



ZoNéCo

PROGRAMME D'ÉVALUATION DES RESSOURCES MARINES
DE LA ZONE ÉCONOMIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

RAPPORT ZoNéCo 2004-mi 2005

Titre du projet :

Etude et prévisions de la circulation océanique dans la ZEE de Nouvelle Calédonie : courants, upwelling le long de la pente externe de Nouvelle-Calédonie et conséquences sur les ressources naturelles.

Andrés Vega¹, Alexandre Ganachaud² et Jérôme Lefèvre²

Collaborateurs :

Marc Despinoy³, Martine Rodier⁴, Gaël Alory⁵, Patrick Marchesiello⁶, Julien Bosson² et Patrick Lehodey⁷

¹ZoNéCo-ADECAL / IRD-Nouméa UR065, ²IRD-Nouméa UR065,
³IRD-Nouméa US-ESPACE, ⁴IRD-Nouméa UR99, ⁵CSIRO-Hobart, ⁶IRD-Brest, ⁷CPS-Nouméa

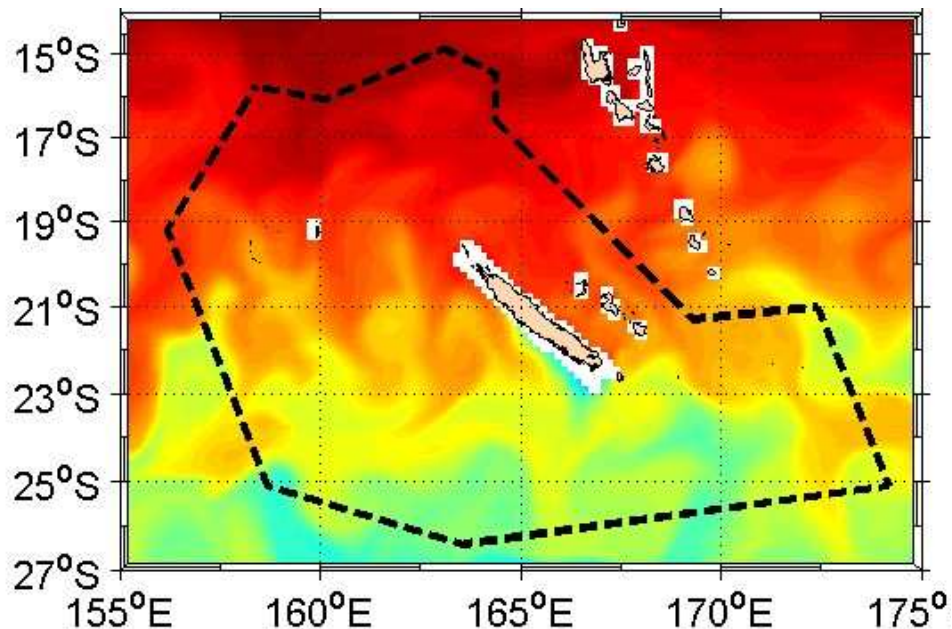


TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION

2. ETUDE EXPERIMENTALE

2.1 *Description bibliographique de la dynamique de la ZEE*

2.2 *Mesures de terrain*

2.2.1 *Acquisition et traitement des données campagnes et in situ*

2.2.2 *Résultats campagnes et capteurs in situ*

Mesures électroniques réalisées lors de campagnes en mer

Echantillons obtenus lors de campagnes en mer

Mesures provenant de capteurs autonomes fixes et mobiles.

2.3 *Etude satellite*

2.3.1 *Acquisition et traitement des données satellite*

Plateforme IRD de traitement satellite pour l'étude de la ZEE

La station d'acquisition d'images NOAA ou SeaWiFS

Pourquoi s'intéresser à la chlorophylle ?

Pourquoi s'intéresser à la température de l'eau ?

2.3.2 *Résultats satellite*

2.4 *Analyse de l'upwelling*

3. ETUDE NUMERIQUE

3.1 *Développement plateforme numérique*

3.1.1 *Présentation des moyens de calculs numériques*

3.1.2 *Conception de la plateforme de prévision de l'état océanique*

3.1.3 *Etat d'avancement du projet de plateforme de prévision de l'état océanique*

3.1.4 *ZEE_RUN2 : Modèle ROMS 1/6° imbriqué dans les champs de prototype Système MiniPOG.*

3.1.5 *Eléments de conception de la plateforme de prévision océanique régionale*

3.2 *Etude de validation*

3.2.1 Validation du modèle ZEE_RUN2

3.2.2 Comparaison avec la Climatologie CARS

Conclusion

3.3 *Présentation des résultats de la simulation ZEE Nouvelle-Calédonie*

4. APPLICATIONS

4.1 Répartition des sels nutritifs et transport de plancton

4.2 Environnement et distribution de thonidés

4.3 Risques naturels et anthropogéniques

4.3.1 Trajectoire des cyclones

4.3.2 Transport et dispersion de polluants

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Atlas Océanographie Satellite ZEE

Article scientifique

INTRODUCTION

Ce document synthétise les activités réalisées dans le cadre du programme ZoNéCo « *Etude et prévisions de la circulation océanique dans la ZEE de Nouvelle Calédonie : courants, upwelling le long de la pente externe de Nouvelle-Calédonie et conséquences sur les ressources naturelles* durant la période 2004-2005 ». Le programme a commencé en août 2004 avec l'intégration d'Andrés Vega au sein de l'équipe du Laboratoire d'Etudes Géophysiques et d'Océanographie Spatiale à l'IRD de Nouméa. Le programme s'organise en 4 actions :

1. Description et compréhension des mécanismes des processus dynamiques dans la ZEE à partir des observations existantes;
2. Acquisition de nouvelles données océanographiques.
3. Mise en place d'une plateforme de modélisation et d'un prototype de prévision océanique.
4. Recommandations d'outils pour application à la gestion de l'écosystème et des ressources naturelles.

La ZEE de la Nouvelle-Calédonie recouvre 1.740.000 Km², et bien que son rôle économique et social soit de première importance pour le Territoire, ses caractéristiques océanographiques, et plus particulièrement la circulation marine, ont été peu étudiées. La dynamique océanique engendre des fronts thermiques, des tourbillons, des courants en surface et au fond ayant potentiellement un effet important sur les concentrations de poissons et la biologie marine. D'autres aspects, comme le transport des particules, le mélange par les ondes internes et les champs de courants 3-D influent sur la dispersion de rejets côtiers, les échanges avec le lagon et le potentiel cyclonique local. L'upwelling côtier étant un signal majeur de la variabilité océanique dans la ZEE, une partie de nos efforts de mesure y est consacrée. L'eau froide qui émerge lors d'événements d'upwelling est, dans la plupart des systèmes d'upwelling existant dans le monde, accompagnée d'un apport important d'éléments nutritifs et peut avoir un impact sur l'activité biologique, particulièrement dans une région oligotrophe (pauvre en sels nutritifs) comme la ZEE. Le renouvellement des eaux du lagon par les eaux du large étant très rapide, de tels changements sont aussi ressentis par l'écosystème lagonaire.

La modélisation et la prévision de la dynamique marine de la ZEE constituent des enjeux nationaux majeurs : la communauté océanographique française développe d'importants chantiers en estimation, modélisation et prévisions de l'état océanique à l'échelle globale et, plus récemment, des applications régionales se sont mises en place. Dans ce cadre, un pôle d'étude en océanographie côtière a pu se développer grâce au soutien de ZoNéCo, conjointement avec l'IRD, le Ministère de l'Outre Mer et le Programme National d'Environnement Côtier. L'expertise ainsi acquise pourra jouer un rôle important pour la surveillance et la gestion durable de l'environnement marin.

2. ETUDE EXPERIMENTALE

2.1 Climatologie océanique de la ZEE

Les études hauturières menées par les équipes de l'IRD ont traditionnellement porté sur les grandes échelles et sur l'influence climatique de El Niño. Les quelques études océanographiques de la région concernent particulièrement la variabilité biologique (Le Borgne et al., 1985) et chimique (campagnes DIAPALIS, Rodier et Eldin, 2005). Peu de programmes ont été mis en place pour étudier les processus physiques et environnementaux en dehors du lagon. Hénin et al. (1984) décrit sommairement la circulation superficielle autour de la Nouvelle-Calédonie, présentant des schémas de courants par vent Alizés et par vent d'Ouest. Une brève description de l'environnement hydroclimatique a aussi été présentée dans le rapport ZoNéCo *Ressources marines de Nouvelle-Calédonie* (Granperrin et al., 1997). Récemment, les caractéristiques de l'upwelling côtier en Nouvelle-Calédonie ont été décrites à partir d'images satellites (Hénin et Cresswell, 2005) et, dans le cadre de la présente étude, un modèle simple a été développé pour estimer l'importance des sources de forçage des émergences d'eau froide (Alory et al., 2005; en annexe).

A l'échelle du Pacifique Sud-Ouest, une climatologie de haute résolution a été développée par le CSIRO australien (Ridgway et Dunn, 2003). Cet atlas, nommé CARS, permet de connaître les champs moyens de plusieurs paramètres chimiques et physiques. La figure 2.1.1 montre un schéma de la circulation géostrophique moyenne de surface dans le Pacifique Sud-ouest estimée à partir de CARS (Kessler, comm. pers.).

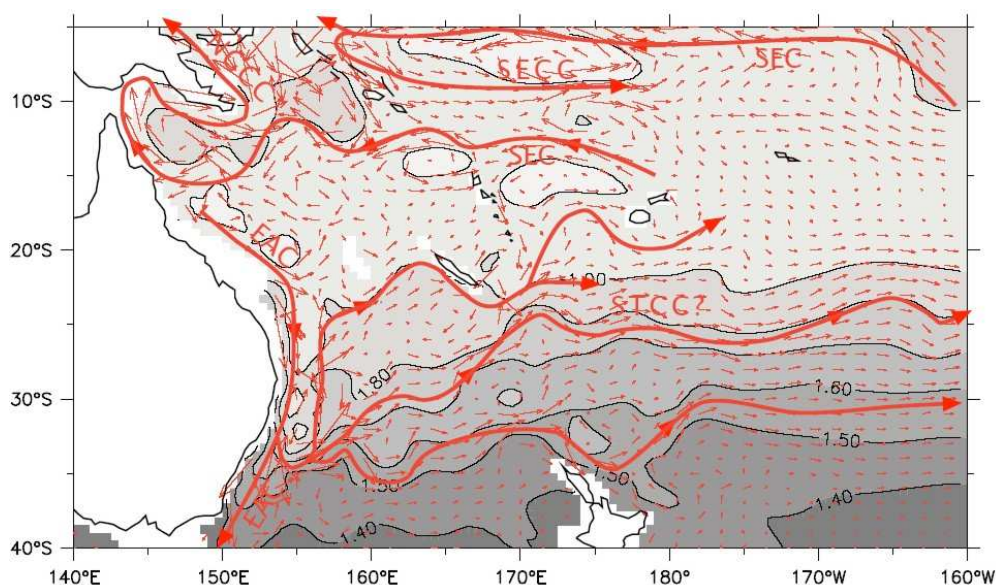


Figure 2.1.1 Circulation moyenne de surface estimée à partir des données climatologiques CARS (CSIRO Atlas of Regional Seas). SEC=Courant équatorial Sud, EAC=Courant Est Australien, SECC=Contre courant équatorial Sud, STCC=Contre courant sub-tropical. D'après Kessler (comm. pers.).

Les eaux superficielles de la ZEE sont sous l'influence de deux grands systèmes de courants très distincts. Au sud, une branche du Courant Est Australien (EAC) amène de l'eau froide et saline tandis que de l'eau d'origine équatoriale, chaude et peu saline, pénètre au nord de la ZEE par le biais du Courant Sub-équatorial (SEC). En conséquence, les caractéristiques océanographiques des couches superficielles de la ZEE sont fortement modulées par la variabilité saisonnière de ces deux systèmes de courants (Fig. 2.1.2).

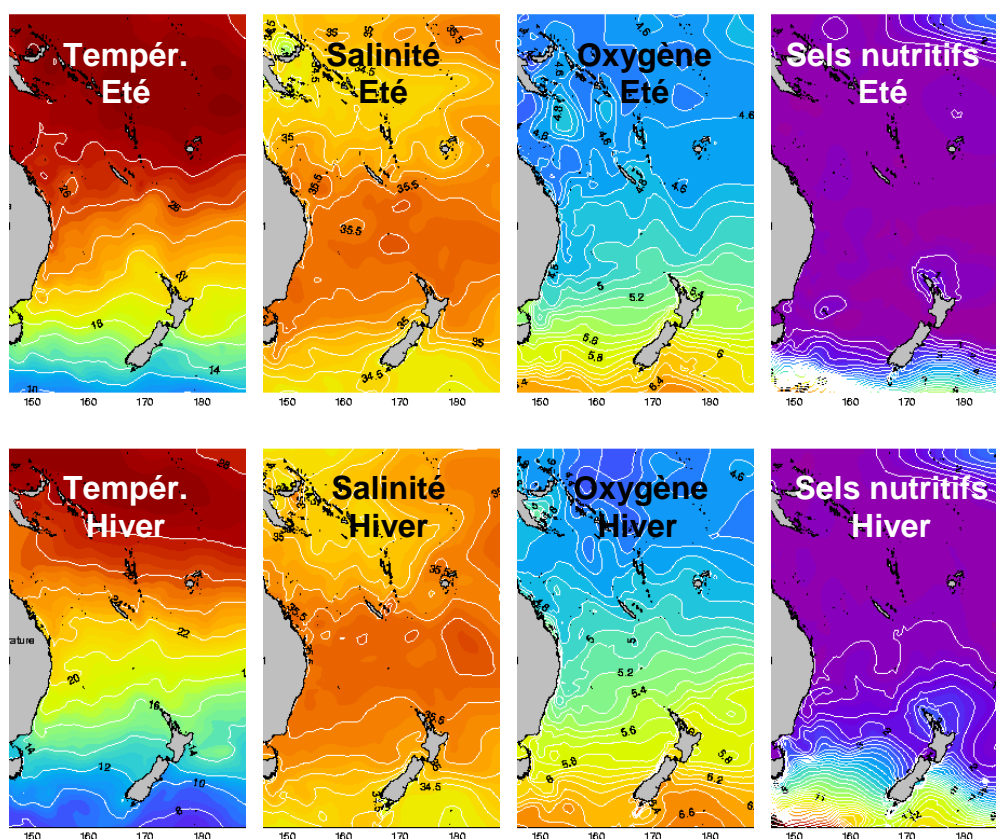
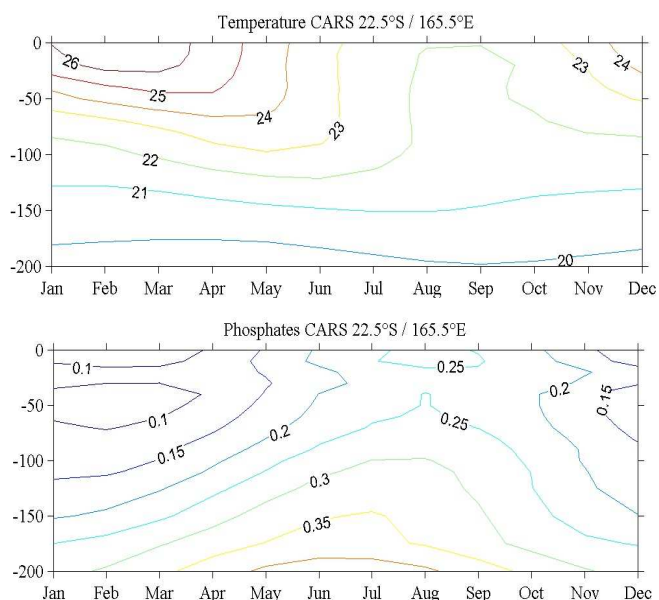


Figure 2.1.2 Distributions en surface de température, salinité, oxygène et sels nutritifs en été et hiver austral obtenues à partir de l'atlas climatologique CARS.

Figure 2.1.3 Distributions en profondeur de la température (°C) et phosphates ($\mu\text{M/l}$) près de la côte ouest de Nouvelle-Calédonie obtenues à partir de l'atlas climatologique CARS.



La forte variabilité saisonnière des paramètres océanographiques dans la ZEE s'observe aussi en profondeur (Fig. 2.1.3). Par exemple, durant la période hivernale (juin à octobre) la colonne d'eau est peu stratifiée, la couche de mélange a une épaisseur de plus de 100 m et les concentrations de phosphates (sel nutritif) atteignent des valeurs supérieures à $0.2 \mu\text{M/l}$. Durant la période estivale (décembre à mars) la colonne est fortement stratifiée, l'épaisseur de la couche de mélange varie entre 20 et 50 m et les concentrations de phosphates sont inférieures à $0.15 \mu\text{M/l}$.

2.2 Mesures de terrain

2.2.1 Présentation des mesures

(a) **Mesures instantanées réalisées lors de campagnes en mer.** Ce groupe concerne principalement les données de courant, mesurées avec l'ADCP installé à bord du N/O Alis (courantomètre Doppler ; mesures des courants sur les 200 premiers mètres), dans la ZEE entre 1991 et 2005 et les profils de température XBT (capteurs de température à sondes perdues) réalisées dans la région durant les 20 dernières années. Cette information a été utilisée pour obtenir un schéma moyen de courants et de profils de température autour de la Nouvelle-Calédonie.

Liste des campagnes où les données de courants ADCP ont été analysées :

ALIZE 2 – 1991 / COARE 1 – 1991 / COARE 2 – 1992 / COARE 3 – 1992 / NOUTAH 92 – 1993 / FLUP 75 – 1994 / FLUP 300 – 1994 / EBENE 75 – 1996 / EBENE 300 – 1996 / KAONOU 75 – 1996 / FRONTALIS 1 – 2001 / FRONTALIS 2 – 2004 / SECALIS 1 – 2004 / FRONTALIS 3 – 2005 / SECALIS 2 – 2005

(b) **Prélèvements hydrologiques obtenus lors de campagnes en mer.** Dans le cadre du programme ZoNéCo une campagne spécifique a été réalisée pour étudier les événements d'upwelling présents le long de la côte ouest du Territoire. Ainsi, à l'occasion de la campagne SECALIS (décembre 2004), des mesures de température, salinité, oxygène, sels nutritifs, chlorophylle-a, phytoplancton, zooplancton, pCO₂ et courants le long du bord ouest de la Nouvelle-Calédonie ont été réalisées sur 3 jours. D'autres campagnes similaires sont prévues pour décembre 2005 et avril 2006.

(c) **Capteurs autonomes fixes et mobiles.** Depuis 1990 de nombreux capteurs de température et salinité ont été installés dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie. Récemment un capteur de température a été installé proche de la passe de Boulari, avec transmission en temps réel, pour détection immédiate des événements d'upwelling. Des bouées dérivantes GTS ont été lâchées dans la ZEE, permettant de suivre en temps quasi-réel les flux de surface (www.aoml.noaa.gov/phod/dac). La mise en place d'un mouillage composé de capteurs de courants et de température à différentes profondeurs est prévue pour décembre 2005.

2.2.2 Résultats des mesures

(a) Mesures instantanées

Une analyse de la totalité des mesures des courantomètres acoustiques des navires de recherche montre que la circulation côtière autour de la Nouvelle-Calédonie est complexe, très sensible aux conditions météorologiques mais aussi à la circulation à plus grande échelle. Par exemple, dans le cas de conditions de vent Alizé en septembre 1992 (Fig. 2.2.1), les courants le long de la pente ouest de la Nouvelle-Calédonie se dirigent vers le sud-est, à l'opposé de la direction du vent, en réponse au gradient de pression. On observe fréquemment de tels schémas non-intuitifs, avec des courants différents pour des conditions atmosphériques semblables. La schématisation de la circulation ainsi que la qualification des différents forçages requiert donc le développement d'un modèle côtier haute résolution.

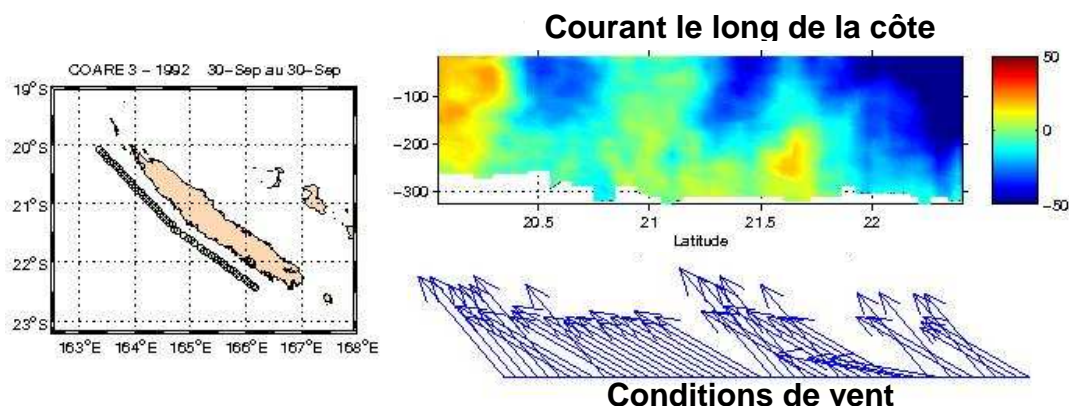


Figure 2.2.1 Courants mesurés le long de la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie durant la campagne COARE 3 le 30 septembre 1992. Les courants négatifs (bleu) se dirigent vers le sud-est, à l'opposé de la direction du vent.

L'analyse des profils de température provenant des XBT indique une forte variabilité saisonnière de la profondeur de la couche de mélange (couche supérieure directement influencée par le vent) dans la ZEE. En été celle-ci a une épaisseur inférieure à 40 m, tandis qu'en hiver la base de la couche de mélange se trouve sous les 100 m. Cette variation saisonnière a une forte incidence sur les processus d'émergence d'eau profonde ; elle pourrait en effet expliquer en partie l'absence d'événements d'upwelling durant l'hiver austral (voir Alory et al., 2005, en annexe).

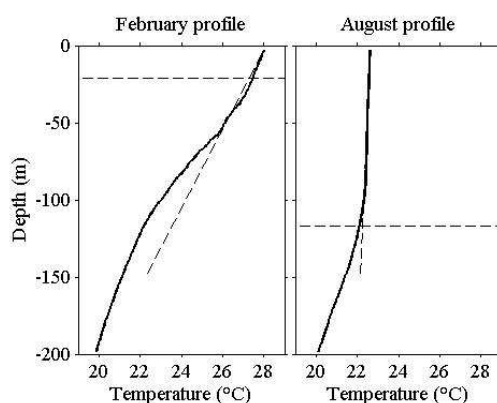


Figure 2.2.2 Profils moyens de température dans la ZEE obtenus à partir de 130 XBT lancés près du bord ouest de la Nouvelle-Calédonie entre 1985 et 2005.

(b) *Echantillons hydrographiques obtenus lors de campagnes en mer*

L'analyse des campagnes historiques DIAPALIS (Rodier et Eldin, 2005) a permis de mettre en évidence la variabilité saisonnière et haute-fréquence des paramètres biochimiques dans la ZEE, mais, bien que quelques rapprochements entre la réponse biologique et l'environnement, particulièrement en relation avec les courants et la structure thermique, ont pu être observés, il est difficile d'établir des liens sans une étude ciblée des mécanismes physiques dominants. Pour étudier la réponse biochimique à un événement d'upwelling côtier, nous avons réalisé durant la campagne SECALIS-2, en collaboration avec l'UR099 de l'IRD, un échantillonnage durant trois jours le long du bord ouest de la Nouvelle-Calédonie - lors du

développement d'un événement d'upwelling (Fig. 2.2.3). Les données physiques et biochimiques ont mis en évidence une réponse biologique (voir section 2.4).

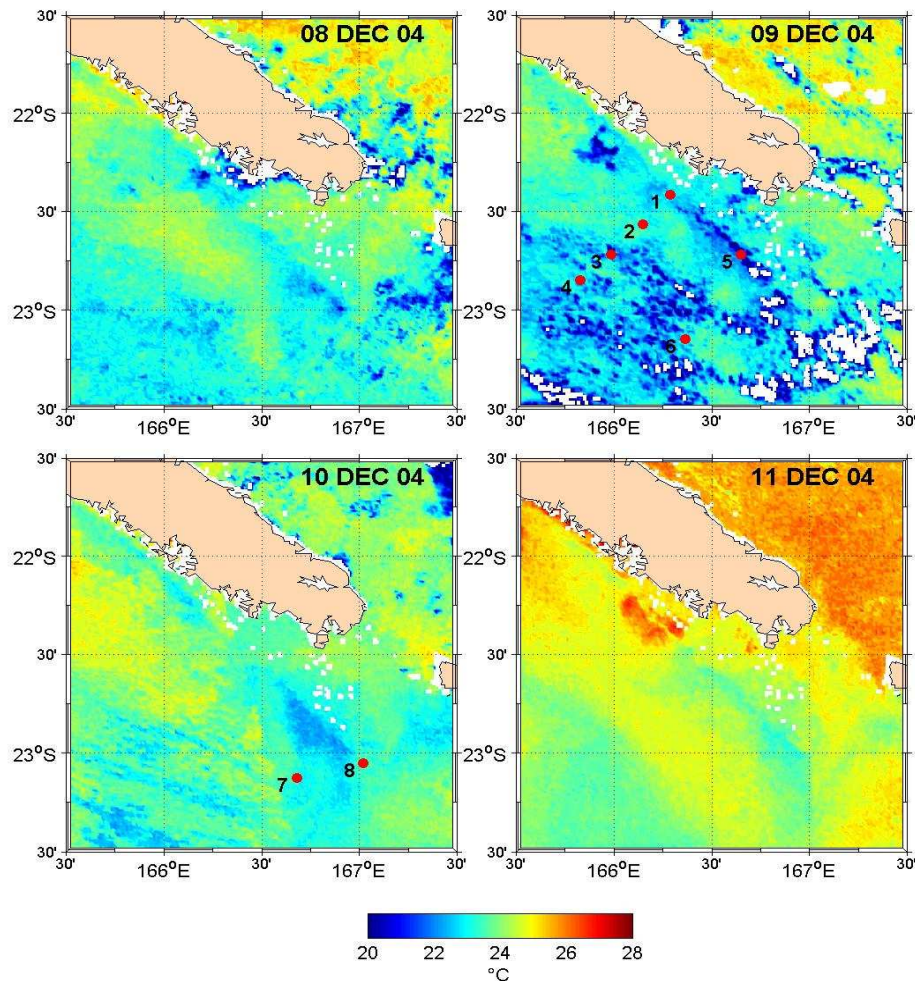


Figure 2.2.3 Images de température de la surface de la mer (SST) provenant du satellite AVHRR-NOAA (US-ESPACE, IRD-Nouméa) correspondant à la période de réalisation des stations 1 à 8 durant la campagne SECALIS 2004. Le 9 décembre correspond à une phase mature d'upwelling, le 11 décembre correspond à une phase chaude (absence d'upwelling).

La figure 2.2.4 présente les résultats d'une section perpendiculaire au récif (stations 1 à 4 sur fig. 2.2.3) réalisés en décembre 2004. On observe un refroidissement associé à l'élévation des isothermes le long de la côte ouest, correspondant à la remontée d'eau froide, un apport de sels nutritifs à 100 m de profondeur le long du récif et une augmentation conséquente de la concentration de chlorophylle-a sous la couche de mélange. Une teneur en phosphate de 0.6 à 100 mètres provient d'eaux de profondeurs supérieures à 200 mètres, d'après la climatologie (Fig. 2.1.3).

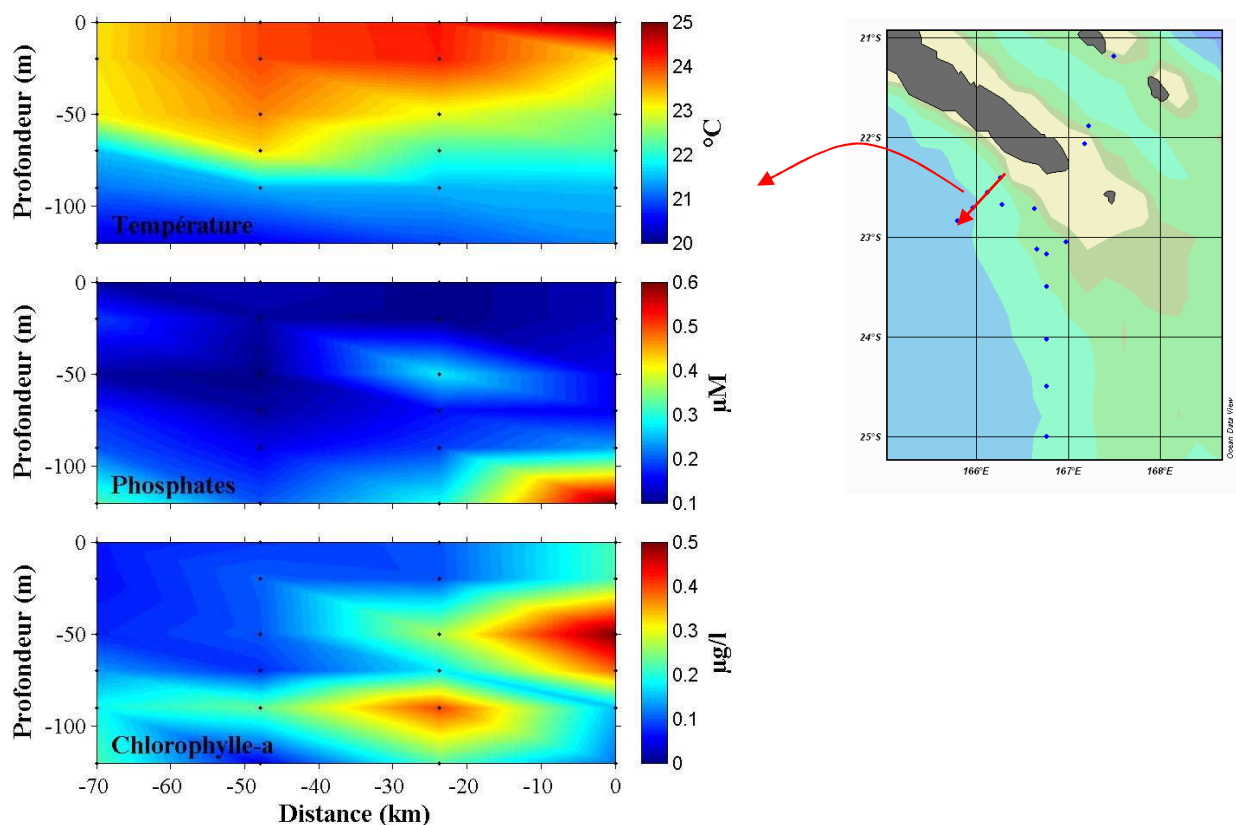


Figure 2.2.4 Sections de température, phosphates et chlorophylle-a correspondant aux stations 1 à 4 de la campagne SECALIS de décembre 2004. La distance 0 (70) correspond à la station 1 (4).

(c) Capteurs autonomes fixes et mobiles

Dans le cadre du programme ZoNéCo, plusieurs capteurs de température ont été installés dès 1990 dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie (Tableau 2.2.1 ; Fig.2.2.5). L'objet de ces mesures est de quantifier et de comprendre la variabilité de la température et de la salinité de surface essentiellement aux échelles diurnes, mensuelles, et interannuelles. Cette surveillance vise, d'une part, à caractériser la variabilité océanographique dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie et, d'autre part, à alimenter des bases de données régionales utilisables pour des objectifs ZoNéCo complémentaires (pêche, tourisme, aquaculture etc.). Ces mesures effectuées dans la ZEE, par thermosalinographe embarqué ou par stations côtières, complètent un ensemble de mesures effectuées sur le Pacifique tropical par l'IRD Nouméa (projet ZoNéCo « Contribution à la connaissance de la variabilité des structures thermo-halines de surface de la Zone Economique Exclusive (ZEE) de Nouvelle-Calédonie »). En décembre un capteur de température avec transmission en temps direct a été installé proche de la passe de Boulari (Fig. 2.2.7).

Ces séries temporelles de température et salinité, librement distribuées à la communauté scientifique, interviennent dans les études suivantes :

1) Etudes climatiques grandes échelles

Le climat grande échelle, en particulier le phénomène El Nino, influence le climat régional du Pacifique Sud-Ouest. Ainsi, les grands programmes internationaux sur El Nino participent à l'étude de la variabilité océanique et de ses influences climatiques régionales (en l'occurrence la ZEE de la Nouvelle-Calédonie). Les mesures en Nouvelle Calédonie aident à comprendre l'impact local de ces phénomènes climatiques.

2) Variations climatiques à l'échelle du lagon

Sous l'influence du phénomène El Niño mais aussi d'événements 'exceptionnels' tels que des coups de vents), la température de l'océan aux abords immédiats du lagon change. Une étude conduite à l'IRD par P.Douillet et S.Ouillon (Programme CARactérisation et Modélisation dans les Ecosystèmes Lagonnaires : CAMELIA) quantifie l'impact du phénomène ENSO sur l'hydrologie du lagon. Cette étude utilise les mesures de la station côtière de l'Anse Vata.

3) Upwelling et dynamique côtière

Cette étude fait l'objet d'un volet ZoNeCo particulier. Les mesures du réseau sont essentielles pour analyser les changements de températures et de salinité, avec notamment l'apparition rapide, à l'échelle du jour d'eau froide le long de la barrière récifale Ouest en relation avec les vents et la couche mélangée océanique.

Stations ou Navire	Paramètre	Début
AnseVata	T	04/1997
Phare Amédée	T	06/1997
Passe Boulari (temps réel)	T	12/2004
Passe Uitoé (extérieur)	T, S	05/1992
Passe Uitoé (extérieur)	T (10 m)	09/1997
Passe Uitoé (extérieur)	T (30 m)	07/2001
Passe Uitoé (extérieur)	T (60 m)	07/2001
Récif Ciménia	T	12/2004
Ilot Mato	T	12/2004
Récif du Prony	T	01/1996
Poé	T	08/1999
Goro	T	04/1997
Poindimié	T	12/1996
Ile Surprise	T	09/1997
Ile Chesterfield	T	09/1997
M/S Havannah	T, S	11/1995

Tableau 2.2.1. Liste des stations et du navire équipés de capteurs de température (T) et/ou de salinité (S) dans le cadre du programme ZoNeCo. Date de mise en place.

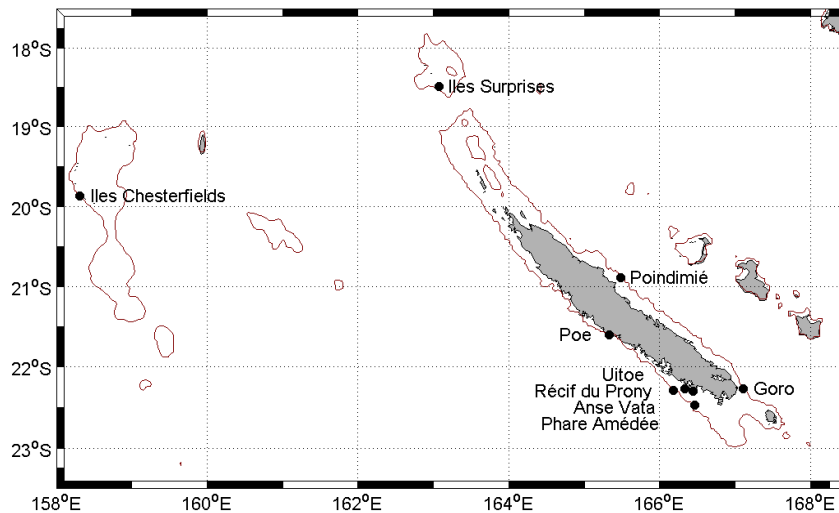


Figure 2.2.5 Position géographique des stations côtières instrumentées de capteurs de température et/ou de salinité

La figure 2.2.6 présente la plus longue série de température analysée, localisée près de la passe de Uitoé. Le signal saisonnier de la température est dominant en température, et moins visible sur la composante parallèle à la côte du vent. L'effet d'El Niño et La Niña s'observe en 1998 et 1999 : les amplitudes hiver-été de température (différences entre maxima et minima consécutives) diminuent fortement durant ces années là. De brusques refroidissements de plusieurs degrés, apparaissant comme des pics sur la figure, se produisent durant la période estivale. Ils correspondent aux événements d'upwelling et sont associés à des coups de vent de sud-est.

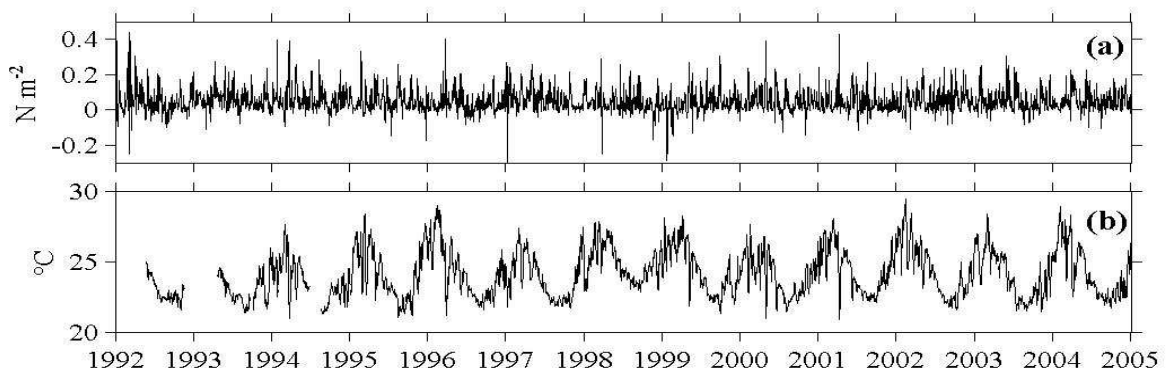


Figure 2.2.6 Séries temporelles de (a) vent le long de la côte (satellite ERS) et (b) température à 10 m de profondeur. Station côtière proche à la passe de Uitoé.

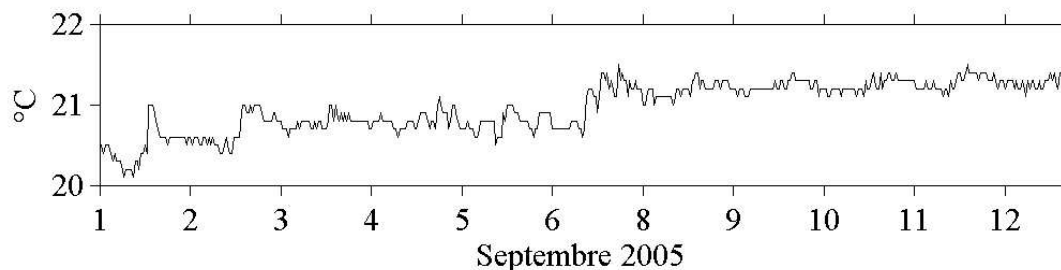


Figure 2.2.7 Extrait de la série temporelle de température en surface proche de la passe de Boulari transmise en temps réel au centre IRD. On observe une augmentation graduelle de la température durant octobre.

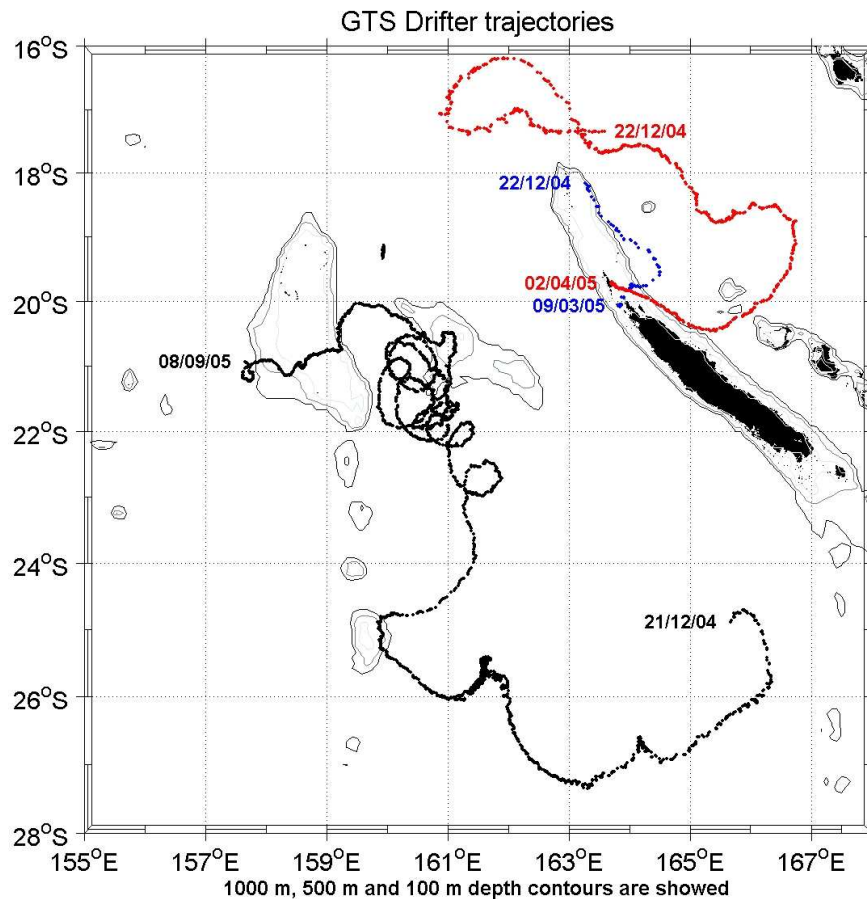


Figure 2.2.7 Trajectoire des bouées dérivantes avec transmission en temps réel lâchées en décembre 2004

Des bouées dérivantes ont été lâchées en décembre 2004 (Fig. 2.2.7). Les trajectoires suivies par ces flotteurs indiquent une activité tourbillonnaire importante à l'ouest de la côte ouest (en noir) et des schémas de courants très distincts. Au nord du territoire le flotteur représenté en rouge s'est d'abord dirigé vers l'ouest, puis il a fait demi-tour pour se diriger finalement vers le sud, échouant sur le récif trois mois après sa mise à l'eau. La bouée représentée en bleu s'est dirigée vers le sud le long de la barrière, s'échouant 2 mois après son largage au nord des îles Belep.

Ces trois types de données in situ constituent une première base d'analyse, et montrent aussi les limitations et les nécessités en données nouvelles. Un élément manquant est la description temporelle des variations des propriétés le long de la colonne d'eau. Cette description peut être obtenue par une ligne de mouillage placée au sud ouest du grand récif. Une tentative de mouillage a échoué en 2004 suite à des défaillances simultanées des éléments de flottabilité, et une nouvelle ligne de mouillage devrait être opérationnelle en 2006 (demande MOM). La description biogéochimique a également été très limitée, en décembre 2004, par les mauvaises conditions météorologiques et des défaillances techniques du NO ALIS. Une campagne spécifique est prévue en décembre 2005 ; une autre en avril 2006.

2.3 Etude satellite

2.3.1 Acquisition, développement et traitement des données satellite

Quatre types de données satellite sont utilisées pour observer les variations en surface associées à la circulation dans la ZEE : infrarouge (température), couleur de l'eau (concentration de chlorophylle-a), altimétrie (niveau de la mer et courants océaniques) et diffusiomètre (vents). Le laboratoire de l'unité ESPACE de l'IRD reçoit les données infrarouges thermique le long des traces du satellite NOAA et les données de radiance du satellite SeaWiFS de laquelle est déduite la concentration en chlorophylle-a. Ces données journalières à une résolution spatiale de l'ordre du km² nous permettent d'analyser un processus à méso échelle comme l'upwelling côtier. Nous avons dû développer un protocole d'acquisition et de traitement spécifique pour ces images satellites. Les distributions de chlorophylle et de température sont analysées en relation avec l'apport de sels nutritifs et la dynamique près des côtes afin d'évaluer les changements rapides dans l'activité biologique. Les données de vent en surface ERS/QuickScat et de hauteur de la mer sont disponibles sur Internet.

Plateforme IRD de traitement satellite pour l'étude de la ZEE

La station d'acquisition d'image satellitaire à « large champ » du type NOAA ou SeaWiFS installée à l'IRD de Nouvelle-Calédonie fait partie d'un réseau de 5 stations situées en Guyane française, aux Canaries, à l'Ile de La Réunion, en Nouvelle-Calédonie et enfin à Tahiti. Une station d'acquisition couvre une zone d'environ 30° de latitude sur 30° de longitude. Ainsi la « ceinture » de stations du réseau SEAS (Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite) couvre 75 % de la zone intertropicale.

En Nouvelle-Calédonie, la chaîne de traitement des images mise en place autorise l'obtention de synthèse journalière et hebdomadaire pour la température de surface de la mer (SST) et la Chlorophylle-a. La chaîne de traitement des SST a été élaborée entièrement par l'US ESPACE tandis que le calcul de la concentration chlorophyllienne repose en partie sur l'utilisation du logiciel SeaDAS développé par la NASA.

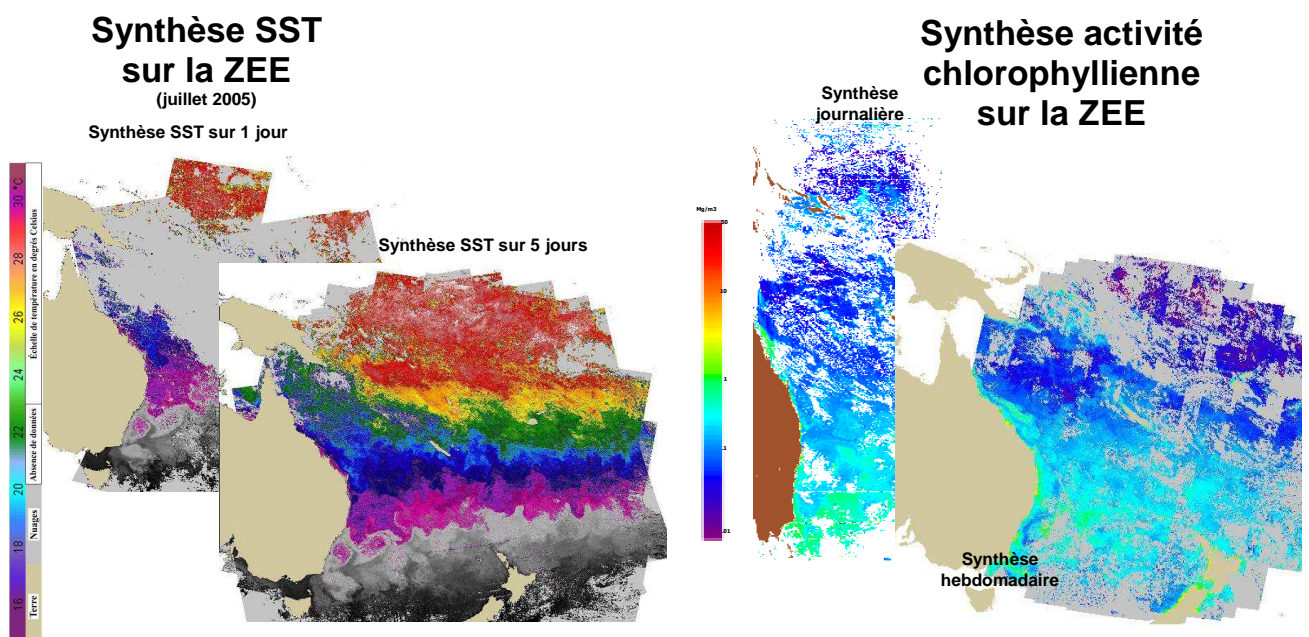


Figure 2.312 Images grande échelle de SST et chlorophylle-a issus de l'antenne d'acquisition

Pourquoi s'intéresser à la chlorophylle ?

La concentration de la chlorophylle, est liée à la productivité primaire, c'est-à-dire la quantité de carbone intégrée par le phytoplancton sous forme de matière organique lors de la photosynthèse. La présence de zooplancton, à la base de toute chaîne alimentaire marine, est conditionnée par le phytoplancton. Des changements dans la répartition du zooplancton peuvent avoir un impact très important sur l'écosystème marin et également les zones de pêche.

Pourquoi s'intéresser à la température de l'eau ?

Une différence de 3 degrés a une influence très importante sur le développement du phytoplancton. La localisation des fronts ou la simple observation des cartes de température de la surface de l'eau permet aussi une localisation des zones potentielles de concentration de poisson, (application décrite ci-dessous).

2.3.2 Résultats satellite

Un effort important a été dévoué à l'acquisition, au traitement et à l'analyse satellite de la ZEE de Nouvelle-Calédonie. Pour synthétiser ce travail nous avons élaboré un atlas climatologique satellite de la ZEE, présenté en annexe. Cet atlas présente les moyennes mensuelles des courants et des vents en surface, des anomalies du niveau de la mer et de la température en surface calculées à partir d'observation satellitaire. Nous avons ainsi la description de la variabilité saisonnière en surface des vents, des températures de surface et des courants de surface dans la ZEE de Nouvelle-Calédonie :

Courant en surface

(1) ***de juin à octobre***. Au Nord, l'intensité des courants qui coulent vers le Sud-ouest est beaucoup plus forte. Au centre des courants faibles coulent vers le Sud. Au Sud-Ouest de la ZEE les flux s'intensifient et se dirigent vers l'Ouest tandis qu'au Sud-Est de la zone économique ils coulent vers l'Est. La circulation dans le ZEE est fortement dominée par l'entrée par le Nord provenant du SEC. Novembre et décembre semblent être une période de transition.

(2) ***de janvier à mai***. En moyenne les courants sont plus faibles durant cette période de l'année. L'intensité des flux se distribue avec plus d'homogénéité, on observe des amplitudes similaires du Nord au Sud. Les courants se dirigent principalement vers le Sud-Ouest au Nord de la ZEE, vers le Sud au centre et vers le Sud-Est au Sud. A la différence de ce que l'on observe entre juin et octobre, l'influence du STCC sur la circulation dans la ZEE s'intensifie et s'équilibre avec la modulation du SEC entre janvier et mai.

Vents de surface

(1) ***de juin à octobre***. Suite au déplacement saisonnier de la Zone de Convergence du Pacifique Sud, les vents augmentent leur intensité vers le Nord. Les mois de novembre et de décembre correspondent à une période de transition où l'intensité des vents est spatialement homogène.

(2) ***de janvier à mai***. La distribution de l'intensité du vent est inversée par rapport à la saison fraîche. Les vents les plus forts se situent préférentiellement au Sud de la ZEE.

Anomalies du niveau de la mer

- (1) ***de mai à octobre***. Les SSH négatives dominent la distribution moyenne dans la ZEE. Ceci est probablement associé à la compression des couches de surface due au refroidissement des eaux de la ZEE durant cette saison.
- (2) ***de novembre à avril***. Les SSH positives dominent la distribution moyenne dans la ZEE. En relation principalement avec le réchauffement d'origine équatorial dans la région.

Température en surface de la mer

- (1) ***de mai à novembre***. Des eaux relativement froides pénètrent du Sud et couvrent la majorité de la ZEE. La période la plus froide est le mois d'août où l'on observe des températures inférieures à 22°C au large de la Nouvelle-Calédonie.
- (2) ***de décembre à mars***. Des eaux chaudes entre 25°C et 30°C couvrent la majorité de la ZEE. Le mois le plus chaud est le mois de février.

2.4 L'upwelling de Nouvelle-Calédonie

Un upwelling correspond à une remontée d'eau profonde le long de la pente externe ouest causée par le vent Alizé, générant des phases régulières de refroidissement de la température de l'eau en surface, accompagnées d'un apport en sels nutritifs et d'une croissance de la production primaire. Ce phénomène est observé le long de la côte ouest pendant les mois de novembre à avril (Hénin et Cresswell, 2005).

Les données de capteurs fixes de température (SST) et salinité (SSS); les vents et pressions des stations météorologiques ; les données satellites de vent (ERS), de températures et Chlorophylle-a (MODIS SST et Chlorophylle-a, SeaWiFS et AVHRR en fonction des résolutions et disponibilités), AVHRR (SST) et SeaWiFS (chlorophylle-a) ; les produits de température, vent et flux air-mer du centre opérationnel NCEP, la climatologie océanique CARS et la campagne océanographique SECALIS-2 ont été analysées simultanément pour décrire l'upwelling.

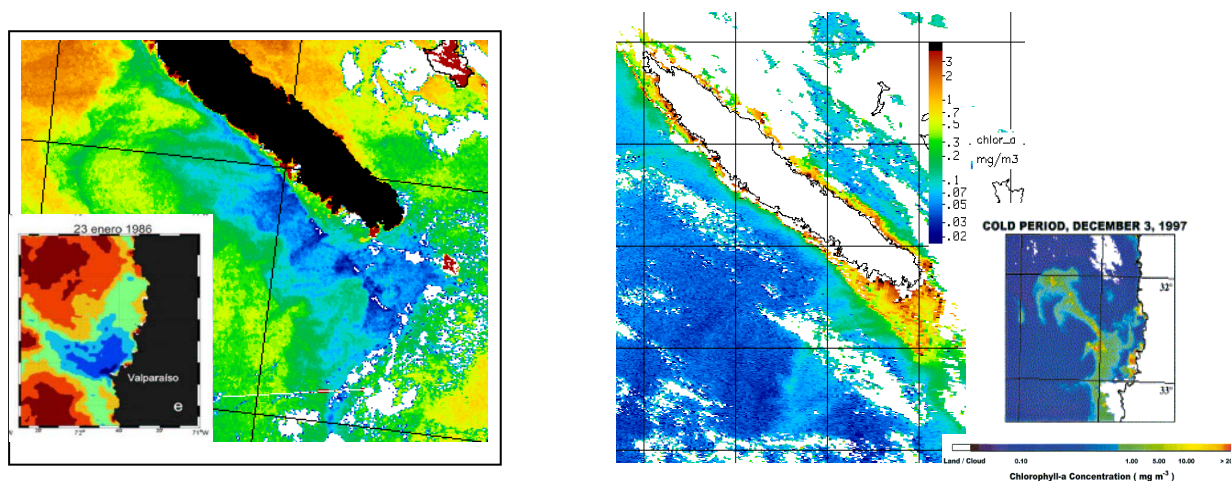


Figure 2.4.1 Comparaison de la dimension des plumes d'eau froides émergentes (gauche) et de la réponse de la chlorophylle-a (droite) des systèmes d'upwelling chilien et néo-calédonien. Les deux régions sont à la même échelle.

Cette analyse (Alory et al., 2005, en annexe) a permis de comprendre comment les refroidissements, qui sont observés entre octobre et mars seulement, sont liés à l'approfondissement saisonnier des isothermes en conjugaison avec le cycle saisonnier des vents alizés. Les plumes d'eau froide que l'on observe le long de la côte sud-ouest sont de tailles similaires, parfois plus grandes, que celles des centres d'upwelling en Orégon, au Chili ou au Pérou (Fig. 2.4.1). D'un point de vue physique, l'upwelling néo-calédonien est aussi intense que celui du Chili-Pérou. Dans les deux régions, la concentration de chlorophylle-a est augmentée d'un facteur de dix. Cependant, la concentration moyenne est bien inférieure autour de la Nouvelle-Calédonie et l'activité biologique liée à l'upwelling néo-calédonien est dix fois inférieure à celle du Pérou ou au Chili.

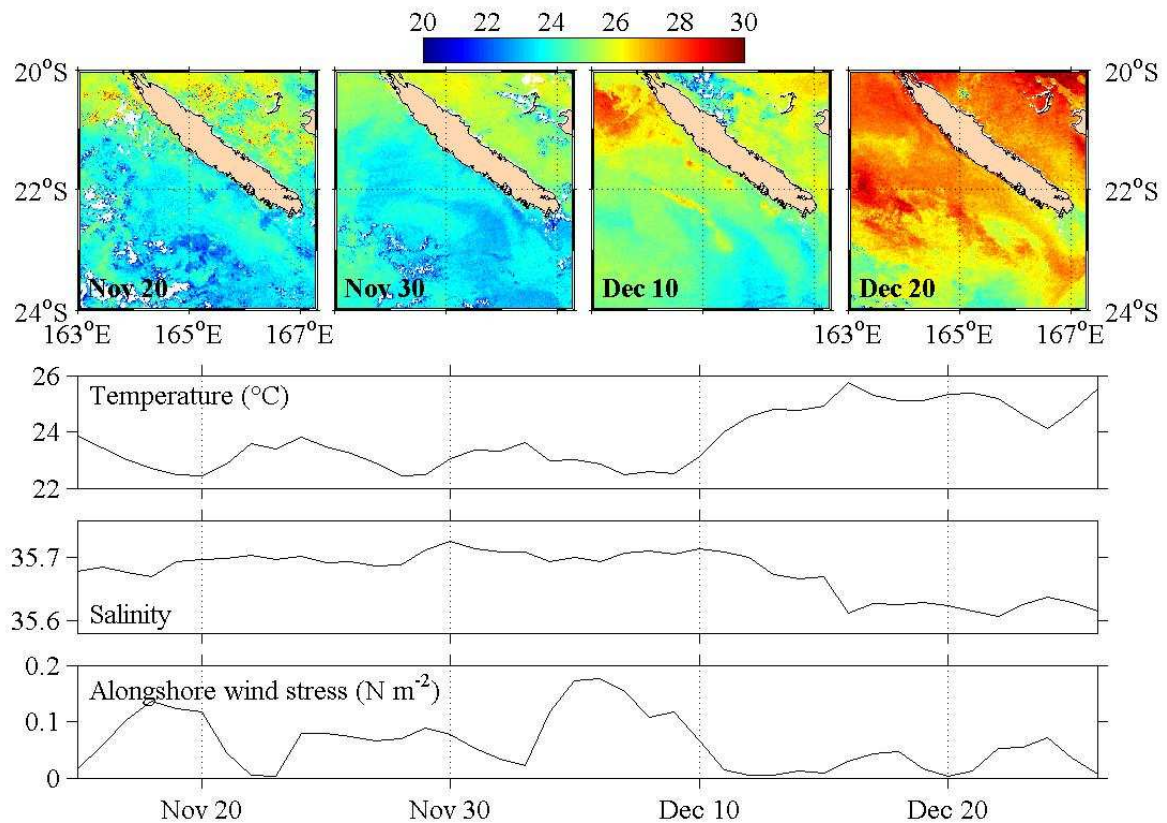


Figure 2.4.2 Evolution de l'upwelling en Nouvelle-Calédonie durant 40 jours en nov-déc 2004. De haut en bas: Cartes SST AVHRR à 10 jours d'intervalle; SST et SSS de la station côtière Uitoé; Vent NCEP le long de la côte (valeurs positives indiquent vent vers le nord-est (Alory et al. 2005)).

Une situation typique d'upwelling est présentée sur la figure 2.4.2. Les images SST des jours 20 et 30 novembre montrent l'émergence d'une bande d'eau profonde le long de la barrière sud-ouest, 3 à 4 °C plus froide et plus saline que l'eau aux alentours. La fine bande d'eau froide est transportée vers le large par action du vent parallèle à la côte. L'intensité du vent chute peu avant le 10 décembre et les conditions d'upwelling disparaissent. La SST tend à se réchauffer dans toute la ZEE et le long de la côte ouest la température augmente de plus de 6 °C en moins de 20 jours. Le vent régional influence non seulement la réponse rapide de la température et de la dynamique proche des côtes, mais aussi celle présente dans toute la ZEE.

Afin de connaître l'importance des différentes sources de forçage lors d'événements d'upwelling, nous avons développé un modèle euristique qui reproduit les variations de température et qui prend en compte la profondeur de la couche de mélange, le vent, les flux de chaleur et la température initiale observée (Alory et al., 2005). La figure 2.4.3 montre une comparaison entre les résultats du modèle et les observations. Les résultats indiquent que l'occurrence d'événements d'upwelling est fortement liée à la profondeur saisonnière de la couche de mélange et que l'indice d'upwelling en Nouvelle-Calédonie peut être bien reproduit et prédit avec les outils adéquats.

L'upwelling peut avoir un effet très important sur l'écosystème, mais aussi sur le climat régional et sur la distribution des propriétés de la colonne d'eau. La circulation océanique côtière et en particulier cet upwelling jouent un rôle déterminant dans la gestion des ressources marines, l'évaluation de l'impact de la pollution, la détermination de l'échange d'eau entre le lagon et le large, l'estimation de la trajectoire des cyclones et la connaissance du climat régional.

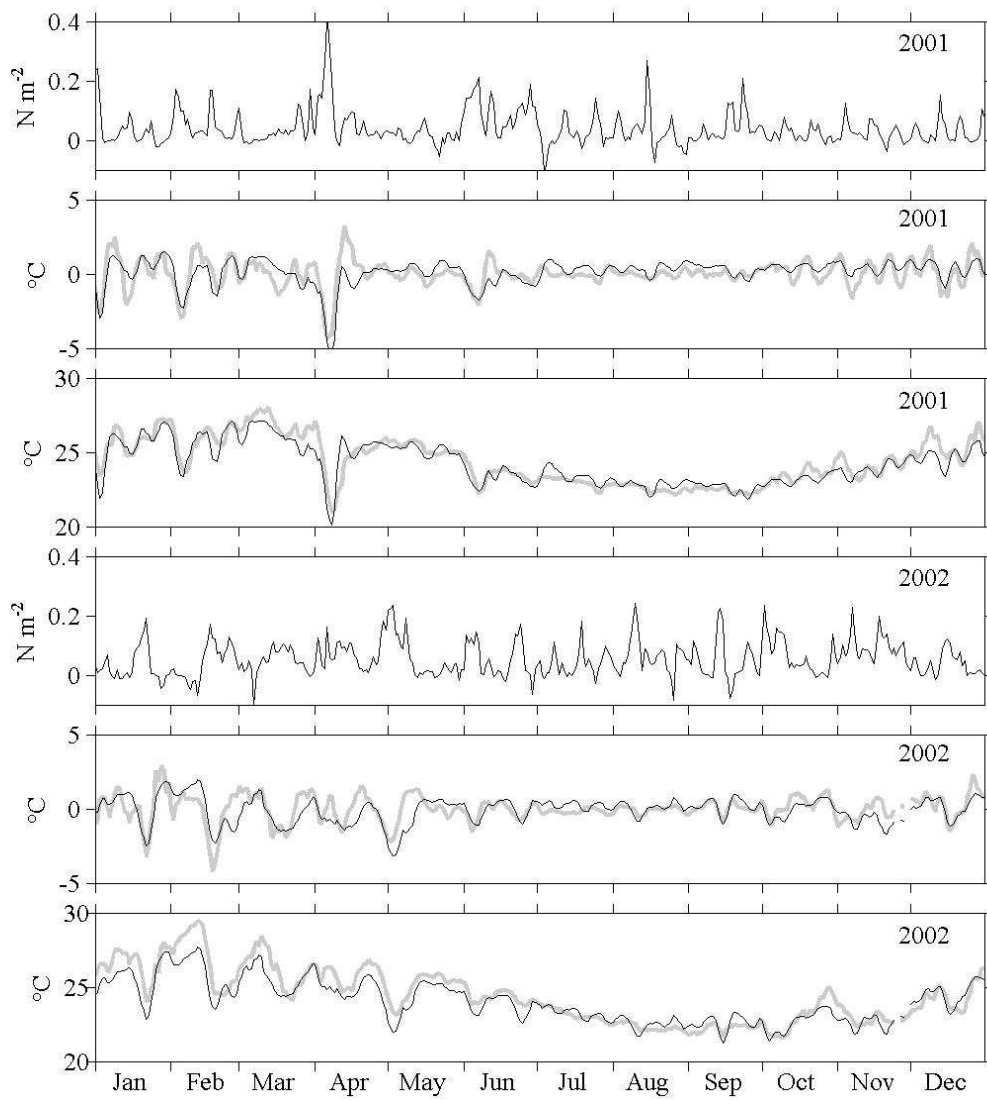


Figure 2.4.3 Vent parallèle à la côte (Nm^3), anomalies de température observées (entre -5 et 5 °C ; trait foncée) et prédites à partir des prévisions de vent (trait clair) et température observée (entre 20 et 30 °C ; trait foncée) et prédite (trait clair) durant 2001 et 2002.

3. ETUDE NUMERIQUE

Les observations montrant une dynamique complexe avec des temps de réaction très rapides, un modèle d'océan numérique a été mis en place pour mieux décrire la circulation océanique.

3.1 *Développement de la plateforme numérique*

3.1.2 *Moyens de calculs*

Pour satisfaire les besoins croissants en modélisation océanique et atmosphérique, l'IRD s'est doté d'un nouvel outil d'analyse de l'état océanique au moyen d'une plateforme numérique basée sur le modèle de circulation Régional Ocean Modeling System (ROMS). Le code effectue la résolution des équations de Navier Stokes en portant les équations primitives sur un maillage tridimensionnel orthogonal et curviligne sur la sphère. Le système permet de calculer les courants, la température, la salinité et la hauteur de mer en trois dimensions (http://www.brest.ird.fr/Roms_tools/). Au sein de l'IRD, Patrick Marchesiello et Pierrick Penven (UR097, IRD Brest), apportent leur contribution à l'évolution du code.

Sur proposition des UR 65 et 103, le centre de Nouméa, avec le soutien de sa Direction des Systèmes Informatiques, l'IRD s'est doté d'une architecture de calcul scientifique dédiée aux modèles de circulation ROMS (extérieur du lagon), MARS3D (intérieur du lagon) et WRF (atmosphère). Le cluster constitué de 10 processeurs Opterons a été assemblé en début de l'année 2005 (www.ird.nc/UR65/ROMS). Ce nouvel équipement marque la première phase d'implémentation du modèle ROMS pour son utilisation sur le domaine maritime de la Nouvelle-Calédonie.

Le modèle est parallélisé et contient des fonctions de zoom et de raffinement de maillage (logiciel AGRIF, INRIA). Les fonctions de zooms permettent de concevoir des grilles imbriquées et d'augmenter la résolution sur les régions côtières, ce qui permet de limiter le coût de calcul. Ces innovations permettent d'aboutir à des solutions de la circulation océanique sur de grands domaines sur le cluster de calcul de l'IRD.

3.1.4 *Estimation et prévision de l'état océanique*

Le système opérationnel a pour objectif la prévision de la circulation océanique dans la ZEE ainsi que de l'upwelling. Le système développé au centre de Nouméa repose sur le modèle régional ROMS, tandis que les solutions globales proviennent du projet national Mercator (www.mercator-ocean.fr). Le système Mercator intègre dans ses prévisions les données d'observation en temps réels, *in-situ* et satellites. La stratégie repose sur l'emploi du modèle régional ROMS contraint aux limites de la grille Mercator. Ainsi, le modèle régional bénéficie de cette assimilation des données et opère un transfert des informations des grandes échelles vers l'échelle de la ZEE.

3.1.5 *ZEE_RUN2 : Modèle ROMS 1/6° imbriqué dans les champs de prototype Système MiniPOG.*

Les essais sur le prototype sont réalisés en situation de réanalyse (il n'y a pas de prévision, mais une estimation 3-D de l'état océanique passé suivant le même principe) pour la période 1993-2005. Une solution couvrant la région du Pacifique Sud-Ouest a été obtenue à partir des champs du prototype système Français MiniPOG (une résolution globale de 2° basée

sur le modèle français ORCA). Ces résultats sont présentés sur le site ‘‘Circulation régionale autour de la Nouvelle-Calédonie’’ (www.ird.nc/UR65/ROMS). Le tableau 1 présente les principales caractéristiques et dimensions du modèle. Pour les fins de validation, le modèle ZEE_RUN2 couvre largement la ZEE de Nouvelle-Calédonie et s’étend depuis la côte orientale d’Australie jusque Fidji. Il s’étend depuis le Sud des îles Salomon jusqu’au front séparant la Mer de Corail avec la Mer de Tasman. Cette extension du domaine permet de bien représenter les ondes et écoulements se propageant d’Est en Ouest et leur déformation avec le relief sous-marin (ondes de Rossby, courant jet) et de capturer le courant Est Australien, dont les branches de recirculation vers l’Est sont susceptibles d’induire de la variabilité dans la partie sud de la ZEE (Ridgway et Dunn, 2003).

Dans notre prototype, le modèle est initialisé et contraint latéralement avec les solutions du modèle global Mercator « MiniPOG 2° » (température, salinité et courants). Les flux de chaleur, de masse (Evaporation minus Précipitation) et tensions de vent de surface proviennent du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (ECMWF). Sur la figure 3.1, le gain de résolution apporté par le modèle régional ROMS comparé au produit MiniPOG apparaît à travers la manifestation de structures turbulentes de mélange sur la zone de front et une meilleure représentation du courant Est Australien. On signalera également que dans le produit MiniPog, à 2° de résolution, les obstacles topographiques tels la Nouvelle-Calédonie ne sont pas représentés.

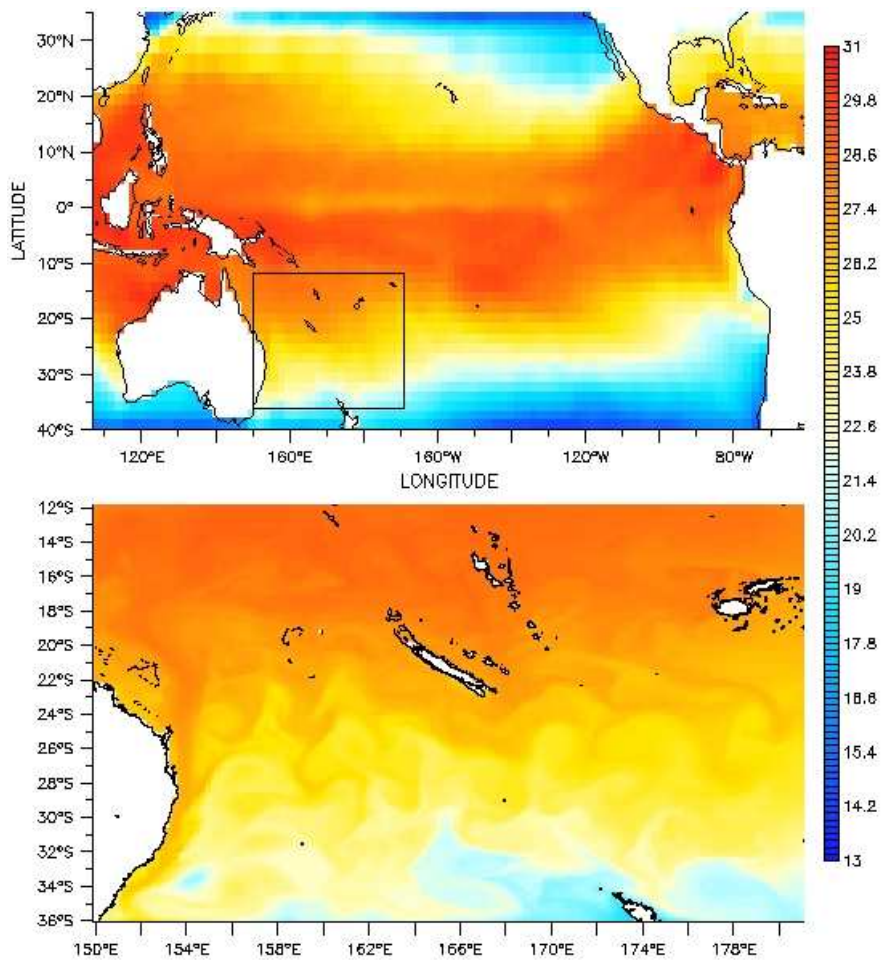


Figure 3.1.1 Situation océanique du 1-Mai-1998. Cette figure montre en haut la solution issue du système opérationnel MERCATOR (MiniPOG, 2°). Le rectangle noir correspond à la région où est effectuée l’imbrication ROMS dans MiniPOG. La figure du bas est la solution obtenue avec le modèle ROMS 1/6° forcé latéralement par MiniPOG.

Nom	Années	Grille	Frontières ouvertes	Vent	Flux de chaleur	Topo et Lissage
ZEE_ RUN2	92 - 05	185x159x35 1/6 °	MiniPog 2°, avec assimilation	ECMWF (CEPMMT) hebdo	ECMWF (CEPMMT) hebdo	Gtopo30 r = 0.2

Tableau 3.1 : Configuration du modèle ZEE_Run2

3.1.6 Structure de la plateforme de prévision océanique régionale

La figure 3.1.1 illustre le système d'imbrication. La figure 3.1.2 présente le schéma conceptuel de la plateforme de prévision régionale. La prévision océanique régionale permettra de décrire l'état de l'océan dans la ZEE, à l'échéance d'une dizaine de jours. Les forçages à la surface de l'océan sont issus des prévisions numériques de modèles atmosphériques (modèle ECMWF). Chaque semaine, les solutions Mercator sont extraites et viennent contraindre aux frontières le modèle ROMS. Les prévisions de l'état océanique (une par jour en partant du jour courant, J0), partent de J0 + 1 à J0 + 14.

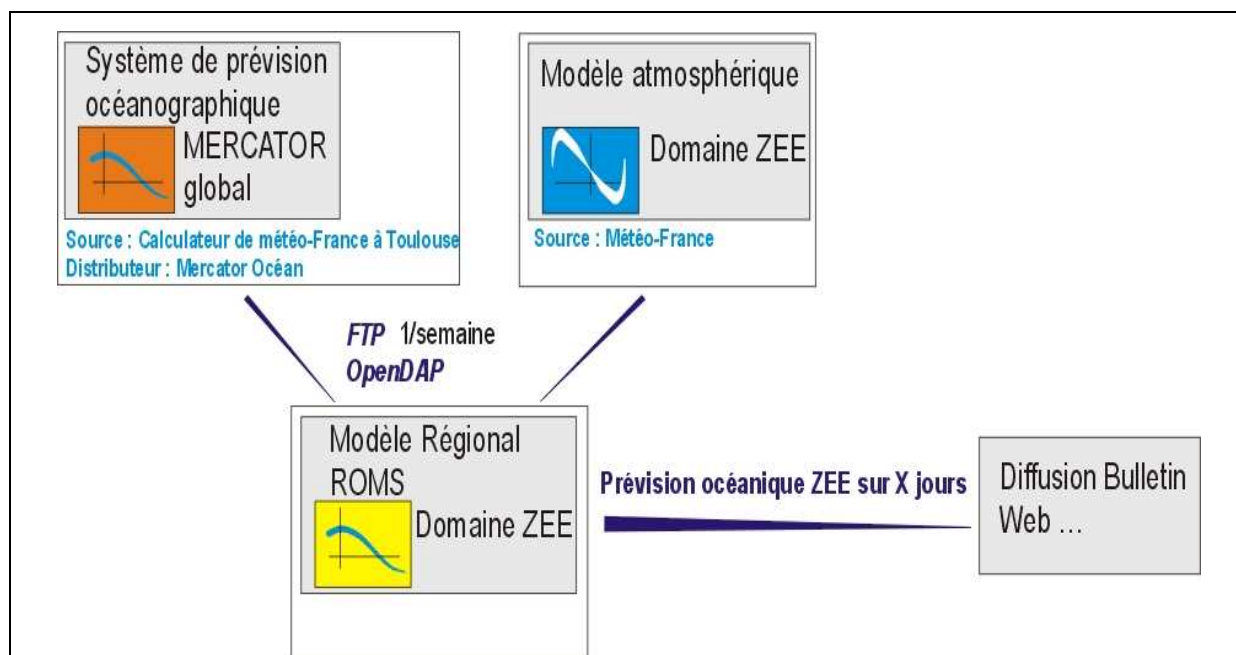


Figure 3.1.2 Schéma conceptuel de la plateforme de prévision océanique régionale fondée sur le modèle ROMS. Chaque semaine les prévisions océaniques et météorologiques sont téléchargées et préparées avant de contraindre le modèle régional aux limites de la grille.

Les flux de surface peuvent être améliorés en utilisant, en lieu du produit ECMWF, un produit régional de plus haute résolution, susceptible de mieux rendre compte des effets orographiques et des effets retroactifs du couple océan-atmosphère à une échelle locale, moyennant l'utilisation d'un modèle numérique atmosphérique régional. Cet outil est inscrit dans les axes de recherche vers l'océanographie côtière opérationnelle menés à l'IRD. Le produit délivré serait de surcroît plus en mesure de répondre aux problématiques côtières qui sont par nature plus sensible aux contraintes atmosphériques locales (cycle diurne, upwelling, mélange des eaux océaniques avec les eaux lagunaires etc...).

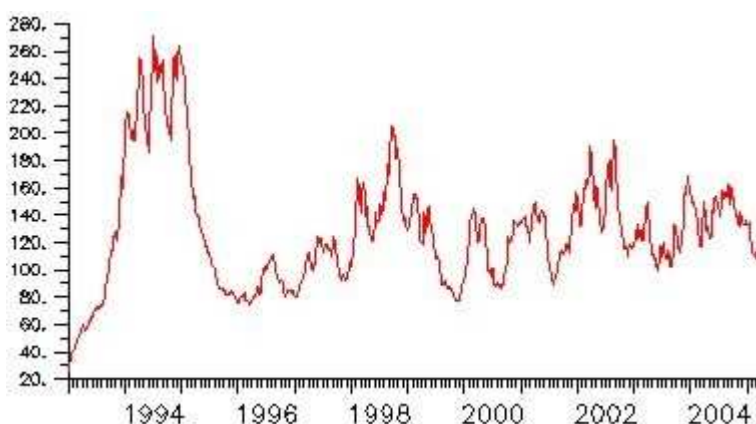
3.2 Validation du modèle ZEE_RUN2

La simulation ZEE_RUN2 reproduit la variabilité saisonnière et interannuelle sur la période 1992-2005. Cette simulation permet :

- d'établir un prototype de système opérationnel en réanalyse ;
- d'identifier les points satisfaisants et les insuffisances de la solution. Dans ce cadre, des comparaisons sont effectuées entre les solutions du modèle et les observations satellites (anomalies de hauteur de l'océan), les profils d'observations *in situ* (profils de température 0-800m XBT) et la climatologie haute résolution CARS2000 issue du CSIRO (Hobart) ;
- de servir de solution grande échelle pour initier des études de processus sur des sous domaines à plus haute résolution (zone d'upwelling).

La figure 3.2.1 montre l'évolution de l'énergie cinétique globale du domaine d'étude, ce qui indique la stabilité du modèle. Après une phase d'équilibrage jusqu'en 1996, le modèle est stable sur ses 8 dernières années.

Figure 3.2.1 Energie cinétique intégrée sur l'ensemble du domaine d'étude. Un cycle annuel répétitif apparaît à partir du début de l'année 1997.



La résolution des champs CARS ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) permet de rendre compte les principales structures thermohalines dans la région. Ci-dessous, figures 3.2.2 à 3.2.4, une comparaison est effectuée entre la moyenne modèle sur la période 1997-2005 et la climatologie CARS pour les trois niveaux 10, 100 et 1000 m.

A 10 m, ou en surface

En surface, la distribution de température du modèle s'accorde relativement bien avec la climatologie (Figure 3.2.2). Le bord Sud de la Warm Pool ($>28^\circ\text{C}$) est présent dans le modèle avec une extension jusqu'à la hauteur du Vanuatu. Par contre, plus au Sud, la branche sud de la gyre subtropicale qui est caractérisée par le Front Tasman entre l'Australie et la Nouvelle-Zélande (35°S) est située plus au Sud. Dans le courant Est Australien, les températures chaudes montrent également une advection des masses d'eau issues de la région tropicale plus franche vers le Sud au-delà de 36°S . Les observations révèlent en général cette extension vers le sud mais sous la forme de détachement de tourbillons, formés à la faveur des instabilités qui se développent à mesure que le courant pénètre dans la mer de Tasman. En outre, des branches de recirculation de l'EAC se développent vers l'Est en général entre 30 et 34°S . La principale branche est visible dans la climatologie, le long des isothermes 19 et 20°C .

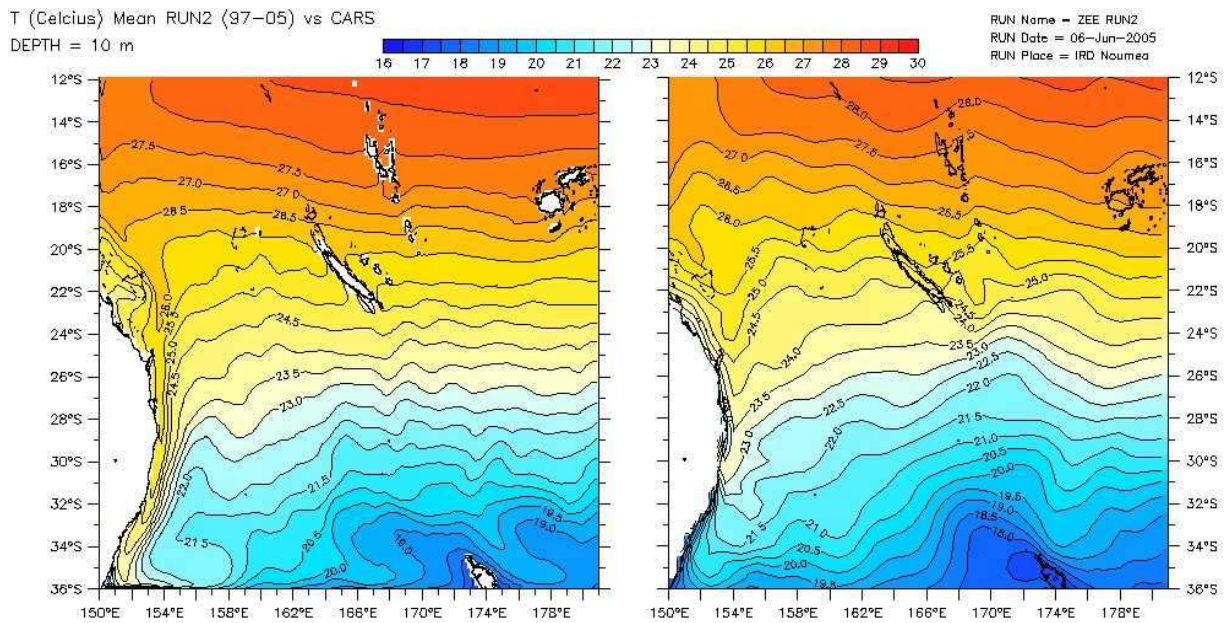


Figure 3.2.2 Comparaison de la température entre moyenne modèle (97-05) et climatologie CARS pour le niveau 10 mètres

A 100 m

Au nord du domaine, les eaux formant la base de la Warm Pool sont plus froides de 2 à 3° dans le modèle comparé avec la climatologie (Fig. 3.2.3). Au Sud du domaine, le front thermique qui marque la séparation entre les eaux chaudes de la Mer de Corail et les eaux plus fraîches de la mer de Tasman est beaucoup plus dilué et/ou déplacé sur la frontière sud du domaine, ce qui suggère là aussi une condition de transfert en limite de grille mal adaptée. On retrouve également une signature de l'EAC qui s'étend plus au Sud. A l'intérieur du domaine, la structure thermique dans son extension Nord-Sud semble cohérente avec la climatologie, notamment pour la région autour de la Nouvelle-Calédonie.

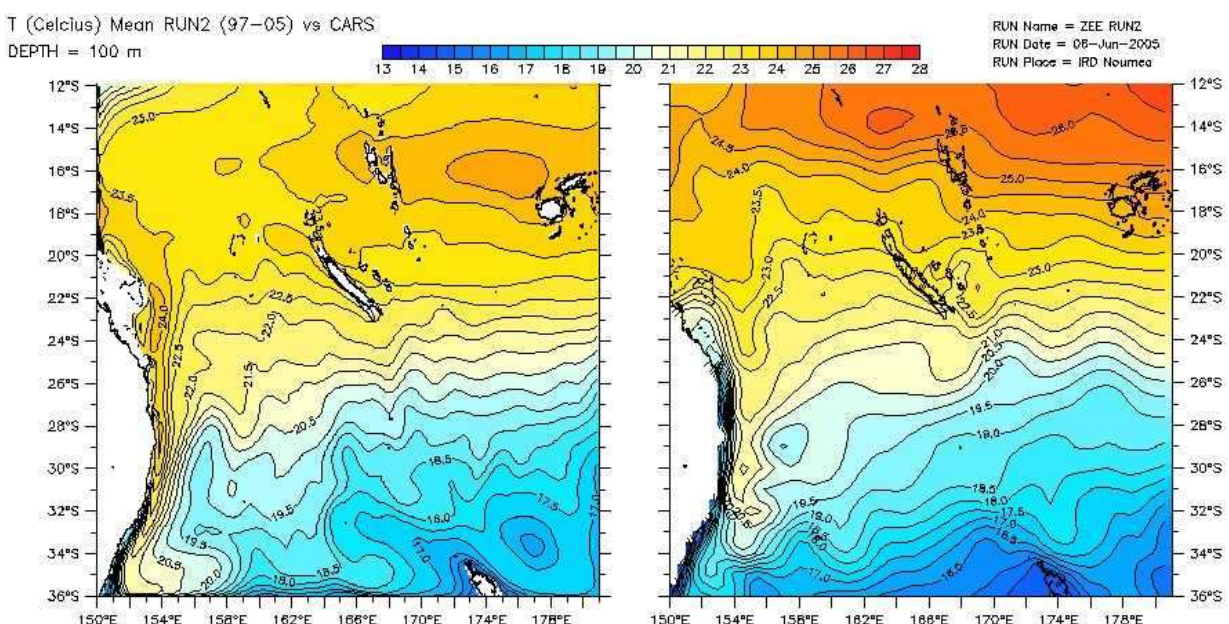


Figure 3.2.3 Comparaison de la température entre moyenne modèle (97-05) et climatologie CARS pour le niveau 100 mètres

A 1000 m

A 1000 mètres, on peut nettement distinguer les effets des conditions de transfert aux frontières, notamment au Sud (Fig. 3.2.4), avec d'une part :

- La formation et une situation de rétention de gros tourbillons anticycloniques, non accompagnés de tourbillons cycloniques comme c'est le cas dans la climatologie
- Une augmentation significative de la température des eaux profondes dans toute la partie Sud du domaine en réponse à l'accumulation de la chaleur contenue dans ces tourbillons qui s'évacuent difficilement vers l'extérieur du domaine.

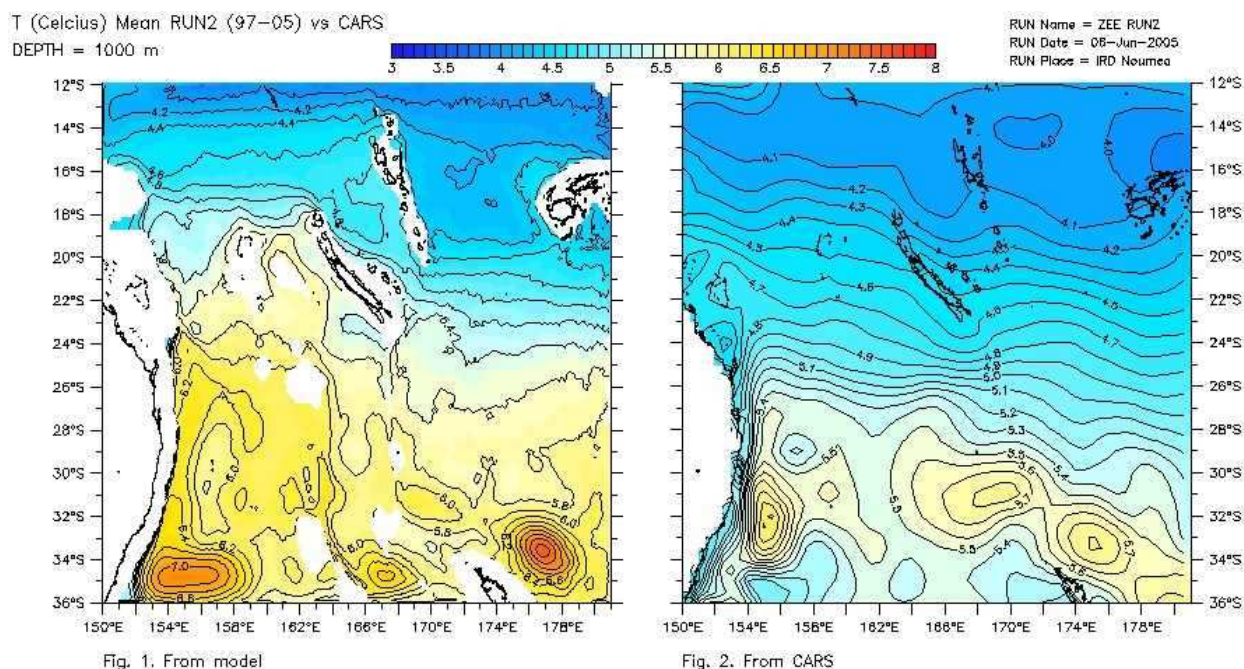


Figure 3.2.4 Comparaison de la température entre moyenne modèle (97-05) et climatologie CARS pour le niveau 1000 mètres

Comparaison des hauteurs dynamiques, niveau 150 m

La figure 3.2.5 effectue la comparaison des champs de hauteurs dynamiques entre la moyenne modèle et la climatologie pour le niveau 150 m avec une profondeur de référence à 2000 m. (La hauteur dynamique est à la surface de l'océan ce que la pression atmosphérique est à la surface de la terre. La hauteur dynamique en un point est le reflet des variations de densité de l'eau de mer le long de toute la colonne d'eau. Elle est exprimée en mètres par rapport à un niveau de référence. Elle s'obtient à partir de l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique : équilibre entre le gradient vertical de pression et le produit gravité x densité. Les courants dits 'géostrophiques' circulent le long des lignes de hauteur dynamique.) La réponse en densité dans la région de la ZEE de Nouvelle-Calédonie reste en accord avec la climatologie. A la frontière Sud, on retrouve les défauts précédemment évoqués.

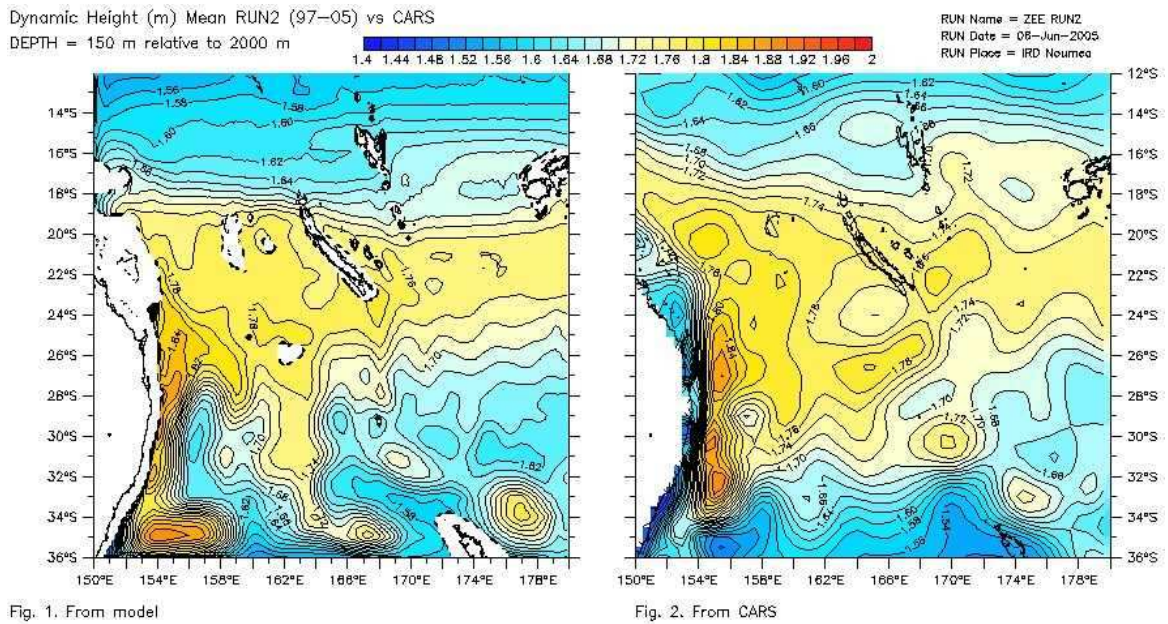


Figure 3.2.5 Comparaison de la hauteur dynamique entre moyenne modèle (97-05) et climatologie CARS pour le niveau 150 mètres

Conclusion

La comparaison entre la simulation ZEE_RUN2 et la climatologie met en évidence les aspects réalistes et moins réalistes de cette simulation. Une grande partie des aspects non-réalistes provient de la grande sensibilité du modèle aux conditions latérales, mise en évidence ici par une réflexion de l'information vers l'intérieur du domaine. Ces conditions latérales sont issues du modèle miniPOG, peu réaliste de par sa faible résolution (2°), mais qui comporte l'intérêt d'être opérationnel (disponibilité pour notre région des prévisions océaniques). La version de ce même modèle au $1/4^\circ$ global (une résolution augmentée d'un facteur de 8) sera disponible sous peu, et rapidement adaptable à notre zone. Néanmoins, pour la zone intérieure au domaine, la simulation offre des solutions similaires à la climatologie, ce qui permet d'initier nos études de processus aux abords de la Nouvelle-Calédonie. De plus, les possibilités d'optimisation du modèle (conditions aux limites, réglages, choix de l'état d'initialisation ...) ont été identifiées, ce qui permettra d'améliorer rapidement le réalisme du modèle lorsque Mercator à 0.25° sera disponible.

3.3 Présentation des résultats de la simulation ZEE Nouvelle-Calédonie

Cette section présente une simulation imbriquée, à plus haute résolution (1/6 de degré), spécifique à la ZEE. La ZEE se situe dans une région frontière influencée tant par la variabilité équatoriale que sub-tropicale. Il en résulte une structure dynamique et thermique complexe, modulée par la branche sud du Courant Equatorial Sud (SEC) et le retour du Courant Est Australien (EAC). D'autres processus caractérisent aussi la région, tels que les ondes océaniques grandes échelles dites « de Rossby », les ondes internes, les veines de courant de subsurface ou encore les événements d'upwelling. Les résultats présentés correspondent à un zoom (méthode d'imbrication) de la simulation grande échelle présentée dans la section précédente.

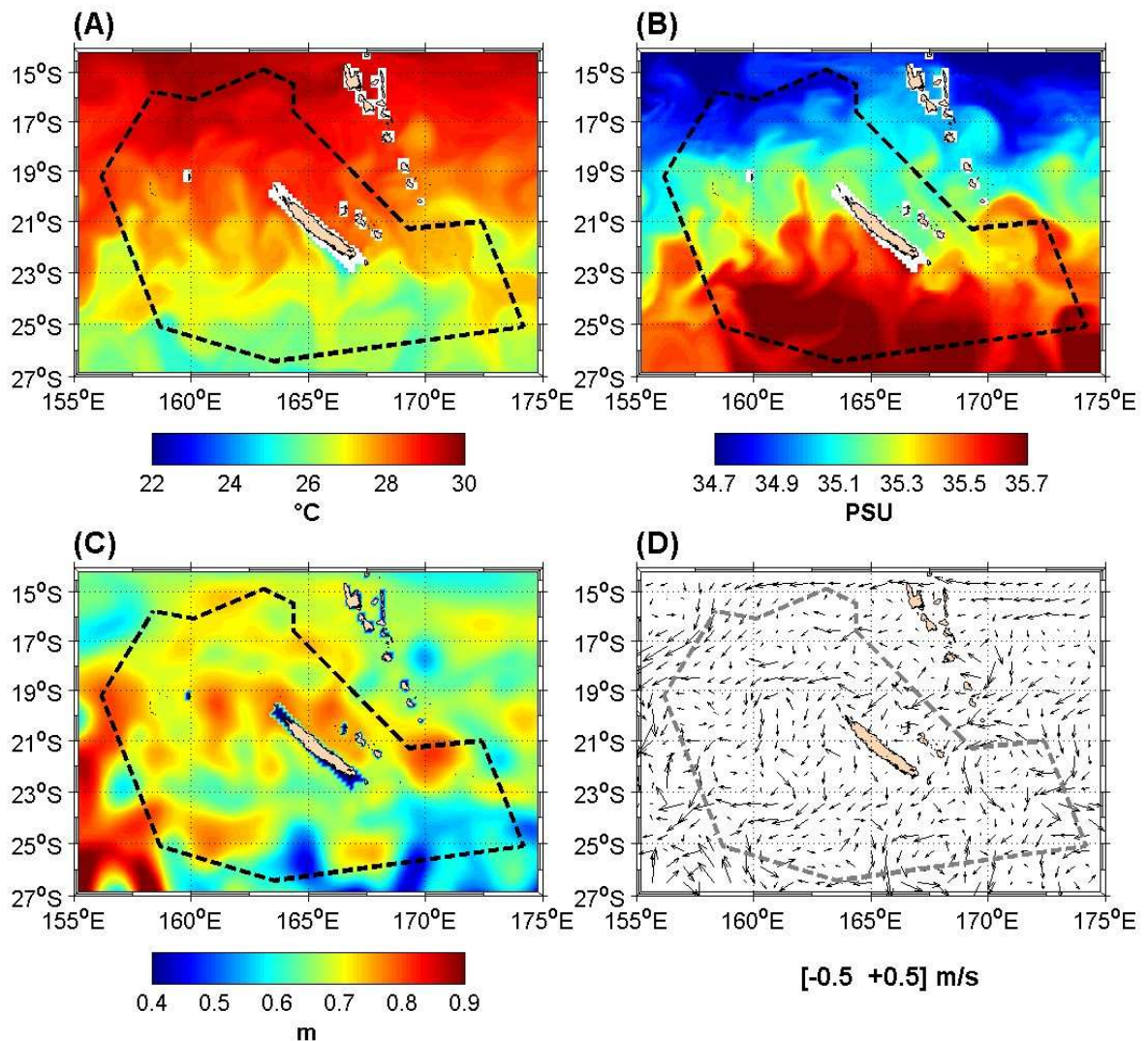


Figure 3.3.1 Sorties numériques du modèle régional ROMS adapté pour la ZEE de Nouvelle-Calédonie. Cartes de (a) température en surface (SST), (b) salinité en surface (SSS), (c) hauteur de la mer et (d) courants en surface correspondants au 15 mars 2005. Le lagon apparaît en bleu sur (c), le masque n'ayant pas été appliqué.

La figure 3.3.1 montre les champs de surface de température (SST), salinité en surface (SSS), niveau de la mer et courants le 15 mars 2005. La distribution de SST (a) présente une région froide au sud du Territoire, associée à la circulation d'origine australe. Un événement d'upwelling semble s'initier le long de la côte ouest. La distribution de SSS montre des eaux les plus salines au sud de la ZEE. Les distributions du niveau de la mer et des courants révèlent une dynamique tourbillonnaire.

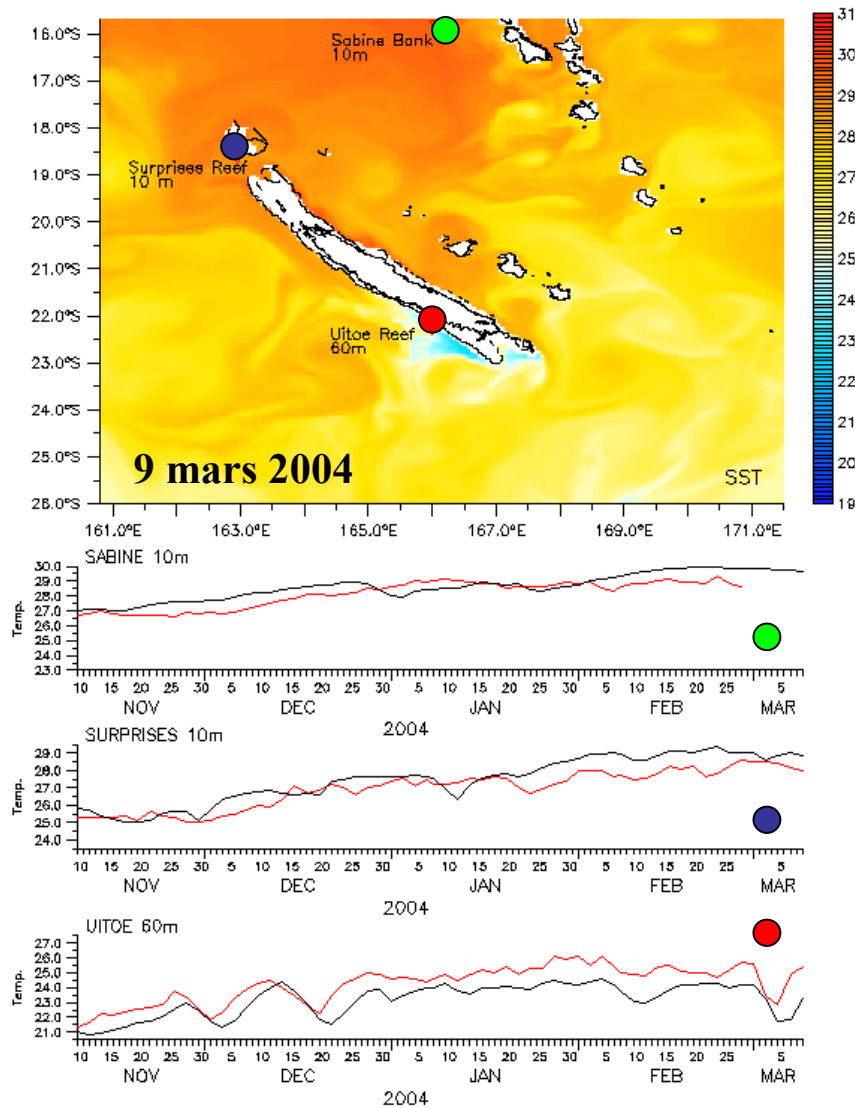


Figure 3.3.2 *Haut : carte de SST ROMS du 15 mars 2004 et localisation des stations de températures (cercles). Bas : Comparaison entre les séries temporelles de température provenant des capteurs (courbes rouge) et celles provenant des stations de Sabine, Surprises et Uitoé (courbes noires).*

Une comparaison entre les sorties du modèle et les séries temporelles provenant de capteurs fixes est présentée sur la figure 3.3.3. Le modèle reproduit très bien les variations de température observées. Les trois événements d'upwelling qui s'observent sur la série d'Uitoé (3 novembre, 22 décembre et 5 mars) sont fidèlement simulés par le modèle. Ce résultat est très encourageant car on s'attend à une plus grande différence entre les observations et le modèle. En effet, les capteurs sont situés sur le récif, tandis que la série du modèle correspond à une extraction sur un point de grille assez éloigné de la barrière. De plus cette version de ROMS est une version préliminaire destinée en partie à tester les différentes sources de forçage, une version plus poussée, de plus haute résolution spatiale et temporelle, est en train de se mettre en place actuellement.

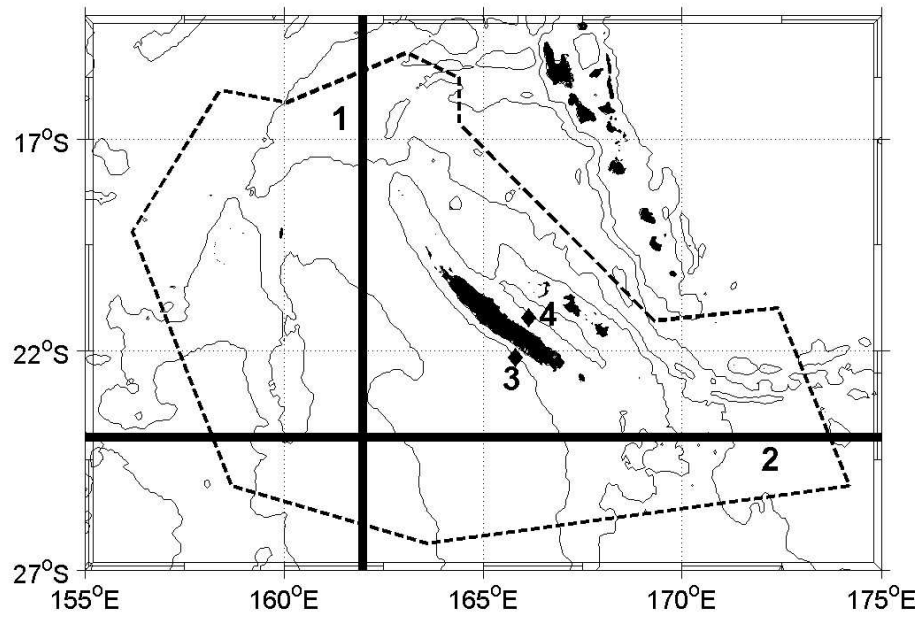


Fig. 3.3.3 Carte de la ZEE représentant les sections et les stations utilisées pour les figures 3.3.4 à 3.3.9. Les lignes 1 et 2 correspondent à des sections « Hovmuller » (latitude-temps et longitude-temps). Les stations 3 et 4 ont été utilisées pour montrer des « sections » profondeur-temps.

Des diagrammes de type « Hovmuller » sont réalisés pour analyser la variation spatio temporelle d'un paramètre dans le sens est-ouest ou nord-sud

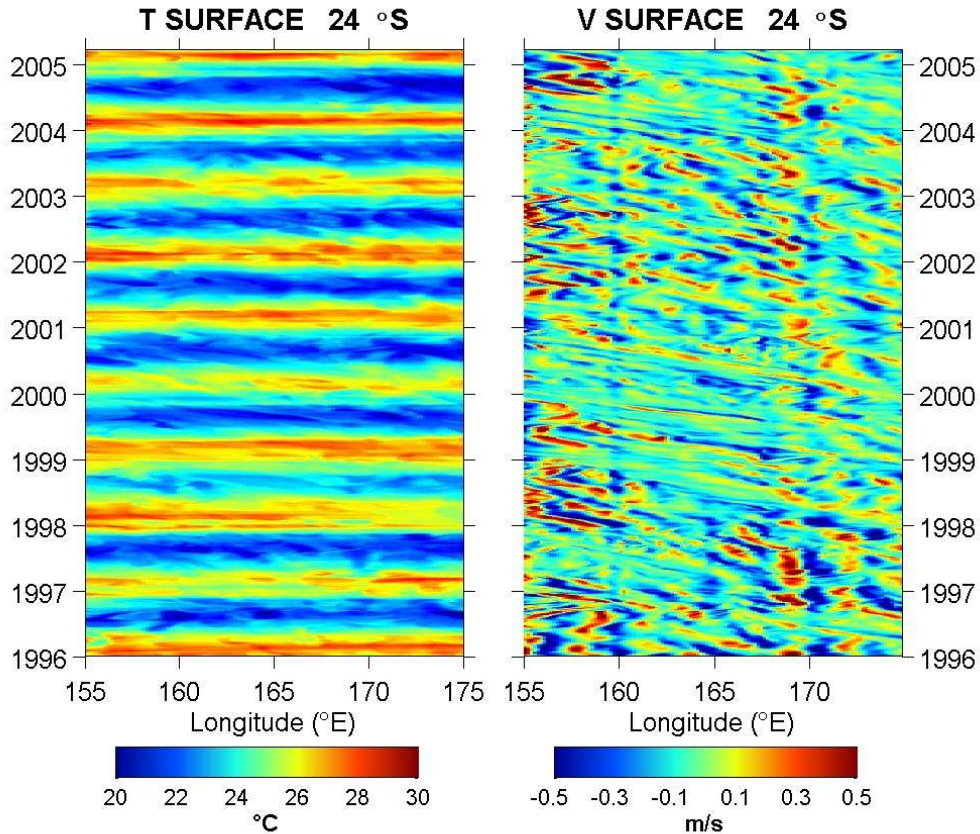


Figure 3.3.4 Sections longitude-temps (ligne 2 sur la fig. 3.3.3) de la SST et du courant méridien issus de la simulation ROMS.

La SST le long de la latitude 24 °S (La figure 3.3.4) présente un cycle saisonnier marqué et une homogénéité longitudinale. Le cycle saisonnier est moins clair pour le courant méridien mais sa distribution longitudinale est plus irrégulière. A 100 m de profondeur (Fig. 3.3.5) la température présente une distribution hétérogène, elle est plus froide dans la zone est de la ZEE. Le cycle saisonnier apparaît mais affaibli et l'influence interannuelle dû à ENSO durant 1998-1999 est plus nette. Le courant méridien à 100 m montre des caractéristiques similaires à celles observées en surface mais avec des intensités inférieures.

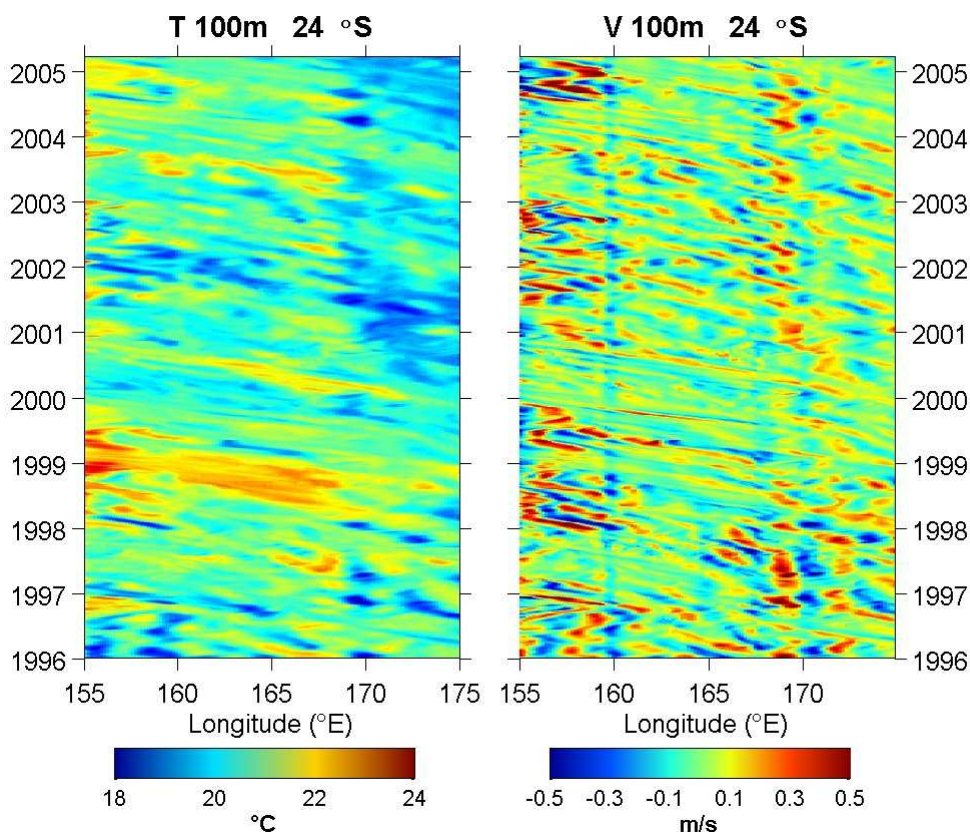


Figure 3.3.5 Sections longitude-temps (ligne 2 sur la fig. 3.3.2) de la température et du courant méridien (composante nord-sud) à 100 m de profondeur issus de la simulation ROMS.

Le diagramme Hovmuller à 162°E (Fig.3.3.6) montre que le cycle saisonnier prédomine sur les autres signaux SST et qui s'affaiblit sur le nord de la ZEE, plus chaud. Le courant zonal (nord-sud) en surface est plus énergétique au sud des 20°S. La température montre aussi plus d'énergie au sud. La variation saisonnière de la température semble disparaître à 100 m (Fig. 3.3.7). Les températures les plus fortes se localisent au centre de la ZEE, autour des 20 °S de latitude. Le courant zonal montre une intensification autour des 15 °S. Cette augmentation de la vitesse vers l'ouest, qui s'observe aussi en surface, est probablement liée au jet présent au nord de la Nouvelle-Calédonie. L'inclinaison du courant zonal (l'angle observé par rapport à l'horizontale) qui apparaît sur le diagramme indique la propagation est-ouest dans la région d'ondes planétaires très énergétiques, les ondes de Rossby qui ont des vitesses de phases de l'ordre de 7 cm s⁻¹.

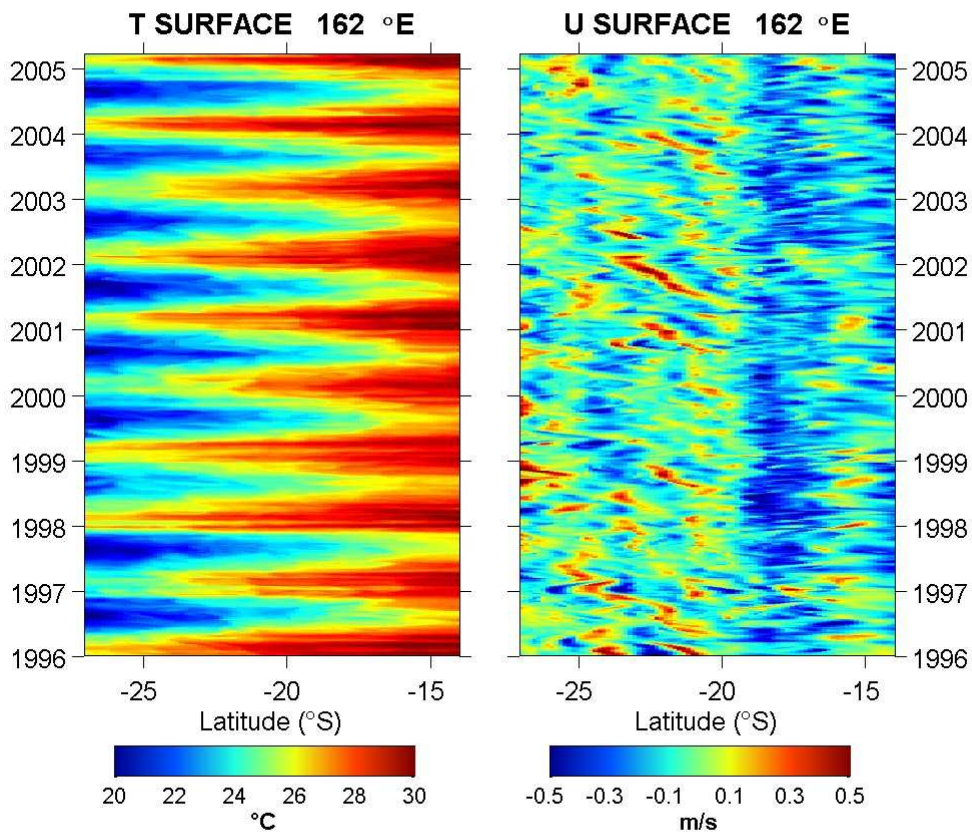


Figure 3.3.6 Sections latitude-temps (ligne 1 sur la fig. 3.3.2) de la SST et du courant zonal en surface (composante est-ouest) issus de la simulation ROMS.

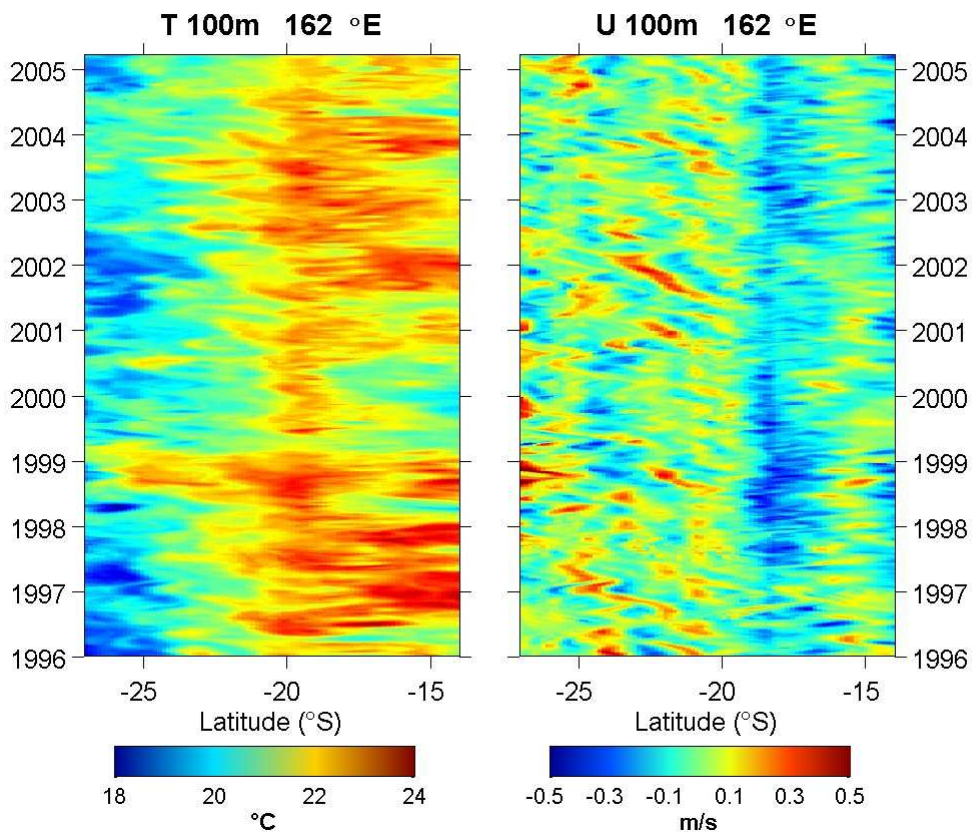


Figure 3.3.7 Sections latitude-temps (ligne 1 sur la fig. 3.3.2) de la température et du courant zonal (composante est-ouest) à 100 m de profondeur issus de la simulation ROMS.

La température et le courant simulés au niveau des stations 3 et 4 de la figure 3.3.3 montrent que le cycle saisonnier influence les variations de la température à l'ouest de la barrière jusqu'à 300 m de profondeur (Fig.3.3.8). La plus importante variation de la profondeur de l'isotherme de 20°C, qui sépare la couche de surface plus chaude de celle profonde plus froide, est associée à l'événement El Niño 97-98. Grossièrement, le courant parallèle à la côte peut se décomposer comme une couche supérieure (0 à 120 m) avec prédominance de courants intenses vers le nord-ouest et une couche profonde avec des courants plus faibles dirigés vers le sud-est.

La côte Est (Fig. 3.3.9) présente une structure thermique similaire à celle de la côte Ouest mais avec des températures en surface plus chaudes. L'intensité des courants est plus importante qu'à l'Ouest et on ne retrouve pas un système de circulation de 2 couches. Les courants sur toute la colonne d'eau semblent se propager dans le même sens avec un affaiblissement en profondeur pour les propagations vers le nord-ouest et une augmentation de l'intensité en profondeur quand le courant est vers le sud-est.

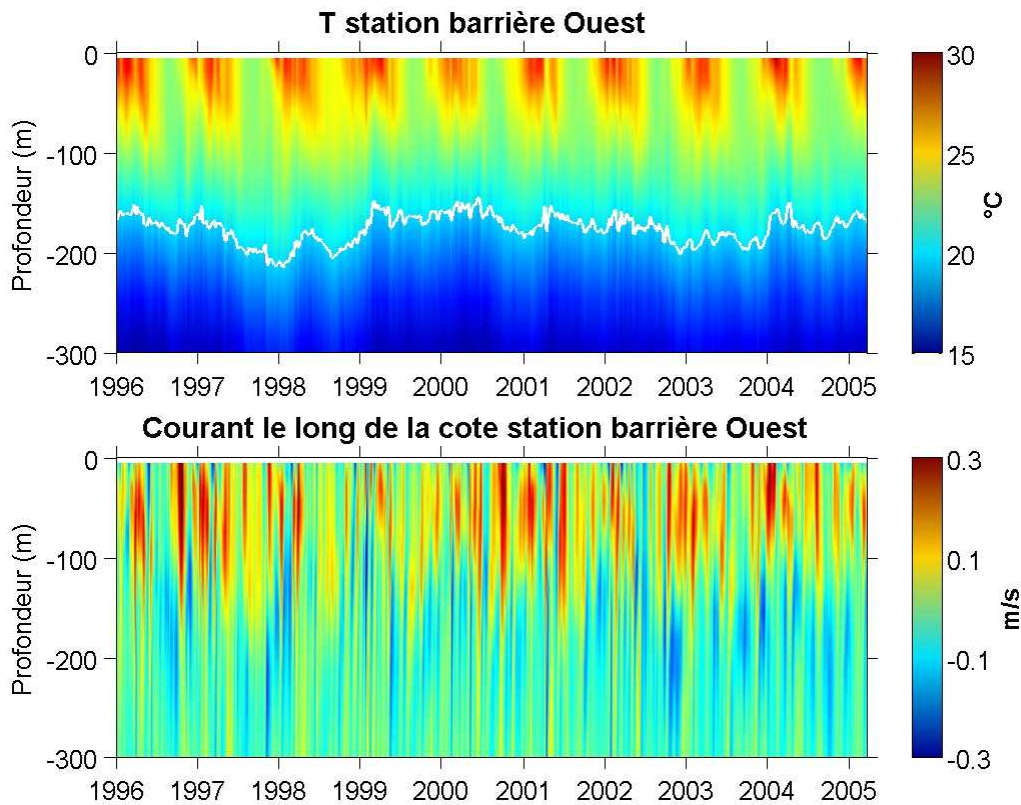


Figure 3.3.8 Séries temporelles de la température et de la composante parallèle à la côte du courant entre 0 et 300 m, issus de la simulation ROMS. Correspond à la station Ouest représentée par le losange noir numéro 3 sur la figure 3.3.2

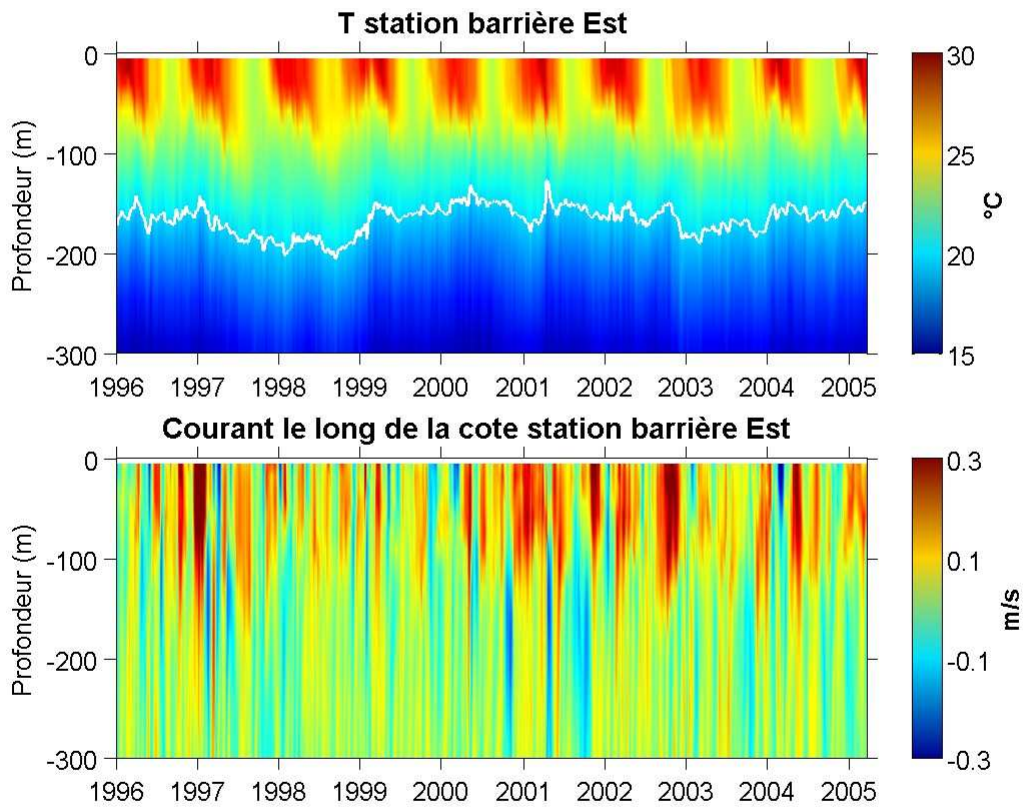


Figure 3.3.9 *Séries temporelles de la température et de la composante parallèle à la côte du courant entre 0 et 300 m, issus de la simulation ROMS. Correspond à la station Est représentée par le losange noir numéro 4 sur la figure 3.3.2*

Conclusion sur la modélisation numérique

A – Les acquis à l'issue de l'étape d'imbrication de ROMS dans Mercator

L'étude mettant en oeuvre l'imbrication du modèle ROMS dans les solutions Mercator 2° a permis de démontrer la faisabilité de la méthode, laquelle servira de référence lors de l'étape vers **l'opérationnel** (prévisions océaniques à une dizaine de jours).

Toutefois, l'amélioration significative et la mise au point finale du système opérationnel régional dépendent de la **disponibilité des solutions globales opérationnelles à plus haute résolution** en provenance de MERCATOR pour la région Pacifique. Les produits 2° nécessitent un domaine suffisamment large pour recréer la dynamique correspondant aux petites échelles (dynamique mésoéchelle), avec perte partielle de l'assimilation de données sur ce domaine. La disponibilité des solutions globales de résolution supérieure à ½° permettra de réduire de manière significative la taille du domaine, dans la mesure où une partie de la dynamique de petite échelle est contenue dans la solution globale.

B – Les étapes suivantes

Les résultats du travail effectué sur le prototype de plate forme opérationnelle nous invitent à améliorer certains aspects du forçage, qu'il en soit pour les conditions aux limites (Mercator) ou pour les flux en surface (Météo-France).

Les acquis et outils développés à l'issue de cette première phase de mise au point du prototype de plateforme sont assez avancés pour commencer à être transférés au SMAI pour une mise en place du système opérationnel au service de la Nouvelle-Calédonie. Des synergies peuvent être initiées de manière à accompagner ce projet (moyens de calcul, portage code, rapatriement, chaîne de pré-traitement et post-traitement).

4. APPLICATIONS

Un outil numérique tel que ROMS, accompagné de mesures de terrain, peut être utilisé pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes côtiers. ROMS permet de cerner le rôle des courants, du vent, des cyclones dans la répartition de sels nutritifs, dans le transport du plancton, et des larves de poissons. Il sert également à mesurer l'impact régional des variations climatiques à grande échelle, telles que El Niño ou le réchauffement planétaire. La plateforme opérationnelle proposée a la potentialité pour aider à la gestion des ressources marines ; à la prévision des trajectoires de cyclones, au suivi de déchets ou de polluants, aux déplacements de sédiments et à l'étude des processus biogéochimiques et des échanges océan-lagon. Ces applications peuvent être développées suivant les besoins. Nous présentons ici quatre applications à l'étude : les cycles biochimiques ; la distribution de thons ; les trajectoires de cyclones et les dispersions de polluants.

4.1 Répartition des sels nutritif et transport de plancton

Les espèces planctoniques sont des organismes qui possèdent une capacité de mobilité très faible ou nulle. Le plancton se laisse donc emporter horizontalement par les courants et leur déplacement vertical est fortement conditionné par les caractéristiques turbulentes de la colonne d'eau. Les sels nutritifs et autres oligoéléments sont la base alimentaire du phytoplancton, qui sert à son tour de nourriture au zooplancton. La répartition du plancton et des nutriments peut être simulée par ROMS en les considérant comme des traceurs. L'effet des transports océaniques sur leur distribution, associé à un modèle des interactions biologiques, peut permettre la réalisation de simulations de la base de la chaîne alimentaire marine. L'exemple ci-dessous correspond à une simulation réalisée pour les îles Kiribati dans le Pacifique équatorial dans un autre contexte, avec une possibilité d'application à la ZEE de Nouvelle-Calédonie.

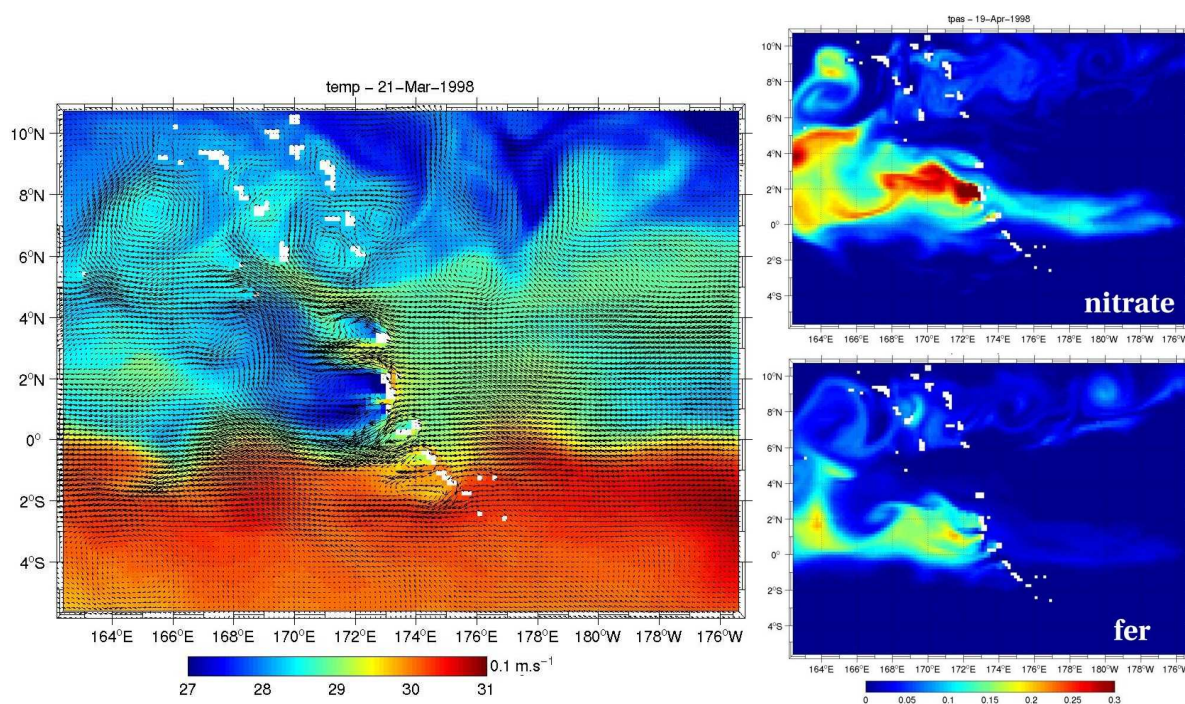


Figure 4.1.1 Simulation ROMS des courants en surface et SST (gauche) et de la conséquence distribution de nitrate et fer dans les îles Kiribati (droite).

4.2 Environnement et distribution de thonidés

Avec sa superficie de 1 740 000 Km² la ZEE représente un fort potentiel en ressources de thonidés. On y trouve plusieurs espèces, caractéristiques des océans tropicaux, dont principalement le thon jaune, le germon et le thon obèse. En 2002, 357 tonnes de thons jaunes et 873 tonnes de thons germons ont été pêchés par les long-liners calédoniens (Etaix-Bonnin, 2003).

Langley (2004) propose un modèle simple qui relie les captures de thons aux paramètres environnementaux de l'océan. Les variables considérées sont la température en surface et à 150 m de profondeur, la concentration en surface de chlorophylle-a, les anomalies du niveau de la mer et le champ de courants. Ce modèle explique 60 % de la variation mensuelle des captures de thons en Nouvelle-Calédonie mais le modèle est fortement limité par la faible résolution spatiale (4° de longitude) et temporelle (mensuelle) des paramètres océanographiques utilisés. Les anomalies du niveau de la mer et les courants sont identifiés comme les paramètres qui ont le plus d'influence dans le modèle appliqué en Nouvelle-Calédonie.

Ce modèle pourrait être amélioré en utilisant les champs haute résolution maintenant disponibles. Des cartes adéquates de zones à concentration de poisson pourraient alors en être déduites. En parallèle, la mise à disposition des prévisions de courants et températures de mer pourrait être utiles aux professionnels de la pêche qui, par expérience, sauront en déduire les zones optimales de pêche.

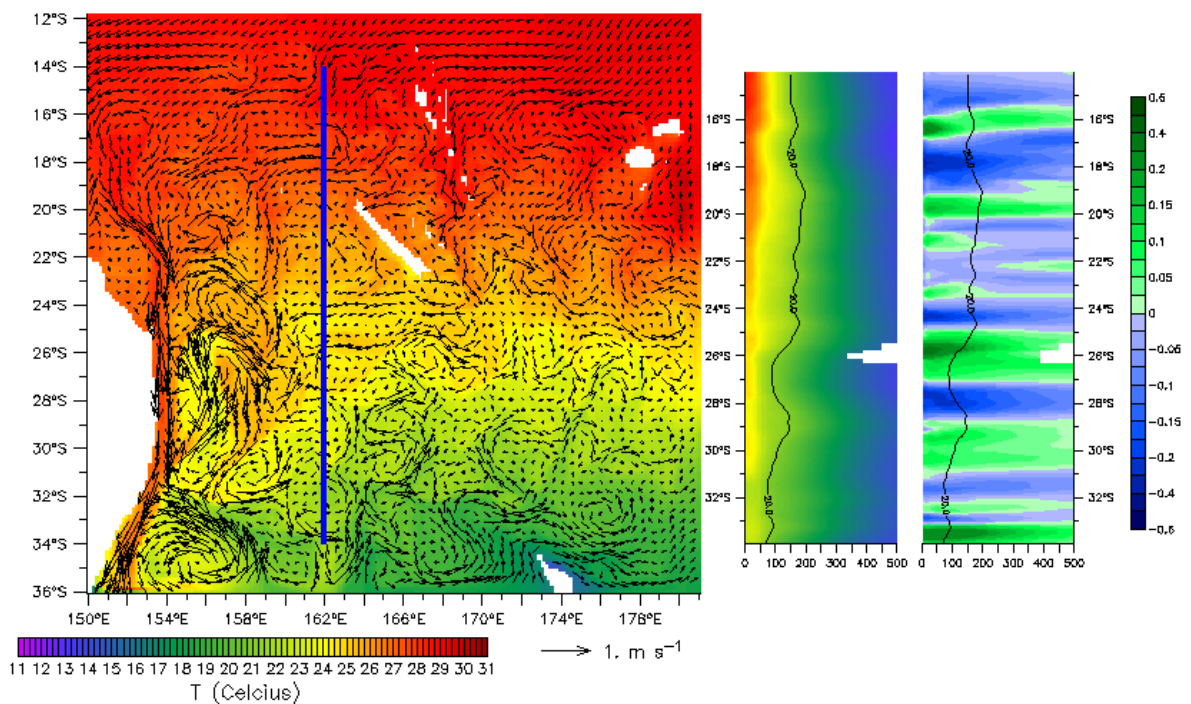


Figure 4.2.1 Simulation ROMS Pacifique sud-ouest 31 décembre 2004. La figure de gauche représente une carte de la température et des vecteurs de courants en surface. La figure de droite correspond à une section le long de 162°E de longitude (ligne bleue sur la carte) de la température entre la surface et 500 m de profondeur.

Les événements d'upwelling injectent des sels nutritifs dans la couche euphotique, fertilisant ainsi les eaux côtières. Les conditions liées à l'upwelling peuvent être particulièrement favorables pour le développement du plancton et du necton (larves et oeufs) et, si les conditions sont réunies, peuvent mener à une prolifération de proies recherchées par les thons. Les données dynamiques et bio-chimiques collectées et modélisées par cette étude permettront d'établir les bases relationnelles entre les événements d'upwelling et la variabilité de la production primaire,

créant ainsi un outil d'application supplémentaire pour l'étude de la distribution des ressources pélagiques proches des côtes de Nouvelle-Calédonie.

4.3 Trajectoire des cyclones

La zone Pacifique Sud-Ouest (140E-130W, 5S-30S) représente 10% de l'activité cyclonique mondiale, et la zone Nouvelle-Calédonie (zone d'alerte 158E-172E, 13S-25S) est situé au cœur de l'activité cyclonique du Pacifique Sud (Blaize et Lacoste, 1995). Cinq événements cycloniques par an traversent en moyenne cette zone, généralement en provenance du Nord-Ouest. Les dommages occasionnés sont proportionnels au carré de l'intensité des tempêtes, qui est mesuré par le maximum de vent. En pratique donc, nous sommes principalement concerné par les événements les plus intenses, pas nécessairement les plus fréquentes.

Les cyclones se développent sur des eaux de plus de 26°C sur une profondeur d'au moins 50 m. L'interaction océan-cyclone pendant la période de genèse présente donc une rétroaction positive, aidant l'intensification. Par contre, les observations montrent aussi un effet dramatique des cyclones sur l'océan puisque la SST peut diminuer de 1 à 6°C sur leur trajectoire. Le résultat de ce refroidissement serait une réduction des flux de chaleur dans l'atmosphère, ce qui se traduit par une réduction de l'intensité du cyclone (Bender et al., 1993). Ce processus représente une rétroaction négative, confirmée par les modèles qui prévoient par ailleurs que l'interaction océan-cyclone a des effets notables sur la vitesse de déplacement et la trajectoire des cyclones. Cependant, peu d'études de modélisation couplée océan-atmosphère prennent en compte l'océan de manière réaliste, aucune à notre connaissance dans le Pacifique Sud.

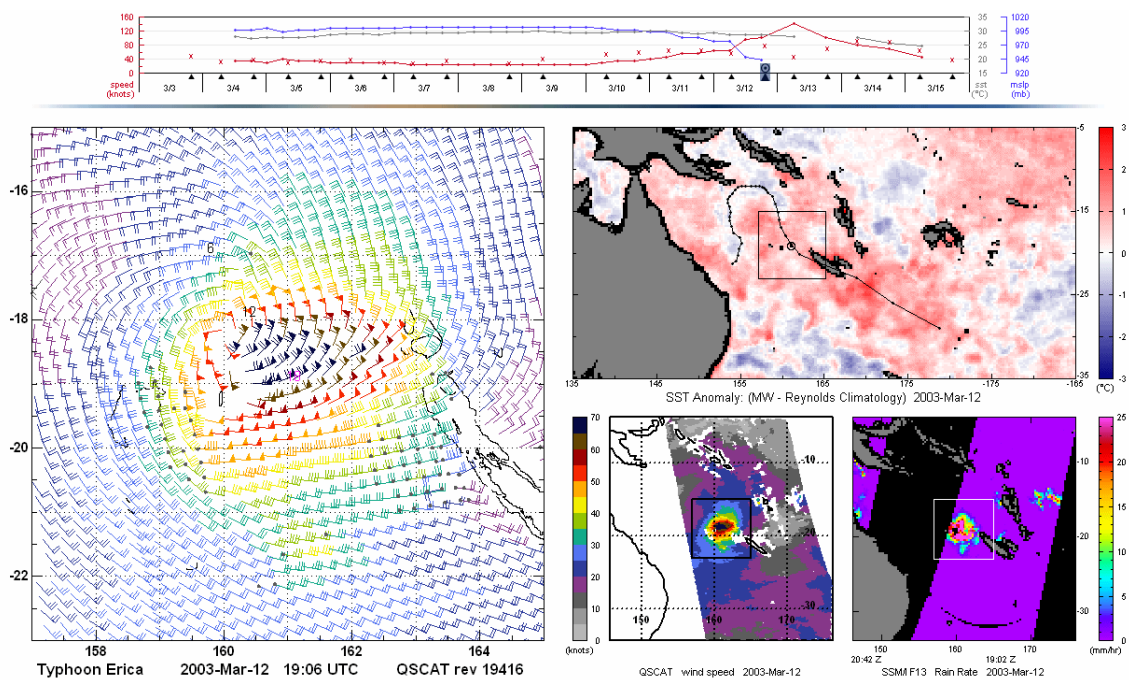


Figure 4.3.1 Cartes satellites de vent, SST et pluie lors du passage du cyclone Erica en Nouvelle-Calédonie

Pourtant, la variabilité de l'océan semble affecter les cyclones dans cette région. Par exemple, on observe que le risque cyclonique sur la zone Nouvelle-Calédonie varie en fonction de l'indice ENSO (El Nino Southern Oscillation). Il augmente en période La Niña, qui correspond à un réchauffement des eaux dans cette région, et au contraire devient plus faible pendant El Nino. En réalité, une large gamme d'échelles océaniques affecte les conditions locales. Les variations de grande échelle, comme ENSO, génèrent les grandes tendances mais celles-ci sont modulées notamment par l'effet de masse des îles. Ces échelles régionales

océaniques ont potentiellement un rôle primordial sur l'évolution des cyclones. Le cyclone Erica, sa genèse, son évolution et son effet sur la surface océanique apparaissent nettement sur les images satellitaires montrant le vent, la SST et les pluies (Figure 4.3.1). Une des leçons d'Erica est qu'il est difficile de prévoir la trajectoire et l'intensité du cyclone avec les moyens en place. Un système de modélisation régionale couplée océan-atmosphère permettrait une étude réaliste de l'interaction océan-cyclone. Un projet de recherche sur cette thématique a été déposé auprès du Ministère de l'Outre-Mer (2006).

4.4 Transport et dispersion de polluants

Des outils de diagnostique ont été développés avec le système ROMS pour simuler l'évolution, en 3-D, d'un polluant déversé à proximité des côtes (cela n'inclut pas le transport par les vagues, au dessus de la barrière de corail, cependant). La figure 4.3.2 présente un exemple en Californie où la dispersion d'une plume de polluants déversés à 40 m de profondeur par un pipeline près des côtes de Los Angeles a été simulée. Cela correspond au scénario de rejet industriel contrôlé dans une baie et non à un accident. On observe une distribution tourbillonnaire du traceur, un approfondissement loin des côtes et une remontée en surface dans les plages au sud de la zone de déversement.

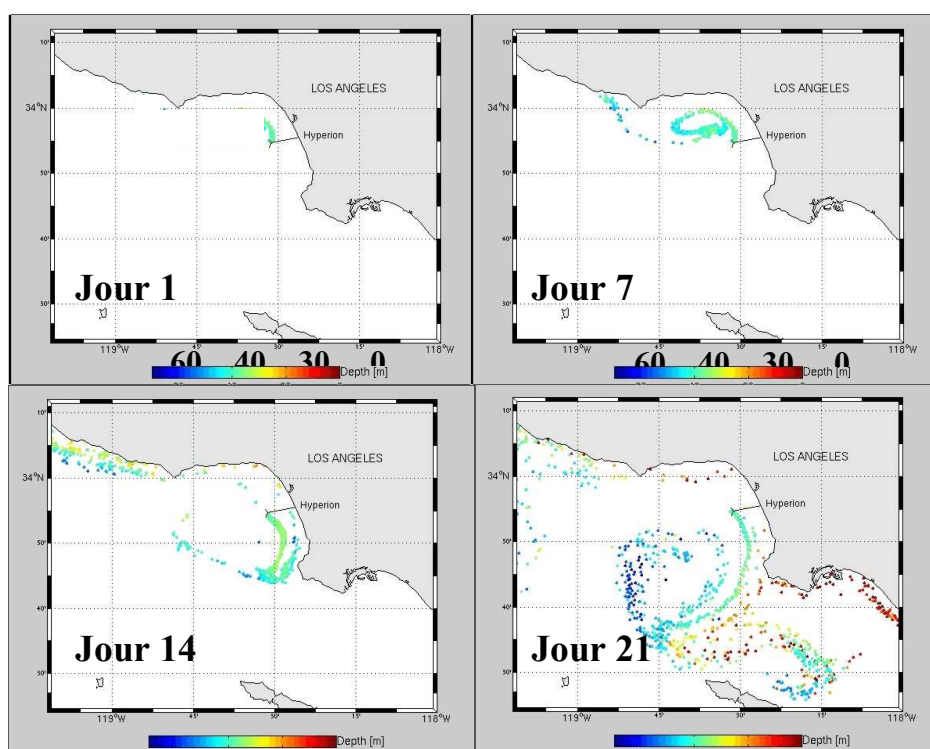


Figure 4.3.2 Différentes étapes d'une simulation ROMS d'une plume au large des côtes de Los Angeles. Une concentration constante de traceur est initialement éjectée à 40 m de profondeur. L'animation es disponible sur http://www.atmos.ucla.edu/~patrickm/hyperion_plume.html

Des simulations similaires peuvent être réalisées dans les zones à risque de la ZEE de Nouvelle-Calédonie dans un contexte de prévision de catastrophes anthropogéniques ou de contrôle du rejet des polluants. Le développement de ce module « qualité de l'eau » pour l'extérieur du lagon devrait aboutir vers mi-2006.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alory, G., A. Vega, A. Ganachaud, et M. Despinoy. 2005. A new upwelling index to hindcast New Caledonian cooling events. Soumis à *J. Geophys. Res.*
- Grandperrin, R., B. Richer de Forges et J.M. Auzende. 1997. Ressources Marines de Nouvelle-Calédonie : Le programme ZoNéCo.
- Henin, C., J-M. Guillerm et L. Chabert. 1984. Circulation superficielle autour de la Nouvelle-Calédonie. *Oceanogr. Trop.*, 19 (2), 113-126.
- Hénin C. et G. Cresswell, 2003: Automatic coastal stations of New Caledonia and thermal variability. Evidence for coastal upwelling. Soumis à *Cont. Shelf Res.*
- Bender, M.A., R.J. Ross, R.E. Tuleya, and Y. Kurihara. 1993. Improvements in tropical cyclone track and intensity forecasts using the GFDL initialization system. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2046-2061.
- Blaize, S. and D. Lacoste. 1995. Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie. *Ed. Météo-France.*
- Rodier, M. et G. Eldin. 2005. Physical and nutrient environment near NC (SW Pacific) : a two years study. A soumettre à *Cont. Shelf Res.*
- Charles E. Tilburg, Harley E. Hurlburt, James J. O'Brien and Jay F. Shriver. The Dynamics of the East Australian Current System: The Tasman Front, the East Auckland Current, and the East Cape Current., *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 2917–2943.
- Ridgway K.R. and Dunn J.R., 2003—Mesoscale structure of the mean East Australian current System and its relationship with topography. *Progress in oceanography*, 56, 189-222.
- Bowen, MM., JL Wilkin and WJ Emery. 2005 Variability and forcing of the East Australian Current. *J. Geophys. Res.*, 110.
- Maes C., Josse P., Ferry N., De Mey P. 2005. Définition du prototype système MiniPOG. Document interne Mercator, pp 24. Réf. MOO-ST-424-226-MER.
- Ridgway K.R., J.R. Dunn, and J.L. Wilkin. 2002. Ocean interpolation by four-dimensional least squares -Application to the waters around Australia. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, Vol 19, No 9, 1357-1375.
- Langley, A. 2004. An examination of the influence of recent oceanographic conditions on the catch rate of albacore in the main domestic longline fisheries; 17 th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, *Working Paper SA-4.*
- Régis Etaix-Bonnin, 2003: New Caledonia tuna and billfish fisheries ; 16 th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, *Working Paper NFA-16.*
- Sabrina V. 1996: synthèse des données de pêche 1970 à 1995. *Rapport ZoNéCo.*