

Oceanography

Enhancement of regional variations in salinity and temperature in a coral reef lagoon, New Caledonia

Sylvain Ouillon*, Pascal Douillet, Renaud Fichez, Jean-Yves Panché

UR Camélia, IRD, BP A5, 98848 Nouméa, New Caledonia

Received 29 October 2004; accepted after revision 17 August 2005

Available online 8 September 2005

Presented by Anny Cazenave

Abstract

The variability in salinity and temperature in the southwest lagoon of New Caledonia (2100 km²) under non-storm conditions is analysed using a 4-year dataset (1997–2001). Seasonal and interannual variations in salinity are amplified nearshore. Temperature is larger in bays than in the open lagoon during summer, the reverse is true in winter. El Niño Southern Oscillation (ENSO) related nearshore temperature variations parallel those at regional scale, but with seasonal variations amplified. Haline stratification, if any, is enhanced in coastal areas. **To cite this article:** *S. Ouillon et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

Amplification des variations régionales en salinité et température dans un lagon de Nouvelle-Calédonie. Les distributions de salinité et de température dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie (2100 km²) sont analysées en regard de leurs variations régionales à partir de quatre ans de mesures (1997–2001). Les variations saisonnières et interannuelles de salinité sont amplifiées à la côte. La température est plus élevée près de la côte qu'en milieu de lagon en été austral et y est plus faible en hiver. Le phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) amplifie ces variations. En cas de stratification haline, celle-ci est également amplifiée à la côte. Les baies jouent ainsi un rôle de caisse de résonance dans le fonctionnement physique du lagon, avec des répercussions tant dans la répartition des espèces que dans la vulnérabilité des milieux (blanchissement des coraux). **Pour citer cet article :** *S. Ouillon et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Keywords: Salinity; Temperature; ENSO; El Niño; Coral reef lagoon; New Caledonia

Mots-clés : Salinité ; Température ; ENSO ; El Niño ; Lagon corallien ; Nouvelle-Calédonie

Version française abrégée

1. Introduction

Des épisodes de blanchissement massif des coraux ont été observés sur la plupart des récifs coralliens au cours des années 1990 [1,2,11]. En Nouvelle-Calédonie,

* Corresponding author.

E-mail address: sylvain.ouillon@noumea.ird.nc (S. Ouillon).

un tel épisode s'est produit en 1996 [8], essentiellement dans les baies côtières. De nombreux paramètres environnementaux, parmi lesquels la température de l'eau, influent sur la croissance et la santé des récifs [10,18]. Des variations significatives de la température de surface de la mer (TSM) et de la salinité par rapport à leur valeur moyenne mensuelle ont été identifiées parmi les causes de blanchissement [6,15]. Ces causes ne sont pas encore connues précisément dans leur ensemble. Pour progresser dans l'analyse, il est primordial d'améliorer notre connaissance du fonctionnement physique et biologique de ces écosystèmes complexes à différentes échelles de temps.

Des études physiques de récifs ont été focalisées sur la circulation des masses d'eau [19] et la distribution de température dans des lagons [9,15]. Les études intégrées (température, salinité, courants, vagues), mise à part celle concernant la Grande Barrière de corail [17], n'ont été conduites que pour de courtes périodes [12, 16]. Des travaux complémentaires sur de plus longues périodes sont donc nécessaires.

Cet article présente les variations principales dans la distribution de température et de salinité dans un lagon étendu de Nouvelle-Calédonie, analysées à partir de 20 campagnes de mesure entreprises entre 1997 et 2001. Les récifs de Nouvelle-Calédonie constituent le second système récifal en superficie (23 400 km²) après la Grande Barrière de corail en Australie. Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie (LSNC), lagon semi-fermé d'environ 120 km de long sur 20 km de large avec une profondeur moyenne de 17,5 m (Fig. 1), constitue notre zone d'étude. Les variations spatiales de salinité et température au sein du lagon sont analysées par rapport aux variations de salinité et température océaniques saisonnières et interannuelles, liées à l'oscillation australe [3,7].

2. Méthodes

D'octobre 1997 à mars 2001, vingt campagnes de mesures ont été réalisées. Chacune, d'une durée de deux ou trois jours, comprenait au minimum 33 stations marines. Pour chaque station, une valeur «de surface» a été calculée en moyennant les mesures effectuées de 3 à 5 m sous la surface et une valeur «de fond» a été obtenue par la moyenne des mesures effectuées de 3 à 5 m au-dessus du fond, en température et en salinité. Des valeurs moyennes ont ensuite été calculées pour chaque campagne dans quatre zones : Nord lagon (NL) et Sud lagon (SL), et baies de Dumbéa (BD) et de Boulari (BB) près de la côte (Fig. 1), pour distinguer les variations hydrographiques le long de la côte et à partir de la côte.

L'analyse s'appuie également sur des mesures de débit, de vent au phare Amédée et à l'îlot Maître (Fig. 1), et sur les mesures de salinité et de température à l'anse Vata (Nouméa) de 1977 à 2001.

3. Contexte météorologique, hydrologique et océanographique

3.1. Pluies et débits

Les précipitations mensuelles mesurées entre 1997 et 2001 présentent des variations typiques, tant saisonnières (pluies tropicales de janvier à mars et pluies fortes occasionnelles de mai à septembre, suivant la position de la zone de convergence intertropicale [14]), qu'inter-annuelles. Elles connaissent une diminution (respectivement un excès) durant l'épisode El Niño de 1997/1998 (respectivement La Niña 1998/2000) (Fig. 2). Les variations de précipitation se répercutent sur les débits des rivières principales qui se déversent dans le LSNC : la Dumbéa, la Coulée et la rivière des Pirogues (Figs. 1 et 3). L'analyse s'appuie sur l'étude de corrélation entre les anomalies de précipitation ou de débits et l'indice d'oscillation australe (*Southern Oscillation Index* en anglais, noté SOI), anomalie standardisée de la différence de pression au niveau de la mer entre Tahiti (Pacifique sud-est) et Darwin (Pacifique sud-ouest) qui est un indicateur reconnu des épisodes El Niño/La Niña. Nos résultats confortent les analyses effectuées précédemment sur les anomalies de précipitation et de débits en Nouvelle-Calédonie [13] et sur les anomalies de précipitation dans le Pacifique sud-ouest [7].

3.2. Vent

Dans l'année, le régime d'alizé de sud-est domine d'octobre à mai (vent moyen de $\sim 7 \text{ m s}^{-1}$) et le vent diminue, de direction plus variable, de juin à septembre [14]. La variation interannuelle se traduit par un renforcement (respectivement une diminution) des vents en période El Niño (respectivement La Niña) [13], comme le confirment nos données (Fig. 4).

3.3. Hydrodynamique côtière

Le vent et la marée sont les éléments moteurs principaux des courants dans le LSNC [4]. La marée semi-diurne se propage du sud vers le nord. Le lagon est pourvu en eau océanique, principalement par le sud, et se vidange par les passes.

4. Résultats et discussion

4.1. Distribution spatiale de la salinité et sa variabilité

Les variations de salinité des eaux océaniques pénétrant dans le lagon sont plus importantes avec ENSO

que suivant le cycle saisonnier [3,7]. Elles se traduisent par une baisse de salinité en période La Niña. La salinité de surface dans le lagon suit cette évolution (Fig. 5), tout en étant également affectée par les conséquences météorologiques et hydrologiques locales d'ENSO. En épisode El Niño, les apports d'eau douce sont réduits et l'évaporation accrue par des vents plus forts (Fig. 4) et une couverture nuageuse réduite. Ceci peut induire des gradients inverses de salinité en été avec des baies légèrement plus salées que le milieu de lagon (Fig. 6). Les apports en eaux douces, accrus en période La Niña, provoquent un dessalement relatif des eaux proches de la côte par rapport au milieu de lagon. Les gradients de salinité le long de la côte ou depuis la côte sont plus forts en période La Niña qu'en période El Niño (Fig. 6), avec cependant un effet de retard de quelques mois en période La Niña par rapport à l'augmentation de SOI qui lui est associée. En conséquence, la salinité varie dans le lagon suivant la même tendance que pour les eaux océaniques, mais ses variations sont amplifiées à la côte par les conséquences météorologiques et hydrologiques d'ENSO.

4.2. Distribution spatiale de la température et sa variabilité

La variation saisonnière de température dans le lagon est largement supérieure à sa variation interannuelle (Fig. 7). L'analyse de mesures continues à long terme (1977–2001) indique un effet imputable à ENSO : la TSM la plus basse de l'année en moyenne mensuelle est plus élevée durant les années post-Niño, comme en 1998 par rapport aux années suivantes (Fig. 7). L'écart thermique entre la côte et le milieu de lagon s'inverse à un rythme saisonnier. La TSM est plus élevée dans les baies et près de la côte durant l'été austral ; elle y est plus faible durant l'hiver austral. Le lagon amplifie donc à la côte les variations saisonnières et interannuelles de TSM que connaissent les eaux océaniques. L'écart de température entre la côte et le milieu de lagon est maximum en décembre 1997, soit en période El Niño (Fig. 7).

4.3. Stratification

La stratification haline est épisodique et hétérogène sur le lagon (Fig. 8). Une salinité plus élevée au fond qu'en surface est observée pendant l'été austral 1997–1998, durant El Niño. Les précipitations accrues durant La Niña induisent des salinités de surface plus faibles qu'au fond, l'écart croissant lorsqu'on se rapproche des embouchures. La stratification thermique est saisonnière et se produit d'octobre à mars durant l'été austral (Fig. 9). La thermocline atteint le fond dans les zones

littorales, mais pas en milieu de lagon. En période de stratification thermique d'été, la distribution de température est ainsi plus homogène dans le lagon en surface qu'au voisinage du fond. L'hétérogénéité des profils de température et de salinité est accentuée en été en période La Niña.

5. Conclusion

La salinité des eaux océaniques entrant dans le lagon connaît des variations plus importantes dues à ENSO plutôt qu'au cycle saisonnier, avec une salinité plus faible en période La Niña. Au voisinage de la côte, la salinité peut être plus forte qu'en milieu de lagon en période estivale El Niño, alors qu'elle y est plus faible en période La Niña. Les variations saisonnières de température dans le lagon sont plus fortes que les variations interannuelles. Ces variations sont amplifiées au voisinage de la côte, où les eaux sont plus froides en hiver et plus chaudes en été qu'en milieu de lagon. Les baies et les zones littorales jouent ainsi un rôle de « caisse de résonance » dans le fonctionnement physique du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Elles accentuent les variations régionales (saisonnières et interannuelles) de salinité sous l'effet d'ENSO et les variations régionales de température, avec un gradient thermique côte-large maximum en été El Niño.

L'amplification locale de température et de salinité dans le lagon, observée en été austral en période El Niño, s'applique également dans le contexte du réchauffement global. Les conditions de déclenchement d'épisodes de blanchissement du corail, induites par le changement climatique, dépendent des variations régionales de température et de salinité et des modifications des régimes régionaux de vent et de précipitation qu'il faut étudier conjointement. Le fonctionnement physique du lagon esquissé dans cet article, dont il convient de poursuivre l'étude, servira de support à l'analyse du changement climatique sur l'écosystème lagonaire, tant dans la répartition des espèces (carte de la biodiversité) et de leur abondance que dans leur vulnérabilité (blanchissement des coraux) [5].

1. Introduction

Major coral bleaching of unprecedented extent was reported during the 1990s over some reefs such as Mexico, Belize, Papua New Guinea and Hawaii in the 1990s [1], in New Caledonia in 1996 [8], in the Great Barrier Reef [2] and in the Tuamotu Archipelago [11] in 1998. Coral bleaching in New Caledonia in 1996 occurred mainly in coastal bays. Coral growth has been

identified to be correlated to environmental parameters such as cloud cover, air temperature, water temperature, nutrient supply, atmospheric pressure, resuspension rates or turbidity [10]. Coral is also known to be very sensitive to changes in forcings (wind regime, radiative budget, river inputs, precipitations) [18], but bleaching episodes are elicited by various triggers that are still not precisely defined. Significant variations in Sea Surface Temperature (SST) and in salinity as compared to mean monthly values were identified among the causes of stress that could induce the expulsion of symbiotic algae and elicit bleaching episodes [6,15]. However, the relative impacts of climate changes and of human activities at different time scales over coral reef lagoons are not precisely known. In that context, it has become a major concern to improve our understanding of the physical and biological functioning of these complex ecosystems.

Physical studies of reefs have analysed the hydrodynamics [19] or the temperature distribution in lagoons [9,15]. Apart from the Great Barrier Reef [17], few studies have yet described integrated physical mechanisms through an analysis of series of measurements spanning several years over large reef lagoons. Integrated physical studies (temperature, salinity, currents, and waves) were presented by Wing and Leichter [16] and Nadaoka et al. [12] for short-term variations. Additional physical studies of reefs, over extended periods are needed.

This paper presents the main variations in temperature and salinity distributions within a large lagoon under non-storm conditions, in New Caledonia (SW Pacific), based on 20 field surveys spanning a 4-year period (1997–2001). The New Caledonia Reef is the second widest tropical reef system in the world after the Australian Great Barrier Reef. New Caledonia is surrounded by coral reef lagoons that cover a total area of 23 400 km² and that are delimited by a barrier reef and the island coast as encountered, for example, in the Great Barrier Reef, in Belize and at North of Viti Levu (Fiji). The southwest lagoon of New Caledonia (SLNC) is a typical large lagoon commonly encountered in the South Pacific. It is approximately 120 km long, 20 km wide, with an average depth of 17.5 m (Fig. 1). The SLNC is nearly enclosed and connected to the ocean by narrow passes through the reef.

Gouriou and Delcroix [7] described seasonal and ENSO (El Niño Southern Oscillation) variations of SSS (Sea Surface Salinity) and SST in the southwestern tropical Pacific, and Delcroix and Lenormand [3] have analysed the seasonal and ENSO variations in SSS and SST at one location within the SLNC. In this paper,

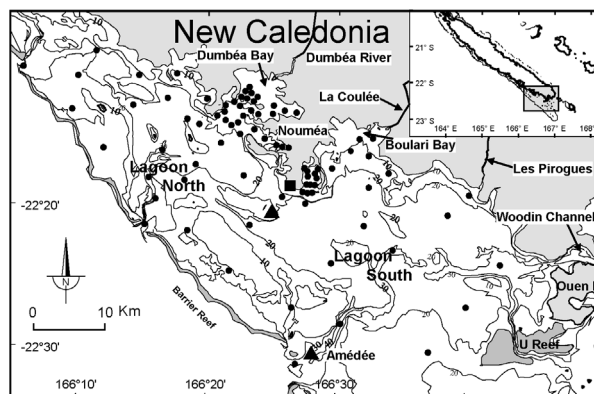


Fig. 1. Map of the southwest lagoon of New Caledonia. Locations of CTD profiles (●), of meteorological stations (▲), and of Anse Vata station (■). Isobaths are expressed in meters.

Fig. 1. Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Positions des profils CTD (●), des stations météorologiques (▲), et de la station côtière de l'anse Vata (■). Les isobathes sont indiquées en mètres.

we analyse spatial variations in salinity and temperature distributions within the SLNC against seasonal and ENSO-related variations of oceanic SSS and SST.

2. Methods

Fourteen cruises had been performed monthly (October 1997–November 1998) using a 33-station grid to observe the seasonal patterns of temperature and salinity within the SLNC. They were completed by six further cruises (January, April, August, and November 1999, September 2000 and March 2001) using more stations. Cruises averaged three days, and stations were occupied without regard to tidal stages. Conductivity, temperature and depth (CTD) profiles were recorded using a SeaBird SBE 19 probe. For each station, we calculated a 'surface' value for temperature and salinity by averaging measurements taken from 3 to 5 m below the surface, and a 'bottom' value averaging measurements taken from 3 to 5 m above the seafloor. For each parameter and each cruise, we calculated four averaged values per 'zone': North Lagoon (NL) and South Lagoon (SL) representing open lagoon waters, Dumbéa Bay (DB) and Boulari Bay (BB) being near the coast (see Fig. 1), to sketch the longshore and cross-shore hydrographic gradients.

River discharges have been measured since 1997. Wind has been measured continuously since 1990 at Amédée Lighthouse and since 1998 at Maître Island, in the middle of the SLNC (Fig. 1). Daily SSS and SST measurements at Anse Vata (Nouméa) from 1977 to 2001 were also used in this study.

3. Meteorological, hydrological and oceanographic setting

3.1. Rainfall and river discharges

The regional variations in rainfall, SST and SSS depend mainly on the location of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and South Pacific Convergence Zone (SPCZ) [14]. From January to March (warm season), the SPCZ is in its southernmost position, rainfall is heavy and tropical storms or cyclones can affect New Caledonia. When the SPCZ moves to the northern hemisphere (mid-May to mid-September), cold fronts carrying polar air from the Tasman Sea can occasionally bring heavy rainfall. The intermediate periods (April–May and September–December) are characterized by sunny and dry weather.

Nicot and Delcroix [13] analysed the correlation between anomalies in precipitation and in river discharges in New Caledonia with the Southern Oscillation Index (SOI), the standardized anomaly of the mean sea-level pressure difference between Tahiti (Southeast Pacific) and Darwin (Southwest Pacific), which is a good indicator of ENSO variations. They showed that: (1) ENSO modulates the rainfall regime in New Caledonia with a 20–50% decrease (increase) during El Niño (La Niña) events, (2) the flow rates of two rivers at the north end of the SLNC (Ouenghi River and Tontouta River) can almost double during La Niña and decrease by more than 50% during El Niño, (3) the best lagged correlations are obtained when SOI leads rainfall by 2–3 months and river flow rates by 3–6 months. Investigating the relationship between rainfall and SOI in the Southwest Pacific, Gouriou and Delcroix [7] showed that a large negative rainfall anomaly occurred in 1997 and 1998, peaking in December 1997–January 1998. Mid-1998 was the watershed between the 1997–1998 El Niño and the 1998–2000 La Niña.

Freshwater input to the SLNC comes principally from the Dumbéa River (drainage area: 238 km²), La Coulée River (85 km²) and Les Pirogues River (140 km²) (Fig. 1). The monthly rainfall figures for the southwestern part of New Caledonia from 1997 up to 2001 are typical of seasonal and inter-annual precipitation variations (Fig. 2) showing a shortage (excess) of rainfall during the 1997/1998 El Niño (1998–2000 La Niña). Seasonal variations in river discharges are thus modulated by ENSO, which induced lower (greater) river discharges during the 1997/1998 El Niño (1998/2000 La Niña) (Fig. 3). The best lagged correlation is obtained when considering SOI leading river discharge anomalies by two months ($r_{\max}^2 = 0.49$ con-

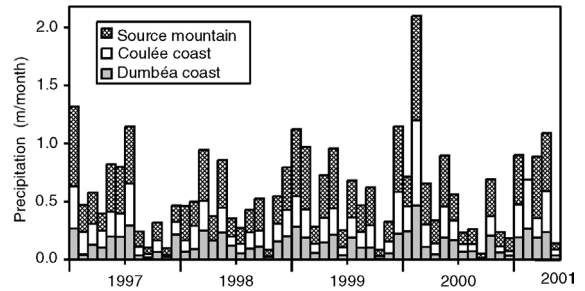


Fig. 2. Monthly rainfall at Dumbéa coast and Coulée coast, near the river mouths, and at inland Source Mountain station.

Fig. 2. Précipitations mensuelles sur la côte de la Dumbéa et sur la côte de la Coulée, près des embouchures des rivières du même nom, et à la station de la montagne des Sources.

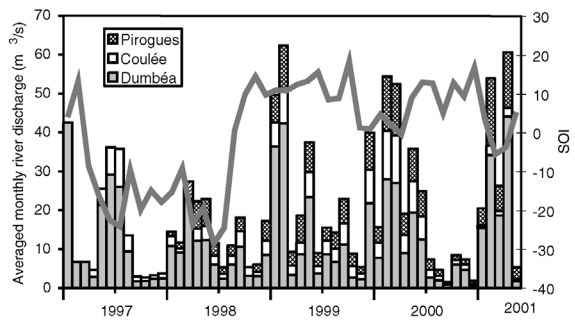


Fig. 3. Averaged monthly river discharges of the three main rivers of the SLNC and the SOI variation (in grey) provided by the Australian Bureau of Meteorology. The discharges of Dumbéa River and of Coulée River show higher correlation with precipitation at Source Mountain ($r^2 = 0.52$ and 0.48 , respectively; $p < 0.001$ for each). The correlation between the discharge of Pirogues River and precipitation is higher at 'Coulée coast' ($r^2 = 0.57$ instead of 0.40 ; $p < 0.001$) because its drainage basin does not extend as far inland.

Fig. 3. Débit mensuel moyen des trois rivières principales débouchant dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie et variation de l'indice d'oscillation australe (en gris) fournie par l'Australian Bureau of Meteorology. Les corrélations entre les précipitations à la montagne des Sources et les débits des rivières Dumbéa et Coulée sont significatives (respectivement $r^2 = 0,52$ et $0,48$; $p < 0,001$ pour chacune). La corrélation entre le débit de la rivière des Pirogues et les précipitations est plus élevée à la côte de la Coulée qu'à la montagne des Sources ($r^2 = 0,57$ au lieu de $0,40$; $p < 0,001$), parce que le bassin versant de cette rivière ne s'étend pas beaucoup dans les terres.

sidering the 5-month averaged SOI and river discharge anomaly, $p < 0.001$).

3.2. Wind

Mean seasonal variations of wind regime are characterized by two major seasons [14]. From October to May, southeasterly ($\sim 110^\circ$) trade winds dominate with a mean velocity of $\sim 7 \text{ m s}^{-1}$. From June to September,

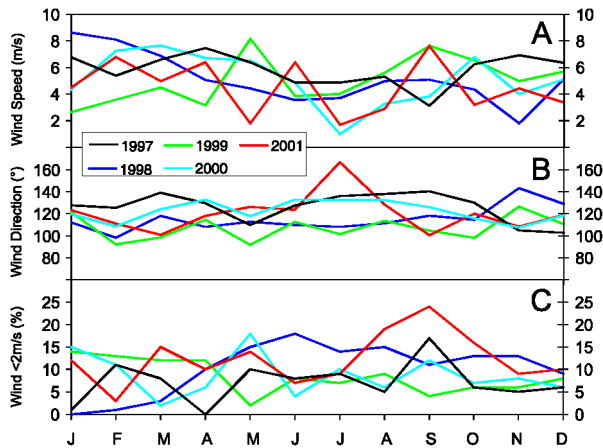


Fig. 4. Monthly wind at Amédée Lighthouse, 1997–2001: (A) wind speed, (B) wind direction, (C) percentage of wind below 2 m s^{-1} .

Fig. 4. Vent mesuré au phare Amédée, données mensuelles, 1997–2001 : (A) vitesse moyenne, (B) direction moyenne, (C) pourcentage de vent $< 2 \text{ m s}^{-1}$.

wind velocity is weaker and direction more variable. Inter-annual variations elicit stronger (weaker) winds during El Niño (La Niña) [13], as confirmed by our data (Fig. 4): wind speed was greater and the percentage of low wind was smaller, month per month, from May 1997 to April 1998 (El Niño) than from May 1998 to April 1999 (La Niña).

3.3. Hydrodynamics

Main circulation patterns have been deduced from extensive currentmeter and tidegauge measurements and from 2D and 3D hydrodynamic models [4]. Wind and tidal forcings are the main mechanisms driving the lagoon circulation. The semi-diurnal tide propagates from south to north. The trade winds drive a general northwest drift. In the absence of local wind, velocity at 15-m depth in the main part of the lagoon has two peaks per tidal cycle. During trade wind episodes, flow direction remains in the same quadrant and velocity presents only one significant peak during flood. Tide- and wind-induced currents flush the lagoon, which is mainly fed with oceanic waters at its southern end, emptying through the passes.

4. Results and discussion

4.1. Salinity distribution and its variability

The mean SSS around New Caledonia, calculated from 20-year datasets, is 35.5 [3]. Gouriou and Delcroix [7] showed that SSS in the surrounding oceanic

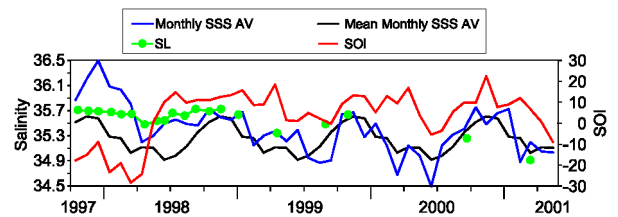


Fig. 5. Temporal variations of SSS in the South Lagoon (circles), of monthly SSS at Anse Vata (dashed line), of mean monthly SSS at Anse Vata averaged between 1977 and 2001 (solid line), and of SOI (grey line).

Fig. 5. Variations temporelles de salinité de surface de la mer dans le Sud du lagon (cercles), de la moyenne mensuelle de salinité de surface à l'anse Vata (tiretés), de la salinité de surface à l'anse Vata en moyenne mensuelle pour la période 1977–2001 (ligne pleine), et de l'indice d'oscillation australe (ligne grise).

waters has a seasonal peak-to-peak variation of 0.1 and that its ENSO-related variation can be larger. They reported that the salinity anomaly was weak during the 1997/1998 El Niño and strongly negative during the 1998/2000 La Niña. SSS values for lagoon waters are in very good agreement with these regional variations (Fig. 5). In 1997–1998, SSS variations in SL were weak, between 35.5 and 35.7. The decrease of SSS in the lagoon started early 1999 with a lag of about 10 months relative to the SOI, consistent with the analysis of Delcroix and Lenormand [3]. The mean SSS of the lagoon waters was 0.2 lower in 1999 than in 1998 (35.4 against 35.6), in agreement with the anomaly of -0.15 for 1999 around New Caledonia [7]. Then SSS decreased to 35.3 in September 2000 and finally to 35.0 in March 2001.

Mean monthly SSS at Anse Vata has a seasonal peak to peak variation of 0.7, and its inter-annual variation may reach 0.8 (Fig. 5). The salinity variations are greater nearshore than in the middle of the lagoon. The austral summers of 1997–1998 and 1998–1999 were characterized by a high level of salinity and by a weak or inverse cross-shore gradient, with higher salinity nearshore (e.g., salinity was 0.4 greater at DB than at NL in December 1997, Fig. 6). In the austral summer of 1997–1998, reduced rainfall and enhanced evaporation linked to El Niño are assumed to have reversed the cross-shore gradients.

The longshore difference in SSS was very low from 1997 to 1999 (less than 0.05 between SL and NL, see Fig. 6), then rose to 0.12 in September 2000 and 0.17 in March 2001. This difference increased substantially several months after the decrease in salinity attributed to the La Niña-related negative anomaly in regional oceanic waters.

The differences in salinity within the lagoon are enhanced by significant freshwater inputs (Fig. 3).

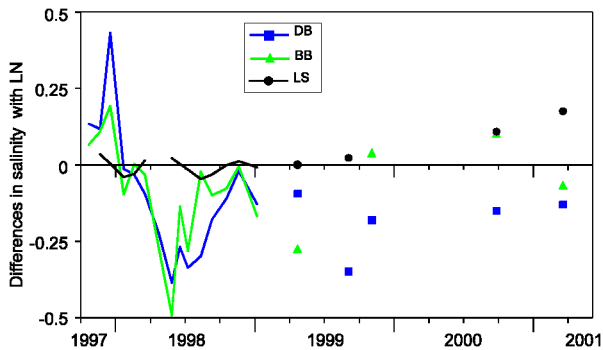


Fig. 6. Differences between salinity averaged within the reference zones and salinity in the North Lagoon.

Fig. 6. Différences entre la salinité moyenne sur chaque zone de référence et la salinité dans le Nord du lagon.

Nearshore salinity decreased from January to April 1998 (Fig. 5), because rainfall resumed after several months of severe drought. The cross-shore difference was maximum in May (0.5, see Fig. 6), while the river discharges had been significant since March. Then the cross-shore SSS gradients regularly flattened up to November 1998, while river flow-rates fell drastically from June to August.

Longshore and cross-shore SSS gradients were steeper from 1999 to early 2001, coincident with more intense rainfall (La Niña) than during the 1997/1998 El Niño. Salinity differences within the lagoon (<0.5) were less than the seasonal (0.7) and inter-annual (up to 0.8) variations of mean monthly SSS nearshore.

In conclusion, salinity of oceanic waters penetrating into the lagoon is subject to interannual variations (ENSO) higher than their seasonal variations. They induce less salted waters during a La Niña event in the lagoon. SSS in coastal areas are also influenced by the meteorological and hydrological ENSO consequences. During El Niño, freshwater inputs are low, and evaporation is enhanced due to stronger winds and to a reduced cloud cover. That may induce inverse horizontal salt gradients in summer, with saltier waters in the bays than in the lagoon. During La Niña event, freshwater inputs increase and evaporation decreases. That induces much lower salinity in coastal zones than in the lagoon during La Niña. Salinity is thus seen varying in the same way nearshore than at a regional scale under ENSO influence, with variations amplified due to the meteorological and hydrological ENSO influences.

4.2. Temperature distribution and its variability

Seasonal changes in temperature are higher than interannual variations (Fig. 7). ENSO induces a zonal dis-

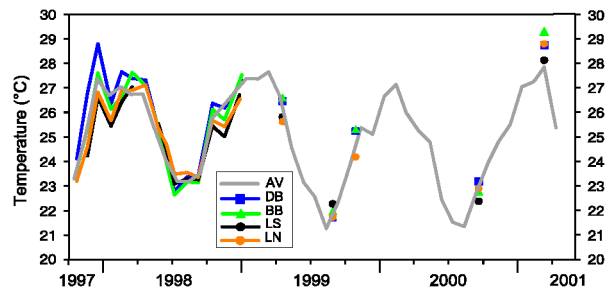


Fig. 7. Temporal variation of temperature (in $^{\circ}\text{C}$) averaged within the reference zones and of monthly temperature (in $^{\circ}\text{C}$) at Anse Vata.

Fig. 7. Différences (en $^{\circ}\text{C}$) entre la température moyenne sur chaque zone de référence et la température mensuelle moyenne à l'anse Vata.

placement of the Pacific Warm Pool, but the meridian change in temperature is weak over the Southwest Pacific [7]. However, we noted that the lowest monthly temperature at Anse Vata in 1998 (August) was substantially higher than the lowest monthly temperatures in 1999 and 2000. A study of the 23-year data at Anse Vata (1977–2001) shows that when the 6-month averaged SOI increases between August–January and the following February–July period, the change in the lowest monthly SST from one year to the next is significantly correlated with this SOI variation ($r^2 = 0.62$, $p < 0.01$). The lowest monthly SST is higher than normal during the austral winter which follows an El Niño event.

Cross-shore temperature gradients invert seasonally. The saltier waters in the bays in December 1997 were also warmer, the cross-shore temperature difference being at its maximum ($>2^{\circ}\text{C}$). The cross-shore SST gradient then flattened regularly until May 1998. From June to August 1998, the less saline coastal waters were also colder than the SL waters. In September 1998, temperature was quite homogeneous within the lagoon, with variations of less than 0.2°C . At the beginning of the 1998–1999 summer, SST increased more rapidly in the bays than in the main part of the lagoon. Temperature was thus higher (lower) near the coast than in the lagoon during summer (winter).

In conclusion, the spatial distribution of temperature within the lagoon presents cross-shore temperature gradients that inverse seasonally. Temperature is higher (respectively, lower) in the bays and near the coast than in the lagoon during summer (respectively, winter). Temperature is thus seen varying in the same way in the lagoon as at a regional scale with seasonal variations amplified nearshore. The cross-shore SST gradient is maximal in December 1997, during an El Niño summer.

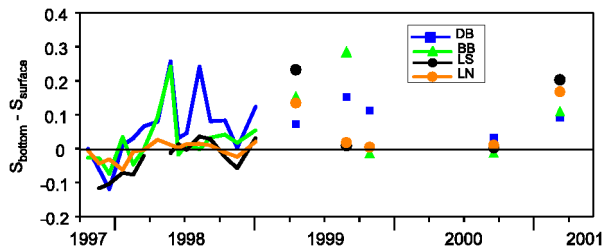


Fig. 8. Difference between bottom and surface salinity within the reference zones.

Fig. 8. Différence entre la salinité de surface et la salinité de fond moyennes dans les zones de référence.

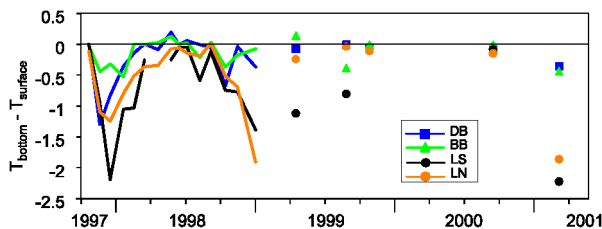


Fig. 9. Difference between bottom and surface temperature within the reference zones.

Fig. 9. Différence entre la température de surface et la température de fond moyennes dans les zones de référence.

4.3. Stratification

Haline stratification, if any, was sporadic and non-uniform (Fig. 8). Higher salinity at the surface than at the bottom could only be observed during the 1997–1998 austral summer, an El Niño episode. During this dry period (strong negative rainfall anomaly), stronger winds combined with summer radiation increased evaporation, inducing higher salinity near the surface. Lower salinity was observed in surface waters during the La Niña episode, characterized by greater river discharges (Fig. 3). The greatest vertical salinity changes were observed near river mouths.

Thermal stratification is seasonal and occurs from October to March during austral summer (Fig. 9). When stratification develops, the thermocline never reaches the bottom in the deeper areas while the entire water column is warmed over the shallower areas, making them vertically more homogeneous. During summer thermal stratification, temperature distribution is thus more homogeneous at the surface than at the bottom.

In conclusion, a thermal stratification settles during the warm and dry season from October to December (see, e.g., December 1997 in Fig. 6), and then thermohaline stratification is observed during the warm and wet season from January to April (see, e.g., March 2001

in Figs. 5 and 6). The existence of haline stratification all the year long depends on the river discharges and is thus more likely during La Niña periods. Thermohaline stratification is thus enhanced in summer during La Niña periods as in March 2001.

5. Conclusion

The measurements allowed us to sketch the main features of the physical behaviour of the SLNC, a coral reef lagoon located in the southwestern Pacific, under non-storm conditions. The salinity of oceanic waters entering the lagoon is subject to ENSO-related variations, greater than seasonal variations, with lower salinity during a La Niña episode. During El Niño, freshwater inputs are low and evaporation is enhanced due to stronger winds and reduced cloud cover. This may reverse the cross-shore salinity gradients in summer, with saltier waters in the bays. During La Niña, freshwater inputs increase and evaporation decreases, inducing lower salinity in coastal areas. Seasonal changes in SST in the lagoon are larger than interannual variations. The cross-shore temperature gradients invert seasonally, temperature being higher (lower) near the coast than in the lagoon during summer (winter). A thermal stratification develops in the lagoon during the dry-warm season (October to December), followed by a thermohaline stratification during the wet-warm season (January to April). The existence of haline stratification during intermediate and cool seasons depends on river discharges and is thus more likely to occur during La Niña episodes. Haline stratification, if any, was observed to be enhanced in coastal areas. Accordingly, bays and coastal zones amplify seasonal and inter-annual regional variations of salinity due to ENSO and regional variations of temperature, with a higher cross-shore thermal gradient in summer during El Niño.

The local amplification of temperature and salinity in the lagoon observed in austral summer during an El Niño episode also occurs in the context of global warming. The conditions of release of coral bleaching episodes induced by the climate change depend on the regional variations of temperature and salinity and on the modifications of the regional wind and rainfall which should be studied jointly. The physical functioning of the lagoon sketched in this paper can help the understanding of the response of the lagoonal ecosystem to climate change, such as species distribution and abundance (biodiversity) as well as their vulnerability (coral bleaching) [5].

Acknowledgements

This study was supported by IRD, by the French *Programme national Environnement côtier* (PNEC) and by the ZoNéCo program. The authors thank the crews of R.V. Alis, Coris and Dawa. R. Gouyet and B. Gernigon (hydrology), D. Varillon and P. Waïgna (Anse Vata), L. Maitrepierre from Météo-France (rainfall, wind at Amédée Lighthouse), and all who provided us with datasets, are gratefully acknowledged.

References

- [1] B.E. Brown, Coral bleaching: causes and consequences, *Coral Reefs* 16 (1997) 129–138.
- [2] R. Berkelmans, J.K. Oliver, Large scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef, *Coral Reefs* 18 (1999) 55–60.
- [3] T. Delcroix, O. Lenormand, ENSO signals in the vicinity of New Caledonia, South Western Pacific, *Oceanol. Acta* 20 (1997) 481–491.
- [4] P. Douillet, S. Ouillon, E. Cordier, A numerical model for fine suspended sediment transport in the south-west lagoon of New-Caledonia, *Coral Reefs* 20 (2001) 361–372.
- [5] J.-Y. Georges, Y. Le Maho, Réponses des écosystèmes marins et insulaires aux changements climatiques, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 551–560.
- [6] P.W. Glynn, Coral reef bleaching: ecological perspectives, *Coral Reefs* 12 (1993) 1–17.
- [7] Y. Gouriou, T. Delcroix, Seasonal and ENSO variations of sea surface salinity and temperature in the South Pacific Convergence Zone during 1976–2000, *J. Geophys. Res.* 107 (C12) (2002) 8011.
- [8] P. Labrosse, R. Fichez, R. Farman, T. Adams, New Caledonia, in: C. Sheppard (Ed.), *Seas at the Millennium, an Environmental Evaluation*, vol. 2, Elsevier, Amsterdam, 2000, pp. 723–736.
- [9] P. Liston, M.J. Furnas, A.W. Mitchell, E.A. Drew, Local and mesoscale variability of surface water temperature and chlorophyll in the northern Great Barrier Reef, Australia, *Cont. Shelf Res.* 12 (1992) 907–921.
- [10] R.L. Miller, J.F. Cruise, Effects of suspended sediments on coral growth: evidence from remote sensing and hydrologic modeling, *Remote Sens. Environ.* 53 (1995) 177–187.
- [11] P.J. Mumby, J.R.M. Chisholm, A.J. Edwards, C.D. Clark, E.B. Roark, S. Andrefouët, J. Jaubert, Unprecedented bleaching-induced mortality in *Porites* spp. at Rangiroa Atoll, French Polynesia, *Mar. Biol.* 139 (2001) 183–189.
- [12] K. Nadaoka, Y. Nihei, R. Kumano, T. Yokobori, T. Omija, K. Wakaki, A field observation on hydrodynamic and thermal environments of a fringing reef at Ishigaki Island under typhoon and normal atmospheric conditions, *Coral Reefs* 20 (2001) 387–398.
- [13] J.B. Nicet, T. Delcroix, ENSO-related precipitation changes in New Caledonia, Southwestern Tropical Pacific: 1969–1998, *Mon. Weather Rev.* 128 (2000) 3001–3006.
- [14] E. Pesin, S. Blaize, D. Lacoste, *Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie*, Météo-France, Nouméa, 1995.
- [15] W. Skirving, J. Guinotte, The Sea Surface Temperature story on the Great Barrier Reef during the coral bleaching event of 1998, in: E. Wolanski (Ed.), *Oceanographic Processes of Coral Reefs: Physical and Biological Links in the Great Barrier Reef*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2001, pp. 301–313.
- [16] S.R. Wing, J.J. Leichter, Storm-generated physical variability on Conch Reef, Florida Keys, USA, in: H.A. Lessios, I.G. Macintyre (Eds.), *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, vol. 2, Smithsonian Tropical Research Institute, Balboa, CA, 1997, pp. 1097–1101.
- [17] E. Wolanski, *Physical Oceanographic Processes of the Great Barrier Reef*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1994.
- [18] E. Wolanski (Ed.), *Oceanographic Processes of Coral Reefs: Physical and Biological Links in the Great Barrier Reef*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2001.
- [19] E. Wolanski, G.L. Pickard, Long-term observations of currents on the central Great Barrier Reef continental shelf, *Coral Reefs* 4 (1985) 47–57.