

RAPPORT DE STAGE
SCIENCES DE LA MER

Mémoire de Maîtrise
Sciences de l'Environnement
Option Océanographie Physique

De l'impact d'ENSO sur l'environnement
océanique et météorologique
des Iles Marquises

Avril / Juin 2000

Emilie NICOLAS

Université de la Méditerranée AIX-MARSEILLE II
Centre d'Océanologie de Marseille
(Observatoire des Sciences de l'Univers)

Sous la direction de Thierry DELCROIX
Groupe ECOP

Institut de recherche pour le développement



Centre de Nouméa

RAPPORT DE STAGE
SCIENCES DE LA MER

Mémoire de Maîtrise
Sciences de l'Environnement
Option Océanographie Physique

De l'impact d'ENSO sur l'environnement
océanique et météorologique
des Iles Marquises

Avril / Juin 2000



Emilie NICOLAS

Université de la Méditerranée AIX-MARSEILLE II
Centre d'Océanologie de Marseille
(Observatoire des Sciences de l'Univers)

Sous la direction de Thierry DELCROIX
Programme ECOP
<http://noumea.ird.nc/ECOP/>



Institut de recherche
pour le développement

© IRD, Nouméa, 2000

/Nicolas, E.

De l'impact d'ENSO sur l'environnement océanique et météorologique des Iles
Marquises Avril / Juin 2000

Nouméa : IRD, Avril / Juin 2000. 35 p.
Rapport de stage; Sci. Mer; Océanogr. Phys.

EL NINO; CLIMAT; ANOMALIE; ANALYSE DE DONNEES; IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT;
VENT DE SURFACE; TEMPERATURE DE SURFACE; SALINITE DE SURFACE; PRECIPITA-
TION; NIVEAU MARIN / MARQUISES; POLYNESIE FRANÇAISE

REMERCIEMENTS

Ces 2 mois passés au centre IRD de Nouméa, Nouvelle-Calédonie, furent pour moi un enrichissement sans égal. Tout d'abord, cela m'a permis de connaître toutes les personnes qui travaillent en océanographie, et de bénéficier de leurs conseils lors de la rédaction de ce rapport.

J'ai plus particulièrement côtoyé les gens du laboratoire d'océanographie physique qui ont pu me faire partager leur goût pour la recherche. J'ai eu la chance d'être aidée par Yves Gouriou pour la partie bibliographique, avec toutes les préoccupations qu'elle engendre... Sans la patience de François Masia, j'aurais eu beaucoup plus de mal à utiliser les outils informatiques. Je remercie Francis Gallois et David Varillon pour l'extraction des données de la station côtière, ainsi qu'Alexandre Finet de Météo-France en Polynésie Française, qui m'a communiqué les données de précipitations in situ. Je remercie également Christian Hénin pour m'avoir expliqué le cadre du programme ECOP, Guy Cabioch pour m'avoir prêté des documents sur les Marquises, Pierre Waigna pour sa disponibilité et Luc Foucher pour m'avoir montré l'aspect technique du travail en océanographie sur les navires de commerce.

Merci encore à Gaël Alory pour ses conseils et ses explications précieuses qui m'ont permis de bien comprendre l'enchaînement de mon étude. Et bien sûr, rien n'aurait été réalisé sans l'œil avisé de Thierry Delcroix, mon directeur de stage, qui m'a donné tout au long de ce travail de très bons conseils scientifiques. De plus, il a su me conseiller justement lors de la rédaction de ce rapport en le corrigeant et en me suggérant de nouvelles idées.

Merci à tous de m'avoir aidée pour que ce stage se déroule dans les meilleures conditions qui soient.

SOMMAIRE

<i>Résumé et abstract</i>	1
1. INTRODUCTION	2
1. 1. <i>Présentation de l'organisme d'accueil</i>	2
1. 2. <i>Cadre du sujet</i>	2
1. 3. <i>Etat moyen du Pacifique tropical</i>	2
1. 4. <i>ENSO</i>	5
1. 4. 1. <i>En situation El Niño</i>	5
1. 4. 2. <i>En situation La Niña</i>	6
1. 4. 3. <i>Marqueur d'ENSO</i>	6
2. ORIGINE DES DONNEES	7
2. 1. <i>Les données océanographiques</i>	7
2. 1. 1. <i>La température de surface</i>	7
2. 1. 2. <i>La salinité de surface</i>	7
2. 1. 3. <i>Les anomalies de hauteur dynamique</i>	7
2. 1. 4. <i>Le niveau de la mer</i>	7
2. 2. <i>Les données météorologiques</i>	8
2. 2. 1. <i>Les précipitations</i>	8
2. 2. 2. <i>Les vents</i>	8
2. 2. 3. <i>L'indice d'oscillation australe</i>	8
3. METHODES D'ANALYSE	9
3. 1. <i>Extraction des données</i>	9
3. 1. 1. <i>Zone d'étude précise de chaque paramètre</i>	9
3. 1. 2. <i>Format commun des grilles</i>	9
3. 2. <i>Méthodes statistiques</i>	9
3. 2. 1. <i>La moyenne</i>	9
3. 2. 2. <i>L'écart type</i>	9
3. 2. 3. <i>Le calcul des corrélations</i>	10
3. 3. <i>Analyse du signal interannuel</i>	10
3. 4. <i>Analyse du signal saisonnier : l'année type</i>	11
4. RESULTATS	12
4. 1. <i>Données non filtrées</i>	12
4. 1. 1. <i>La température de surface</i>	12
4. 1. 2. <i>La salinité de surface</i>	12
4. 1. 3. <i>Les anomalies de hauteur dynamique et de niveau de la mer</i>	12
4. 1. 4. <i>Les précipitations</i>	12
4. 1. 5. <i>Les vents</i>	12
4. 2. <i>La structure moyenne</i>	15
4. 3. <i>Le signal saisonnier</i>	15
4. 3. 1. <i>Part relative du signal saisonnier</i>	15
4. 3. 2. <i>L'année type</i>	15
4. 4. <i>Signature climatique d'ENSO</i>	19
4. 4. 1. <i>Les anomalies de température de surface</i>	19
4. 4. 2. <i>Les anomalies de salinité de surface</i>	20
4. 4. 3. <i>Les anomalies de précipitations</i>	20
4. 4. 4. <i>Les anomalies de hauteur dynamique</i>	20
4. 4. 5. <i>Les anomalies de vents</i>	20
5. CONCLUSION	23
<i>Bibliographie</i>	25
<i>Annexes</i>	26

RESUME

Un ensemble de données, collectées au voisinage des Îles Marquises (7°S-11°S, 135°W-145°W), est analysé sur la période 1961-1999 afin d'améliorer notre connaissance de l'environnement régional et de sa variabilité à l'échelle saisonnière et interannuelle (phénomène El Niño Southern Oscillation, ENSO). Les structures moyennes et les variations saisonnières de la température de surface, de la salinité de surface, des précipitations, des anomalies de hauteur dynamique et des vents sont d'abord décrites. Les anomalies liées à ENSO sont ensuite identifiées pour chaque paramètre en les comparant à l'Indice d'Oscillation Australe (SOI).

En général, au cours des événements El Niño (SOI<0), la température de surface présente des anomalies positives de 0,5/1,2°C, la salinité de surface diminue de 0,2/0,8 et on observe une augmentation des anomalies de hauteur dynamique de l'ordre de 0,03/0,06m.dyn. Les précipitations augmentent de 0,4/1,0m/an et les vents faiblissent. Les anomalies observées pendant les événements El Niño sont de signe contraire pendant les événements La Niña. L'amplitude des anomalies observées n'est pas proportionnelle à la SOI. Les mécanismes liant les anomalies régionales aux anomalies à grande échelle sont discutés qualitativement.

Cette étude a été effectuée au sein du laboratoire d'océanographie physique (programme Etude Climatique de l'Océan Pacifique tropical), au centre IRD de Nouméa d'avril à juin 2000.

ABSTRACT

In situ and satellite-derived data collected in an area enclosing the Marquesas Islands (7°S-11°S, 135°W-145°W) are analysed for the 1961-1999 period, in order to improve our knowledge of the regional environment, with emphasis on seasonal and interannual variability (i.e. El Niño Southern Oscillation, ENSO). Long-terms means and seasonal changes in sea-surface temperature, sea-surface salinity, precipitation, sea-level and surface winds are first described to set the context. Through comparisons with the Southern Oscillation Index (SOI), it is then demonstrated that there are signals in these parameters that are connected with ENSO.

Generally speaking, during the warm phase of ENSO (SOI<0, El Niño), we observe warmer-than-average sea-surface temperature (+0,5/1,2°C), a sea-surface salinity decrease (-0,2/0,8) and a sea-level increase (+3/6cm). There is a notable rainfall increase (+0,4/1,0m/yr) together with a weakening of the trade-winds. Conversely, anomalies of similar magnitude but of opposite sign are detected during the cold phase of ENSO (La Niña, SOI>0). The ENSO-related anomalies are, however, not strictly proportional to the SOI. The mechanisms which connect these regional anomalies to ENSO evolution at low-latitudes are qualitatively discussed.

This investigation was performed while visiting the Physical Oceanography Laboratory (Etude Climatique de l'Océan Pacifique tropical program) at IRD center in Nouméa, New Caledonia, from April to June 2000.

1. INTRODUCTION

1. 1. Présentation de l'organisme d'accueil

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM) est un établissement public à caractère scientifique et technologique, placé conjointement sous la tutelle des Ministères de la Recherche et de la Coopération.

Depuis plus de 50 ans, les recherches de l'Institut portent sur les relations entre l'homme et son environnement dans les milieux tropicaux et méditerranéens, dans la perspective d'un développement durable de ces régions. Il existe trois thèmes de recherche principaux :

- milieux et environnement
- ressources vivantes
- société et santé.

L'IRD emploie 2300 agents qui se répartissent en personnel scientifique, technique, administratif et ingénieur. Les centres IRD sont présents dans plus de 40 pays du monde tropical, en France métropolitaine et dans les territoires et départements d'outre-mer.

Le centre IRD de Nouméa, créé en 1946, est le plus grand centre hors de la France métropolitaine et compte 152 personnes en avril 2000. L'ensemble des départements réalise une vingtaine de programmes, dans 15 disciplines différentes, en rapport avec des sujets aussi variés que l'environnement marin et terrestre ou encore les communautés humaines. Le centre de Nouméa, par son importance et ses activités, préside la délégation de l'IRD pour le Pacifique et privilégie les rapports avec les organismes de recherche régionaux et l'Université de Nouvelle-Calédonie.

1. 2. Cadre du sujet

Cette étude porte sur l'impact d'El Niño Southern Oscillation (ENSO) sur l'environnement océanique et météorologique des Iles Marquises (figure 1, Atlas of the South Pacific, 1986). Elle s'inscrit dans le cadre du programme international CLImate VARiability and prediction (CLIVAR 1995-2010) et du programme IRD Etude Climatique de l'Océan Pacifique tropical (ECOP) qui fait partie du Programme National d'Etudes de la Dynamique du Climat. CLIVAR est placé sous l'égide du Programme Mondial de Recherche sur le Climat de l'Organisation Météorologique Mondiale.

Plusieurs études à l'échelle du Pacifique tropical suggèrent l'influence d'ENSO sur la région des Marquises. Le but du stage est de quantifier cette influence en se concentrant sur une région d'échelle moyenne (un rectangle de coordonnées 7°S-11°S, 135°W-145°W) centrée sur ces îles. Cette région comprend de nombreuses observations océanographiques et météorologiques de base, disponibles au centre de Nouméa. Elles incluent des mesures hydrologiques (stations bouteille, Conductivity Temperature Depth, CTD), des mesures de profils thermiques (eXpandable BathyThermograph, XBT), des mesures de température et de salinité de surface, des mesures du niveau de la mer (marégraphe et altimétrie), des mesures de vent et de précipitations (satellite et in situ).

Le rapport de stage est organisé de la manière suivante : après définition d'un état moyen du Pacifique tropical et des Marquises (chapitre 1), nous présentons les données utilisées (chapitre 2) et les traitements effectués (chapitre 3). Nous quantifions ensuite les anomalies permettant d'illustrer les effets d'ENSO, en dégageant le signal saisonnier et l'interannuel (chapitre 4), ce dernier caractérisant ENSO. Le chapitre 5 est une synthèse des résultats obtenus.

1. 3. Etat moyen du Pacifique tropical

Dans le Pacifique tropical, circulations océanique et atmosphérique sont étroitement liées, chacune réagissant rapidement aux fluctuations de l'autre. En moyenne, les alizés (vents dominants, de nord-est dans l'hémisphère nord et de sud-est dans l'hémisphère sud, voir figure) provoquent une accumulation d'eau chaude vers le nord de l'Australie et les Philippines, appelée « warm pool » (figure 3). C'est là que se trouve la zone de convection atmosphérique (basses pressions) de la branche ascendante de la cellule de Walker, impliquant un climat chaud et humide. Pour équilibrer cette circulation atmosphérique, on trouve à l'est au niveau de l'équateur la zone de subsidence (hautes pressions) de cette cellule, d'où un climat plutôt sec et froid près des îles Galapagos. Les alizés convergent vers 10°N dans la Zone de Convergence Intertropicale (ITCZ) et le long d'un axe Papouasie-Tahiti dans la Zone de Convergence du Pacifique Sud (ZCPS). Ces zones sont associées à de fortes précipitations (figure 2.d).

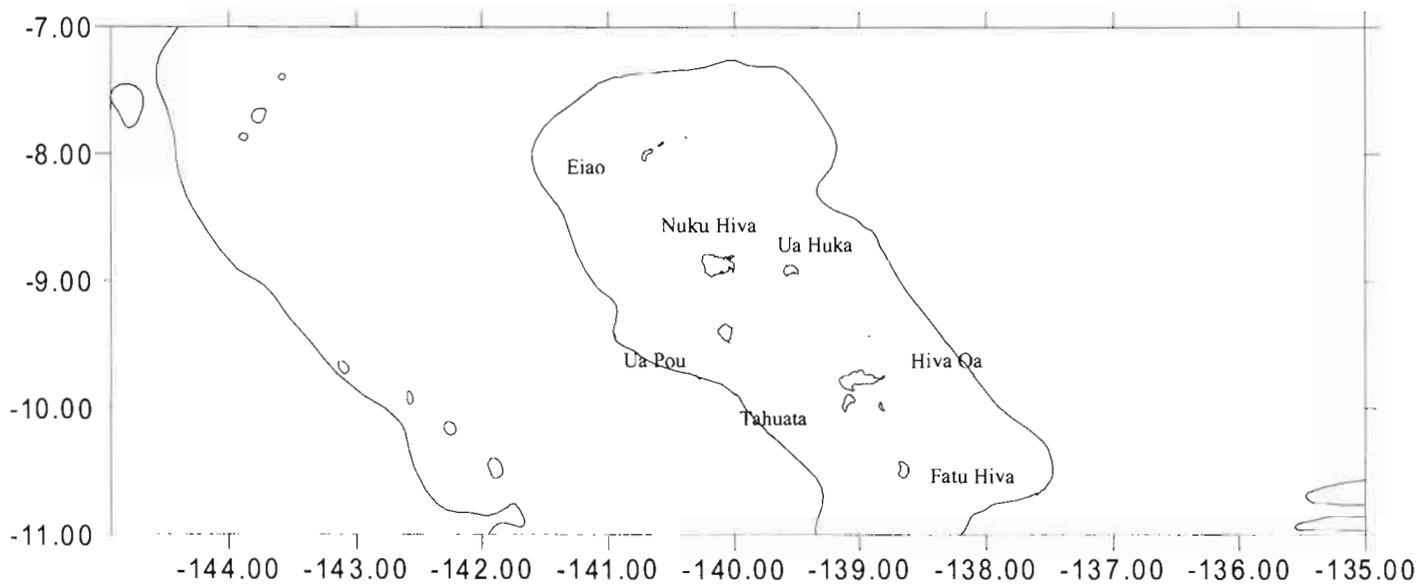
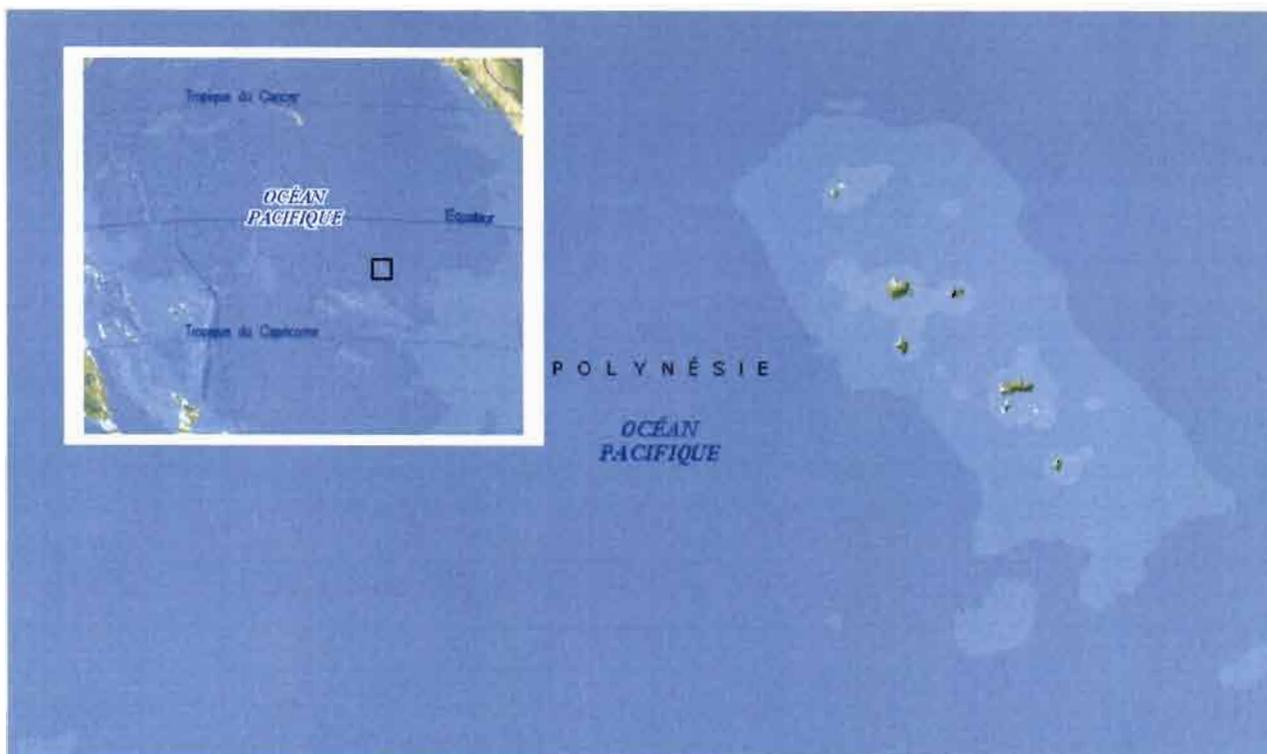


Figure 1 : Situation des Iles Marquises dans l'Océan Pacifique et visualisation de la zone d'étude.

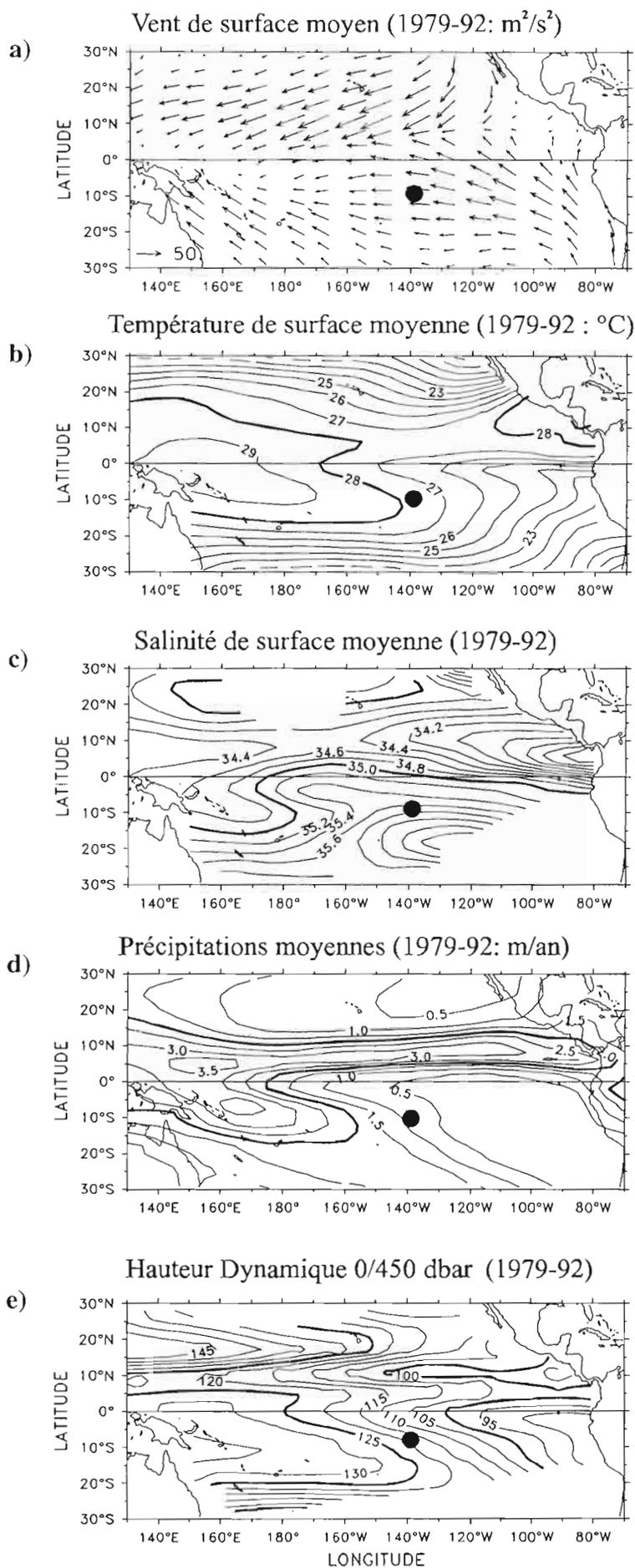


Figure 2 : Etat moyen du Pacifique avec de haut en bas : a) les vents, b) la température de surface, c) la salinité de surface, d) les précipitations, e) les anomalies de hauteur dynamique (cm.dyn). Les moyennes sont calculées sur la période 1979-1992. Les Iles Marquises sont représentées par le cercle noir vers 9°S, 140°W. D'après Delcroix (1998).

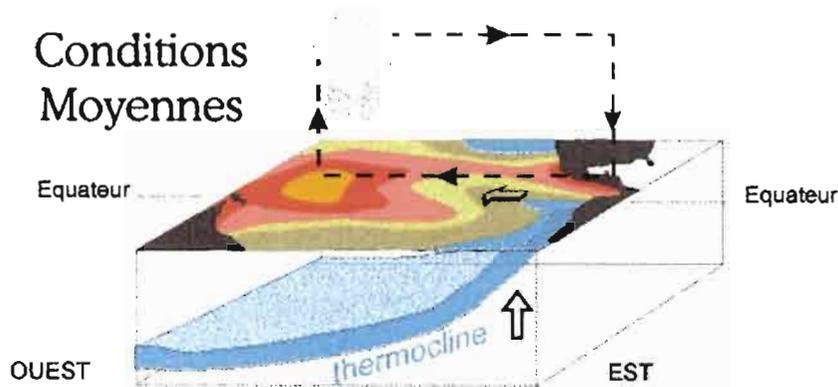


Figure 3 : Situation moyenne dans le Pacifique tropical, avec mise en évidence de la « warm pool » en jaune et de l'inclinaison de la thermocline.

Dans la bande équatoriale, la thermocline est inclinée, plus haute à l'est qu'à l'ouest. Le long des côtes du Chili et du Pérou, des eaux froides riches en sels nutritifs, remontent à la surface par un phénomène d'upwelling dû au transport d'Ekman. La température de surface (Sea Surface Temperature) passe de 29° C au niveau de la « warm pool » à 22° C près des côtes péruviennes.

La salinité de surface présente des variations importantes dans tout le bassin Pacifique (figure 2.c). La distribution spatiale fait apparaître 2 lentilles d'eau salée, une au nord-ouest des îles Hawaiï, l'autre au sud-est de l'archipel des Tuamotu. On observe des eaux relativement peu salées au niveau des zones de convergence car la salinité de surface est liée au bilan précipitation-évaporation.

Les anomalies de hauteur dynamique (0/450 dbar) représentent l'élévation relative du niveau de la mer (figure 2.e). Les gradients horizontaux de niveau de la mer induisent des courants géostrophiques de surface dont le sens est régi par la force de Coriolis qui dévie les masses d'eau à gauche de leur sens de propagation dans l'hémisphère Sud.

1. 4. ENSO

1. 4. 1. En situation El Niño

Des vents d'ouest apparaissent à l'extrémité ouest du bassin. Cela se traduit par un déplacement de la « warm pool » vers le centre du Pacifique équatorial. Les alizés s'affaiblissent, voire disparaissent. La zone de fortes précipitations (et des cyclones) se déplace également vers l'est, provoquant des pluies abondantes sur les îles du centre du Pacifique, puis de nombreuses inondations sur la côte ouest de l'Amérique du Sud (figure 5) . La thermocline se redresse. Les eaux froides ne remontent plus le long des côtes du Chili et du Pérou, les eaux restent chaudes et les espèces marines habituelles se raréfient rapidement avec la disparition des sels nutritifs (figure 4) .

L'origine du nom « El Niño », l'Enfant Jésus, est attribuée aux pêcheurs péruviens qui, au moment de Noël, ramenaient dans leurs filets des poissons tropicaux à la place des anchois qui abondent dans les zones d'upwelling (Voituriez et Jacques, 1999). Au niveau atmosphérique, le basculement des pressions entre l'est et l'ouest du bassin pacifique s'appelle l'Oscillation Australe (Southern Oscillation, SO) et fait partie du phénomène global ENSO.

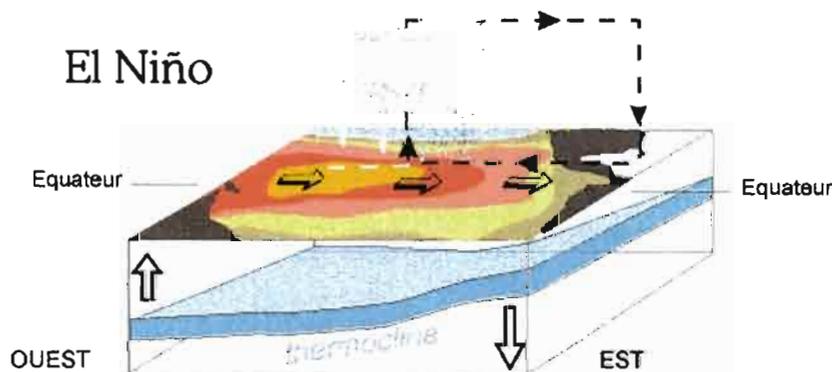


Figure 4 : Schéma d'une situation « El Niño ».

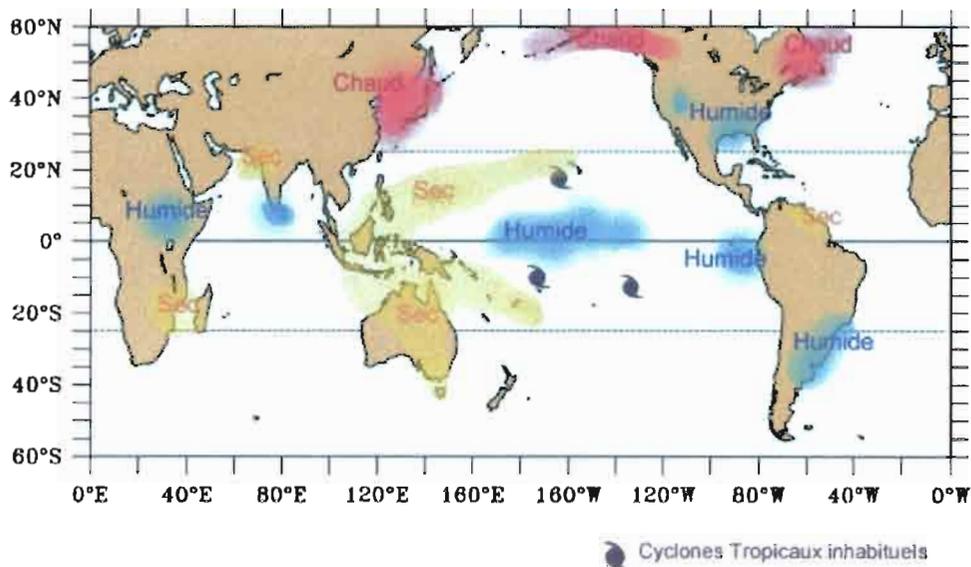


Figure 5 : Impacts climatiques globaux d'El Niño.

1. 4. 2. En situation La Niña

Les alizés se renforcent et induisent des températures plus froides que la moyenne dans le Pacifique tropical. L'upwelling équatorial s'intensifie et la pente de la thermocline s'accroît. La zone de fortes précipitations se déplace plus à l'ouest, avec des pluies abondantes sur l'Indonésie (figure 6).

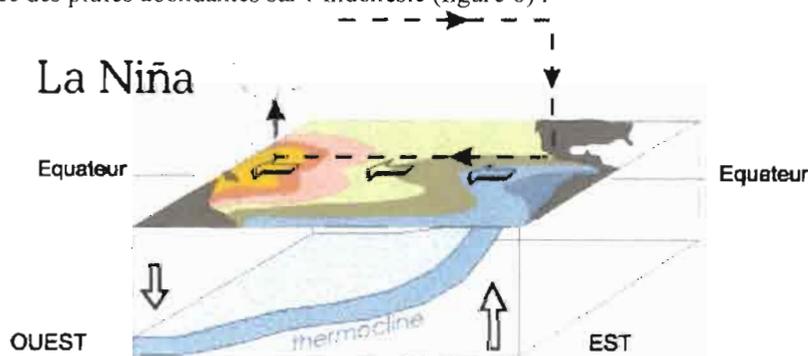


Figure 6 : Schéma d'une situation « La Niña ».

1. 4. 3. Marqueur d'ENSO

Le Pacifique tropical « oscille » entre les états El Niño et La Niña (Philander, 1985). Ces phénomènes étant couplés avec la circulation atmosphérique, on peut les caractériser (Walker, 1923) en mesurant la différence de pression atmosphérique au sol entre Darwin (12°S, 131°E) et Tahiti (17°S, 149°W). Cette différence est appelée Indice d'Oscillation Australe (figure 7) ; en période El Niño, elle est négative (1982, 1987, 1991, 1992-1993, 1995, 1997-1998) et elle est positive en période La Niña (1973-1976, 1988-1989, 1996, 1998-2000).

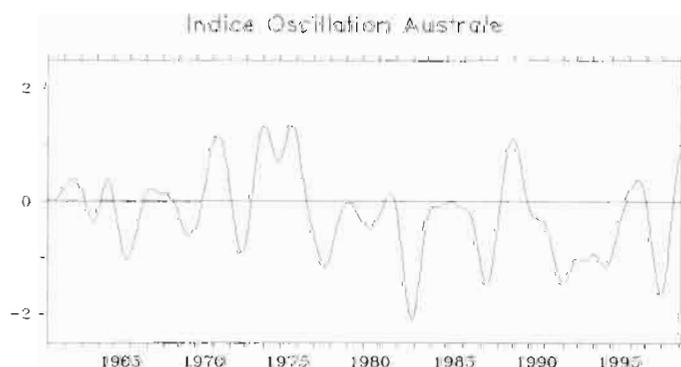


Figure 7 : Valeurs de l'Indice d'Oscillation Australe entre janvier 1961 et décembre 1998. Les valeurs mensuelles ont été lissées par un filtre de Hanning sur 25 mois.

2. ORIGINE DES DONNEES

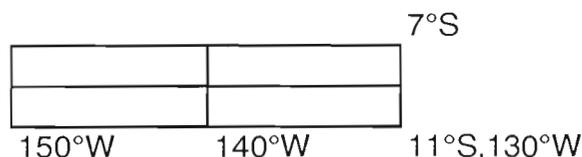
Les paramètres étudiés s'organisent en 2 catégories :

- les données océanographiques telles la température et la salinité de surface, les anomalies de hauteur dynamique et les variations du niveau de la mer.
- les données météorologiques, telles les précipitations, les vents et l'indice d'oscillation australe.

2. 1. Les données océanographiques

2. 1. 1. La température de surface

La température de surface (SST) est issue des données mensuelles de 2° de latitude par 2° de longitude, faites par Reynolds et Smith (1994) sur la période 1950-1994. Elles ont été converties en grilles de 2° de latitude par 10° de longitude de 1961 à 1994. La zone étudiée (7°S-11°S, 135°W-145°W) recouvre 4 rectangles :



Le centre de chacun des rectangles représente un point de grille qui prend toutes les données du rectangle de 2°*10° qui l'entoure.

On disposait aussi de données mensuelles de 1982 à 1999, « grillées » 1°*1°, mais il existait un biais entre la moyenne sur la période 1961-1982 et 1982-1999. L'origine de ce biais (0,5°C) n'ayant pas été élucidée, les données les plus récentes n'ont pas été utilisées.

Par ailleurs, le groupe ECOP de l'IRD a installé un thermomètre au point de coordonnées 8°56'S, 140°5,6'W près de l'île Nuku Hiva, en septembre 1997. Il est changé tous les 6 mois par une équipe de plongeurs. Les mesures ont une résolution temporelle de 15 minutes. J'ai fait des moyennes journalières.

2. 1. 2. La salinité de surface

La salinité de surface (SSS) est déduite d'environ 270 000 mesures de diverses origines :

- mesures au seau collectées par des navires marchands gérés à partir de l'IRD-Nouméa et participant au programme « Ship Of Opportunity Programme » (SOOP).
- mesures hydrologiques avec des sondes CTD de mesure de température et de salinité faites pendant plus de 200 campagnes en mer.
- thermosalinographes installés sur les navires de commerce gérés à partir de l'IRD-Nouméa et participant au programme SOOP, appareils que j'ai pu voir quand les bateaux sont au port de Nouméa.
- thermosalinographes installés sur les mouillages « Tropical Atmosphere Ocean » (TAO, bouées de mesures océanographiques du programme TOGA, annexe 2).

La validation et le « grillage » de ces données mensuelles ont été faits par Delcroix (1998), ce qui donne des grilles de 2°*10° de 1961 à 1995. L'incertitude sur la mesure est de l'ordre de 0,1 (Delcroix et Hénin, 1991). Il manque 25 valeurs mensuelles dans la série temporelle (annexe 7).

2. 1. 3. Les anomalies de hauteur dynamique

La hauteur dynamique (Hd) résulte d'environ 240 000 profils de température validés sur la période 1979-1995. Ils sont réalisés par des XBT lancés par des navires océanographiques et marchands. Ces profils sont complétés par les mesures des mouillages TAO et des sondes CTD. La température est interpolée linéairement tous les 10 m dans les premiers 250 m et tous les 25 m jusqu'à 450 m. Les mesures XBT étant débarrassées des erreurs grossières, une validation supplémentaire a été effectuée, en gardant les valeurs dans une fourchette de ± 5 , ± 4 , $\pm 3,5$ fois l'écart type, dans des rectangles de 2°*10°. Environ 1% des valeurs fut rejeté. La distribution des mesures de température étant hétérogène en espace et en temps, une grille mensuelle de 2° de latitude par 10° de longitude a été construite (Delcroix, 1998). Pour chaque point de grille, le profil de température est converti en hauteur dynamique 0/450 dbar, grâce aux courbes T-S locales de Levitus et al. (1994).

2. 1. 4. Le niveau de la mer

On dispose aussi de données altimétriques satellitaires, le principe de la mesure est donné en annexe 3. Leur résolution spatiale est de $0,5^\circ$ de latitude par 5° de longitude. Elles sont moyennées tous les 5 jours. Celles issues du satellite GEOSAT sont validées de novembre 1986 à février 1989, les mesures de février à octobre 1989 étant douteuses selon Masia et Delcroix (1996). GEOSAT repasse par le même point tous les 17 jours et l'erreur sur ses mesures est de ± 5 cm. Celles issues du satellite TOPEX/POSEIDON sont disponibles d'octobre 1992 à septembre 1998. TOPEX/POSEIDON repasse au même endroit tous les 10 jours et on estime que l'erreur sur ces mesures est de ± 2 cm, ce satellite étant plus récent.

2. 2. Les données météorologiques

2. 2. 1. Les précipitations

Les données de précipitations (P) proviennent des travaux de Xie et Arkin (1996), sur la période 1979-1995. Les valeurs des précipitations ont été construites à partir d'une combinaison de relevés pluviométriques, effectués par des stations météorologiques, d'estimations satellitaires de 5 types (GPI, OPI, SSM/I émission et MSU) et d'estimations issues d'un modèle numérique. Les données mensuelles d'origine de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ont été interpolées linéairement pour obtenir des grilles 2° de latitude $\times 10^\circ$ de longitude. Les données des précipitations sur la période 1979-1999 complètent l'étude, elles sont présentées en annexe 5 mais ces dernières sont grillées $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. L'erreur est de l'ordre de 50%.

On dispose aussi des données de P in situ avec un pluviomètre de Météo-France installé à Atuona sur l'île de Hiva Oa ($9^\circ 48'S$; $139^\circ 3'W$). Il fait partie du réseau mondial d'observation climatologique Global Climate Observing System (GCOS). Ces données sont quotidiennes et couvrent la période du 01/01/1961 au 30/04/2000. L'erreur dépend de l'intensité, elle est de 3% pour 50 mm /h.

2. 2. 2. Les vents

Les vents sont tirés de la grille mensuelle $2^\circ \times 2^\circ$ des pseudo-tensions du vent de la Florida State University (FSU) (Legler et O'Brien, 1988). Les composantes zonales (τ_x) et méridiennes (τ_y) sont au format $2^\circ \times 10^\circ$ de 1961 à 1995. Pour le module de τ , on le calcule sur chaque point au centre des rectangles $2^\circ \times 10^\circ$, puis on en fait la moyenne sur la zone de 4 rectangles étudiée.

2. 2. 3. L'indice d'oscillation australe

L'indice d'oscillation australe (SOI) est tiré de la version du « Climate Analysis Center » (CAC) décrite dans le Climate Diagnostic Bulletin (1986). Cette SOI mensuelle est similaire à celle utilisée par Trenberth (1984), avec une normalisation supplémentaire qui aboutit à une série temporelle de moyenne nulle et de variance 1 sur la période 1951-1980.

En résumé, la plupart des données sont disponibles sur une « grille » mensuelle de 2° de latitude par 10° de longitude, et la plus longue période d'étude est de 1961 à 1995 pour la salinité et les vents, de 1961 à 1994 pour la température et de 1979 à 1995 pour les anomalies de hauteur dynamique et les précipitations.

3. METHODES D'ANALYSE

Dans ce chapitre, il s'agit d'expliquer comment les données brutes sont traitées afin de dégager et quantifier le signal interannuel lié à ENSO.

3. 1. Extraction des données

La zone étudiée (7°S-11°S, 135°W-145°W), qui englobe les Iles Marquises, est un rectangle de 4° de latitude par 10° de longitude. Les données sont stockées sur stations SUN/UNIX, les programmes d'extraction et de traitement ont été réalisés en FORTRAN.

3. 1. 1. Zone d'étude précise de chaque paramètre

Pour les données grillées 2° de latitude par 10° de longitude (température, salinité de surface, hauteur dynamique, précipitations de 1979 à 1995, vents), on extrait les valeurs aux points de grille 8°S 135°W, 8°S 145°W, 10°S 145°W, 10°S 135°W. Ces points de grille englobent les données récoltées à $\pm 1^\circ$ en latitude et $\pm 5^\circ$ en longitude de part et d'autre du point. Donc, au final, ces valeurs représentent la zone d'étude allant de 7°S à 11°S et de 130°W à 150°W.

Pour les données satellitaires, les grilles sont de 0,5° de latitude par 5° de longitude. Je les ai extraites sur la zone 7°S-11°S, 135°W-145°W, identique à la zone étudiée.

Pour les données des précipitations 2,5°*2,5° de 1979 à 1999, j'ai choisi la zone 8,75°S-11,25°S, 131,25°W-148,75°W. Les points de grille de cette zone prennent en compte les données récoltées à $\pm 1,25^\circ$ dans les 4 directions N, S, E, W. En fait, la zone la plus approchée qu'il a été possible de réaliser est 7,5°S-12,5°S, 130°W-150°W, zone qui est à peu près celle utilisée pour les grilles 2°*10°.

Il est important de vérifier ces zones d'étude en sachant où sont les points réels des grilles et ce qu'ils englobent, sinon les traitements ultérieurs ne reposent pas sur les mêmes bases.

3. 1. 2. Format commun des grilles

La plupart des données ont donc été extraites de grilles de 2° de latitude par 10° de longitude. Cela présente un intérêt certain pour traiter de la même manière ces paramètres en utilisant des programmes Fortran ou des procédures graphiques identiques. ENSO étant un phénomène interannuel à grande échelle, on ne s'intéresse pas aux variations inférieures à un mois. Les données de résolution inférieure à un mois (SST et précipitations in situ) servent à étayer les commentaires des graphiques.

3. 2. Méthodes statistiques

3. 2. 1. La moyenne

Pour décrire l'état moyen \bar{x} , on a calculé la moyenne des données brutes sur la période maximale d'étude et sur la période commune de l'ensemble des paramètres :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

avec x_i les valeurs mensuelles et N le nombre de mois.

3. 2. 2. L'écart type

A chacune de ces moyennes est associé un écart type qui permet de quantifier les variations du paramètre. L'écart type d'une série x_i ($i = 1$ à N) de moyenne \bar{x} est la racine carrée de la variance σ^2 .

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

3. 2. 3. Le calcul des corrélations

Pour étudier l'influence d'ENSO sur les différents paramètres, nous avons calculé la corrélation entre les variations interannuelles d'un paramètre et celles de la SOI. On calcule un coefficient de corrélation sans et avec retard car un paramètre peut avoir de l'avance ou du retard par rapport à la SOI. Pour un retard φ , le calcul du coefficient de corrélation r est basé sur la formule de Pierson à coefficients de corrélation linéaires. Si les séries de points à comparer sont les x_i et y_i , on a (avec $\varphi = -24, \dots, -1, 0, 1, \dots, 24$ mois) :

$$r(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\varphi} (x_i - \bar{x})(y_{i+\varphi} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Physiquement, la réponse d'un paramètre au signal ENSO ne peut être déphasée de plus d'un ou deux ans au lieu considéré d'où le choix du retard maximal de 24 mois.

Pour l'interprétation des résultats, on se focalisera uniquement sur les valeurs statistiquement significatives de corrélation. Le seuil à partir duquel la corrélation est significative à 97,5% est donné par des tables (annexe 4). Il dépend du nombre de degrés de liberté de la série temporelle, c'est-à-dire du nombre de points indépendants. Ici, on ne peut considérer que toutes les valeurs mensuelles sont indépendantes, car le filtrage de Hanning (voir section 3.3) introduit une relation entre les points d'une série. On peut considérer en première approximation que les données sont indépendantes par bloc de 12, donc qu'il existe un degré de liberté par année.

Une corrélation positive indique un même sens de variation pour la SOI et le signal interannuel observé, une corrélation négative un sens de variation opposé.

3. 3. Analyse du signal interannuel

ENSO est un phénomène interannuel. Pour pouvoir l'analyser à partir des données mensuelles, il faut traiter celles-ci de façon à éliminer les périodes inférieures ou égales à 12 mois. On utilise pour cela un filtre de Hanning de demi-période T_m égale à 12 mois (figure 8). C'est un filtre passe-bas amélioré, dont la fonction temporelle est définie par :

- $h_{T_m}(\tau) = 0$ pour $|\tau| > T_m$
- $h_{T_m}(\tau) = 0.5 * [1 + \cos(\pi * \tau / T_m)]$ pour $|\tau| \leq T_m$

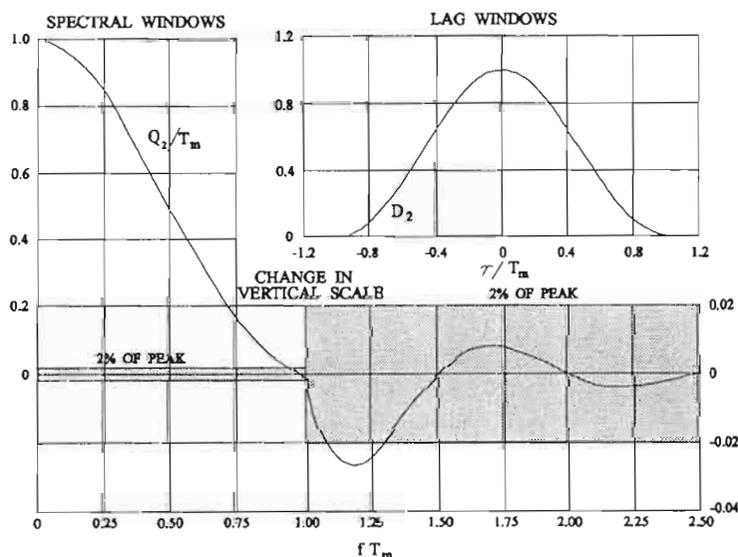


Figure 8 : Fenêtre spectrale et fenêtre temporelle de Hanning. D'après Bendat et Piersol (1971).

Comme le montre la figure 8, la fenêtre spectrale a des lobes secondaires très aplatis, ce qui permet de ne laisser passer qu'un minimum des périodes inférieures à T_m , mais 90% des périodes ≥ 4 ans qui est l'intervalle moyen de retour des El Niño. En chaque point de la série temporelle, le filtre a besoin des données des 12 mois précédents et suivants pour construire la valeur filtrée. Le signal interannuel est donc raccourci, par rapport au signal brut, de 12 mois sur chaque bord de la série. La moyenne sur la période 1980-1992 est retranchée au signal interannuel, il ne reste alors que l'anomalie interannuelle (Alory et Delcroix, 1999). La moyenne prise en compte est celle faite sur une période de 13 ans commune à chaque paramètre. C'est une période représentative des événements El Niño, La Niña et de l'oscillation australe.

3. 4. Analyse du signal saisonnier : l'année type

En retranchant au signal brut le signal interannuel, on obtient un signal comprenant toutes les périodes inférieures ou égales à 12 mois. Il comprend à la fois le signal purement saisonnier et le signal intrasaisonnier de plus petite période.

Pour faciliter l'interprétation, on a ramené l'ensemble des données à l'échelle d'une année appelée l'année type. Pour cela, on calcule la moyenne et l'écart type de chaque mois pour un paramètre donné, puis on assemble les 12 mois.

4. RESULTATS

4. 1. Données non filtrées

On ne peut pas dégager des données non filtrées des informations précises sur la signature d'ENSO. On y voit une « tendance », à savoir si le signal est plutôt saisonnier, ou interannuel ou prend en compte des variations intrasaisonniers.

4. 1. 1. La température de surface

La température de surface (figure 9.a) a un caractère saisonnier dominant, avec des minima vers septembre-octobre. On note des variations interannuelles, par exemple entre 1987 et 1988.

La température de surface relevée à la station côtière (figure 9.b) est plus chaude en 1997 qu'en 1998 probablement en raison de l'influence de El Niño 1997-1998 par rapport à La Niña 1998-2000. Les valeurs sont plus « bruitées » de l'hiver austral vers l'été que de l'été vers l'hiver, il y a donc plus de variations haute fréquence. Ceci n'a pas encore été expliqué.

4. 1. 2. La salinité de surface

La salinité de surface (figure 9.c) n'a pas un caractère saisonnier très marqué, on note de fortes variations interannuelles. Cependant, les données de salinité doivent être analysées en tenant compte de leur densité d'observation assez faible de 1961 à 1975 (annexe7).

4. 1. 3. Les anomalies de hauteur dynamique et de niveau de la mer

Les anomalies de hauteur dynamique (figure 10.c) présentent un caractère saisonnier avec un maximum en été. On observe des minima en 1983 et 1989, qui pourraient être liés à un signal interannuel.

Les données issues du satellite GEOSAT (figure 10.b) ne paraissent pas très saisonnières, on a un maximum en janvier pendant l'été austral dû à la dilatation de l'eau de mer. Le signal a une tendance croissante de novembre 1986 à mai 1988 pendant un événement El Niño, et une tendance décroissante de mai 1988 à février 1989, pendant un événement La Niña.

Pour les données issues du satellite TOPEX/POSEIDON (T/P) (figure 10.a), les valeurs ne présentent pas de caractère saisonnier. Elles sont minimales pendant La Niña de 1996 et la deuxième partie de l'année 1998, alors qu'elles sont beaucoup plus élevées pendant El Niño de 1997-1998, la variation est de l'ordre de 15 cm pic à pic.

En annexe 5 sont présentées les courbes superposées des anomalies de hauteur dynamique, avec d'une part les données GEOSAT et d'autre part les données TOPEX/POSEIDON pendant leurs périodes de recouvrement. On vérifie ainsi que les variations sont en phase. Les différences entre les mesures d'anomalies de hauteur dynamique et les mesures altimétriques du niveau de la mer sont liées à la précision relative de chaque mesure, à l'influence des variations de la couche comprise entre 450m et le fond et à la variation du profil de salinité car on utilise des profils T-S moyens (ces 2 dernières raisons ne sont pas prises en compte dans le calcul des anomalies de hauteur dynamique).

4. 1. 4. Les précipitations

Les données de précipitations figure (9.d) sont assez « bruitées », sans doute à cause des variations intrasaisonniers. Les données sur la deuxième grille de 1979 à 1999 (annexe 6.b) viennent confirmer certains pics, notamment début 1981 et début 1983. Les données in situ (annexe 6.a) reprennent bien le pic de début 1998 pendant un événement La Niña.

4. 1. 5. Les vents

Pour la composante zonale (figure 10.d), on observe presque toujours un vent d'est, l'alizé, avec une seule anomalie d'ouest début 1983 qui est confirmée par Rancher et Rougerie (1995). Cette anomalie est liée à ENSO. Le signal a une composante saisonnière et une interannuelle. La composante méridienne (figure 10.e) est fluctuante à dominante saisonnière. Le module de τ (annexe 6) présente aussi un caractère saisonnier et un interannuel.

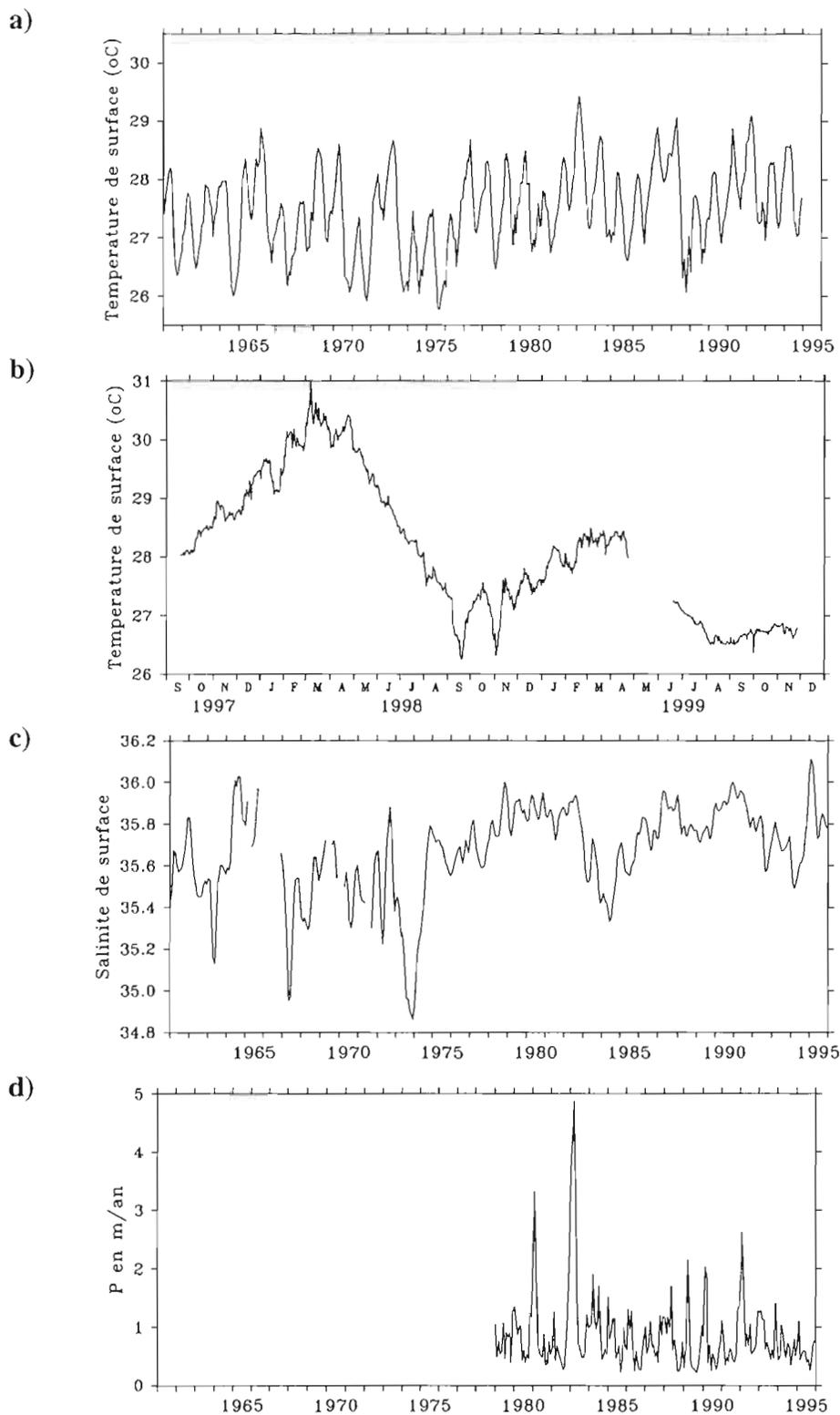


Figure 9 : Variations temporelles : a) de la température de surface, c) de la salinité de surface, d) des précipitations dans le rectangle 7°S-11°S, 130°W-150°W entourant les Iles Marquises. La figure c) représente la température de surface à la station côtière de coordonnées 8°56'S, 140°5,6'W.

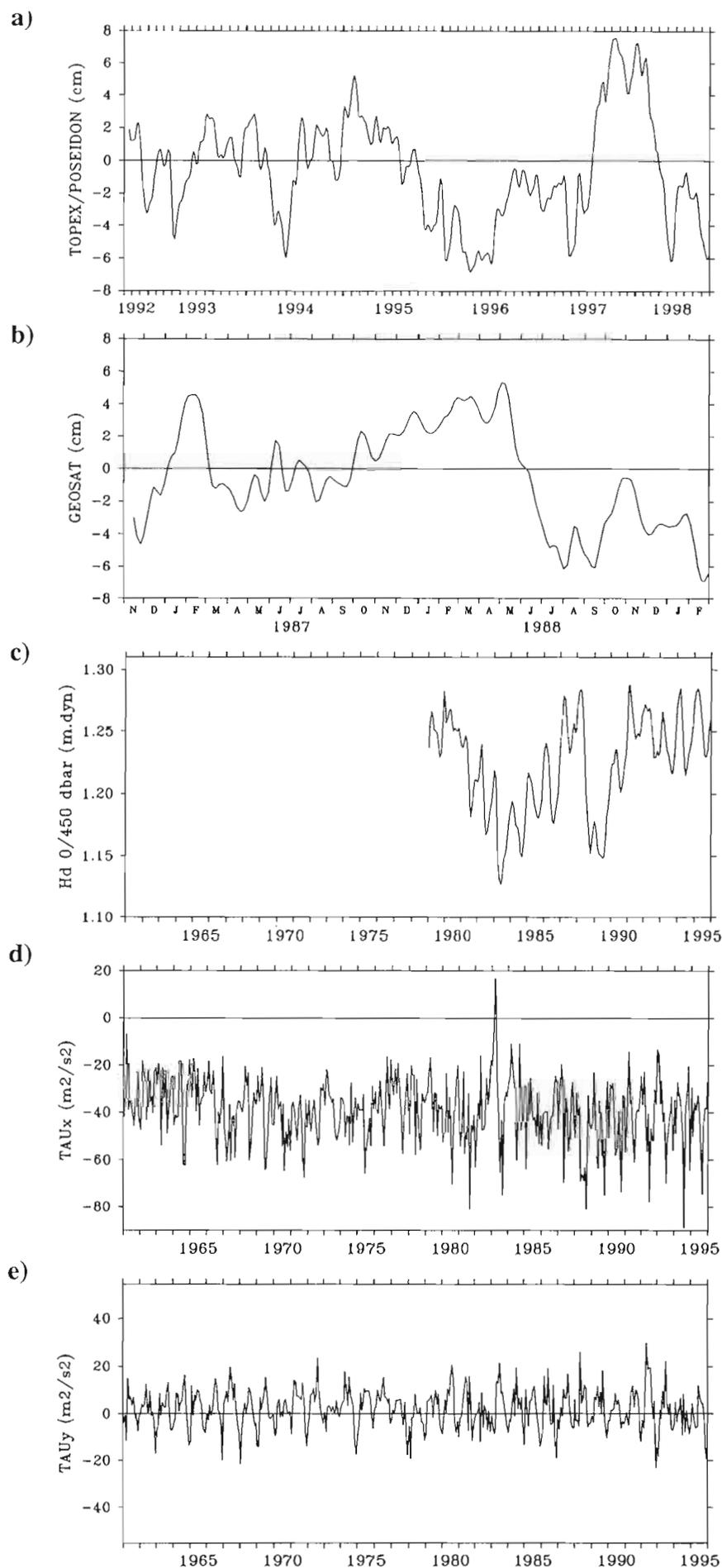


Figure 10 : Variations temporelles : a) du niveau de la mer avec les données issues du satellite TOPEX/POSEIDON, b) du niveau de la mer avec les données issues du satellite GEOSAT, c) des anomalies de hauteur dynamique ; d) de la composante zonale du vent ($\tau_x > 0$ correspond à un vent d'ouest), e) de la composante méridienne du vent ($\tau_y > 0$ correspond à un vent de sud), dans le rectangle 7°S - 11°S , 130°W - 150°W entourant les Iles Marquises.

4. 2. La structure moyenne

La valeur moyenne et l'écart type sont calculés pour chaque paramètre sur leur période maximale d'étude et sur la période 1979-1995 commune à tous les paramètres (tableau 1). Nous avons choisi d'étudier chaque paramètre sur sa période maximale pour avoir un maximum de données.

paramètres	Période maximale			Période restreinte		
	années	moyenne	écart type	années	moyenne	écart type
SST (°C)	61-94	27.49	0.73	79-94	27.74	0.65
SSS STATION	97-99	28.12	1.16			
SSS	61-95	35.67	0.22	79-95	35.77	0.14
P (m/an)	79-99	0.85	0.73	79-95	0.86	0.66
P in situ (m/an)	61-99	1.56	1.44	79-95	1.94	4.73
Hd (m.dyn)	79-95	1.22	0.04			
GEOSAT(cm)	86-89	*	4			
T/P (cm)	92-98	*	3.23			
TAUx(m2/s2)	61-95	-39.21	13.82	79-95	-40.82	15.51
TAUy(m2/s2)	61-95	1.76	8.24	79-95	1.55	8.85
TAU(m2/s2)	61-95	40.22	13.47	79-95	42.01	14.9

Tableau 1 : Moyenne et écart type des différents paramètres sur la période maximale d'étude et sur la période de recouvrement 1979-1995. Les cases avec le signe * n'ont pas de moyenne car les données altimétriques sont relatives à une période donnée par construction (annexe 3).

Les moyennes pour la température et la salinité de surface corroborent les travaux de Wauthy et al. (1988) et avec les figures de l'état moyen du Pacifique (figure 2). Les valeurs des précipitations in situ sont plus élevées que celles prises sur toute la zone d'étude pour des raisons orographiques. En effet, Les Marquises sont des îles à relief très haut qui « piège » les pluies. Sur une plus grande zone d'étude, ces pics de précipitations sont amoindris.

4. 3. Le signal saisonnier

4. 3. 1. Part relative du signal saisonnier

On peut déterminer la part relative du signal saisonnier par rapport à la somme des signaux saisonnier et interannuel pour quantifier les importances respectives. Pour cela, on calcule le rapport de l'écart type saisonnier fait sur 12 mois sur la somme de l'écart type saisonnier et de l'écart type interannuel (Alory, 1997). Le tableau 2 reporte ces résultats :

	SST	SSS	P	P in situ	Hd	TAUx	TAUy	TAU
saisonnier	51%	11%	55%	63%	33%	54%	75%	51%
interannuel	49%	89%	45%	37%	67%	46%	25%	49%

Tableau 2 : Parts relatives des signaux saisonnier et interannuel par rapport à la somme des 2.

On remarque que le signal saisonnier est prédominant pour les paramètres atmosphériques (P in situ, τ_x et τ_y), alors que le signal interannuel l'emporte pour comme la salinité de surface et les anomalies de hauteur dynamique.

4. 3. 2. L'année type

Les courbes des années types sont représentées figures 11 et 12 en trait plein. Les courbes en tirets représentent l'année type \pm un écart type.

La température de surface (figure 11.a) a un signal saisonnier bien marqué. L'eau est plus chaude en été austral avec un maximum en avril à 28,2°C, et plus froide en hiver avec un minimum en août à 26,9°C.

La salinité de surface (figure 11.b) n'a pratiquement pas de signal saisonnier. On note un minimum en avril-mai de 35,66 en réponse aux fortes pluies et aux faibles vents du début de l'été (Delcroix et al., 1996).

Les précipitations (figures 11.c et 11.d) ont un caractère saisonnier assez marqué. Elles sont fortes en été (1,3 m/an), au-dessus de leur moyenne de 0,85 m/an. Il y a une bonne corrélation avec le minimum de salinité en avril-mai, la salinité étant en retard de 3 mois par rapport aux fortes pluies. Le maximum relatif en juin observé sur l'année type des précipitations in situ est confirmé par Rancher et Rougerie (1993).

Les anomalies de hauteur dynamique (figure 12.a) ont un caractère saisonnier bien marqué avec des valeurs supérieures à la moyenne en été austral (1,25 m.dyn au lieu de la valeur moyenne 1,22 m.dyn). Cela correspond à une dilatation de l'eau de mer avec la température plus chaude des eaux de la couche de surface en été.

Les composantes zonale et méridienne du vent, ainsi que le module de τ (figures 12.b.c.d) sont saisonniers. Les vents sont plus forts pendant l'hiver austral avec un maximum en août de 53m²/s². L'alizé de sud-est est prépondérant pendant l'hiver ($\tau_y > 0$), alors qu'il est de nord-est en été. La ZCPS caractérise le front de convergence entre ces 2 types d'alizés, celui de nord-est dépendant de l'anticyclone de l'île de Pâques (Rancher et Rougerie, 1995).

En été, la ZCPS est caractérisée par une circulation cyclonique convergente, associée à un système dépressionnaire de coups de vents d'ouest et de fortes précipitations. En hiver, le fait marquant est l'affaiblissement de l'anticyclone du Pacifique nord associé à un renforcement des hautes pressions de l'hémisphère sud. La ZCPS est alors peu marquée.

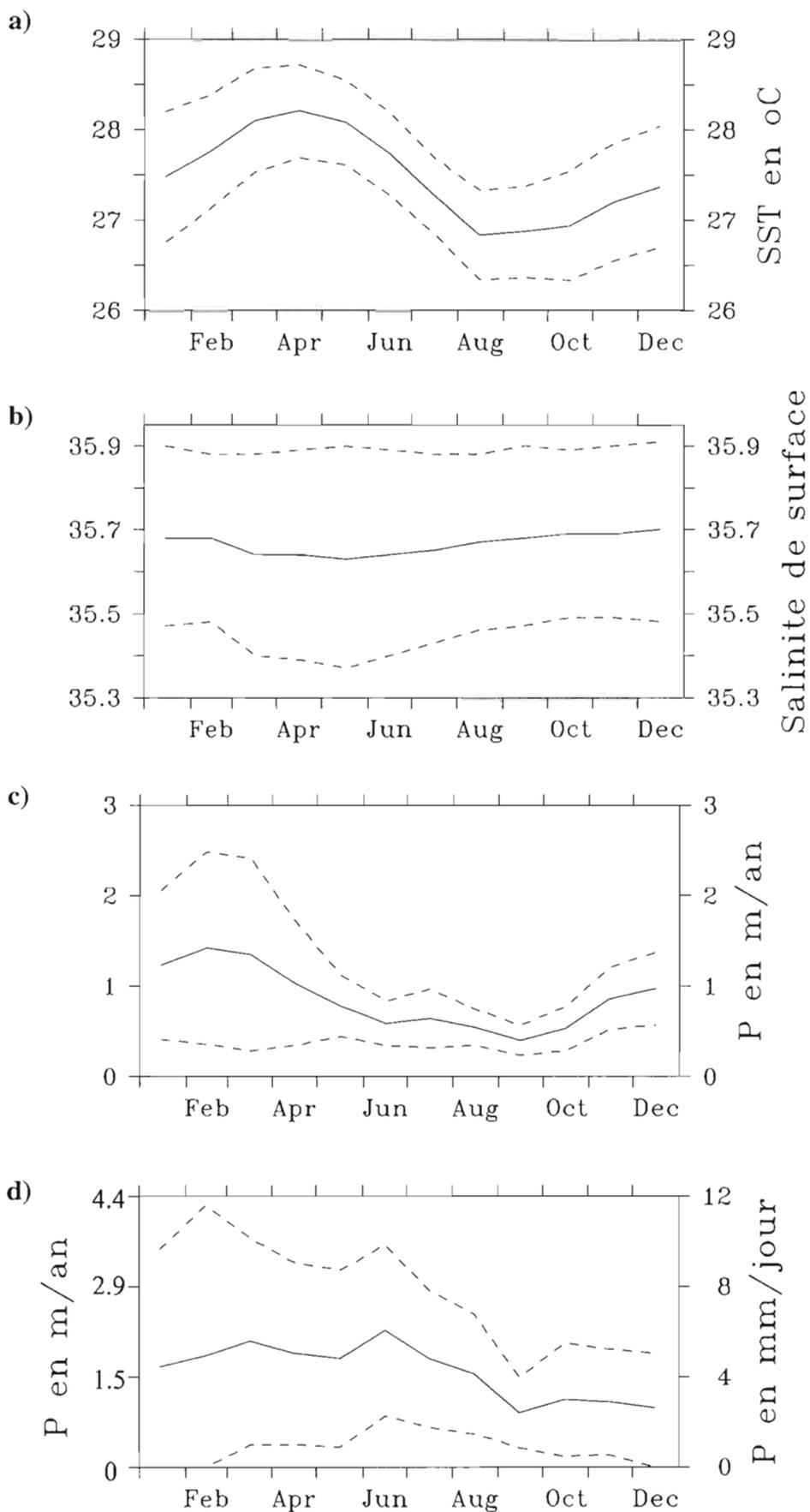


Figure 11 : Variations annuelles moyennes (trait plein) : a) de la température de surface, b) de la salinité de surface, c) des précipitations, dans le rectangle 7°S-11°S, 130°W-150°W entourant les Iles Marquises. La figure du bas (d) représente les variations annuelles moyennes des précipitations in situ au point 9°48'S, 139°3'W. Les tirets représentent la moyenne \pm un écart type des valeurs au point considéré.

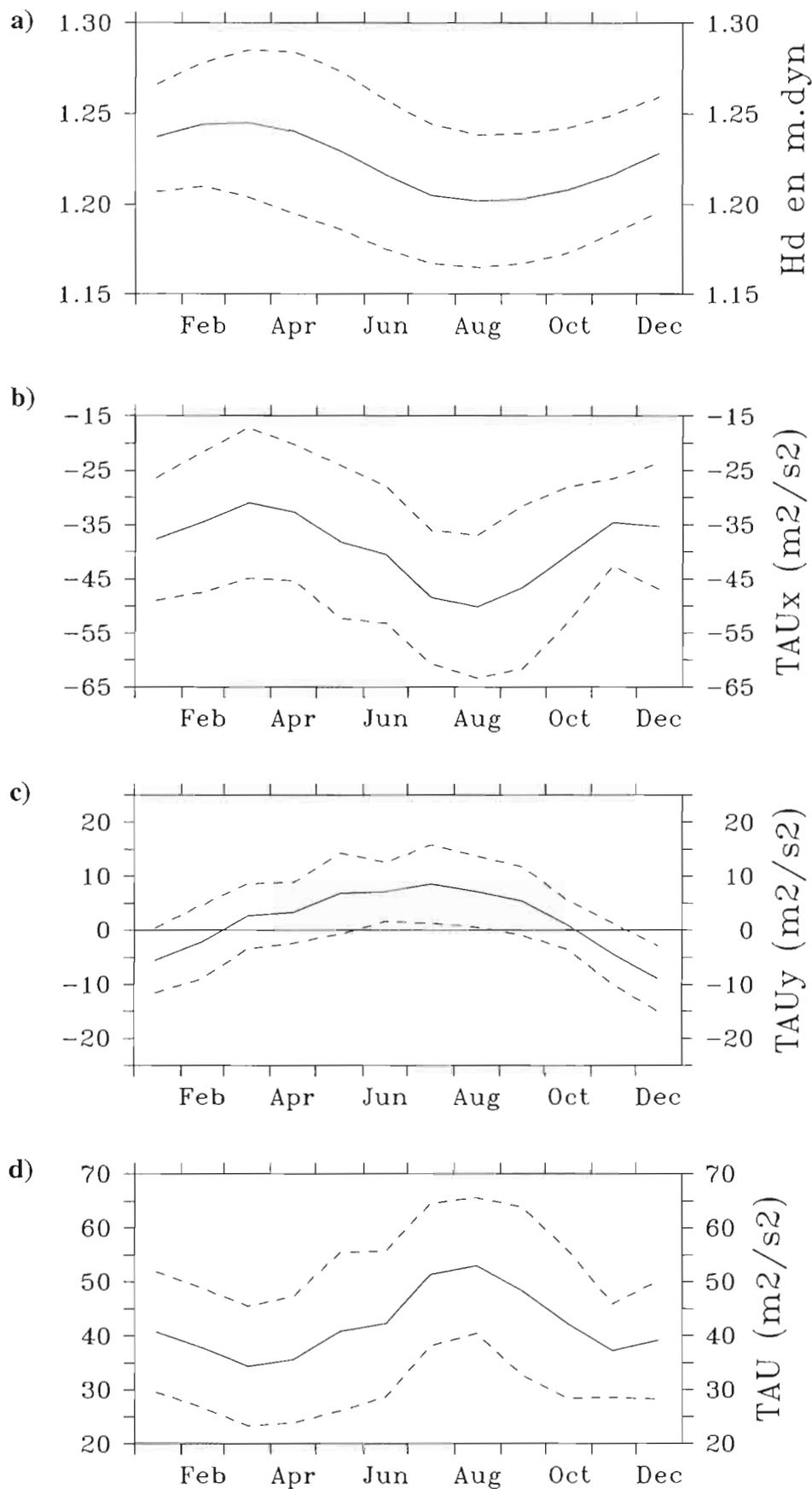


Figure 12 : Variations annuelles moyennes (trait plein) : a) des anomalies de hauteur dynamique, b) de la composante zonale du vent (τ_x), c) de la composante mériidienne du vent (τ_y) et d) du module de τ_x et τ_y (τ) dans le rectangle 7°S-11°S, 130°W-150°W entourant les Iles Marquises. Les tirets représentent la moyenne \pm un écart type des valeurs au point considéré.

4. 4. Signature climatique d'ENSO

Après avoir calculé la part relative du signal interannuel par rapport à la somme du signal interannuel et du saisonnier. Nous allons analyser plus finement ce signal interannuel. Les figures 13 et 14 présentent les anomalies interannuelles de chaque paramètre (signal filtré retranché de sa moyenne sur la période 1980-1992) comparées à la SOI. On peut donc comparer la SOI et les anomalies interannuelles qualitativement avec cette superposition et quantitativement avec le calcul des corrélations.

Paramètres	Corrélation sans retard	Corrélation avec retard	Retard/SOI en mois	Période d'observation	Degrés de liberté
SST	-0.89	-0.92	2	1962-1993	31
SSS	-0.41	-0.49	-6	1962-1994	30
P	-0.39	-0.57	5	1980-1994	15
	-0.38	-0.54	4	1980-1998	19
P in situ	-0.54	-0.6	4	1962-1998	36
Hd	-0.41	-0.42	1	1980-1994	15
	-0.86	-0.93	3	1987-1994	8
TAUx	-0.39	-0.39	1	1962-1994	32
TAUy	0.39	0.39	1	1962-1994	32
TAU	0.35	0.35	-1	1962-1994	32

Tableau 3 : Corrélations sans et avec retard entre les anomalies interannuelles des différents paramètres et la SOI. Seule la meilleure corrélation avec retard est indiquée. Les valeurs en gras ne sont pas significatives à 97,5%. Le nombre de degrés de liberté est précisé pour chaque série temporelle. Les valeurs négatives du retard correspondent à une avance du paramètre sur la SOI.

4. 4. 1. Les anomalies de température de surface

Les anomalies de température de surface et la SOI ont une bonne corrélation : de -0.89 sans retard et de -0.92 avec retard. Sur la figure 13.a, on voit bien cette corrélation. Les anomalies de température de surface retardent de 2 mois par rapport à la SOI. Cela n'est pas visible sur la figure 13.a car l'échelle temporelle est trop grande.

En période El Niño, comme en 1972, 1977, 1982, 1987 on observe une anomalie positive de l'ordre de 1°C . On note qu'en octobre 1987 il y a persistance de l'eau à 28°C à la latitude des Marquises, conséquence d'un événement El Niño qui a entraîné la disparition de l'upwelling équatorial et du refroidissement associé, entre décembre 1986 et juin 1987 (Rancher et Rougerie, 1993). Le réchauffement des eaux est dû au déplacement vers le Pacifique central de la « warm pool » pendant un épisode El Niño. Ordinairement située vers l'Indonésie, elle se déplace alors vers l'est, et l'upwelling équatorial au nord des Marquises s'affaiblit. Les eaux se réchauffent. C'est l'inverse pendant un épisode froid, la « warm pool » reste sur l'Indonésie et l'eau se refroidit.

Ceci est confirmé par les données non filtrées de la température de surface à la station côtière (figure 9.b). La température atteint un maximum de 31°C en mars 1998 pendant un événement El Niño, puis diminue jusqu'à $26,2^{\circ}\text{C}$ en septembre et novembre 1998 au début de la Niña 1998-2000.

4. 4. 2. Les anomalies de salinité de surface

Les anomalies de salinité de surface (figure 13.b) ont une corrélation assez faible avec la SOI (-0.49 avec retard) et significative à 97,5%. Ceci est peut-être dû à la densité d'observation assez faible dans la zone d'étude (annexe 7).

Le signal interannuel est en avance de 6 mois par rapport à la SOI. Pendant un épisode El Niño, on a une diminution de la salinité qui est due aux fortes pluies, ce qui est confirmé par l'analyse des précipitations. De plus, la salinité faiblit à cause du transport advectif d'eau peu salée de la « warm pool » (Rancher et Rougerie, 1995).

4. 4. 3. Les anomalies de précipitations

Les anomalies de précipitations de 1979 à 1995 (figure 13.c) et celles de 1979 à 1999 (figure 13.d) ont une corrélation sans retard non significative à 97,5%, la période d'étude étant assez restreinte pour faire ressortir des signaux interannuels. Par contre, elles ont une assez bonne corrélation avec retard de 4 ou 5 mois par rapport à la SOI. Visuellement, les pics de début 1983 et début 1997 sont en phase avec un retard pour les précipitations.

Les anomalies de précipitations in situ sont bien corrélées avec la SOI. On retrouve un retard de 4 mois par rapport à la SOI.

Pendant un épisode El Niño, la « warm pool » et la zone de convection atmosphérique associée se déplacent vers l'est et entraînent avec elles de fortes précipitations sur la bande de latitude allant de l'équateur à 10°S. Ce sont les pics que l'on observe dans les données non filtrées (figure 10.d, annexes 6.a et 6.b) en 1977, fin 1982, en 1992-1993 et en 1997-1998. L'archipel des Marquises enregistre alors d'énormes excédents pluviométriques (Rougerie et Wauthy, 1983).

4. 4. 4. Les anomalies de hauteur dynamique

La corrélation est calculée pendant 2 périodes différentes car on dispose de peu de mesures de 1980 à 1987. Pour la période totale 1980-1994, aucune des corrélations n'est significative. De 1987 à 1995, les corrélations sont très satisfaisantes : -0,86 sans retard et -0,93 avec un retard de 3 mois par rapport à la SOI. Sur la courbe (figure 14.a), on voit que les signaux sont en phase à partir de 1987.

On observe une diminution du niveau de la mer pendant La Niña 1988-1989, alors qu'il augmente pendant El Niño 1991 et 1992-1993. Ceci est dû au déplacement de la « warm pool », qui en amenant des eaux chaudes provoque la dilatation de l'eau de mer et donc une augmentation du niveau.

Ceci est confirmé par les données issues du satellite GEOSAT (figure 10.b) avec une augmentation du niveau de la mer pendant El Niño 1987. C'est la même chose pour les données issues du satellite TOPEX/POSEIDON (figure 10.a) où l'on observe des pics pendant El Niño 1992-1993, 1995 et 1997-1998.

4. 4. 5. Les anomalies de vents

Les anomalies des composantes zonale et méridienne du vent ont une corrélation assez faible (de l'ordre de 0.39 avec et sans retard) mais significative. Elles sont quasiment en phase avec la SOI puisque le retard ou l'avance des paramètres ne dépassent pas un mois.

Les anomalies de τ_x (figure 14.b) sont en phase avec la SOI. Plus l'anomalie interannuelle est positive, plus l'alizé est faible et c'est la situation pendant un événement El Niño comme en 1972, 1977, 1982, 1987. L'anomalie de début 1983 est de l'ordre de la moitié de la moyenne (-39m2/s2), ce qui est très fort. En fait, sur les données non filtrées (figure 10.d), on voit qu'il y a eu une anomalie d'ouest pendant cette période. Ceci est signalé par Rancher et Rougerie (1995) où, lors d'anomalie ENSO, on note une modification importante de la circulation et de la dynamique océanique, et en particulier une disparition complète ou partielle de la divergence équatoriale. Ainsi, l'upwelling a disparu de juillet 1982 à mai 1983, l'anomalie de vent d'ouest ayant conduit à une inversion vers l'est de la dérive de surface. τ_y (figure 14.c) est aussi en phase avec la SOI. Pendant un événement El Niño, il y a affaiblissement du vent de sud car les anomalies de vent de nord ($\tau_y < 0$ sur la figure 13.c) sont inférieures à la moyenne qui est de 1,7m2/s2. Pour τ (figure 14.d), on voit que les vents faiblissent pendant un événement El Niño et se renforcent pendant un événement La Niña.

Toutes ces différences d'intensité du vent sont expliquées par le déplacement de la « warm pool ». Les vents en situation moyenne convergent vers la « warm pool » (figure 2.a). Pendant un épisode chaud, elle se déplace vers l'est et les alizés convergent toujours vers elle. Il y a donc au niveau des Marquises un affaiblissement des alizés.

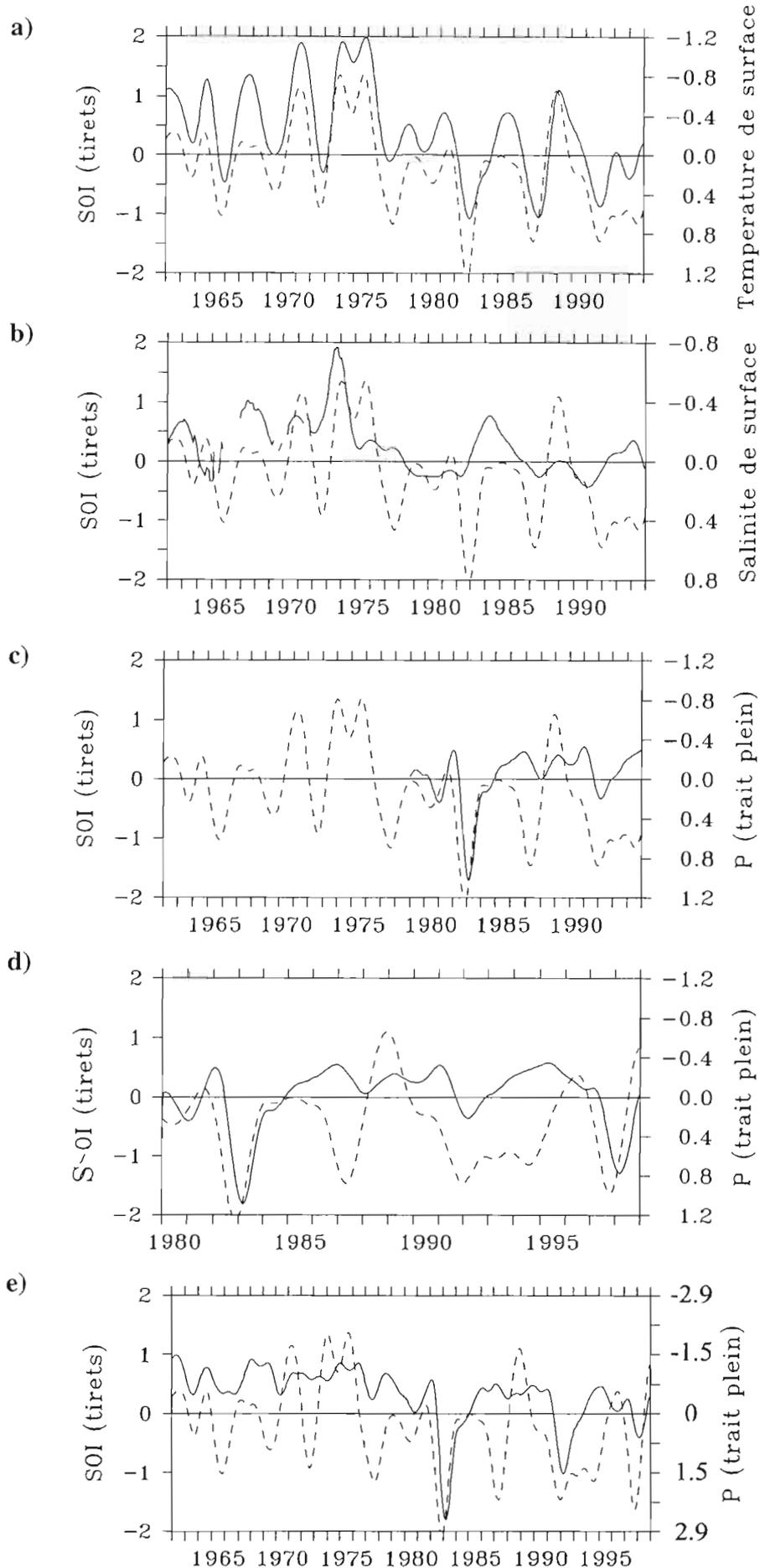


Figure 13 : Comparaison entre les anomalies interannuelles relatives à la moyenne de 1980 à 1992 et la SOI avec de haut en bas : a) la température de surface (°C), b) la salinité de surface, c) les précipitations de 1979 à 1995 (m/an), d) les précipitations de 1979 à 1999 (m/an), dans le rectangle 7°S-11°S, 130°W-150°W entourant la zone des Iles Marquises. La figure du bas (e) représente les anomalies interannuelles des précipitations in situ (m/an) au point 9°48'S, 139°3'W comparées à la SOI.

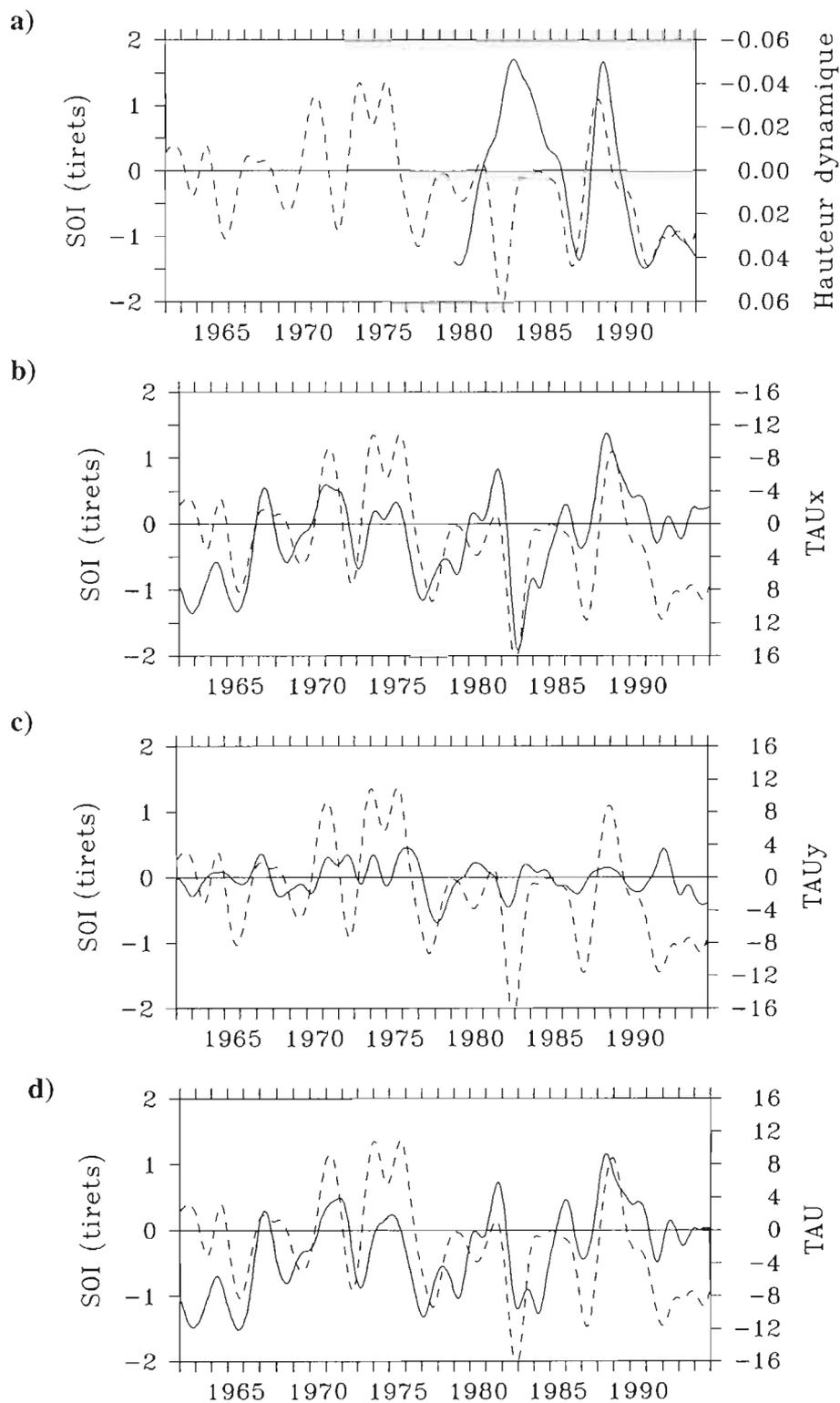


Figure 14 : Comparaison entre les anomalies interannuelles relatives à la moyenne de la période 1980-1992 et la SOI avec de haut en bas : a) les anomalies de hauteur dynamique (m.dyn), b) la composante zonale du vent (τ_x) (m^2/s^2), c) la composante méridienne du vent (τ_y) (m^2/s^2), d) le module de τ_x et τ_y (τ) (m^2/s^2), dans le rectangle $7^\circ S-11^\circ S$, $130^\circ W-150^\circ W$ entourant les Îles Marquises.

5. CONCLUSION

Dans cette étude, nous décrivons les variations de 5 paramètres climatiques : la température de surface, la salinité de surface, les anomalies de hauteur dynamique, les précipitations et les vents, ainsi que des données in situ de la température et des précipitations, de 1961 à 1999 et dans la zone 7°S-11°S, 135°W-145°W entourant les Iles Marquises.

A partir d'une analyse de ces données, nous avons quantifié l'état moyen ainsi que les variations saisonnières de chaque paramètre. Nous avons également mis en évidence qualitativement et quantitativement l'influence d'ENSO (El Niño Southern Oscillation) en comparant les variations interannuelles avec l'Indice d'Oscillation Australe (SOI). Lors d'un événement El Niño, les amplitudes des paramètres sont résumées dans le tableau 4, celles-ci s'inversent pendant un événement La Niña. L'amplitude des anomalies observées n'est pas proportionnelle à la SOI.

Paramètres	Variations	Retard/SOI (mois)
SST (°C)	+0,5/+1,2	2
SSS	-0,2/-0,8	-6
Précipitations (m/an)	+0,4/+1,0	5
Hd (m.dyn)	+0.03/+0,06	1
vents (m2/s2)	-5/-15	0

Tableau 4 : Résumé des variations des paramètres et retard de ces paramètres par rapport à la SOI.

Les anomalies interannuelles s'expliquent par le déplacement de la « warm pool ». Pour résumer cela, on représente le déplacement de la « warm pool » pendant l'événement El Niño 1986-1987 (figure 15.a) avec des eaux allant jusqu'à 28,5°C vers les Marquises (aux environs de 9°S, 140°W). Au contraire, pendant l'événement La Niña 1988-1989, l'archipel se situe dans une zone où la température de surface avoisine les 27°C.

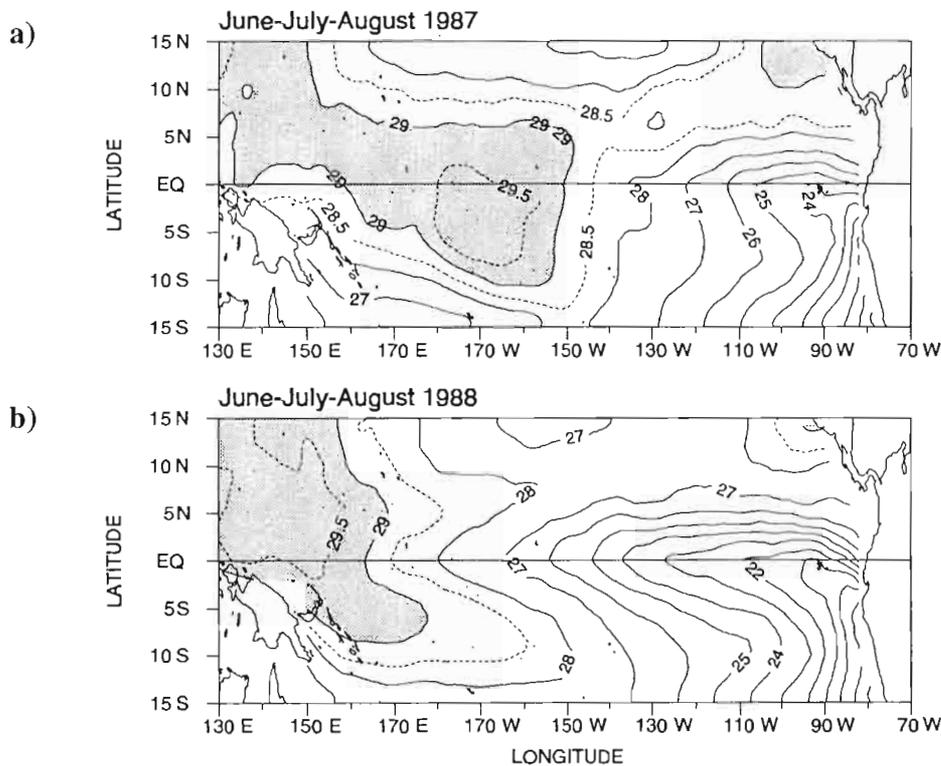


Figure 15 : Température de surface pendant un événement El Niño (juin-juillet-août 1987) (a) et La Niña (juin-juillet-août 1988) (b). On notera le déplacement de la « warm pool ». D'après Picaut et Delcroix, 1995.

Pendant un événement El Niño, le déplacement de la « warm pool » vers l'est du Pacifique induit au niveau des Marquises une augmentation de la température de surface. La couverture nuageuse qui suit le déplacement vers l'est de la « warm pool » induit également une augmentation des précipitations et donc une diminution de la salinité de surface. Le niveau de la mer augmente avec la dilatation de l'eau due à une température plus élevée de la couche de surface et les alizés diminuent car ils convergent vers la « warm pool » qui se rapproche des Marquises.

Finalement, le choix de cette zone d'étude a mis en évidence des variations dans un rectangle important de 400km sur 2000km car ENSO est un phénomène à grande échelle. Mais ce n'est pas forcément représentatif des variations à plus petite échelle. On peut cependant les estimer en comparant les données in situ très localisées avec les autres données moyennées sur le rectangle. Par exemple, pour les précipitations, il y a une différence sensible sur la moyenne de 0,7m/an entre les précipitations in situ et celles relevant des travaux de Xie et Arkin (1996). Pour les anomalies interannuelles, pendant El Niño les précipitations in situ augmentent de 1,5m/an au lieu de 0,5 m/an pour les autres données de précipitations. De même, au niveau de la station côtière, la température de surface enregistrée est plus élevée (d'environ 1°C) que la température sur toute la zone d'étude.

On pourrait donc continuer et affiner cette étude en travaillant à plus petite échelle et en récoltant toutes les données in situ disponibles sur l'archipel des Marquises, dont très peu existent actuellement.

BIBLIOGRAPHIE

- Alory G., 1997. Etude de l'environnement océanique et météorologique des îles Wallis, Futuna et du Samoa occidental. *Centre Orstom de Nouméa, rapport de DEA*, 45 pages.
- Alory G. et T. Delcroix, 1999. Climatic variability in the vicinity of Wallis, Futuna and Samoa islands (13-15S ; 180-170W). *Oceanol. Acta*, **22**, 3, 249-263.
- Atlas of the South Pacific, 1986. *Government Printing Office, Wellington, New Zealand*, 48 pages.
- Bendat J. and A. Piersol, 1971. Random Data : analysis and measurement procedures. *Wiley-Interscience*, 407 pages.
- Climate Diagnostic Bulletin, mars 1986. Global analyses and indices. *NOAA Climate Analysis Center, Washington*, 53 pages.
- Delcroix T. et C. Hénin, 1991. Seasonal and interannual variations of sea surface salinity in the tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **96**, 22135-22150.
- Delcroix T., C. Hénin, V. Porte et P. Arkin, 1996. Precipitation and sea-surface salinity in the tropical Pacific Ocean. *Deep Sea Res.*, **1**, **43**, 1123-1141.
- Delcroix T. 1998. Observed surface oceanic and atmospheric variability in the Tropical Pacific at seasonal and ENSO time scales : a tentative overview. *J. Geophys. Res.*, **103**, 1087-1098.
- Legler, D. M. and J. J. O'Brien, 1988. Tropical Pacific wind stress analysis for TOGA, IOC Time series of ocean measurements, *IOC Technical Series*, 4, UNESCO.
- Levitus S., R. Burgett et T. P. Boyer, 1994. World Ocean Atlas 1994, vol. 3, salinity, NOAA Atlas NESDIS 3. *Natl. Oceanogr. Data Cent., Silver Springs, Md.*, 111 pages.
- Masia F. et T. Delcroix, 1996. Atlas des anomalies du niveau de la mer et des courants géostrophiques de surface déduits de GEOSAT, novembre 1986 - février 1989. *Centre ORSTOM de Nouméa, documents scientifiques et techniques*, 88 pages.
- Philander S. G., 1985. El Niño and La Niña. *J. Atmos. Sc.* **42**, 2652-2662.
- Picaut J. et T. Delcroix, 1995. Equatorial wave sequence associated with warm pool displacement during the 1986-1989 El Niño and La Niña. *J. Geophys. Res.*, **100**, 18398-18408.
- Rancher J. et F. Rougerie, 1993. Situations océaniques du Pacifique Central Sud, campagnes du Bâtiment de contrôle biologique et océanographique « Marara » d'avril 1986 à octobre 1989. *Edition du Service Mixte de Sécurité Radiologique*, 91 pages.
- Rancher J. et F. Rougerie, 1995. L'environnement océanique de l'archipel des Tuamotu (Polynésie Française). *Oceanol. Acta*, **18**, 1, 43-60.
- Reynolds D. et T. Smith, 1994. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Clim.*, **7**, 929-948.
- Rougerie F. et B. Wauthy, 1983. Anomalies de l'hydroclimat et cyclogenèse en Polynésie en 1982-83. *MET-MAR.*, **121**, 26-40.
- Trenberth K.E., 1984. Signal Versus Noise in the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 326-332.
- Voituriez B. et G. Jacques, 1999. El Niño, réalité et fiction. *Commission Océanographique Intergouvernementale Forum Océans*, 116 pages.
- Walker G.T., 1923. Correlation in seasonal variations of weather, VIII: a preliminary study of world weather. *Mem. Indian Meteor. Dep.*, **24**, 75-131.
- Wauthy B., F. Rougerie, L. Charpy, J. Rancher et M. Thouard, 1988. Formations récifales et effet d'île par endo-upwelling autour des îles Marquises. *Notes et documents du centre ORSTOM de Tahiti*, **37**, 36 pages.
- Xie P. et P.A. Arkin, 1996. Analysis of Global Monthly Precipitation Using Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Predictions. *J. Climate*, **9**, 840-858.

ANNEXES

- ANNEXE 1 : Liste des acronymes utilisés.
- ANNEXE 2 : Mouillages TAO.
- ANNEXE 3 : Altimétrie satellitaire.
- ANNEXE 4 : Valeurs critiques du coefficient de corrélation.
- ANNEXE 5 : Données satellitaires.
- ANNEXE 6 : Données non filtrées.
- ANNEXE 7 : Densité d'observation de la salinité.

ANNEXE 1 : LISTE DES ACRONYMES UTILISES

CLIVAR	CLImate VARIability and prediction
CTD	Conductivity Temperature Depth
ECOP	Etude Climatique de l'Océan Pacifique tropical
ENSO	El Niño Southern Oscillation
GCOS	Global Climate Observing System
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPI	GOES Precipitation Index
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ITCZ	InterTropical Convergence Zone
MSU	Microwave Sounding Unit
NESDIS	National Environmental Satellite, Data and Information System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OPI	Outgoing Precipitation Index
ORSTOM	Office de recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PNEDC	Programme National d'Etudes de la Dynamique du Climat
SO	Southern Oscillation
SOI	Southern Oscillation Index
SOOP	Ship Of Opportunity Programme
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager
SSS	Sea-Surface Salinity
SST	Sea-Surface Temperature
TAO	Tropical Atmosphere Ocean
TOGA	Tropical Ocean Global Atmosphere
XBT	eXpandable BathyThermograph
ZCPS	Zone de Convergence du Pacifique Sud

ANNEXE 2 : MOUILLAGES TAO

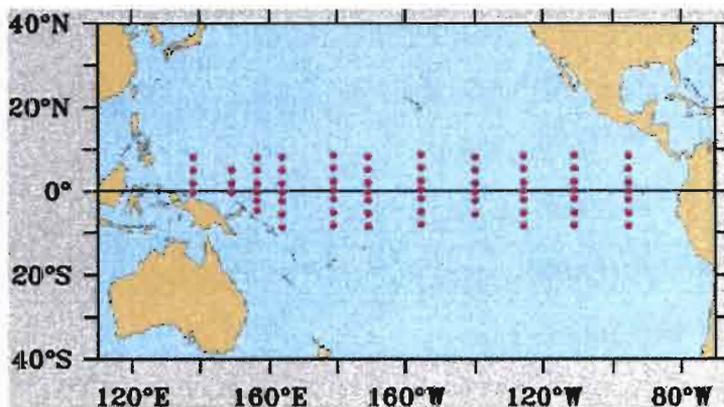
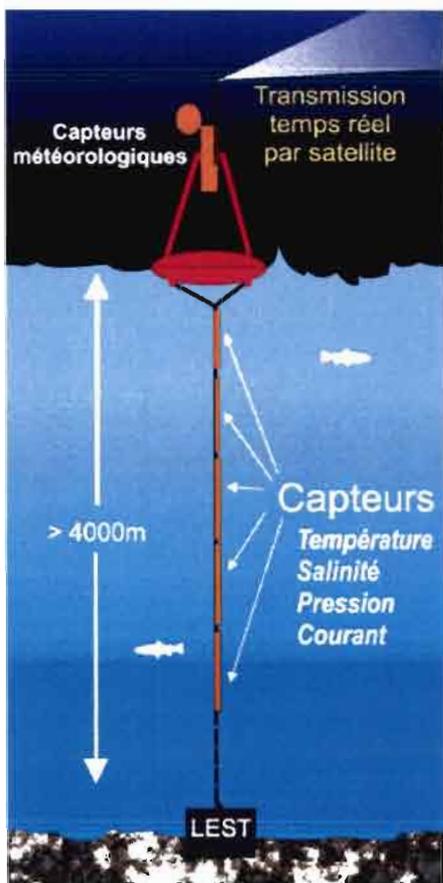


Schéma et Répartition spatiale des mouillages TAO.

Des mouillages ont été ancrés sur des points fixes de la bande équatoriale de l'océan Pacifique entre 8°N et 8°S.

Ils permettent un suivi en continu des variations de la température, de la salinité et des courants dans la couche 0-500 m. Les observations sont transmises en temps réel par le système Argos. Ils sont co-gérés par les USA (NOAA), la France (IRD), le Japon et Taiwan.

ANNEXE 3 : ALTIMETRIE SATELLITAIRE

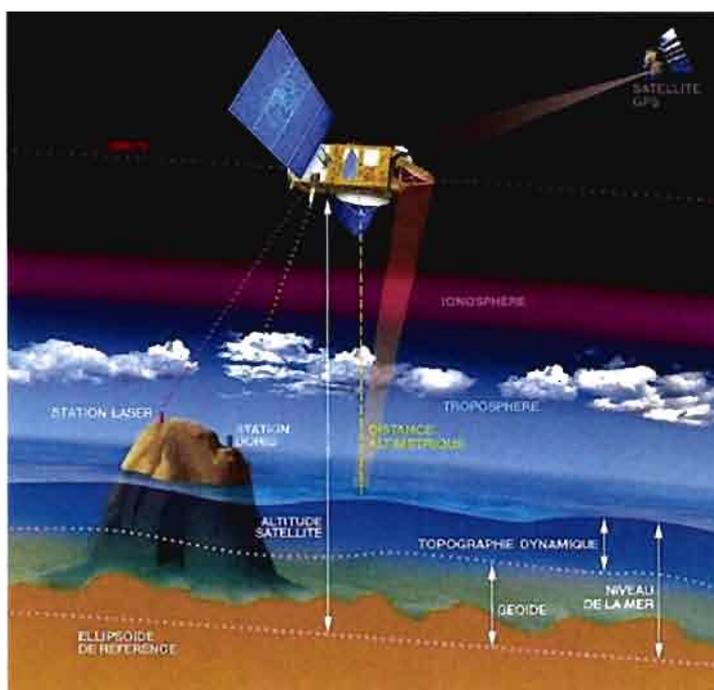


Schéma de la mesure du niveau de la mer par altimétrie satellitaire.

Un radar altimètre embarqué à bord d'un satellite émet un signal à très haute fréquence à la verticale de celui-ci en direction du sol et reçoit en retour l'écho réfléchi par la surface de la mer. Une fois appliquées des corrections nécessaires liées à l'absorption du signal par l'atmosphère, la distance finale (h) est estimée avec une précision de 2 cm, grâce à la connaissance précise du temps du trajet aller-retour.

Il faut aussi connaître avec précision la trajectoire du satellite et sa position au moment de la mesure. Ceci est réalisé grâce à un réseau de balises au sol émettant en direction du satellite. On connaît ainsi la vitesse du satellite, par effet Doppler, ainsi que son orbite calculée par des modèles dynamiques d'orbitographie, donc on en déduit sa position.

Cette position est calculée par rapport à un ellipsoïde de référence, une « sphère » aplatie aux 2 pôles. L'altitude du satellite au-dessus de l'ellipsoïde (H) est calculée avec une précision meilleure que 3 cm.

Le niveau de la mer est mesuré à un instant donné par rapport à l'ellipsoïde de référence. La profondeur réelle de l'eau n'étant pas connue partout avec précision, cette référence permet un repérage précis et homogène. Ce niveau est égal à ($H-h$). Il représente plusieurs effets combinés :

- la surface, appelée géoïde, qu'elle aurait en l'absence de toutes perturbations.
- la circulation océanique appelée topographie dynamique, avec une partie stationnaire (circulation permanente liée à la rotation de la terre, aux vents permanents, etc...) et une partie fortement variable (liée à la variabilité des vents, aux marées, etc.).

La hauteur du géoïde étant mal connue mais considérée comme constante pour notre période d'étude, on en déduit que les variations de la hauteur de la surface de l'océan sont dues aux variations du niveau de la mer.

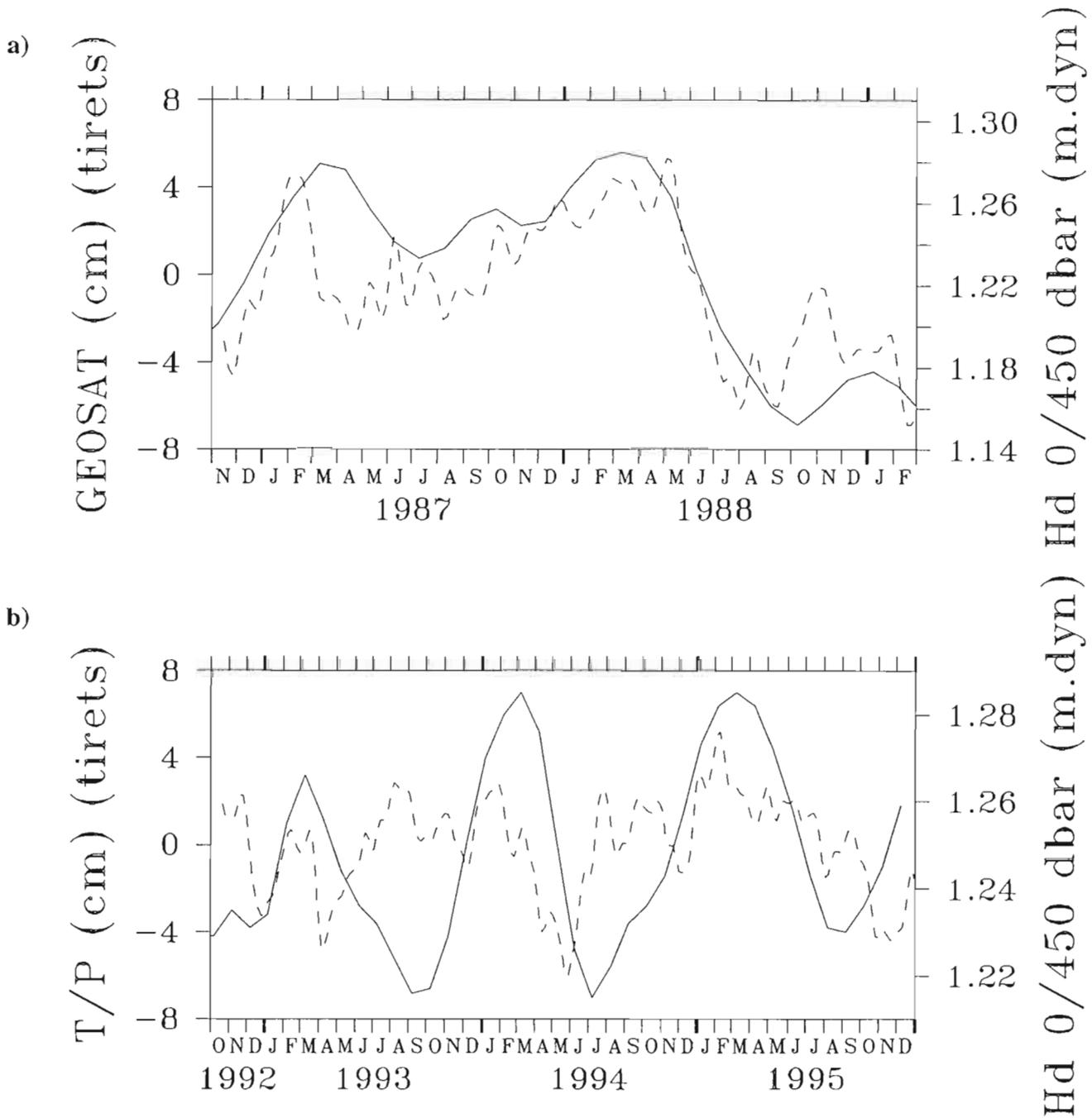
La connaissance de la hauteur du satellite et de la mesure altimétrique permet donc de calculer les anomalies du niveau de la mer par rapport à une période de référence.

ANNEXE 4 : Valeurs critiques du coefficient de corrélation

k	a=0,05	a=0,01	a=0,001
1	0.99692	0.999877	0.9999988
2	0.95	0.99	0.999
3	0.8783	0.95873	0.99116
4	0.8114	0.9172	0.97406
5	0.7545	0.8745	0.95074
6	0.7067	0.8343	0.92493
7	0.6664	0.7977	0.8982
8	0.6319	0.7646	0.8721
9	0.6021	0.7348	0.8471
10	0.576	0.7079	0.8233
11	0.5529	0.6835	0.801
12	0.5324	0.6614	0.78
13	0.5139	0.6411	0.7603
14	0.4973	0.6226	0.742
15	0.4821	0.6055	0.7246
16	0.4683	0.5897	0.7084
17	0.4555	0.5751	0.6932
18	0.4438	0.5614	0.6787
19	0.4329	0.5487	0.6652
20	0.4227	0.5368	0.6524
25	0.3809	0.4869	0.5974
30	0.3494	0.4487	0.5541
35	0.3246	0.4182	0.5189

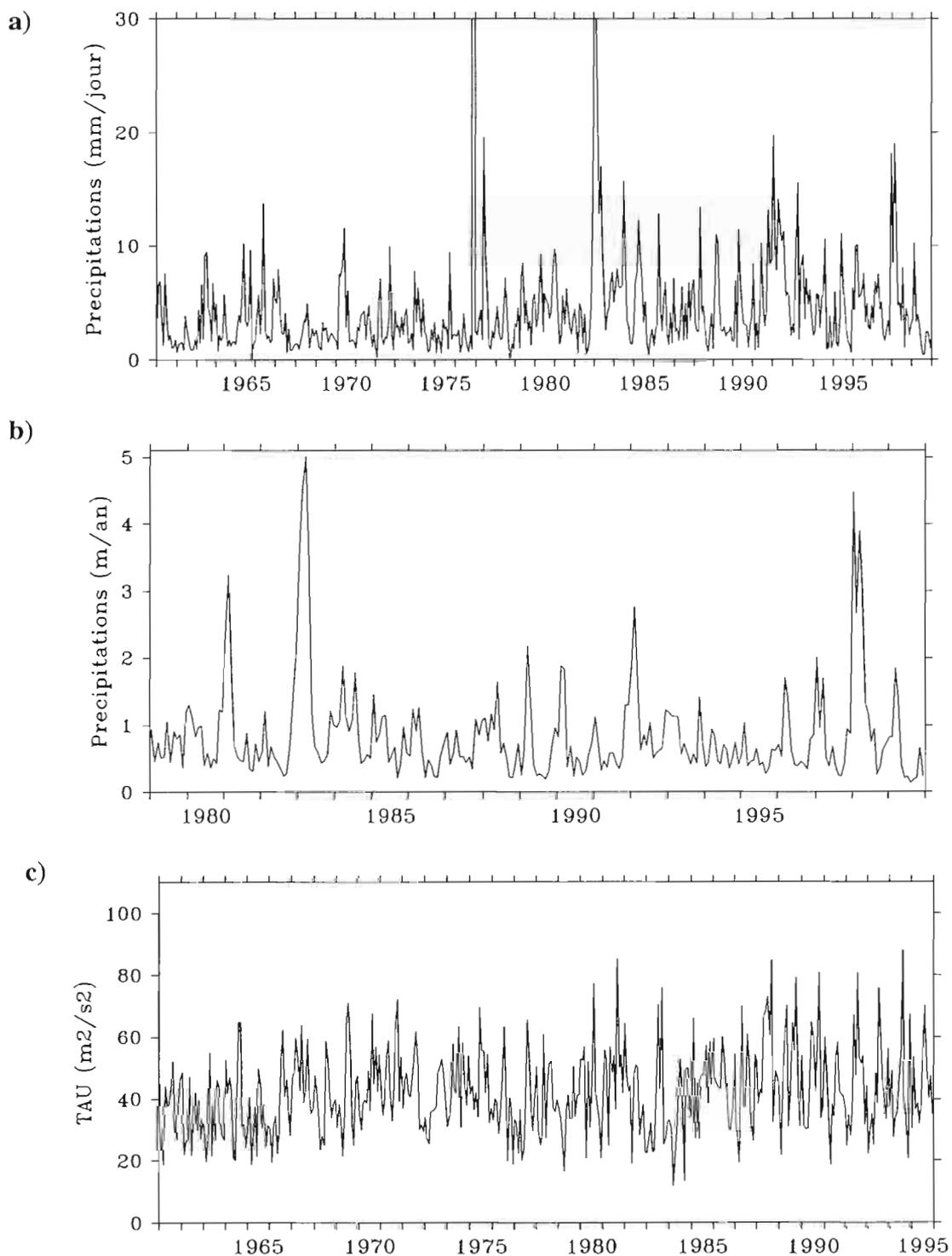
Valeurs critiques $r_{(1-a/2)}$

- $1-a/2$: pourcentage de signification de la corrélation
- k : nombre de degrés de liberté.



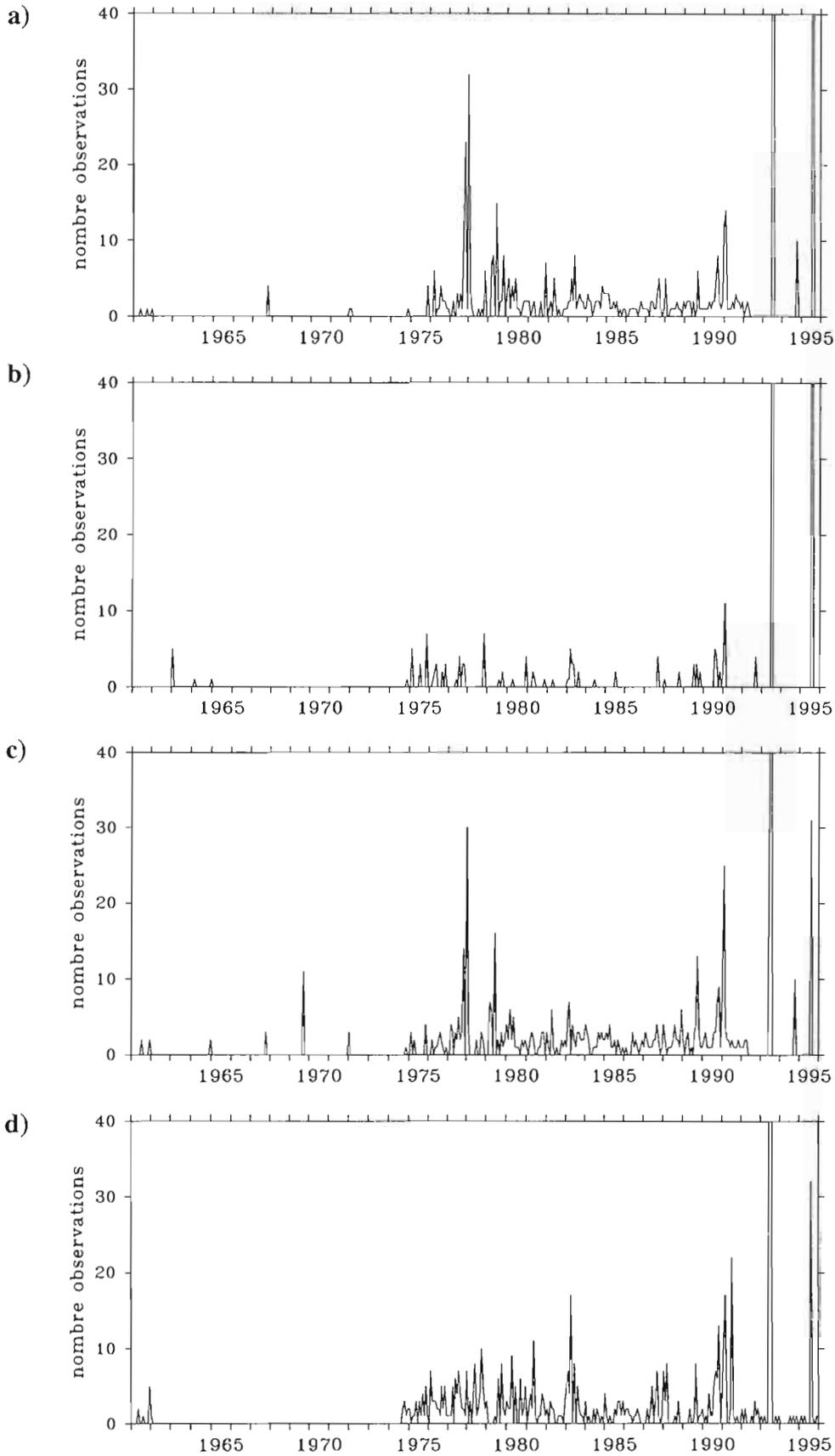
Variations temporelles des anomalies de hauteur dynamique 0/450 dbar comparées avec les données issues du satellite GEOSAT (a) et des anomalies de hauteur dynamique comparées avec les données issues du satellite TOPEX/POSEIDON (b) dans le rectangle 7°S-11°S, 130°W-150°W entourant les Iles Marquises.

ANNEXE 6 : DONNEES NON FILTRES



La figure a) représente les variations temporelles des précipitations in situ au point $9^{\circ}48'S, 139^{\circ}3'W$. Les figures b) et c) représentent les variations temporelles des précipitations de 1979 à 1999 (b) et du module du vent τ (c) dans le rectangle $7^{\circ}S-11^{\circ}S, 130^{\circ}W-150^{\circ}W$ entourant les Iles Marquises.

ANNEXE 7 : DENSITE D'OBSERVATION DE LA SALINITE



Nombre d'observations de la salinité de surface aux points extrêmes de la zone d'étude avec en a) le point 8°S 145°W, en b) 8°S 135°W, en c) 10°S 145°W et en d) 10°S 135°W.