

INSTITUT MÉDITERRANÉEN D'OCÉANOLOGIE

MASTER Océanographie

SPÉCIALITÉ : OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE ET BIOGÉOCHIMIQUE

Louise ROUSSELET

Étude de la circulation à mésoéchelle et ses implications sur la biogéochimie en mer de Corail

RAPPORT DE STAGE RÉALISÉ AU SEIN DU LABORATOIRE : INSTITUT
MÉDITERRANÉEN D'OCÉANOLOGIE

SOUS LA DIRECTION DE : A.M DOGLIOLI (MIO) ET C. MAES (LPO)

Résumé

L'activité de méso-échelle va fortement influencer sur la circulation générale, le mélange des masses d'eau et la répartition des traceurs au sein des océans. Ce rôle a été étudié à partir des données *in-situ* de la campagne BIFURCATION menée en mer de Corail en Septembre 2012. Ces observations de terrain ont été remises dans un contexte à plus grande échelle en étudiant conjointement plusieurs sources de données satellites (altimétrie, SSS, SST, couleur de l'eau). Dans ce travail, un bilan de transport de masse a été calculé et il a été montré que l'activité tourbillonnaire joue un rôle prépondérant dans les estimations de transport (pouvant conduire à une sensibilité de l'ordre de 5 à 10 Sv) et dans l'interprétation des observations hydrologiques. De plus une connexion entre le Jet Nord Vanuatais (NVJ) et le Jet Nord Calédonien (NCJ) a été proposée via la dynamique à méso-échelle, lien qui n'avait pas été documenté jusqu'à présent. Une analyse lagrangienne, à travers le calcul d'exposants de Lyapunov (*Finite Size Lyapunov Exponent*, FSLE), a également permis de mettre en évidence une concordance entre structures frontales à subméso-échelle et gradients de traceurs tels que la température et la salinité. Enfin il a été montré que la présence de telles structures pouvait, dans certains cas, fournir une explication sur la présence d'espèces diazotrophes dans cette région à caractère oligotrophe. Cette étude ouvre de nombreuses perspectives quant à la confirmation de la connexion du NVJ et du NCJ à long terme et sur l'utilisation pertinente des FSLE pour l'étude de la distribution des paramètres biogéochimiques.

Abstract

The meso-scale activity has a strong impact on the ocean circulation, mixing of water masses and tracer distribution. This role is studied with the help of data collected during the oceanographic cruise, BIFURCATION, conducted in September 2012 within the Coral Sea. *In-situ* data has been analyzed and explained with the help of satellite-based remote sensing data (altimetry, SSS, SST, ocean color). This work estimates the budget of mass transport within the Coral sea. This study has also shown that the meso-scale activity takes an important part in mass transport estimations (leading to a sensitivity from 5 to 10 Sv) and in interpretations of hydrological observations. The meso-scale activity has been identified to be responsible for the connexion between the North Vanuatu Jet (NVJ) and the North Caledonian Jet (NCJ), previously considered to be independant. A Lagrangian analysis showed that high resolution gradients of temperature and salinity can be associated to hydrodynamical submeso-scale features detected by Finite Size Lyapunov Exponent (FSLE). The latters are also found to be linked to the presence of diazotroph species in this oligotrophic area. This study offers interesting outlooks concerning the validation of the long-term connection between the NVJ and NCJ and the relevant use of FSLE to study the distribution of biogeochemical elements.

Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier mes deux encadrants de stage, Andrea Doglioli et Christophe Maes, pour leur disponibilité tout au long du stage et leurs conseils précieux. Travailler avec vous dans une bonne ambiance, fut un réel plaisir et source d'enrichissement. J'espère pouvoir poursuivre cette collaboration qui fut, je pense, agréable pour tous les trois.

Je tiens également à remercier tout l'équipage de l'ALIS et les membres ayant participé à la campagne BIFURCATION, dirigée par Christophe Maes, qui ont permis l'acquisition de nombreuses données originales. La diversité de ces données m'a permis de faire un travail complet et abouti.

Je tiens à remercier aussi toutes les personnes ayant travaillées au préalable sur les données utilisées pendant ce stage : G. Eldin (LEGOS/IRD) pour les données ADCP ; Sophie Bonnet pour toutes les données biogéochimiques ; Thomas Bouinot et Virginie Thierry pour le traitement des données O₂ du flotteur Argo ; Fabienne Gaillard pour les analyses ISAS ; et Nicolas Reul de l'IFREMER pour les données SMOS ¹.

Merci aussi à Sophie Bonnet, Anne Petrenko et Nicolas Barrier pour leur disponibilité et leurs conseils lorsque j'en avais besoin.

Enfin je tiens spécialement à remercier mes compagnons de route Mathieu, John, Greg et Nans pour toutes ces pauses autour d'un café, moments de détente indispensables, et pour toutes leurs suggestions à chaque fois pertinentes.

1. <http://www.salinityremotesensing.ifremer.fr/>

Table des matières

I	Introduction	2
II	Matériels et méthodes	6
II.1	Données <i>in situ</i>	6
II.2	Données satellitaires	7
II.3	Méthodologie	8
III	Résultats	12
III.1	Transports de masse et masses d'eau	12
III.2	Traceurs des masses d'eau en surface et chlorophylle-a	18
IV	Discussion	22
IV.1	Transports de masse et tourbillons	22
IV.2	Connexion entre le NVJ et le NCJ	24
IV.3	FSLE et données biogéochimiques	28
V	Conclusion et perspectives	28
	Références	33
A	Masses d'eau en mer de Corail	34
B	Traitement des données ADCP	34
C	Sections verticales des vitesses mesurées par l'ADCP	36
D	Diagramme T-S Argo	39

I Introduction

La mer de Corail est située dans l'océan Pacifique Sud-Ouest qui est caractérisé par la "*warm-pool*" (réservoir d'eau chaude où la température de surface des eaux est en permanence supérieure au seuil de 28°C à partir duquel la convection atmosphérique se déclenche) qui module les systèmes climatiques globaux ou régionaux tel que El Nino-Southern Oscillation (ENSO). Le Pacifique Sud-Ouest joue donc un rôle climatique essentiel car il répartit les masses d'eau du gyre subtropical vers l'équateur ou vers le pôle sud à travers la dynamique de la mer de Corail et le courant de bord ouest qui régule l'évolution de la "*warm-pool*". Les changements climatiques menacent, d'autant plus dans les mers tropicales, les espèces marines et le fonctionnement des écosystèmes (Burke et Spalding, 2011). Malgré son aspect oligotrophe la mer de Corail renferme des environnements caractérisés par une grande biodiversité (récifs coralliens, monts sous-marins...) et une importante biomasse (aggrégations pélagiques) (McKinnon et al., 2014). L'écologie en mer de Corail est donc régie par les cycles ENSO, qui permettent l'émergence de conditions favorables ou défavorables au développement biologique. La production primaire en mer de Corail, considérée comme oligotrophique, est principalement influencée par les dépôts atmosphériques et les processus d'upwelling générés par les vents ou les tourbillons. De façon schématique la mer de Corail est généralement caractérisée par une thermocline et une nutricline profondes (~ 110 m) marquées par une faible biomasse de phytoplancton en surface et un maximum de chlorophylle en profondeur.

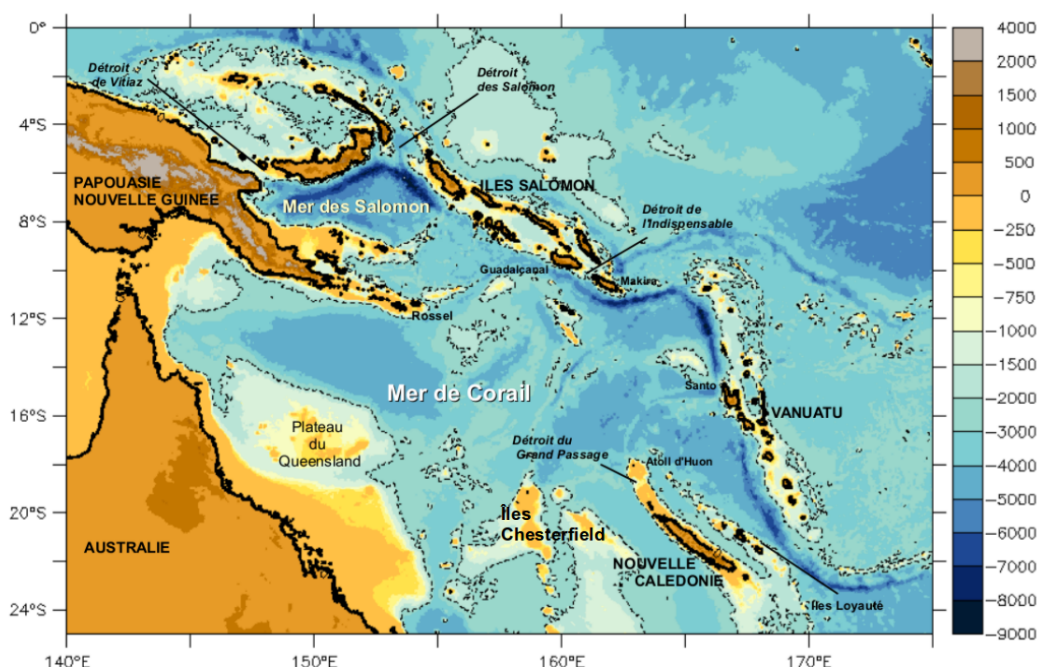


FIGURE 1 – Carte topographique de la région du Pacifique Sud-Ouest (basée sur les données de Smith et Sandwell, 1997). La ligne épaisse en noir indique l'isobathe 0. (extrait de Gasparin, 2012)

Dans le Pacifique Sud-Ouest, les reliefs importants à forts accidents topographiques (Fig. 1) et la présence de nombreuses îles induisent une circulation océanique complexe. Les travaux de Webb

(2000) à l'aide du modèle OCCAM au $1/4^\circ$ ont permis de mettre en évidence, pour la première fois, la présence de jets zonaux issus du Courant Equatorial Sud (SEC), branche nord du gyre anticyclonique subtropical, qui heurte les îles de la Nouvelle-Calédonie, du Vanuatu et des Fidji. La présence de ces îles entraîne la séparation du SEC en deux branches : le Jet Nord Vanuatais (NVJ) au Nord du Vanuatu et le Jet Nord Calédonien (NCJ) au nord de la Nouvelle-Calédonie au niveau du détroit du Grand Passage. Ces résultats ont été confirmés par des observations *in situ* menées par Maes et al. (2007) grâce au déploiement de flotteurs Argo en avril 2005 qui ont suivi le trajet de ces deux courants. Les travaux de Kessler et Cravatte (2013) ont également étudié la circulation dans la mer de Corail à partir des flotteurs Argo disponibles dans la région et de la climatologie CARS (Ridgway et Dunn, 2003) pour arriver à cette même conclusion. Plusieurs climatologies et études numériques à grande échelle suggèrent également l'existence de ces courants (Ganachaud et al., 2008). De nombreux progrès ont donc été accomplis ces dernières années dans la compréhension de la dynamique complexe de la zone (Ganachaud et al., 2014). La figure 2 permet de résumer ces avancées, mais cette vision de la circulation demeure incomplète et propose principalement une vision climatologique de la circulation générale.

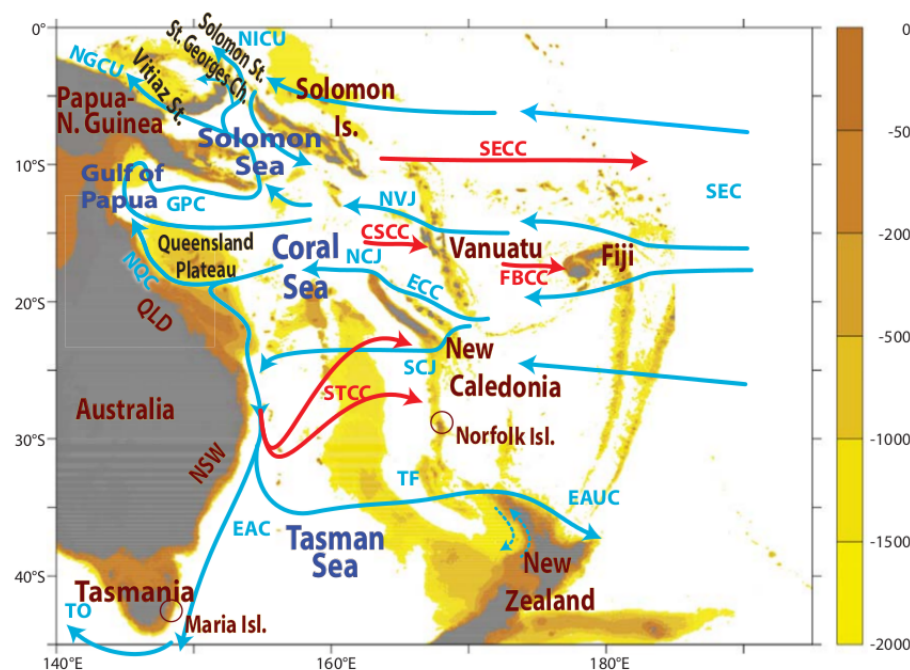


FIGURE 2 – Schéma de la circulation générale du Pacifique Sud-Ouest (la topographie est représentée en couleur de fond avec une échelle en mètre). Les flèches bleues représentent les courants majeurs intégrés sur 1000 m (SEC=South Equatorial Current ; NVJ=North Vanuatu Jet ; ECC=East Caledonian Current ; NCJ=North Caledonian Jet ; SCJ=South Caledonian Jet ; NQC=North Queensland Current ; GPC=Gulf of Papua Current ; NGCU=New Guinea Coastal Undercurrent ; NICU=New Ireland Coastal Undercurrent ; EAC=East Australia Current ; TF=Tasman Front ; EAUC=East Auckland Current ; TO=Tasman Outflow). Les flèches rouges représentent les contre-courants de surface majeurs (STCC=South Pacific Subtropical Counter Current ; CSCC=Coral Sea Counter Current ; FBCC=Fiji Basin Counter Current ; and SECC=South Equatorial Counter Current). NSW et QLD indiquent respectivement les régions du New South Wales et du Queensland en Australie (extrait de Ganachaud et al. (2014)).

Le transport de masse total entrant en mer de Corail est estimé suivant les études et les méthodes utilisées entre 25 et 45 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Gourdeau et al., 2008; Gasparin, 2012; Ganachaud et al., 2014). Ce transport est principalement effectué par les jets NVJ et NCJ qui présentent pour autant des caractéristiques bien distinctes. En effet si le NCJ est plutôt fin (100 km) et profond (~ 1000 m) et transporte environ 15 ± 5 Sv, le NVJ est lui plus large (~ 300 km) et moins profond (0-500 m) et transporte environ 20 ± 5 Sv (Gasparin, 2012; Kessler et Cravatte, 2013). Les masses d'eau continuent ensuite leur trajet vers l'Australie avant de bifurquer, au niveau du Plateau du Queensland, soit vers le sud par courant de bord Ouest avec l'EAC, soit vers l'équateur pour alimenter le Courant du Golfe de Papouasie (GPC). Ce dernier va contourner la Papouasie Nouvelle-Guinée pour former le Sous-Courant de Nouvelle-Guinée (NGUC) et ainsi créer une connexion avec les eaux de la mer des Salomon (Fig. 2). Malgré cette vision à grande échelle de la circulation il reste assez difficile de se faire une idée de la circulation à plus petite échelle. En effet la vorticité induite par l'interaction entre les courants à grande échelle et la topographie ( les, récifs, monts sous-marins...) empêche de fournir une description nette de la circulation notamment lorsque les jets s'approchent du Plateau du Queensland. Si le fait que le flux arrivant sur le Plateau du Queensland va se scinder en deux parties est bien établi (une vers le Nord et l'autre vers le Sud) cette zone de bifurcation reste encore mal connue et les proportions du NVJ et du NCJ qui y circulent ne sont pas établies clairement. De plus l'aspect tourbillonnaire complique les choses en créant un effet d'aliasing sur les courants moyens. Thompson et Veronis (1980) avaient déjà souligné l'influence de la méso-échelle sur les calculs de transports de masse et la difficulté de définir la circulation dans cette zone à forte variabilité tourbillonnaire. De plus les travaux de Kessler et Cravatte (2013) ont également suggéré l'influence des tourbillons sur l'estimation de la circulation dans la mer de Corail et sur les estimations des transports moyens associés. L'enjeu est donc d'arriver à estimer les transports de masse et le cheminement des eaux, tout en cherchant à identifier les processus physiques mis en jeu dans cette zone de bifurcation.

Les études précédentes (Webb, 2000; Ganachaud et al., 2008; Maes et al., 2007; Kessler et Cravatte, 2013) ont donc montré l'existence de deux jets majeurs dans la circulation de la mer de Corail qui sont caractérisés par des masses d'eau différentes. En effet les eaux de surface, dessalées en raison des fortes précipitations sévissant sur la zone, sont appelées les Eaux de Surface Tropical (*Tropical Surface Waters*, TSW) (Wyrtki, 1962; Sokolov et Rintoul, 2000). Elles sont aussi fortement conditionnées par les échanges verticaux (diffusion et mélange) et par les caractéristiques des eaux en profondeur (en dessous de la couche de mélange). Les eaux de la thermocline principale peuvent être distinguées par des origines distinctes : au sud des eaux salées, bien oxygénées issues du chenal entre la Nouvelle-Calédonie et le Vanuatu, la *South Pacific Tropical Water South* (SPTWS, $\sigma = 25,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et la *Western South Pacific Central Water* (WSPCW, $\sigma = 26,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ; au nord de Santo des eaux de salinité moyenne et moyennement oxygénée, caractéristiques d'une origine équatoriale provenant de l'Est, la *South Pacific Tropical Water North* (SPTWN, $\sigma = 24,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) et la *Pacific Equatorial Water* (PEW, $\sigma = 26,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) (Gasparin, 2012; Gasparin et al., 2014) (ANNEXE A Fig. 22). Ces eaux de la thermocline sont susceptibles de modifier ou d'altérer les conditions moyennes de la bande équatoriale, et de jouer par la même un rôle dans les variations à long terme ( chelles de temps allant de 20 à 50 ans). Gasparin et al. (2014) ont mis en évidence que les eaux de la thermocline du

NCJ étaient composées de la SPTWS et de la WSPCW alors que les eaux de la thermocline du NVJ sont dominées par la SPTWN et la PEW. Les eaux en dessous de la thermocline principale entrant en mer de Corail entre 400 et 1000 m, sont formées par les *Antarctic Intermediate Waters* (AAIW). Ces eaux sont caractérisées par un minimum de salinité et un maximum de concentration en oxygène marquant leur formation récente (Maes et al., 2007). Elles sont advectées par le SEC après leur parcours à travers la gyre anticyclonique du Pacifique Sud (Ceccarelli et al., 2012) et sont présentes dans la partie profonde des deux jets. Cependant malgré ces différences bien marquées, de nombreuses zones d'ombres persistent notamment sur le cheminement de ces masses d'eaux au sein de la mer de Corail et sur des potentielles interactions résultantes de la dynamique des jets entre eux. En effet si ces deux jets aux caractéristiques bien différentes sont supposés indépendants, aucune étude a pu, à ce jour, mettre en évidence des interactions entre eux malgré la forte activité à méso-échelle de la zone.

Enfin la vorticité, induite par l'activité à méso-échelle, provoque une dissipation d'énergie mais piège également des particules en suspension (Couvelard et al., 2008). Les tourbillons peuvent donc influencer la disponibilité en nutriment car la rotation cyclonique ou anticyclonique (respectivement) est associée à des remontées ou plongées (respectivement) de nutriments en surface ou en profondeur. La circulation à méso-échelle régissant donc la répartition des espèces biogéochimiques en surface mais aussi sur la verticale, il est d'autant plus important d'obtenir des informations sur la circulation à fine échelle afin de pouvoir fournir une explication physique à certains *blooms* ou fortes abondances en espèces biologiques dans cette région oligotrophe. Les caractéristiques biogéochimiques des eaux sont un facteur discriminant du développement biologique au sein de masse d'eau. Certaines intrusions d'eau peuvent donc être associées au développement d'espèces phytoplanctoniques dans des régions *a priori* pauvres en organismes. Les travaux de Maes et al. (2013) ont montré une correspondance entre les fronts, marqués en température et salinité, séparant deux masses d'eaux différentes et un diagnostique lagrangien (*Finite Size Lyapunov Exponents*, FSLE) qui détecte les structures convergentes. Les FSLE pourraient être associés directement à des fronts qui pourraient aussi être à l'origine d'un développement biologique. Ainsi cet outil pourrait constituer un élément diagnostique et explicatif de certains épisodes de *blooms* phytoplanctoniques.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier comment l'activité de méso-échelle va pouvoir non seulement influencer sur la circulation et le mélange des eaux de la mer de Corail mais aussi à plus fine échelle sur le développement biologique en contrôlant les gradients horizontaux et la répartition des éléments biogéochimiques en surface.

Pour étudier la dynamique de la bifurcation de ces jets au niveau de l'Australie, la campagne BIFURCATION (chef de mission C.Maes) a été menée du 31 août au 15 septembre 2012 à bord du Navire Océanographique ALIS de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en mer de Corail. Cette étude est intégrée dans le volet exploratoire du projet SPICE (*SouthWest Pacific Oceanic Circulation and Climate Experiment*) qui vise à observer, modéliser et mieux comprendre les phénomènes qui induisent la circulation océanique du Pacifique Sud-Ouest (Ganachaud et al., 2014). Ainsi la route du navire comprend un départ à Nouméa jusqu'à atteindre les  les Chesterfield où une section

méridionale, suivant la longitude 159°E, est effectuée afin d'étudier le transport du NCJ (Fig. 3). Le trajet se poursuit ensuite jusqu'à la zone d'intérêt, où a lieu la bifurcation des jets entre 152-156°E et 16-19°S. Le trajet du bateau a été défini au préalable pour former une zone fermée au niveau de la zone de bifurcation afin d'étudier les transports associés avant d'entamer le retour jusqu'à Nouméa. Tout au long du trajet des stations hydrologiques sont réalisées de manière à étudier les caractéristiques des masses d'eau (CTD, O₂...). De plus, un *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) de coque et un ThermoSalinoGraphe (TSG) ont permis de faire des mesures instantanées des courants horizontaux ainsi que des mesures de température et salinité de surface en continu qui permettront de mettre en évidence les fronts et les gradients horizontaux des masses d'eau. Les données de la campagne seront donc analysées, interprétées et comparées avec des outils satellitaires afin de mieux comprendre la dynamique de la zone de bifurcation des deux jets (NCJ et NVJ) intégrée dans une circulation à méso-échelle très importante. Ces outils satellitaires pourront aider à remettre les données de la campagne dans un contexte à plus grande échelle mais aussi à comparer ces résultats avec une analyse fine en suivant le trajet des tourbillons influents sur notre zone d'étude, en reconstituant leurs histoires et leurs caractéristiques. Un diagnostic lagrangien, à travers le calcul d'exposants de Lyapunov, permettra de faire un lien entre la circulation de méso- et subméso-échelle et les caractéristiques des eaux de surface échantillonnées lors de la campagne BIFURCATION. En plus de la physique, il a été possible pendant les stations hydrologiques de la campagne d'étudier la diversité et le rôle biogéochimique d'espèces fixatrices d'azote atmosphérique. L'apport de données de concentration en chlorophylle-a issues de mesures satellites, permettra dans un deuxième temps de relier l'analyse physique de la circulation à des caractéristiques biogéochimiques tels que l'abondance d'une espèce dans un milieu *a priori* défavorable à sa croissance. Ainsi l'importance de l'activité de méso-échelle en mer de Corail sera mis en évidence d'un point de vu physique mais également biogéochimique.

II Matériels et méthodes

II.1 Données *in situ*

Au cours de la campagne BIFURCATION, des mesures en continu des courants horizontaux, par l'ADCP de coque du navire ont été enregistrées à une fréquence de 150 kHz. Les vitesses instantanées de courant sont estimées sur une couche de 0 à 600 m (au maximum) avec une erreur de $\pm 5 \text{ cm s}^{-1}$ (Hummon et Firing, 2003). Les données de l'ADCP ont été pré-traitées afin de fournir à chaque donnée une étiquette déterminant si la valeur peut-être considérée comme plus ou moins aberrante (LEGOS/IRD). Après traitement de ces données l'utilisateur peut alors choisir entre différents pourcentages de valeurs à supprimer. Un test de sensibilité a été effectué sur ces pourcentages (ANNEXE B). La comparaison des profils à 30% et 50% ne montrent pas de différences significatives. Ainsi pour la suite de l'étude les données à 30% ont été préférées dans le but de garder le maximum de données brutes possibles. De plus au vu de l'absence de données sur une grande partie de l'ensemble des profils verticaux sous les 500 m, les données qui seront conservées seront comprises entre le premier niveau de mesure de l'ADCP et le 30^{ème} (sur 56) correspondant à la profondeur 488 m.

De plus, pendant la campagne 40 stations hydrologiques mesurant en continu le long de la ver-

ticale (0-2000 m au maximum) des profils de température, salinité et de concentration en oxygène dissous ont été effectuées à l'aide d'une sonde Seabird 911+ (CTD-O₂). La précision des capteurs en température, salinité et oxygène dissous est respectivement de 0.002°C, 0.0002 psu (pour simplifier, les valeurs de salinité seront exprimées en psu, selon l'échelle de Salinité Pratique de 1978, dans la suite du texte) et 1 $\mu\text{mol l}^{-1}$. Les données d'O₂ ont été calibrées avec des échantillons discrets de mesure de type Winckler (avec des résidus conformes aux normes standards internationales de $-0.003 \pm 1.730 \mu\text{mol kg}^{-1}$), celle de salinité avec des échantillons analysés après la campagne dans une précision de l'ordre de 0.005 psu. Enfin, en complément un TSG a mesuré en continu les conditions thermo-halines de surface pendant le trajet de la campagne. Les données du TSG ont fait l'objet d'un pré-traitement standard appliqué dans le cadre du *Sea surface Salinity Observation Service*² (SNO-SSS).

Enfin, des échantillons d'eau ont été récupérés lors des stations hydrologiques afin de faire des mesures biogéochimiques. Ainsi des échantillons pour la détermination de la concentration en chlorophylle-a ont été collectés à partir de bouteilles Niskin dans des flacons de 0.55 L, filtrés sur des filtres GF/F Whatman, gelés à -80°C et analysés à bord du bateau (Bonnet et al., en révision). Les concentrations en chlorophylle-a sont déterminées après extraction au méthanol (Herbland et al., 1985) en utilisant un fluorimètre Turner Design équipé d'un module extraction-acidification de chlorophylle-a (module a 7200-040) et calibré avec de la chlorophylle-a standard pure (Sigma). La profondeur du maximum de chlorophylle-a est déterminée par la profondeur à laquelle la concentration de chlorophylle-a maximale a été mesurée pour chaque station hydrologique.

Durant BIFURCATION l'abondance de diazotrophes a été déterminée par dosage Taqman[®] qPCR et pour cette étude seront utilisées les abondances suivantes : groupe unicellulaire cyanobactérien A1 (UCYN-A1 ; (Church et al., 2005)) et les cyanobactéries coloniales et filamenteuses *Trichodesmium* spp. (Church et al., 2005). Le protocole détaillé est décrit dans Bonnet et al. (en révision). Les limites de détection (LD) et de quantification (LQ) sont comprises entre 106 et 136, et 851 et 1092 *nifH* copies.L⁻¹ respectivement.

II.2 Données satellitaires

Les produits Ssalto/Duacs issus de la base de données AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic*³) ont été utilisés pour extraire les anomalies de hauteur de mer (SLA, *Sea Level Anomalies*) et les vitesses géostrophiques correspondantes. Les données issues de plusieurs satellites (Cryosat-2, Jason-1/-2) sont combinées pour réaliser des cartes journalières, d'une résolution de $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4}^\circ$ sur une grille Mercator (depuis le 15 Avril 2014), représentant les variables citées précédemment. Ces anomalies sont calculées par rapport à une moyenne entre 1993 et 1998.

Le site web `oceancolor`⁴ fournit chaque jour des données de concentration en chlorophylle-a de surface. L'utilisation de données de niveau 3 (*Level 3 Standard Mapped Image*) à une résolution de 4 km permet de représenter les caractéristiques de méso-échelle.

2. <http://www.legos.obs-mip.fr/observations/sss>

3. www.aviso.oceanobs.com

4. oceancolor.gsfc.nasa.gov

La concentration en chlorophylle-a est dérivée grâce à un algorithme, dont les paramètres varient en fonction du capteur (OC3M, OC2M), qui représente le meilleur ajustement polynomial qui relie la variable biogéochimique au logarithme du rapport des réflectances de télédétection suivant les formules :

$$X = \log_{10}(Rrs1/Rrs2) \quad (1)$$

$$chlor_a = 10^{(a_0 + a_1 \times X + a_2 \times X^2 + a_3 \times X^3 + a_4 \times X^4)} \quad (mg/m^3) \quad (2)$$

avec :

Rrs1 = blue wavelength Rrs (e.g., 443, 490, or 510-nm)

Rrs2 = green wavelength Rrs (e.g., 547, 555, or 565-nm)

En raison du manque de données sur certaines zones, dû à la présence de nombreux nuages dans cette région intertropicale, l'utilisation d'un composite sur les 15 jours de mission a été privilégiée.

Les produits SMOS d'une résolution de 35 à 50 km ont été préalablement traités par le Centre Aval de Traitement des Données SMOS (CATDS⁵) (Reul et al., 2014) avec une erreur globale d'environ 0.3 psu. Les données utilisées pour cette étude sont des composites de la salinité de surface sur 6 jours datant du mois de septembre 2012.

Une moyenne mensuelle de salinité et de température de surface est également fournie grâce aux produits ISAS (*In-situ Analysis System*) qui permet de reconstruire des champs de salinité à différent niveau à partir de données des flotteurs autonomes du réseau Argo (Von Schuckmann et al., 2009).

II.3 Méthodologie

Le calcul de transport de masse étant très sensible à la précision des courants, il a été nécessaire de faire un post-traitement des données ADCP afin de vérifier leur qualité et faciliter le calcul de transport précis. Ainsi les absences de données ont été comblées grâce à une interpolation par plus proche voisin. Un critère sur les gradients verticaux permet ensuite d'éliminer les valeurs aberrantes (notamment entre 400 et 500 m, c'est-à-dire à la limite de portée de l'appareil). Les données sont supprimées lorsque la dérivée première de la composante zonale ou méridionale est supérieure à 12 fois l'écart-type du profil vertical. Une seconde interpolation est enfin appliquée.

Lors des 40 stations réalisées au cours de la campagne BIFURCATION le navire a pu effectuer des demi-tours et il a réduit sa vitesse lors des stations hydrologiques, ce qui a biaisé l'échantillonnage en continu de l'ADCP. Les données des stations ont donc été supprimées en utilisant un critère sur la variation en latitude car ces zones étaient plus échantillonnées. De ce fait la quantité de données disponibles était plus importante dans ces zones, ce qui induit une erreur dans le calcul de transport de masse en prenant en compte plusieurs fois les données échantillonnées au même endroit. Lorsque

5. www.catds.fr

la dérivée temporelle de la latitude devient inférieure à une valeur seuil (0.6) les données ne sont pas considérées. Une validation croisée est effectuée en comparant ce critère avec un autre critère défini par une vitesse seuil du bateau en dessous de laquelle le bateau est considéré comme "en station" (ici lorsque la vitesse du bateau est inférieure à 5.5 noeuds). Pour la suite du travail, le critère sur la variation en latitude sera utilisée dans les différents autres jeux de données continus pour supprimer l'effet des stations.

Enfin les données ainsi validées sont interpolées de façon linéaire sur un intervalle de 30 min sur l'ensemble du parcours. La cohérence des données ainsi traitées est confirmée par les figures du premier niveau de mesure et des mesures intégrées sur 104 puis 488 m (ANNEXE B Fig. 24). De plus la visualisation des sections verticales permet de s'assurer de la cohérence des signaux géophysiques.

Le parcours de la campagne est subdivisé en 8 radiales au travers desquelles le transport de masse sera calculé (Fig. 3). La radiale 2 est divisée en une partie comprenant le trajet méridional au dessus des îles Chesterfield (2a), afin de calculer le transport potentiel du NCJ, et une deuxième partie (2b). Au niveau du Plateau du Queensland, le trajet de la campagne dessine une zone fermée (de la radiale 3 à 6) qui sera désignée comme le trapèze dans la suite de cette étude.

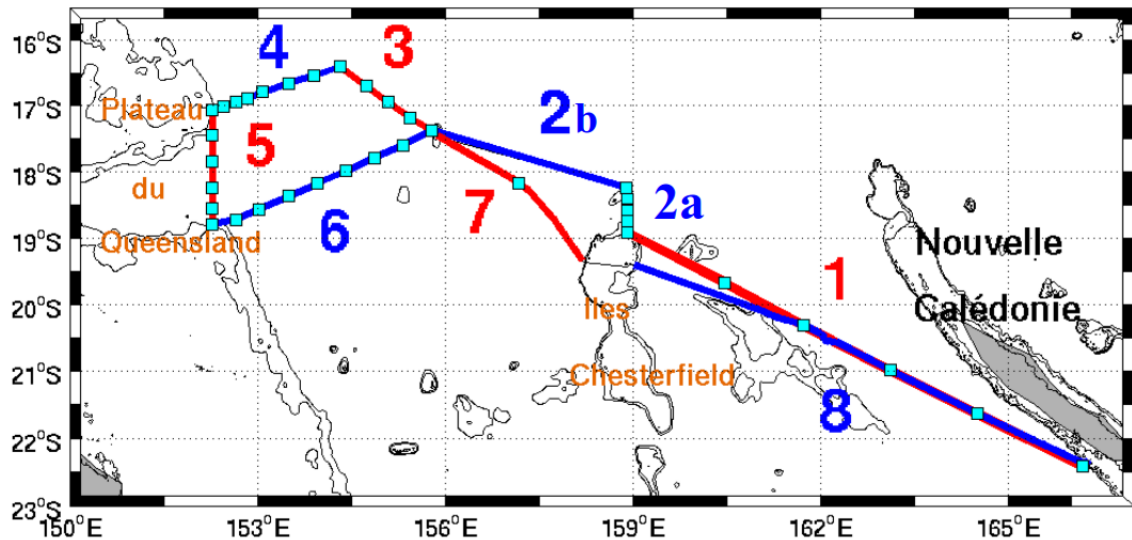


FIGURE 3 – Trajet de la campagne Bifurcation opérée en Sept. 2012 avec la position des stations hydrologiques CTD-O₂ (carrés). Les radiales définies pour les calculs de transport ont été numérotées de 1 à 8 et sont colorées par alternance en rouge et bleu pour bien les différencier. Les lignes fines en noir représentent les isobathes 500 et 1000 m.

La composante orthogonale à chaque radiale, du vecteur vitesse est ensuite estimée pour calculer le transport à travers cette radiale (Fig. 4). Le transport, exprimé en Sverdrup ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), est ensuite calculé de la façon suivante :

$$\sum_{k=1}^n (v_n \Delta x \Delta z) \quad (3)$$

avec :

v_n = composante orthogonale à la section [m s^{-1}]

Δx = résolution spatiale horizontale [m]

Δz = résolution spatiale verticale [m]

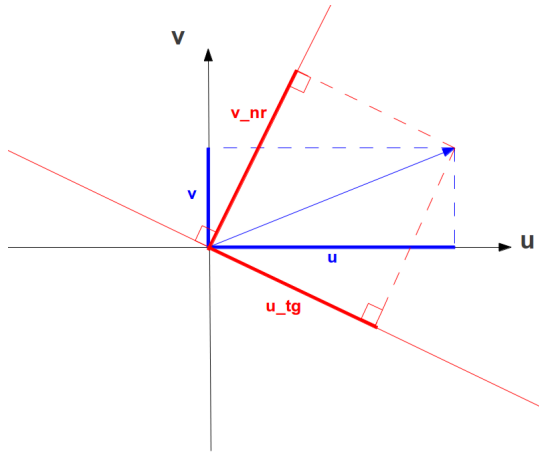


FIGURE 4 – Schéma de projection en composantes orthogonales et tangentielles des courants le long d'une radiale de la campagne. La flèche bleue représente u (resp. v) la composante Ouest-Est (resp. Sud-Nord) du vecteur vitesse, v_{nr} (resp. u_{tg}) la composante orthogonale (resp. tangentielle) à la radiale.

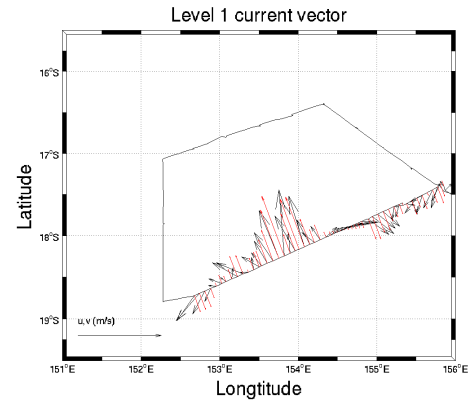


FIGURE 5 – Représentation vectorielle des vitesses [m s^{-1}] mesurées au premier niveau (24 m) par l'ADCP (flèches noires) et de la composante orthogonale (flèches rouges) pour la radiale 6.

Les *Finite Size Lyapunov Exponent* (FSLE) (Aurell et al 1997) représentent un outil mathématique mesurant le taux de séparation des trajectoires de particules initialement proches dans l'espace. Ils permettent ainsi d'identifier des structures fines à submésos-échelle, les Structures Lagrangiennes Cohérentes (ou LCSs) qui peuvent être soit répulsives soit attractives. Ainsi ces structures diagnostiquent l'impact des mouvements sur la dispersion des traceurs dans l'eau (température, salinité, chlorophylle-a...) et peuvent expliquer l'insertion de masses d'eau d'origines différentes entre deux masses d'eau de même origine.

Dans cette étude les FSLE sont calculés à partir des champs de courant géostrophique déduits de l'altimétrie dans des régions au large qui ne sont pas influencées par la dynamique côtière, suivant la méthode et le code de d'Ovidio et al. (2004). Le même code a déjà été utilisé par Nencioli et al. (2011) lors de la campagne Latex10 afin d'identifier les LCSs et lors de la campagne OUTPACE qui s'est déroulée en mars 2015 grâce au programme SPASSO⁶. Les FSLE sont calculés comme décrit par l'équation (4). Le temps d'intégration est fixé à 15 jours, soit la durée de la campagne. Dans ce calcul un grand nombre de particules est relâché à l'instant initial avec une résolution de 0.05° (δ_0). Ces particules sont éloignées de 0.3° à l'instant final (δ_f). Le calcul va intégrer les trajectoires de ces particules en utilisant les données de courant au pas de temps précédent, soit arrière en temps (mode backward), ou au pas de temps suivant, soit avant en temps (mode forward). L'utilisation des données

6. <http://www.mio.univ-amu.fr/doglioli/>

de courant AVISO impose un pas de temps d'un jour pour l'intégration. Ainsi le FSLE ($\lambda(x, t, \delta_0, \delta_f)$) à la position x et au temps t est calculé à partir du temps τ nécessaire pour que la trajectoire démarrée au temps t et à distance δ_0 de x atteigne une distance δ_f .

$$\lambda(x, t, \delta_0, \delta_f) \equiv \frac{1}{\tau} \log \frac{\delta_f}{\delta_0} \quad (4)$$

Dans cette étude les structures attractives, associées à une intégration en mode backward correspondent à une convergence au temps j de particules initialement éloignées ($j-15$) et les structures répulsives, associées à une intégration en mode forward correspondent à une divergence des trajectoires de particules initialement proches ($j-15$) qui vont s'éloigner jusqu'au temps j (Fig. 6). Cependant si cette interprétation peut être valable en général, il faut faire attention à l'interprétation des résultats FSLE pour identifier des zones de convergence ou divergence avec des courants AVISO non-divergents. De plus, le front de divergence peut être advecté ce qui impose une incertitude sur ce diagnostic. Ainsi, ici, seules les structures attractives sont estimées et superposées avec les données TSG.

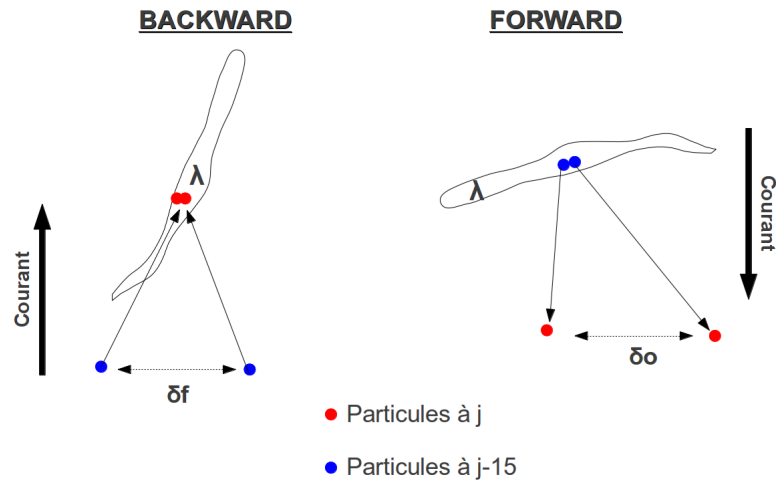


FIGURE 6 – Schéma illustratif du calcul des FSLE en mode arrière (backward) et en mode avant (forward). Les patchs représentent les iso-contour des exposants de Lyapunov (λ en jour^{-1}). En mode backward le patch représente la zone dans laquelle des particules, qui étaient éloignées de la distance d à $j-15$, vont converger jusqu'au jour j . En mode forward le patch représente la zone dans laquelle des particules étaient proches à $j-15$, et qui seront ensuite éloignées de d au pas de temps j .

Un autre code a été développé pour calculer, à partir des courants AVISO, la trajectoire de 25 particules relâchées à une certaine position (x, y) à l'instant t . Les particules sont initialement positionnées en suivant le trajet de la radiale 3 de BIFURCATION avec une résolution de $\frac{1}{4}^\circ$. Le code a été écrit de façon à ce que la trajectoire puisse être calculée, à l'aide d'un simple schéma Eulérien (équation (5)), en avançant dans le temps ou en reculant dans le temps. Ainsi il est possible de retrouver à partir de

l'instant $t+1$ la position de la particule à t (et inversement si on avance dans le temps). Pour le calcul la vitesse est interpolée en utilisant les quatre valeurs de vitesse AVISO autour de la particule. De plus la position de la particule est calculée avec un pas de temps de 6 heures pour assurer un meilleur suivi temporel des trajectoires des particules dans une zone soumise à de forts courants et une forte variabilité.

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= x_t \pm u\Delta t \\y_{t+1} &= y_t \pm v\Delta t\end{aligned}\tag{5}$$

III Résultats

III.1 Transports de masse et masses d'eau

Un des objectifs principaux de la campagne BIFURCATION est de caractériser la zone de déflexion du NCJ lors de sa rencontre au niveau du plateau du Queensland (vers 152°E , voir la figure 3). De façon à appréhender le rôle potentiel du NCJ sur les alimentations du flux de masse vers l'équateur et vers le Sud (comme source de l'EAC, voir la figure 2) le transport de masse est calculé pour chaque radiale (Fig. 7).

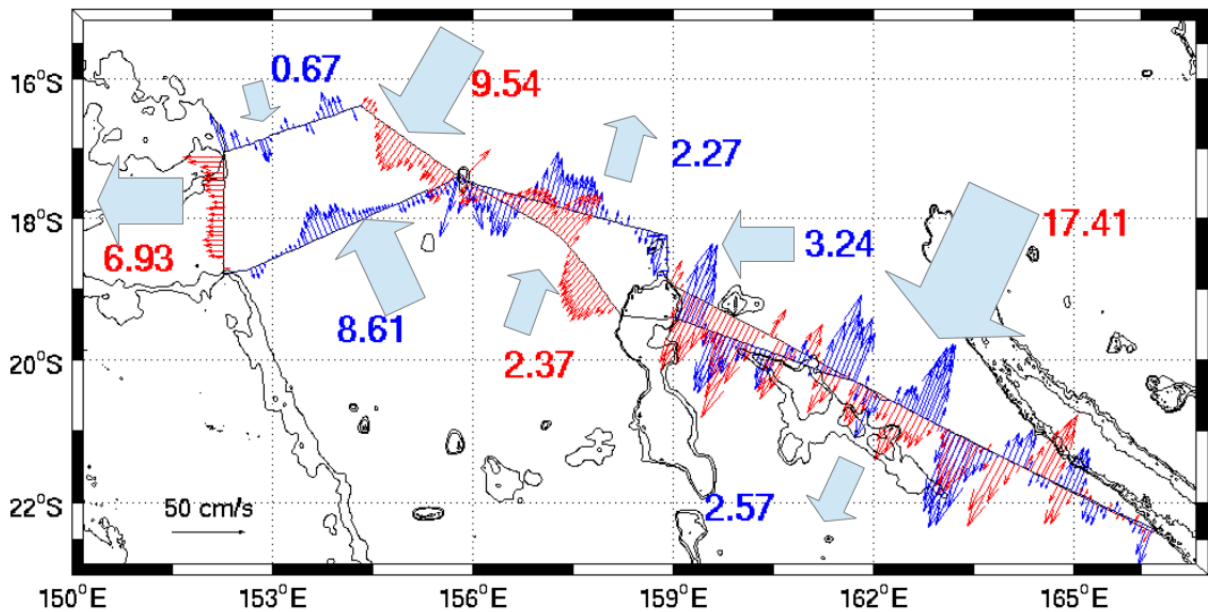


FIGURE 7 – Transports de masse [Sv] intégrés sur 488 m à partir des données ADCP pour chaque section de la campagne BIFURCATION (voir Fig. 3). Les vecteurs en rouge (resp. en bleu) représentent les composantes orthogonales du champ de vitesse pour les différentes sections. Les lignes fines en noir représentent les isobathes 500 et 1000 m. Un transport sera considéré comme positif lorsque la composante zonale sera dirigée vers l'Ouest.

Les transports sont globalement dirigés vers l'Ouest hormis ceux des radiales 2b et 7. La radiale 1 présente le transport le plus important avec 17.41 Sv. Cette radiale ne sera pas prise en compte dans les calculs de transport globaux car cette région est non seulement protégée par la topographie et la

présence de la Nouvelle-Calédonie mais en plus la présence du NCJ n'est pas vraiment détectable du fait de la forte activité de méso-échelle. De forts transports sont mesurés au niveau de la zone de bifurcation au niveau des radiales 3, 5 et 6, et seule la radiale 4 présente un transport extrêmement faible (0.67 Sv). Les deux dernières radiales (7 et 8) présentent des transports moyens d'environ 2.5 Sv.

Les transports calculés au niveau des radiales 2, 3 et 5 (0.97, 9.54 et 6.93 Sv *resp.*) mettent en évidence un transport dirigé vers l'Ouest. Le transport à l'entrée de la mer de Corail peut être estimé, en prenant en compte les radiales 2 et 3, à un total d'environ 10.5 Sv. En ce qui concerne la bifurcation du NCJ vers le Nord, la radiale 6 est cohérente avec les études précédentes avec un transport de 8.61 Sv vers le Nord-Ouest. Enfin les estimations de la figure 7 suggèrent que la conservation de la masse à l'intérieur du trapèze n'est pas respectée. En effet le bilan fait apparaître 18.82 Sv en entrée alors que seulement 6.93 Sv sortent de cette zone soit 11.89 Sv qui sont manquants dans cette région. Cet ordre de grandeur est aussi similaire à l'estimation de l'effet des tourbillons le long des radiales 1 et 8. En effet la radiale 1 a été quasiment répétée lors de la campagne BIFURCATION et offre une possibilité unique de pouvoir estimer l'impact de l'activité de méso-échelle sur des calculs de transports. La comparaison des transports le long des radiales 1 et 8 montre une forte sensibilité du calcul de transport de masse à l'activité de méso-échelle. Les transports cumulés, représentés pour ces deux radiales montrent la divergence des résultats finaux pour ces radiales quasi identiques (Fig. 8). L'incertitude pour ces radiales est d'environ 15 Sv pour une échelle de variation assez courte (15 jours d'écart entre les réalisations). De plus les radiales 2 et 7 permettent également de mesurer la sensibilité de la méthode de calcul du transport car elles sont quasiment identiques (Fig. 8). Pour ces radiales, les transports cumulés divergent peu en l'espace de 8 jours entre l'échantillonnage de la radiale 2 et de la radiale 7. Ces résultats confirment aussi la forte variabilité des transports calculés.

Afin d'identifier plus clairement les effets de ces tourbillons, il est nécessaire d'identifier les structures de méso-échelle impactant les sections de la campagne grâce aux profils verticaux des vitesses mesurées par l'ADCP (ANNEXE C) et d'étudier leur historique grâce aux données altimétriques qui permettent de faire un suivi de ces tourbillons au cours du temps.

Les mesures *in situ* des courants en surface (premier niveau à 24 m) sont mises dans le contexte des champs de surface journaliers AVISO qui ont été étudiés du 1^{er} Août au 31 Octobre 2012, ce qui correspond à une période d'un mois précédent le début de la campagne et d'un mois et demi après la fin de la campagne. Cette comparaison a permis de mettre en évidence neuf structures cohérentes qui ont eu une influence sur les radiales (Fig. 9).

Les caractéristiques et les conditions de déplacement de ces tourbillons sont récapitulées dans le tableau I. Le suivi des tourbillons s'est limité à des définitions très basiques : le diamètre d'un tourbillon est défini par le contour fermé de surélévation de la surface libre et le centre du tourbillon par le maximum local de surélévation. Ainsi les critères du tableau I sont calculés de manière qualitative avec une précision de l'ordre de 50 km. Les vitesses de déplacement des tourbillons sont calculées en mesurant la distance entre la position de formation et de disparition du centre du tourbillon. Le

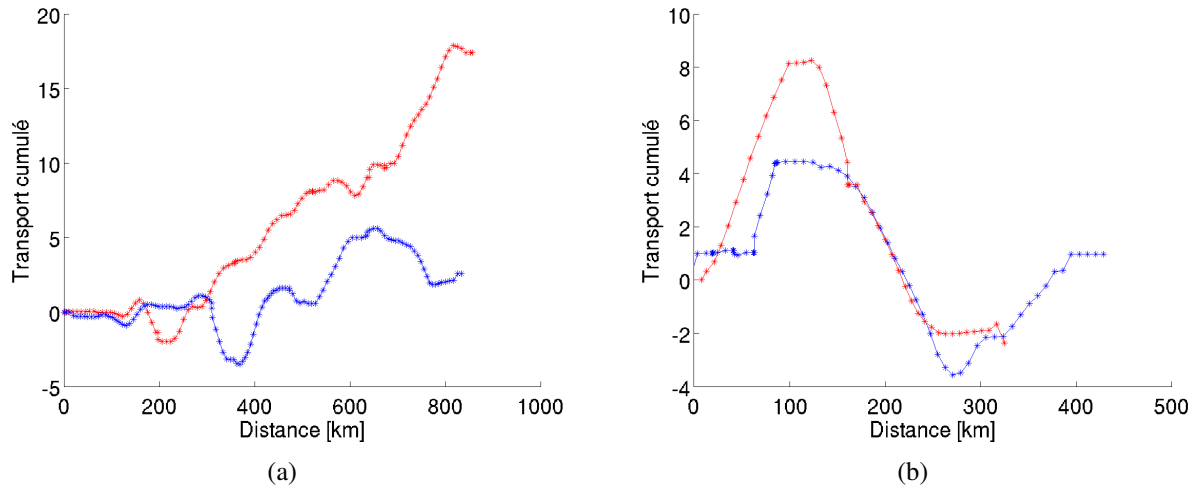


FIGURE 8 – Transports cumulés [Sv] en fonction de la distance [km] le long des radiales 1 (rouge) et 8 (bleue) (a), et des radiales 2 (bleue) et 7 (rouge) (b). Un transport positif correspond à un transport vers l'Ouest.

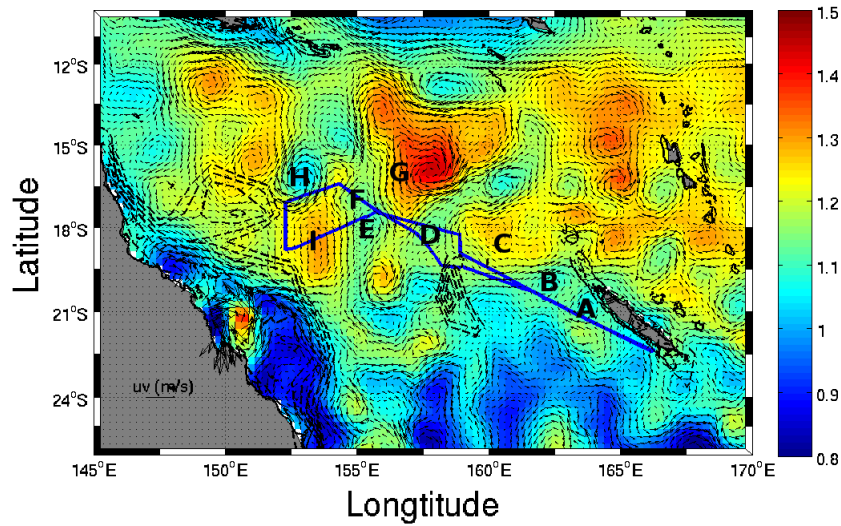


FIGURE 9 – Champ de courant de surface issu des données AVISO [m s^{-1}] du 8 août 2012 (1er jour de campagne BIFURCATION) superposé à l'anomalie de hauteur de surface de l'eau (échelle de couleur en mètre). Les lignes en noir correspondent aux isobathes 200, 400, 600, 800 et 1000 m. Neuf structures ont été identifiées (et labellisées de A à I) comme impactant les différentes sections pendant la campagne Bifurcation dont le trajet est tracé en bleu foncé.

diamètre moyen des tourbillons est lui mesuré en estimant la taille moyenne, pendant sa durée de vie, du tourbillon en degré puis cette estimation est convertie en kilomètres. Ainsi ces critères sont sous-estimés et ne donnent qu'un ordre de grandeur des caractéristiques des tourbillons.

La moyenne des différences de longitude (tableau I : ΔLon) entre la disparition et la formation des tourbillons (3.6°) met tout de même en évidence la présence d'un fort courant moyen dirigé vers l'Ouest avec des vitesses de déplacement en moyenne de 6 km j^{-1} . Le tourbillon G est le plus remarquable de tous car il présente des caractéristiques quasiment 2 fois supérieures aux moyennes des tourbillons étudiés. En effet, c'est le plus large de tous et le seul à s'être formé à l'entrée de la mer de

TABLE I – Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des tourbillons influant sur les sections de la campagne BIFURCATION. *Vitesse de prop.* représentent la vitesse de propagation des tourbillons ; ΔLon (resp. ΔLat), la différence [°] entre la longitude (resp. latitude) du coeur du tourbillon au moment de sa formation et la longitude (resp. latitude) du coeur du tourbillon au moment de sa disparition ou de la fin de son suivi. Lorsque les dates sont précédées des signes < ou >, cela signifie que les tourbillon étaient encore présent avant ou après mais que le suivi du tourbillon s'arrête à cette date. Les distances sont estimées avec une précision de 50 km. La vorticité est également reportée (A : anticyclonique, C :cyclonique).

Identifiant	Formation	Disparition	Diamètre moyen [km]	Distance parcourue [km]	Temps de suivi [j]	Vitesse de prop. [km j ⁻¹]	ΔLon [°]	ΔLat [°]	Vorticité
A	25/08/12	02/10/12	100	180	38	4.7	1.7	-0.3	C
B	25/08/12	02/10/12	100	40	38	1	0.3	0.3	C
C	27/08/12	09/10/12	150	165	43	4	1.5	0.5	A
D	11/08/12	>31/10/12	150	550	81	6.8	5.2	0	C
E	20/08/12	>31/10/12	100	470	72	6.5	4.3	-1.2	C
F	24/08/12	17/09/12	50	170	24	7	1.5	-0.4	C
G	<01/08/12	>31/10/12	400	935	92	10	8.7	0.2	A
H	10/08/12	>31/10/12	150	560	82	6.8	5.3	-0.3	C
I	<01/08/12	>03/10/12	250	400	64	6.3	3.8	-0.5	A
Moyenne			160	385	59	5.9	3.6	-0.2	

Corail (vers 15°S - 163°E) dans la zone de passage du NVJ. Sa vitesse de propagation est plus rapide (10 km j⁻¹), ce qui lui a permis de parcourir 8.7° en longitude (soit environ entre 950 et 1000 km) en 92 jours et d'atteindre la radiale 3.

Sur l'extension verticale de ces tourbillons, AVISO ne peut apporter d'informations supplémentaires cependant les sections verticales des vitesses mesurées par l'ADCP mettent en évidence une influence des tourbillons sur la verticale entre 200 et 500 m.

L'analyse de l'activité à méso-échelle a donc permis de mettre en évidence un certain nombre de tourbillons influant sur les radiales. Par la suite l'analyse des profils CTD-O₂ des stations hydrologiques permettra de mettre en évidence les caractéristiques des masses d'eau rencontrées et observées pendant la campagne.

Jusqu'ici les analyses des données *in-situ* et satellitaires ont permis de mettre en évidence la forte turbulence de la mer de Corail et la difficulté associée à définir son rôle sur la circulation climatologique via la méso-échelle. A partir des données satellitaires, neuf tourbillons ont été identifiés comme affectant les radiales. Des analyses hydrologiques des masses d'eau vont permettre de caractériser l'origine et le parcours de certaines masses d'eau piégées par des tourbillons.

Pour étudier ces éventuelles interactions ainsi que l'impact de l'activité à méso- et subméso-échelle sur la verticale, les données de température potentielle, salinité absolue et concentration en

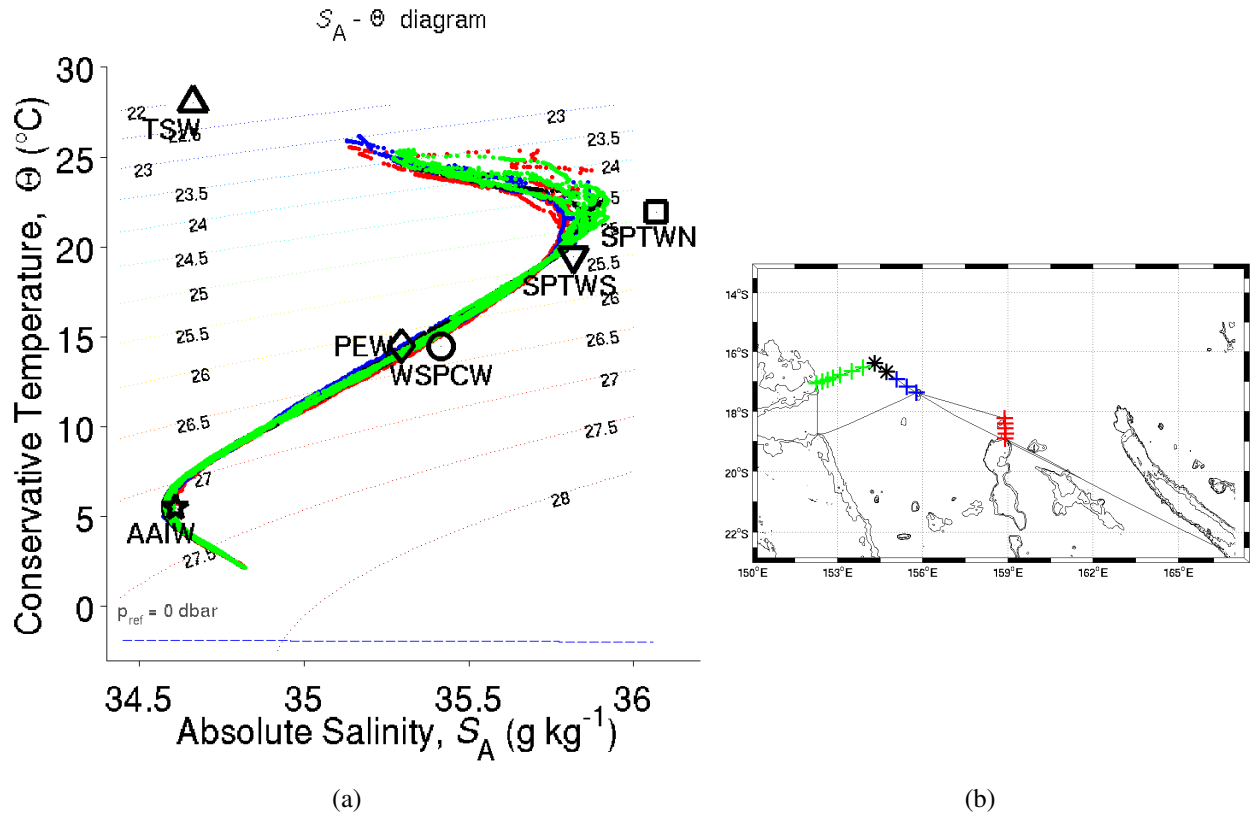


FIGURE 10 – (a) Diagramme Température-Salinité des stations hydrologiques (0-2000 m) situées sur le trajet de BIFURCATION en mer de Corail. Les lignes d'isodensité apparaissent en pointillés. Les symboles (\triangle , \square , ∇ , \diamond , \circ , $*$) représentent les caractéristiques des masses d'eau à l'entrée de la mer de Corail (entre la N-C et le Vanuatu) selon Gasparin et al. (2014). (b) Position des stations hydrologiques représentées en (a) suivant le même code couleur.

oxygène dissous de la CTD- O_2 de la rosette sont utilisées pour tracer des diagrammes température-salinité (T-S) et salinité-oxygène (S- O_2). Dans la suite, il sera fait référence uniquement à la température, la salinité et l'oxygène pour ces quantités. Les figures de ces diagrammes permettent de mettre en évidence les caractéristiques des différentes masses d'eau traversées lors du trajet de la campagne. Les stations ont été regroupées en fonction de leur zone géographique et de leur potentielle similarité du point de vue de la signature en température-salinité-oxygène (Fig. 10(b)). Ainsi la radiale 3 de la campagne est divisée en deux sous-groupes de stations correspondant à la délimitation des deux tourbillons (F en noir et G en bleu) repérés précédemment (Fig. 10(b)). Le diagramme T-S montre un schéma général cohérent avec les résultats de Gasparin et al. (2014) mais aussi une grande proximité dans la composition des eaux des différentes sections (Fig. 10(a)). Pour essayer de différencier les masses d'eau, un agrandissement est réalisé sur les eaux de la thermocline inférieure (Fig. 11(a)). Ainsi les eaux de la branche la plus au Sud du tourbillon G (bleu) sont plus proches de la signature de la PEW. Les eaux des sections au-dessus des îles Chesterfield (rouges) semblent, quant à elles, être plus proches de la WSPCW ce qui correspond à une signature plus forte du NCJ. Les sections de la radiale 4 (vertes) sont comprises entre les sections des îles Chesterfield (rouges) ce qui met en évidence une certaine proximité entre elles. Les deux profils du tourbillon F (noirs) sont plus difficiles à caractériser car les eaux de la thermocline inférieure semblent être issues d'un mélange entre les

masses d'eau de la PEW et de la WSPCW.

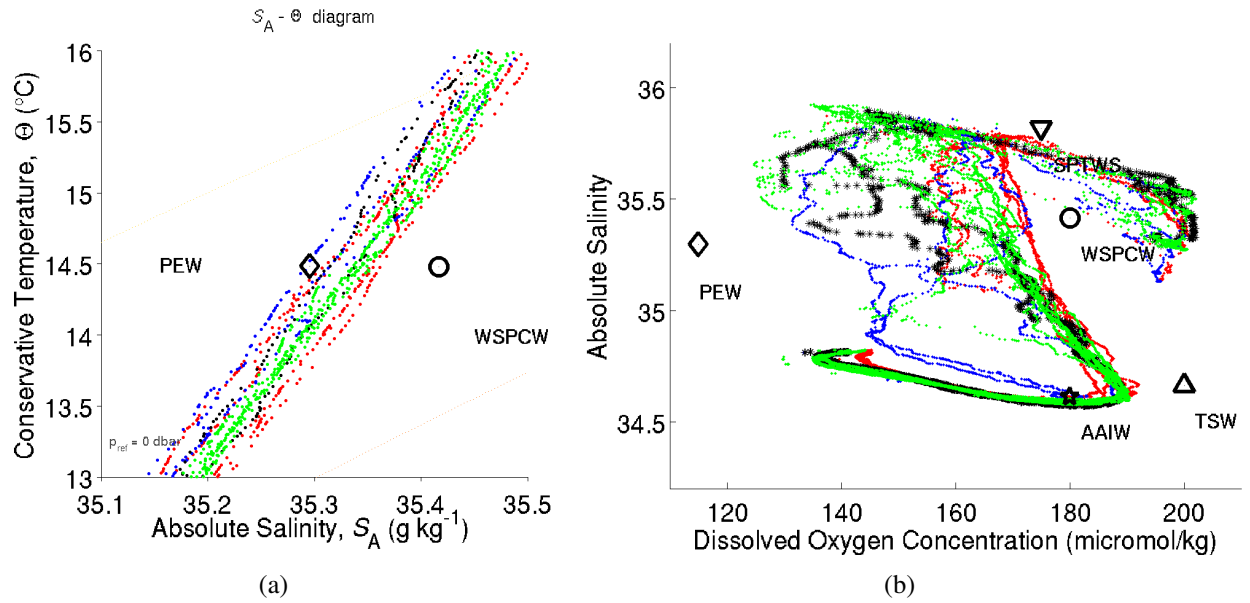


FIGURE 11 – (a) Diagramme T-S limité à la thermocline inférieure. (b) Diagramme Salinité-O₂ des stations hydrologiques (0-2000 m) situées sur le trajet de BIFURCATION (voir Fig. 10(b)). Les principales masses d'eau de la région sont identiques à celles définies sur la figure 10. La SPTWN n'apparaît pas car elle est éloignée des profils considérés. Les lignes d'isodensité apparaissent en pointillés.

Pour mettre en évidence des masses d'eau ayant des origines différentes la concentration en oxygène dissous apparaît comme la caractéristique la plus discriminante. A titre de comparaison, les caractéristiques des eaux à l'entrée de la mer de Corail (extraites de Gasparin et al., 2014) sont indiquées. Les profils représentés sont sensiblement éloignés de ces caractéristiques, ce qui suggère la présence d'un mélange subi par les masses d'eau échantillonnées. Sur le diagramme S-O₂ les eaux des sections du tourbillon G (bleues) sont marquées par un minimum d'oxygène ce qui laisse supposer que ce sont des eaux plus vieilles. Ces eaux plus vieilles et ce minimum d'oxygène correspondent à la PEW, caractéristique du NVJ, même si une différence d'environ 20 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ sépare les concentrations en oxygène dissous des profils du tourbillon G (bleus) et de la PEW. Grâce à ce diagramme il est donc possible de distinguer deux types de masse d'eau : une première catégorie autour des profils des îles Chesterfield (rouge), présentant des concentrations fortes en oxygène dissous (entre 170 et 180 $\mu\text{mol kg}^{-1}$) et une deuxième catégorie composée de deux profils du tourbillon G (bleus) et un profil de la radiale 4 (vert) caractérisée par un minimum d'oxygène dissous (entre 140 et 150 $\mu\text{mol kg}^{-1}$). Au vu des caractéristiques de ces masses d'eau, il est possible d'imaginer un échange entre les deux jets (NCJ et NVJ).

III.2 Traceurs des masses d'eau en surface et chlorophylle-a

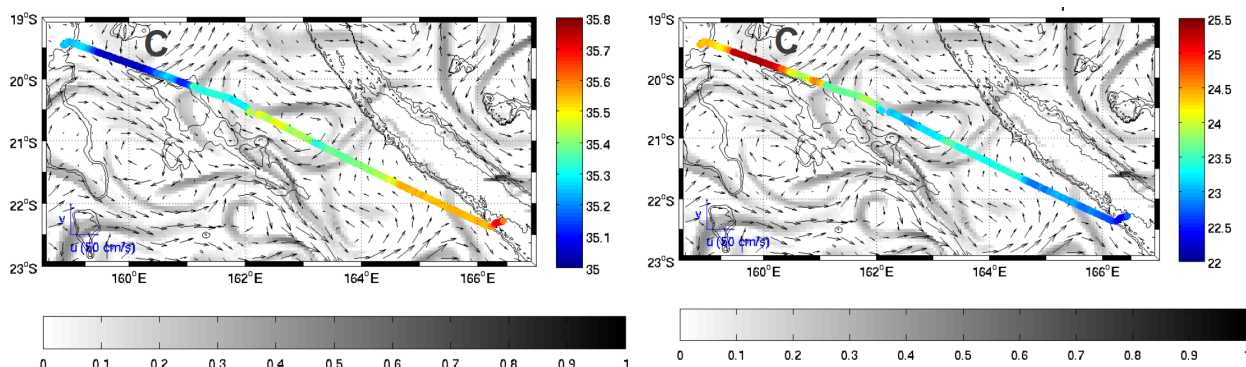


FIGURE 12 – Carte des coefficients moyens FSLE [jour^{-1}] (barre des gris en bas) en mode backward avec les courants de surface AVISO [m s^{-1}]. La salinité [psu] et la température [$^{\circ}\text{C}$] de surface mesurées par le ThermoSalinoGraphe (barre de couleur à droite) par échantillonnage du transect 8 de la campagne BIFURCATION sont superposées. Les champs sont représentés pour la période du 12/09 au 15/09 2012. Les lignes fines en noir indiquent les isobathes 500 et 1000 m.

Les FSLE sont étudiés conjointement avec les données de température et salinité mesurées par le TSG. Certains fronts marqués sur les FSLE portent ainsi une signature en température et salinité. En effet sur les données TSG il est possible d'identifier la présence de certains tourbillons. Sur la figure 12 des eaux plus chaudes et moins salées sont clairement piégées dans le tourbillon C qui, d'après son historique, s'est formé plus au Nord de la mer de Corail où les eaux sont plus chaudes et dessalées.

Une correspondance entre structures convergentes et fronts de SST ou SSS est assez évidente sur les représentations en Longitude-Latitude (Fig. 13 (a) et 14 (a)). Pour étayer cette observation des courbes représentant la salinité et la température en fonction de la distance journalière parcourue sont superposées aux données de FSLE sur les 3 jours encadrant le jour de mesure du TSG (Fig. 13 (b) et 14 (b)). Cette superposition sur 3 jours consécutifs des FSLE montre la forte variabilité induite par la circulation à méso-échelle et subméso-échelle. En effet les données du TSG, que ce soit en température ou en salinité, mettent en évidence une variabilité de l'ordre de 2°C et 0.4 psu. Il faut toutefois modérer la variation en température car elle peut être impactée par des effets induits par le cycle diurne. Il est en plus remarquable que certains pics des données du TSG en température ou salinité correspondent à des pics de FSLE ce qui tend à montrer l'influence de ces structures sur la présence de fronts (Fig. 13 (b) et 14 (b)). Ainsi les structures à subméso-échelle ont un impact direct sur la répartition locale des caractéristiques en température et salinité des masses d'eau. Lors de cette campagne de nombreux fronts marqués en salinité et en température présentaient une correspondance avec les FSLE journaliers superposés. Cependant cette correspondance avec les structures cohérentes ne suffit pas à expliquer tous les fronts.

Enfin une comparaison avec les données satellites SMOS et l'atlas ISAS permet de mettre en évidence la variation journalière des données de température et salinité. Cette variation n'est pas marquée dans les données SMOS, qui montrent une variabilité bien plus faible que celle observée *in-situ*. Elle n'est pas non plus comprise systématiquement dans la barre d'erreur des données de l'atlas ISAS.

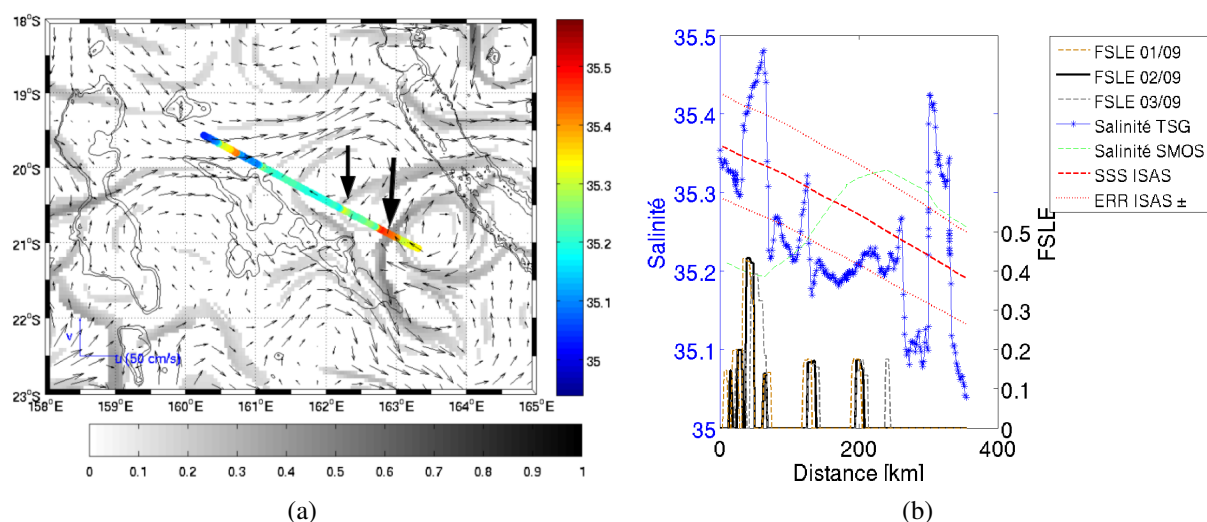


FIGURE 13 – (a) Carte des coefficients FLSE [jour^{-1}], barre des gris en bas) du mode backward et des courants de surface AVISO [m s^{-1}] avec la salinité de surface [psu] mesurée par le TSG (barre de couleur à droite) le long de la section 1 (le 2/09/2012). Les lignes fines en noir indiquent les isobathes 500 et 1000 m. (b) Section de la salinité de surface du TSG (le 2/09/2012), de la moyenne hebdomadaire du satellite SMOS (2/09 au 8/09 2012 en tirets vert) et de la moyenne mensuelle de l'atlas ISAS (mois de septembre en tirets rouges avec en pointillés rouges les erreurs associées) en fonction de la distance [km] (163.5°E à 160°E). Les coefficients FSLE du mode backward sont représentés pour les dates allant du 1er au 3 septembre 2012 [jour^{-1}].

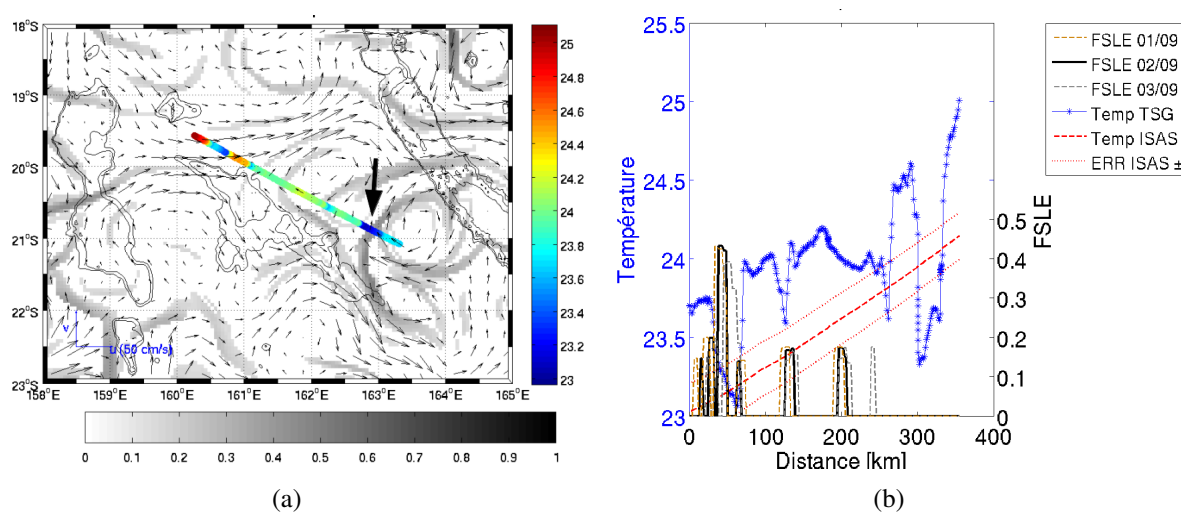


FIGURE 14 – (a) Carte des coefficients FLSE [jour^{-1}], barre des gris en bas) du mode backward et des courants de surface AVISO [m s^{-1}] avec la température de surface [$^\circ\text{C}$] mesurée par le TSG (barre de couleur à droite) le long de la section 1 (le 2/09/2012). Les lignes fines en noir indiquent les isobathes 500 et 1000 m. (b) Section de la température de surface du TSG (le 2/09/2012) et de la moyenne mensuelle de l'atlas ISAS (mois de septembre en tirets rouges, avec en pointillés rouges les erreurs associées) en fonction de la distance [km] (163.5°E à 160°E). Les coefficients FSLE du mode backward sont représentés pour les dates allant du 1er au 3 septembre 2012 [jour^{-1}].

Cependant ce dernier point s'explique par le fait que les données ISAS sont mensuelles, donc extrêmement lissées dans le temps et par un faible nombre de mesures (en l'absence d'observation ce type

d'atlas reproduit la climatologie moyenne). L'allure générale et les ordres de grandeur sont toutefois cohérent avec les données *in-situ* mesurées par le TSG.

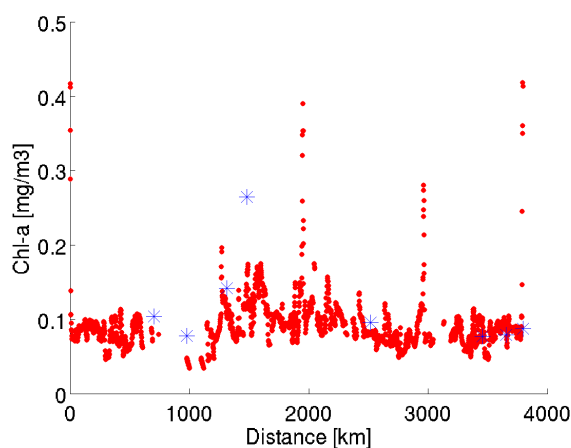


FIGURE 15 – Concentrations en chlorophylle-a [mg m^{-3}] des données composite MODIS sur 15 jours (en rouge) et des données *in-situ* (en bleu) mesurées au niveau des stations hydrologiques CTD-O₂ en fonction de la distance totale parcourue du début à la fin de la campagne [km]. Ces données *in-situ* sont intégrées jusqu'à la profondeur du maximum de chlorophylle-a (entre 50 et 100 m).

La même comparaison a été réalisée avec des données de concentration en chlorophylle-a collectées lors de la campagne BIFURCATION. Cependant, les mesures de chlorophylle-a ont été réalisées de façon discrète pendant quelques stations hydrologiques, ce qui ne permet pas d'obtenir des données de chlorophylle-a sur l'ensemble du trajet de la campagne. Pour pallier à ce manque ce sont les données de chlorophylle-a issues de mesures satellites (composite MODIS sur 15 jours) qui sont utilisées. Pour valider l'utilisation du composite les données discrètes de chlorophylle-a sont comparées aux valeurs du composite MODIS (Fig. 15). Les mesures de chlorophylle-a *in situ* ont été intégrées jusqu'à la profondeur du maximum de chlorophylle-a. En effet les données satellites sont des approximations de la concentration en chlorophylle-a de surface, or la prise en compte pour cette comparaison des données *in situ* de la campagne jusqu'à la profondeur du maximum de chlorophylle-a pourrait biaiser cette comparaison en augmentant la moyenne dite de "surface" des données *in situ*. Les variations de ces deux mesures suivent la même dynamique générale et les ordres de grandeurs des concentrations mesurées par MODIS ou en *in situ* sont sensiblement identiques ce qui permet de donner une confiance relative en l'utilisation des données composites MODIS. Les données biogéochimiques de concentration en *Trichodesmium spp.* et en unicellulaires fixateurs d'azote UCYN-A1 de la campagne BIFURCATION sont également récupérées pour être comparées aux données FSLE. Seules les concentrations supérieures à 10^2 copies.L⁻¹+1 pour *Trichodesmium spp.* et 10^4 copies.L⁻¹+1 pour UCYN-A1 du gène *nifH*, correspondant à un critère présence/absence de l'espèce (Moisander et al., 2010; Bonnet et al., en révision) sont superposés à la carte composite de chlorophylle-a. Les isocontours des FSLE, correspondant au jour au cours duquel ces fortes concentrations ont été mesurées, permettent de mettre en évidence une correspondance entre forte structure frontale et forte concentra-

tion en espèces phytoplanctoniques (Fig. 16 et 17). En effet, les données biogéochimiques supérieures au critère présence/absence du gène *nifH* correspondent à chaque fois à des valeurs significatives en chlorophylle-a ($\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$) et en FSLE ($\sim 0.1\text{-}0.2 \text{ jour}^{-1}$) (tableau II). Cependant aucune relation quantitative ne peut être mise en évidence entre concentration en chlorophylle-a et FSLE ou concentration en espèce biologique et FSLE. De plus les fortes concentrations en chlorophylle-a ne sont pas toujours associées à des structures frontales. En effet la topographie ainsi que d'autres processus physiques (dépôts atmosphériques, conditions d'upwelling...) peuvent expliquer la forte abondance de ces espèces.

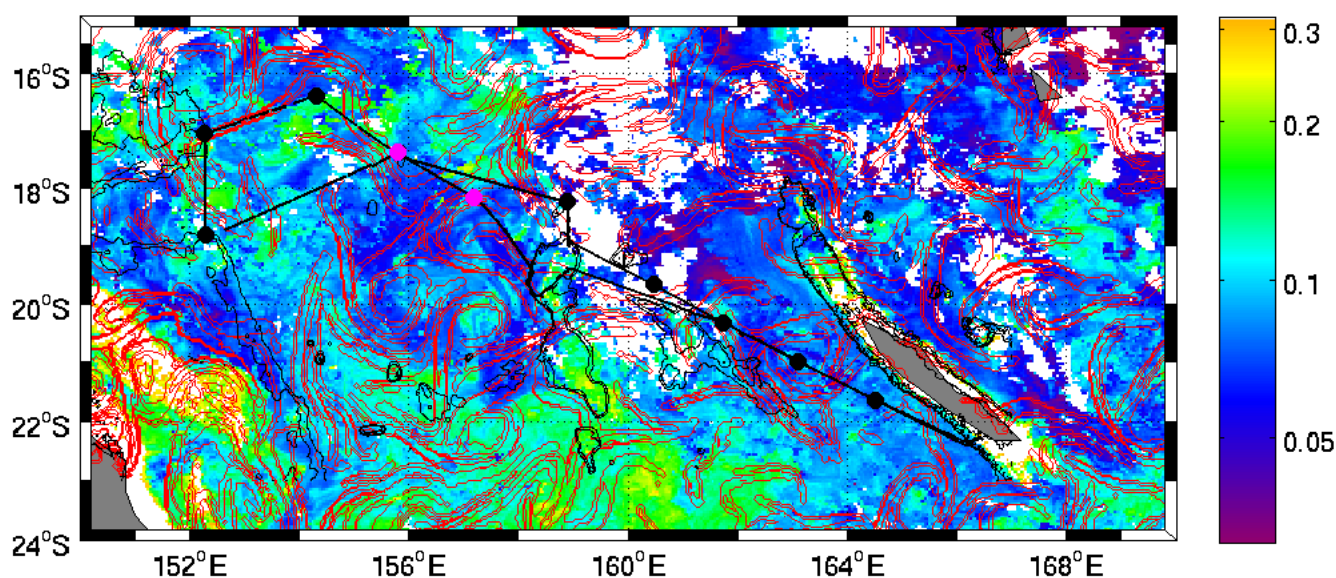


FIGURE 16 – Carte composite MODIS (15 jours) de la concentration en chlorophylle-a (échelle $\log_{10} [\text{mg m}^{-3}]$) sur laquelle est superposée en magenta les concentrations de *Trichodesmium spp.* supérieures au seuil de $10^2 \text{ copies.L}^{-1} + 1$ du gène *nifH*, en noir les stations échantillonnées pour lesquelles l'abondance de *Trichodesmium spp.* est inférieure au même seuil. Les iso-contours des FSLE en mode backward [jour^{-1}] datant du 9 sept. 2012 (date à laquelle ont été échantillonnées les deux stations en magenta) apparaissent en rouge. Les lignes fines en noir représentent les isobathes 500 et 1000 m.

TABLE II – Tableau récapitulatif des données biogéochimiques (*Trichodesmium spp.* & *UCYNA1*) de la campagne BIFURCATION et de la chlorophylle-a (MODIS composite 15 jours), des FSLE et du module des vitesses AVISO co-localisé aux points de prélèvements des données biogéochimiques. (LD = limite de détection)

Date	Station	<i>Trichodesmium spp.</i>	<i>UCYNA1</i>	Chlorophylle-a [mg m^{-3}]	FSLE [jour^{-1}]	Module vitesse [m s^{-1}]
		[$\log_{10}(\text{nifH copies.L}^{-1} + 1)$]				
04/09/2012	11	2.36	3.81	0.09	0.14	0.26
09/09/2012	36	3.45	2.78	0.11	0.26	0.21
13/09/2012	37	< LD	3.86	0.09	0.18	0.16
13/09/2012	38	< LD	4.37	0.09	0.11	0.10
13/09/2012	39	< LD	4.66	0.08	0.03	0.07

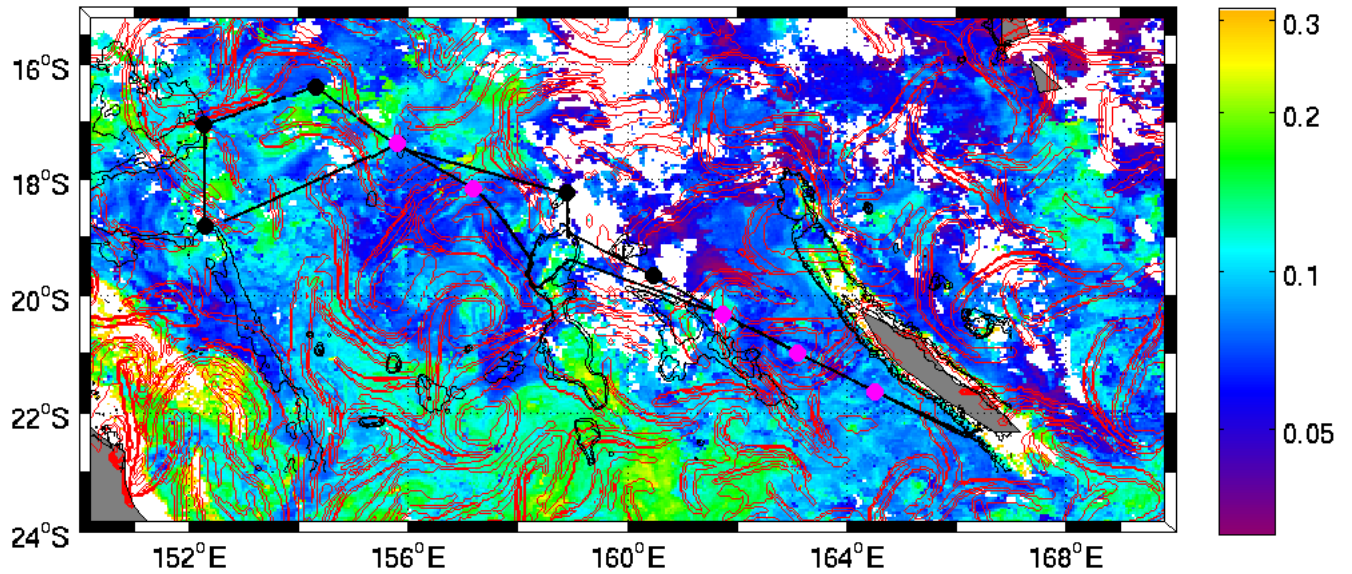


FIGURE 17 – Carte composite MODIS (15 jours) de la concentration en chlorophylle-a (échelle \log_{10} [mg m^{-3}]) sur laquelle est superposée en magenta l'abondance des unicellulaires fixateurs d'azote *UCYNAl* supérieure au seuil de 10^4 copies. $\text{L}^{-1}+1$ du gène *nifH*, en noir les stations échantillonnées pour lesquelles l'abondance de *UCYNAl* est inférieure au même seuil. Les iso-contours des FSLE en mode backward [jour^{-1}] datant du 13 sept. 2012 (date à laquelle ont été échantillonnées les dernières stations, entre 161 et 165°E, en magenta) apparaissent en rouge. Les lignes fines en noir représentent les isobathes 500 et 1000 m.

IV Discussion

IV.1 Transports de masse et tourbillons

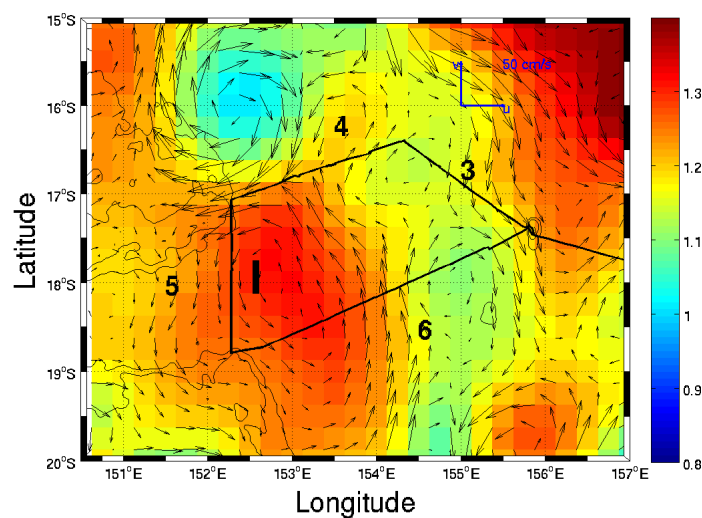


FIGURE 18 – Champ de courant de surface issu des données AVISO [m s^{-1}] du 8 sept. 2012 superposé à l'anomalie de hauteur de surface de l'eau (échelle de couleur en mètres). Les sections 3, 4, 5 et 6, ainsi que le tourbillon I, sont identifiés et labellisés. Les lignes fines en noir représentent les isobathes 500 et 1000 m.

L'ensemble des transports calculés à partir des mesures ADCP représentés sur la figure 7, présentent des ordres de grandeurs cohérents avec les travaux de Gasparin (2012) et de Kessler et Cravatte (2013). De plus ils confirment les travaux précédents sur la présence d'un transport dirigé vers l'Ouest. En effet Gourdeau et al. (2008) ont estimé le transport entrant en mer de Corail, par l'Est, à 12 Sv au nord de la Nouvelle Calédonie ce qui est du même ordre de grandeur que les 10.5 Sv calculés dans cette étude.

Cependant ils permettent également de mettre en évidence la sensibilité du calcul de transport de masse, à petite échelle temporelle, dans cette zone soumise à une forte activité de méso-échelle. En effet la différence entre le transport calculé pour la radiale 1 et 8 montre la forte influence des tourbillons sur les transports mesurés et donne un ordre de grandeur de l'erreur qui peut être commise (~ 10 -12 Sv) lorsque des données *in-situ* sont utilisées pour de tel calcul.

De plus il faut rappeler que le bilan dans le trapèze n'est pas équilibré car environ 12 Sv manquent pour fermer le budget. Or les processus verticaux ne semblent pas suffisants pour expliquer cette absence (perte de masse par subduction) car cette région n'est pas connue comme étant une zone majeur de downwelling (ni d'upwelling permanent). La signature en température et salinité, mesurée par les satellites, ne présente pas non plus de caractéristiques plausibles en faveur de cette dernière hypothèse. Par contre il est possible d'expliquer ce déficit en étudiant le cas du tourbillon I qui impacte les radiales 5 et 6 (Fig. 18). En effet les vitesses mesurées par l'ADCP du tourbillon I sont orthogonales à la radiale 6 mais sont quasiment tangentielles à la 5 (Fig. 5). Or pour le calcul de transport de masse, c'est la composante de vitesse orthogonale aux radiales qui est utilisée. Pour la radiale 6 la composante orthogonale (en rouge sur la figure 5) présente un module quasiment identique à la vitesse mesurée par l'ADCP alors que pour la radiale 5, le module de la composante orthogonale est nettement inférieur à celui de la vitesse mesurée. Ainsi le calcul de transport permet d'avoir environ la moitié du débit du tourbillon I entrant par la radiale 6 cependant la géographie de la campagne ne permet pas d'obtenir la moitié du débit sortant de l'autre côté par la radiale 5. Cette dernière étant tangentielle au bord du tourbillon, le débit en sortie est très faible comparé au débit entrant. Le même constat peut être fait pour la radiale 4 qui présente un transport très faible (0.67 Sv). Les vitesses mesurées par l'ADCP sont souvent tangentielles à la radiale. Ces aspects expliquent très probablement que le bilan à l'intérieur du trapèze ne soit pas équilibré. L'activité de méso-échelle et la géographie de la campagne sont donc à l'origine d'une perte d'information sur les transports calculés perpendiculairement aux radiales de la campagne.

Ainsi dans le cadre d'une campagne en mer il est très difficile d'obtenir les situations adéquates (géographie de la campagne adaptée à l'activité de méso-échelle) pour réaliser un bilan équilibré au sein d'un trapèze d'autant plus que les radiales ne peuvent être échantillonnées au même instant. Il a en effet été montré que la variabilité de la zone d'étude, dans un laps de temps assez court, était importante. Ainsi dans une zone à forte variabilité à méso-échelle il est très peu probable d'obtenir un bilan équilibré.

En ce qui concerne les caractéristiques moyennes des tourbillons identifiés, les observations corroborent les travaux de Chelton et al. (2007) et Chelton et al. (2011) réalisés à partir des images satellites de l'élévation de la surface libre (SSH : *Sea Surface Height*). Selon ces études, le diamètre moyen des

tourbillons dans les zones de forte turbulence est d'environ 200 km et leur direction de propagation est pour 75% d'entre eux vers l'Ouest. Dans le cas des tourbillons rencontrés pendant la campagne, un courant moyen les transporte vers l'Ouest et le diamètre moyen est de 160 ± 50 km. Les vitesses de déplacement des tourbillons qui se dirigent vers l'Ouest entre la latitude 15°S et 25°S est compris entre 3.5 et 11.2 km j^{-1} (Chelton et al., 2011). Ainsi les caractéristiques des tourbillons identifiés pendant la campagne BIFURCATION sont tout à fait cohérentes avec les travaux de Chelton et al. (2011).

IV.2 Connexion entre le NVJ et le NCJ

Les caractéristiques des masses d'eau, (extraites de Gasparin et al., 2014), ont été définies à l'entrée de la mer de Corail, soit à plus de 1000 km de la zone de bifurcation, ce qui peut expliquer l'éloignement des profils CTD- O_2 avec les caractéristiques des eaux des jets (Fig. 11). En effet les eaux atteignant la zone de bifurcation ont pu s'enrichir par mélange horizontal au cours de leur parcours dans la mer de Corail.

De plus l'analyse des données hydrologiques CTD- O_2 permet de faire des suppositions, quant à l'origine et le trajet des masses d'eau influant sur les radiales de la campagne (Fig. 11). En effet, les eaux du tourbillon G (profils bleus) semblent présenter des caractéristiques des eaux transportées par le NVJ. En particulier il a été proposé que la PEW soit un bon marqueur de la thermocline inférieure des eaux du NVJ (Gasparin et al., 2014). Ainsi les eaux du tourbillon G (profils bleus), présentant des caractéristiques proches de la PEW, semblent avoir une origine proche des eaux du NVJ. Cette hypothèse est cohérente avec l'historique de ce tourbillon formé dans le Nord-Est de la mer de Corail.

Enfin les sections au-dessus des îles Chesterfield (rouges), qui sont situées sur le trajet schématique du NCJ, présentent des caractéristiques similaires aux eaux du NCJ (Fig. 11). Le fait que les profils de la radiale 4 (verts) soient proches des profils des îles Chesterfield suggèrent que les eaux du NCJ seraient entraînées vers le Nord au niveau de la bifurcation. Ce résultat semble confirmer les hypothèses émises en amont de cette étude sur la circulation dans la zone de bifurcation des jets. Une partie du NCJ remonterait vers le Nord afin de s'écouler dans le NQC puis le GPC comme l'indique la proximité des eaux de ces sections (rouges et verts).

Les analyses convergent donc vers une seule et même hypothèse : le tourbillon G a piégé, lors de sa formation, les eaux du NVJ et les a transporté jusqu'à des latitudes où la circulation du NCJ domine. Ainsi les tourbillons à travers leur parcours général vers l'Ouest dans la mer de Corail permettent de créer une connexion dynamique entre les eaux du NVJ et du NCJ en piégeant des masses d'eaux distinctes et en les transportant vers des latitudes différentes. L'analyse des données CTD- O_2 a donc permis de mettre en évidence un exemple de connexion et de mélange des eaux des deux jets, jusqu'ici considéré comme indépendants, induit par l'activité tourbillonnaire de la mer de Corail.

Pour confirmer les résultats avancés par l'analyse CTD- O_2 sur la connexion entre le NVJ et le NCJ au niveau de la zone de bifurcation, les données du flotteur Argo (WMO Id 5903381) mis à l'eau dans la zone de circulation du NVJ en Janvier 2011 à l'entrée de la mer de Corail et équipé d'une optode (permettant donc d'obtenir des données de la concentration en oxygène) sont superposées aux diagrammes T-S et S- O_2 des stations de la radiale 3. Deux ensembles de profils sont identifiés comme

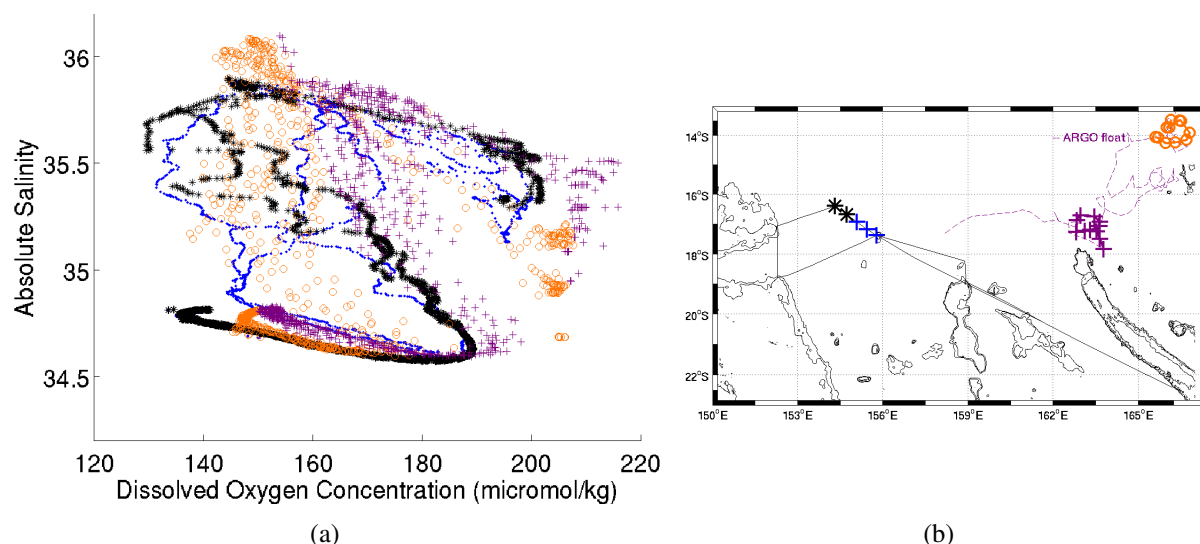


FIGURE 19 – (a) Diagramme S-O₂ des profils Argo et des stations hydrologiques CTD-O₂ (0-2000 m) de la section 3 de BIFURCATION. (b) Position des stations hydrologiques CTD-O₂ correspondant aux tourbillons G (bleu) et F (noir) et des profils réalisés par un flotteur Argo (0-2000 m) dans la zone du NVJ (orange) et dans la zone du NCJ (violet). La ligne discontinue (- -) correspond à la trajectoire de parking de la bouée Argo (WMO id 5903381). Les lignes fines en noir représentent les isobathes 500 et 1000 m.

signature des eaux du NVJ (orange) et du NCJ (violet) au niveau de la région entre la Nouvelle Calédonie et le Vanuatu (Fig. 19). L'analyse d'un diagramme S-O₂ permet une fois de plus de regrouper les profils Argo en fonction de leur zone géographique (circulation du NVJ ou du NCJ) (Fig. 19 (a)). En effet, les profils correspondant à la zone de circulation du NVJ (oranges) sont marqués par un minimum d'oxygène aussi visibles sur deux des trois profils du tourbillon G (bleus). Les profils du tourbillon F (noirs) présentent, quant à eux, une allure générale semblable aux profils correspondant à la zone de circulation du NCJ (violets). Ainsi les caractéristiques de deux des trois profils, impactés par le tourbillon G sont similaires à celles des eaux circulant au sein du NVJ. Le troisième profil bleu, se trouvant à la limite des deux tourbillons (F et G), n'est pas significatif du tourbillon G. De plus, les profils issus des données Argo suivent la même allure générale que les profils CTD-O₂ avec une différence notable dans les eaux de surface et de la thermocline supérieure (ANNEXE D Fig. 33). En effet les profils Argo montrent des eaux plus salées dans les eaux plus chaudes. Cependant cette différence est cohérente avec les valeurs des TSW, SPTWN et SPTWS calculées par Gasparin et al. (2014) à l'entrée de la mer de Corail. Ces données mesurées, par le flotteur Argo sont situées au bord Est de la mer de Corail soit beaucoup plus proches des mesures de Gasparin et al. (2014) que les données de la campagne. Ainsi il est possible d'imaginer que les eaux vont perdre de leur propriétés par mélange au cours de leur parcours dans la mer de Corail, ce qui expliquerait les différences mises en évidence dans les eaux de la thermocline supérieure (ANNEXE D Fig. 33). De plus, ces profils donnent une autre information sur l'impact de l'activité de méso-échelle sur la verticale. La différence entre les profils diminue avec la profondeur, de sorte que les caractéristiques des eaux de l'AAIW ne sont que très peu influencées par ce processus de mélange.

Enfin la trajectoire du flotteur met aussi en lumière l'hypothèse émise par Maes et al. (2007) sur

la connexion entre les deux jets. En effet la trajectoire de la bouée initialement prise par le NVJ va dévier jusqu'à atteindre une latitude caractéristique de la circulation du NCJ (Fig. 19 (a)). La bouée est progressivement advectée vers le Sud, en décrivant des cercles ce qui laisse penser qu'elle a été piégée dans un tourbillon qui l'a transporté jusqu'au NCJ.

Ainsi grâce à cette comparaison il a été montré que l'activité de méso-échelle est un élément majeur créant la connexion et le mélange des eaux transportées par ces deux jets. Cependant cette étude ne concerne que quelques profils CTD et l'analyse d'un seul flotteur Argo. Ce travail mériterait donc une analyse plus poussée en utilisant les profils de tous les flotteurs Argo équipés d'optodes et disponibles en mer de Corail mais aussi les données d'autre campagne, notamment PANDORA qui a été menée de Juin 2012 à Août 2012, soit seulement un mois avant la campagne BIFURCATION. Le trajet de la campagne (Nouvelle-Calédonie jusqu'à la mer des Salomon) permet d'avoir un jeu de données sur l'ensemble du bord Est de la mer de Corail, ce qui peut être intéressant notamment pour étudier les caractéristiques des masses d'eau à l'entrée de la mer de Corail mais aussi des calculs de transport en entrée et ainsi relier cette étude aux travaux de Gasparin (2012) et Gasparin et al. (2014).

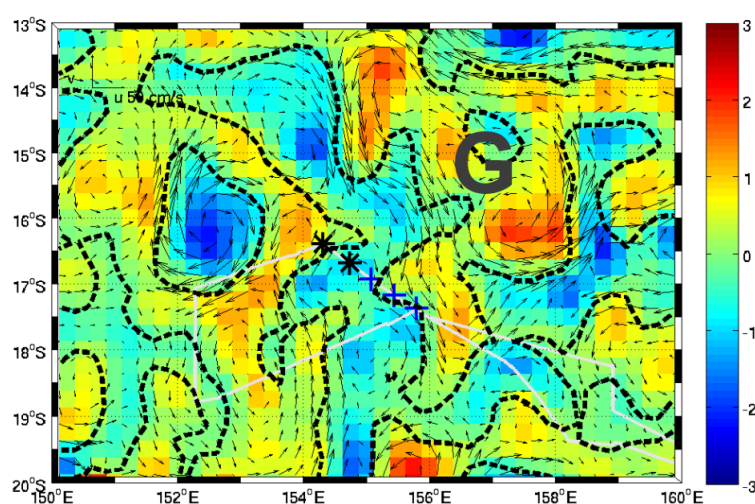


FIGURE 20 – Vorticité relative (s^{-1} , échelle de couleur) calculée à partir des champs de courants AVISO [$m s^{-1}$] de surface du 4 sept. 2012 (date à laquelle la section 3 a été échantillonnée) également superposés. Le contour de 0 vorticité relative apparaît en ligne discontinue (- -) noire. Le trajet de la campagne est superposé en blanc et les stations hydrologiques sont positionnées en suivant le même code couleur que la figure 19.

Une autre approche a été initiée afin de confirmer l'hypothèse que le tourbillon G a piégé des eaux du NVJ. Une première expérience s'est basée sur les travaux de Early et al. (2011) qui défini le coeur d'un tourbillon grâce au contour du zéro de la vorticité relative. Le coeur du tourbillon est formé par des eaux ayant conservées leurs caractéristiques d'origine lorsqu'elles ont été piégées par le tourbillon. Ainsi sur la figure 20 le contour de zéro vorticité est à la limite de la radiale 3 mais englobe quand même les stations hydrologiques marquées par une signature des eaux du NVJ. Ceci pourrait suffire à confirmer l'hypothèse que le tourbillon G a piégé des particules cependant ce tourbillon est très asymétrique et présente une structure très complexe dans laquelle semble emboîtées des

structures plus petites. Or le théorie d' Early et al. (2011) a été définie pour des tourbillons idéalisés circulaires. Il est quand même raisonnable de penser que même si la partie du tourbillon G qui atteint la radiale 3 n'est pas exclusivement composée des eaux du coeur du tourbillon, ces eaux ont été mélangées au cours de leur trajet mais pas en proportion assez importante pour effacer complètement la signature des eaux du NVJ.

Pour étayer cette dernière hypothèse un programme de calcul de trajectoire de particules a été développé afin d'identifier la trajectoire passée (rétroactive) de particules situées au niveau de la radiale 3 le jour où cette dernière a été échantillonnée (4 sept. 2012). Ainsi la trajectoire rétroactive de ces particules montre un déplacement méridional des particules du tourbillon G (bleues) situées dans la zone affectée par le tourbillon G (Fig. 21). Les particules ne se retrouvent pourtant pas à l'intérieur du tourbillon G le 1er Août 2012. Cependant la trajectoire méridionale met une fois de plus en évidence une connexion entre les deux jets. De plus ce test recoupe le travail effectué à partir de la théorie d'Early et al. (2011) en confirmant que la structure G est peu cohérente et n'est pas un tourbillon qui piège des particules, défini par Flierl (1987) comme un tourbillon dont la vitesse tangentielle est supérieure à la vitesse de déplacement. Il faut toutefois faire attention à cette synthèse car le programme ne prend en compte que les courants de surface, sans tenir compte de l'extension verticale de ces courants.

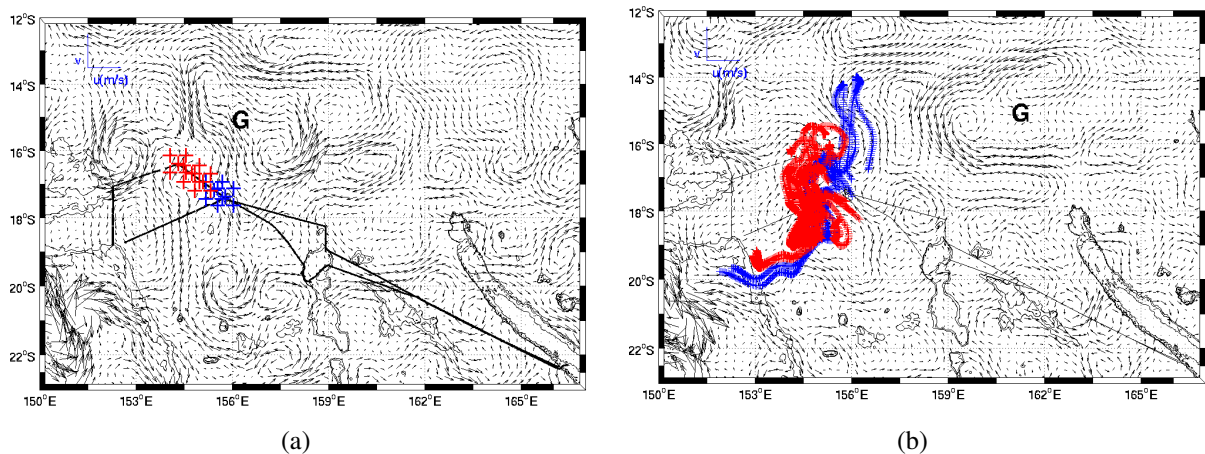


FIGURE 21 – (a) Position initiale des particules le 4 sept. 2012 (en bleu : particules impactées par le tourbillon G ; en rouge : particules non-impactées par le tourbillon G). Le champ de courants de surface issu des données AVISO [m s^{-1}] datant du 4 sept. 2012 est superposé. (b) Trajectoire arrière en temps des particules du 4 sept. 2012 au 1er Août 2012. Le champ de courants de surface issu des données AVISO [m s^{-1}] du 1 août 2012 est représenté ainsi que le position du tourbillon G. Les lignes fines en noir représentent les isobathes 500 et 1000 m.

Enfin les données du TSG suggèrent que lors de son voyage vers le Sud le tourbillon C a déplacé des eaux dont la signature est marquée et différente des eaux alentours indiquant une fois de plus l'idée d'une connexion entre les eaux plus au Nord, du NVJ, et celles plus au Sud, du NCJ (Fig. 12).

IV.3 FSLE et données biogéochimiques

Il a été montré dans cette étude que l'outil diagnostique de calcul de FSLE est un outil puissant permettant d'expliquer la présence de fronts sur des données de température et salinité mesurées en continu. Il faut toutefois rester prudent quant à leur interprétation. En effet certains fronts peuvent être aussi expliqués par la topographie. En effet des eaux moins profondes et enclavées peuvent présenter des signatures différentes en température et salinité que les eaux voisines. De plus il semble raisonnable de porter une attention plus particulière aux variations de salinité plus que celles en température. Les cycles diurnes affectant la température de surface, il faut faire attention à ce que les fronts ne soient pas simplement dus à une alternance jour/nuit inhérente au déroulement de la campagne. Cet effet étant facilement vérifiable il ne faut toutefois pas le négliger.

En ce qui concerne la comparaison avec la chlorophylle-a, l'utilisation d'un composite sur 15 jours peut clairement biaiser certains résultats. En effet la zone étant soumise à une forte variation journalière, la comparaison entre des données journalières de FSLE et des données composites de chlorophylle-a induit une forte incertitude sur les concordances mises en évidence. Le problème étant la présence de nuage qui ne permet pas aux images MODIS de couvrir l'ensemble de la mer de Corail de façon journalière, il faut donc trouver d'autres outils satellites qui permettent d'obtenir des images journalières exploitables.

De plus la résolution actuelle des satellites peut constituer un frein à ce genre d'étude. En effet les variations de la concentration en chlorophylle-a ont lieu à subsubmésos-échelle. Or aujourd'hui la résolution des satellites permet seulement de faire des études à méso- voire submésos-échelle. Ainsi le développement d'outils satellites à plus forte résolution pourrait permettre d'identifier des variations de très petites échelles.

Enfin pour rendre ce genre d'analyse plus complète il serait nécessaire de pouvoir avoir accès à des données *in-situ* en continu pendant le trajet d'une campagne océanographique. De la même façon que les mesures du TSG et de l'ADCP, il serait intéressant d'équiper les bateaux de la flotte océanographique d'un capteur de fluorescence qui permettrait de faire des mesures en continu, desquelles la concentration en chlorophylle-a de surface serait dérivée. Ainsi les données *in-situ* seraient un bon complément des images satellites pour la validation de telles analyses.

V Conclusion et perspectives

De nos jours, l'intérêt pour les études en océanographie menées à fine échelle est de plus en plus évident. L'analyse des données *in-situ* de la campagne BIFURCATION a permis de mettre en lumière l'importance de l'activité à méso-échelle dans cette zone et la relative faiblesse des stratégies d'échantillonnage latitudinales ou longitudinales face à cet effet. Ses effets sur les quantités mesurées doivent impérativement être pris en compte lors de l'analyse de données *in-situ* sous peine de mal interpréter les résultats. Les influences sont diverses : calculs de transport de masse biaisés avec une forte incertitude, mélange de masses d'eau mais aussi modification de la répartition spatiale des paramètres biogéochimiques et espèces biologiques.

L'analyse des données *in-situ* a donc été un point de départ dans cette étude pour identifier une

connexion entre les deux jets caractéristiques de la mer de Corail (NCJ et NVJ). L'hypothèse émise par Maes et al. (2007) est renforcée par cette étude. Cependant malgré des résultats encourageants, l'étude sur la trajectoire des particules n'a pas permis de confirmer l'hypothèse de mélange des eaux, transportées par les principaux jets, induit par les tourbillons qui auraient piégé et transporté des masses d'eau. Une extension possible de cette approche serait donc de considérer la circulation générale et un nombre bien plus important de particules lagrangiennes. À l'aide d'un programme plus puissant, du type ARIANE (Blanke et Raynaud, 1997), prenant en compte différents niveaux verticaux, les particules pourraient être piégées dans le tourbillon G et se retrouver à la position initiale du tourbillon G le 1er Août 2012 au niveau de la zone de circulation du NVJ. Ainsi l'idée d'une connexion et d'un mélange des eaux des deux jets pourrait être confirmée grâce à la trajectoire rétroactive des particules. De plus l'aspect instantané des données de la campagne ne permet pas de confirmer la continuité de cette connexion dans le temps. Le programme ARIANE pourrait aussi être utilisé dans le but d'identifier, de quantifier la connexion à long terme et de prouver que ces observations ne sont pas qu'un cas exceptionnel. Par la suite cet outil permettrait de quantifier le pourcentage de cette connexion qui est due aux tourbillons. Ainsi la validation de l'hypothèse de connexion entre les deux jets serait une grande avancée dans la compréhension de la circulation de la mer de Corail.

En ce qui concerne l'utilisation des FSLE, cette étude a montré que dans certains cas ils permettent d'apporter une explication sur la présence de certains fronts entre deux masses d'eau de caractéristiques hydrologiques différentes détectées par un TSG en surface. Elle a aussi mis en évidence l'importance d'avoir accès à des produits satellites à haute résolution. En effet même si les premières comparaisons des données *in-situ* avec les produits SMOS à haute résolution sont plutôt décevantes, car les données SMOS ne semblent pas reproduire la forte variabilité à méso-échelle de la mer de Corail, il est important de garder l'idée d'utiliser ces outils. Afin de poursuivre le développement de ces produits, la présentation des résultats de ce stage a été proposée pour une communication lors de la conférence sur les changements en salinité et du flux d'eau douce dans l'océan qui aura lieu à Hambourg du 12 au 15 Octobre 2015 (*Salinity and freshwater changes in the ocean*).

Dans cette zone à la topographie très complexe, les produits altimétriques n'ont pas encore une résolution assez haute pour décrire la circulation à fine échelle. Or il est très important d'avoir accès aux courants régionaux pour augmenter la précision du calcul FSLE. De plus l'utilisation d'images satellites est très limitée par la présence de nuage qui empêche d'obtenir une couverture spatiale maximale. Dans le cadre de la campagne OUTPACE, de nouvelles images journalières satellites de couleur de l'eau (produits CLS) ont été utilisées afin de mettre en place une stratégie adaptative d'échantillonnage. Cette dernière était basée sur l'analyse d'images satellites de couleur de l'eau en quasi-temps réel, dans le but de déterminer la position d'une station hydrologique. Ces produits sont traités en amont pour éliminer les zones nuageuses et ont montré des résultats très encourageants au cours de la campagne menée entre Février et Avril 2015. Ainsi l'utilisation de tels outils permettrait de faire des comparaisons fines aux échelles journalières entre FSLE et couleur de l'eau. Ce travail pourra donc être effectué dans le cadre du traitement des données de la campagne OUTPACE pour confirmer les résultats mis en évidence par cette étude. Ces outils doivent tout de même être associés à un échantillonnage très haute fréquence lors de campagne océanographique pour pouvoir confirmer

ce diagnostique, notamment en ce qui concerne l'abondance des espèces biologiques. Ainsi grâce à ces données des coefficients de corrélation entre FSLE et données biogéochimiques pourraient être calculés afin de fournir aussi une analyse statistique à ce diagnostique.

Références

- Blanke, B. et Raynaud, S. (1997). Kinematics of the pacific equatorial undercurrent : an eulerian and lagrangian approach from gcm results. *Journal of Physical Oceanography*, 27(6) :1038–1053.
- Bonnet, S., Rodier, M., Turk-Kubo, K., Germaineaud, C., Menkes, C., Ganachaud, A., Cravatte, S., Raimbault, P., Campbell, E., Desnues, A., Maes, C., and Eldin, G. (en révision). Contrasted geographical distribution of n₂ fixation rates and *nifh* phylotypes in the coral and solomon seas (south-western pacific) during austral winter conditions. *Global Biogeochemical Cycles*.
- Burke, L. et Spalding, M. (2011). Reefs at risk. *World Resources Institute, Washington, DC*.
- Ceccarelli, D. M., McKinnon, A. D., Andrefouet, S., Allain, V., Young, J., Gledhill, D. C., Flynn, A., Bax, N. J., Beaman, R., Borsa, P., et al. (2012). The coral sea : physical environment, ecosystem status and biodiversity assets. *Advances in marine biology*, 66 :213–290.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., and Samelson, R. M. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2) :167–216.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M., and de Szoeke, R. A. (2007). Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15).
- Church, M. J., Jenkins, B. D., Karl, D. M., and Zehr, J. P. (2005). Vertical distributions of nitrogen-fixing phylotypes at stn aloha in the oligotrophic north pacific ocean. *Aquatic Microbial Ecology*, 38(1) :3–14.
- Couvelard, X., Marchesiello, P., Gourdeau, L., and Lefèvre, J. (2008). Barotropic zonal jets induced by islands in the southwest pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 38(10) :2185–2204.
- d’Ovidio, F., Fernández, V., Hernández-García, E., and López, C. (2004). Mixing structures in the mediterranean sea from finite-size lyapunov exponents. *Geophysical Research Letters*, 31(17).
- Early, J. J., Samelson, R., and Chelton, D. B. (2011). The evolution and propagation of quasigeostrophic ocean eddies*. *Journal of Physical Oceanography*, 41(8) :1535–1555.
- Flierl, G. (1987). Isolated eddy models in geophysics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 19(1) :493–530.
- Ganachaud, A., Cravatte, S., Melet, A., Schiller, A., Holbrook, N., Sloyan, B., Widlansky, M., Bowen, M., Verron, J., Wiles, P., et al. (2014). The southwest pacific ocean circulation and climate experiment (spice). *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 119(11) :7660–7686.
- Ganachaud, A., Gourdeau, L., and Kessler, W. (2008). Bifurcation of the subtropical south equatorial current against new caledonia in december 2004 from a hydrographic inverse box model*. *Journal of Physical Oceanography*, 38(9) :2072–2084.

- Gasparin, F. (2012). *Caractéristiques des Masses d'Eau, Transport de Masse et Variabilité de la Circulation Océanique en mer de Corail (Pacifique sud-ouest)*. PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E).
- Gasparin, F., Maes, C., Sudre, J., Garcon, V., and Ganachaud, A. (2014). Water mass analysis of the coral sea through an optimum multiparameter method. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 119(10) :7229–7244.
- Gourdeau, L., Kessler, W., Davis, R., Sherman, J., Maes, C., and Kestenare, E. (2008). Zonal jets entering the coral sea. *Journal of Physical Oceanography*, 38(3)(715–725).
- Herbland, A., Le Bouteiller, A., and Raimbault, P. (1985). Size structure of phytoplankton biomass in the equatorial atlantic ocean. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 32(7) :819–836.
- Hummon, J. et Firing, E. (2003). A direct comparison of two rdi shipboard adcps : A 75-khz ocean surveyor and a 150-khz narrow band. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, (872-888).
- Kessler, W. et Cravatte, S. (2013). Mean circulation of coral sea. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 118 :1–26. doi :10.1002/2013JC009117.
- Maes, C., Dewitte, B., Sudre, J., Garcon, V., and Varillon, D. (2013). Small-scale features of temperature and salinity surface fields in the coral sea. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 118 :1–13. doi :10.1002/jgrc.20344.
- Maes, C., Gourdeau, L., Couvelard, X., and Ganachaud, A. (2007). What are the origins of the antarctic intermediate waters transported by the north caledonian jet ? *Geophysical Research Letters*, 34(21).
- McKinnon, A. D., Williams, A., Young, J., Ceccarelli, D., Dunstan, P., Brewin, R. J., Watson, R., Brinkman, R., Cappo, M., Duggan, S., et al. (2014). Tropical marginal seas : priority regions for managing marine biodiversity and ecosystem function. *Annual review of marine science*, 6 :415–437.
- Moisander, P. H., Beinart, R. A., Hewson, I., White, A. E., Johnson, K. S., Carlson, C. A., Montoya, J. P., and Zehr, J. P. (2010). Unicellular cyanobacterial distributions broaden the oceanic n₂ fixation domain. *Science*, 327(5972) :1512–1514.
- Nencioli, F., d'Ovidio, F., Doglioli, A., and Petrenko, A. (2011). Surface coastal circulation patterns by in-situ detection of lagrangian coherent structures. *Geophysical Research Letters*, 38(17).
- Reul, N., Chapron, B., Lee, T., Donlon, C., Boutin, J., and Alory, G. (2014). Sea surface salinity structure of the meandering gulf stream revealed by smos sensor. *Geophysical Research Letter*, 41.
- Ridgway, K. et Dunn, J. (2003). Mesoscale structure of the mean east australian current system and its relationship with topography. *Progress in Oceanography*, 56(2) :189–222.

- Smith, W. H. et Sandwell, D. T. (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334) :1956–1962.
- Sokolov, S. et Rintoul, S. (2000). Circulation and water masses of the southwest pacific : Woce section p11, papua new guinea to tasmania. *Journal of Marine Research*, 58(223–268).
- Thompson, R. et Veronis, G. (1980). Transport calculations in the tasman and coral seas. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 27(5) :303–323.
- Von Schuckmann, K., Gaillard, F., and Le Traon, P.-Y. (2009). Global hydrographic variability patterns during 2003–2008. *Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012)*, 114(C9).
- Webb, D. (2000). Evidence for shallow zonal jets in the south equatorial current region of the southwest pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 30(4)(706–720).
- Wyrtki, K. (1962). The subsurface water masses in the western south pacific ocean. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 13(1) :18–47.

A Masses d'eau en mer de Corail

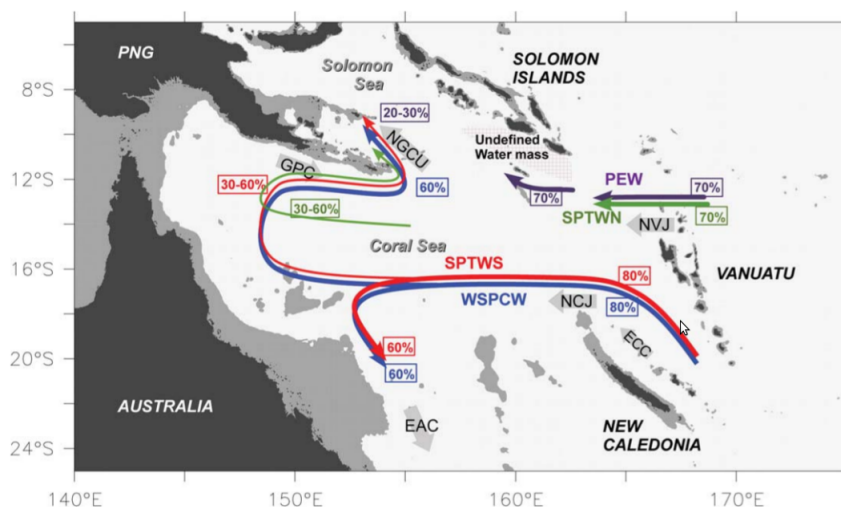


FIGURE 22 – Schéma des principales masses d'eau de la thermocline supérieure et inférieure circulant en mer de Corail (extrait de Gasparin et al., 2014). Les flèches verte et rouge représentent la circulation des eaux de la thermocline supérieure (SPTWN (*South Pacific Tropical Water North*) et SPTWS (*South Pacific Tropical Water South*) respectivement) ; les flèches violette et bleue celle des eaux de la thermocline inférieure (PEW (*Pacific Equatorial Water*) et WSPCW (*Western South Pacific Central Water*) respectivement). Les pourcentages indiquent la contribution de chaque eau à son niveau de thermocline. Les principaux courants sont représentés par des flèches grises (ECC=East Caledonian Current ; NVJ=North Vanuatu Jet ; NCJ=North Caledonian Jet ; EAC=East Australia Current ; GPC=Gulf of Papua Current ; NGCU=New Guinea Coastal Undercurrent).

B Traitement des données ADCP

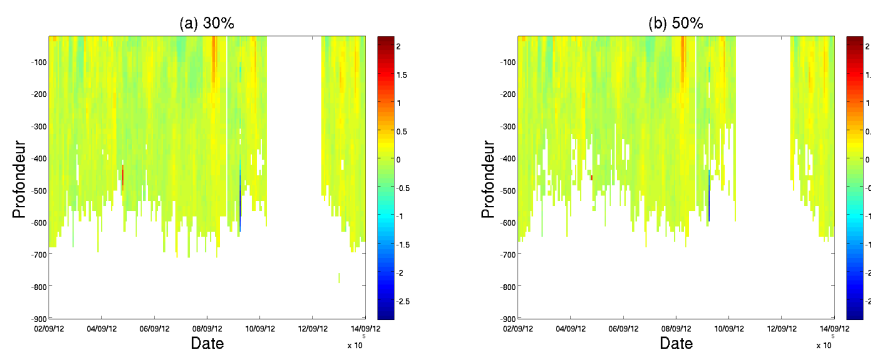


FIGURE 23 – Section verticale pour la composante Sud-Nord (v) des données ADCP en fonction du temps [m s^{-1}]. Le pourcentage de valeurs aberrantes à supprimer est indiqué : 30% (a) et 50% (b).

– Mesures du courant par l'ADCP au premier niveau, intégrés sur 104 et 488 m :

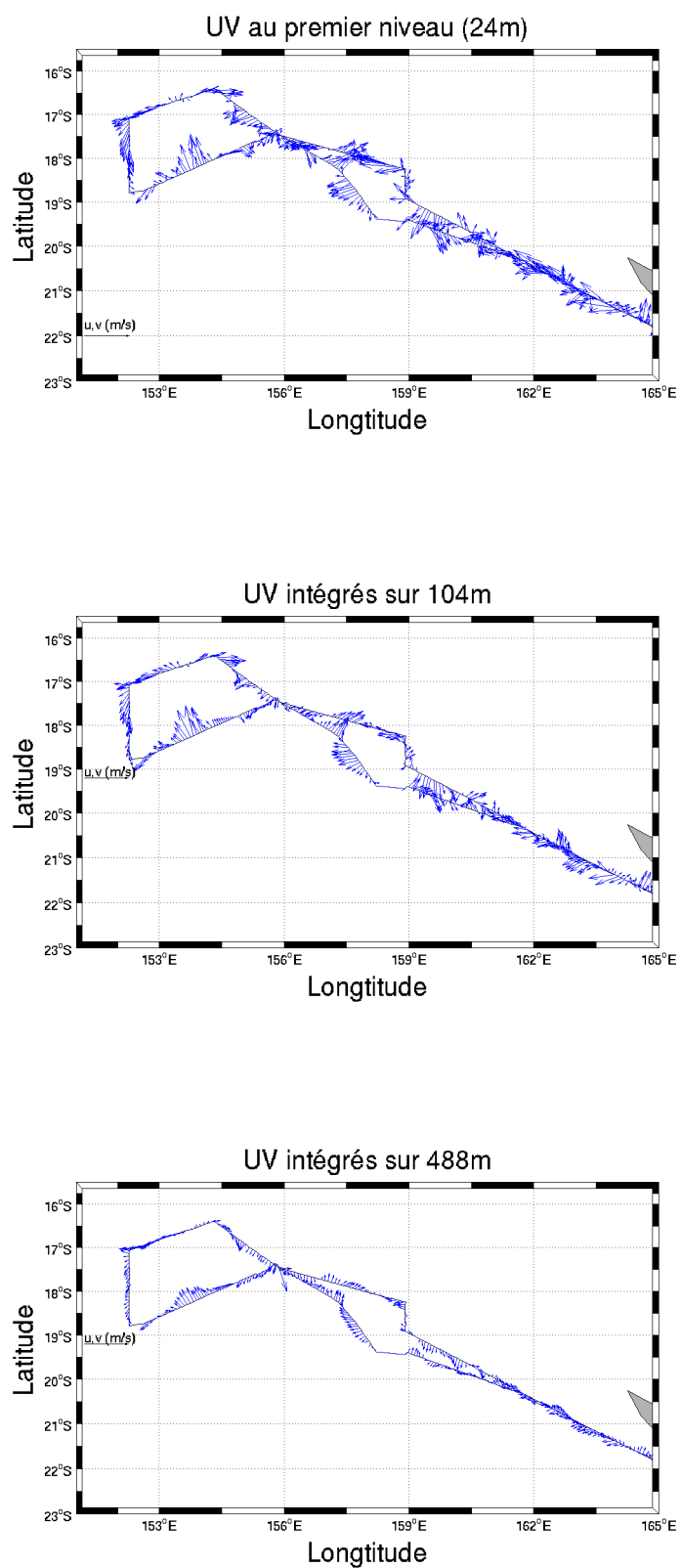


FIGURE 24 – Représentation vectorielle des mesures de courant de l'ADCP [m s^{-1}] après traitement à 24 m, intégrés sur 104 m et intégrés sur 488 m.

C Sections verticales des vitesses mesurées par l'ADCP

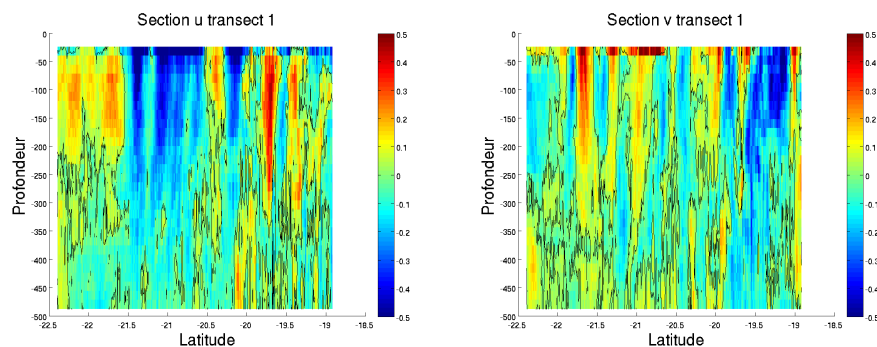


FIGURE 25 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 1.

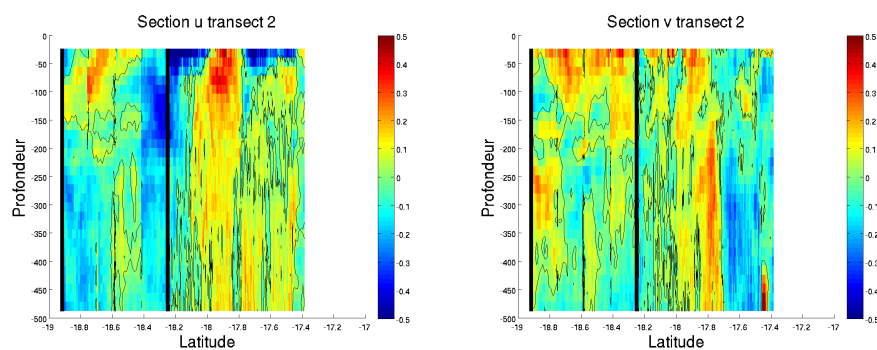


FIGURE 26 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 2. Les lignes pleines noires délimitent la section méridionale au dessus des îles Chesterfield.

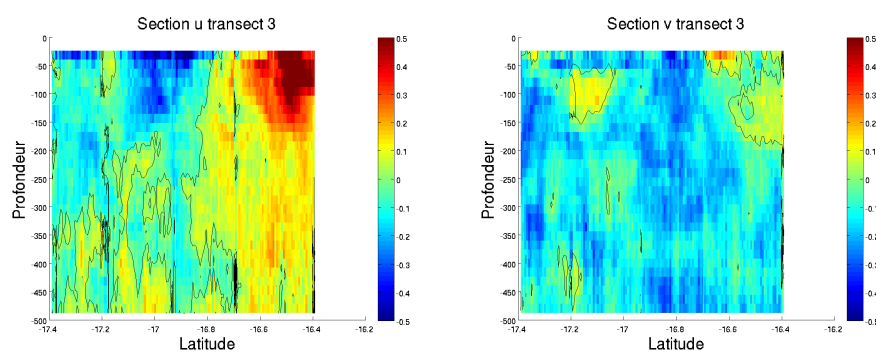


FIGURE 27 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 3.

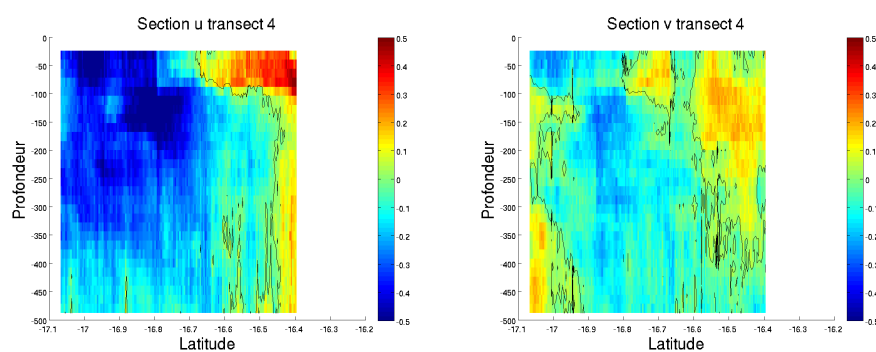


FIGURE 28 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 4.

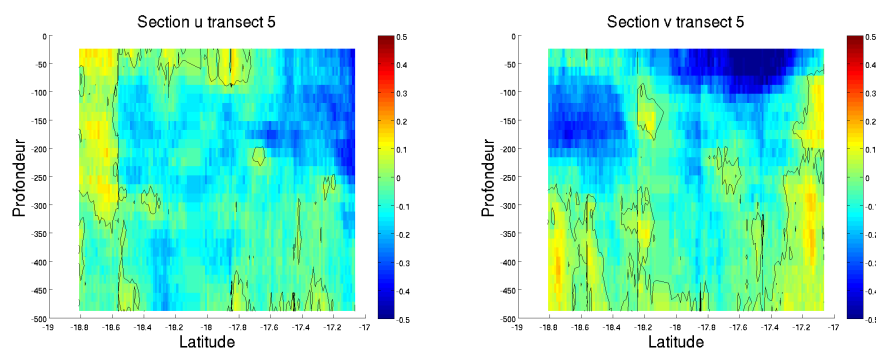


FIGURE 29 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 5.

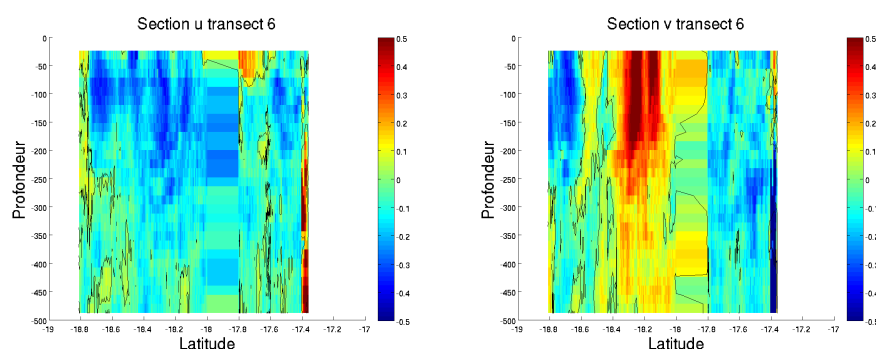


FIGURE 30 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 6.

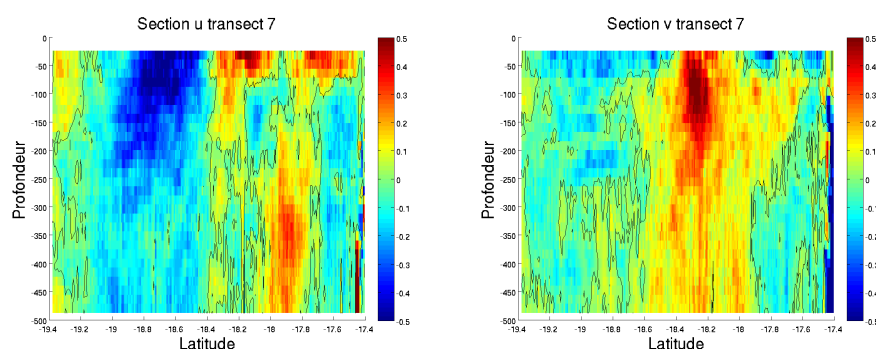


FIGURE 31 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 7.

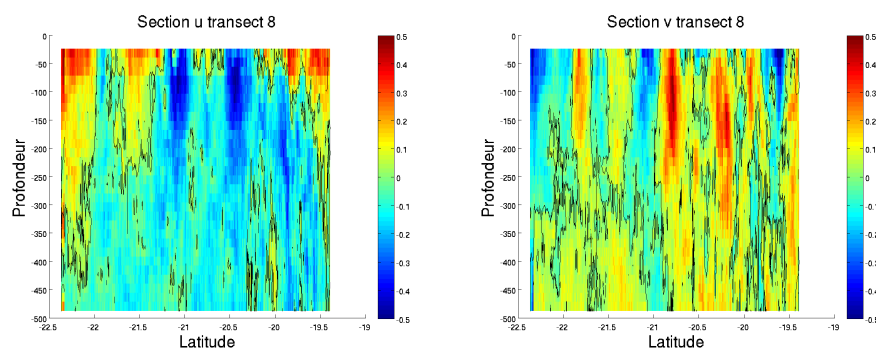


FIGURE 32 – Sections verticales des composantes Ouest-Est (u) et Sud-Nord (v) [m s^{-1}] en fonction de la latitude pour la radiale 8.

D Diagramme T-S Argo

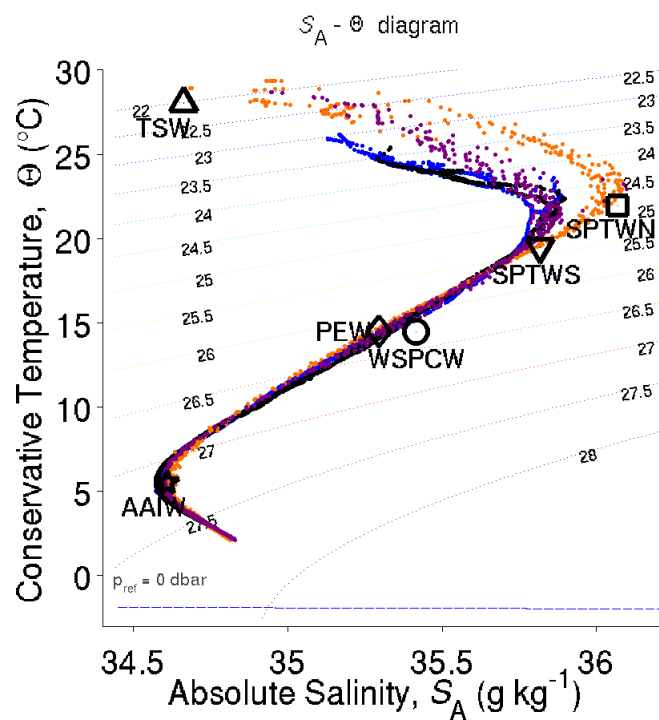


FIGURE 33 – Diagramme T-S des profils Argo et des stations hydrologiques CTD-O₂ (0-2000 m) de la radiale 3 (voir Fig. 19 (b)).