anticipated for the western Pacific might help offset this pressure, and a catch of one million tonnes of skipjack tuna per year is deemed sustainable. Central Pacific countries like Kiribati that have a high dependence on tuna fishing makes them and their domestic fishing fleets most vulnerable to the climate change impacts on fish populations that may occur in the near future.

Future climate change and tuna fishing

Large uncertainties about the changes in western equatorial Pacific productivity mean there are many questions about climate change impacts on spawning migrations for tuna as well as the connections these fisheries have with extra-tropical regions.



Correlation of ENSO (illustrated by the SOI) variations to skipjack tuna catch rate (metric tonnes per day) and catch location indicates displacements in tuna populations are related to the eastern edge of the western Pacific warm pool movements.

Current research programmes like the Oceanic Fisheries and Climate Change Project (OFCCP) are underway to critically assess climate change impacts on oceanic tuna stocks with the aim of predicting short- to long-term population variations that will occur with global warming and increased climate variability. It is anticipated that this will help us understand how greenhouse warming will affect the abundance and productivity of commercially exploited species and fisheries at both the oceanic and global scale.

Information for this article was sourced from the Secretariat of the Pacific Communities Oceanic Fisheries Programme (New Caledonia) and The World Bank.



The Island
Climate Update

Cover Photo:
Wendy St George,
NIWA

Visit The Island Climate Update at:
www.niwascience.co.nz/ncc/icu

Your comments and ideas about The Island Climate Update are welcome. Please contact:

Project Director: Dr Jim Salinger, NIWA,
Private Bag 109 695, Newmarket, Auckland,
New Zealand. E-mail: j.salinger@niwa.co.nz

Editors:

Jim Salinger Email: j.salinger@niwa.co.nz
Andrew Lorrey Email: a.lorrey@niwa.co.nz

Sources of South Pacific rainfall data

This bulletin is a multi-national project, with important collaboration from the following Meteorological Services: **American Samoa, Australia, Cook Islands, Fiji, French Polynesia, Kiribati, New Caledonia, New Zealand, Niue, Papua New Guinea, Pitcairn Island, Samoa, Solomon Islands, Tokelau, Tonga, Tuvalu, Vanuatu, Wallis and Futuna**

Acknowledgements

This bulletin is produced by NIWA and made possible with financial support from the New Zealand Agency for International Development (NZAID), with additional support from the Pacific Islands Applied Geosciences Commission (SOPAC) and the Secretariat for the Pacific Regional Environmental Programme (SPREP).

This summary is prepared as soon as possible following the end of the month, once the data and information are received from the Pacific Island National Meteorological Services (NMHS). Delays in data collection and communication occasionally arise. While every effort is made to verify observational data, NIWA does not guarantee the accuracy and reliability of the analysis and forecast information presented, and accepts no liability for any losses incurred through the use of this bulletin and its content.

The contents of The Island Climate Update may be freely disseminated, provided the source is acknowledged.

Requests for Pacific Island climate data should be directed to the Meteorological Services concerned.

The Island Climate Update, No. 90, March 2008

Page 6