

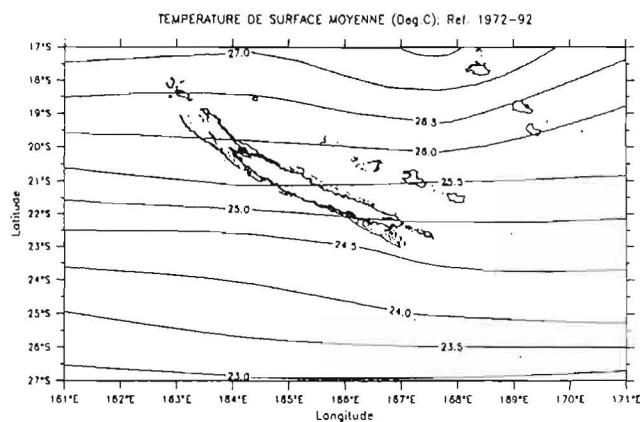
Université d'Aix-Marseille II  
Centre d'Océanologie de Marseille  
(Observatoire des Sciences de l'Univers)

MEMOIRES DE DEA  
SCIENCES DE LA MER  
OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE

1995

Les anomalies climatiques associées à ENSO  
ont-elles une influence au voisinage  
de la Nouvelle-Calédonie ?

Olivier LENORMAND



DEA "Sciences de l'environnement marin"  
Option Océanographie Physique Côtière et Littorale  
Stage effectué de mars à juin 1995

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION



CENTRE DE NOUMÉA

MEMOIRES DE DEA  
SCIENCES DE LA MER  
OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE

1995

Université d'Aix-Marseille II  
Centre d'Océanologie de Marseille  
(Observatoire des Sciences de l'Univers)

Les anomalies climatiques associées à ENSO  
ont-elles une influence au voisinage  
de la Nouvelle-Calédonie ?

Olivier LENORMAND

Sous la direction de Thierry DELCROIX, dans le groupe SURTROPAC

DEA "Sciences de l'environnement marin"  
Option Océanographie Physique Côtière et Littorale  
Stage effectué de mars à juin 1995



L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

CENTRE DE NOUMÉA

## **Remerciements**

Mon stage ne s'est pas effectué de façon solitaire, mais en équipe, avec pour commencer les patientes explications des phénomènes climatiques du Pacifique par Thierry Delcroix, responsable de mon stage et Christian Hénin, qui m'ont permis de m'imprégner du sujet et que je remercie pour avoir fait cette démarche. Je remercie également l'équipe informatique composée de Marie-José Langlade et François Masia grâce auxquels j'ai pu maîtriser rapidement les outils informatiques du centre. Merci encore à Christian Hénin, et aussi à Gérard Heldin et Pierre Rual pour leurs bon conseils scientifiques et à l'équipe SURTROPAC entière pour la convivialité générale et l'intérêt porté à mon étude. Merci enfin à l'excellent Thierry Delcroix qui m'a fait comprendre ce que représente le métier de chercheur, avec qui j'ai partagé la passion d'un sujet prometteur et de nombreuses heures de travail communes. Il a été non seulement un guide scientifique, mais a participé activement à la préparation de mon rapport, ce en quoi je lui suis très reconnaissant.

## Résumé

Ce rapport présente l'étude de quatre paramètres physiques observés autour de la Nouvelle Calédonie (27°S–17°S et 160°E–170°E) sur la période 1972–1992. Les paramètres étudiés sont la température et la salinité de surface de la mer, les vents et précipitations.

Il en résulte des informations précises sur les caractéristiques moyennes et sur les cycles annuels de ces paramètres. Les variations interannuelles de ces paramètres sont également quantifiées et il est établi qu'elles présentent une bonne correspondance avec le phénomène ENSO (*El Niño Southern Oscillation*)

Cette étude a été effectuée au sein du groupe SURTROPAC (SURveillance du PACifique TROPical) du centre ORSTOM de Nouméa, de mars à juin 1995.

## Abstract

ENSO is quite well-known in the tropical region as the main basin scale ocean-atmosphere phenomenon at interannual time scale. Several studies have already highlighted the link between ENSO and atmospheric and oceanic anomalies such as air temperature, rainfall, wind speed and direction, oceanic currents, sea surface salinity and temperature (SSS, SST) in the tropical region. In a logical extension of these prior works, the present study analyses the ENSO impact on New Caledonia oceanic environment, based on extensive observational data sets including SST, SSS, rainfall and surface wind. For each parameter, the long term average and the seasonal changes are discussed and a particular emphasis is put on the ENSO related anomalies.

This study constitutes a training period of the ESIM. It was performed while visiting the SURTROPAC (*SURveillance du PACifique TROPical*) group at ORSTOM (*Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération*) center in Noumea, New Caledonia, from march to june 1995.

## Table des matières

<b>Acronymes et initiales utilisés</b>	<b>2</b>
<b>I. PRESENTATION</b>	<b>3</b>
I.1. A propos d' ENSO	3
I.2. Introduction	5
<b>II. CONNAISSANCE ET ACQUISITION DES DONNEES CLIMATIQUES</b>	<b>8</b>
<b>II.1. Données océanographiques de surface</b>	<b>8</b>
a. Origine	8
b. Précision	8
c. Validation initiale	9
d. Extraction des mesures océanographiques de la base de données	9
e. Validations supplémentaires	12
f. Etats moyens de température et de salinité de surface	13
g. Création des grilles de départ	15
<b>II.2. Données météorologiques</b>	<b>17</b>
a. Origine	17
b. Précision	18
c. Extraction depuis la base de données des vents et précipitations	18
d. Etats moyens des vents et précipitations	18
e. Création des grilles de départ de vents et de précipitations	20
<b>III. METHODES D'ANALYSE</b>	<b>23</b>
<b>III.1. Construction de l'année type</b>	<b>23</b>
<b>III.2. Analyse de Fourier</b>	<b>23</b>
<b>III.3. Calcul des variations interannuelles</b>	<b>24</b>
<b>III.4. Moyenne et écarts types du signal total et de ses variations saisonnières et interannuelles</b>	<b>25</b>
<b>III.5. Calcul du coefficient de corrélation avec l'IOS</b>	<b>26</b>
<b>IV. RESULTATS</b>	<b>28</b>
<b>IV.1. Ordres de grandeur des différentes variations</b>	<b>28</b>
<b>IV.2.</b>	<b>32</b>
<b>IV.2. Variations saisonnières</b>	<b>33</b>
<b>IV.3. Signatures océaniques et atmosphériques d'ENSO</b>	<b>39</b>
a. Qualitativement	39
b. Quantitativement	44
<b>V. CONCLUSION</b>	<b>48</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>51</b>

## **Acronymes et initiales utilisés**

CGM : Compagnie Générale Maritime

CLIVAR : CLImate VARIability and prediction

COARE : Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment

CTD : Conductivity Temperature Depth

ECMWF : European Center for Medium-Range Weather Forecasts

ENSO : El Niño / Southern Oscillation

FNOC : Fleet Numerical Oceanography center

FSU : Florida State University

GPS : Global Positioning System

IOS : Indice d'Oscillation Sud

NMC : National Meteorological Center

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

OLR : Outgoing Longwave Radiation

ORSTOM : Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération

RADAR : RADio Detecting And Ranging

SAWIN : SATellite WINd

SSM/I : Special Sensor Microwave / Imager

SSS : Sea Surface Salinity

SST : Sea Surface Temperature

SURTROPAC : SURveillance du PACifique TROPical

TOA : TOGA Ocean Array

TOGA : Tropical Ocean Global Atmosphere

XBT : eXpendable BathyTermograph

ZCIT : Zone de Convergence Inter Tropicale

ZCPS : Zone de Convergence du Pacifique Sud

# I. PRESENTATION

---

## I.1. A propos d' ENSO

Le climat du Pacifique se caractérise à l'état 'moyen', dans la partie ouest équatoriale par une zone d'eaux chaudes de surface et dans la partie est par des remontées d'eaux profondes froides vers les côtes de l'Amérique équatoriale. La zone d'eaux chaudes se répartit jusque 10° de latitude de part et d'autre de l'équateur au niveau de l'Indonésie et la température de surface décroît lorsque l'on se déplace vers l'est ou l'ouest et que l'on s'éloigne de l'équateur. Il faut signaler aussi pour la suite qu'il existe dans le Pacifique deux grandes régions de convergence des vents, la zone de convergence intertropicale (ZCIT), située d'ouest en est vers 10°N, et la zone de convergence du Pacifique sud (ZCPS). Ces éléments correspondent à des concentrations de masses nuageuses, l'air sec des vents de surface se chargeant progressivement d'humidité pendant sa course et convergeant finalement sur ces zones. La ZCPS s'étend de la Papouasie-Nouvelle Guinée à la Polynésie Française et sa branche ouest se déplace en relation avec la *warm pool* du Pacifique équatorial ouest. Ces zones évoluent de façon saisonnière en s'écartant de l'équateur pendant l'été respectif de chaque hémisphère.

A l'origine, le terme El Niño définissait un faible courant côtier, apparaissant chaque hiver boréal au large des côtes de l'équateur et du Pérou (*el corriente del Niño*), qui remplace par des eaux chaudes les eaux habituellement froides en raison de remontées d'eaux de sub-surface. La prise exceptionnelle d'espèces marines exotiques, inconnues de ces régions, donnait à cet événement un caractère miraculeux, religieux (El Niño désigne l'enfant Jésus en espagnol). Mais de manière apériodique ce courant devient très chaud et s'étend beaucoup plus au sud jusqu'à atteindre les côtes nord du Chili. L'apport d'eaux froides depuis les couches profondes de l'océan est stoppé et l'ensemble des variations climatologiques anormales qui s'enchainent induisent de fortes répercussions écologiques, économiques et humaines. Depuis les années 60-70, El Niño désigne maintenant l'un des deux états qui caractérise la variabilité interannuelle de l'ensemble du Pacifique tropical, le deuxième état ayant été nommé par la suite La Niña (Philander, 1985). De la même façon, les modifications climatiques induites lors de ces deux phénomènes (déluges ou sécheresses en Amérique du sud, sécheresses et incendies dans le Pacifique occidental, mousson indienne modifiée, cyclone atypiques en Polynésie, etc.) provoquent de lourdes implications socio-économiques. De manière globale, ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) désigne l'ensemble du phénomène océanique et atmosphérique comprenant El Niño, La Niña et l'oscillation australe (*Southern Oscillation*; SO: balancement des anomalies de pression atmosphériques de surface entre le Pacifique équatorial ouest et le Pacifique sud est tropical). ENSO est le phénomène climatique de macro-échelle le plus important du globe, mettant en jeu l'ensemble de l'atmosphère et des océans tropicaux où sont localisées les eaux les plus chaudes.

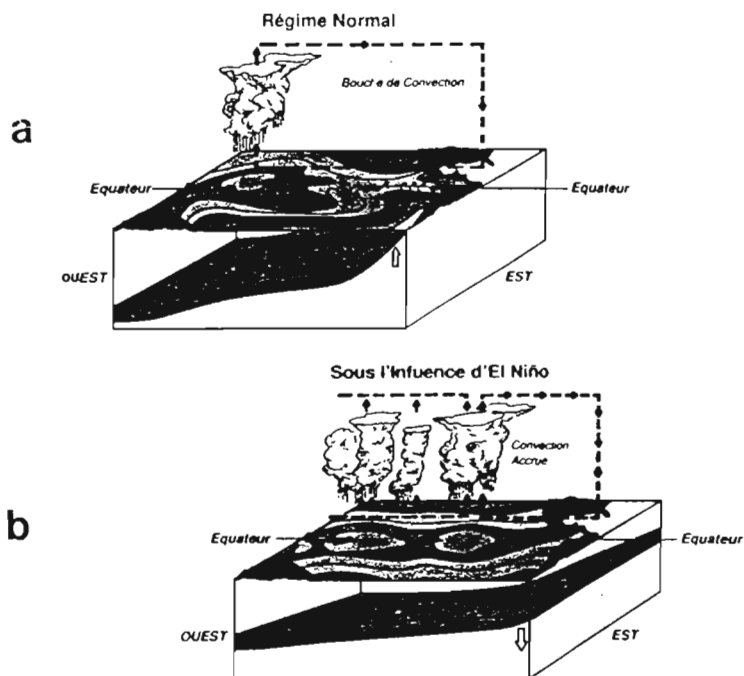


Figure 1 : représentation du pacifique tropical en perspective avec en surface les Isothermes et en subsurface la thermocline; régime climatique 'moyen' (en haut; a) et sous l'influence d'El Niño (en bas; b). Pendant El Niño la réserve d'eau chaude se déplace vers l'est avec sa zone de convection

*Mécanismes d'El Niño.* En régime normal (Fig. 1a) les eaux les plus chaudes du Pacifique sont concentrées dans la partie équatoriale ouest, vers l'Indonésie, constituant ce que l'on appelle la *warm pool*, et la cellule de Walker (boucle de convection au-dessus de la *warm pool* et de subsidence à l'est, comprenant les vents d'altitude et les vents de surface) se déploie au dessus de l'équateur. Le même type de circulation existe dans l'axe méridien (cellule de Hadley), au nord et au sud de la *warm pool*. Pendant EL Niño (Fig; 1b), l'eau chaude apparait à l'équateur, mais jusque dans le Pacifique est et l'activité de la cellule de Walker faiblit : les alizés regressent, parfois jusqu'à leur inversion, tout comme le courant marin d'est de surface à l'équateur. La zone de convection se déplace depuis l'ouest vers le Pacifique central, ainsi que les régions de fortes précipitations qui suivent la migration des eaux de surface les plus chaudes. Ce phénomène est apériodique (de trois à dix ans), de durée variable (un à trois ans) et son déroulement peut se produire ou ne pas se produire en phase avec le cycle saisonnier. La Niña, caractéristique des épisodes froids, présente les mêmes mécanismes mais dans le sens opposé.

*Marqueur d'ENSO.* La présence d'El Niño, et d'ENSO au niveau de l'équateur, peut donc se caractériser par la position de la limite est de la *warm pool* (Fig. 2a), mais il a été établi (Walker et Bliss, 1932) que l'indice d'oscillation sud (IOS; Fig. 2b) joue sensiblement le même rôle. L'IOS est calculé sur un principe de comparaison entre les pressions atmosphériques à Tahiti (Polynésie Française) et à Darwin (nord-est de l'Australie) : positif, il signale une période La Niña et négatif, il



signifie un régime de Niño.

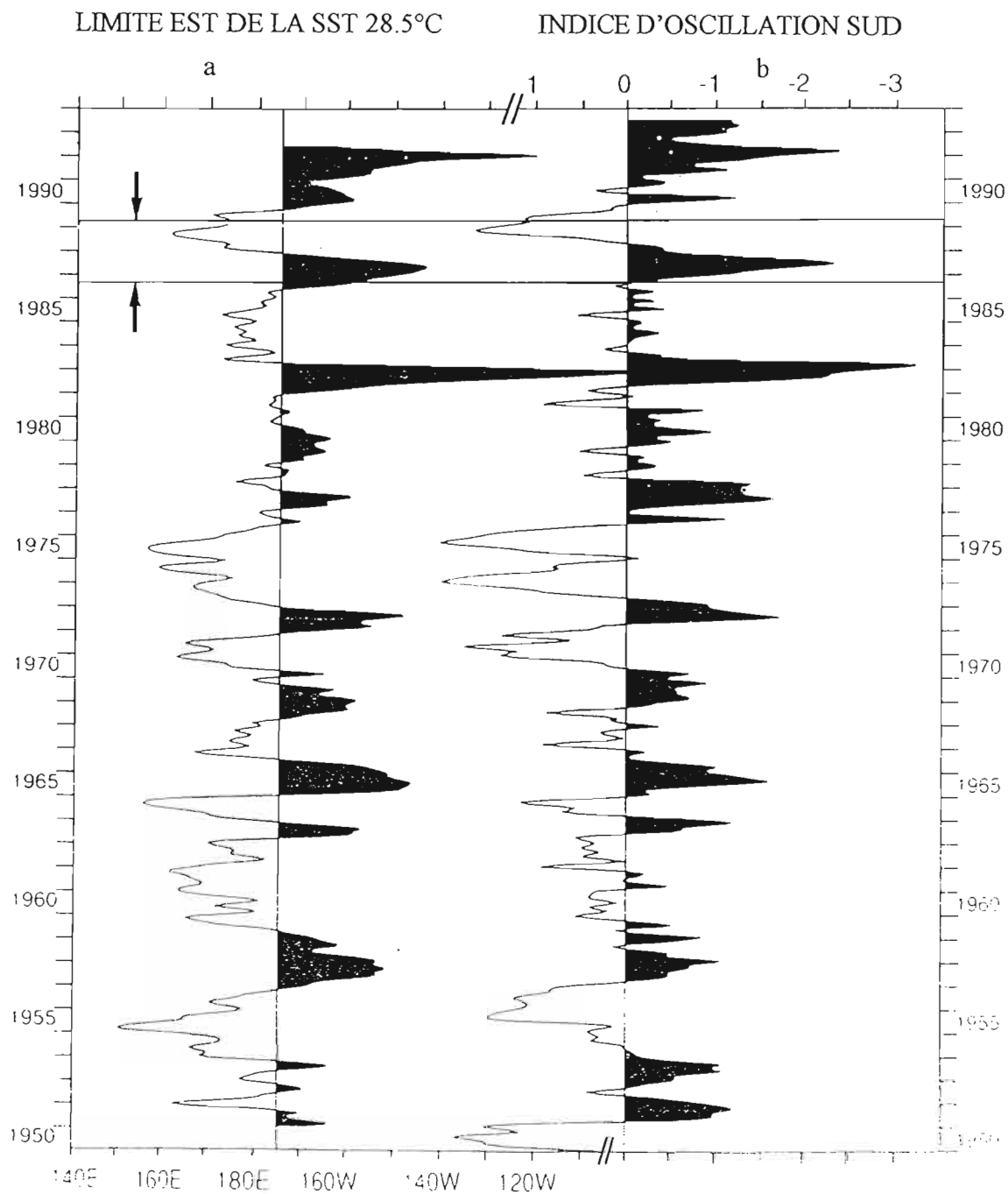


Figure 2 : les deux marqueurs d'ENSO les plus couramment utilisés: position la plus à l'est de l'isotherme de surface à 28.5°C (à gauche; a) et Indice d'Oscillation Sud (à droite; b)

## I.2. Introduction

L'oscillation australe (*Southern Oscillation*; SO) consiste en un balancement des anomalies de pression atmosphériques de surface entre le Pacifique équatorial ouest et le Pacifique sud est tropical. Ceci fut supposé pour la première fois dans les travaux de Hildebrandson (1897) qui mit en évidence

une relation déphasée entre les anomalies de pression de surface à Sidney (Australie) et Buenos Aires (Argentine). Les travaux de Walker (1923, 1924) marquèrent ensuite une étape importante en décrivant clairement le fait que le phénomène SO s'apparentait à des variations de précipitations, de pression et de température de surface à travers les régions tropicales des océans Indien et Pacifique. Par la suite Berlage (1966), Bjerknes (1966) et Wyrski (1975) mirent en évidence l'existence de relations entre les variations de vent et précipitations à grande échelle dues à SO et les variations interannuelles de température de surface de la mer (*Sea Surface Temperature*, SST) au large des côtes du Pérou et de l'Equateur, variations que l'on attribuait auparavant au courant local El Niño. En 1975, Wyrski démontra le fait que les variations interannuelles de SST de la partie est du Pacifique équatorial constituent une réponse des vents équatoriaux du Pacifique centre et ouest par le biais d'une dynamique équatoriale spécifique (ondes de Kelvin). Le travail de Wyrski révéla par ailleurs le couplage dynamique océan-atmosphère entre El Niño et l'oscillation australe SO, ce qui a été ensuite confirmé par des résultats de modèles équatoriaux (Busalacchi et Cane, 1985). L'acronyme ENSO (*El Niño Southern oscillation*) représente ainsi un phénomène grande échelle couplé entre l'océan et l'atmosphère.

Il est maintenant établi que les zones tropicales sont les parties du monde les plus sensibles à ENSO : les variations océaniques et atmosphériques associées ont été décrites pour l'océan Atlantique tropical (Hastenrath, 1984; Delecluse et al., 1994), l'océan Indien tropical (Cadet, 1985; Tourre et White, 1995) et abondamment pour l'océan Pacifique tropical (Rasmusson et Carpenter, 1982; Cane, 1983). Plus globalement, les relations entre ENSO et les valeurs de précipitations et de température de l'air ont été avancées par Ropelewski et Halpert (1987) et Halpert et Ropelewski (1992). Ces auteurs ont montré que les plus fortes relations se produisent dans les tropiques, comme on peut s'y attendre, bien que le signal ENSO ressort nettement dans certaines régions extérieures aux tropiques. En particulier, et contrairement à la plupart des régions du globe, ils ont fait remarquer que dans la région située de 10°S à 40°S et de 160°E à 150°W (Fig. 3), les températures de l'air et de surface de la mer présentent une anomalie froide durant les épisodes chauds (El Niño, indice d'oscillation sud -IOS- négatif) et une anomalie chaude durant les épisodes froids (La Niña, IOS positif). Cette région est située juste en-dessous de la position moyenne de la zone de convergence du Pacifique sud (ZCPS) et englobe plusieurs terres dont la Nouvelle-Calédonie, les Fidji, le Vanuatu et une partie de la Nouvelle-Zélande et de la Polynésie Française, l'ensemble subissant des impacts économiques et écologiques d'ENSO. Ainsi, plusieurs études ont déjà mis à jour le lien entre ENSO et les anomalies océaniques et atmosphériques de la région sud-ouest Pacifique telles que celles de la température de l'air, des précipitations, des vitesses et directions du vent, de la SST, de la salinité de surface de la mer (*sea surface salinity*, SSS) et des courants de surface zonaux (Gordon, 1986; Morlière et Rébert, 1986, Delcroix et Hénin, 1989).

Dans la continuité logique de ces travaux, cette étude va analyser les effets d'ENSO au voisinage

de la Nouvelle-Calédonie, en se fondant sur un ensemble de données plus spécifiques et plus nombreuses comme la SST et la SSS (données ORSTOM), les précipitations et les vents de surface. Nous n'aborderons pas ici les données de subsurface. Ces données et leurs méthodes d'analyse sont présentées respectivement aux chapitres II. et III. A partir de ces analyses, le chapitre IV. caractérise les variations saisonnières des paramètres, et discute de la comparaison des variations interannuelles avec l'IOS, le marqueur d'ENSO choisi pour cette étude. La dernière partie de ce rapport est consacrée à la synthèse des résultats principaux de l'étude et à la conclusion.

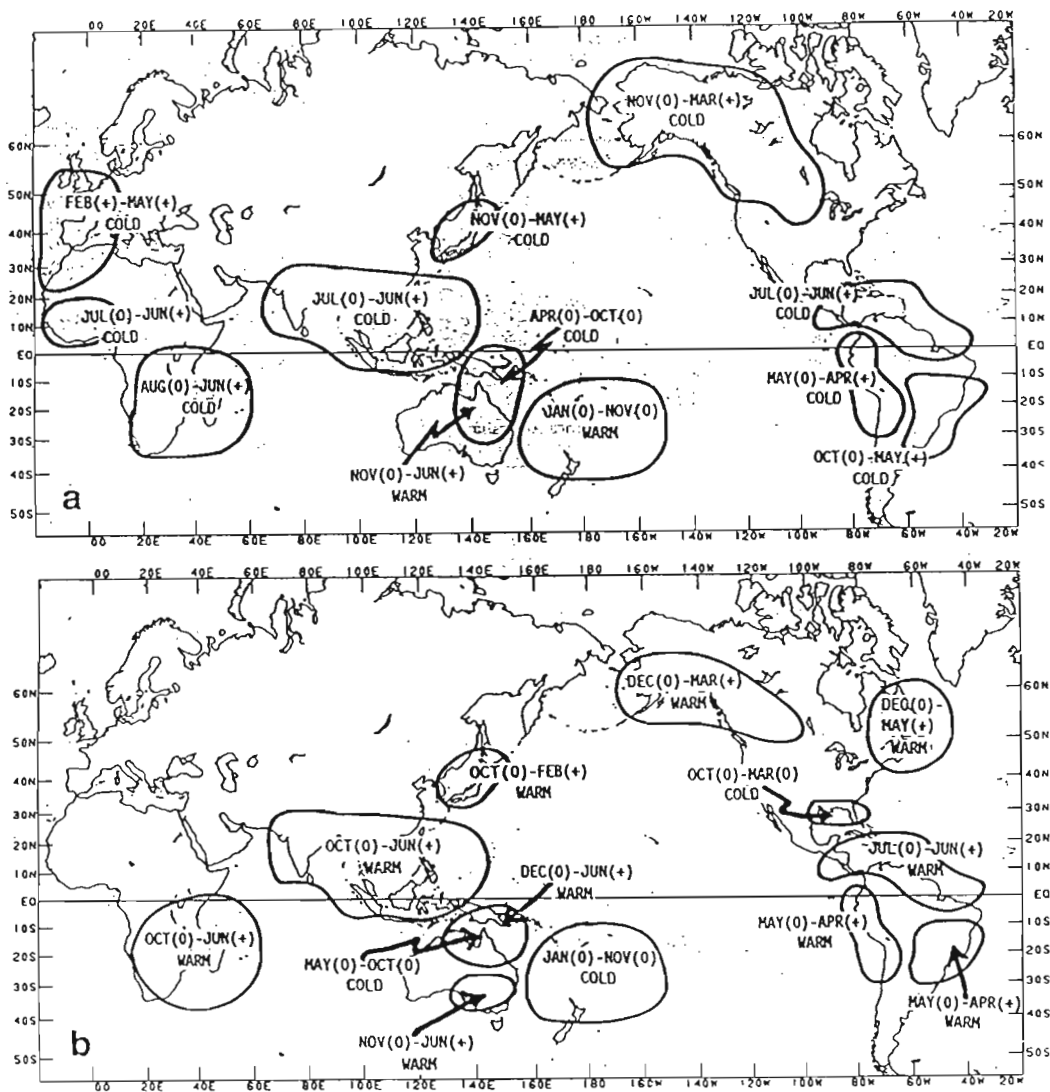


Figure 3 : représentation schématique des anomalies de température de l'air associées à la phase froide (La Niña, en haut; a) et à la phase chaude (El Niño, en bas; b) du phénomène ENSO. Noter la spécificité de la région sud-ouest du Pacifique qui présente des anomalies de sens opposé aux autres régions. D'après Halpert et Ropelewski (1992)

## II. CONNAISSANCE ET ACQUISITION DES DONNEES CLIMATIQUES

---

Ce chapitre décrit la nature et la technologie des données du groupe SURTROPAC dont j'ai disposé et qui ont permis la réalisation de l'étude. Il présente aussi succinctement les méthodes utilisées permettant d'effectuer la sélection et la visualisation graphique de ces paramètres climatiques en vue de réaliser des traitements ultérieurs.

### II.1. Données océanographiques de surface

Ce sont la SST et la SSS.

#### a. Origine

Les données océanographiques utilisées ont été mesurées dans le cadre du programme Navires Marchands qui fonctionne au laboratoire de Nouméa depuis 1969. Ce sont les officiers des navires sélectionnés qui sont chargés par le laboratoire d'effectuer les démarches nécessaires. Ils prélèvent un échantillon d'eau de mer à intervalles de temps réguliers (toutes les six heures) à l'aide d'un sceau météorologique largué à partir de la passerelle. Ils notent la température une fois le sceau remonté grâce au thermomètre qui y est fixé et échantillonnent quelques cm<sup>3</sup> d'eau de mer. Ils notent la date, la position et la mesure de SST (plus d'autres paramètres non décrits ici). Lorsque le navire passe à Nouméa, les échantillons et les données sont récupérés et la salinité est mesurée au laboratoire. Ce procédé fut utilisé jusqu'en 1992 et concerne toute la période que couvre l'étude du présent rapport. Il n'existe pratiquement plus depuis 1992 puisque ces navires ont été équipés de thermosalinographes reliés à des PC embarqués et au système GPS.

Ce programme a permis de stocker un grand nombre de données le long de rails parcourus régulièrement à travers le Pacifique par les navires marchands. Ces rails partent, depuis la Nouvelle Calédonie principalement vers les Fidji, la Nouvelle-Zélande, l'Australie, l'Indonésie, le Japon et Hawaï. Pour ce qui concerne la zone plus rapprochée de la Nouvelle Calédonie, quelques navires de la Marine Nationale participent aussi à ce programme. Il est ainsi possible à ce jour d'accéder à environ 190.000 mesures T & S réparties sur le Pacifique depuis 1969.

#### b. Précision

Les données étant la matière première d'une étude telle que celle-ci, il est donc important d'en connaître les limites, leur précision, en particulier si l'on veut détecter des variations interannuelles dues à ENSO qui sont parfois de très faibles amplitudes.

*Température de surface de la mer (Sea Surface Temperature; SST).* La précision des mesures de température au sceau peut être évaluée par l'écart type des différences par rapport à des mesures de

référence faites avec des CTD (Delcroix, 1993). Cet écart type est de  $0.35^{\circ}\text{C}$ . La précision d'une mesure de température d'un CTD étant de  $0.003^{\circ}\text{C}$ . D'autre part, la mesure de température au sseau est sous-estimée en moyenne de  $0.15^{\circ}\text{C}$  par rapport à la mesure CTD. Ceci serait peut-être du à une évaporation de l'eau (donc une perte de chaleur) lors de la remontée du sseau jusqu'à la passerelle qui est souvent très haut au-dessus de l'eau (20-25m sur les navires de la CGM).

*Salinité de surface de la mer* (Sea Surface Salinity; SSS). D'après Delcroix et Hénin (1991), et selon le même type de comparaison avec CTD, l'écart type des différences pour une mesure de salinité au sseau est de 0.1 usp. La mesure au sseau est surestimée de 0.06 à 0.09 usp pour des raisons différentes: dépôts de sel dans le sseau, évaporation à la remontée et stockage des échantillons pendant 1 à 3 mois avant analyse.

### **c. Validation initiale**

L'étape suivante est la mesure de salinité des échantillons au laboratoire. Puis c'est la saisie informatique des données qui passent ensuite par un premier traitement avant d'être classées définitivement en banque de données. C'est une validation subjective effectuée à l'aide de graphiques qui permettent la visualisation des données. Pour les données associées à un rail de navigation on trace les valeurs de chaque paramètre T, S en fonction de la distance parcourue par le navire. On peut voir immédiatement les valeurs aberrantes qui forment des pics, ou bien des valeurs qui sortent des limites climatiques connues. Sont aussi tracés la longitude et la latitude en fonction du temps afin d'éviter les erreurs de position (erreur de transcription ou passage de la ligne de changement de date...).

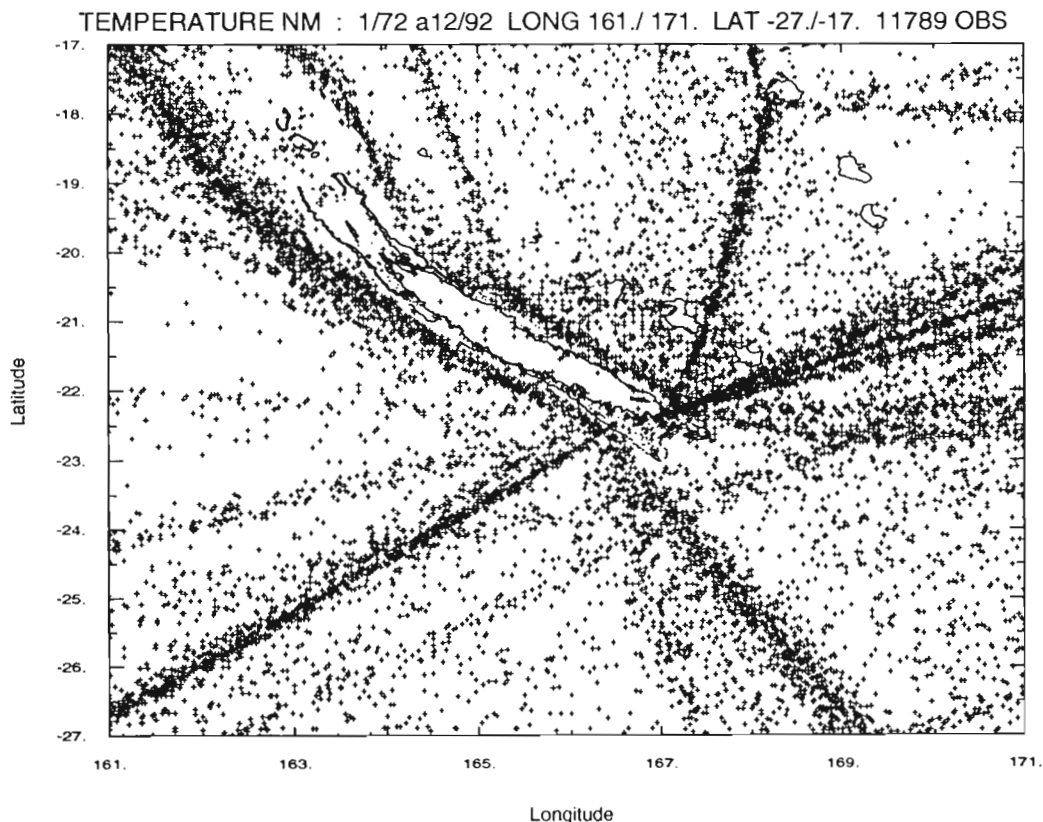
Le laps de temps qui sépare la mesure de la mise en service en banque de données peut aller de trois à six mois.

### **d. Extraction des mesures océanographiques de la base de données**

Les données sont classées par enregistrements (une vingtaine de millier), chaque enregistrement est un tableau qui contient 128 éléments [8 observations de 16 paramètres]. Ces 16 paramètres sont : jour, mois, an, heure, latitude, longitude, état de la mer, nébulosité, temps présent, température air sec, température air humide, direction du vent, force du vent, SST, SSS, chlorophylle.

Avec un programme de tri sélectif de la base de données et de classement dans un fichier de sortie (de même format que les données d'entrée), on peut sélectionner une période et une région choisies et pointer sur une carte la position de toute la sélection (Fig. 4). J'ai adapté ce programme à l'étude en augmentant les pas en latitude et en longitude pour améliorer les routines graphiques, en modifiant les bornes et en ajoutant le tracé d'une carte de la Nouvelle Calédonie beaucoup plus précise que la carte du monde initiale (nmtraol.f). Un autre programme (fmmmlt.f) permet d'obtenir la distribution spatio-temporelle des mesures en les situant en fonction du temps et de la latitude (on ne tient plus compte de la

longitude, Fig.5). L'observation de cette distribution a permis, par approches successives, de sélectionner un maximum de données situées entre 161°E–171°E , 27°S–17°S sur la période 1961–1994.



**Figure 4 : localisation spatiale des mesures de température et de salinité de surface obtenues à partir des navires marchands et de la marine Nationale sur la période 1972 à 1992**

*Distribution spatio-temporelle.* La distribution spatiale des données sélectionnées de T et S est présentée sur la figure 4 : On remarque les routes de navigation des navires marchands depuis ou vers la Nouvelle Calédonie. On voit certaines erreurs de position (mesures sur la grande Terre!) due à des erreurs à la saisie ou à l'absence de GPS dans les années 1970. La fenêtre est choisie de telle sorte que ces rails s'y répartissent de manière homogène en latitude et en longitude. Elle est centrée sur Nouméa. La Nouvelle Calédonie se situe plutôt dans la partie supérieure, ce qui permet de pratiquement centrer le tropique du Capricorne. A 23°27'S ce parallèle délimite les zones tropicale et extra-tropicale ce qui marque l'intérêt supplémentaire de l'étude: le signal ENSO sera recherché en dehors de sa zone équatoriale de genèse et on entame ainsi les premier pas du programme de recherche international CLIVAR.

La représentation spatiale de la figure 4 ne permettant pas de contrôler la répartition dans le temps des données, il a fallu une représentation spatio-temporelle. Les distributions des structures océaniques en T et S étant essentiellement zonales (Delcroix-Hénin, 1989; on le justifiera à posteriori), nous avons choisi une représentation temps/latitude en regroupant les longitudes 161°E–171°E comme sur la figure 5. En raison du faible nombre de données de 1961 à 1971 et après 1992, seule la période

1972–1992 a été sélectionné, dans un souci de minimiser les interpolations.

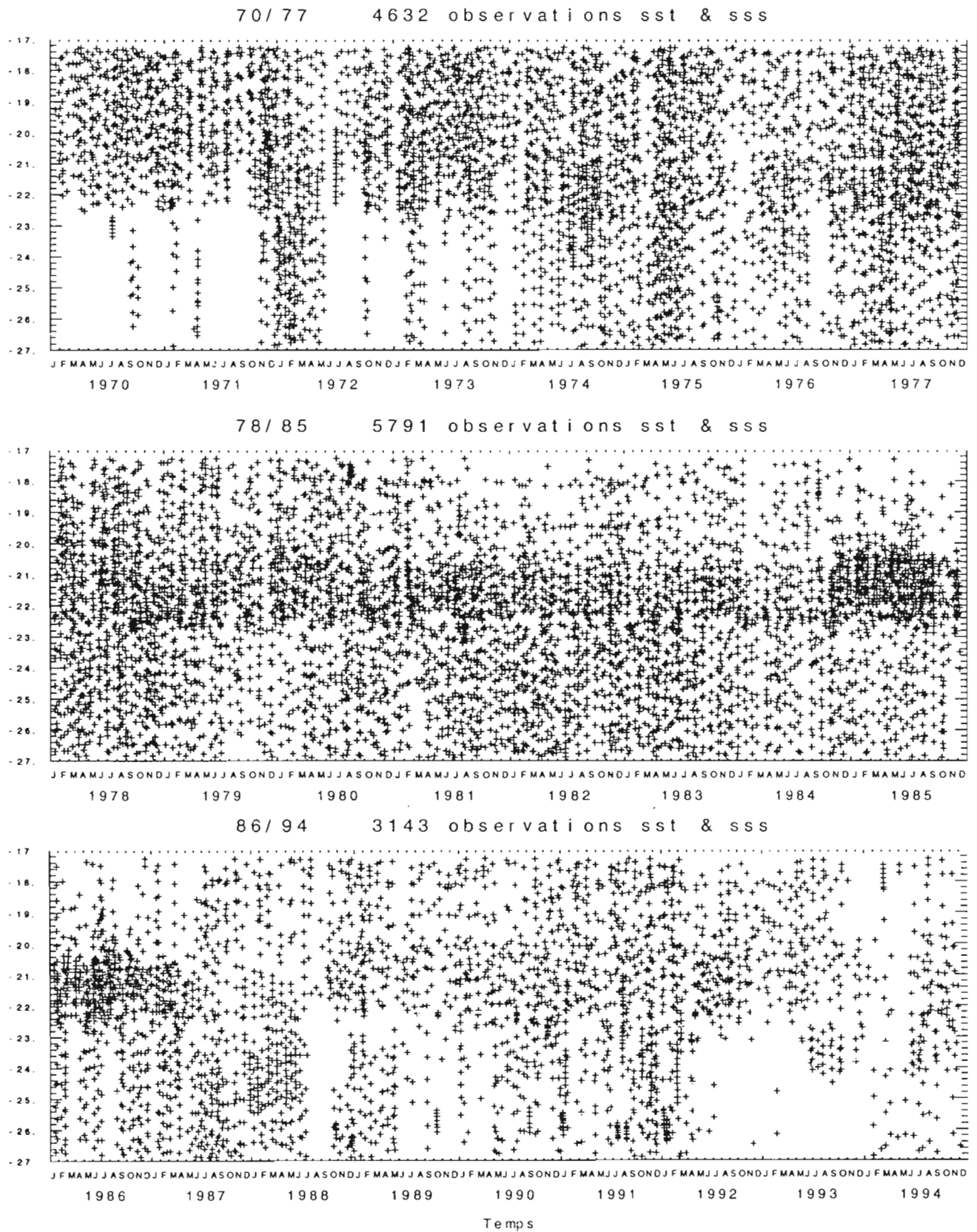


Figure 5 : répartition latitude–temps des mesures de température et de salinité de surface obtenues à partir des navires marchands et de la marine Nationale sur 161°E–171°E

### e. Validations supplémentaires

En complément de la validation subjective des données, une validation objective, faisant appel à un outil mathématique, a été entreprise. En effet, la validation subjective se faisait par route de navigation, et on peut penser que si les données étaient homogènes entre elles, elle peuvent toutes présenter une erreur – de majoration par exemple – et être validées malgré tout. La validation objective ne distingue pas les routes de navigation.

Le principe est de classer les données sélectionnées par 12 bandes de un degré de latitude en partant de 28°S à 16°S. Dans un premier temps un programme lit la sélection et fait la moyenne des valeurs de température et de salinité pour chaque bande de 1° de latitude, sur toutes les longitudes et sur toute la période. Puis, un deuxième programme calcule l'écart type des valeurs de T et S dans chaque bande. Pour une bande de latitude donnée, chaque valeur est comparée à la valeur moyenne et à l'écart type calculés plus haut. Il place un drapeau sur les valeurs dépassant la valeur moyenne d'un multiple choisi d'écarts types. Il calcule les nouvelles valeurs moyennes à partir des valeurs sans drapeau. On fait tourner plusieurs fois ce programme qui calcule les nouveaux écarts types en diminuant successivement le multiple en question. Un troisième programme permet une sortie en format ascii de la sélection des données validées.

J'ai là encore du adapter ces programmes (nmmoyol.f, nmetol.f, nmctol.f) pour le format des données d'entrée, les pas spatiaux désirés et pour d'autres détails.

Rappelons que si l'on considère la distribution des données comme étant Gaussienne centrée en  $m$ , 68% des données sont à moins d'un écart type de  $m$ . Une fonction gaussienne d'écart type  $\sigma$ , de moyenne  $m$  est décrite par

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad \text{avec} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

La probabilité  $p$  qu'une mesure soit comprise entre  $m-\sigma$  et  $m+\sigma$  est alors

$$P = \int_{m-\sigma}^{m+\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)} dx$$

soit, avec  $t = (x-m)/\sigma$

$$P(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-T}^T e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Les tableaux de valeur de la fonction  $\frac{1}{2}\text{erf}(k/\sqrt{2})$  permettent d'obtenir la probabilité  $p(k)$  qu'une



mesure soit comprise entre  $m-k\sigma$  et  $m+k\sigma$ . Les valeurs utilisées sont :

$$p(k=5) = 0.999994266, \quad p(k=4) = 0.9999366 \quad \text{et enfin} \quad p(k=3.5) = 0.9995348$$

Dans la procédure utilisée, les valeurs ont été filtrées à cinq fois l'écart type, puis à quatre, puis à trois et demie. Pour chaque bande de latitude et selon les valeurs moyennes de T et S, il y a un certain nombre de valeurs retenues à chaque étape. En tout on a écarté ainsi 0.19% des données de température et 0.66% en salinité, ce qui est assez important au vu des précédentes probabilités inférieures à 0.05%. Cela reflète l'existence d'un faible nombre de données aberrantes et traduit ainsi le fait que le signal ne soit pas purement gaussien, en particulier en raison des modes El Niño et La Niña décrits plus loin (sans excès non plus car 0.66% et 0.19% restent encore de faibles valeurs).

#### **f. Etats moyens de température et de salinité de surface**

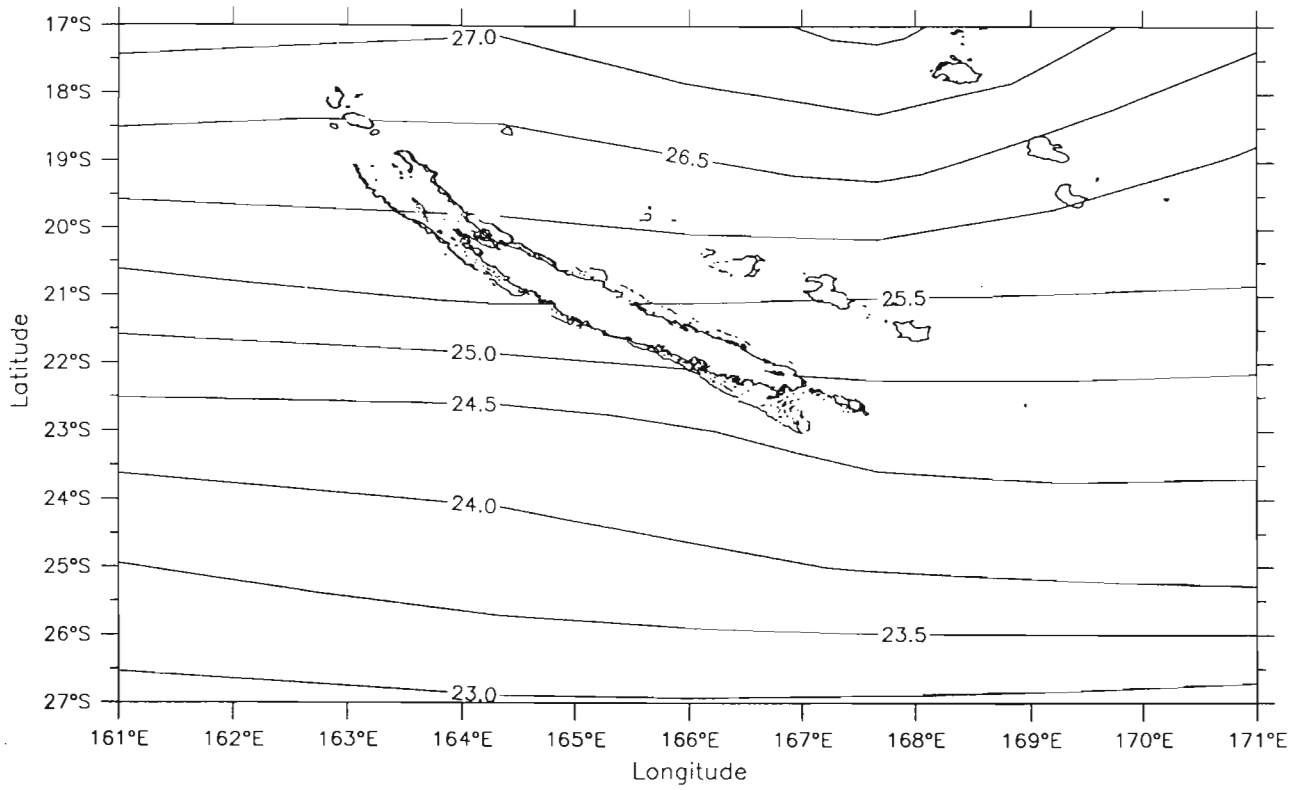
Les études précédentes ont montré que la distribution de la température et de la salinité est, comme je l'ai dit plus haut, essentiellement zonale (par bande de latitude). Cette propriété peut s'illustrer à partir de l'état moyen.

Pour cela, j'ai utilisé un logiciel graphique du fortran, PPLUS, qui permet de programmer le tracer des courbes à partir de données en format ascii, avec la possibilité de modifier le type d'interpolation utilisée (ssts.ppc). A partir du fichier d'entrée ascii issu de la précédente validation, [temps(mois), latitude, longitude, température, salinité] et en supprimant la variable temps, la figure 5 représente la distribution spatiale des isothermes et les isohalines. Le logiciel PPLUS moyenne pour une latitude et une longitude toutes les valeurs avec un pas de deux degrés en longitude et un degré en latitude. En moyennant les données indépendamment du temps, il faut être bien conscient que le résultat risque d'être biaisé par une inhomogénéité temporelle de la répartition des données, d'où le choix de la fenêtre en temps d'après la figure 5.

La représentation des états moyens sur les 21 ans se trouve en figure 6a et 6b. La distribution est donc quasiment zonale, en accord avec les résultats passés (Delcroix et Hénin, 1989). Lorsque l'on se déplace du sud au nord, la salinité de surface moyenne décroît de 35.8 à 35.1 usp et la température moyenne de l'eau augmente de 22.5 à 27.5°C. Les variations de salinité sont reliées aux variations de l'évaporation, de précipitations et de l'advection des sel entre le sud et le nord. La variation méridienne de température reflète principalement la variation de distribution solaire (incidence moyenne) sur chaque zone.

La première conclusion est que l'on peut considérer la distribution comme étant zonale et donc que le regroupement en longitude va être envisageable. La variation longitudinale de la température est 7 fois moins grande que celle en latitude et 4 fois moins pour la salinité. Supprimer la distinction en longitude dans les données va permettre d'éviter une certaine redondance de l'information, va focaliser

**a** TEMPERATURE DE SURFACE MOYENNE (Deg.C); Ref. 1972-92



**b** SALINITE DE SURFACE MOYENNE (usp); Ref. 1972-92

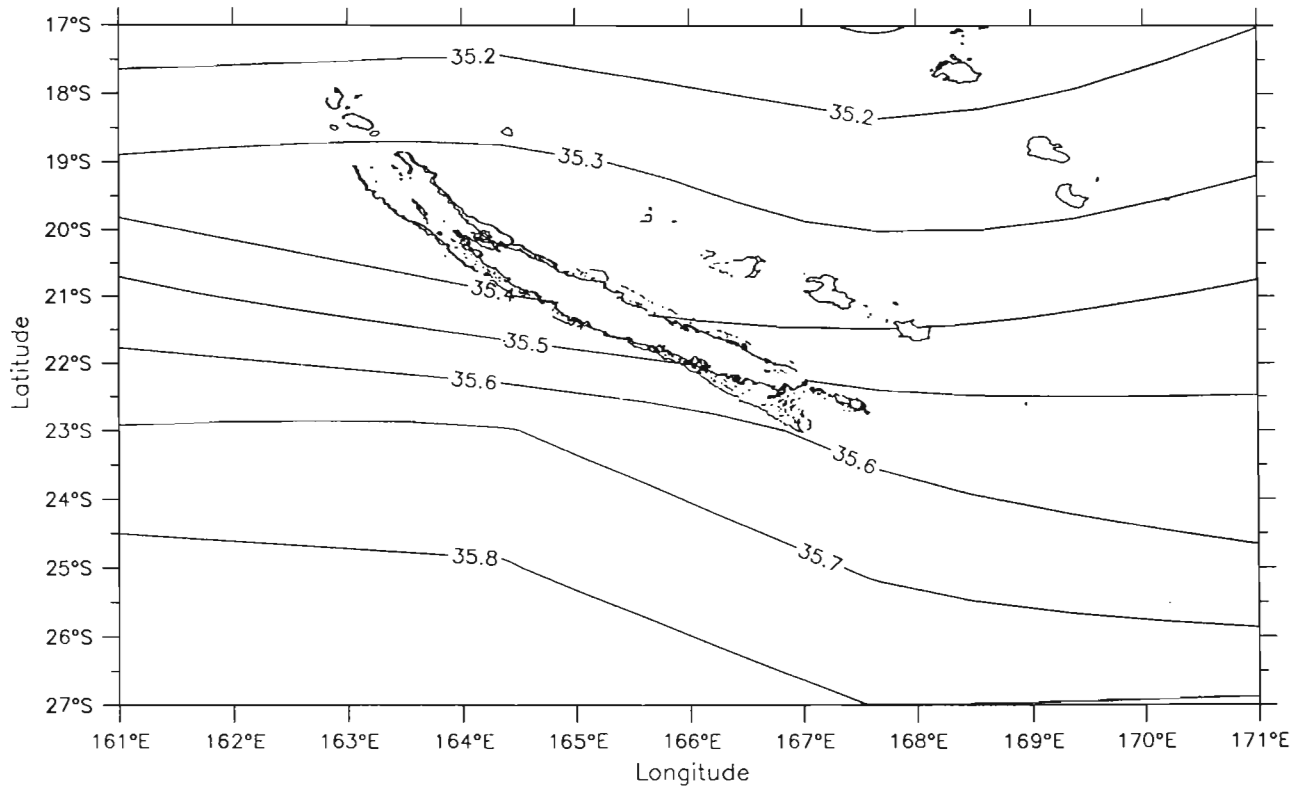


Figure 6 : moyennes climatologiques sur la période 1972 à 1992 de la température ( a : en haut; degrés Celcius) et de la salinité ( b : en bas; usp) de surface

l'étude sur le gradient important. Pour les études de variations temporelles, cela permet d'augmenter la densité en temps et d'éviter des inhomogénéités. On ne peut de toute façon faire une étude des variations en latitude, longitude et par mois car il n'y a pas assez de données et cette propriété permet de réaliser un compromis inévitable mais justifiable.

#### **g. Création des grilles de départ**

On utilise les grilles pour passer d'une forme de données inégalement réparties dans le temps et l'espace à une forme quadrillée et connue qui va permettre leur manipulation. Concernant ces grilles, il y avait dès le départ une volonté de les rendre uniformes pour chaque paramètre. Afin de les traiter avec le même type de programmes Fortran et graphiques et afin de pouvoir les comparer réellement. Pour s'assurer de la possibilité de cette systématisation, nous avons procédé au départ de façon parallèle pour chaque paramètre jusqu'à la création des grilles. Cela a été possible puisque les quatre paramètres principaux (SST, SSS, vents, précipitations) ont pu se mettre sous la même forme [temps, latitude, valeur]. Il n'y avait pas de dimension verticale.

Une grille est une matrice de valeurs, ici  $T_{ij}$  pour la température ou  $S_{ij}$  en salinité, dont les pas d'indices sont constants en temps (colonnes) et en latitude (lignes). En raison de la répartition spatio-temporelle et des échelles de temps et d'espace étudiées, les pas de grille choisis sont de un mois et de un degré. Sur 21 ans et sur 27°S à 17°S, cela donne [11×252] points. Le principe d'approximation du 'grillage' est le suivant : par exemple le point de coordonnées 25°S, mois n°5 est calculé en faisant la moyenne de toutes les valeurs comprises dans le carré [25.5°S–24.5°S] × [4.5–5.5]. Si il n'y a pas de valeur le point est calculé par interpolation Laplacienne à partir des points ayant déjà fait l'objet d'une approximation, et situés au plus loin à NPG pas de grille autour du point courant (NPG étant au choix). Le logiciel qui permet cette programmation est CONTOUR+, qui possède presque les mêmes fonctions graphiques que PPLUS décrit plus haut, mais permet en plus de créer ces grilles dans un fichier de sortie binaire.

En moyenne un point de grille représente 4.3 mesures, ce qui est très correct. En effet, cela réduit l'erreur d'un ordre de grandeur de  $1/\sqrt{4.3}$ . C'est un ordre de grandeur car l'intervalle de confiance de la moyenne est valable pour de grandes séries.

Afin d'enlever le bruit et les variations à l'échelle du mois, la grille ainsi créée a été lissée en temps à l'aide d'un filtre '¼ ½ ¼' (slis.f). Le principe est que pour chaque ligne (latitude), on parcourt toutes les valeurs en les remplaçant par une combinaison linéaire des valeurs précédente, courante et suivante:  $val(i,j) = \frac{1}{4} val(i,j-1) + \frac{1}{2} val(i,j) + \frac{1}{4} val(i,j+1)$ . Ceci permet une visualisation correcte par 'contouring' avec un programme de CONTOUR+ (controlT, myfile). Le tracé de la grille lissée est présenté en figure 7a pour la température et en figure 7b pour la salinité.



On retrouve les caractéristiques de l'état moyen sur les figures 7a-b : du sud vers le nord la salinité diminue et la température augmente. En température les variations saisonnières de période un an sont très nettes, alors qu'en salinité ce signal est moins clair – en amplitude du moins –, par contre on perçoit des variations interannuelles comme par exemple la brèche de forte salinité en 1978. On isolera au § IV. ces dernières variations, en montrant en particulier si elles sont associées au phénomène El Niño–Oscillation Australe ou pas.

## II.2. Données météorologiques

### a. Origine

Les données vents utilisées (FSU) proviennent de la Florida State University. Les vents sont mesurés à partir de navires marchands essentiellement et aussi par les mouillages TOA (réseau de bouées de mesures océanographiques du programme TOGA) depuis 1989. La mesure à partir des navires est convertie en vecteur pseudo-tension du vent de norme  $\|u\| \times u$  et d'unité  $m^2.s^{-2}$ . Ils sont produits à partir d'un principe de validation subjectif en étant d'abord digitalisés sur des rectangles de  $2^\circ$  de latitude et  $10^\circ$  de longitude par mois, puis les valeurs extrêmes à plus de trois écarts types de la moyenne sont écartées. Ces valeurs sont alors interpolées à la main pour chaque mois et sur tout le Pacifique entre  $30^\circ S$  et  $30^\circ N$ , puis digitalisées à nouveau par mois, mais sur des carrés de  $2^\circ$  de latitude et  $2^\circ$  de longitude (Goldenberg et O'Brien, 1981). Nous avons donc accès à un produit déjà grillé, de 1969 à 1994 sur l'océan Pacifique et depuis peu sur l'Indien, de pas  $2^\circ \times 2^\circ \times 1$  mois, d'unité  $m^2.s^{-2}$ .

Les précipitations proviennent de mesures satellitales basées sur la température des nuages d'altitude. Plusieurs satellites à orbite polaire de la NOAA sont équipés de radiomètres utilisés pour estimer les OLR (Outgoing Long-wave Radiations). La température des nuages est déduite du flux radiatif mesuré selon le principe du rayonnement corps noir et de la relation de Boltzman  $E = \sigma T^4$ . Dans les tropiques, il y a une bonne corrélation entre les nuages froids ( $< 235^\circ K$ ) et les quantités d'eau qu'ils contiennent. Ceci se vérifie bien sur des carrés de  $2.5^\circ l \times 2.5^\circ L \times 24H$ . Le satellite effectue deux mesures par jour qui sont ensuite moyennées par mois. L' algorithme qui permet d'établir la relation entre la température mesurée et la quantité de précipitation au niveau de la mer est donné par Janowiak et Arkin (1990). La calibration est effectuée à partir de mesures sur des îles du Pacifique soit par RADAR au sol ou par pluviomètre classique (Arkin et Meisner, 1987). Les données de précipitation existent depuis juin 1974 avec un trou du 03-1978 au 12-1978. Au laboratoire, on n'en dispose que jusqu'en 1989 en attendant la prochaine mise à jour (de Janowiack et Arkin de la NOAA). Nous avons ainsi un produit 'grillé' de  $2.5^\circ l \times 2.5^\circ L \times 1$  mois du 06-1974 au 03-1989, d'unité mm/jour (convertie ensuite en m/an).

## **b. Précision**

Le vent est mesuré de la passerelle, puis ramené à un niveau de référence ( $u^*$ ). L'erreur absolue est difficilement mesurable et peut provenir des différentes étapes : mesure, interpolation, etc.... Il existe d'autres produit de vents que FSU (FNOC, ECMWF, SAWIN, NMC) et une étude de Busalacchi et al., (1993) les comparant entre eux montre que les vents FSU semblent ressortir comme les meilleurs à l'échelle mensuelle.

La précision des estimations de précipitation tirées des OLR a été évaluée par Janowiak et Arkin au minimum à 50%. Malgré cela, compte tenu des types de variations de la précipitation, le satellite peut identifier la différence entre un régime de pluie et un régime de faible précipitation. L'erreur maximale dans le premier cas sera de l'ordre de 1.5m/an et dans le deuxième de l'ordre de 0.05m/an. Comme se sont deux ordres de grandeur très différents, on pourra toujours distinguer les deux régimes sur une variation temporelle. Par la suite sera faite une comparaison de l'année type de précipitation sur Nouméa entre l'étude de Morlère et Rebert, 1986 et la série tirée des FSU. Remarquons que l'hypothèse des précipitations associées à la température d'un nuage (ascension, refroidissement puis condensation) a été bousculée, à l'échelle de la semaine et sur des observations ponctuelles, lors de l'expérience COARE (Nov 92 – Fev 93). Des précipitations ont été observées, associées à des nuages 'chauds' ( $> 240^{\circ}\text{K}$ ).

## **c. Extraction depuis la base de données des vents et précipitations**

Un programme du laboratoire (`triwfsu.f`) permet le tri de la base de donnée (`bwdfsu8`) des vents dans un fichier binaire. On s'ajuste à la fenêtre choisie avec les SST et SSS et la sélection des données de vent se fait sur  $160^{\circ}\text{E}$  à  $1720\text{E}$ ,  $27^{\circ}\text{S}$  à  $17^{\circ}\text{S}$  sur une période continue de 21 ans de janvier 1972 à décembre 1992. J'ai ensuite créé un programme pour obtenir un fichier ascii [temps, latitude, longitude, composantes zonales et méridiennes et norme de la pseudo tension] à partir du fichier binaire (`fsuascii.f`).

De même pour les précipitations, de la base de donnée (`rr`) un programme (`gridp.f`) crée un fichier ascii de quadruplettes [temps, latitude, longitude, précipitation]. La sélection se fait sur  $160^{\circ}\text{E}$  à  $172.5^{\circ}\text{E}$ ,  $27.5^{\circ}\text{S}$  à  $15^{\circ}\text{S}$ , de juin 1974 à mars 1989 avec un trou en 1978 de mars à décembre, unité en m/an.

## **d. Etats moyens des vents et précipitations**

Les vents moyens (Fig. 8a-c) ont été calculés sur une grille lon. $\times$ lat. de  $2^{\circ}\times 1^{\circ}$  pour  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  et la norme de  $\tau$ , dans un soucis de conformité avec les SST et SSS moyens, le vecteur  $\tau$  a été ramené à une grille longitude–latitude de  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  (`w.ppc`, sur PPLUS). Nous nous intéressons à la norme mais aussi au deux composantes zonales et méridiennes du vecteur pseudo–tension du vent.

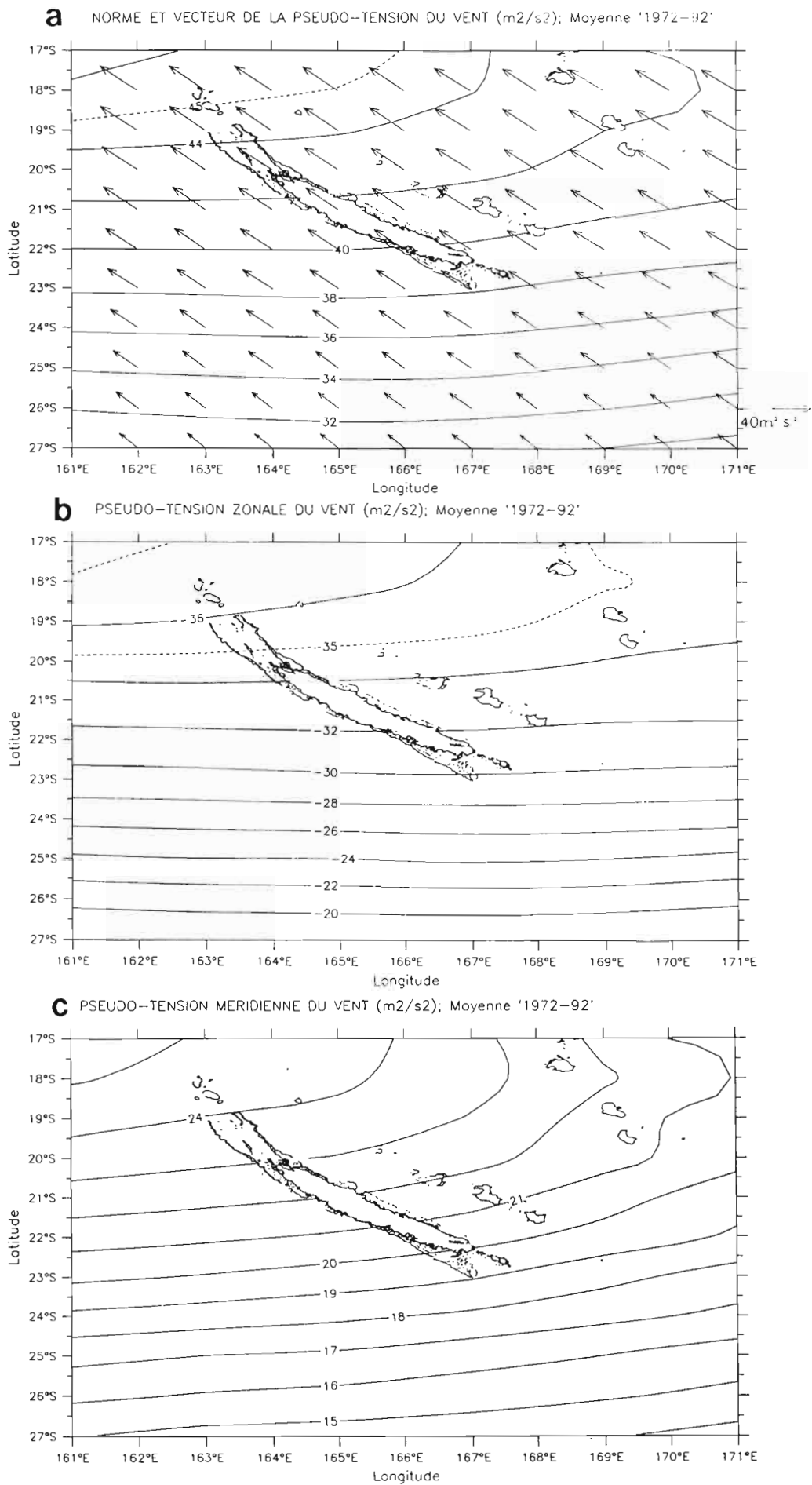


Figure 8 : moyennes climatologiques sur la période 1972 à 1992 de la pseudo-tension du vent, norme et vecteur (a : en haut;  $m^2.s^{-2}$ ), composante zonale (b : au milieu; négative vers l'ouest,  $m^2.s^{-2}$ ) et composante méridienne (c : en bas; positive vers le nord,  $m^2.s^{-2}$ )

Ce régime moyen met évidemment en évidence les alizés comme vents dominants, orientés de sud-sud-est au sud et de sud-est au nord de la fenêtre. Ils sont parallèles à la Nouvelle Calédonie et plus intenses au nord. La pseudo-tension est en  $m^2 \cdot s^{-2}$  et ramené en vitesse plus perceptible, le vent moyen varie de  $20.5 \text{ km/h}^{-1}$  au sud à  $24 \text{ km/h}^{-1}$  au nord (de 10 à 12 nds). Les lignes de même pseudo-tension de vent ont une structure quasi-zonale, excepté dans le nord de la région.

Les précipitations moyennes (Fig. 9) s'échelonnent de 0.4 à 0.8 m/an. Nous avons comparé ces valeurs avec les valeurs moyennes in situ du territoire et on remarque des pluies deux fois plus fortes (1 mètre sur la côte est et 2 mètres côte ouest). Cette différence est certainement due à l'effet orographique qui piège les nuages sur les flancs de montagnes. Contrairement aux autres paramètres, les isohyètes ne sont pas de symétrie zonale et s'incurvent très fortement au niveau du tropique du Capricorne. La présence de la ZCPS peut expliquer l'orientation du gradient vers  $[17^\circ\text{S}, 170^\circ\text{E}]$ .

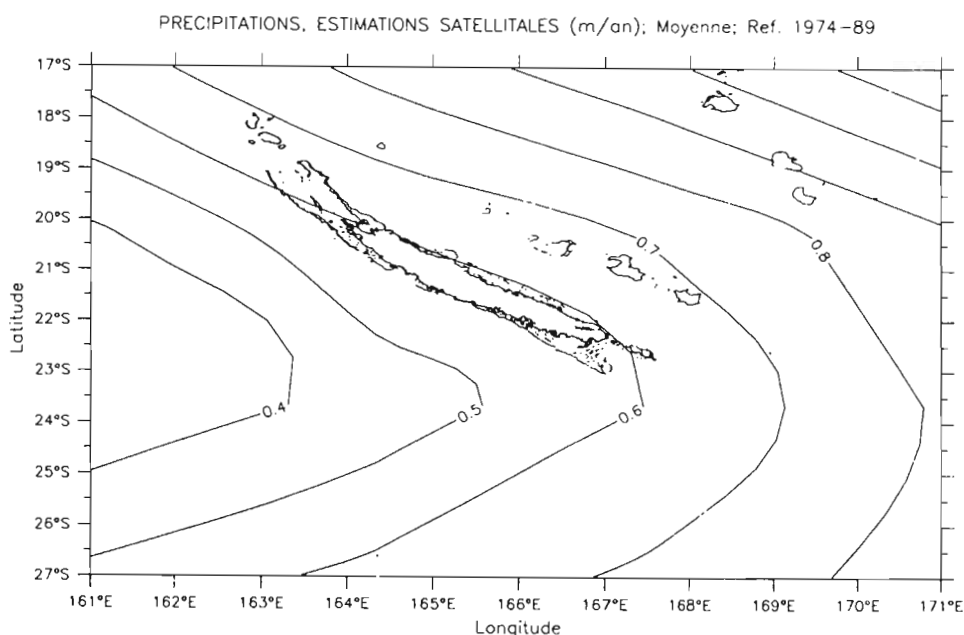


Figure 9 : moyenne climatologique des estimations satellitales des précipitations sur la période 1974 à 1989 (m/an)

### e. Création des grilles de départ de vents et de précipitations

Il y a cette fois une particularité dans l'étape de création des grilles lat.-temps puisqu'il s'agit pour les deux paramètres météorologiques de ramener une grille sur une autre de résolution plus fine, et ceci uniquement en latitude (Fig 10). Pour compenser le fait que les intervalles de temps concordent mais pas ceux en latitude il a fallu 'orienter' l'interpolation en la forçant dans le sens méridien.

Pour les vents, l'intervalle de confiance d'une valeur mensuelle lié au nombre de mesures que représente un point de grille se ramène sensiblement à celui des SST et SSS puisque les officiers qui



mesurent les vents à la passerelle le font toutes les six heures. On a vu que la distribution des valeurs de vents moyens ne se faisait pas exactement de manière zonale (Fig. 8a-c). Afin de vérifier que les variations en longitude ne risquent pas de biaiser les résultats liés au compactage en longitude, nous avons mené des études parallèles pour différentes longitudes. Pour cela nous avons créé trois types de grilles différentes (pour la norme de  $\tau$ ,  $\tau_x$  et  $\tau_y$ ), en prenant les données des longitudes 160°E à 172°E, de la longitude 166°E et de la longitude 170°E. La conclusion est que l'on a obtenu des résultats très peu différents, ce qui permet de présenter ici la version compactée sur [160°E – 172°E].

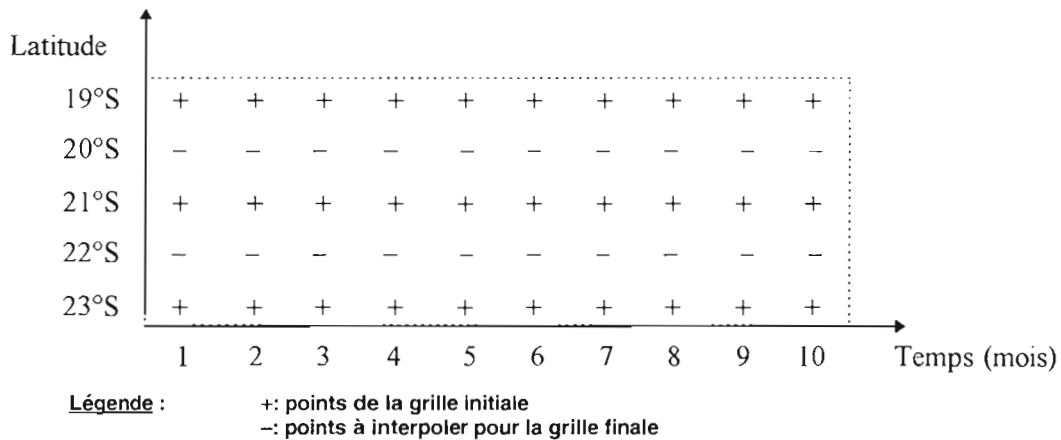


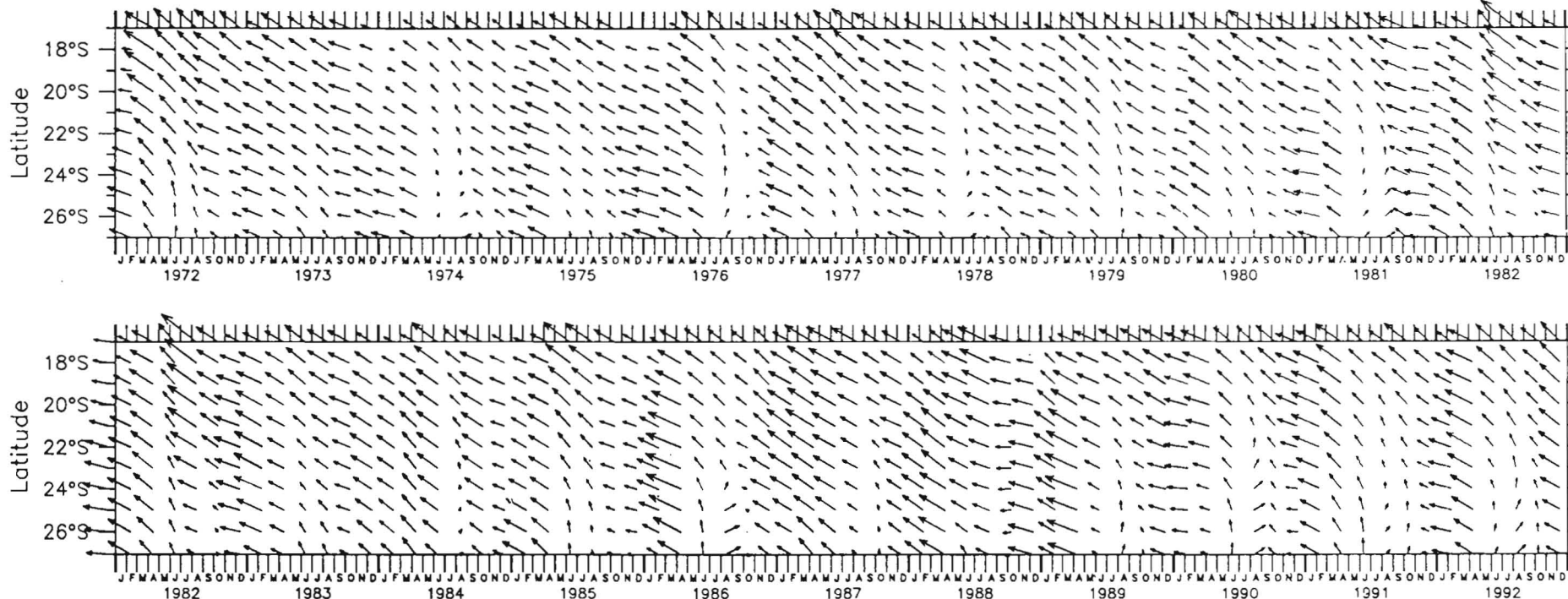
Figure 10: représentation schématique des interpolations de grilles (ici les vents)

Le paramètre précipitation ne sera pas exactement comparable aux autres étant donné la longueur des séries, de 1974 à 1989 au lieu de 1972 à 1992. Qui plus est, de part la forme non zonale de l'état moyen (Fig. 9) et d'après les acquis des précédents traitements de vents, la grille de départ des précipitations a été créée uniquement avec les données situées sur la longitude 165°E.

Par conformité avec les traitements des données SST et SSS, les grilles finales de vent et de précipitation ont aussi été filtrées en '¼ ½ ¼' en temps pour améliorer la visualisation. La figure 11b présente des isohyètes de ces grilles. La pseudo-tension du vent est présentée en vecteurs (Fig. 11a) afin de rassembler les informations des contours de valeurs  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  ou  $\tau$ . On voit que pour ces paramètres atmosphériques la mise en évidence d'un signal saisonnier ou interannuel n'est pas évidente, d'où l'intérêt du chapitre IV. Mais disons d'abord quelques mots sur les techniques utilisées pour mettre en évidence les variations saisonnières et interannuelles.

**a** VECTEUR DE LA PSEUDO-TENSION DU VENT; 160E-172E

→ 4.000E+01 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>



**b** PRECIPITATIONS (m/an); 165E

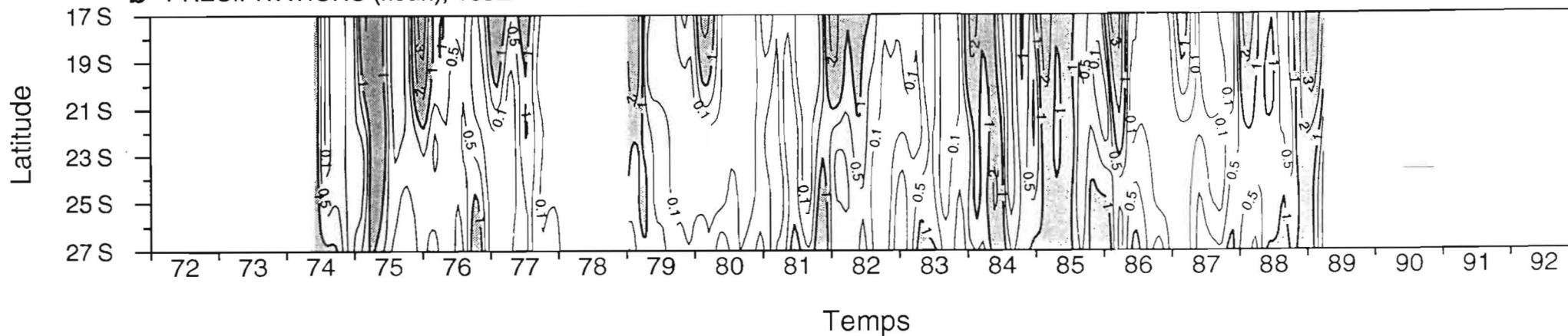


Figure 11 : variation latitude-temps du vecteur pseudo-tension du vent (a : en haut; m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>) moyenné sur 160°E-172°E et des précipitations (b : en bas; m/an) le long de 165°E

### III. METHODES D'ANALYSE

---

Ce chapitre insiste sur la présentation des méthodes employées pour obtenir les résultats présentés plus loin. Il s'agit d'expliquer l'utilité, la pertinence de certaines démarches et d'en détailler le fonctionnement. Ainsi nous verrons comment obtenir, à partir des grilles de départ de chaque paramètre, l'année type, la variation interannuelle, les moyennes et écarts types, l'amplitude et la phase de l'harmonique annuel par analyse de Fourier et les coefficients de corrélation avec le signal IOS. Il est intéressant de montrer que l'approche utilisée fut la même pour les deux types de données océanographiques et météorologiques et les programmes ont été créés pour s'adapter à leur formats communs.

#### III.1. Construction de l'année type

Le but de ce rapport est de faire ressortir à travers les variations interannuelles la présence ou non d'une influence d'ENSO sur un paramètre donné. Or les variations interannuelles ne sont qu'une partie du signal total et a priori petites devant les variations annuelles. Ces dernières englobent le cycle saisonnier qui peut être très important en amplitude. Cette constatation nous a amené à bien étudier le cycle saisonnier pour ne pas risquer d'obtenir l'interannuel sans une bonne connaissance du signal complet et sans en relativiser l'importance.

L'année type fut calculée à partir de la grille de départ (latitude, temps) sur les 21 ans. Pour chaque latitude on regroupe les valeurs par mois et on en fait la moyenne. On obtient alors la moyenne des mois de janvier, la moyenne des mois de février, etc. jusqu'au mois de décembre, et ceci pour les 11 latitudes de 27°S à 17°S. Le programme qui effectue cela (`antype.f`) produit en sortie une grille (12×11) représentative d'un cycle annuel complet calculé sur une base de 21 années. Une visualisation graphique est ensuite obtenue avec un programme CONTOUR+ pour chaque paramètre.

#### III.2. Analyse de Fourier

Les schémas obtenus précédemment permettent une bonne appréciation globale du cycle annuel, mais pour une analyse plus fine, il a paru utile de pousser encore plus loin avec l'analyse de Fourier. La décomposition en série de Fourier permet de quantifier le cycle annuel moyen en se focalisant sur l'harmonique annuel. Cette analyse a été possible grâce à un programme (`amphas.f`) qui existait sur le laboratoire et qu'il a fallu modifier uniquement pour l'entrée de la grille. Cette grille d'entrée est d'ailleurs le signal entier, et non l'année type. L'analyse qui en ressort est faite pour chaque bande de latitude.

Pour une latitude donnée, on obtient tout d'abord l'amplitude annuelle, qui est la valeur de l'harmonique à 12 mois, permettant de quantifier les variations annuelles. On obtient également la phase

annuelle, exprimée en mois ou en degrés (les degrés correspondant quasiment aux nombres de jours de l'année : de 0 à 360 et de 0 à 365), et qui montre clairement la date du maximum d'amplitude.

Un dernier produit, important, de ce traitement est le pourcentage de variance qui quantifie l'importance relative en % des variations typiquement annuelles devant les autres variations possibles. Pour une latitude donnée, c'est un calcul de corrélation entre la série des valeurs brutes et la série annuelle. Le pourcentage de variance est égal au carré du coefficient de corrélation. En particulier cette dernière information pourra montrer clairement qu'un signal, même si il est visuellement très annuel pour l'année type (de forme sinusoidale), comporte d'autres variations importantes à d'autres échelles de temps.

Ces trois produits (amplitude, phase annuelle et % de variance) sont ensuite présentés avec un programme sous PPLUS (amphas.ppc) sur le même graphe afin de pouvoir rapidement les relier entre eux par bande de latitude.

### III.3. Calcul des variations interannuelles

Voici la partie qui nous intéresse plus particulièrement. Il existe plusieurs méthodes pour extraire d'un signal brut la composante interannuelle. Nous en avons essayé deux.

La première était de soustraire à tous les mois du signal brut le mois correspondant de l'année type. Cette méthode a été écarté car le résultat obtenu n'était pas satisfaisant, et ceci en raison de deux phénomènes : les variations non saisonnières, mais d'échelle de temps inférieures à une année n'étaient pas écartées (principalement pour un signal peu annuel comme par exemple la salinité). De plus il peut arriver que le cycle annuel se décale dans le temps à certaines années, ce qui fausse encore le résultat. Les résultats de cette étude ne sont pas présentés ici.

La deuxième méthode fut d'utiliser un filtre passe-bas. Le principe est de filtrer le signal brut en éliminant toutes les périodes inférieures à 12 mois, puis de soustraire au signal ainsi filtré la moyenne calculée sur la longueur de la série filtrée. On évite par là l'erreur de la première solution en s'assurant que les seules variations restantes seront de toutes façon de période supérieures à un an. Ce programme de filtrage existait au laboratoire sous forme de sous-routine, il a fallu l'adapter pour faire le traitement sur nos grilles (slisH.f). La méthode utilisée est basée sur le filtre de Hanning (Bendat et Piersol, 1971).

Le filtre de Hanning provient d'une amélioration du filtre passe-bas plus connu qui est celui de la fonction temporelle fenêtre  $w_{\tau_m}(\tau)$  définie par

$$w_{\tau_m}(\tau) = 0 \quad \text{pour } \tau < -\tau_m$$

$$w_{\tau_m}(\tau) = 1 \quad \text{pour } -\tau_m \leq \tau \leq \tau_m$$

$$w_{\tau_m}(\tau) = 0 \quad \text{pour } \tau > \tau_m$$

et de transformée de Fourier  $W_{\tau_m}(f)$

$$W_{\tau_m}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} w_{\tau_m}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

$$W_{\tau_m}(f) = 2\tau_m \left( \frac{\sin 2\pi f\tau_m}{2\pi f\tau_m} \right)$$

Or la fonction fenêtre spectrale  $W_{\tau_m}(f)$  montre que si l'on applique ce filtre, on va induire la présence de puissances spectrales négatives assez fortes en raison surtout du deuxième lobe que présente cette fonction sinus cardinal, et donc on laisse passer certaines fréquences plus hautes que voulues. Pour réduire ce problème de perte d'énergie au delà de la fenêtre fréquentielle visée, il faut modifier la forme de fenêtre temporelle pour élargir le lobe central et diminuer les effets des lobes secondaires. Ceci est réalisé en effectuant un lissage de Hanning '  $\frac{1}{4} \frac{1}{2} \frac{1}{4}$  ', décrit plus haut, sur la fonction densité spectrale d'énergie estimée de la fonction fenêtre. Ce qui revient à définir la fonction fenêtre spectrale de Hanning comme

$$H_{\tau_m}(f) = \frac{1}{4} W_{\tau_m}\left(f - \frac{1}{2\tau_m}\right) + \frac{1}{2} W_{\tau_m}(f) + \frac{1}{4} W_{\tau_m}\left(f + \frac{1}{2\tau_m}\right)$$

et par transformée de Fourier inverse, la fenêtre temporelle de Hanning est

$$h_{\tau_m}(\tau) = 0 \quad \text{pour } \tau < -\tau_m$$

$$h_{\tau_m}(\tau) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi\tau}{\tau_m}\right) \right] \quad \text{pour } -\tau_m \leq \tau \leq \tau_m$$

$$h_{\tau_m}(\tau) = 0 \quad \text{pour } \tau > \tau_m$$

Ainsi, pour chaque série temporelle correspondant à une bande de latitude, la subroutine applique ce filtre en faisant le produit de convolution du signal brut et de  $h_{\tau_m}(\tau)$ , en choisissant  $\tau_m = 12$ . L'inconvénient de cette méthode est qu'elle fait perdre de l'information sur les bords de chaque série étant donné que l'on ne peut filtrer les 12 premiers et les 12 derniers mois puisque la largeur du filtre temporel est de  $-\tau_m$  à  $\tau_m$ . Nous obtenons ainsi une grille, toujours binaire et de forme  $[11 \times (252-24)]$  mais dont les éléments représentent les variations interannuelles. Une visualisation graphique est ensuite directement obtenue avec un programme CONTOUR+ pour chaque paramètre.

#### III.4. Moyenne et écarts types du signal total et de ses variations saisonnières et interannuelles

Dans le but d'avoir une vue d'ensemble de chaque paramètre, il est intéressant de pouvoir comparer les différents signaux que sont les variations saisonnières et interannuelles, et le signal total. L'écart type a paru être bien adapté dans cette optique, toujours calculé pour chaque latitude (moy.f). La moyenne du signal total a été ajoutée pour compléter cette vision d'ensemble.

L'écart type d'une série  $x_i$  ( $i = 1$  à  $N$ ) de moyenne  $\bar{x}$  est la racine carrée de la variance  $\sigma^2$

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

L'écart type saisonnier est calculé à partir de la grille de l'année type, l'écart type interannuel l'est à partir de la grille issue du filtrage de Hanning, et l'écart type total à partir de la grille de départ. On pourra ainsi, en traçant ces valeurs d'écart types sur le même graphique sous PPLUS (moy.ppc), quantifier les importances relatives d'une variation par rapport à l'autre. C'est ainsi que l'on a perçu l'importance du signal saisonnier, d'où l'analyse de Fourier décrite au § III.2.. Ces calculs ont permis aussi de s'apercevoir que pour certains paramètres, l'écart type total semblait être grand devant les deux écarts types saisonniers et interannuels. Aussi, afin d'avoir une vision des variations à l'échelle du mois, il a fallu représenter, pour une seule bande de latitude donnée, les valeurs de chaque paramètre en fonction des mois de l'année (trimois.f). La représentation graphique sur PPLUS (trimois.ppc) permettait ensuite de se rendre compte de la variation d'une valeur dans un même mois.

### III.5. Calcul du coefficient de corrélation avec l'IOS

L'IOS est le marqueur d'ENSO que nous avons choisi comme le plus représentatif. L'observation des graphes de variations interannuelles de chaque paramètre permettront une analyse par rapport aux événements El Niño-La Niña. Le coefficient de corrélation  $r$  entre les variations interannuelles obtenues et celles de l'IOS filtrées également à 12 mois permettra de quantifier cette corrélation. L'analyse est faite pour chaque bande de latitude, comme auparavant. Nous ferons aussi des corrélations avec calcul du retard, les variations interannuelles d'un paramètre donné n'étant pas nécessairement en phase avec l'IOS.

Pour un retard  $\phi$ , le calcul de corrélation est basé sur la formule de Pierson à coefficients de corrélation linéaires. Si les séries de points à comparer sont les  $x_i$  et les  $y_i$ , alors

$$r(\phi) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\phi} (x_i - \bar{x})(y_{i+\phi} - \bar{y})}{\left( \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{pour } \phi = -\phi, \dots, -1, 0, 1, \dots, \phi, (\phi = 12 \text{ mois})$$

Un programme du laboratoire réalise ce calcul (corsoi.f). Je l'ai modifié uniquement pour obtenir les corrélations jusqu'à 24 mois de décalage, retard ou avance: le programme effectue pour chaque latitude 24+24+1 calculs de corrélation sur toute la période, en décalant à chaque fois d'un mois les séries d'IOS et de variations interannuelles qu'il compare. On obtient la corrélation maximum pour un

décalage donné. Lorsque l'IOS et les variations interannuelles sont de signe opposés, les corrélations seront négatives.

A partir du coefficient de corrélation, il faut pouvoir interpréter correctement ce résultat. En d'autres mots, à partir de quelle valeur le coefficient  $r$  indique-t-il une corrélation *significant* entre l'IOS et la variation interannuelle ? Inversement, quelle est la probabilité que  $N$  paires d'observations  $(x_i, y_i)$  produisant un coefficient  $r$  ne soient pas reliées entre elles purement par hasard ? C'est ce que l'on appelle le test de corrélation nulle et il existe des tables donnant ces valeurs que nous utiliserons pour interpréter nos résultats. Signalons déjà que ces tables sont basées sur un nombre d'observations indépendantes. Les corrélations s'effectuent sur des bandes de latitude de longueur 252-24 mois, mais on ne peut considérer que ce soient 228 points indépendants. En effet le filtre de Hanning coupe à 12 mois en introduisant une relation entre les points d'une série. Même si le filtre n'est pas parfait, on peut estimer que les observations sont indépendantes par blocs de douze. On obtient

$$\frac{228}{12} = 19 \text{ points indépendants}$$

Si maintenant on se reporte à ces tables, on peut connaître les valeurs minimales de  $r$  au delà desquelles on a une probabilité  $P$  pour que les séries soient indépendantes. Pour une probabilité d'indépendance des séries de  $P = 0.05$ , on trouve  $|r| > 0.43$ . En d'autres termes, on pourra affirmer avec une admissibilité statistique de 95% que les événements IOS et variations interannuelles sont totalement reliés lorsque l'on obtiendra des coefficients de corrélations supérieurs à 0.43 en module.

## IV. RESULTATS

---

Ce chapitre présente le produit des traitements décrits précédemment (§ III.) et les analyses et interprétations que l'on en a tiré.

### IV.1. Ordres de grandeur des différentes variations

Ces ordres de grandeur s'évaluent par le calcul des écarts types relatifs à chaque moyenne. La moyenne et l'ensemble des écarts types total, saisonnier et interannuel sont présentés sur les figures 12a–f, pour les quatre paramètres SST, SSS, précipitation et le groupe  $\tau_x$ ,  $\tau_y$ , et norme de  $\tau$ .

*Valeurs moyennes.* Les valeurs moyennes des différents paramètres augmentent vers le nord de la zone étudiée sauf en précipitations et en salinité; cette dernière diminue vers le nord et les précipitations évoluent vers un minimum au voisinage du tropique. En toute logique on retrouve les valeurs observées aux chapitres décrivant les états moyens (cf. § II.1.f. et § II.2.d.).

*Ecart type total comparé à la moyenne.* Intéressons-nous tout d'abord aux ordres de grandeur de la valeur moyenne et de l'écart type total. La valeur moyenne de la SST est, du sud au nord, 13 à 21 fois supérieure à l'écart type (Fig. 12a) : pour une température moyenne de 22.8°C (27°S) à 27.1°C (17°S), l'écart type évolue de 1.8°C à 1.3°C, soit environ 6% de la température moyenne de surface. Toujours du sud au nord, la salinité de surface moyenne évolue de 35.82 usp (27°S) à 35.12 usp (17°S) et l'écart type de 0.13 usp à 0.27 usp, soit en général 0.6% de la moyenne.

Avec la pseudo-tension du vent (Fig. 12b), on note un minimum des écarts type vers 19°S et le rapport écart type sur moyenne est beaucoup plus grand : la moyenne de la norme de  $\tau$  évolue de 30 à 44 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup> et l'écart type entre les extrêmes de 10 à 13 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>, soit 26 à 40% de la valeur moyenne de la pseudo tension. Les moyennes des composantes  $\tau_x$  et  $\tau_y$  varient respectivement de 18 à 36 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup> et de 14 à 23 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup> et les écarts types respectifs représentent 29 à 100% de la moyenne de  $\tau_x$  et 35 à 50% de la moyenne de  $\tau_y$ . En ce qui concerne les précipitations (Fig. 12c), le rapport écart type sur moyenne augmente encore, étant toujours supérieur à l'unité : à 23°S, il atteint 1.7 (170%) pour une valeur moyenne de 0.39 m/an et un écart type de 0.66 m/an.

Par ailleurs, il est intéressant de montrer que le sens de variation des écarts types totaux (Fig. 12a–b) se classe en deux catégories distinctes. On observe une augmentation globale vers le nord des écarts types totaux de SSS et de précipitation. Au contraire, ceux-ci diminuent pour la SST et la pseudo-tension zonale du vent (qui est la composante la plus forte du vecteur  $\tau$ ). Cela suggère que les variations en salinité sont probablement forcées en partie par les variations de précipitation. Une telle relation est moins claire entre température et vents.



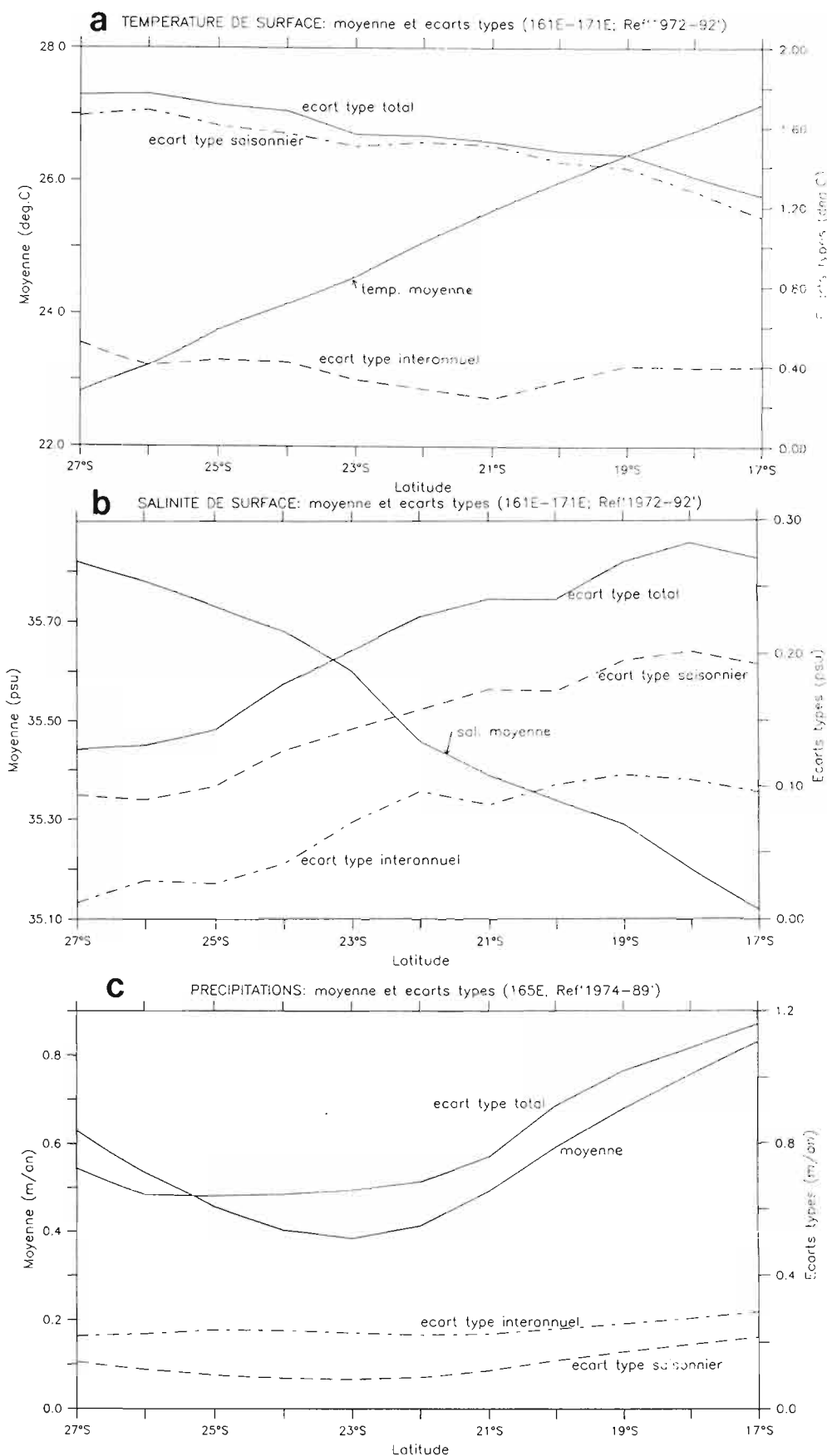


Figure 12 : variation méridienne des moyennes (échelle de gauche) et des écarts types (échelle de droite) de la température de surface (a), de la salinité de surface (b), des précipitations (c), de la pseudo-tension du vent(d), de la composante zonale de la pseudo-tension du vent (e) et de la composante méridienne de la pseudo-tension du vent (f). Chaque valeur est calculée à partir des mesures moyennées sur une bande de longitude indiquée pour chaque paramètre dans les titres des figures. La définition des écarts types saisonniers et interannuels est donnée au § III.4.

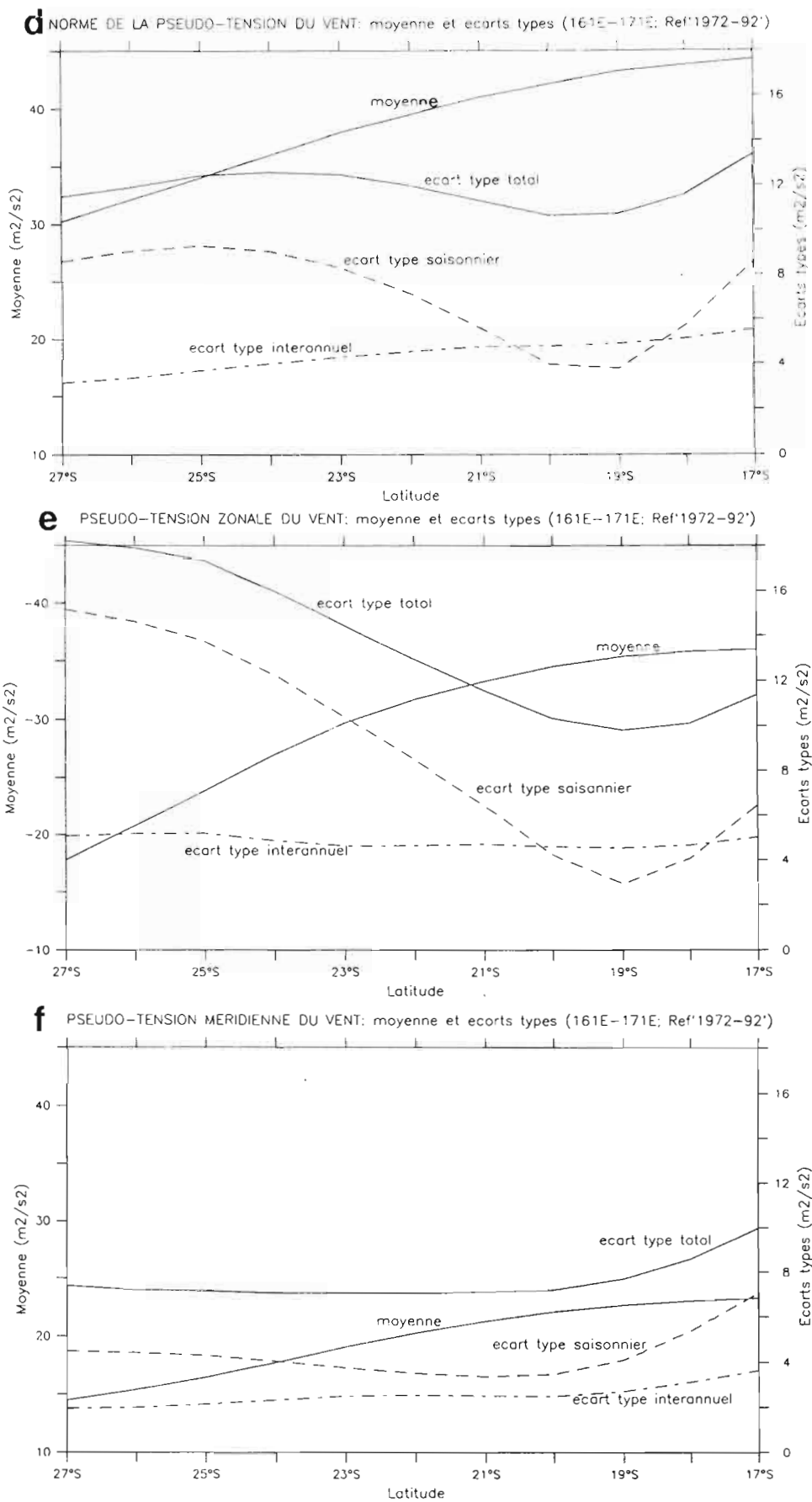


Figure 12 (suite)

*Distribution mensuelle des valeurs de chaque paramètre.* Afin d'estimer les variations relatives à un mois donné de l'année, nous présentons la distribution des valeurs dans chaque mois de l'année pour chaque paramètre à une latitude fixée sur 22°S (Fig.13).

La SST est un signal principalement à composante saisonnière : pour un mois donné, l'écart des valeurs entre elles est faible devant les variations saisonnières (Fig.13). C'est le contraire en ce qui concerne les vents et précipitations pour lesquels on ne peut faire que deux suppositions : soit il existe une autre fréquence de variation principale, soit on est en présence d'un signal dont le spectre est très large et uniformément réparti. Nous montrerons par la suite que pour ces deux paramètres, cette composante principale n'est ni l'échelle saisonnière, ni l'échelle interannuelle. Pour conclure disons que cette propriété de l'étalement en fréquence est caractéristique des paramètres atmosphériques dont les évolutions peuvent être très rapides et qui ne présentent pas de caractéristique inertielle forte, contrairement aux paramètres océaniques.

*Ecart types saisonniers et interannuels.* L'écart type interannuel des quatre paramètres évolue dans de bien moins grandes proportions que l'écart type total ou saisonnier suivant la latitude et reste d'une amplitude faible devant la valeur moyenne : de 0.2 à 0.5°C en SST, de 0.01 à 0.1 usp en SSS, de l'ordre de 5, 3 et 4 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup> pour respectivement  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  et  $\tau$  et enfin de 0.2 à 0.3 m/an en précipitations.

Une particularité de la température de surface est que l'écart type saisonnier est prédominant devant l'écart type interannuel, c'est donc un paramètre qui dépend essentiellement du cycle saisonnier, ainsi que le suggère la figure 7.

De manière générale, l'écart type saisonnier est toujours supérieur à l'écart type interannuel (Fig. 12a-b), sauf dans le cas des précipitations. Le groupe des paramètres océaniques vérifie sensiblement l'égalité

$$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{saisonnier}} + \sigma^2_{\text{interannuel}}$$

Dans ce cas les modes saisonniers et interannuels sont prépondérants et forment une grande partie de la variabilité du signal total. Ceci n'est pas vérifié pour les paramètres atmosphériques, ce qui nous ramène à la précédente remarque (*Distribution mensuelle des valeurs de chaque paramètre*) concernant la présence d'autres modes importants à des échelles intermédiaires ou inférieures que nous n'analyserons pas ici.

On a quantifié ici l'ordre de grandeur de la variation interannuelle que l'on désire observer car probablement liée à ENSO. C'est en général la plus faible, mais il faut noter que ces variations restent d'un ordre de grandeur décelable puisque supérieures aux précisions de mesures correspondant à l'ensemble des données (cf. § II.1.b. et II.2.b.). Regardons maintenant plus précisément chaque mode l'un après l'autre avec les méthodes décrites au chapitre III. en isolant du signal total la variation saisonnière et la variation interannuelle.

REPARTITIONS PAR MOIS

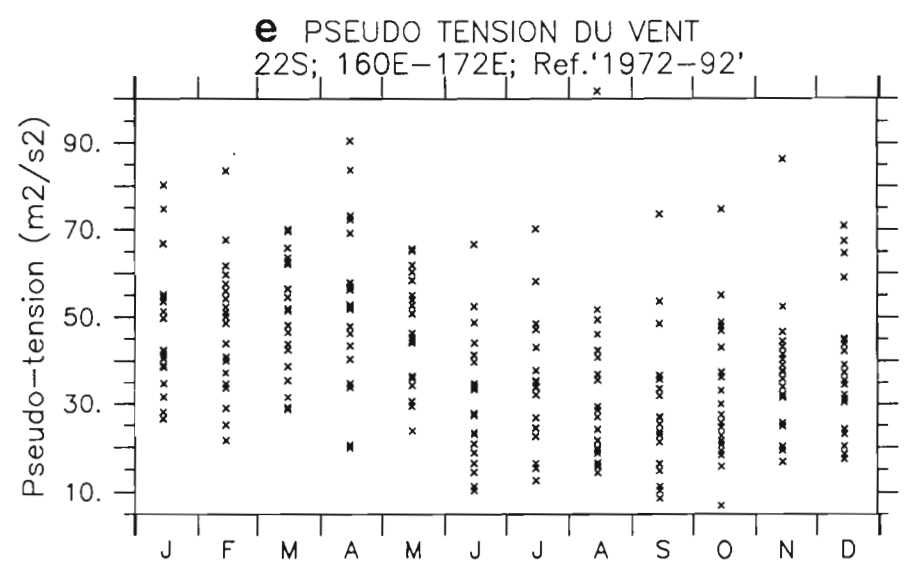
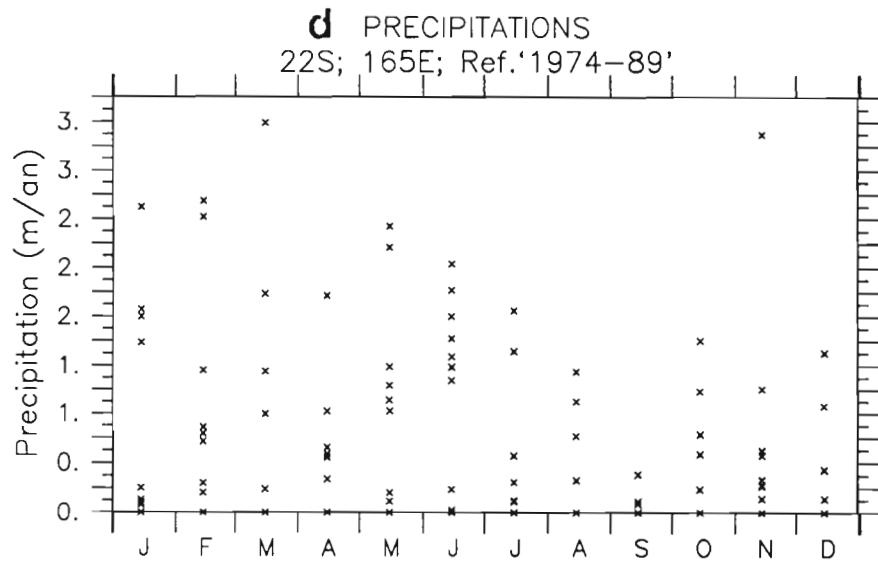
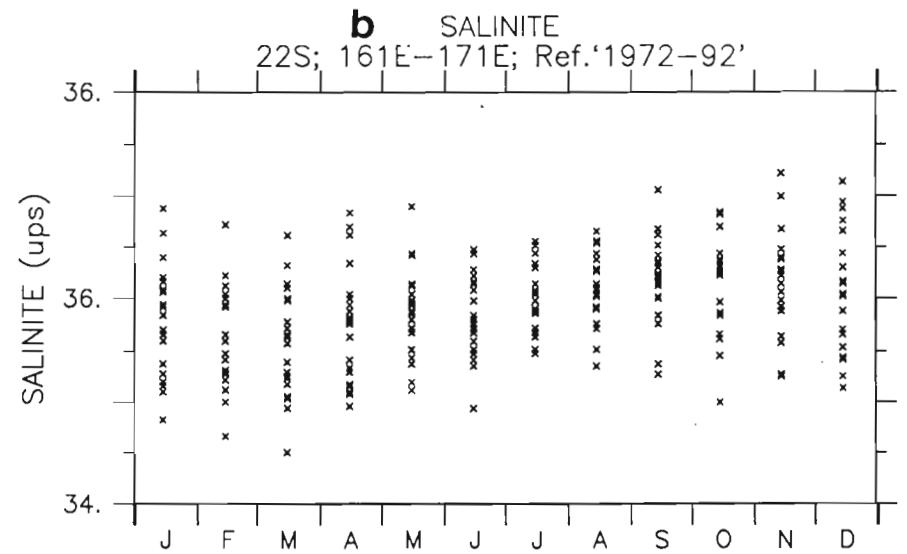
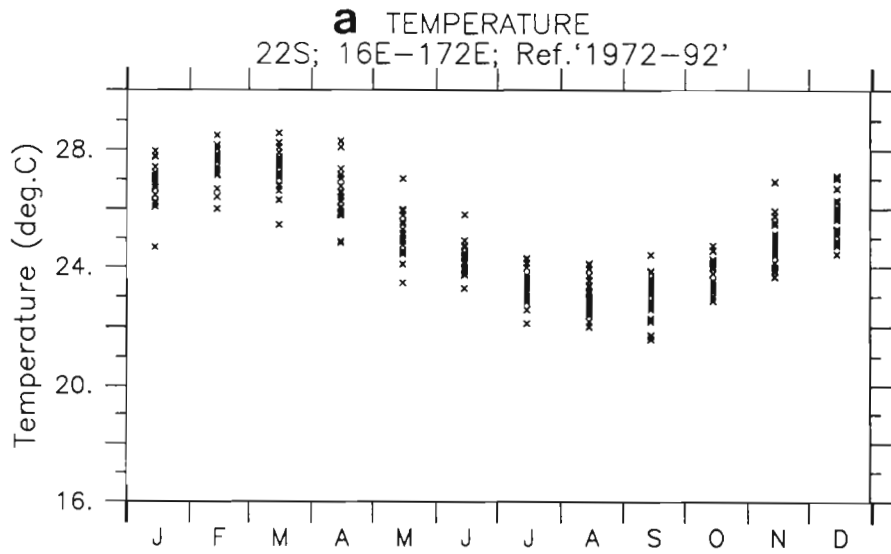


Figure 13 : distribution mensuelle de la température (a; de 1972 à 1992) et de la salinité de surface (b; de 1972 à 1992), des vents (c; de 1972 à 1992) et des précipitations (d; de 1974 à 1989) à 22°S. Chaque valeurs ont été moyennées sur des longitudes indiquées sur les figures correspondantes.

## IV.2. Variations saisonnières

Ces variations saisonnières sont caractérisées suivant deux approches : la construction de l'année type et l'analyse de Fourier. Cette dernière offrant des résultats plus complets, c'est sur elle que nous basons la description des phénomènes physiques, et on pourra se reporter aux figures 14a-f pour plus de détails sur l'évolution mois après mois de chaque paramètre au cours de l'année type.

Conformément à ce que l'on a vu avec les écarts types saisonniers, les variations de SST suivent essentiellement le cycle annuel (Fig. 14a) avec un pourcentage de variance supérieur à 80% (Fig. 15a, pour la SST). L'amplitude annuelle de SST (autour de la valeur moyenne) augmente vers le sud de 1.5 (17°S) à 2.2°C (27°S). Inversement l'amplitude annuelle de SSS (Fig. 15a, pour la SSS) diminue vers le sud de 0.13 (17°S) à 0.01 usp (27°S) et devient en même temps de moins en moins annuel en passant de 15 à 0.5% de variance. Le maximum de température annuelle se produit, comme on pouvait s'y attendre, à la fin de l'été austral en début mars, et indépendamment de la latitude. En salinité, le maximum annuel se produit plutôt vers septembre, date à laquelle la ZCPS est la plus éloignée de la région et donc les précipitations associées sont minimum, ce qui est consistant avec le maximum de salinité.

Ceci se vérifie avec l'année type des précipitations (Fig. 14a) qui présente un minimum vers août–septembre. Pour ces dernières, l'amplitude du cycle annuel augmente en allant vers le nord de 0.1 (27°S) à 0.7 m/an (17°S), ainsi que le pourcentage de variance expliqué par le cycle annuel (Fig. 15b). Ces augmentations sont dues au fait que vers le nord, on se rapproche de la ZCPS. La phase du maximum d'amplitude apparaît début mars, date à laquelle les maximums de précipitations sont atteints, excepté au sud de 25°S où le maximum se décale vers le milieu de l'année. Le pourcentage de variance est très faible au sud. On a vu sur la répartition par mois des précipitations à 22°S (Fig. 13) que les valeurs étaient très variables et très peu annuelles, ce qui explique les faibles valeurs du pourcentage de variance.

Les variations relatives aux trois grandeurs liées au vent ( $\tau_x$ ,  $\tau_y$  et  $\tau$ ) sont identiques (Fig. 15c). Le minimum des amplitudes se situe à 19°S avec 3 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>, de même pour les pourcentages de variance où l'on retrouve une variation proportionnellement moins importante vers 19–20°S. De part et d'autre de ces minima, ces valeurs croissent vers les frontières du domaine, surtout vers le sud : respectivement pour  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  et  $\tau$ , les amplitudes des variations passent de 2 à 20.4 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>, de 4 à 9 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup> et enfin de 4 à 12 m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>. Les phases des maximums se rejoignent au nord vers mi–août et sont constantes au sud de 20°S mais différentes pour respectivement  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  et  $\tau$  : début février, mi–avril et fin février.

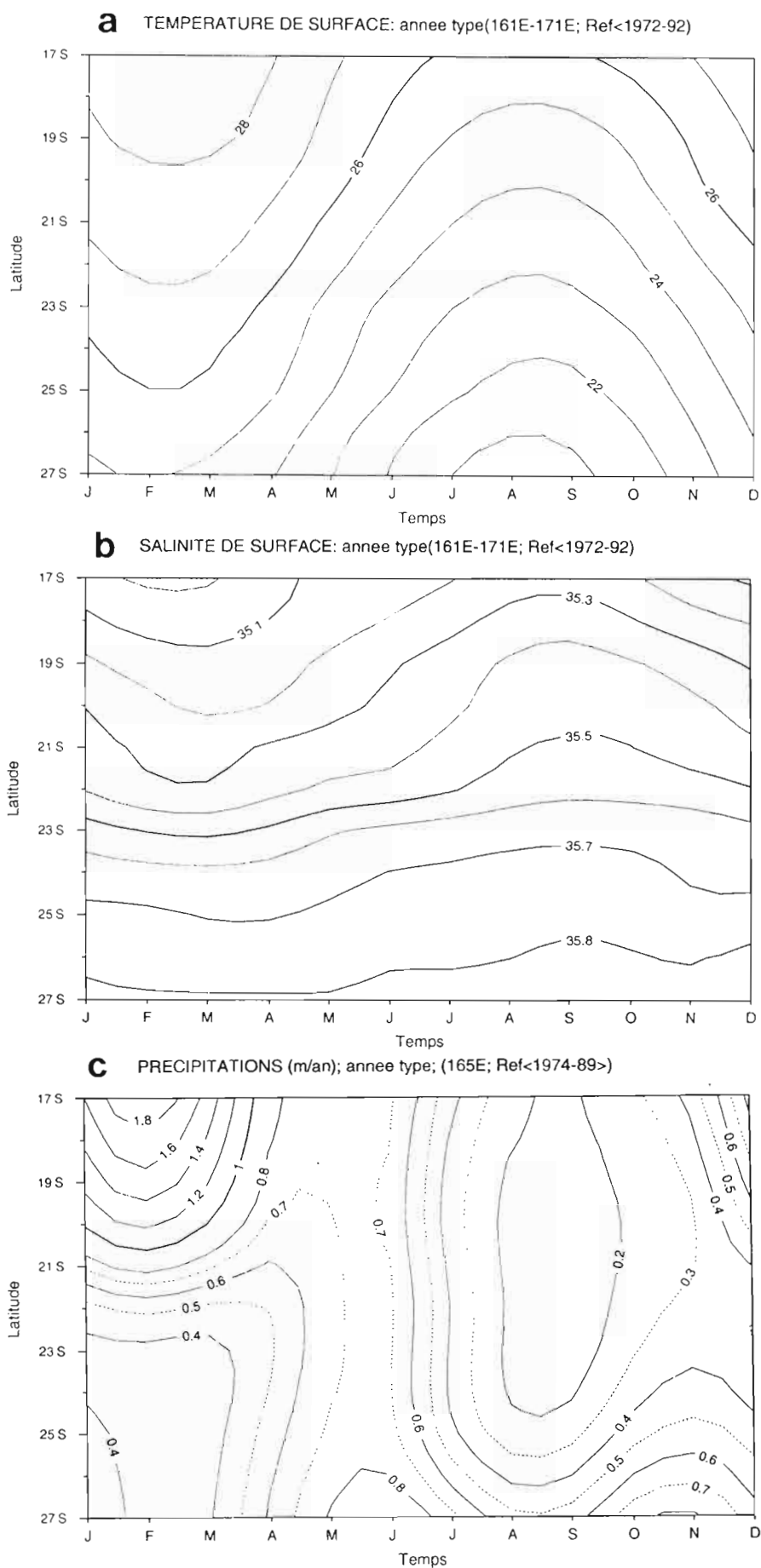
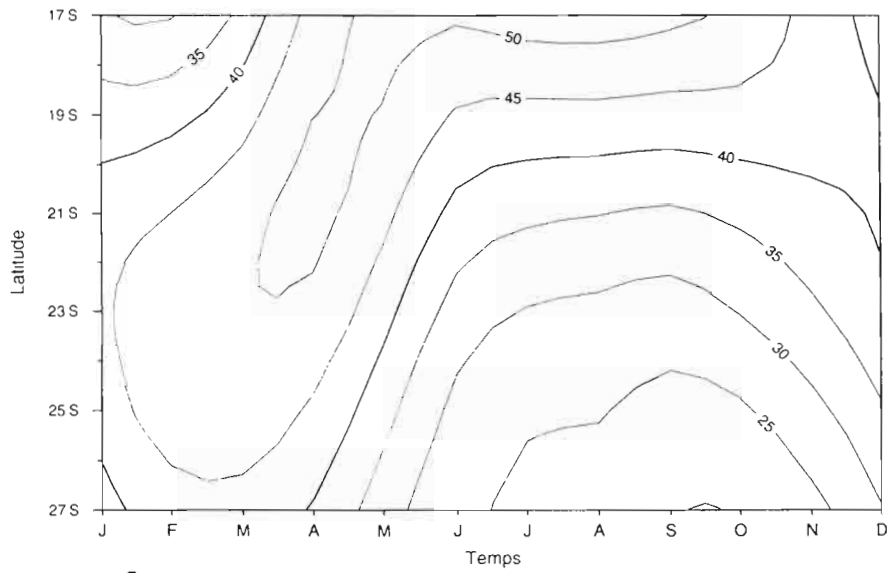
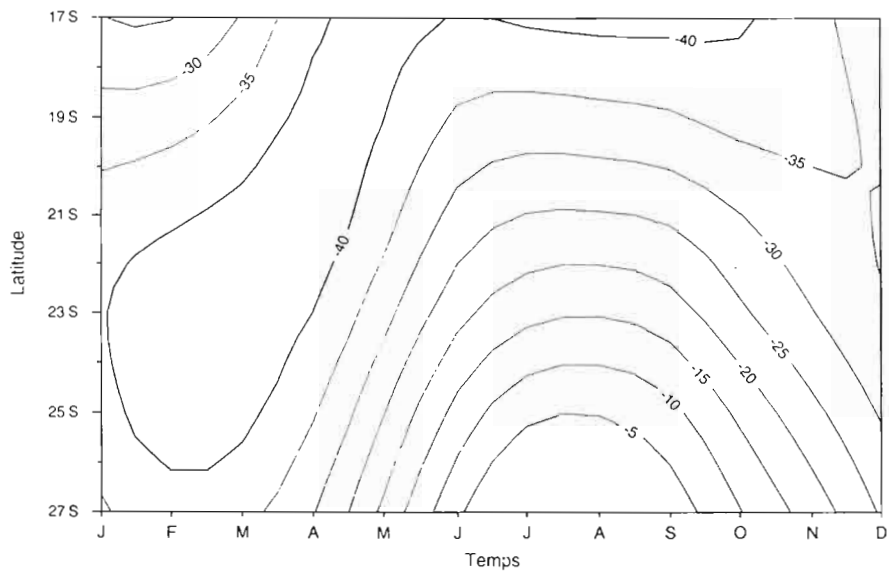


Figure 14 : variations mensuelles moyennes (années types) en fonction de la latitude de la température de surface (a; °C), de la salinité de surface (b; usp), des précipitations (c; m/an), de la pseudo-tension du vent (d;  $m^2.s^{-2}$ ), de la composante zonale de la pseudo-tension du vent (e;  $m^2.s^{-2}$ ) et de la composante méridienne de la pseudo-tension du vent (f;  $m^2.s^{-2}$ ). Les années types ont été calculées sur la période 1972 à 1992 pour tous les paramètres sauf pour les précipitations (de 1974 à 1989). La température et la salinité de surface sont moyennées sur 161°E–171°E, les pseudo-tensions sur 160°E–170°E et les précipitations le long de 165°E

**d** NORME DE LA PSEUDO-TENSION DU VENT (m2/s2): annee type; Ref<1972-92>



**e** PSEUDO-TENSION ZONALE DU VENT (m2/s2): annee type; Ref<1972-92>



**f** PSEUDO-TENSION MERIDIENNE DU VENT (m2/s2): annee type; Ref<1972-92>

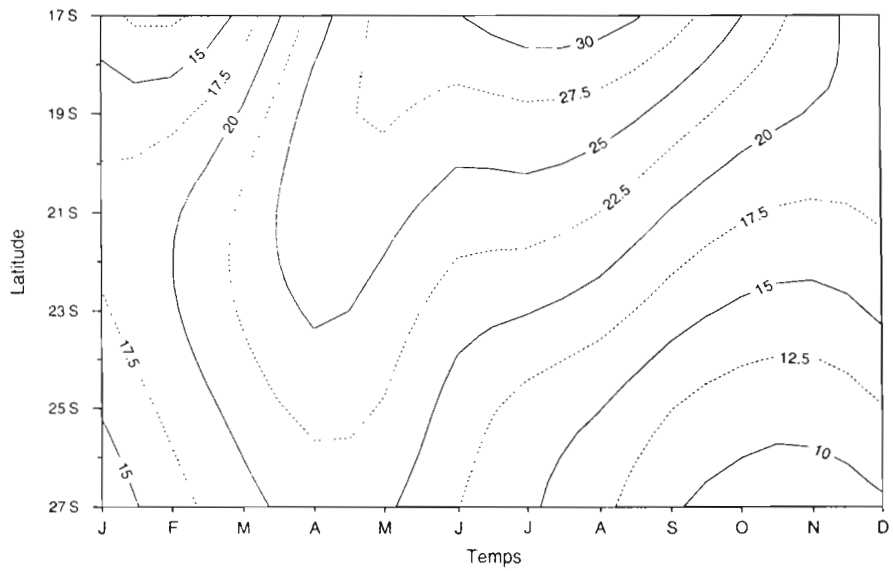


Figure 14 (suite)

**a** TEMPERATURE & SALINITE DE SURFACE  
 Analyse de Fourier sur la periode 1972-92 (161E-171E)

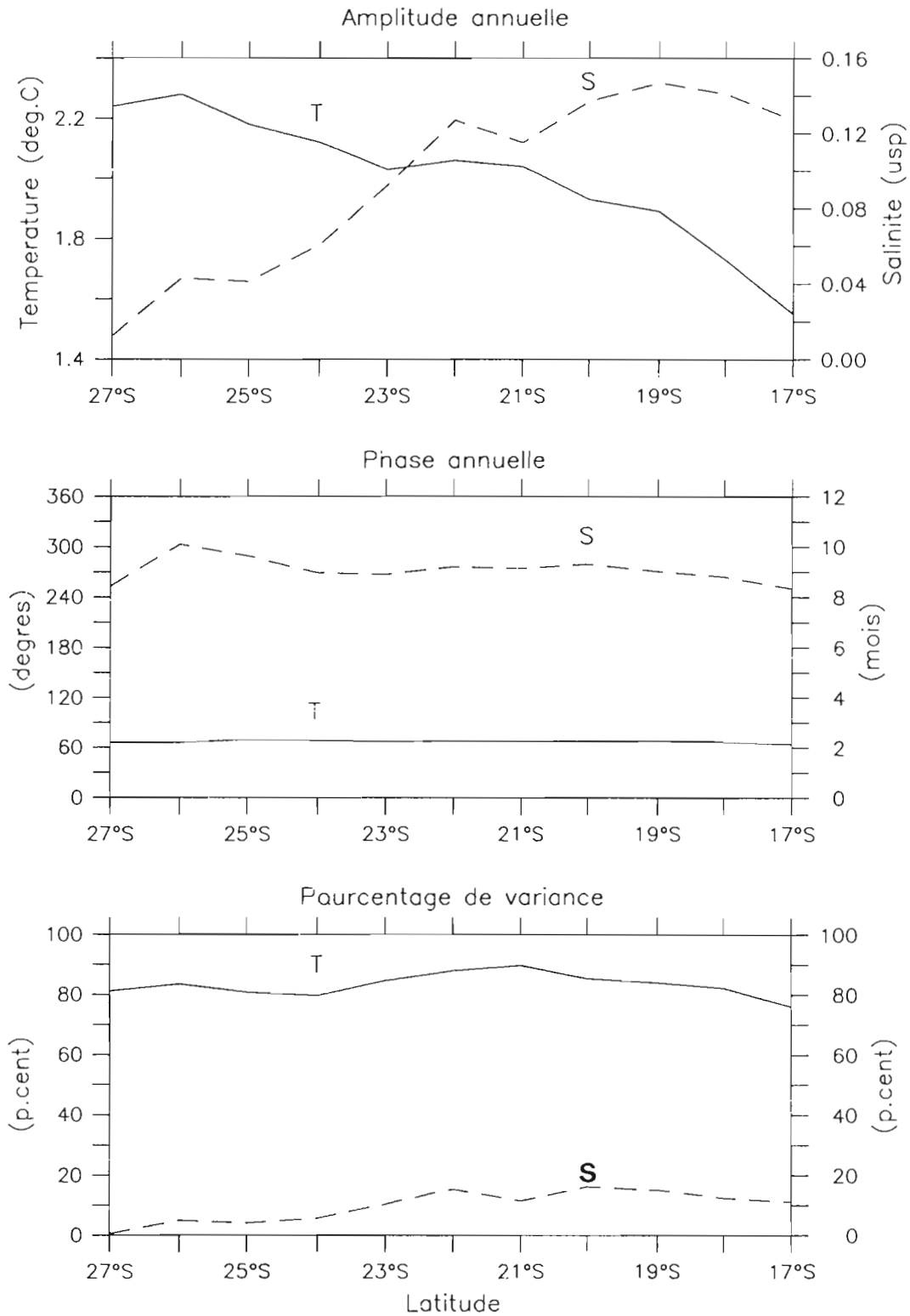


Figure 15 : amplitude, phase et pourcentage de variation de l'harmonique annuel pour la température de surface (a; T), la salinité de surface (a; S), les précipitations (b), la pseudo-tension du vent (c; TAU), la composante zonale de la pseudo-tension du vent (c; TAUx) et la composante méridienne de la pseudo-tension du vent (c; TAUy)



## b PRECIPITATIONS

Analyse de Fourier sur la periode 1979-88 (165E)

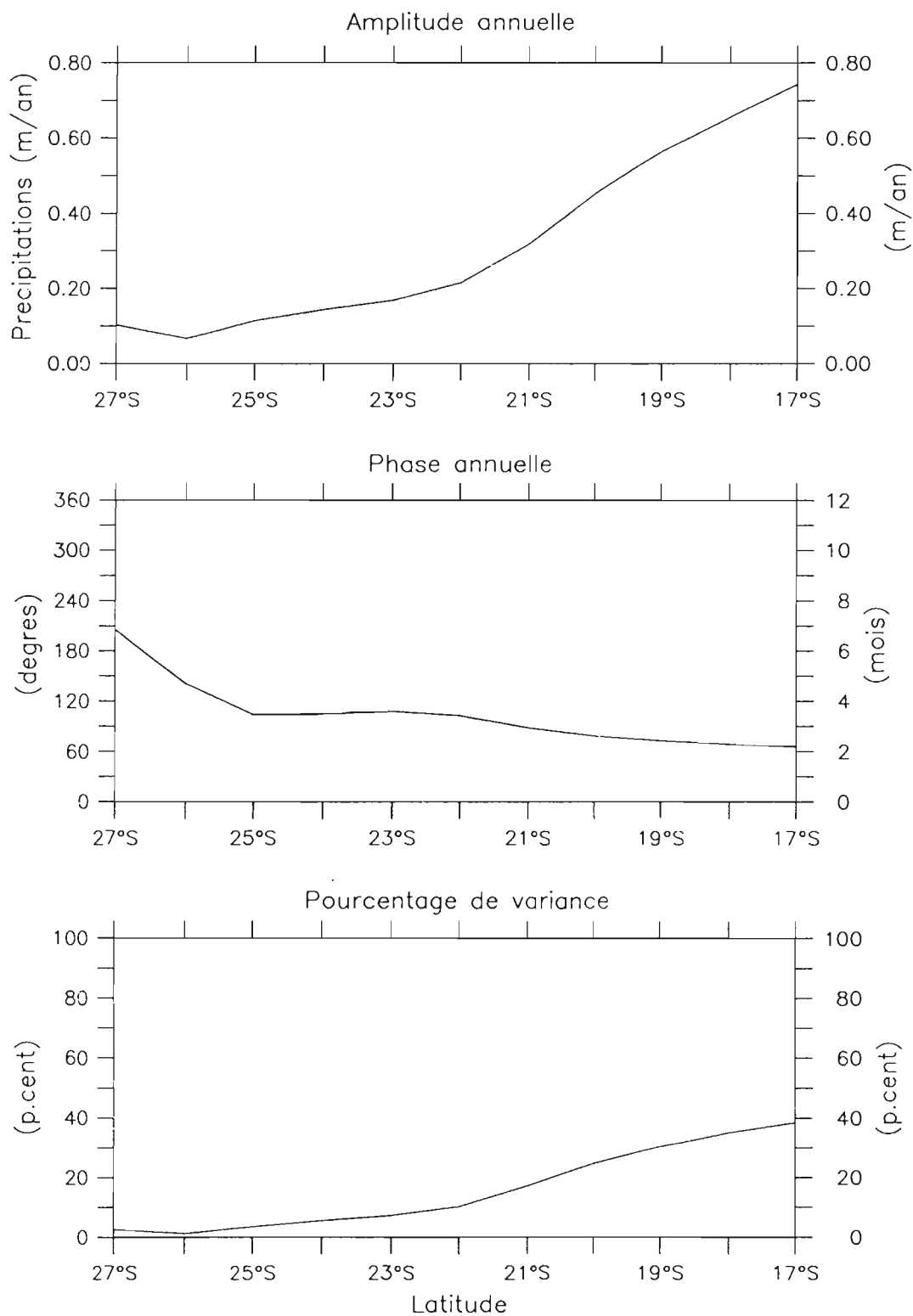


Figure 15 (suite)

### C PSEUDO-TENSION DU VENT, NORME ET COMPOSANTES

Analyse de Fourier sur la période 1972-92 (160E-172E)

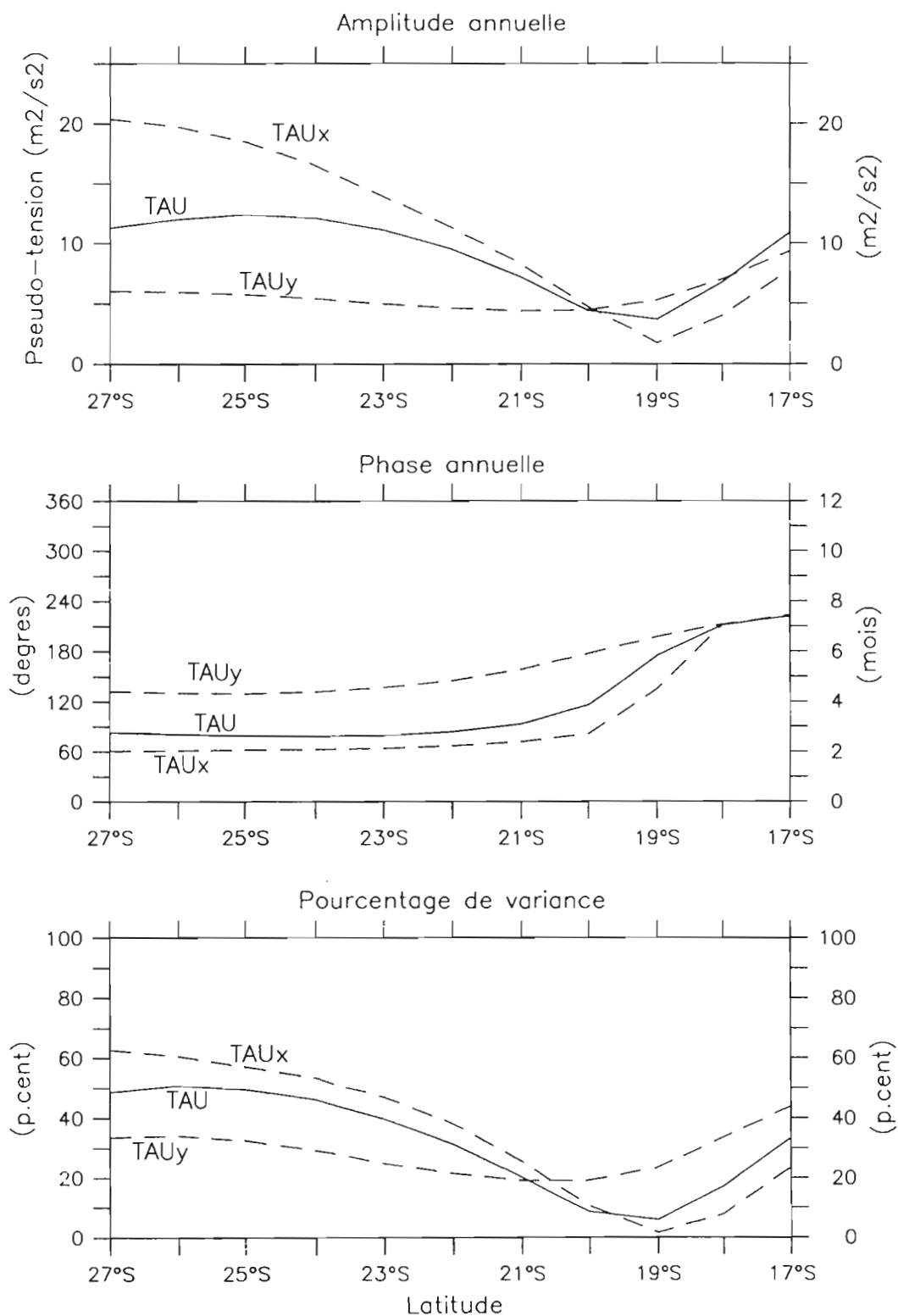


Figure 15 (suite)

### IV.3. Signatures océaniques et atmosphériques d'ENSO

Nous mettons ici en évidence la présence de l'influence du signal climatique ENSO au niveau de la région entourant la Nouvelle Calédonie. Pour chaque paramètre nous comparons donc les séries filtrées par un filtre de Hanning de largeur 12 mois à l'indice d'oscillation sud qui est traité avec le même filtre afin d'assurer la conformité des éléments comparés. Sur la période 1972–1994, l'IOS indique les phénomènes suivants : de 72 à début 73 l'indice est négatif et marque le premier Niño de la période, suivit par un Niña marqué par un  $IOS > 1$  qui se prolonge jusqu'à mi-76, puis un Niño qui prend fin au terme de l'année 1978. Les événements suivants sont ensuite l'El Niño de 82–83 qui est très marqué ( $IOS < -1$ ), El Niño 86–87 ( $IOS < 0$ ), La Niña de 88–89 ( $IOS > 0$ ) et enfin en 91 un Niño exceptionnellement long qui s'est terminé au début de cette année 1995.

La comparaison des variations interannuelles de chaque paramètre et de l'IOS se fera à l'aide d'une approche qualitative que nous appuierons ensuite en quantifiant les corrélations correspondantes.

#### a. Qualitativement

Le traitement choisi pour obtenir les variations interannuelles permet de faire ressortir très clairement des groupes de 'taches' uniformes de variations de même signe qui s'étalent en latitude (donc en espace) et en temps (Fig. 16a-f). Ceci montre d'ores et déjà que l'on a pu déceler la présence de phénomènes de macro-échelle bien distincts. On distingue pour chaque paramètre de trois à quatre périodes d'alternance des anomalies, sauf pour les précipitations en raison de la longueur relativement petite de la série.

*SST & SSS.* En général les variations interannuelles de SST restent inférieures à  $0.5^{\circ}\text{C}$  et celles de SSS inférieures à 0.3 usp (Fig. 16a et b). Les anomalies positives de SST (chaudes) semblent correspondre à des La Niña ( $IOS > 0$ ) et les anomalies négatives (froides) à des Niño ( $IOS < 0$ ). Inversement, les anomalies positives de SSS correspondent assez fidèlement à des Niño et les négatives à des Niña. Ainsi, les anomalies de température et de salinité de surface sont globalement opposées. Dans cette région un Niño sera marqué en surface de l'océan par une augmentation de salinité et une diminution de température contrairement à ce qui se passe en zone équatoriale est. On remarque aussi un phénomène intéressant, c'est que les variations interannuelles, notamment de SSS, présentent un décalage dans le temps avec l'IOS, ce décalage se faisant avec un retard croissant vers le sud.

*Précipitations.* La série de données de précipitations, déjà courte par le manque de données sur la période 1972–92, a été encore raccourcie par le filtrage de Hanning qui occulte quatre ans de variations interannuelles. Malgré cela, de grandes zones d'anomalies homogènes se découpent sur les périodes restantes (Fig. 16c). Leur ordre de grandeur varie de  $-0.3$  à  $+0.3$  m/an et on observe une tendance à l'augmentation des précipitations pendant les Niña qui est nette en 1975 et début 1988.

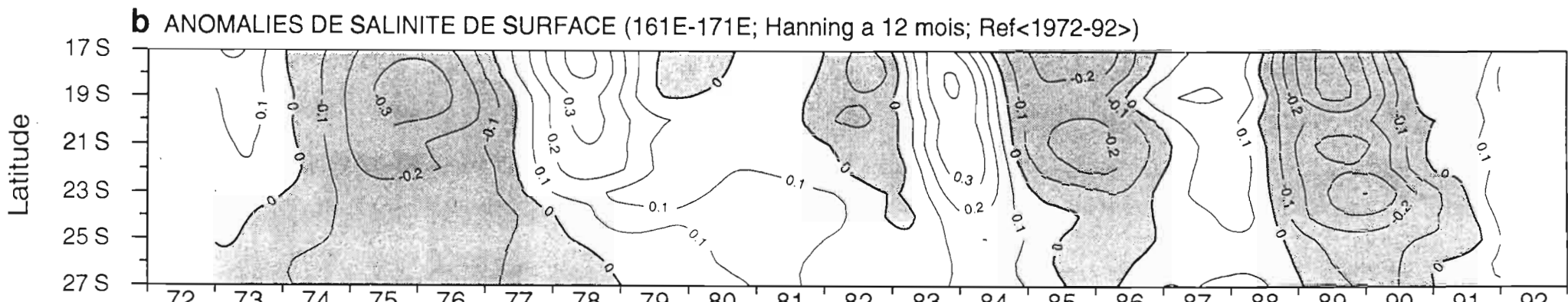
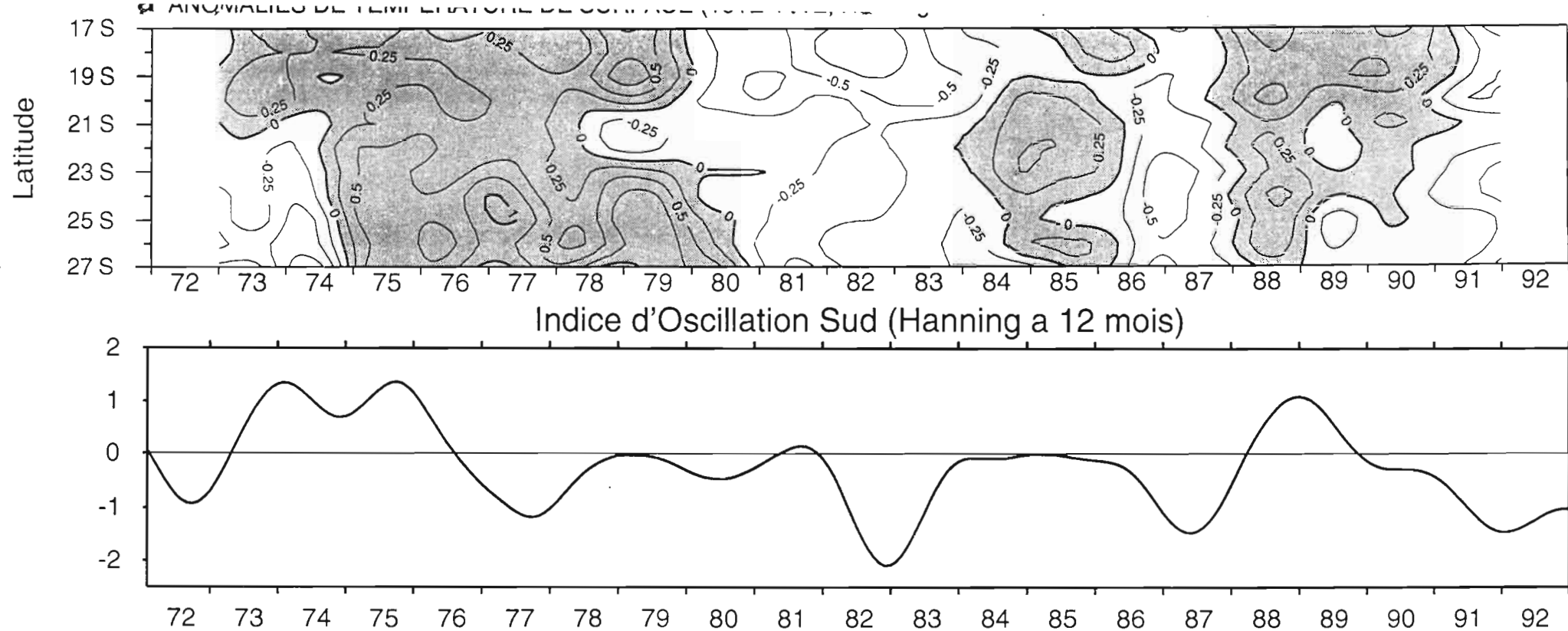
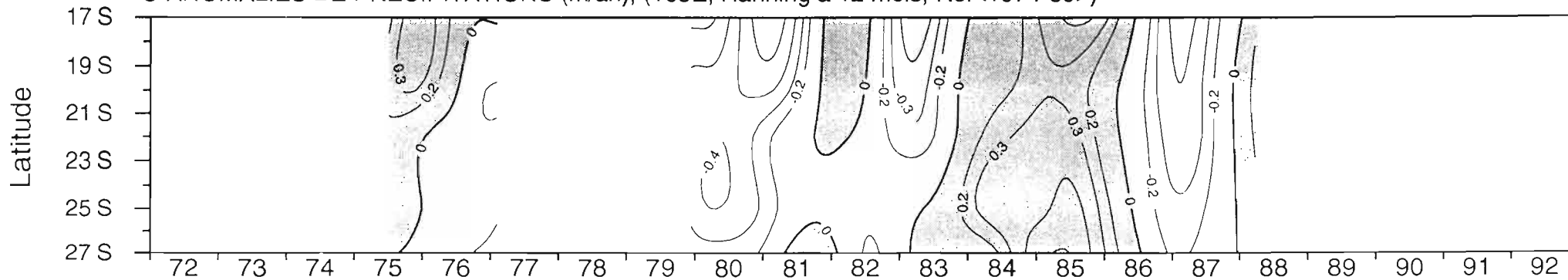
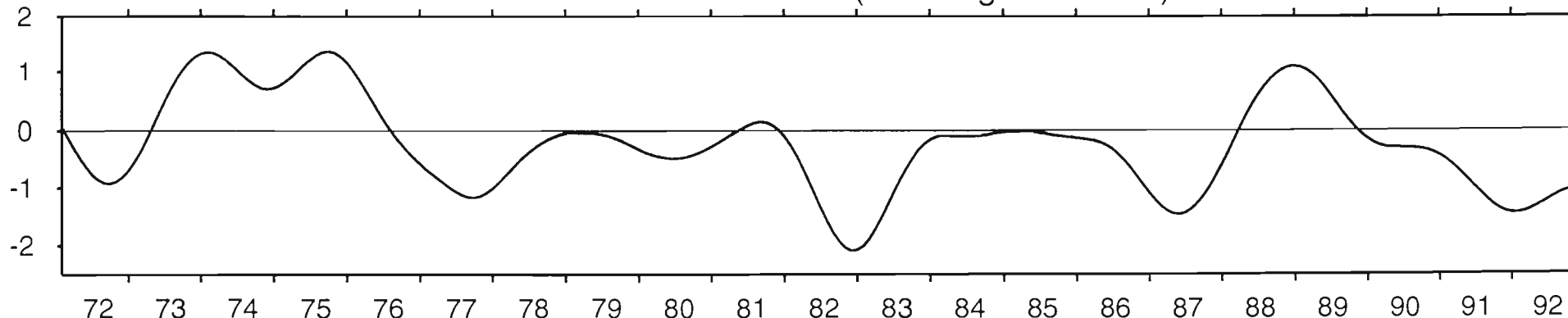


Figure 16 : variations Interannuelles (relatives à 1972-92 ou 1974-89 pour les précipitations) de la température de surface (a; °C), de la salinité de surface (b; usps), des précipitations (c; m/an), de la pseudo-tension du vent (d;  $m^2.s^{-2}$ ), de la composante zonale de la pseudo-tension du vent (e;  $m^2.s^{-2}$ ) et de la composante méridienne de la pseudo-tension du vent (f;  $m^2.s^{-2}$ ). Pour chaque page, la figure du milieu présente les variations interannuelles de l'Indice d'oscillation sud. Pour toutes les figures, les valeurs ont été lissées par un filtre de Hanning sur 12 mois

**c** ANOMALIES DE PRECIPITATIONS (m/an); (165E; Hanning a 12 mois; Ref<1974-89>)



Indice d'Oscillation Sud (Hanning a 12 mois)



**d** ANOMALIE DE LA P.-TENSION DU VENT (m2/s2) (Hanning 12mois; Ref<1972-92>)

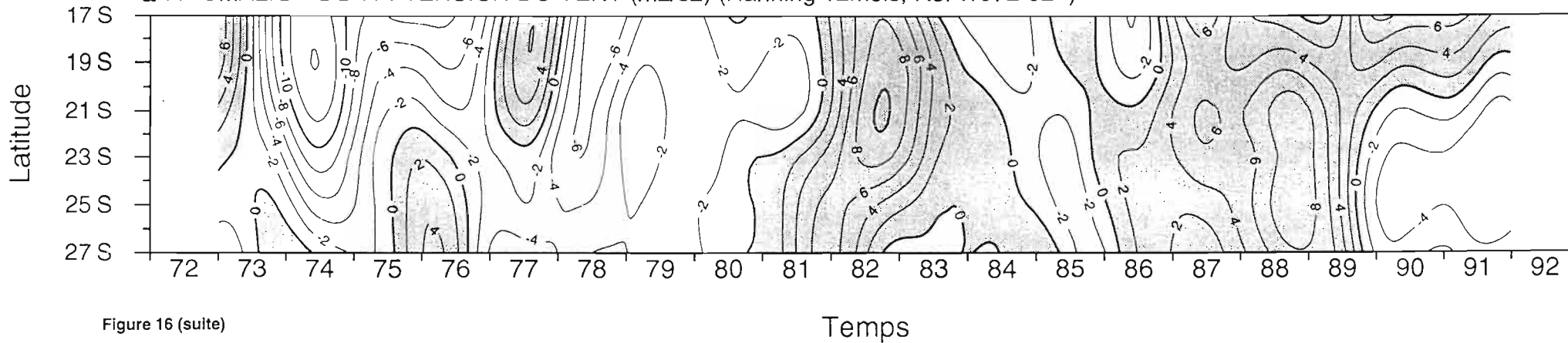


Figure 16 (suite)

Temps

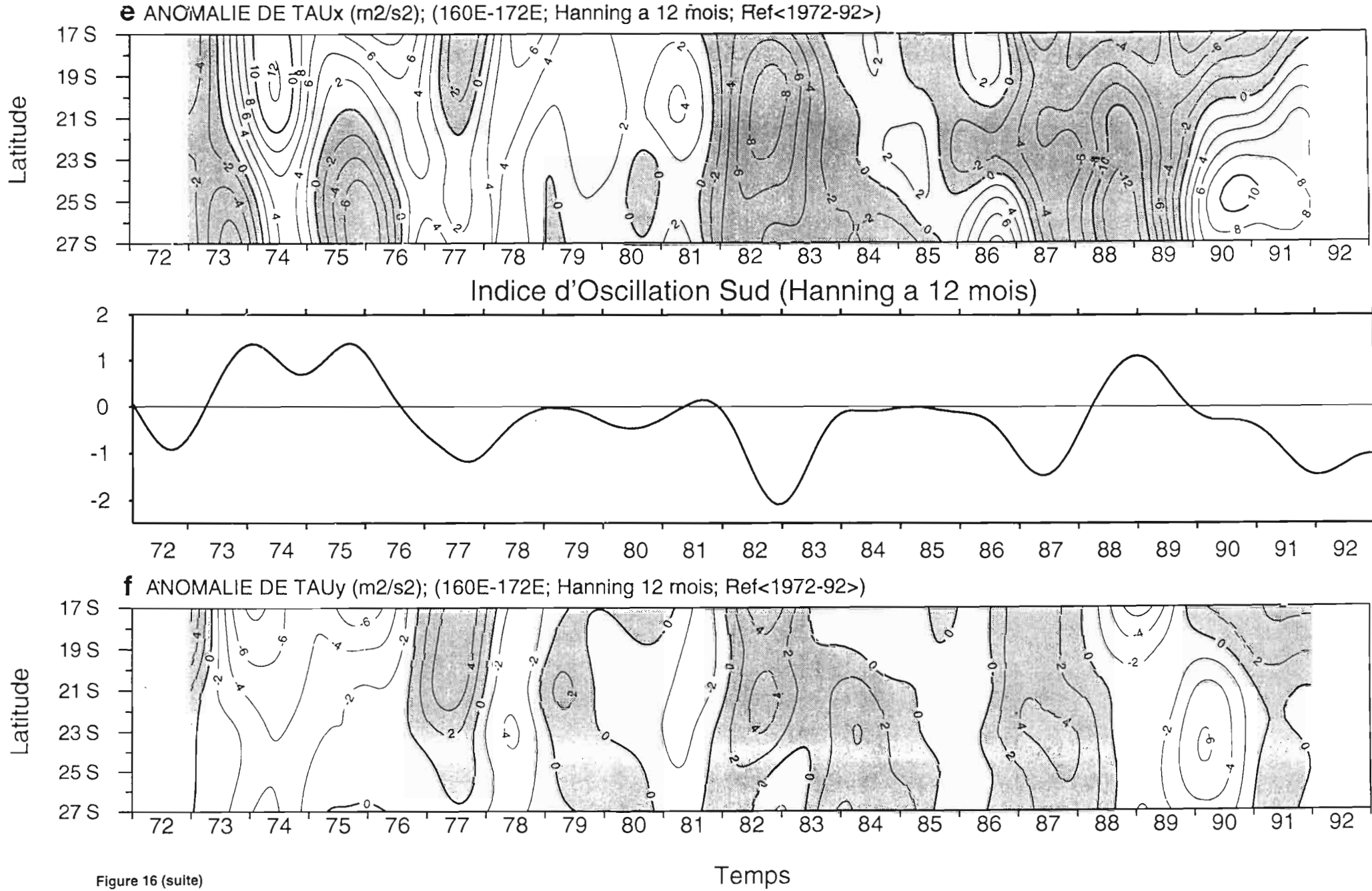


Figure 16 (suite)

Inversement en période Niño, on observe une bonne correspondance avec des périodes de déficit de précipitations. Ceci est clairement perçu au niveau du territoire de Nouvelle-Caledonie, d'après les archives météorologiques en particulier pendant La Niña 88–89 qui avait provoqué de fortes précipitations et lors du Niño 91–92–93 où une forte sécheresse locale avait eu lieu. Ces observations permettent de compléter notre analyse qualitative et de dire qu'il y a une bonne correspondance entre les phénomènes, du moins au niveau du territoire (de 18°S à 22°S). Pour compléter ces observations, citons Morlière et Rébert (1986) qui ont analysé, toujours sur le territoire, les précipitations de la période 1952–83 et trouvent les mêmes correspondances avec ENSO. Toutes ces informations corroborent et indiquent que l'on peut généraliser les résultats issus de notre courte série de précipitations. Nous ne pouvons rien affirmer sur le retard des anomalies par rapport à l'IOS, par contre l'étude de Morlière et Rébert indiquait un décalage de trois mois (IOS avant les précipitations).

*Vents.* De façon générale, les vents augmentent en intensité pendant El Niño (les alizés se renforcent) et faiblissent pendant La Niña (Fig 16d-e-f). Les variations entre Niño et Niña sont en moyenne inférieures à  $8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , donc crête à crête des variations de l'ordre de 6 nœuds qui peuvent être assez sensibles. Les correspondances entre augmentation des vents pendant Niño, et vice versa, ne sont pas systématiques en raison de quelques exceptions, en particulier :

- pendant La Niña de 88–89, le vent a augmenté. Cette spécificité de La Niña 88–89 a déjà été remarqué au niveau de la température de l'air dans une étude de Halpert et Ropelewski (1992) où il est montré que sur 20 La Niña de 1881 à 1988 autour de la bande équatoriale, seul l'épisode de 1988 fut suivi par des anomalies positives de température de l'air.
- de plus, pendant le Niño de 77, la correspondance avec l'IOS ne fonctionne que dans la moitié nord de la région.

$\tau_x$  &  $\tau_y$ . Si on décompose maintenant la norme en ses deux composantes  $\tau_x$  et  $\tau_y$ , on retrouve :

- ✘ pour  $\tau_x$  (Fig 16e) les deux précédentes exceptions de correspondances avec un caractère encore plus marqué par des variations allant de -10 à +10  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .
- ✘ pour  $\tau_y$  (Fig.16f) une correspondance remarquable avec les variations avec l'IOS : les exceptions ont totalement disparues et les variations sont assez uniformes, allant de -4 à +4  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .

La composante  $\tau_x$  semble être un élément dissociable de la composante  $\tau_y$  et s'associe beaucoup moins aux alternances d'ENSO en revanche, la composante  $\tau_y$  est un marqueur plus net d'ENSO sur toute la période 1972–92, ce qui a déjà été noté par Meyers et al. (1986), pour l'évènement El Niño de 82–83. Enfin, dans le cas des vents, on n'observe pas de retard apparent entre les anomalies de vent et les variations d'IOS.

Regardons maintenant pour tous les paramètres (sauf les précipitations), si l'étude quantitative va

pouvoir confirmer ces correspondances avec le signal ENSO.

## b. Quantitativement

*SST & SSS.* Selon la méthode décrite au § III.5. concernant le calcul de corrélation maximum et le retard associé, on s'aperçoit que les coefficients de corrélation des SST et SSS (Fig. 17a et b) avec l'IOS confirment la discussion qualitative précédente. (Rappelons que l'on ne considère que les valeurs  $|r| > 0.4$  qui sont significatives à 95%). En SST (Fig. 17a) la corrélation dépasse ce seuil au nord de 21°S en étant en phase avec l'IOS (retard nul). Plus on se déplace vers le sud, plus le signal ENSO en SST est faible, et au sud du tropique du Capricorne, il n'y a plus vraiment de correspondance avec ENSO, étant donné que  $r < 0.4$  et que le retard effectue un saut brusque vers de trop grandes valeurs qui laissent penser que ce n'est pas physiquement admissible. Notons que le signal ENSO observé en SST n'est pas significatif au sud de 21°S, en revanche Delcroix et Hénin (1989) et Lehodey (1994) montrent que ce signal ENSO apparaît sur le contenu thermique de la couche des 400 premiers mètres au voisinage de la Nouvelle Calédonie.

La corrélation en SSS est en revanche remarquable (Fig. 17b) avec des valeurs de  $r$  telles que  $0.7 < |r| < 0.8$ , soit plus de 50% des variations interannuelles qui sont dues à ENSO, et une admissibilité statistique supérieure à 99.99%. De plus ce que l'on a perçu se confirme : le signal ENSO en salinité de surface se manifeste d'abord au nord de la zone avec 8 mois de retard sur l'IOS et s'étend vers le sud pour se faire finalement ressentir avec un an de retard à 27°S. L'étude déjà citée de Morlière et Rébert (1986), signale une anomalie de précipitation avec un retard de 12 mois sur le signal d'IOS au niveau de la Nouvelle Calédonie. On retrouve environ douze mois de retard sur la SSS et cela suggère que les précipitations jouent un rôle moteur sur les variations de salinité de surface à l'échelle interannuelle sur le secteur Néo-Calédonien.

*Vents.* Les corrélations sont essentiellement significatives en  $\tau_x$  et norme de  $\tau$  (Fig 17d et e) dans la partie nord de la zone au-delà de 20°S, avec un faible retard sur l'IOS des variations de 0 à 3 mois. C'est avec  $\tau_x$  qu'il y a les plus faibles corrélations. Par contre, comme nous l'avons vu plus haut, les corrélations entre l'IOS et  $\tau_y$  sont significatives sur toute la zone : le coefficient de corrélation atteint -0.9 à 17°S (81% des variations dues à ENSO) et décroît vers le seuil de signification statistique de 95% ( $r = 0.4$ ) à 27°S. De plus ces anomalies sont en phase avec l'IOS, ENSO est donc nettement ressenti sur toute la zone en anomalie de vents méridiens.

Un traitement supplémentaire des fichiers FSU (programmes *writau.f*, *wvect.ppc*) a permis d'obtenir le vecteur anomalie du vent (Fig. 18) et l'on s'aperçoit que les variations du vent ne sont pas homogènes pour tous les Niño et Niña. Chaque Niño / Niña présente une spécificité, excepté dans l'inversion du signe de la pseudo-tension méridienne  $\tau_y$ . Par contre l'amplitude des anomalies



interannuelles varie en  $\tau_x$  et  $\tau_y$  et ne présente pas de lien de proportionnalité avec l'amplitude de l'IOS : les anomalies de vent des Niño de 77, 82, 87 sont respectivement de sud, d'est-sud-est et de sud-est, les anomalies des deux Niña de 74-75 et 88 sont de nord-ouest et d'est-nord-est.

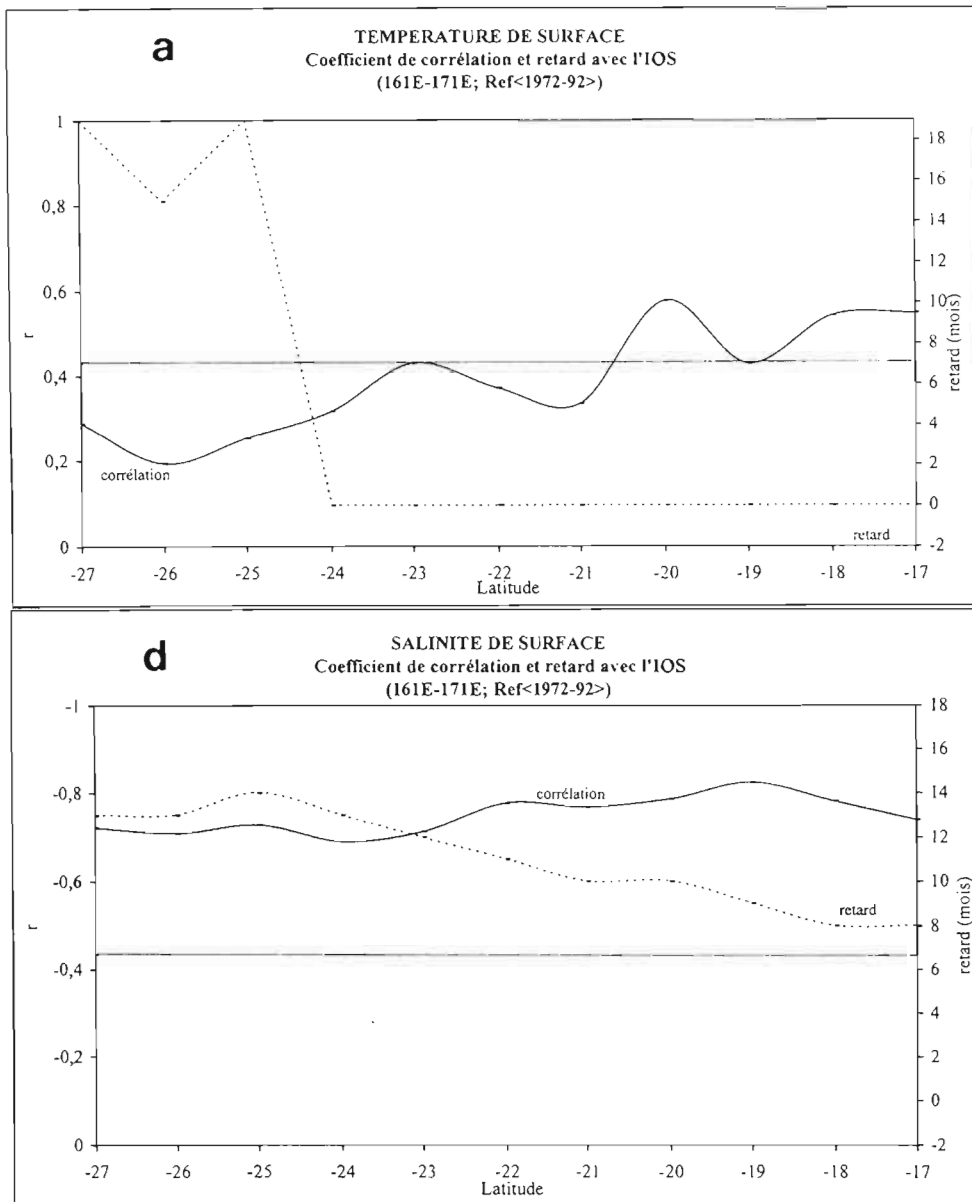


Figure 17 : variations méridiennes du coefficient de corrélation maximum (échelle de gauche) et du retard associé (échelle de droite) entre les variations de l'indice d'oscillation sud et les variations interannuelles de la température de surface (a), de la salinité de surface (b), de la pseudo-tension du vent (c), de la composante zonale de la pseudo-tension du vent (d) et de la composante méridienne de la pseudo-tension du vent (e). Les coefficients de corrélations sont calculés sur la période 1972 à 1992 à une longitude voisine de 161E-170°E. Les coefficients de corrélations supérieurs en module à 0.43 sont significatifs à 95%. Cette limite est indiquée par la droite transversale

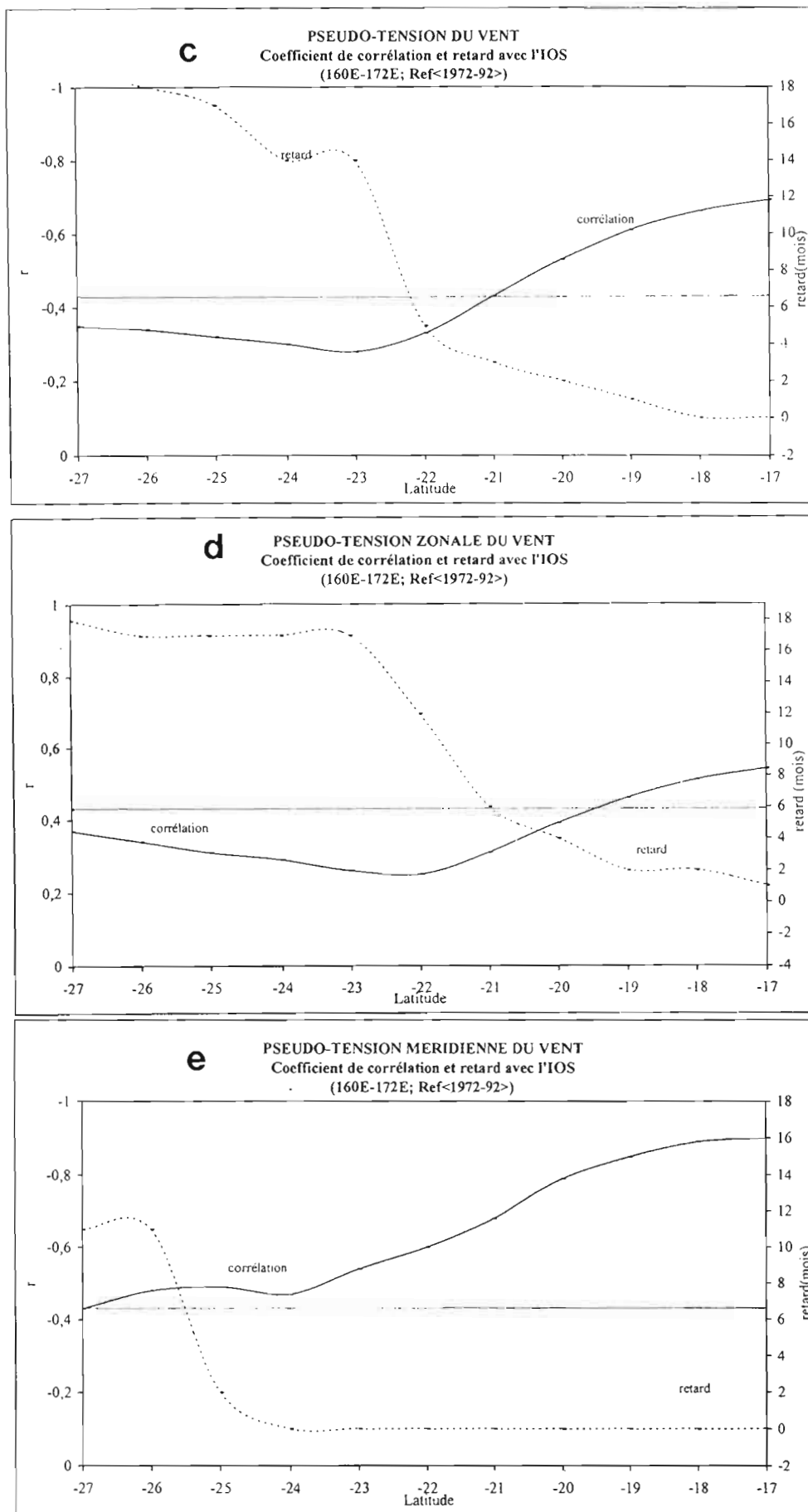


Figure 17 (suite)

ANOMALIE DU VECTEUR DE LA PSEUDO-TENSION DU VENT  
160E-172E; Hanning a 12 mois; Ref '1972-92'

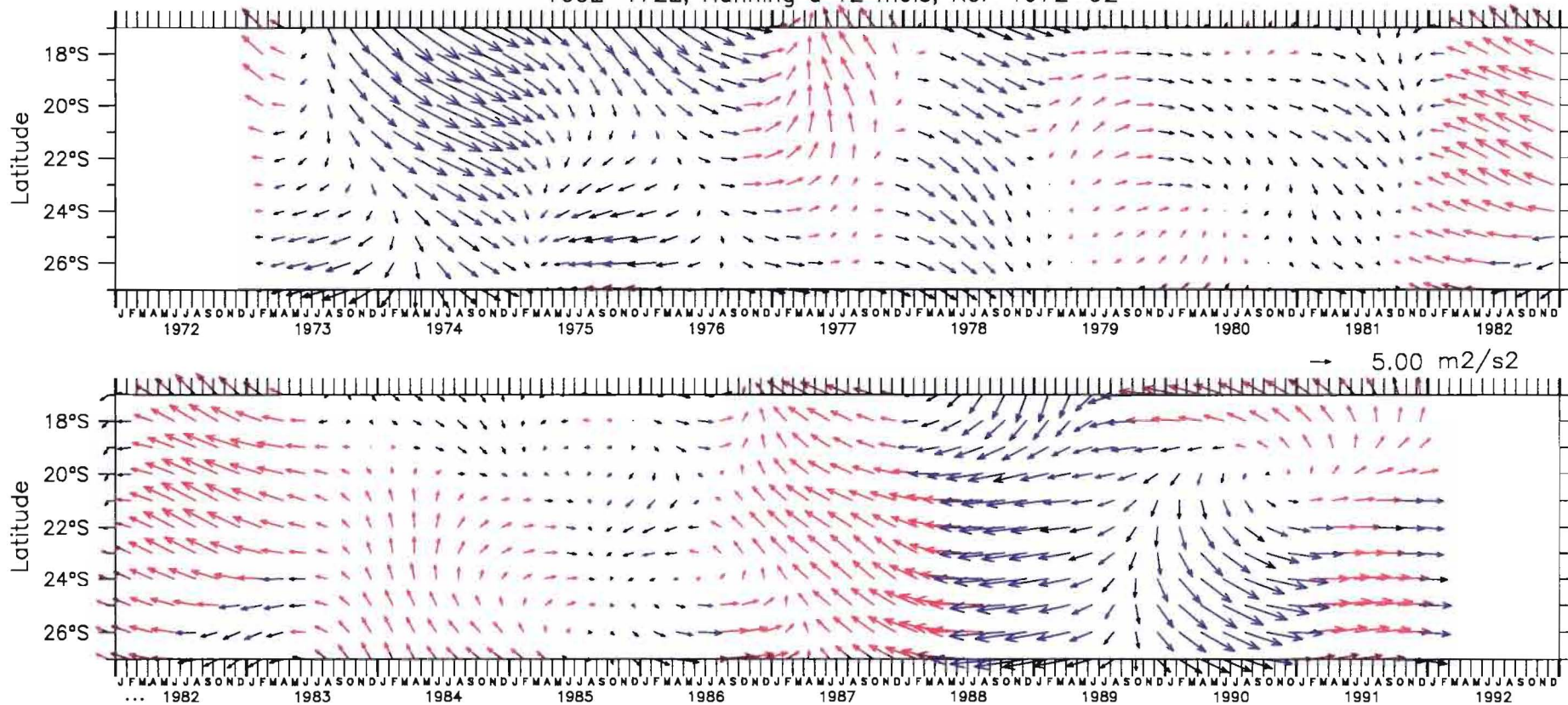


Figure 18, pages suivantes : variations interannuelles relatives à 1972-92 sur 160°E-170°E du vecteur pseudo-tension du vent lissée par filtrage de Hanning sur 12 mois. Le vecteur est dessiné en rouge lorsque l'anomalie de la composante méridienne du vecteur est positive et en bleu lorsque celle-ci est négative. La figure sur transparent présente les variations interannuelles de l'indice d'oscillation sud et se superpose pour comparaison aux variations du vecteur pseudo-tension du vent

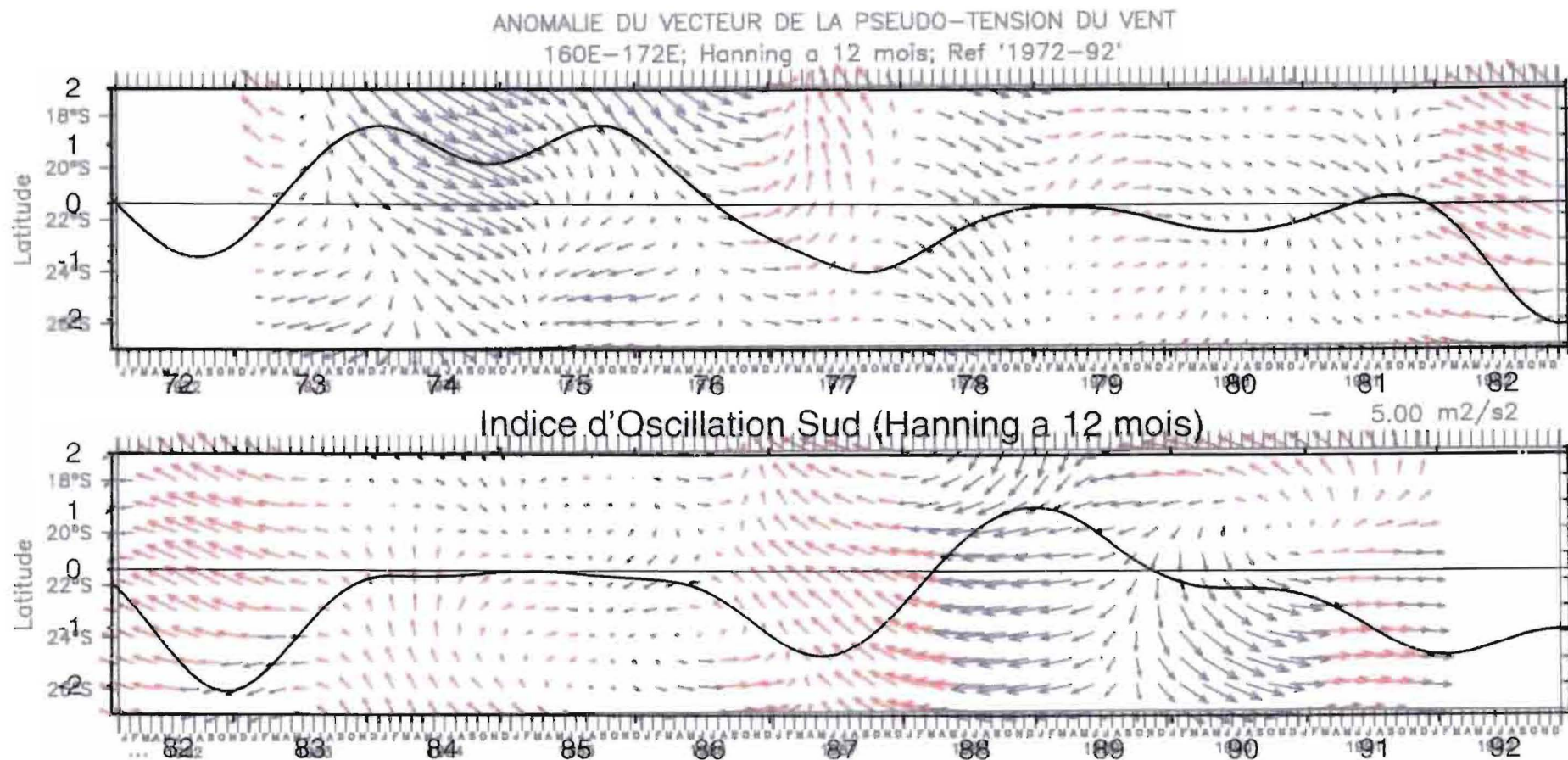


Figure 18, pages suivantes : variations interannuelles relatives à 1972-92 sur 160°E-170°E du vecteur pseudo-tension du vent lissée par filtrage de Hanning sur 12 mois. Le vecteur est dessiné en rouge lorsque l'anomalie de la composante méridienne du vecteur est positive et en bleu lorsque celle-ci est négative. La figure sur transparent présente les variations interannuelles de l'indice d'oscillation sud et se superpose pour comparaison aux variations du vecteur pseudo-tension du vent



## V. CONCLUSION

---

ENSO (El Niño Southern Oscillation) est le phénomène climatique d'échelle interannuelle le plus important de la planète. Ses effets les plus forts se font ressentir au niveau des tropiques à la fois dans les océans Atlantique, Indien et surtout dans le Pacifique. Le programme international TOGA (Tropical Global Ocean Atmosphere de 1985 à 1994) les a mis en évidence, en soulignant aussi les impacts socio-économiques que peuvent provoquer les anomalies océaniques et atmosphériques liées à ENSO.

Le Pacifique sud-ouest ( $10^{\circ}\text{S}$ – $40^{\circ}\text{S}$  et  $160^{\circ}\text{E}$ – $150^{\circ}\text{O}$ ), dans lequel nous situons notre étude, constitue une zone particulière en raison d'évolutions inverses des températures de l'air et de surface de l'océan par rapport aux évolutions de ces mêmes paramètres dans la bande équatoriale centre-est du Pacifique et dans d'autres régions (Fig.3, Halpert et Ropelewski, 1992; Delcroix et Hénin, 1989). Qui plus est notre étude se situe géographiquement en partie hors des tropiques et s'inscrit ainsi dans le programme CLIVAR (CLImate VARIability and prediction, de 1995 à 2008) qui vise sensiblement les mêmes objectifs que TOGA sans être limité aux régions intertropicales. Notre champ d'observation s'est porté plus précisément sur l'environnement océanique de la Nouvelle Calédonie, à travers la signature d'ENSO des quatre paramètres SST (*température de surface de la mer*), SSS (*salinité de surface de la mer*), vents et précipitations.

ENSO étant un phénomène de couplage entre océan et atmosphère, nous avons choisi d'étudier deux couples de paramètres océaniques et atmosphériques. Dans cette optique, nous avons utilisé pour les paramètres océaniques des données issues de mesures effectuées à partir de navires marchands et de la marine Nationale gérées (depuis 25 ans) par un programme de l'ORSTOM. Cela nous a permis d'accéder pour notre étude à environ 12.000 mesures de température et de salinité de surface que nous avons validées et analysées à travers une série de traitements spécifiques. Les données de la partie atmosphérique proviennent : pour les vents de la Florida State University (FSU) et pour les précipitations, des mesures satellites de radiations longues (OLR) de la NOAA. Etant donné les distributions spatio-temporelles irrégulières des données disponibles, nous les avons ramené sur des grilles latitude ( $1^{\circ}$ )  $\times$  temps (1 mois) en ignorant les variations en longitude dans notre zone d'étude compte tenu du rapport important entre le gradient méridien et le gradient zonal. De plus la période étudiée a été choisie de 1972 à 1992 et l'espace géographique entre  $27^{\circ}\text{S}$ – $17^{\circ}\text{S}$  et  $160^{\circ}\text{E}$ – $170^{\circ}\text{E}$ .

Nous avons été amené à étudier le signal saisonnier (et le cycle annuel) qui s'est révélé important dans la variabilité des paramètres car toujours supérieur au signal interannuel. Nous l'avons quantifié par le calcul des écarts types saisonniers, par établissement d'années types et par analyse harmonique. Cela a aussi contribué à approfondir les connaissances de l'environnement climatique de la région.

L'objectif initial était de détecter la présence ou l'absence de signatures d'ENSO sur la zone à

partir d'observations océanographiques et météorologiques. Ce projet a été mené à terme avec la production de résultats démontrant la présence de ces signatures. Nous nous sommes ainsi attachés à les étudier en comparant les variations interannuelles des différents paramètres avec l'IOS (Indice d'Oscillation Sud), indice le plus couramment utilisé comme marqueur d'ENSO. Si on regarde l'IOS sur la période 1972–92, on observe un enchaînement de phases négatives et positives caractérisant 5 Niño et 2 Niña (Fig.2 et 16). Les variations interannuelles des différents paramètres ont été mises en évidence par filtrage de Hanning des périodes inférieures à 12 mois, ce qui a aussi permis une quantification de la corrélation avec retard entre ces paramètres et l'IOS. Le résumé des signatures ENSO sur les paramètres étudiés est présenté dans le tableau suivant :

	Signe et ordre de grandeur de l'anomalie pendant un Niño	Signe et ordre de grandeur de l'anomalie pendant une Niña	Coefficient de corrélation avec l'IOS et retard	Remarques
SST	-0.5°C	+0.5°C	r = 0.4 à 0.6 en phase	corrélation au nord de 21°S
SSS	+0.3 usp	-0.3 usp	r = -0.7 à -0.8 le retard évolue de 8 mois (27°S) à 12 mois (17°S)	sur toutes les latitudes de 17°S à 27°S
Pseudo-tension du vent (norme)	+8 m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> renforcement des alizés	-8 m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> affaiblissement des alizés	r = -0.4 à -0.7 retard de 0 à 3 mois	corrélation au nord de 21°S
Pseudo-tension zonale du vent	-10 m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> (- : vers l'ouest)	+10 m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> (+ : vers l'est)	r = 0.4 à 0.7 retard de 0 à 3 mois	corrélation au nord de 21°S
Pseudo-tension méridienne du vent	+4 m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> (+ : vers le nord)	-4 m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> (- : vers le sud)	r = -0.4 à -0.9 en phase puis retard passant à 12 mois de 24°S à 27°S	sur toutes les latitudes de 17°S à 27°S
Précipitations	-0.3* m/an	+0.3* m/an	* : valeurs approximatives compte tenu de la technologie des mesures et de la faible longueur de la série disponible	

Tableau I : Caractéristiques moyennes des paramètres climatiques de la région 27°S–17°S et 160°E–170°E lors des événements El Niño–La Niña de la période 1972-92 et coefficients de corrélations associés

Pendant les Niño, on observe des anomalies froides de SST au nord de 21°S en phase avec l'IOS, consistantes avec le renforcement des vents (évaporation et refroidissement liés aux vents) et notamment de la composante méridienne qui amène de l'air plus froid et plus sec. L'accroissement de cette composante lors des Niño est vraisemblablement liée au déplacement vers le Pacifique central de la zone d'eau chaude habituellement située plus à l'ouest (Fig. 1); la zone de convection associée aux eaux chaudes se déplace et entraîne une orientation plus méridienne des gradients de pression atmosphérique. Par ailleurs, pendant El Niño, on observe une augmentation significative de la SSS (0.3 usp) sur l'ensemble de la zone avec un retard de 8 à 12 mois sur l'IOS. Comme pour la SST et les vents, ces

variations sont consistantes avec une augmentation des vents (donc une évaporation croissante) et une diminution des précipitations (les apports d'eau douce réduisent la salinité) qui peut aussi s'expliquer par le déplacement vers l'est de la zone de convection, donc de la partie ascendante de la cellule de Hadley (Fig 1) qui induit une subsidence au voisinage de la zone étudiée (air sec qui retombe) et moins de précipitations.

Pendant les Niña ce sont les processus inverses qui se produisent : en effet les Niño–Niña apparaissent essentiellement comme symétriques au voisinage de la zone étudiée, ce qui n'était pas évident a priori. En dépit des relations entre ENSO et les paramètres étudiés, il est important de noter que la comparaison des deux Niña entre elles et des trois Niño entre eux montre une spécificité de chaque évènement : le signe des anomalies est effectivement lié au signe de l'IOS mais pas forcément les amplitudes associées.

D'autre part les corrélations mises en évidence se basent sur l'IOS et on pourrait envisager d'autres indices d'ENSO comme le déplacement de la warm pool (Fig i3). La corrélation des phénomènes climatiques de la zone est peut-être exacerbée par le fait que celle-ci se situe quasiment entre les deux centres de pression qui définissent l'IOS.

On suggère ici des liens entre les paramètres océaniques et atmosphériques (augmentation des précipitations et diminution des vents entraîne diminution de SSS, augmentation des vents entraîne diminution de SST) en raison du fait qu'ENSO est un phénomène de couplage océan-atmosphère à part entière. Ces liens n'ont pas été montrés de manière quantitative, de même que l'on n'a pas examiné les relations possibles entre les variations interannuelles des deux paramètres SST et SSS et celles des courants océaniques. Pour la poursuite de l'étude on pourrait regarder aussi les modifications potentielles de ces courants pendant ENSO en examinant tout d'abord les courants géostrophiques que l'on peut obtenir à partir des mesures de subsurface (eXpendable BathyThermograph, XBT) et à partir de l'altimétrie (pour les courants de surface); les courants d' Ekman pourraient être obtenus à partir des vents. Cela permettrait de savoir si le signal ENSO a une influence sur l'advection océanique et si la limite méridienne de cette influence en matière de courants correspond ou non à celle des paramètres de surface que nous avons étudiés.

## Bibliographie

- Arkin P. A. and B. N. Meisner (1987) The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the Western Hemisphere during 1982- 84. *Monthly Weather Review*, **115**, 51-74.
- Bendat J. S. et A. G. Piersol, (1971). Random data : analysis and measurements procedures. *Wiley-Interscience*, 407
- Berlage, H. P., (1966). The Southern Oscillation and world weather. *K. Ned. Meteorol. Inst., Meded. Verh.*, **88**, 152pp
- Bjerknes, J., (1966). A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, **18**, 820-829
- Busalacchi A et al., (1993). Comparison of Special Sensor Microwave Imager vector wind stress with model-derived and subjective products for the tropical Pacific. *J. of Geo. Res.*, **98**, 6961-6977
- Busalacchi A., and M. Cane (1985), Hindcasts of sea level variations during the 1982-83 El Niño, *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 213-221.
- Cadet, D., (1985). The Southern Oscillation over the Indian ocean. *J. of Clim.*, **5**, 189-212
- Cane, M. A., (1983). Oceanographic events during El Niño, *Science*, **222**, 1189-1195
- Delcroix T. et C. Hénin, (1989). Mechanisms of subsurface thermal structure and sea surface thermohaline variabilities in the southwestern tropical Pacific during 1979-85. *J. Mar. Res.*, **47**, 777-812.
- et C. Hénin, (1991). Seasonal and interannual variations of sea-surface salinity in the tropical Pacific ocean. *J. Geophys. Res.*, **96**, 22135-22150.
- , (1993). Seasonal and interannual variability of sea-surface temperatures in the tropical Pacific, 1969-1991. *Deep Sea Res.*, **40**, 2217-2228.
- , C. Hénin, V. Porte et P. Arkin, (1995). Precipitation and sea-surface salinity in the tropical Pacific. Soumis à *Deep Sea Res.*
- Delecluse P. et al., (1994). On the connection between the 1984 Atlantic warm event and the 1982-1983 ENSO. *Tellus*, **46A**, 448-464
- Goldenberg S., and J. O'Brien (1981), Time and space variability of tropical wind stress, *J. Geophys. Res.*, **109**, 1190-1207,.
- Gordon N. D. (1986). The Southern Oscillation and New Zealand Weather, *Monthly Weather Review*, **114**, 371-387.
- Halpert, M. S. et C. F. Ropelewski, (1992). Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J. of Climate*, **5**, 577-593
- Hastenrath, S., (1984). Interannual variability and annual cycle : mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1097-1107
- Hildebrandson, H. H., (1897). Quelques recherches sur les centres d'action de l'atmosphère. *K. Svenska Vetenskaps Akad. Handl.*, **29**, 33pp
- Janowiak J. E. and P. A. Arkin (1990) Rainfall variations in the tropics during 1986-1989. *Journal of Geophysical Research*, **96** (supplement), 3359-3373.
- Lehodey, P., (1994). Les monts sous-marins de Nouvelle Calédonie et leurs ressources Halieutiques. *Thèse présentée à l'université française du Pacifique*, 401pp
- Meyers G., J.R. Donguy and R.K. Reed (1986) Evaporative cooling of the western equatorial Pacific Ocean by anomalous winds. *Nature*, **323**, 523-526.



- Morlière A. et J. P. Rébert, (1986). Rainfall shortage and El Niño–Southern Oscillation in New Caledonia, Southwestern Pacific. *Monthly Weather Review*, **114**, 1131-1137
- Philander, S. G. H. (1985), El Niño and La Niña, *J. Atmos. Sc.*, **42**, 2652-2662.
- , (1990), El Niño, La Niña, and the southern oscillation, *Academic Press*, **293** pp., San Diego, Calif..
- Rasmusson E.M. and T.H. Carpenter (1982) Variations in tropical sea surface temperature and surface wind field associated with the southern Oscillation / El Niño. *Monthly Weather Review*, **110**, 354-384.
- Ropelewski C. F. and M. S. Halpert (1987) Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, **115**, 1606-1626.
- Tourre Y. M. et White W. B., (1995). ENSO signals in global upper–ocean Temperature. *Monthly Weather Review*
- Walker, G. T., (1923). Correlation in seasonal variations of weather, VIII : A preliminary study of world weather. *Mem. Indian Meteor. Dep.*, **24**, 75-131
- , (1924). ). Correlation in seasonal variations of weather, IX : A further study of world weather. *Mem. Indian Meteor. Dep.*, **24**, 275-232
- , et E. W. Bliss, (1932). World Weather V. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, **4**, 53-84
- Wyrtki K (1975), El Niño- the dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, 572-584.

