

Océan du Large et Variabilité Climatique (OLVAC) (Bilan 2005-2009)

Responsable : Delcroix Thierry DR IRD

Permanents : ALORY Gaël (Phys. Adj. CNAP), BOURLES Bernard (DR IRD), CHUCHLA Rémy ⁽¹⁾ (IE IRD), CRAVATTE Sophie (CR IRD), DURAND Fabien (CR IRD), ELDIN Gérard ⁽¹⁾ (CR IRD), GANACHAUD Alexandre (CR IRD), GOURDEAU Lionel (CR IRD), HALL Nick (PR UPS), KESTENARE Elodie ⁽¹⁾(IR IRD), MAES Christophe (CR IRD), MARIN Frédéric (CR IRD), MORROW Rosemary (Phys CNAP), RADENAC Marie-Hélène (CR IRD), TESUT Laurent (Phys. Adj. CNAP)

⁽¹⁾ 50% OLVAC

Non Permanents. Doctorants : ATHIE Gabriella, BOSC Christelle, KOLODIECZICK Nicolas, PETER Charlotte, MESSIE Monique, SALLEE Jean-Baptiste, WADE Malick; Post Doctorants : KOCH-LARROUY Ariane, POUVREAU Nicolas; CDD : ZAKHAROVA Elena (2007-2008)

Objectif général

Les recherches de l'équipe OLVAC visent à améliorer la compréhension des mécanismes responsables de la variabilité des océans tropicaux, de l'océan Indien Sud et l'océan Austral, dans une gamme d'échelles de 100 à 10.000 km, de l'intra saisonnier au décennal, en incluant la tendance climatique récente. Elles incluent des approches basées sur la collecte et l'analyse d'observations in situ et satellitaires, ainsi que sur des sorties de modèles numériques à l'échelle globale et régionale.

Contexte national et international

Ces recherches s'insèrent dans le cadre d'objectifs institutionnels (CNAP, IRD, UPS), de programmes nationaux (LEFE, IDAO et CYBER) et/ou internationaux (AMMA, CLIVAR, GOOS, GLOS). Quatre des Services d'Observations de l'OMP sont sous la responsabilité scientifique de membres de l'équipe OLVAC : le réseau de suivi de la salinité de surface dans l'océan global (ORE-SSS), le réseau de mouillages météo-océaniques dans l'Atlantique tropical (ORE PIRATA), le réseau d'observations in situ du niveau de la mer dans l'océan Indien Sud (ORE ROSAME) et le service dédié aux études d'altimétrie satellitaire (SO CTOH). (cf. fiches détaillées).

Production scientifique

Le questionnement scientifique affiché par l'équipe dans la précédente prospective LEGOS s'est soldé (en septembre 2009) par un total de 89 publications de rang A sur 4,5 ans (12 en 2005; 16 en 2006, 18 en 2007, 21 en 2008 et 22 depuis janvier 2009). Cela correspond à des valeurs de 0,4 à 4 publications/Permanent/an, avec une moyenne annuelle de 1,8. Neuf résultats scientifiques principaux sont synthétisés dans les pages qui suivent par thèmes scientifiques.

Formation, encadrement

Plus des 2/3 des membres de l'équipe ont été ou sont impliqués dans des activités d'enseignements (Master 1-2 à Toulouse, etc..) en 2006-2009. A noter, la création d'un Master 2 à Cotonou au Bénin en 2008 (cf. fiche détaillée). Trois HDR ont été soutenues ; 12 thèses encadrées (ou co-encadrées) avec une moyenne de 2,25 publications de rang A / thèse ; 7,6 étudiants ont été accueillis en stage de Master 1-2, en moyenne annuelle.

Administration de la recherche. Contrats de recherche

95% des membres s'impliquent dans des tâches collectives LEGOS-OMP, institutionnelles, nationales et/ou internationales (e.g. CS AMMA, CLIVAR, PIRATA). Plus de la moitié ont des contrats de recherche national (TOSCA, LEFE) et/ou européens (ESA). A noter le

financement LEFE en 2008 puis ANR en 2009 d'une importante contribution française au programme international SPICE/CLIVAR coordonné par un des membres de l'équipe.

1. Chantiers géographiques et thèmes scientifiques

Les principaux thèmes scientifiques de l'équipe sont résumés ci-dessous.

1.1 Océan Pacifique tropical

- Mécanismes du phénomène El Niño Oscillation Australe (ENSO) et de la variabilité décennale.
- Variabilité thermohaline et interactions physique - biologie dans la warm pool.
- Circulation océanique dans le Pacifique tropical sud-ouest. Lien avec la variabilité ENSO et décennale (SPICE)

1.2 Océan Atlantique tropical

- Modes de variabilité climatique de l'Atlantique tropical.
- Dynamique du Golfe de Guinée en relation avec la mousson africaine (AMMA).

1.3 Océan Indien

- Changements de température, salinité et circulation océanique liés au réchauffement global.
- Transports de masse et de sel dans la partie Nord, aux échelles de la mousson asiatique.

1.4 Océan Austral

- Variabilité des masses d'eau, de la circulation et de la réponse océanique aux forçages climatiques grande échelle (SAM, ENSO)
- Rôle des processus méso échelles dans la circulation et la modification des masses d'eau.
- Variabilité du niveau de la mer par modélisation et mesures marégraphiques.

2. Sélection de résultats scientifiques liés à la prospective scientifique

Plusieurs axes scientifiques génériques étaient affichés dans la prospective LEGOS 2006-2009. Les réponses apportées sont résumées dans les pages suivantes pour neuf de ces axes. (Voir les fiches résultats sur le site web de l'équipe pour une vision plus complète).

2.1 Rôle du sel et de la barrière de sel pour ENSO

Le Pacifique Equatorial ouest (la *warm pool*) est une région clé pour l'étude du phénomène climatique ENSO. Cette région se caractérise, le plus souvent, par une couche barrière de sel (stratification en salinité dans la couche isotherme) qui influence le transfert de chaleur et de quantité de mouvement entre l'océan et l'atmosphère, en particulier à l'échelle ENSO.

Le front de sel et la couche barrière de sel ont été étudiés en analysant principalement des données des trois campagnes océanographiques Frontalis 1-3, des données de thermosalinographes (TSG) issues de l'ORE-SSS et des données de T et S provenant de profileurs Argo. Nous avons démontré que la couche barrière est une structure quasi permanente située à l'ouest du front de salinité de surface, indissociable des SST très chaudes (>28-29°C) génératrices de convection atmosphérique organisée. L'analyse des mécanismes de formation a notamment mis en évidence le rôle des ondes équatoriales de Kelvin et de Rossby dans la modulation de son épaisseur (Maes et al., 2006 ; Bosc, 2008 ;

2.2 Mécanismes de recharge et décharge de la bande équatoriale, échanges méridiens de masse, de chaleur

Une des théories actuelles pouvant rendre compte de la nature quasi-cyclique d'ENSO est la théorie dite de l'oscillateur rechargé/déchargé. Selon cette théorie et diverses observations, le Pacifique équatorial se recharge en eaux chaudes ($T > 20^{\circ}\text{C}$) avant l'apparition d'un événement El Niño et s'en décharge durant sa phase mature. Ces recharges / décharges, qui se traduisent par des variations du niveau de la mer, sont en général de très bons précurseurs d'El Niño. Il est donc important de comprendre les mécanismes qui les régissent.

À partir de données satellites de vent (ERS, Quikscat) et de niveau de la mer (Topex/Poseidon, Jason, ERS), nous avons montré que la partie géostrophique de la recharge / décharge est principalement due à des ondes de Rossby équatoriales essentiellement engendrées par le vent. En se propageant, ces ondes modifient la pente zonale de la thermocline, générant des anomalies de courants méridiens qui induisent le remplissage (ou la vidange) de la bande équatoriale en eaux chaudes avant (ou pendant) ENSO. Il reste cependant à déterminer pourquoi ces processus de recharge / décharge sont si divers d'un événement à l'autre (notamment en termes de chronologie et d'amplitude), surtout depuis 1992 (Bosc, 2008 ; Bosc et Delcroix, 2008).

2.3 Variations décennales et tendance climatique en SST et SSS dans le Pacifique tropical

Le Pacifique tropical ouest (la *warm pool*) est un élément essentiel dans le contexte de la variabilité climatique à l'échelle ENSO et décennale et du changement global. Nous avons analysé la SST et la SSS de cette région grâce à des observations réalisées entre 1950 et 2000 provenant d'échantillons d'eau de mer prélevés à partir de bateaux marchands, de TSG de l'ORE-SSS, de campagnes océanographiques et de mouillages TAO/TRITON.

Ces observations nous ont permis de mettre en évidence la signature du signal PDO (*Pacific Decadal Oscillation*) en SSS et une tendance à la baisse de salinité le long de trois rails moyens de navigation. A l'échelle du bassin, nous avons démontré que la *warm pool* s'est réchauffée et sa surface considérablement étendue au cours des dernières décennies. Les eaux supérieures à $28,5^{\circ}\text{C}$ ont vu leur température moyenne augmenter de $0,29^{\circ}\text{C}$ en $\frac{1}{2}$ siècle ; la surface de l'océan couverte par des eaux supérieures à 29°C a doublé depuis 1955 ; les zones d'eaux chaudes supérieures à 30°C , limitées il y a 50 ans, sont devenues communes. La *warm pool* s'est aussi fortement dessalée et la surface couverte par des eaux de faible salinité s'est étendue, en particulier via une migration vers l'Est sur plus de 2000 km en 50 ans du front équatorial de SSS. Le réchauffement de la *warm pool* est lié au réchauffement global, la baisse de salinité est cohérente avec l'augmentation des précipitations dans les zones de convergence atmosphérique sous l'effet de ce réchauffement. (Delcroix et al., 2007 ; Cravatte et al., 2009 ; Delcroix et Cravatte, 2009).

2.4 La circulation océanique du Pacifique sud-ouest et son rôle dans la variabilité décennale du Pacifique. Projet SPICE

Plusieurs études récentes suggèrent que la variabilité décennale du Pacifique tropical résulte en grande partie d'un cheminement original des eaux du Pacifique sud-ouest, en direction de l'Australie, puis de la Papouasie Nouvelle Guinée, de la mer des Salomon, avant

d'alimenter le sous-courant et la bande équatoriale. L'étude de ce cheminement et de son rôle climatique est au cœur du programme international SPICE, entériné par CLIVAR en 2008. SPICE est coordonné par un des membres et mobilise plusieurs scientifiques de l'équipe OLVAC ; des propositions LEFE et ANR ont été acceptées en 2006-2009.

Des travaux amont et nourrissant le programme SPICE ont été réalisés en 2006-2009. Des campagnes SECALIS, des flotteurs Argo et des lâchers de gliders ont permis de caractériser les jets entre la Nouvelle-Calédonie et les Iles Salomon. En mer des Salomon, l'étude a été complétée par la campagne FLUSEC, une approche altimétrique originale appliquée aux régions côtières ainsi que par des travaux de modélisation numérique incluant le développement d'un modèle régional couplé à un modèle global. L'entrée du Courant Equatorial Sud en Mer de Corail est suivie à partir de données répétitives XBT et de lâcher régulier de flotteurs Argo. Des mesures gliders 'répétitives' ont été (et sont) réalisées en mer des Salomon via une collaboration internationale. Plusieurs de ces travaux ont été publiés (Kessler et Gourdeau, 2006, 2007 ; Ganachaud et al. 2007, 2008ab ; Maes et al., 2007 ; Gourdeau et al., 2008 ; Couvelard et al., 2008).

2.5 Variabilité biologique dans le Pacifique tropical ouest : interactions avec la dynamique physique

La *warm pool* du Pacifique équatorial ouest étant généralement assimilée à une vaste région uniformément oligotrophe, l'advection horizontale de nutriments y est considérée comme négligeable. Seuls les processus verticaux ont été évoqués pour expliquer les enrichissements en chlorophylle observés aux échelles intra-saisonnière et interannuelle (ENSO).

L'analyse de données satellites (chlorophylle, SST, niveau de la mer, vent) dans la région nous a montré que l'océan peut répondre de deux façons à un coup de vent d'ouest. D'une part, le pompage d'Ekman peut provoquer localement une baisse de SST et une augmentation de la chlorophylle de surface. D'autre part, le jet équatorial de surface généré par ce coup de vent peut transporter des eaux enrichies en nutriments depuis l'ouest vers l'est de la *warm pool*. Une source d'eaux froides et riches en nutriments serait l'upwelling qui se développe au nord de la Nouvelle Guinée pendant la mousson de nord-ouest. L'action répétée des coups de vent des deux types semble contribuer au maintien de l'anomalie positive de chlorophylle observée dans la *warm pool* pendant El Niño (Radenac and Messié, 2007 ; Radenac et al., 2008).

2.6. Dynamique du Golfe de Guinée et mousson africaine. Programme EGEE / AMMA.

Le programme EGEE a pour objectif d'étudier la variabilité saisonnière et interannuelle des conditions hydrologiques du Golfe de Guinée, en relation avec la mousson africaine (programme international AMMA). Deux campagnes par an ont été réalisées en 2005-2007, associées à la maintenance du réseau de mouillages météo-océaniques PIRATA.

Les études réalisées nous ont permis, pour l'essentiel, a) de décrire la variabilité et la dynamique du sous-courant équatorial dans le Golfe de Guinée (Kolodziejczyk et al., 2009), b) de décrire les ondes d'instabilité tropicales en Atlantique Tropical (Athié et Marin, 2008) et le rôle du vent sur leur signature en surface (Athié et al., 2009), c) d'étudier les relations entre les conditions de température de surface du Golfe de Guinée et le climat des régions côtières (Ali et al.; 2009), et d) de mieux comprendre les processus responsables de l'établissement de l'upwelling équatorial, en particulier le rôle de coups de vent en provenance de l'Atlantique Sud (Marin et al., 2009). Trois thèses ont été soutenues en 2008-2009 sur ces thématiques.

Outre les aspects scientifiques *stricto sensu*, les collaborations régionales établies lors de EGEE/AMMA nous ont permis d'initier en 2007 le programme PROP AO d'océanographie physique avec plusieurs partenaires africains. PROP AO a pour objectif: a) d'établir et de maintenir un réseau de mesures côtières en lien avec des actions de recherche régionales et b) de renforcer les capacités scientifiques locales (*capacity building*). Dans ce cadre, un Master 2 régional Océanographie Physique et Applications a été mis en place en septembre 2008 en collaboration avec l'Université Paul Sabatier, le LEGOS et le DME de l'IRD.

2.7. Formation et transformation des eaux modales dans l'océan austral

Pour mieux comprendre la dynamique dans les zones de formation des eaux modales dans l'océan austral, nous avons fait un bilan de chaleur dans la couche de mélange (CMO) en hiver pour tout l'océan austral, en utilisant des données spatiales et in-situ. Cette étude circumpolaire a confirmé que les variations de chaleur dans le CMO peuvent être expliquées au premier ordre par les flux air-mer et le transport d'Ekman (Sallée et al., 2006 ; 2008a). Si la distribution de ces 2 termes de forçage est assez zonale et cohérente, les régions de CMO profondes sont limitées spatialement. Il se trouve que les processus de diffusion tourbillonnaire latérale sont un facteur clé pour limiter l'approfondissement du CMO dans certaines régions (Sallée et al., 2008c).

Nous avons aussi étudié les origines et les mécanismes de formation et de transformation des eaux modales dans l'océan austral, avec le modèle DRAKKAR. La vision « classique » de la formation des eaux modales est qu'un grand volume d'eau est subducté en fin d'hiver, dans les CMO profondes jusqu'au nord des fronts. Notre étude montre bien cette subduction, mais ces eaux sont ensuite re-ventilées quelques années plus tard dans les CMO plus au nord. Nous avons identifié trois régions clés pour la ventilation des eaux modales dans le secteur Indien, et quantifié leurs chemins de circulation et leurs sources. Le mélange tourbillonnaire joue un rôle important dans la formation de ces eaux, mais il rend aussi ces eaux plus homogènes après subduction (Koch-Larrouy et al., 2009).

2.8. Variabilité du niveau de la mer dans les océans Indien Sud et Austral

Cet axe de recherche a été abordé via la modélisation numérique et l'analyse de mesures in situ. Nous avons mis en place un modèle barotrope (tugo/mog2d) à haute résolution dans le secteur indien de l'Océan Austral pour l'étude des variations haute fréquence du niveau de la mer. Ce modèle s'est avéré le meilleur modèle régional pour la dynamique haute-fréquence. Il a fourni des informations importantes sur les flux d'énergie de la marée et sa dissipation ainsi que sur l'extension du bloom phytoplanctonique du plateau de Kerguelen. Il a également permis d'améliorer les données altimétriques notamment en zone côtière (Maraldi et al. 2007, 2008, Maraldi; 2008 ; Galton-Fenzi et al., 2008)

L'étude de la tendance du niveau de la mer à Kerguelen (1993-2005) a pu être menée grâce à l'analyse des données historiques du SHOM. Ces données nous ont permis de déterminer l'évolution régionale du niveau de la mer sur le dernier demi-siècle. La hausse observée du niveau marin est de l'ordre de 1.1 +/- 0.7 mm/an, résultat qui se situe dans la partie basse des estimations de l'IPCC et en accord avec les autres observations de l'océan austral (Port Arthur en Tasmanie, et Port Stanley aux îles Falkland) sur une période à peu près équivalente (Testut et al., 2006).

2.9 Océan Indien tropical

Nous nous sommes intéressés en priorité aux transports de masse et de sel dans la partie Nord, aux échelles de la mousson asiatique, ainsi qu'au réchauffement sur la période 1960-2000 et aux mécanismes associés.

Nous avons mis en évidence le rôle fondamental des courants de bord dans le transport trans-océanique (Golfe du Bengale <-> Mer d'Arabie) de chaleur et de sel dans les couches superficielles de l'océan, au moyen de la modélisation numérique (Durand et al., 2007). Nous avons ensuite étudié l'observabilité de ces courants de bord à partir des nouveaux produits d'altimétrie spatiale côtière (en collaboration avec le LEGOS/CTOH). Cela a abouti à l'élaboration d'une méthodologie objective pour restituer le courant côtier de surface à partir de l'altimétrie côtière le long de la trace satellite (Durand et al., 2008). La méthodologie a été appliquée de façon systématique à tout le bord Ouest de la Baie du Bengale pour caractériser la variabilité spatio-temporelle du Courant Côtier Est Indien (Durand et al., 2009).

L'Océan Indien équatorial s'est significativement réchauffé en surface sur la période 1960-2000, malgré une baisse régionale du flux net de chaleur atmosphérique. Nous avons montré par un bilan de chaleur dans un modèle couplé que ce réchauffement est dû à un ralentissement de l'upwelling sud-équatorial par rapport à la période pré-industrielle, et entraîne une intensification de l'évaporation qui explique la baisse du flux de chaleur (Alory et Meyers, 2009).