

N° d'ordre:

THÈSE

Présentée pour obtenir

L'HABILITATION À DIRIGER DES
RECHERCHES

Spécialité: Océanographie Physique

par

Pierrick PENVEN

Modélisation numérique à fine échelle autour du continent africain pour les écosystèmes marins et le climat

Soutenue le 1 Juin 2016 devant la Commission d'examen:

M. Bernard BOURLÈS
M. Xavier CARTON
M. Alain COLIN DE VERDIÈRE (Président du jury)
M. Yves MOREL
M. Mathieu ROUAULT

Rapporteurs:

M. Bernard Bourlès
M. Xavier Carton
M. Patrick Marchesiello



Thèse préparée au
Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale
(UMR 6523 CNRS, IFREMER, IRD, UBO)
Institut de Recherche pour le Développement
Centre IRD de Bretagne
BP 70 - Plouzané - France

Résumé

Les transports océaniques méridiens ont lieu principalement aux bords des bassins. Dans ces zones proches des côtes, le franchissement des pentes est limité par la rotation terrestre. L'effet β planétaire classe les marges continentales en bords Est et en bords Ouest. Les bords Est sont généralement associés aux upwellings côtiers, des zones océaniques parmi les plus productives de la planète. Les bords Ouest sont caractérisés par la présence de courants intenses, assurant la fermeture des gyres océaniques et l'essentiel des transports océaniques méridiens de chaleur.

Autour du continent Africain, un courant de bord Ouest majeur (le courant des Aiguilles) rétroflecte à proximité d'un système d'upwelling côtier de bord Est particulièrement productif (le Benguela). En amont du courant des Aiguilles, dans le canal du Mozambique, les anneaux du Mozambique, tourbillons parmi les plus énergétiques au monde, structurent les écosystèmes marins et perturbent le comportement du courant des Aiguilles. Les effets du déversement du courant des Aiguilles sur les cycles climatiques planétaires ont été démontrés. Le système d'upwelling du Benguela permet la comparaison de systèmes contrastés. Plus au Nord, le Golfe de Guinée héberge un système d'upwelling côtier original le long de sa côte Nord, proche de l'Équateur.

Un modèle numérique régional a été employé en collaboration étroite avec nos partenaires au sud pour adresser ces différents processus autour du continent africain. Ceci a conduit au co-encadrement de 13 thèses de doctorat et de 3 masters. Ce manuscrit résume les résultats obtenus sur la période 2003-2015 autour de ces systèmes, que ce soit pour les upwellings du Benguela et du Golfe de Guinée, en relation avec l'Atlantique Tropical ; pour les changements du déversement du courant des Aiguilles et la compréhension de leurs contrôles ; pour la caractérisation des tourbillons dans le Canal du Mozambique et de leurs impacts sur les écosystèmes marins ; ou pour la dynamique de plateau et le transport larvaire le long des côtes mozambicaines.

Ces travaux en modélisation numérique régionale apportent un éclairage sur ces processus et leur évolution dans le temps avec un fort potentiel pour des applications régionales telles que les écosystèmes marins, la vulnérabilité côtière, la variabilité climatique ou les systèmes opérationnels. L'apport le plus valorisant reste cependant la participation à la formation de nouveaux chercheurs en océanographie.

Mots-clefs : Modélisation Numérique, Upwelling Côtier, Courants de Bord, Plateaux, Tourbillons, Turbulence Océanique, Fines Échelles, Courant du Benguela, Courant des Aiguilles, Canal du Mozambique Atlantique Tropicale.

FINE SCALE NUMERICAL MODELING AROUND THE AFRICAN CONTINENT FOR MARINE ECOSYSTEMS AND CLIMATE

Abstract

Poleward/equatorward ocean transport occurs mostly along boundaries of oceanic basins. In these areas close to the coasts, slopes crossing is limited by Earth's rotation. Because of the planetary beta effect, continental margins are separated between eastern and western boundaries. Eastern boundaries are generally associated with coastal upwelling, ocean areas among the most productive in the world. Western boundaries are characterized by the presence of intense currents, ensuring the closure of ocean gyres and the bulk of poleward oceanic heat transport.

Around the African continent a major western boundary current (the Agulhas current) retroflects near a particularly productive eastern boundary coastal upwelling system (the Benguela). Upstream of the Agulhas current, in the Mozambique Channel, eddies among the most energetic in the world structure marine ecosystems and disrupt the behavior of the Agulhas current. The effects of the Agulhas leakage on planetary climate cycles have been demonstrated. The Benguela upwelling allows the comparison of contrasting systems. Further to the North, the Gulf of Guinea hosts an original coastal upwelling system along its northern coast, close to the Equator.

A regional numerical model has been used in close collaboration with our partners in southern countries to address these different processes around the African continent. This has led to the co-supervision of 13 PhD and 3 master students. This manuscript summarizes the results obtained for these systems: for coastal upwelling in the Benguela and in the Gulf of Guinea, in relation to the Tropical Atlantic; for the changes in Agulhas leakage and the understanding of their controls; for the characterization of the eddies in the Mozambique channel and their impacts on marine ecosystems; or for shelf dynamics and larval transport along the Mozambican coasts.

These regional modeling endeavors shed light on such processes and their evolution in time. This has a strong potential for regional applications such as marine ecosystems, coastal vulnerability, climate variability or operational systems. The most satisfying aspects remain however the participation in the training of new researchers in oceanography.

Keywords : Numerical Modeling, Coastal Upwelling, Boundary Currents, Shelves, Eddies, Ocean Turbulence, Fine Scales, Benguela Current, Agulhas Current, Mozambique Channel, Tropical Atlantic.

Table des matières

I	Introduction	8
1	Introduction générale	10
2	Historique des premières étapes de ma carrière	14
II	Méthodes	17
3	Un système intégré de modélisation numérique de l’océan régional	19
3.1	Roms_Agrif : un modèle d’océan régional portable et performant	20
3.2	ROMSTOOLS : une suite d’outils pour la modélisation océanique	23
3.3	Un outil diagnostique : détection de tourbillons pour les modèles et l’al- timétrie	25
4	Quelques travaux sur les observations	27
4.1	Biais dans les produits de température de surface de mer AVHRR Pathfinder	27
4.2	Équilibre cyclogéostrophique pour estimer des courants plus réalistes de- puis les données de hauteur de la mer	29
III	Résultats scientifiques : A - dynamique tropicale et up- welling côtiers	32
5	Systèmes d’upwelling côtier du Pérou et du Benguela	34
5.1	Le Pérou	36
5.2	Le Benguela	38
6	Dynamique de l’Atlantique tropical et upwelling au nord du golfe de Guinée	41
6.1	Analyse énergétique de la variabilité de l’Atlantique tropical	41
6.2	L’upwelling côtier au nord du Golfe de Guinée	44
IV	Résultats scientifiques : B - dynamique océanique et va- riabilité du système du courant des Aiguilles	47

7	Dynamique du courant des Aiguilles	51
7.1	Modélisation du courant des Aiguilles	51
7.2	Application de SAfE pour la variabilité amont du courant des Aiguilles et les processus de transport en aval	55
8	Changements climatiques et courant des Aiguilles	57
8.1	Changements récents dans l'océan Indien et le système du courant des Aiguilles	58
8.2	Contrôles du déversement du courant des Aiguilles	62
V	Résultats scientifiques : C - dynamique tourbillonnaire et écosystèmes marins dans le canal du Mozambique	68
9	Les tourbillons dans le canal du Mozambique	72
9.1	Modélisation des tourbillons dans le canal du Mozambique	72
9.2	Influence des tourbillons sur la production biologique dans le Canal du Mozambique	76
10	Processus de transport sur le plateau et dynamique côtière autour du canal du Mozambique	79
10.1	Marées et transport larvaire sur le banc de Sofala	79
10.2	Modélisation des tourbillons cycloniques dans la région de la baie de Delagoa	80
10.3	Variabilité interannuelle au large de la Tanzanie	81
VI	Conclusion - Perspectives	85
11	Conclusion	87
12	Perspectives	88
12.1	Participation au travail sur CROCO	89
12.2	Puit d'énergie à l'ouest de l'océan Indien	89
	Références	93
VII	Annexes	106

A	Recherche en partenariat pour le développement	108
A.1	Co-construction de programmes de recherche dans et avec des pays en développement	108
A.2	Expérience de travail dans les pays en développement	108
A.3	Participation au renforcement des capacités au sud	109
A.4	Co-publications des résultats des recherches	112
B	Application et valorisation sociale, économique et culturelle de la recherche	117
B.1	Participation à des articles de vulgarisation scientifique	117
B.2	Participation à la production audiovisuelle	117
C	Directions, animation et administration de la recherche	117
D	Participation à la formation	118

Première partie

Introduction

Sommaire

1	Introduction générale	10
2	Historique des premières étapes de ma carrière	14

“Where there is an ocean, a marine biologist is never on holiday.” James Bond dans “A spy who loved me”, un film de Lewis Gilbert.

1 Introduction générale

Je suis chargé de recherche depuis juillet 2002 à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Dans un contexte scientifique national en évolution, l'IRD a su garder sa spécificité, privilégiant une science pluridisciplinaire afin de contribuer au développement des pays du sud. Ainsi, les recherches de l'institut sont centrées sur les relations entre l'homme et son milieu dans les régions tropicales et méditerranéennes (<https://www.ird.fr/la-recherche/thematiques-de-recherche/grands-enjeux-de-la-recherche-pour-le-developpement>). L'IRD a mis en avant 2 enjeux scientifiques majeurs intéressant l'océanographie :

- la compréhension des changements climatiques,
- la compréhension et la gestion des écosystèmes marins.

La dynamique océanique côtière et régionale est directement impliquée dans ces 2 thématiques. On peut citer par exemple les transferts de chaleur par les courants de bord ouest pour le climat et les upwellings côtiers pour les écosystèmes marins. Les structures fines y jouent un rôle important pour le transfert des propriétés océaniques au travers des plateaux, pour l'export de ces propriétés vers le large, pour l'ajustement ou la déstabilisation des courants de bord ouest, pour l'enfouissement de matière vers l'océan profond, ou au contraire pour les remontées de nutriments vers la surface.

L'étude de la dynamique océanique côtière et régionale sur les pourtours du continent africain constitue le cœur de mon activité de recherche et se décline en 3 axes principaux :

- Les upwellings côtiers et la dynamique océanique tropicale
- La dynamique du courant des Aiguilles, de sa rétroflexion, de son déversement en Atlantique sud et de ses effets sur le climat local et global.
- Les tourbillons océaniques et la dynamique de plateau dans le sud ouest de l'océan Indien (principalement dans le canal du Mozambique) et leurs liens avec les écosystèmes marins.

Dans la suite du document, la structure de la présentation des résultats scientifiques suit ces trois axes. Dans chaque cas, les processus à fine échelle tels que les tourbillons, les fronts ou les filaments occupent une place privilégiée. Nous retrouvons aussi dans chacun des cas un lien entre les processus de circulation à grande (voir très grande) échelle et les systèmes côtiers.

La démarche scientifique se base en majorité sur la modélisation numérique de la circulation océanique sur les plateaux continentaux ainsi qu'en océan profond. Les configurations expérimentales sont réalistes ou idéalisées (la frontière étant cependant floue entre ces deux approches). L'attention est portée sur l'applicabilité des outils et des résultats pour la compréhension de la dynamique des écosystèmes marins. La méthode de travail est principalement la modélisation numérique régionale. L'objectif est de continuer le développement de la branche de modélisation numérique océanique côtière et régionale au sein de l'IRD. Les applications potentielles sont variées : rôle de l'océan dans la machine climatique planétaire, processus physiques intervenant dans la dynamique des ressources halieutiques, de la biogéochimie, du transport sédimentaire, de la qualité de l'eau, de l'érosion côtière, de la pollution ou des surcotes.

Ce manuscrit présente un résumé du travail effectué dans le cadre des unités de recherche IDYLE (2001-2004), ECO-UP (2005-2007) et LPO (2008-présent) au centre

IRD de Bretagne à Brest et lors de deux affectations (2004-2006 et 2010-2013) à l'université de Cape Town (UCT) en Afrique du Sud. Cette présence au sud est complétée par trois missions de longues durées : IMARPE, Lima, Pérou (mars à mai 2003) ; UCT, Cape Town, Afrique du Sud (mars à mai 2007) ; UCT, Cape Town, Afrique du Sud (février à avril 2008). Une large proportion des travaux présentés ici a été assurée lors de collaborations autour de l'encadrement d'étudiants du Sud, dont voici la liste :

- Sarah Asdar. Thèse de doctorat en co-tutelle entre UCT et UBO démarrée en janvier 2015. Sujet : “Impact du changement climatique sur les écosystèmes de l'archipel du Prince-Édouard : rôle des processus océaniques à mésoéchelle”. Encadrants : I. Ansorge (UCT, South Africa), J. Deshayes (CNRS, France), P. Penven (IRD, France), T. Gorgues (IRD, France) et X. Carton (UBO, France). Financement : NRF (South Africa).
- Heriniaina Juliano Dani Ramanatsoa. Thèse de doctorat de UCT démarrée en mai 2014. Encadrants : M. Krug (CSIR, South Africa), M. Rouault (UCT, South Africa) and P. Penven (IRD, France) Sujet : “Coastal upwelling south of Madagascar, Interactions with the East Madagascar Current”. Financement : Science Faculty UCT (South Africa).
- Fehmi Dilmahamod. Thèse de doctorat de UCT démarrée en octobre 2014. Sujet : “Modélisation du courant Est Madagascar et de l'efflorescence planctonique de Madagascar avec un modèle couplé physique-biogéochimie”. Encadrants : J. Hermes (SAEON, South Africa), P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : NRF / SAEON (South Africa).
- Obadias Cossa. Thèse de doctorat de UCT démarrée en mars 2013. Sujet : “Modélisation numérique de la dynamique côtière et des ondes de marée interne en baie de Maputo”. Encadrants : S. Pous (MHN), P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : gouvernement Mozambique.
- Sandrine Djakouré. Thèse de doctorat de l'Université Abomey Calavi (Bénin) et l'Université de Cocody (Côte d'Ivoire), démarrée en septembre 2011 et obtenue en février 2015. Sujet : “Analyse numérique de la circulation océanique de la région nord du golfe de Guinée”. Encadrants : B. Bourlès (IRD, France) et P. Penven (IRD, France). Financement : bourse IRD, France.
- Bernardino Malauene. Thèse de doctorat de UCT démarrée en juin 2011 et obtenue en juin 2015. Sujet : “Influences environnementales sur la population de crevettes péneïdées sur le banc de Sofala, canal du Mozambique”. Encadrants : C. L. Moloney (UCT, South Africa), M. J. Roberts (DEA, South Africa), F. Marsac (IRD, France), P. Penven (IRD, France) et C. Lett (IRD, France). Financement : bourse IRD, France.
- Yonss José. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2010 et obtenue en juin 2014. Sujet : “Structuration par l'activité méso-échelle de l'écosystème pélagique dans le canal du Mozambique”. Encadrants : O. Maury (IRD, France), O. Aumont (IRD, France), P. Penven (IRD, France), E. Machu (IRD, France), C. L. Moloney (UCT, South Africa) et F. Shillington (UCT, South Africa). Financement : bourse IRD, France.
- Benjamin Roger Loveday. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2010 et obtenue en juin 2014. Sujet : “Modélisation des échanges interocéaniques forcés par le vent : dans quelle mesure les forçages distants du courant des Aiguilles contrôlent les flux entre les bassins océaniques sous des conditions climatiques contrastées?”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South

- Africa). Financement : GATEWAYS.
- Majuto Clement Manyilizu. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2010 et obtenue en juin 2014. Sujet : “Modélisation de la variabilité du sud ouest de l’océan Indien Tropical”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), F. Dufois (UCT, South Africa) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : WIORISE.
 - Clousa Maueua Chevane. Master de UCT démarré en septembre 2011 et obtenu en juin 2012. Sujet : “Caractéristiques générales des marées modélisées sur le banc de Sofala, Mozambique”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : SIDA.
 - Issufo Halo. Thèse de doctorat de UCT démarrée en avril 2008 et obtenue en décembre 2012. Sujet : “Les tourbillons du Canal du Mozambique : formation, comportement et rôle pour les écosystèmes ; une étude de modélisation”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), I. Ansorge (UCT, South Africa) et J. Lutjeharms (UCT, South Africa). Financement : bourse IRD, France.
 - Nathalie Burls. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2008 et obtenue en décembre 2010. Sujet : “Rôle de la dynamique océanique dans la variabilité climatique de l’Atlantique Tropical”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), C. Reason (UCT, South Africa) et G. Philander (UCT, South Africa). Financement : NRF (South Africa).
 - Yonss José. Stage de Master 2 de l’Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II démarré en mars 2009 et obtenu en juin 2009. Sujet : “Circulation hydrodynamique dans l’archipel de Quirimbas : influence de la circulation méso-échelle - impact des ouragans”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et C. Chevalier (IRD, France). Financement : Bourse ambassade de France au Mozambique.
 - Jennifer Veitch. Thèse de doctorat de UCT démarrée en janvier 2006 et obtenue en juin 2010. Sujet : “Modélisation du système d’upwelling du Benguela - comparaisons entre le Benguela Sud et le Benguela Nord”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et F. Shillington (UCT, South Africa). Financement : bourse IRD, France / NRF (South Africa).
 - Nicolette Chang. Thèse de doctorat de UCT démarrée en janvier 2004 et obtenue en juin 2009. Sujet : “Dynamique de la langue d’eau froide à l’est du banc des Aiguilles (Afrique du Sud)”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et F. Shillington (UCT, South Africa). Financement : NRF / CSIR (South Africa).
 - Issufo Halo. Master de UCT obtenu en novembre 2008. Sujet : “Influence des dorsales océaniques sur la circulation océanique au sud du canal du Mozambique et de Madagascar”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), I. J. Ansorge (UCT, South Africa) et J. R. E. Lutjeharms (UCT, South Africa). Financement : NRF / Canon Collin Trust (South Africa).

On peut noter que 5 des 13 thèses de doctorat ont bénéficié des bourses de l’IRD (ou anciennement AIRD) et qu’une grande majorité a obtenu un complément de bourse par le LMI ICEMASA. Ceci montre l’importance capitale des financements IRD pour la formation des étudiants au Sud. Tous ces encadrements ont été effectués en collaboration avec un ou plusieurs collègues du Sud (et du Nord). Je tiens à les remercier de leur confiance. Je tiens aussi à remercier tous les étudiants pour leur confiance, leur enthousiasme, la quantité et la qualité de travail fournie. J’ai été très impressionné. Les travaux en modélisation numérique sont relativement peu gourmands en financements. Ainsi, bien que les travaux s’inscrivent dans le cadre de programmes et projets nationaux et internationaux (comme par exemple le projet Benguela Current Large Marine

Ecosystem, le projet WRC MAHYVA, le projet LEFE INTERUP, le projet BONUS-GOODHOPE, le projet NRF SeaChange, le groupe de travail SCOR 136 ou le projet ANR COMODO), une très large proportion des ressources utilisées proviennent des fonds récurrents de l'IRD via la dotation aux laboratoires ou le LMI ICEMASA. Ces fonds ont assuré la poursuite et la continuité de ces activités de recherche. Pour l'accès aux calculateurs, j'ai jusqu'à présent privilégié l'utilisation des ressources locales (ou celles que l'on avait installées localement). Pour assurer une pérennité des méthodes transmises dans le contexte d'une recherche pour le développement, les étudiants doivent pouvoir réaliser leurs expériences sur place. Nous avons ainsi bénéficié des stations de travail du BCLME et de UCT, des calculateurs du CHPC (Cape Town, Afrique du Sud) et de Caparmor (Ifremer, France). Nous avons récemment équipé les instituts partenaires du Mozambique de 3 stations de travail dans le cadre de la JEA MOCA.

Après un rappel succinct des premières étapes de ma carrière, une deuxième partie est dédiée aux aspects méthodologiques. Le contexte d'une recherche pour le développement amène à des choix déterminants dans les outils utilisés et la manière de les employer.

Les trois parties suivantes développent les résultats obtenus selon les trois axes de recherche présentés précédemment. Dans une première partie, les upwellings côtiers constituent un champ de travail historique pour l'océanographie à l'IRD car ils hébergent des pêcheries importantes pour les pays du Sud. Cette thématique est liée dans une même partie à la dynamique océanique tropicale, un autre domaine historique de l'IRD. L'océan tropical exerce un contrôle sur la position de la thermocline et par conséquent sur les upwellings côtiers. L'exemple peut être le plus spectaculaire est la propagation du signal des événements de type "El Niño" le long des côtes Sud Américaines.

La seconde partie "résultats" est dédiée au système de courant de bord ouest de l'océan Indien : le courant des Aiguilles. C'est un courant majeur du système océanique global. Il a été le sujet d'une attention spécifique de la part de la communauté scientifique internationale ces dernières années du fait de son impact potentiel sur le fonctionnement de la machine climatique terrestre.

La troisième et dernière partie "résultats" présente des travaux récents effectués principalement autour du canal du Mozambique. C'est un système régional à l'ouest de l'océan Indien caractérisé par la présence de tourbillons intenses : les anneaux du Mozambique. Les tourbillons dans le canal sont connus pour avoir un impact significatif sur les écosystèmes marins. L'accent est porté sur la dynamique spécifique des tourbillons dans cette région et sur leurs rôles sur les écosystèmes marins. Le banc de Sofala qui s'étend sur la partie ouest du canal du Mozambique héberge une pêcherie de crevettes pénaïdées. Le rôle respectif des panaches des rivières, des marées et de la circulation dans le canal est testé pour le transport des larves sur le plateau.

2 Historique des premières étapes de ma carrière

Afin de préciser le cadre de la synthèse de mes travaux, cette section présente un bref rappel des étapes principales du début de ma carrière scientifique jusqu'en 2002.

Après avoir suivi la formation en physique des océans du DEA “météorologie, océanographie et environnement ; option D : physique des océans” (obtenu en juin 1997) de l'université de Bretagne Occidentale (UBO), j'ai poursuivi ma thèse de doctorat dans le cadre du projet pluridisciplinaire VIBES (Viability of exploited pelagic fish resources in the Benguela Ecosystems and Stocks in relation with the environment), mené de manière conjointe par l'IRD, l'Université de Cape Town (UCT, Cape Town, Afrique du Sud), l'Institut des pêches d'Afrique du Sud et le Laboratoire de Physique des Océans (LPO, Brest) de décembre 1997 à décembre 2000 sous la supervision de A. Colin de Verdière et C. Roy. L'objet d'étude était le système d'upwelling côtier du Benguela, un des quatre grands systèmes d'upwelling mondiaux au sud-ouest du continent africain, avec pour objectif la quantification des effets des processus de transport affectant le recrutement des sardines et des anchois dans la partie sud du système.

Dans le Benguela Sud, un piégeage par une recirculation côtière en aval du cap Columbine en baie de Ste Hélène a été identifié comme étant un processus qui pourrait assurer la rétention des œufs et des larves dans un milieu favorable à leur développement. Des expériences idéalisées ont montré les contrôles topographiques et frictionnels sur ce processus de recirculation ainsi que les conséquences potentielles sur la rétention (Penven *et al.*, 2000). Cette spécificité pourrait faire de la baie de Ste Hélène la nourricerie de la côte ouest de l'Afrique du Sud.

Une première configuration réaliste de la circulation océanique pour le Benguela Sud (PLUME) (Figure 1) a été développée pour comprendre les processus physiques intervenant durant le parcours des œufs, larves et juvéniles de la ponte à leur recrutement. PLUME reproduit les caractéristiques océaniques de la région (Penven *et al.*, 2001b), comme par exemple les tourbillons cycloniques générés au détachement du courant des Aiguilles à l'extrémité Sud du banc des Aiguilles (Penven *et al.*, 2001a) ou les tourbillons cycloniques associés au cisaillement entre le courant des Aiguilles et la côte (Shear Edge Eddies) (Lutjeharms *et al.*, 2003). Un traceur passif a été introduit pour suivre le transport larvaire du banc des Aiguilles vers la côte ouest de l'Afrique du Sud. La proportion des produits de la ponte atteignant les zones de nourriceries est fortement dépendante du moment de la ponte. On observe un parcours privilégié empruntant le jet côtier entre le cap des Aiguilles et cap Columbine. L'effet négatif de la dérive d'Ekman, entraînant les œufs au large est marqué. Il peut être cependant compensé par des processus tourbillonnaires piégeant le matériel biologique à la côte (Penven, 2000).

Les résultats de PLUME ont été employés pour forcer un premier modèle de simulation de vie (Individual Based Model : IBM) développé dans le cadre de VIBES à l'Université de Cape Town (Mullon *et al.*, 2002b). Ces expériences IBM ont montré les effets du lieu de la ponte, du moment de la ponte (Huggett *et al.*, 2003) et de la flottabilité des œufs (Parada *et al.*, 2003) pour le succès du recrutement des anchois dans le Benguela Sud. Un modèle IBM “évolutionnaire” a été mis au point pour tester l'hypothèse “obstinate nature” sur le recrutement des petits poissons pélagiques (Mullon *et al.*, 2002a). Ce modèle IBM a ensuite été consolidé par les équipes de l'IRD et est désormais connu sous le nom “ICHTHYOP” (Lett *et al.*, 2007, 2008). PLUME a été couplé à deux mo-

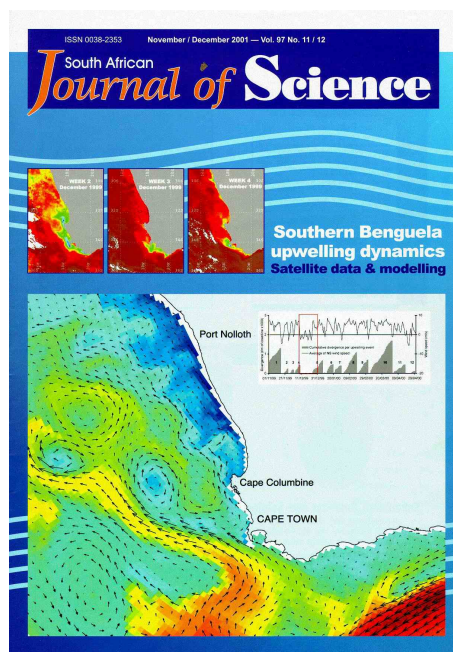


FIGURE 1 – Une image de températures et courants de surface issus du modèle PLUME publiée en couverture du South African Journal of Science (volume 97, Novembre-Décembre 2001).

dules biogéochimiques (de type “NPZD” et “N2P2Z2D2”) pour étudier la dynamique des premiers niveaux de la chaîne trophique dans le Benguela Sud (Koné *et al.*, 2004, 2005). PLUME a été utilisé pour suivre les variations des habitats de ponte pour l’anchois dans le Benguela Sud (Roy *et al.*, 2002, 2005). Dans le cadre d’une coopération entre l’unité de recherche IDYLE et le LPO, PLUME a été forcé par des données de vent issues des diffusiomètres embarqués sur les satellites ERS pour tester le rôle des variations du vent pour la variabilité interannuelle dans le Benguela Sud (Blanke *et al.*, 2002a,b).

Ce travail sur la modélisation numérique des systèmes d’upwelling côtier a été approfondi dans le cadre d’un post-doctorat au Center of Earth System Research (CESR) à l’Université de Californie à Los Angeles (UCLA) sous la supervision de J. C. McWilliams. Dans le cadre de l’étude du système d’upwelling Californien et particulièrement de la région de la baie de Monterey, j’ai participé avec L. Debreu, P. Marchesiello et J. C. Mc Williams au développement d’un système de modèles océaniques emboîtés (ROMS_AGRIF) et à son application à la côte ouest des États Unis (Penven *et al.*, 2006a). Ce système d’emboîtement de modèles a été mis au point pour obtenir, à un coût informatique raisonnable, des solutions locales à haute résolution tout en préservant la circulation à grand échelle. Cette méthode a été appliquée sur un domaine à haute résolution de l’upwelling central de Californie, incorporé dans un modèle englobant l’ensemble de la côte Pacifique des États-Unis. Pour analyser la sensibilité du courant de Californie aux forçages atmosphériques, une série d’expériences a été lancée en utilisant des climatologies de vent différentes : COADS, QuickSCAT, NCEP et COAMPS. Bien que ces produits soient relativement similaires à grande échelle, ils présentent des différences significatives à la côte. Ceci induit de fortes disparités dans le rotationnel du vent et donc des changements dans la structure du courant de Californie (Penven *et al.*, 2002). En particulier, la présence du courant de Davidson dépend

directement de la représentation du rotationnel du vent près de la côte Californienne.

J'ai été embauché à l'IRD en Juillet 2002 dans l'unité de recherche IDYLE ("Interactions et DYnamiques spatiaLEs des ressources renouvelables dans les écosystèmes d'upwelling"). L'UR ECO-UP ("structuration et fonctionnement des ÉCOsystèmes d'UPwelling exploités") lui a ensuite succédé. ECO-UP se focalisait sur le fonctionnement des écosystèmes d'upwelling côtiers soumis aux changements climatiques et à la pression anthropique. Mon programme de recherche s'inscrivait dans la composante "physique des océans" de l'unité de recherche IDYLE et de l'unité de recherche ECO-UP dans le cadre d'une approche écosystémique des pêches. Dans le cadre de la suppression des unités de recherche de l'IRD et l'intégration dans les UMRs, j'ai été incorporé à l'UMR LPO en janvier 2008. Je suis actuellement membre de l'équipe 1 du LPO : "Dynamique de la Variabilité Océan-Atmosphère" et je suis membre du laboratoire mixte international ICEMASA ("International Centre for Education, Marine and Atmospheric Sciences over Africa").

Deuxième partie

Méthodes

Sommaire

3	Un système intégré de modélisation numérique de l'océan régional	19
3.1	Roms_Agrif : un modèle d'océan régional portable et performant . .	20
3.2	ROMSTOOLS : une suite d'outils pour la modélisation océanique . .	23
3.3	Un outil diagnostique : détection de tourbillons pour les modèles et l'altimétrie	25
4	Quelques travaux sur les observations	27
4.1	Biais dans les produits de température de surface de mer AVHRR Pathfinder	27
4.2	Équilibre cyclogéostrophique pour estimer des courants plus réalistes depuis les données de hauteur de la mer	29

“Il vaut mieux ne pas converger quand la solution n’existe pas.” échanges lors de la rédaction du papier “cyclogeostrophic balance in the Mozambique Channel”

Le travail avec les partenaires du sud dans un institut comme l'IRD oriente la démarche scientifique et en tout premier lieu la méthodologie. En effet, les outils développés doivent être performants pour une recherche de qualité internationale et doivent pouvoir aussi être utilisés efficacement par nos partenaires. Pour la modélisation numérique, nous avons privilégié la possibilité de faire tourner les expériences dans les centres de calcul locaux plutôt que d'analyser, par exemple, des simulations ayant tourné sur les superordinateurs des pays du Nord. La modélisation restant un exercice expérimental, un étudiant doit pouvoir tester lui même ses hypothèses, l'objectif étant l'appropriation par le partenaire des outils de modélisation. Ceci oriente le développement de systèmes spécifiques, qui doivent être : robustes, documentés, simples d'utilisation, immédiatement portables, performants, libres, disponibles et surtout adaptés aux problématiques locales.

C'est un effort initialisé en collaboration avec des collègues de l'IRD (P. Marchesio, G. Cambon) et de l'INRIA (L. Debreu). Cet effort se poursuit dans le cadre du développement de modèles dans le contexte du projet ANR COMODO et du projet CROCO. Dans le contexte de la recherche pour le développement, nous nous sommes attachés à la mise au point et à la mise à disposition d'outils performants pour un travail collaboratif fructueux avec nos partenaires du Sud.

3 Un système intégré de modélisation numérique de l'océan régional

La modélisation numérique océanique ne se limite pas à la création et la mise en place du modèle le plus performant possible. Les outils et les données pour générer les différentes configurations ainsi que les outils et les observations pour évaluer la pertinence des résultats sont aussi nécessaires. L'aspect le plus important du travail de modélisateur reste l'interprétation et l'analyse des résultats. Dans ce cadre, les approches deviennent plus systématiques et nous nous attachons à développer des outils diagnostiques génériques pour extraire les informations pertinentes des expériences numériques.

3.1 Roms_Agrif : un modèle d'océan régional portable et performant

ROMS (Regional Ocean Modeling System) est un modèle aux équations primitives 3D pour la simulation des courants, des écosystèmes, des cycles biogéochimiques et du transport sédimentaire dans les régions côtières développé à UCLA (États Unis) (Shchepetkin and McWilliams, 2005). Le modèle ROMS_AGRIF est la version de ROMS que nous maintenons à l'IRD (<http://www.romsagrif.org/>). ROMS_AGRIF est adapté aux problématiques de l'IRD : il autorise la génération de modèles emboîtés pour accéder localement à la haute résolution à un coût numérique réduit (Penven *et al.*, 2006a; Debreu *et al.*, 2012), il est couplé à différents modèles d'écosystèmes et il est portable et performant.

Ce qui distingue plus clairement les courants côtiers et hauturiers sont leurs échelles spatiales dominantes : de $O(1 \sim 30)$ km près des côtes à $O(30 \sim 1000)$ km au large. En pratique, ces phénomènes sont généralement modélisés par des méthodes distinctes. En particulier, il est difficile pour une grille de calcul régulière de résoudre simultanément les différents types de courants. Afin d'obtenir des solutions locales à haute résolution tout en préservant la circulation à l'échelle régionale, à un coût abordable de calcul, une méthode d'emboîtement de grilles a été intégrée dans le système océanique de modélisation régionale ROMS. Le système est basé sur la librairie AGRIF (raffinement adaptatif de grille en Fortran). La structure du modèle ROMS, avec des pas de temps différents pour les processus rapides (barotropes) et lents (baroclines) complique le développement d'un système de grilles emboîtées. Dans un premier temps, la librairie AGRIF a été appliquée pour forcer des grilles à haute résolution sans retour d'information vers la grande échelle (ce que l'on appelle la méthode d'emboîtement à une voie). Après une première évaluation sur un cas test de vortex barocline, la procédure a été appliquée à l'upwelling côtier de Californie, autour de la baie de Monterey, intégré dans un domaine comprenant toute la côte Pacifique des États-Unis (Penven *et al.*, 2006a). Les solutions sont évaluées par comparaison avec des solutions pour l'ensemble de la région à haute résolution.

La mise au point d'un système d'imbrication de grilles complet et satisfaisant pour ROMS_AGRIF a pris plus de temps (Debreu *et al.*, 2012). La méthode est basée sur trois approches novatrices :

1. Le traitement du raffinement de grille se situe désormais au niveau du mode rapide.
2. Le retour d'information vers la grande échelle utilise des schémas spatialement sélectifs.
3. La conservation des volumes et traceurs est contrôlée explicitement.

La technique a de nouveau été testée sur les cas du vortex barocline et de l'upwelling côtier de Californie (Figure 2). La méthode autorise plusieurs niveaux d'imbrication et plusieurs grilles à un niveau donné. Cette capacité autorise la simulation réaliste des interactions entre la côte et le large sur plusieurs échelles.

ROMS_AGRIF est un code ouvert qui est le sujet d'un développement continu de la part de la communauté scientifique (et particulièrement des chercheurs de l'IRD et de l'INRIA). De plus ROMS_AGRIF a bénéficié en 2007 de l'embauche à l'IRD d'un ingénieur d'étude (G. Cambon) pour le suivi des codes. Le code source et sa documentation

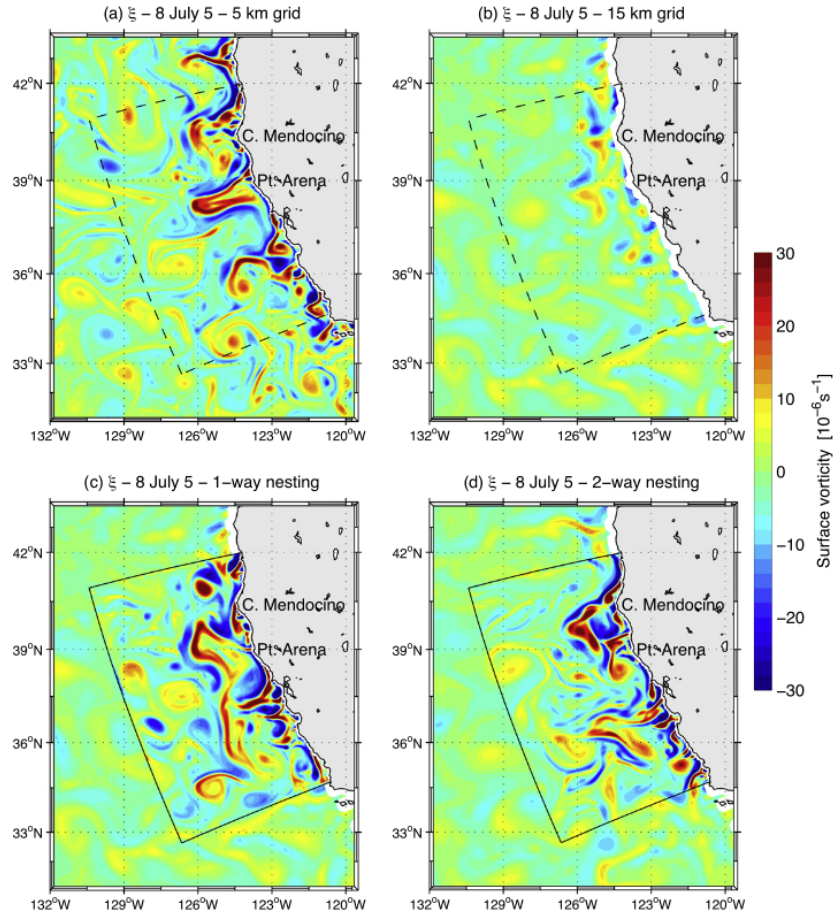


FIGURE 2 – Exemple de composante verticale de vorticité de surface [10^{-6} s^{-1}] pour la simulation à 5 km de résolution sur tout le domaine (a), la simulation à 15 km de résolution (b), la grille emboîtée à 5 km de résolution pour un emboîtement à une voie (c), la grille emboîtée dans le cas d'un emboîtement à deux voies (d). On peut noter la propagation de structures à la frontière ouest de la grille emboîtée. Figure tirée de l'article rédigée par Debreu *et al.* (2012).

sont disponibles sur le site <http://www.romsagrif.org/>.

ROMS_AGRIF étant un code actif, bénéficiant de la présence d'une communauté étendue, les additions récentes dans le modèle sont :

- l'emboîtement de grilles au niveau barotrope (Debreu *et al.*, 2012) ;
- des opérateurs d'hyperdiffusion semi-implicites orientés dans les directions isopycnales pour les schémas d'advection (Marchesiello *et al.*, 2009; Lemarié *et al.*, 2012b) ;
- la mise à jour du schéma de fermeture turbulente KPP (Large *et al.*, 1994, paramétrisation non locale du profil de fermeture turbulente K) pour le rendre différentiable (Lemarié *et al.*, 2012a; Shchepetkin and McWilliams, 2005) ;
- l'ajout du schéma de fermeture turbulente générique (generic turbulence length-scale, GLS) (Umlauf and Burchard, 2003; Warner *et al.*, 2005) ;
- l'implémentation d'un schéma d'advection de traceur d'ordre supérieur monotone (de type WENO5) (Liu *et al.*, 1994; Borges *et al.*, 2008) ;
- un système de couplage océan-atmosphère basé sur le modèle atmosphérique

WRF (Weather Research and Forecasting Model) (Michalakes *et al.*, 2004) et l’interface OASIS3-MCT (Valcke *et al.*, 2015) ;

- un système de couplage vagues-courants (McWilliams *et al.*, 2004; Uchiyama *et al.*, 2010) ;
- des couplages avec les modèles biogéochimiques PISCES (Aumont and Bopp, 2006) et BioEBUS (Gutknecht *et al.*, 2013) ;
- un schéma autorisant les bancs découvrant (Warner *et al.*, 2013).

Dans un futur proche, ROMS_AGRIF va laisser la place à un nouveau modèle d’océan côtier / régional pour la communauté française : CROCO (Coastal and Regional Ocean COMMunity model ; [https ://gforge.inria.fr/projects/croco/](https://gforge.inria.fr/projects/croco/)). CROCO répond aux recommandations du projet ANR COMODO et incorpore les capacités des modèles ROMS_AGRIF (cœur numérique), MARS3D (sédiments, biogéochimie côtière) et SNH (non-hydrostatique). CROCO Les développements futurs comprennent l’intégration d’un système de gestion des entrées-sorties optimisé (XIOS - [http ://forge.ipsl.jussieu.fr/ioserver/](http://forge.ipsl.jussieu.fr/ioserver/)) et d’un solveur non hydrostatique explicite (Aulclair *et al.*, 2011).

3.2 ROMSTOOLS : une suite d'outils pour la modélisation océanique

Pour rendre la modélisation océanique régionale accessible aux partenaires des pays du Sud, ROMSTOOLS est un ensemble de logiciels dédiés à la création, la visualisation et à l'analyse des simulations numériques (Penven *et al.*, 2008). Pour faciliter les premières étapes de la mise au point de simulations réalistes océaniques basées sur ROMS_AGRIF, une collection de programmes Matlab et plusieurs bases de données globales sont rassemblées dans un système intégré. ROMSTOOLS génère la grille, les forçages de surface, les conditions initiales et les conditions aux frontières pour des expériences climatologiques et interannuelles. ROMSTOOLS peut intégrer les marées et aider à la réalisation d'expériences en biogéochimie. ROMSTOOLS peut aussi aider à la mise au point de systèmes de prédictions côtiers opérationnels (Échevin *et al.*, 2005; Marchesiello *et al.*, 2008) et à la génération de modèles emboîtés. ROMSTOOLS est distribué sur le site de ROMS_AGRIF : <http://www.romsagrif.org/>. Le système a été utilisé dans de nombreuses applications (Penven *et al.*, 2005; Speich *et al.*, 2006; Couvelard *et al.*, 2008; Marchesiello *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2009; Mason *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2010; Veitch *et al.*, 2010; Colas *et al.*, 2011; Mason *et al.*, 2011; Karnauskas and Cohen, 2012; Durgadoo *et al.*, 2013; Halo *et al.*, 2014a; Loveday *et al.*, 2015). En 2011, plus de 1000 utilisateurs dans 67 pays étaient enregistrés sur le site ROMS_AGRIF/ROMSTOOLS (Figure 3). On peut noter sur la figure 3 la présence des pays partenaires à l'IRD, comme par exemple l'Afrique du Sud, le Mozambique ou Madagascar.

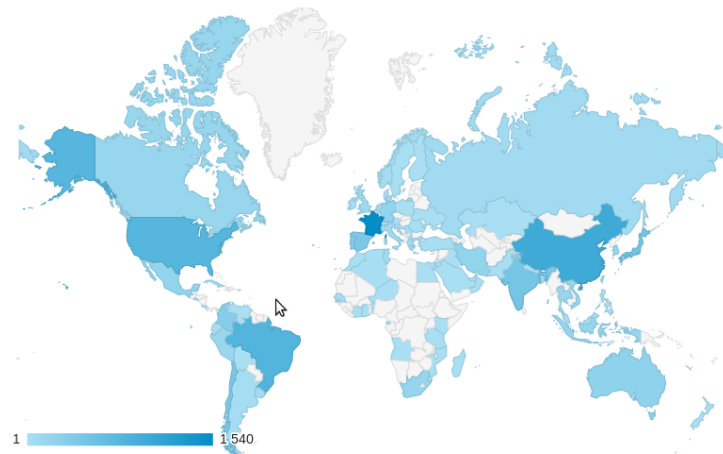


FIGURE 3 – Répartition géographique des accès au site <http://www.romsagrif.org/> en 2014. La présence n'est pas négligeable en Afrique australe et en Afrique de l'ouest. Figure fournie par G. Cambon.

De même que ROMS_AGRIF, ROMSTOOLS est ouvert et bénéficie de l'implication d'une communauté étendue. Les additions récentes à ROMSTOOLS sont :

- la gestion de l'interpolation en ligne des données atmosphériques de surface issues de la réanalyse atmosphérique CFSR (Climate Forecast System);
- la possibilité d'utiliser la nouvelle version de la réanalyse océanique ECCO2 (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean);
- des outils diagnostiques pour la détection de tourbillons, le calcul de transport

- et les bilans d'énergie ;
- une gestion automatisée des apports fluviaux.

3.3 Un outil diagnostique : détection de tourbillons pour les modèles et l'altimétrie

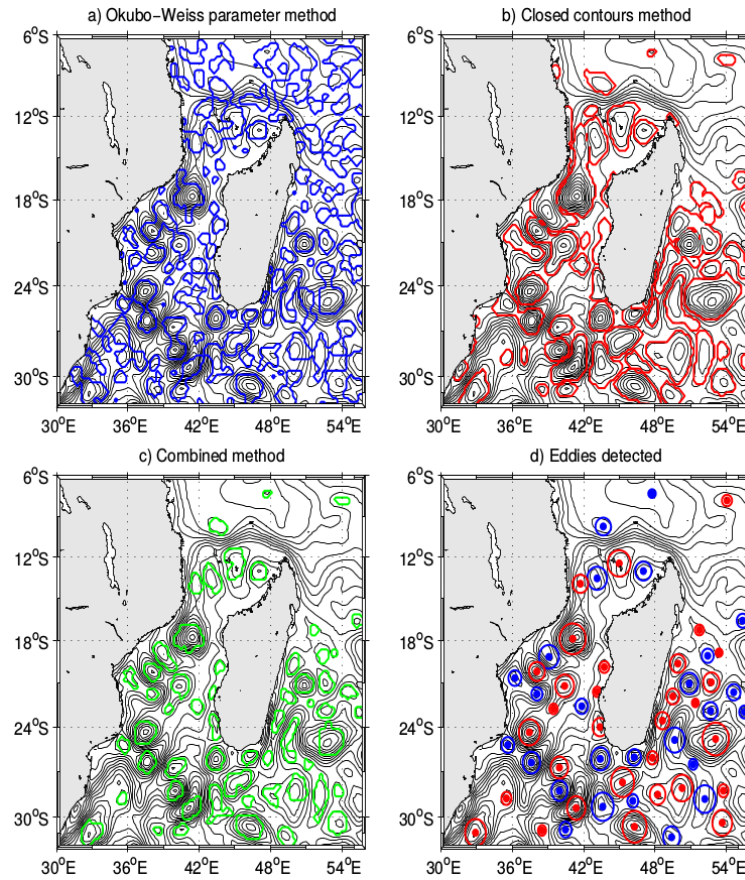


FIGURE 4 – Évaluation de différents critères de détection de tourbillons à partir de données altimétriques pour le 15 septembre 2003 : (a) régions où le paramètre d'Okubo-Weiss est négatif ; (b) régions enfermées dans des contours fermés de niveau de la mer ; (c) combinaison des régions sélectionnées en (a) et (b) ; (d) tourbillons détectés par la combinaison des méthodes. Figure tirée de la thèse de doctorat de I. Halo (2012).

Un nouvel algorithme de détection de tourbillons, basé sur la combinaison des méthodes sélectionnant des contours fermés (Chaigneau *et al.*, 2008) et des valeurs du critère d'Okubo Weiss (Chelton *et al.*, 2007), a été mis au point (Figure 4). La détection est améliorée par combinaison des deux méthodes, réduisant la sensibilité au choix de paramètres (par exemple, un seuil pour le critère d'Okubo-Weiss), résultant en une détection plus robuste des tourbillons. L'algorithme de suivi des tourbillons minimise une distance généralisée dans l'espace des paramètres d'un instant donné au suivant (Penven *et al.*, 2005). Cet algorithme a été utilisé avec succès pour suivre les tourbillons du Sud-ouest de l'océan Indien (Backeberg *et al.*, 2012a,b) et pour comparer 2 simulations dans le canal du Mozambique (Halo *et al.*, 2014a). Ce système fonctionne avec des sorties de modèle ou des données altimétriques. Il est désormais disponible sur le serveur SVN de ROMSTOOLS.

Cet outil a été récemment utilisé dans une simulation à haute résolution par le modèle MARS autour de l'île de La Réunion et l'île Maurice (Pous *et al.*, 2014). Le suivi des tourbillons montre qu'ils proviennent majoritairement de l'est du bassin, mais

une génération locale est aussi détectable sous le vent des îles. Les tourbillons présentent une tendance méridienne dans leur trajectoire (vers le nord pour les cyclones et vers le sud pour les anticyclones).

Cet outil est utilisé par des étudiants dans plusieurs travaux au département d'océanographie de l'université de Cape Town et ailleurs, par exemple pour l'étude des tourbillons dans l'Océan Indien Tropical (Thèse de F. Dilmahamod), dans le bassin des Comores (Thèse de C. Collins) ou dans le Golfe de Guinée (Thèse de S. Djakouré).

4 Quelques travaux sur les observations

Les différences entre les modèles et les observations n'impliquent pas nécessairement une erreur dans les modèles. L'analyse de ces différences permet parfois de détecter et de résoudre des problèmes dans les systèmes d'observations et de les améliorer. Deux cas sont présentés : pour l'observation satellite des températures de surface de mer et pour la dérivation des courants à partir de mesures altimétriques.

4.1 Biais dans les produits de température de surface de mer AVHRR Pathfinder

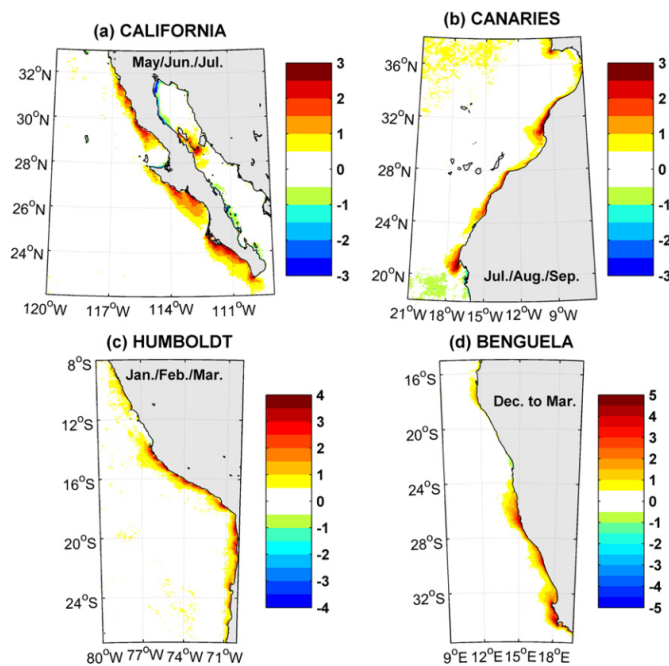


FIGURE 5 – Différence de SST [$^{\circ}\text{C}$] entre Pathfinder v5.0 et MODIS pour la période 2000-2009 pour les quatre systèmes d'upwelling côtier principaux : (a) Californie pour Mai/Juin/Juil., (b) Canaries pour Juil./Aou./Sep., (c) Humboldt pour Jan./Fev./Mar. et (d) Benguela pour Dec./Jan./Feb./Mar. Figure tirée de l'article rédigé par Dufois *et al.* (2012).

Le produit mensuel de température de surface de mer (Sea Surface Temperature : SST) AVHRR Pathfinder est régulièrement utilisé comme base de comparaison pour la simulation numérique des systèmes d'upwelling côtier (Penven *et al.*, 2001b, 2003, 2005) (Marchesiello *et al.*, 2004; Blayo and Debreu, 2005; Gruber *et al.*, 2006; Machu *et al.*, 2009) (Veitch *et al.*, 2009, 2010) (Albert *et al.*, 2010; Giraud and Paul, 2010; Colas *et al.*, 2011)(Échevin *et al.*, 2011). Il a été régulièrement noté que les simulations montraient des eaux plus froides à la côte en comparaison à ces observations. L'hypothèse généralement avancée expliquait cette différence par une mauvaise représentation dans les modèles de la structure fine du vent à la côte (Capet *et al.*, 2004). Le produit SST Pathfinder a été comparé aux données in situ et aux données SST MODIS/TERRA dans les quatre principaux systèmes d'upwelling de bord est (Dufois *et al.*, 2012). Un biais

chaud dans les données mensuelles de Pathfinder a été systématiquement trouvé durant les mois d'été dans les régions côtières où il existe des gradients élevés de SST (Figure 5). En effet les valeurs froides de SST au cœur de l'upwelling sont souvent considérées par les algorithmes comme la présence de nuages et sont donc écartées. Basé sur la moyenne climatologique couvrant 2000-2009, ce biais peut atteindre en moyenne jusqu'à 3°C dans les systèmes d'upwelling de Californie, du Humboldt, des Canaries et du Benguela. Ce biais chaud pourrait expliquer une grande partie des écarts (froids) souvent trouvés dans les modèles numériques des upwellings côtiers. Ainsi le biais froid à la côte décrit par Veitch *et al.* (2010) est de 2.9°C, valeur comparable à la figure 5.

La dernière version de Pathfinder (version 5.2, septembre 2011) a nettement amélioré ce biais par rapport à la version précédente.

4.2 Équilibre cyclogéostrophique pour estimer des courants plus réalistes depuis les données de hauteur de la mer

Les mesures altimétriques de hauteur de surface de la mer sont utilisées quasiment systématiquement en comparaison avec les sorties de modèles d'océan (Penven *et al.*, 2005, 2006a,c) (Capet *et al.*, 2008) (Halo *et al.*, 2014a) (Djakouré *et al.*, 2014) (Loveday *et al.*, 2014) (Pous *et al.*, 2014). Ces données apparaissent aussi dans de nombreuses études spécifiques. Par exemple, elles ont été largement employées au cours des deux dernières décennies pour suivre les tourbillons et les anneaux dans le canal du Mozambique (Gründlingh, 1995) (de Ruijter *et al.*, 2002) (de Ruijter *et al.*, 2004) (Quartly and Srokosz, 2003) (Schouten *et al.*, 2003) (Weimerskirch *et al.*, 2004) (Tew-Kai *et al.*, 2009) (Swart *et al.*, 2010) (Backeberg *et al.*, 2012b) (Halo *et al.*, 2014a) (Ternon *et al.*, 2014b) (Ternon *et al.*, 2014a). Avec l'amélioration des modèles, les comparaisons sont désormais plus quantitatives. Dans des zones énergétiques telles que les courants de bord ouest, il apparaît possible d'améliorer la précision des courants calculés à partir de données altimétriques.

Ainsi, trois méthodes sont proposées pour l'inclusion des effets inertiels lors de la dérivation des courants à partir de la hauteur de la mer dans le canal du Mozambique : une méthode analytique "gradient wind", une méthode approchée des perturbations et une méthode itérative (Penven *et al.*, 2014). Elles sont testées dans un modèle et appliquées à l'altimétrie par satellite. Pour un tourbillon d'amplitude 25 cm et de rayon 100 km [typiques des anneaux du canal du Mozambique (Halo *et al.*, 2014a)], l'erreur commise par la géostrophie est de 40 % pour les anticyclones et de 20 % pour les cyclones. Les forces d'inertie peuvent ainsi atteindre un tiers du gradient de pression. La géostrophie sous-estime les courants jusqu'à 50 cm s^{-1} , ce qui entraîne des erreurs de 30 %. La méthode itérative se traduit par des erreurs réduites à 5 %. Testé sur 8 ans de simulation numérique du Canal du Mozambique, l'écart type de l'erreur est supérieure à 30 cm s^{-1} pour la géostrophie et se réduit à environ 10 cm s^{-1} pour le "gradient wind" et la méthode itérative. La méthode des perturbations est cependant moins précise. Appliquée à l'altimétrie par satellite, l'ajout de l'inertie entraîne une augmentation significative des vitesses pour les anticyclones et une diminution pour les cyclones. Ceci induit une augmentation des vitesses de plus de 50 % pour les anneaux du canal du Mozambique. L'énergie cinétique tourbillonnaire géostrophique atteint $1400 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ dans le canal du Mozambique, alors qu'elle atteint $1800 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ quand l'inertie est prise en compte (Figure 6). Appliquées au Gulf Stream, ces méthodes confirment l'hypothèse de Maximenko and Niiler (2006) : la force centrifuge est la principale cause expliquant les différences observées entre l'énergie tourbillonnaire géostrophique et l'énergie tourbillonnaire issue des bouées dérivantes dans le Gulf Stream (Figure 7). Cette méthodologie, appliquée à l'échelle globale et transmise à CLS (Collecte Localisation Satellites), devrait se traduire dans le futur en une amélioration nette des produits opérationnels de courants océaniques de surface.

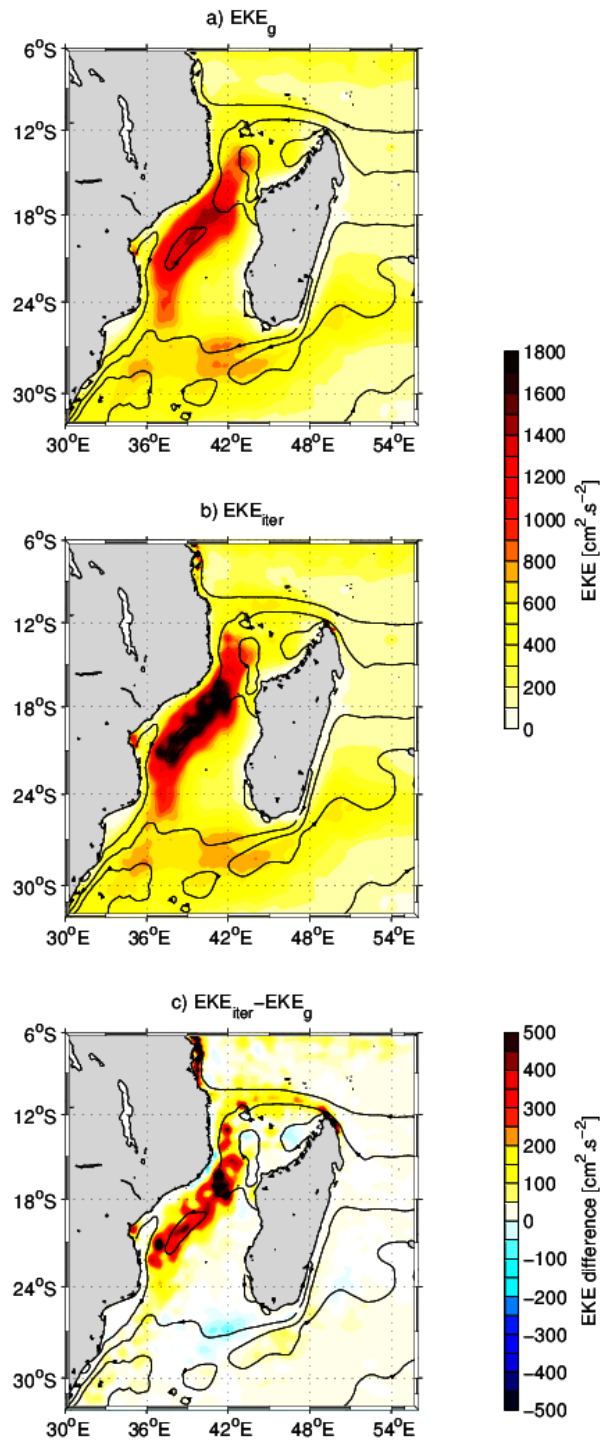


FIGURE 6 – Énergie cinétique tourbillonnaire dans le Canal du Mozambique [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] calculée à partir de 20 ans de données satellites altimétriques grillées utilisant (a) la géostrophie et (b) la cyclo-géostrophie (ici par une méthode itérative). (c) Différence d'énergie cinétique tourbillonnaire [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] entre les 2 méthodes. Figure tirée de l'article rédigé par Penven *et al.* (2014).

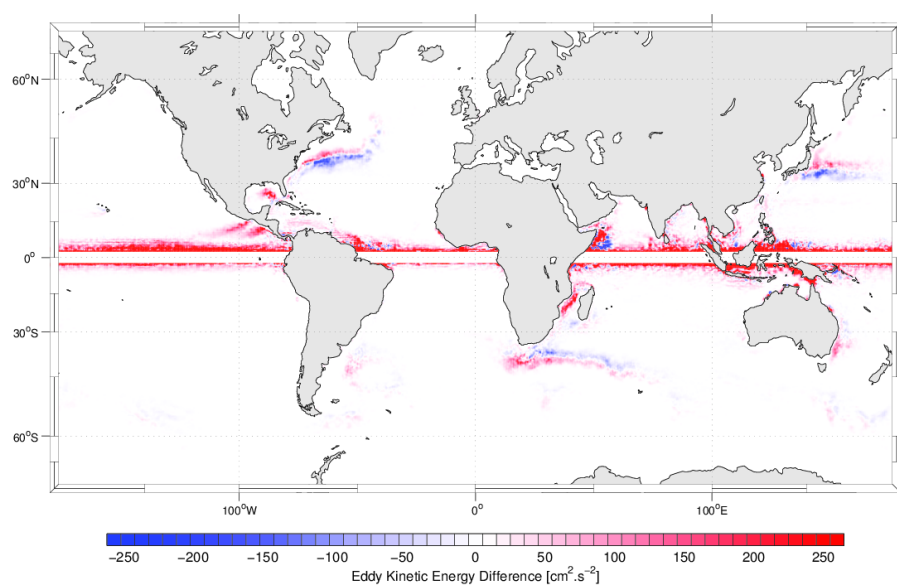


FIGURE 7 – Différences d'énergie cinétique tourbillonnaire [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] pour les vitesses géostrophiques (telles que celles distribuées par AVISO) et celles calculées avec la méthode proposée par Penven *et al.* (2014). Cette figure peut être comparée aux différences altimétrie / bouées dérivantes présentées par Fratantoni (2001) et Maximenko and Niiler (2006) pour le Gulf Stream.

Troisième partie

Résultats scientifiques : A - dynamique tropicale et upwelling côtiers

Sommaire

5	Systèmes d'upwelling côtier du Pérou et du Benguela	34
5.1	Le Pérou	36
5.2	Le Benguela	38
6	Dynamique de l'Atlantique tropical et upwelling au nord du golfe de Guinée	41
6.1	Analyse énergétique de la variabilité de l'Atlantique tropical	41
6.2	L'upwelling côtier au nord du Golfe de Guinée	44

“L’eau c’est des molécules, c’est pour ça que ça mouille.” Jean-Marie Gourio “Les nouvelles brèves de comptoir”

5 Systèmes d'upwelling côtier du Pérou et du Benguela

Les systèmes d'upwelling côtier constituent un champ d'étude privilégié à l'IRD. Ils sont généralement situés à l'est des bassins océaniques à des latitudes tropicales et subtropicales. Les quatre principaux systèmes sont le courant du Benguela à l'ouest de l'Afrique australe, le courant des Canaries le long des côtes d'Afrique de l'Ouest, le courant de Californie pour l'Amérique du Nord et le courant du Humboldt le long des côtes péruviennes et chiliennes (Figure 8). Dans ces cas typiques, un vent (généralement associé à la branche Est de l'anticyclone) orienté vers l'Équateur entraîne un transport d'Ekman vers le large. Il en résulte une divergence des courants de surface à la côte induisant une remontée d'eaux plus froides et plus riches en éléments nutritifs. Les systèmes d'upwelling côtier sont ainsi caractérisés en surface par une bande d'eaux côtières relativement froides et surtout productives (Figure 8). En conséquence, ils hébergent des pêcheries importantes qui sont une source de protéines et de revenus pour les pays adjacents.

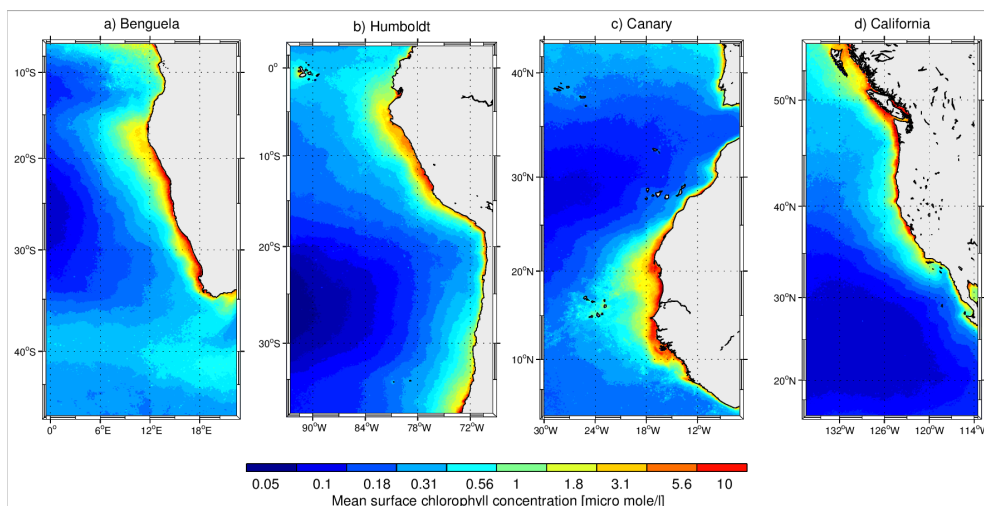


FIGURE 8 – Estimation de la concentration moyenne de chlorophylle de surface [$\mu\text{mol l}^{-1}$] à partir d'observations satellitaires SeaWiFS de la couleur de l'océan sur la période 1998-2006.

Bien que le principal moteur soit connu, plusieurs aspects restent à être caractérisés, que ce soit les processus tourbillonnaires pouvant participer aux transferts de propriétés océaniques horizontalement et verticalement, les processus contrôlant la position de la thermocline et des fronts d'upwelling, ou les rétroactions possibles entre les forts gradients de température (dus aux remontés d'eau froide) et l'atmosphère. Au niveau des écosystèmes marins, les processus de transport larvaire pourraient expliquer une partie de la variabilité de la ressource. La présence d'eaux pauvres en oxygène peut ajouter une contrainte supplémentaire pour les ressources marines (Chan *et al.*, 2008).

Ma contribution à l'effort produit pour les systèmes d'upwelling côtier s'inscrit dans la continuité de mes travaux de thèse et de post doctorat. L'outil de modélisation a été utilisé dans des études de processus visant à comprendre les équilibres dynamiques dans ces systèmes. Ces travaux se situent dans le cadre d'une recherche amont avant

d'aborder en collaboration les impacts de la circulation océanique sur les processus biogéochimiques et les écosystèmes marins.

Les travaux sur les systèmes d'upwelling côtier du Pérou et du Benguela sont présentés dans un premier temps. Dans une section suivante nous aborderons les travaux portant sur l'Atlantique tropical et l'upwelling côtier du nord du Golfe de Guinée.

5.1 Le Pérou

La première application de ROMSTOOLS a eu lieu lors d'une mission de longue durée que j'ai effectuée au CIMOBP (Centro de Investigaciones en Modelado Oceanográfico y Biológico Pesquero) à l'IMARPE (Instituto del Mar del Peru, Lima, Pérou) de mars à mai 2003. L'objectif était d'initier une collaboration avec l'IMARPE pour la modélisation numérique du système d'upwelling côtier péruvien. Au niveau des pêches, le système du courant de Humboldt est le plus productif des systèmes d'upwelling de bord est. Un modèle a été conçu pour étudier le système de courant du Pérou (Penven *et al.*, 2005). Ce modèle reproduit la circulation océanique, le cycle saisonnier et la dynamique tourbillonnaire à moyenne échelle de la région (Figure 9). Par exemple il montre que le contre courant du Pérou-Chili (le PCCC) est directement forcé par un rotationnel de vent cyclonique et que les diamètres moyen des tourbillons suivent le premier rayon interne de Rossby (et augmentent ainsi approximativement de 40 km à plus de 100 km lorsque l'on se rapproche de l'Équateur). Ces travaux, menés en collaboration avec les scientifiques de l'IMARPE ont été publiés en 2005 (Penven *et al.*, 2005).

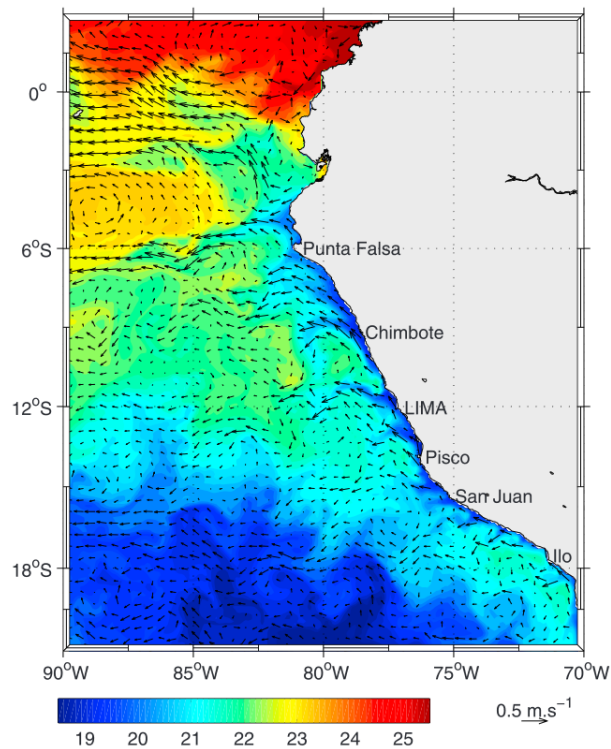


FIGURE 9 – Un exemple de courants de surface (1 vecteur pour 4 points de grille) et de température de surface de mer [°C] pour le 25 décembre de la dixième année de simulation. Figure tirée de l'article rédigé par Penven *et al.* (2005).

Cette configuration a ensuite été utilisée pour tester l'influence de la circulation équatoriale à grande échelle sur la dynamique du système de courant péruvien (Échevin *et al.*, 2011). Le modèle montre que la variabilité saisonnière des courants dépend de la propagation des ondes équatoriales entrant dans le domaine et que le transport vers l'Équateur et l'intensité de l'upwelling côtier sont influencés par des tourbillons côtiers produits saisonnièrement.

Ce modèle a été aussi employé pour quantifier les 3 composantes de la "triade de

Bakun” (c.à.d. l’enrichissement, la concentration et la rétention des œufs et larves de poissons pélagiques) (Bakun, 1998) pour le recrutement des anchois dans l’écosystème d’upwelling du Nord Humboldt (Lett *et al.*, 2007). Le modèle de suivi Lagrangien ICH-THYOP est utilisé ici en prenant des critères simples pour quantifier les processus d’enrichissement, de rétention et de concentration (Bakun, 1998).

5.2 Le Benguela

Au sud-ouest de l'Afrique du Sud, le système d'upwelling côtier du Benguela a été le chantier historique pour les collaborations entre l'IRD et nos partenaires sud-africains depuis la fin des années 1990. Dans la suite des travaux initiés dans le cadre des unités de recherche IRD IDYLE et ECO-UP, j'ai co-encadré avec Pr. Frank Shillington (UCT) 2 étudiantes de l'UCT en thèse de doctorat : Nicolette Chang de juin 2004 à juin 2009 sur la dynamique du banc des Aiguilles et Jennifer Veitch (thèse co-financée par l'IRD) de janvier 2006 à juin 2010 pour la comparaison entre le Benguela Sud et le Benguela Nord.

Pour chacune de ces 2 thèses, la technique utilisée se base sur le système de modélisation SAfE (South African Experiments) mis en place durant mon affectation à UCT en 2005 (Penven *et al.*, 2006b,c). Pour traiter les différentes questions scientifiques autour des systèmes du courant du Benguela et du courant des Aiguilles, SAfE est une coordination des efforts de modélisation pour cette région. SAfE est une plateforme de modélisation basée sur ROMS_AGRIF et constituée d'un modèle régional à une résolution de $1/4^\circ$ dans lequel les modélisateurs introduisent des zooms à haute résolution pour étudier les différents systèmes côtiers (Figure 10). Au sud de l'Afrique, la présence d'eaux chaudes et les anneaux des Aiguilles (les grands tourbillons prenant naissance à la rétroflexion du courant des Aiguilles et se propageant en Atlantique Sud) peuvent influencer le système d'upwelling du Benguela. Ainsi, pour modéliser le système d'upwelling, il est nécessaire de représenter le courant des Aiguilles. La configuration SAfE a été construite en prenant en considération la dynamique du courant des Aiguilles dans son ensemble, de ses sources autour de Madagascar à la dissolution des anneaux des Aiguilles dans l'océan Atlantique Sud (Penven *et al.*, 2006b,c; Rouault *et al.*, 2009). L'utilisation de SAfE pour la compréhension spécifique de la dynamique du courant des Aiguilles est développée dans le chapitre IV de ce document. Un raffinement de maillage local est mis en place pour traiter les processus côtiers. Deux types de simulations sont réalisés : des expériences climatologiques de processus et des expériences interannuelles.

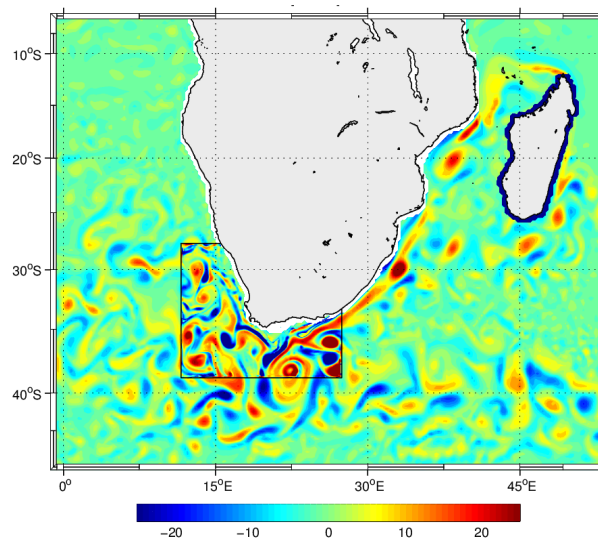


FIGURE 10 – Exemple de composante verticale de vorticité [10^{-6} s^{-1}] à 100 m de profondeur pour la simulation centrée sur le Sud Benguela.

La thèse de Nicolette Chang s'est concentrée sur la structure océanique et la circu-

lation sur le banc des Aiguilles. Ce plateau continental est situé au sud de l’Afrique du Sud, sous l’influence du courant des Aiguilles sur sa bordure est et du système d’upwelling du Benguela à l’ouest. Cette région est connue comme une zone de ponte pour les petits poissons pélagiques du Benguela Sud. Une attention particulière est portée sur la langue d’eau froide s’étendant au travers du banc : le “cool ridge”. Dans le contexte de SAfE, un zoom à une résolution de 8 km a été introduit sur la zone comprenant le banc des Aiguilles et le Benguela Sud (Figure 10). Le modèle a montré le rôle du courant des Aiguilles sur la génération et l’extension du cool ridge (Chang, 2009).

Cette configuration a été utilisée pour montrer, par une analyse Lagrangienne, que l’intensité de la connexion entre le Banc des l’Aiguilles et l’upwelling côtier du Benguela fluctue en réponse à la variabilité des vents saisonniers dans le système du Benguela (Blanke *et al.*, 2009). Les anomalies intra saisonnières sont, quand à elles, plutôt liées au champ tourbillonnaire le long du bord sud-ouest du Banc des l’Aiguilles.

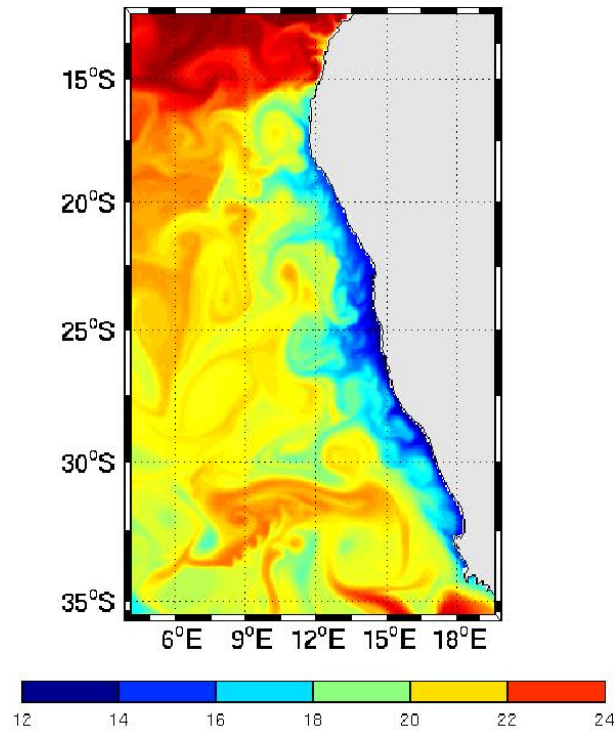


FIGURE 11 – Exemple de simulation de la température de surface de mer [°C] pour le zoom englobant le Benguela. Figure fournie par J. Veitch.

Comme la thèse de Jennifer Veitch se concentrait sur la comparaison entre les systèmes d’upwelling du Benguela Sud (entre Cape Town et Lüderitz à 27°S) et le Benguela Nord (entre Lüderitz du front Angola-Benguela à 15°S), un zoom couvrant le Benguela dans son ensemble a été introduit dans SAfE (Figure 11). Ce modèle autorise une étude systématique à haute résolution des conditions d’équilibre et des variations saisonnières du système de courant du Benguela dans son ensemble (Veitch *et al.*, 2009, 2010)(Veitch, 2010). Un courant moyen de subsurface vers le pôle est présent dans le Benguela Nord et subit un approfondissement durant son déplacement vers le sud et une majeure partie vire vers le large aux alentours de 25-27°S. Au sud, le courant du Benguela est fortement influencé par les interactions non linéaires associées au passage des anneaux des Aiguilles. Il est caractérisé par deux veines principales : celle

plus côtière est contrôlée par la topographie, alors que celle au large développe de larges méandres stationnaires. Le modèle reproduit les sept cellules majeures de l'upwelling côtier du Benguela, elles sont caractérisées par un renforcement de l'upwelling en aval des caps.

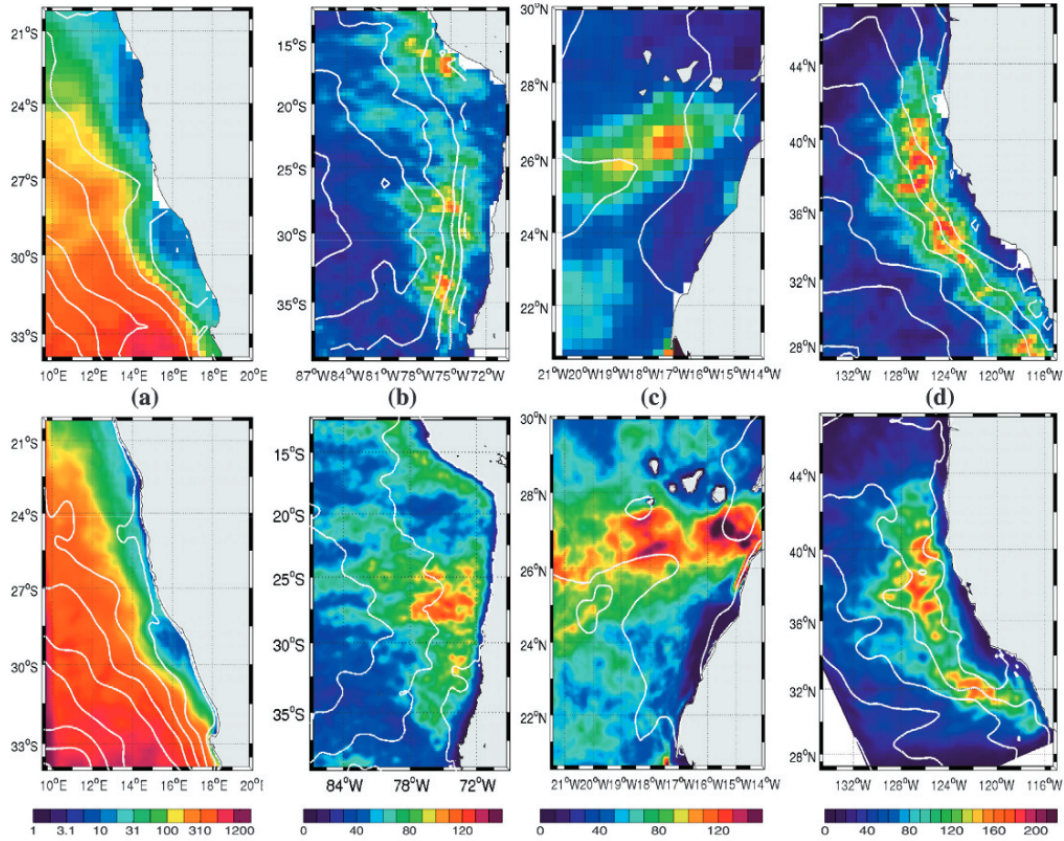


FIGURE 12 – Énergie cinétique turbulente [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] et hauteur de la surface de la mer [6 cm par contour] pour les quatre grands systèmes d'upwelling côtier. De gauche à droite : courants du Benguela, du Humboldt, des Canaries et de Californie. Ligne du haut : observations par altimétrie et hauteur dynamique moyenne (Rio and Hernandez, 2004). Ligne du bas : simulations numériques basées sur le modèle ROMS. Notez l'échelle de couleurs différente utilisée pour le Benguela. Figure tirée du chapitre de livre rédigé par Capet *et al.* (2008)

Cette simulation a été aussi utilisée dans une comparaison plus générale des systèmes d'upwelling côtier. Au cours des dernières décennies, les modèles numériques ont atteint une maturité autorisant désormais la comparaison systématique des systèmes d'upwelling de bord est. Une comparaison de ce type a été réalisée pour le rôle de la turbulence océanique dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe modélisation océanique de UCLA (États Unis) (Capet *et al.*, 2008). Dans les upwellings, l'activité tourbillonnaire découle des instabilités barotrope et barocline. Le rôle des tourbillons de méso-échelle dans la structure dynamique est testé pour les différents upwellings. On se rend compte que les niveaux de turbulence dans le Benguela Sud (plus de dix fois supérieurs aux autres systèmes d'upwelling) en font un système particulier (Figure 12).

6 Dynamique de l'Atlantique tropical et upwelling au nord du golfe de Guinée

Autre chantier historique de l'IRD, l'océan tropical exerce une influence sur les systèmes d'upwelling côtier par la propagation d'ondes côtières et les variations de la thermocline. C'est un phénomène connu et documenté pour le Pérou et le Benguela par exemple. En effet, la position de la thermocline à l'est des bassins est un élément clef pour la variabilité des systèmes d'upwelling côtier de bord est. Cependant, bien que les océans tropicaux Atlantique et Pacifique montrent des états moyens similaires (c.à.d. une thermocline en pente et affleurant dans sa partie est en réponse aux régimes d'alizés), ils diffèrent dans les amplitudes respectives de leurs variations saisonnières et interannuelles. Natalie Burls, durant sa thèse de doctorat à UCT de février 2008 à décembre 2010, co-encadrée par Chris Reason (UCT), Georges Philander (Université de Princeton / UCT) et moi même, s'est penchée sur les contrôles de la variabilité de l'Atlantique tropical (Burls, 2010). La méthode retenue est la mise en place d'une simulation numérique de l'Atlantique tropical à $1/6^\circ$ de résolution, basée sur le modèle ROMS_AGRIF et forcée par la réanalyse atmosphérique NCEP (Figure 13). Un bilan énergétique intégré sur la zone équatoriale sous la forme d'énergie potentielle disponible et d'énergie cinétique aide à la déduction des processus impliqués dans les différents modes de variabilité.

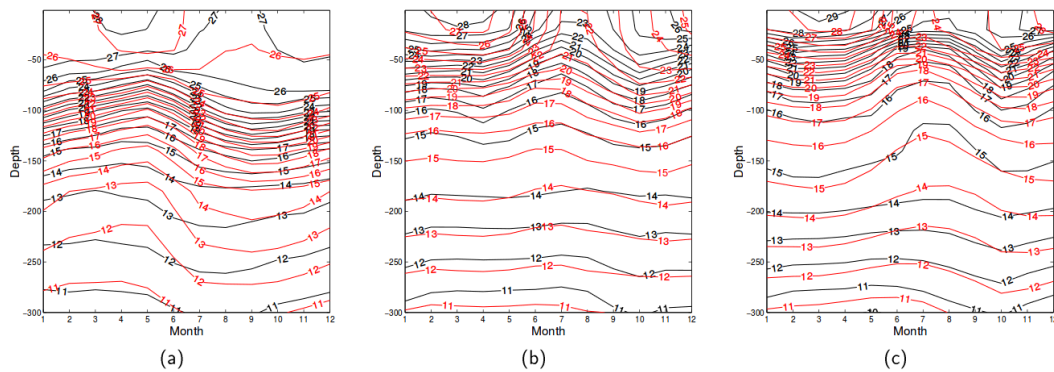


FIGURE 13 – Comparaison de la climatologie mensuelle de température pour trois sites le long de l'Équateur entre le modèle (rouge) et les observations PIRATA (noir) : (a) 35°O , (b) 10°O , (c) 0°O . Figure extraite du manuscrit thèse de Burls (2010).

6.1 Analyse énergétique de la variabilité de l'Atlantique tropical

Dans une première étape, le travail se concentre sur le cycle saisonnier de l'Atlantique tropical. En effet, alors que dans le Pacifique les variations saisonnières et interannuelles ont des amplitudes comparables, dans l'Atlantique le cycle saisonnier est dominant. Cette différence est attribuable à la taille du bassin. La rétroaction de Bjerknes entre le vent et la température de surface de la mer constitue un mode interannuel libre pour le Pacifique, mais pourrait influencer le cycle saisonnier dans l'Atlantique. L'analyse énergétique de la simulation numérique montre une relation circulaire entre l'énergie potentielle disponible et le travail accompli par le vent entre avril et septembre (Figure 14). Ceci montre qu'un mode de variabilité de thermocline de type rétroaction de Bjerknes

joue un rôle actif dans le cycle saisonnier de l'Atlantique tropical durant cette période, le forçage saisonnier externe reprenant le contrôle le reste de l'année (Burls *et al.*, 2011).

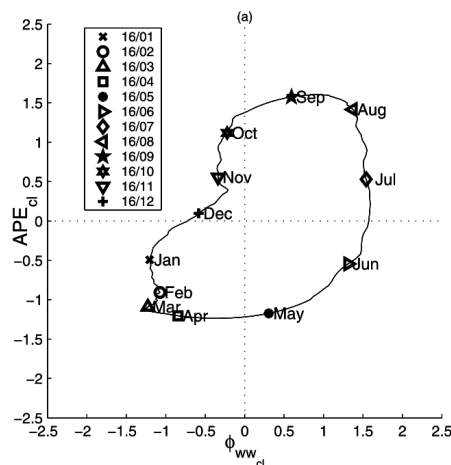


FIGURE 14 – Diagramme de phase entre l'énergie potentielle disponible (APE) et le travail du vent pour le cycle saisonnier en Atlantique tropical (8°S 8°N 60°O 15°E). Les valeurs ont été normalisées. La partie circulaire est le signe d'une rétroaction. Figure tirée de l'article rédigé par Burls *et al.* (2011).

Cette méthodologie est ensuite appliquée pour tester le rôle de la mémoire de l'océan sur le mode zonal de variabilité interannuelle de l'Atlantique tropical (Burls *et al.*, 2012). À la différence du Pacifique où les variabilités saisonnière et interannuelle impliquent des processus différents, le modèle suggère que le mode zonal de variabilité de l'Atlantique tropical est une modulation du cycle saisonnier. Le mécanisme de mémoire de l'océan fonctionne dans ce cas sur des échelles de temps beaucoup plus courtes que celles associées à ENSO dans le Pacifique. Le mode zonal de variabilité apparaît associé aux modulations interannuelles des rétroactions qui sont elles actives à l'échelle saisonnière (Figure 15). Bien que les anomalies de travail du vent en Atlantique tropical soient un prédictor potentiel pour les événements de mode zonal, cela reste limité dans le temps.

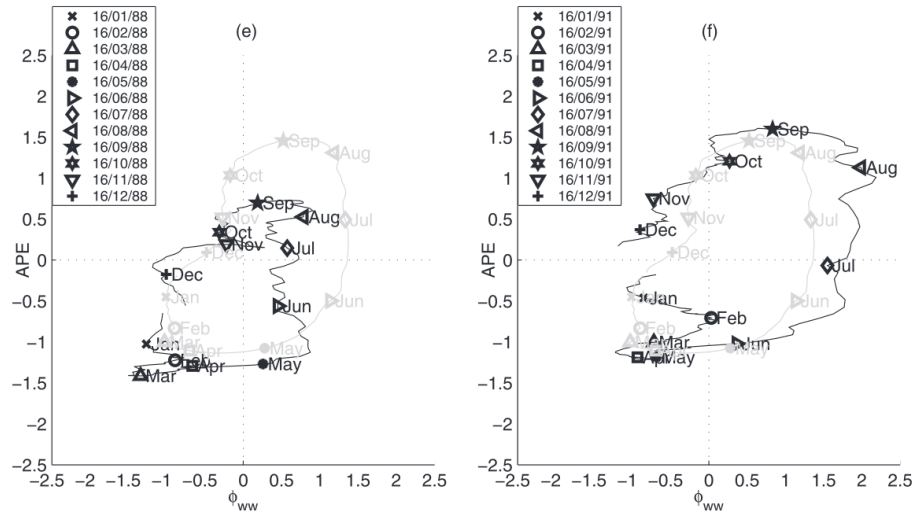


FIGURE 15 – Diagramme de phase entre l'énergie potentielle disponible (APE) et le travail de vent pour les événements chauds de 1988 et 1991. Le diagramme de phase climatologique apparaît en gris. Les valeurs ont été normalisées. Figure tirée de l'article rédigé par Burls *et al.* (2012).

6.2 L'upwelling côtier au nord du Golfe de Guinée

La côte nord du golfe de Guinée héberge un upwelling côtier assez particulier. Alors que la plupart des systèmes d'upwelling côtier se situent sur les bords est et sont forcés par un vent vers l'Équateur, celui-ci s'étend le long du bord nord du Golfe de Guinée et ne peut pas être expliqué de manière satisfaisante par un forçage de vent classique. Durant sa thèse de doctorat (financée par l'IRD) co-encadrée par Bernard Bourlès (IRD, LEGOS), Jennifer Veitch (UCT) et moi-même de septembre 2011 à février 2015, Sandrine Djakouré s'est attachée à comprendre la dynamique de l'upwelling côtier et de quantifier les effets respectifs des forçages locaux et des téléconnexions. Nous nous sommes inspirés des travaux de Natalie Burls pour créer un modèle de l'Atlantique tropical à grande échelle (Figure 16). Un zoom AGRIF à maille fine dans le nord du Golfe de Guinée résout l'upwelling côtier. Les téléconnexions au travers du guide d'onde de l'Atlantique tropical sont ainsi résolues explicitement. Une simulation climatologique et une configuration interannuelle forcée par la réanalyse CFSR sont analysées.

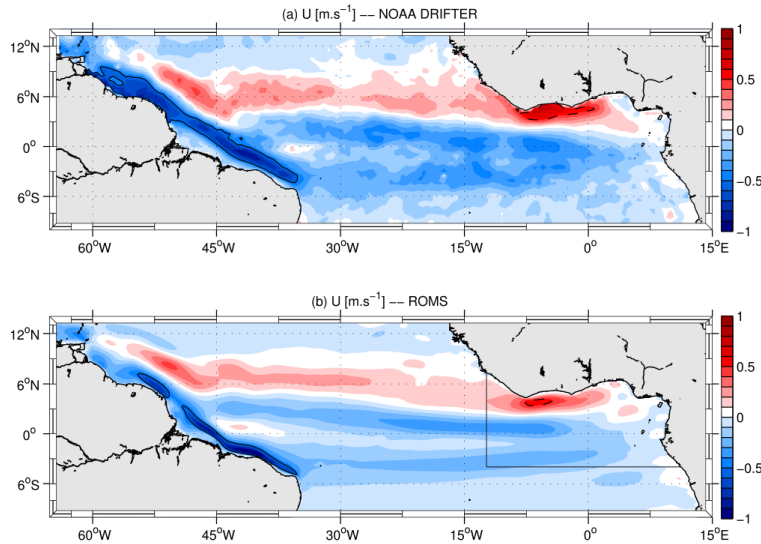


FIGURE 16 – Vitesses moyennes zonales [m s^{-1}] issues d'une climatologie de bouées dérivantes (a) et du modèle à 15 m de profondeur (b). Figure tirée de l'article rédigé par Djakouré *et al.* (2014).

La simulation numérique à haute résolution a mis en évidence des tourbillons cycloniques particulièrement énergétiques associés au cisaillement du courant de Guinée au niveau du Cap des Palmes et du Cap des Trois Pointes (Figure 17). Le modèle a montré que ces tourbillons ne génèrent pas l'upwelling côtier mais sont par contre responsables de la présence du contre-courant de Guinée à la côte par transfert d'énergie des tourbillons vers le courant moyen (Djakouré *et al.*, 2014).

L'effet du détachement du courant de Guinée est testé à l'aide d'une simulation idéalisée où les termes d'advection de moment ont été annulés. Dans ce cas, en absence d'inertie, le courant de Guinée reste piégé à la côte. L'upwelling à l'est du Cap des Palmes disparaît alors que celui à l'est du Cap des Trois Pointes reste présent (Figure 18). Ceci montre que les processus générateurs de l'upwelling sont différents le long de la côte nord du golfe de Guinée : détachement du courant de Guinée à l'ouest et forçage du vent à l'est du Cap des Trois Pointes (Djakouré, 2015).

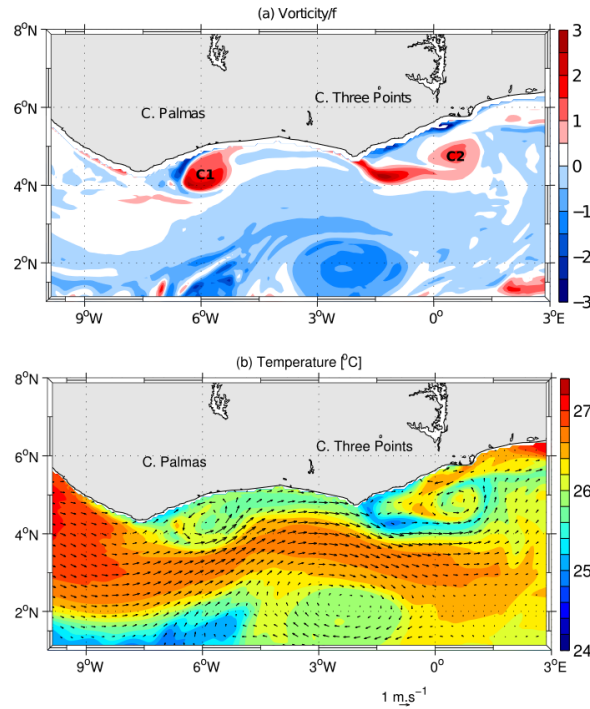


FIGURE 17 – Exemple typique de tourbillons au niveau du Cap des Palmes et du Cap des Trois Pointes : (a) vorticité / (paramètre de Coriolis) et (b) température de surface de mer [ C]. Figure tirée de l’article rédigé par Djakouré *et al.* (2014).

Ce travail se fait en collaboration avec Vamara Koné (CRO, Centre de Recherches Océanologiques, Côte d’Ivoire) pour un couplage avec la biogéochimie et les effets sur les écosystèmes dans le cadre du projet BEST “ tudes des interactions Environnementales et trophiques dans le golfe de Guinée (2012-2014)” dont j’étais coordinateur scientifique. Dans ce contexte, le modèle individu centré ICHTHYOP est employé pour tester les processus affectant le recrutement de *Sardinella aurita*. Les résultats montrent l’importance de la frayère, du calendrier et de la profondeur sur le succès du recrutement de *Sardinella aurita* dans le nord du golfe de Guinée (Koné *et al.*, 2017).

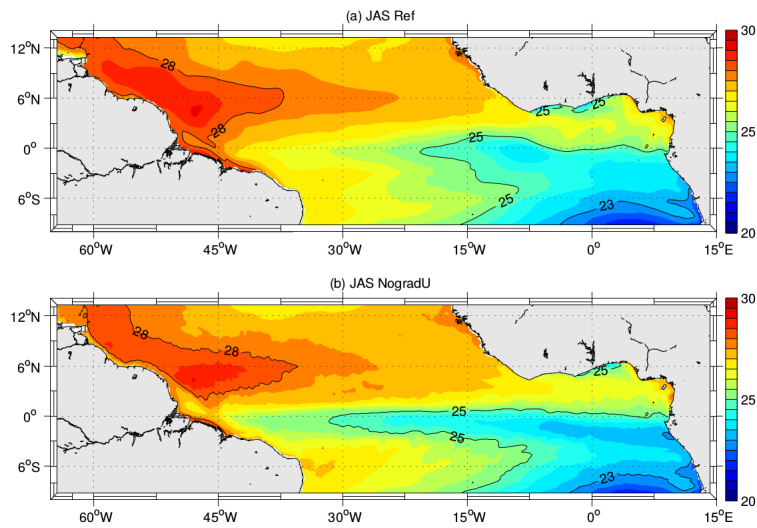


FIGURE 18 – Température de surface de la mer moyenne en été [°C] pour la simulation de référence (a) et la simulation sans advection de moment (b). Figure extraite du manuscrit de thèse de S. Djakouré (2015).

Quatrième partie

Résultats scientifiques : B - dynamique océanique et variabilité du système du courant des Aiguilles

Sommaire

7	Dynamique du courant des Aiguilles	51
7.1	Modélisation du courant des Aiguilles	51
7.2	Application de SAfE pour la variabilité amont du courant des Aiguilles et les processus de transport en aval	55
8	Changements climatiques et courant des Aiguilles	57
8.1	Changements récents dans l'océan Indien et le système du courant des Aiguilles	58
8.2	Contrôles du déversement du courant des Aiguilles	62

“Logiquement, avec le réchauffement de la planète, on devrait avoir plus de vacances.”
Jean-Marie Gourio “Les nouvelles brèves de comptoir”

Longeant les côtes sud-est du continent africain, le courant des Aiguilles est le courant de bord ouest du gyre subtropical de l'océan Indien (Figure 19). À la différence de l'atmosphère, la circulation dans les océans est bloquée par la présence de continents, entraînant la formation de gyres océaniques. La sphéricité de la terre (causant la variation du paramètre de Coriolis avec la latitude : l'effet β planétaire) résulte en une intensification des courants des gyres océaniques le long des bords ouest des bassins (Stommel, 1948). Pour les gyres océaniques subtropicaux, les principaux courants de bords ouest sont le courant du Gulf Stream pour l'Atlantique Nord, le courant du Brésil pour l'Atlantique Sud, le courant du Kuroshio pour le Pacifique Nord, le courant Est-Australien pour le Pacifique Sud et le courant des Aiguilles pour l'océan Indien Sud (Figure 19).

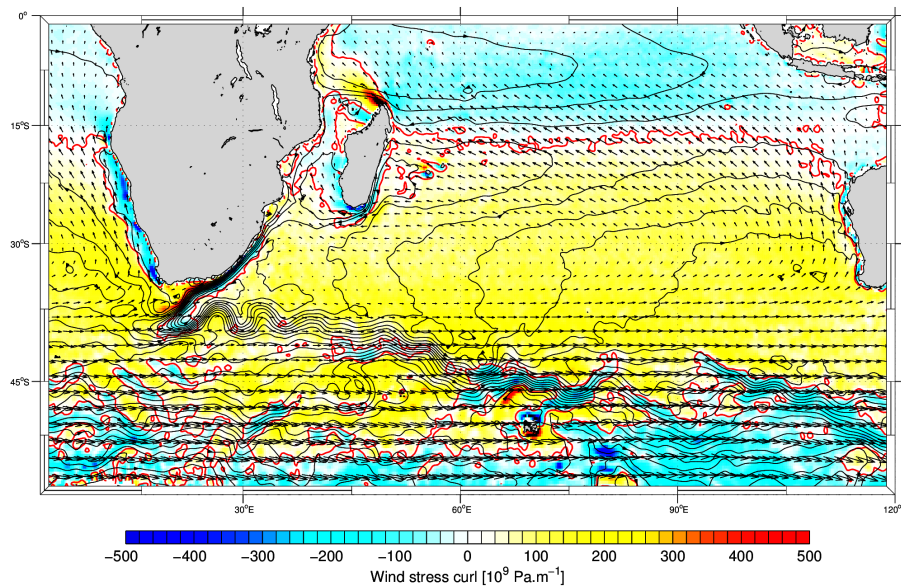


FIGURE 19 – Vecteurs de tension de vent et rotationnel moyens [10^9 Pa m^{-1}] issus de mesures diffusiométriques QuikSCAT sur la période 1999-2009 (Risien and Chelton, 2008) et hauteur dynamique moyenne [1 contour pour 10 cm] fournie par AVISO (version CLS 2013) (Rio *et al.*, 2014). La ligne du rotationnel de vent nul est représentée en rouge.

De manière générale, ces courants sont relativement étroits, s'ajustent sur les talus continentaux, s'étendent sur de grandes profondeurs et transportent des volumes d'eau importants (de l'ordre de 100 Sv ; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Pour les gyres subtropicaux, ils transportent des eaux plus chaudes vers les pôles et peuvent être des vecteurs pour la cellule de retournement méridienne. Les extensions polaires des courants de bord ouest sont des zones de perte de chaleur significatives pour l'océan (Cronin *et al.*, 2010). Au cours du siècle écoulé, ces zones se sont réchauffées de deux à trois fois plus rapidement que le reste de l'océan global (Wu *et al.*, 2012). Le courant des Aiguilles est remarquable à plusieurs titres (Lutjeharms, 2006a,b) : transportant 70 Sv à 32°S (Bryden *et al.*, 2005), s'étendant sur plus de 3000 m de profondeur et montrant des vitesses de surface maximales supérieures à 2 m s^{-1} (Figure 20) (Beal *et al.*, 2006, 2015), il est le courant de bord ouest le plus puissant de l'hémisphère sud.

La partie nord du courant, entre 27°S et 34°S (Lutjeharms, 2006a), est particulièrement stable le long de la pente continentale, épisodiquement perturbée par la propagation de méandres : les pulsations du Natal (Lutjeharms and Roberts, 1988)(de Ruijter

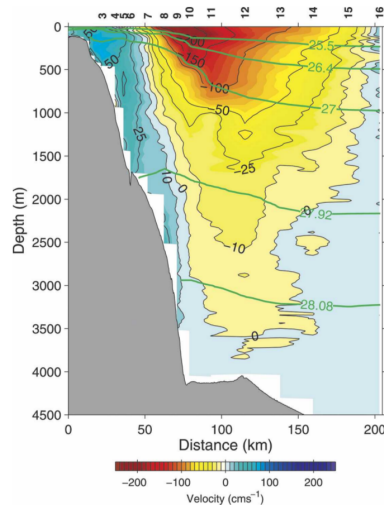


FIGURE 20 – Vitesses mesurées à travers le courant des Aiguilles à 36°S. Les contours verts représentent les anomalies de densité potentielle. Figure tirée de l'article rédigé par Beal *et al.* (2006).

et al., 1999a)(Rouault and Penven, 2011). Nous avons récemment réalisé une analyse détaillée des pulsations du Natal à partir de données satellites (Rouault and Penven, 2011). Lorsque ces méandres cycloniques progressent vers le sud-est, ils forment des méandres secondaires qui se dissipent, fusionnent avec la perturbation originale ou se détachent du courant des Aiguilles (Figure 21). Le nombre de pulsations du Natal observées dans le courant des Aiguilles, avec une moyenne de 1.6 par an, est plus faible que les estimations précédentes réalisées par de Ruijter *et al.* (1999a).

Au sud du banc des Aiguilles, vers 36°S, le courant des Aiguilles perd l'appui du continent africain avant d'atteindre la latitude du rotationnel de vent nul qui se situe en moyenne vers 50°S (Figure 19). Comme nous pouvons le voir sur la figure 19, le courant des Aiguilles rétroflète alors sur lui même pour revenir dans l'océan Indien (Lutjeharms and van Ballegooyen, 1988). Issus de cette rétroflexion, les anneaux des Aiguilles sont des tourbillons anticycloniques parmi les plus grands des océans et se propagent vers le Brésil. Avec des valeurs d'énergie cinétique turbulente calculées à partir d'altimétrie AVISO atteignant $3000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, la zone de rétroflexion du courant des Aiguilles est une des régions les plus turbulentes des océans (Figure 22).

Selon Richardson (2007), au dessus de 1000 m de profondeur, 15 Sv des eaux du courant des Aiguilles poursuivent leur parcours en Atlantique Sud. Ce déversement du courant des Aiguilles, apportant des eaux relativement chaudes et salées en Atlantique, pourrait affecter la circulation méridienne de retournement avec des effets potentiels sur le climat global de la Terre (Weijer *et al.*, 1999) (Beal *et al.*, 2011). L'arrêt du déversement a été associé à des périodes glaciaires extrêmes (Bard and Rickaby, 2009), alors qu'une augmentation vigoureuse a précédé les retours vers les époques interglaciaires (Peeters *et al.*, 2004). Ces effets potentiels sur le climat et les changements récents du courant des Aiguilles (Biaostoch *et al.*, 2008)(Biaostoch *et al.*, 2009) (Rouault *et al.*, 2009) ont stimulé une activité soutenue au sein de la communauté scientifique (Beal *et al.*, 2011).

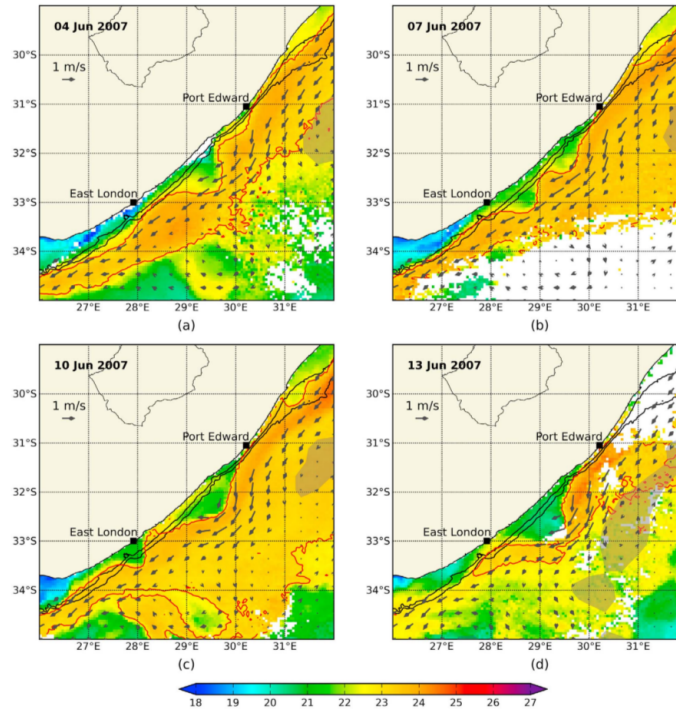


FIGURE 21 – Composites journaliers de température de surface de la mer [$^{\circ}\text{C}$] issus de SEVIRI montrant le développement d'une pulsation du Natal au travers du courant des Aiguilles. Le contour rouge est l'isotherme 23°C . Les courants géostrophiques proviennent d'altimétrie AVISO. La surface brune représente un tourbillon anticyclonique situé plus au large. Figure tirée de l'article rédigé par Rouault and Penven (2011).

7 Dynamique du courant des Aiguilles

7.1 Modélisation du courant des Aiguilles

Alors qu'à l'origine du projet VIBES (1997-2000) la collaboration avec nos partenaires Sud-Africains a concerné les pêcheries du système d'upwelling du Benguela, nos collègues de UCT (et tout particulièrement Pr. Johann Lutjeharms), nous ont très rapidement montré l'importance majeure du courant des Aiguilles. La configuration du modèle PLUME réalisée durant ma thèse de doctorat ne résolvait que partiellement la partie sud du courant des Aiguilles. Nous l'avons cependant utilisé pour montrer la génération de tourbillons cycloniques au niveau du cisaillement entre le courant des Aiguilles et la partie est du banc des Aiguilles (Lutjeharms *et al.*, 2003) ainsi qu'au niveau du détachement du courant au sud du banc des Aiguilles (Penven *et al.*, 2001a). Ces 2 processus sont visibles sur la figure 23. Quelques années plus tard, une configuration régionale d'emprise un peu plus grande a été utilisée pour tester les effets de la topographie sur le courant des Aiguilles et son déversement (Speich *et al.*, 2006). La suppression du Banc des Aiguilles résulte en une augmentation du déversement alors que la suppression du plateau des Aiguilles affecte le courant de retour des Aiguilles.

Comme cela a été présenté dans le chapitre III, la plateforme de modélisation SAfE réalisée ensuite à Cape Town a été construite selon le constat que pour modéliser le Benguela Sud il était nécessaire de représenter le courant des Aiguilles dans son ensemble, de

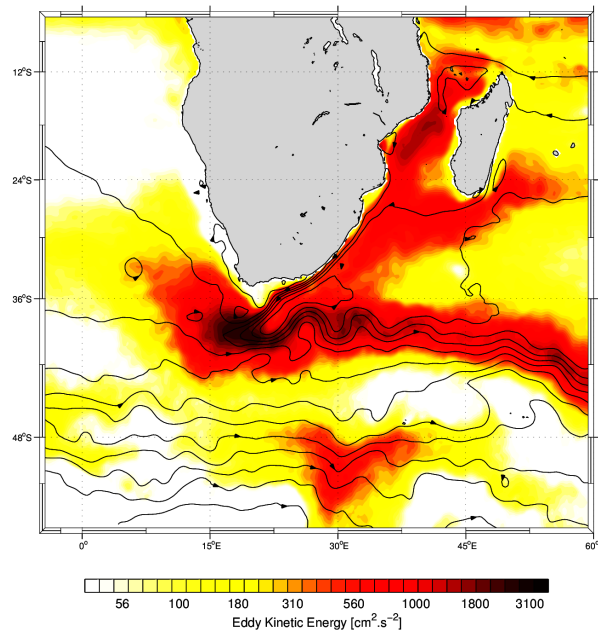


FIGURE 22 – Énergie cinétique turbulente [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] calculée à partir d'altimétrie satellitaire AVISO sur la période 1993-2014.

ses sources autour de Madagascar à la dispersion des anneaux des Aiguilles dans l'océan Atlantique Sud (Penven *et al.*, 2006c). Autour de l'extrémité sud du continent africain, l'échelle caractéristique des anneaux des Aiguilles est supérieure à 200 km. La grille parent de SAfE, à une résolution de $1/4^\circ$, devait être capable de résoudre les processus principaux de la région (Figure 24).

Un des premiers enseignements lors de la mise en place de SAfE a été la difficulté de représenter de manière satisfaisante la rétroflexion du courant des Aiguilles. Les modèles semblent montrer généralement une tendance intrinsèque à développer une rétroflexion des Aiguilles en amont du banc des Aiguilles, associée à une accumulation d'énergie cinétique turbulente et à une propagation quasi rectiligne des anneaux des Aiguilles en Atlantique Sud. C'est un comportement détectable sur des configurations de modèles océaniques de formulations différentes (Lutjeharms and Webb, 1995; Wallcraft *et al.*, 2002, 2003; Sasaki *et al.*, 2005; Maltrud and McClean, 2005; Barnier *et al.*, 2006; Backeberg *et al.*, 2009; Thoppil *et al.*, 2011). Ce phénomène peut parfois s'amplifier avec la résolution (Thoppil *et al.*, 2011). Il montre aussi une forte sensibilité aux choix des schémas numériques utilisés (Barnier *et al.*, 2006; Backeberg *et al.*, 2009). La bifurcation de la solution présentée par Backeberg *et al.* (2009) entre un schéma d'advection de moment d'ordre 2 et un schéma d'ordre 4 est particulièrement spectaculaire (Figure 25). Dans le cadre de SAfE, ce comportement est contrôlé par le lissage de la topographie et l'addition d'une paramétrisation de viscosité turbulente (Smagorinsky, 1963). La circulation océanique de surface et l'énergie cinétique turbulente de la rétroflexion des Aiguilles restent dans ce cas comparables aux observations (Figure 24). Cependant il n'existe pas à ce jour de méthode systématique pour obtenir de solution de modèle satisfaisante pour le courant des Aiguilles.

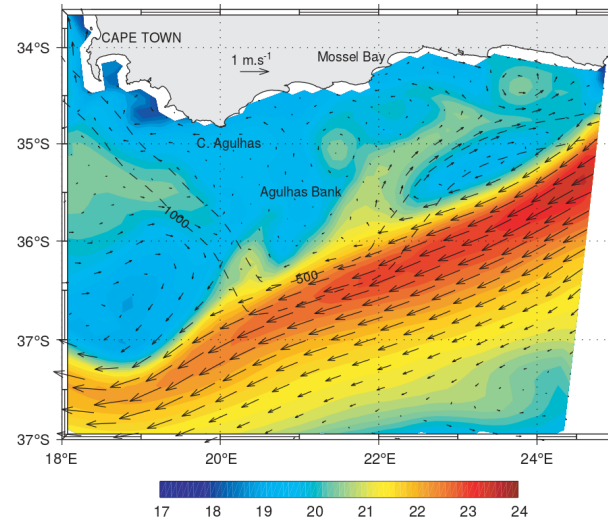


FIGURE 23 – Température [°C] et courants de surface sur le banc des Aiguilles pour le 10 avril de l'année 9 de la simulation PLUME. Figure tirée de l'article rédigé par Lutjeharms *et al.* (2003).

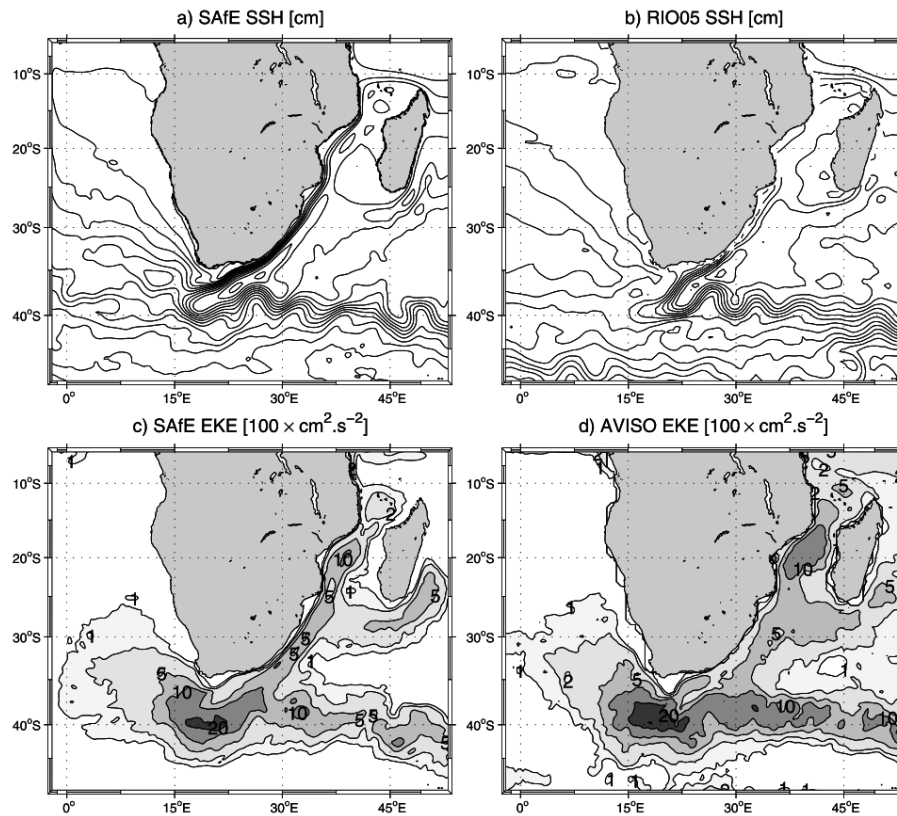


FIGURE 24 – Comparaisons entre le modèle et les observations pour SAFE : hauteur de la mer moyenne pour SAFE (a) et le produit RIO05 (Rio and Hernandez, 2004) (b) [10 cm par contour], énergie cinétique turbulente moyenne [$100 \times \text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] pour SAFE (c) et AVISO (d). Figure tirée de l'article rédigé par Penven *et al.* (2006b).

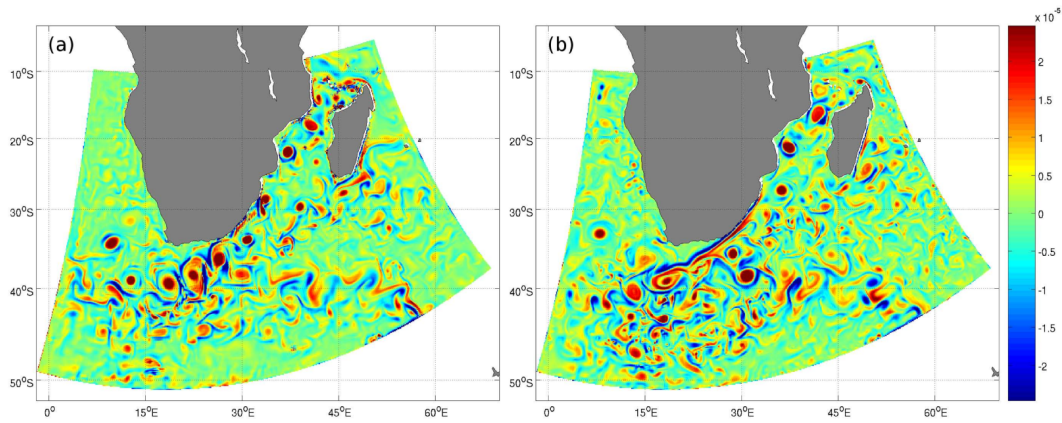


FIGURE 25 – Composantes verticales de vorticité [s^{-1}] à 10 m la semaine du 23 avril 2003 issues du modèle HYCOM pour un schéma d'advection de moment d'ordre 2 (a) et d'ordre 4 (b). On peut voir un courant des Aiguilles longeant la partie Sud du continent sur le panneau (b), alors qu'il se resume à une succession de tourbillons sur le panneau (a). Figure tirée de l'article rédigé par Backeberg *et al.* (2009).

7.2 Application de SAfE pour la variabilité amont du courant des Aiguilles et les processus de transport en aval

Les pulsations du Natal se propageant le long du courant des Aiguilles ont été reliées à la génération des anneaux des Aiguilles (de Ruijter *et al.*, 1999b; van Leeuwen *et al.*, 2000). A partir d'analyses statistiques de données altimétriques, Schouten *et al.* (2002) proposent que ces perturbations et la génération des anneaux des Aiguilles sont contrôlées par les grands tourbillons provenant du canal du Mozambique. Il a en effet été observé que des tourbillons intenses se forment continuellement dans le canal du Mozambique (Ridderinkhof and de Ruijter, 2003) et au sud de Madagascar (de Ruijter *et al.*, 2003). La circulation dans le canal du Mozambique est ainsi dominée par des tourbillons anticycloniques aux diamètres supérieurs à 300 km qui occupent toute la colonne d'eau (voir Figure 36) et se propagent vers le sud (de Ruijter *et al.*, 2002). La présence de Madagascar est supposée être responsable de la génération de ces tourbillons. En supprimant Madagascar dans SAfE, nous avons annulé la source de génération des tourbillons du canal du Mozambique (Figure 26) (Penven *et al.*, 2006b). Dans ce cas, un courant de bord ouest se forme et constitue un continuum avec le courant des Aiguilles (Figure 26). Cette simulation confirme les effets de la propagation des tourbillons du canal du Mozambique sur la périodicité des événements d'échanges interocéaniques au sud de l'Afrique. Cependant, nous n'avons pas détecté d'impact significatif sur le transport net du déversement des Aiguilles.

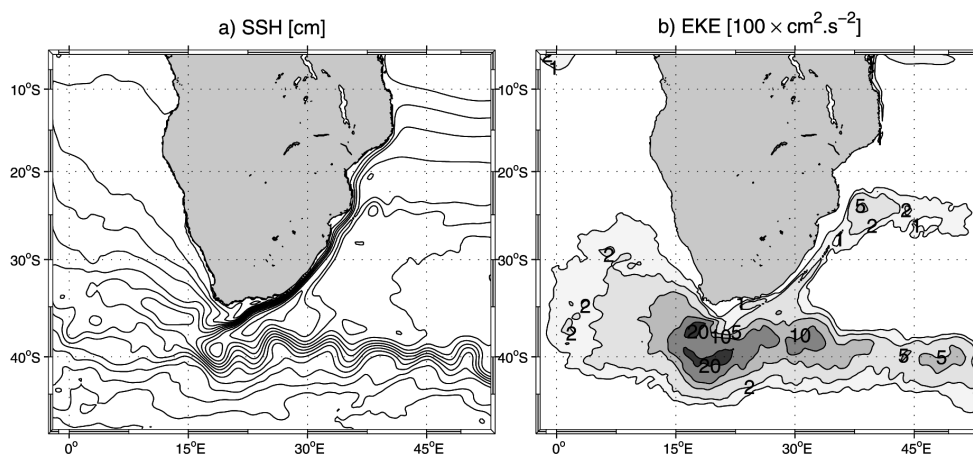


FIGURE 26 – Hauteur de la mer moyenne [10 cm par contour] et énergie cinétique turbulente moyenne [$100 \times \text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] pour l'expérience SAfE dans laquelle Madagascar a été enlevée. Figure tirée de l'article rédigé par Penven *et al.* (2006b).

La campagne BONUS GoodHope, réalisée dans le secteur Atlantique de l'océan Austral en Février-Mars 2008, a été l'occasion d'une application originale de la configuration SAfE. Durant cette campagne, Chever *et al.* (2010) ont mesuré des concentrations des différentes spéciations de fer qui diminuent lorsque que l'on se déplace depuis les environs du continent africain jusqu'à la mer de Weddell. Les résultats des modèles, basés entre autres sur la simulation numérique régionale SAfE, ont montré que dans le domaine subtropical, les dépôts atmosphériques de poussières venant de Patagonie et d'Afrique du Sud et les apports océaniques à partir des marges continentales du continent africain via la rétroflexion du courant des Aiguilles, peuvent expliquer les concentrations plus élevées de fer en surface et dans les eaux intermédiaires de la zone subtropicale proche

du continent africain (Chever *et al.*, 2010).

8 Changements climatiques et courant des Aiguilles

Des résultats importants ont été obtenus ces dernières années sur le lien entre le courant des Aiguilles et le climat planétaire. Le déversement des Aiguilles (le transfert d'eaux de l'océan Indien vers l'Atlantique via la rétroflexion du courant des Aiguilles) est reconnu être un processus clef pour la fermeture de la boucle chaude de circulation thermohaline (de Ruijter *et al.*, 1999b)(Beal *et al.*, 2011). Des résultats paléo-océanographiques et des observations récentes d'un changement dans le courant des Aiguilles ont stimulé une recherche très active sur le sujet (Zahn, 2009)(Beal *et al.*, 2011). L'apport du déversement des Aiguilles pourrait renforcer la cellule méridienne de circulation Atlantique à un moment où le réchauffement de la planète et la fonte des glaces pourrait la ralentir (Beal *et al.*, 2011). Nous avons participé à cet effort de la communauté internationale dans le contexte de la collaboration avec nos partenaires sud-africains au sein du LMI ICEMASA. En tant que membre associé du SCOR/WCRP/IAPSO Working Group 136 Climatic Importance of the Greater Agulhas System (http://www.scor-int.org/SCOR_WGs_WG136.htm), j'ai participé activement à l'organisation et à la recherche de financement via l'IRD de la conférence Chapman organisée à Stellenbosch en octobre 2012 : "The Agulhas System and its Role in Changing Ocean Circulation, Climate, and Marine Ecosystems". Beal *et al.* (2011) insistent sur la nécessité d'expériences de modélisation numériques (confirmées par des mesures paléo-océanographiques et des observations modernes) pour établir fermement le rôle du système du courant des Aiguilles dans le contexte du changement climatique global.

8.1 Changements récents dans l'océan Indien et le système du courant des Aiguilles

En 2006, Mathieu Rouault, océanographe à l'université de Cape Town, a observé une augmentation importante de la température de surface de la mer au niveau de la rétroflexion des Aiguilles (Figure 27) (Rouault *et al.*, 2009). Ce phénomène peut être constaté dans différents produits comme les données satellite AVHRR (Figure 27) et les reconstructions de température de surface de la mer OISST et du centre de HADLEY (Figure 28). Ce réchauffement est aussi associé à une augmentation du transfert de chaleur vers l'atmosphère. Mathieu Rouault m'a approché pour chercher ce signal dans la simulation interannuelle SArE. Ce fut le début d'une longue collaboration. La simulation interannuelle SArE reproduisant les variations de température de la région (Figure 28), nous avons pu l'utiliser pour approfondir l'analyse de ce phénomène. Le modèle montre que le réchauffement est important en profondeur, qu'il est lié à un apport d'eaux venant du courant des Aiguilles et qu'il est associé à une accélération du déversement des Aiguilles avec comme conséquence une augmentation importante du flux de chaleur et de sel de l'océan Indien vers l'Atlantique Sud (Rouault *et al.*, 2009). Ce phénomène semble relié à une intensification générale du système du courant des Aiguilles en réponse à une augmentation du rotationnel de vent dans l'océan Indien. Des résultats équivalents ont été obtenus sur une période de temps plus longue par Biastoch *et al.* (2009) dans une simulation globale contenant un zoom sur le système du courant des Aiguilles. Cependant, l'augmentation du déversement des Aiguilles serait associée dans ce cas à un décalage vers le pôle de la ligne de rotationnel de vent nul, une analyse statistique du transport Lagrangien concluant qu'une augmentation du déversement nécessiterait une diminution du courant des Aiguilles (van Sebille *et al.*, 2009).

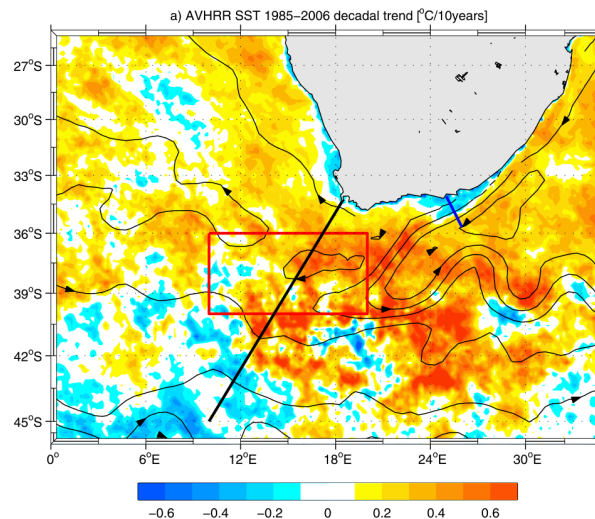


FIGURE 27 – Tendence linéaire de mesures satellites AVHRR de température de surface de la mer AVHRR de 1985 à 2006 [$^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$] montrant un réchauffement atteignant $0.7^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$. Figure tirée de l'article rédigé par Rouault *et al.* (2009).

L'hypothèse d'une accélération générale du gyre subtropical de l'océan Indien a été confirmée à partir d'observations altimétriques satellitaires par Backeberg *et al.* (2012a,b) (Figure 29). Ces observations montrent que la variabilité à méso-échelle du système du courant des Aiguilles dans son ensemble a significativement

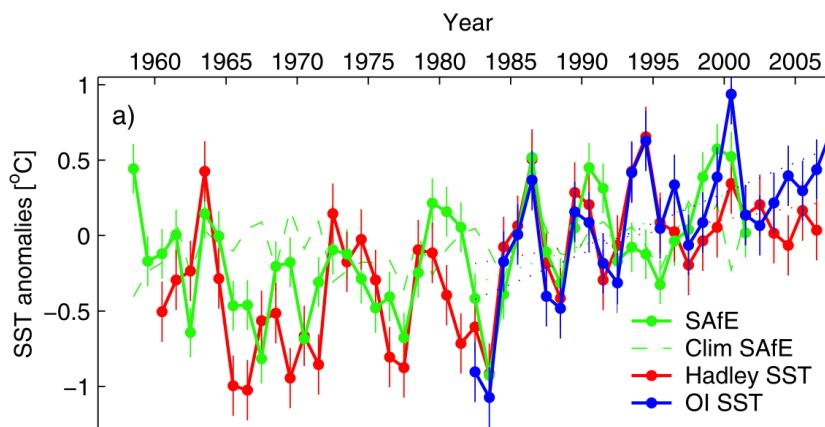


FIGURE 28 – Température de surface de la mer [°C] dans la zone 36°S - 41°S et 10°E - 20°E. Figure tirée de l'article rédigé par Rouault *et al.* (2009).

augmenté au cours des 17 dernières années (Figure 30-b). Ce phénomène résulte d'un accroissement du Courant Sud Équatorial, forcé par les alizés de l'Océan Indien tropical (Figures 29 et 30-a). L'intensification de la variabilité à méso-échelle du système du courant des Aiguilles est associée à un déplacement accéléré des tourbillons dans les régions sources du courant des Aiguilles autour de Madagascar, ainsi que dans la zone de rétroflexion à partir de laquelle les anneaux des Aiguilles se propagent en Atlantique Sud. Les positions annuelles du gyre subtropical, représentées par la ligne de hauteur de la mer correspondant au bord côtier du courant des Aiguilles, montrent une stabilité remarquable de la limite sud du gyre et de la position de la rétroflexion (Figure 30-c) en accord avec les observations de Dencausse *et al.* (2010b).

L'observation des changements de température de surface de la mer dans la zone de rétroflexion du courant des Aiguilles (Rouault *et al.*, 2009) a été étendue aux côtes sud-africaines (Rouault *et al.*, 2010b). Une tendance négative de 0.5°C par décennie est observée dans le Benguela Sud de janvier à août ainsi qu'une tendance au refroidissement de moindre ampleur le long de la côte Sud et dans la région de Port Elizabeth - Port Alfred de mai à août. Le refroidissement du Benguela Sud est associé à une augmentation des vents de sud-est favorables à l'upwelling côtier. Dans le Benguela Sud, El Niño affaiblit l'upwelling côtier, tandis qu'il augmente avec La Niña. La corrélation avec le mode de variabilité annulaire austral SAM est plus faible et moins cohérente. L'intensification du courant des Aiguilles pourrait être aussi responsable du refroidissement observé au niveau de l'upwelling dynamique de Port Alfred.

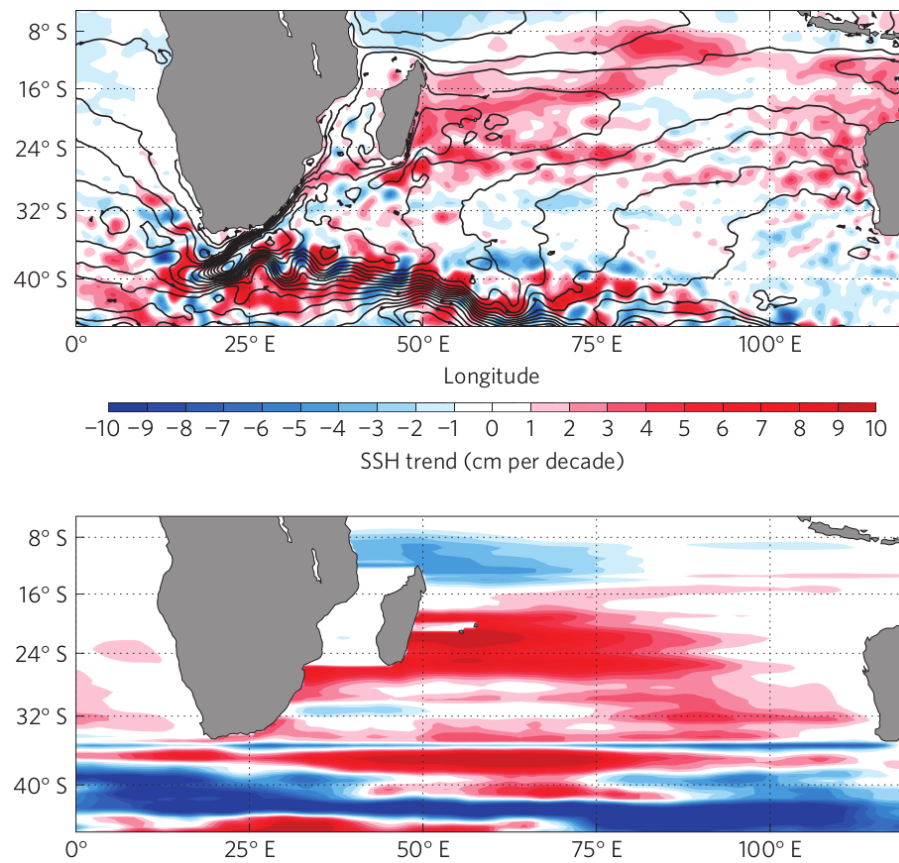


FIGURE 29 – Tendance décennale de hauteur de surface de la mer de 1993 à 2009 [cm/décennie] (une tendance globale de 3.4 cm par décennie a été retirée) issue d'altimétrie satellite AVISO (haut) et de l'intégration d'une relation de Sverdrup forcée par des vents CFSR (bas). Figure tirée de l'article rédigé par Backeberg *et al.* (2012b).

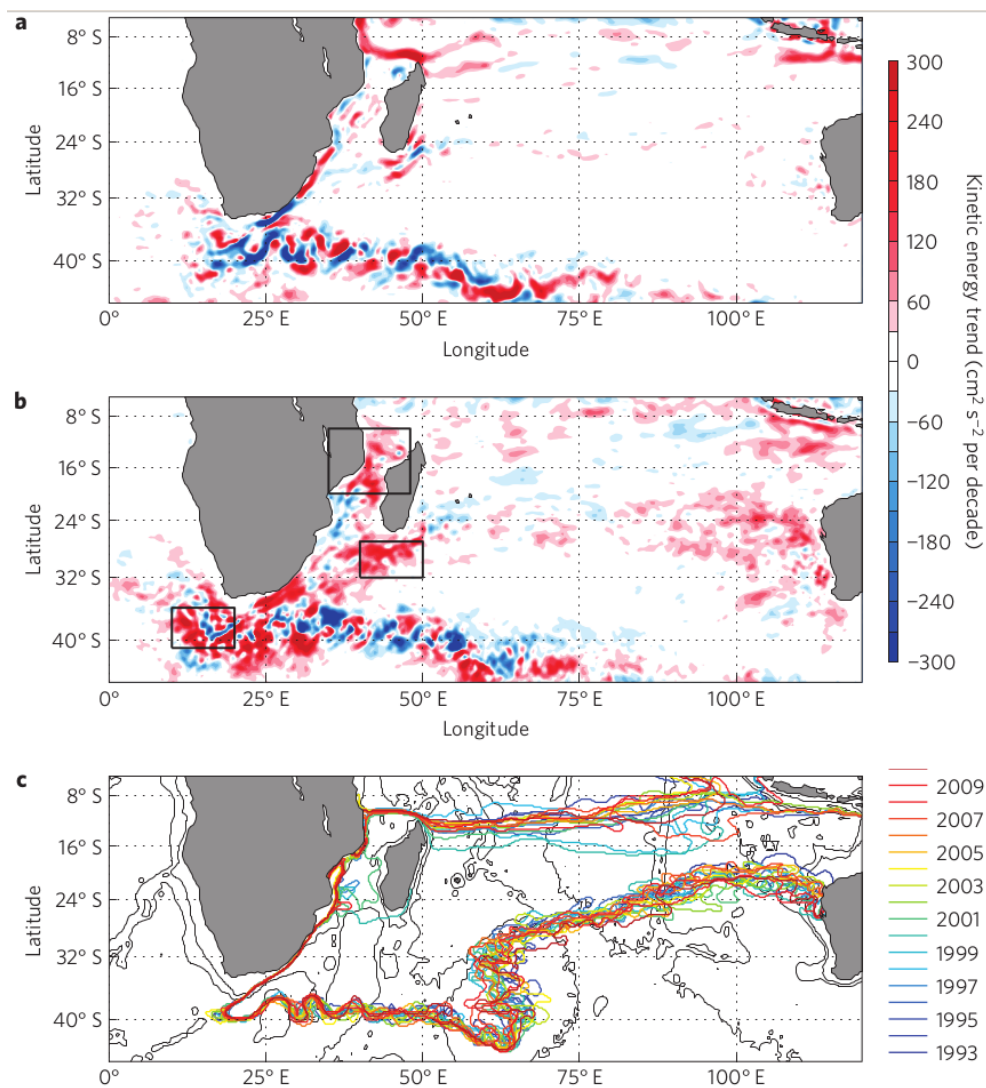


FIGURE 30 – a) Tendence décennale de l'énergie cinétique moyenne [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}/\text{décennie}$] calculée à partir d'altimétrie satellite AVISO sur la période 1993-2009. b) Tendence décennale de l'énergie cinétique turbulente [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}/\text{décennie}$] pour la même période. c) Positions annuelle du gyre subtropical de l'océan Indien calculées à partir d'altimétrie satellite AVISO. Figure tirée de l'article rédigé par Backeberg *et al.* (2012b).

8.2 Contrôles du déversement du courant des Aiguilles

En 2008-2009, l'intérêt pour les liens entre le courant des Aiguilles et le climat planétaire était tel que trois thèses de doctorat ont débuté en même temps sur des sujets équivalents :

- D. Le Bars à l'université d'Utrecht (Pays-Bas) sous la direction de W. P. M. de Ruijter et H. Dijkstra (sujet : “Dynamics and estimation of the Agulhas leakage”),
- Jonathan V. Durgadoo à l'université de Kiel (Allemagne) sous la direction de A. Biastoch (sujet : “Controls and impact of Agulhas leakage”),
- Benjamin Loveday à l'université de Cape Town (Afrique du Sud) sous la direction de C. Reason et moi même (sujet : “Modelling wind-driven inter-ocean exchange in the greater Agulhas with the Regional Ocean Modelling System”).

Ces trois thèses étaient toutes basées sur de la modélisation numérique du système du courant des Aiguilles dans le cadre de tests de sensibilité sur les forçages de vent. D. Le Bars s'est orienté vers des simulations idéalisées de processus. Il a ainsi exposé un nouveau régime du déversement, où après avoir augmenté avec le forçage de vent un maximum du déversement est atteint (Le Bars *et al.*, 2012).

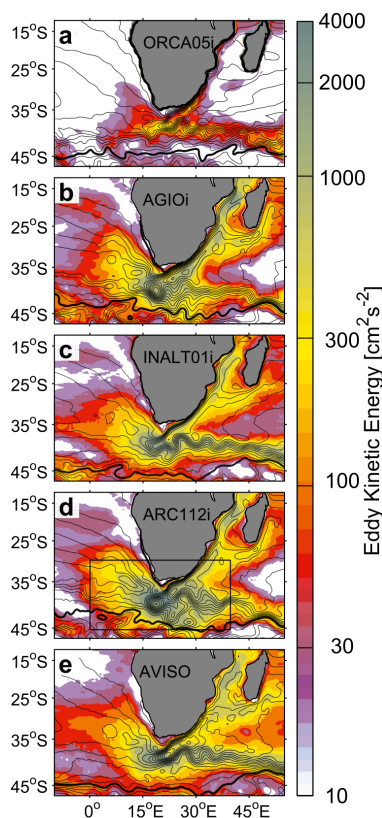


FIGURE 31 – Énergie cinétique turbulente [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$] sur la période 1992-2007 pour les simulations interannuelles ORCA05i (NEMO $1/2^\circ$, a), AGIOi (ROMS_AGRIF $1/4^\circ$, b), INALT01i (NEMO $1/10^\circ$, c), ARC112i (ROMS_AGRIF $1/12^\circ$, d) et l'altimétrie satellite AVISO. L'énergie cinétique turbulente est calculée à partir des vitesses géostrophiques dérivées de la hauteur de la mer. Les contours [10 cm par intervalle] représentent la hauteur de la mer moyenne pour cette période. Figure tirée de l'article rédigé par Loveday *et al.* (2014).

J. Durgadoo a utilisé une configuration globale NEMO à une résolution de $1/2^\circ$ ORCA05 dans laquelle il a introduit un zoom à une résolution de $1/10^\circ$ comprenant une partie de l'océan Indien et l'ensemble de l'Atlantique Sud (INALT01). C'est une extension des configurations réalisées par Biastoch *et al.* (2009). B. Loveday a mis au point une configuration ROMS_AGRIF s'inspirant des enseignements de SAfE et comprenant l'océan Indien et la moitié de l'Atlantique Sud à une résolution de $1/4^\circ$ (AGIO) avec un zoom à une résolution de $1/12^\circ$ sur le système du courant des Aiguilles (ARC112). Les 4 configurations (ORCA05, INALT01, AGIO, ARC112) utilisent des forçages équivalents (CORE) dans le cadre d'expériences climatologiques pour les tests de sensibilité et de simulations interannuelles sur de longues périodes. La mise en commun des expériences de J. Durgadoo et B. Loveday a grandement renforcé la robustesse des résultats.

En effet, les contrôles du déversement des Aiguilles étaient jusqu'alors sujets à débat : Rouault *et al.* (2009) montraient un renforcement du déversement en réponse à une accélération du flot alors que van Sebille *et al.* (2009) avaient décrit une anticorrélation entre le transport du courant des Aiguilles et le déversement des Aiguilles. Le comportement obtenu par Rouault *et al.* (2009) a été reproduit dans des simulations idéalisées montrant un courant des Aiguilles et son déversement augmentant avec le rotationnel du vent sur l'océan Indien (Penven *et al.*, 2010). Le déversement suit alors un transport de Sverdrup calculé à partir du rotationnel du vent intégré sur une ligne zonale passant au sud de la rétroflexion. L'anticorrélation décrite par van Sebille *et al.* (2009) entre le courant des Aiguilles et le déversement était associée à une théorie stationnaire prédisant un déplacement de la rétroflexion vers l'est (en amont) avec le renforcement du courant des Aiguilles (van Sebille *et al.*, 2009; Ou and de Ruijter, 1986). Dans ce cas, un courant des Aiguilles plus fort induirait un déplacement vers l'est de la rétroflexion et donc une baisse du déversement. Une corrélation entre le déplacement vers l'ouest de la rétroflexion et le déversement a été déduite de cette simulation (van Sebille *et al.*, 2010). Dans ce modèle, l'augmentation du déversement des Aiguilles est alors expliquée par le déplacement vers le sud de la ligne du rotationnel de vent nul (élargissant ainsi le passage au sud du continent africain) (Biastoch *et al.*, 2009). A partir d'un grand nombre de tests de sensibilité basés sur ROMS et NEMO, et où les alizés et les vents d'ouest ont été perturbés séparément, les thèses de doctorat de J. Durgadoo et B. Loveday vont résoudre cette énigme.

Une première série de tests de sensibilité, dans laquelle des anomalies de vent sont appliquées au régime de vents d'ouest dans l'océan Austral, montre que c'est l'intensité de ces vents d'ouest qui contrôle le déversement du courant des Aiguilles (Figure 32) (Durgadoo *et al.*, 2013). Le déversement du courant des Aiguilles répond proportionnellement à l'intensité des vents d'ouest jusqu'au point où l'ajustement de la circulation à grande échelle induit des interactions fortes entre le courant de retour des Aiguilles et le courant Circumpolaire Antarctique.

Une deuxième série de tests de sensibilité, dans laquelle des anomalies de vent sont appliquées au régime d'alizé de l'océan Indien, montre qu'à partir du moment où la résolution est suffisante pour développer une rétroflexion inertielle, le déversement du courant des Aiguilles est insensible aux changements du transport du courant des Aiguilles à 32°S (Loveday *et al.*, 2014) (Figure 33). Ainsi le transport du courant des Aiguilles peut augmenter ou diminuer sans affecter le déversement des Aiguilles. La position de la rétroflexion du courant des Aiguilles demeure quant à elle stable, en accord avec les observations (Dencausse *et al.*, 2010b). Cependant, il a été surprenant de constater que

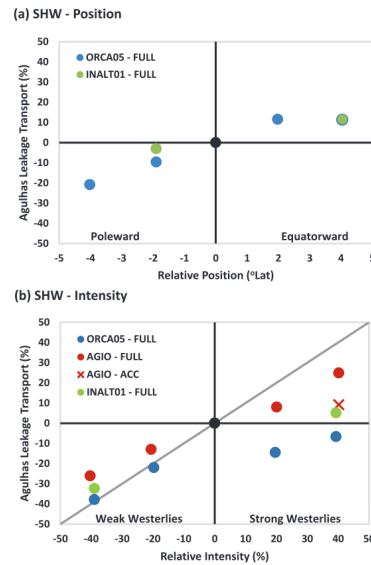


FIGURE 32 – Changements du déversement des Aiguilles [%] en fonction de la latitude [°] (a) et de l'intensité [%] (b) des vents d'ouest de l'océan Austral. Les valeurs de référence sont placées à l'origine. Chaque valeur représente une moyenne sur dix ans. La ligne grise dans (b) représente la variation du transport de Sverdrup. ORCA05 et INALT01 sont les simulations basées sur NEMO à des résolutions de $1/2^\circ$ et $1/10^\circ$. AGIO est la simulation basée sur ROMS_AGRIF à une résolution de $1/4^\circ$. Figure tirée de l'article rédigé par Durgadoo *et al.* (2013).

le niveau d'énergie cinétique turbulente de la rétroflexion répondait au courant des Aiguilles sans changement dans le déversement (Loveday *et al.*, 2014). Ainsi un plus grand nombre d'anneaux des Aiguilles n'implique pas nécessairement un déversement plus fort. Ces résultats sont obtenus en utilisant aussi bien des méthodes Eulériennes (Figure 34) que Lagrangiennes pour quantifier le déversement du courant des Aiguilles. Ces simulations montrent de plus une convergence du comportement des modèles de formulations différentes avec la résolution horizontale (Loveday *et al.*, 2014).

Au regard de ces deux séries d'expériences réalisées avec plusieurs modèles et différentes techniques pour la quantification du déversement, nous pouvons maintenant affirmer que les relations obtenues précédemment entre le courant des Aiguilles et son déversement sont fortuites. L'anticorrélation obtenue par van Sebille *et al.* (2009) est causée par des tendances différentes entre les régimes d'alizés et les vents d'ouest (Loveday, 2014). En filtrant ces tendances, l'anticorrélation disparaît.

La configuration ROMS_AGRIF employée pour les tests de sensibilité a ensuite été utilisée dans le cadre d'une simulation réaliste interannuelle (Loveday *et al.*, 2015). Cette simulation représente quasiment les trajectoires privilégiées des anneaux des Aiguilles observées par Dencausse *et al.* (2010a) et les tendances des énergies cinétiques moyenne et turbulente de la rétroflexion (Backeberg *et al.*, 2012b) (Figure 35). Les participations des différents éléments constituant le déversement des Aiguilles (c.à.d. les anneaux des Aiguilles, les cyclones, le transport côtier et le transport non turbulent) sont quantifiées dans le modèle. Ainsi, l'augmentation du déversement des Aiguilles est liée à l'augmentation des transports turbulent et non turbulent, tous les deux étant associés au renforcement des vents d'ouest (associé lui même à la phase positive du mode

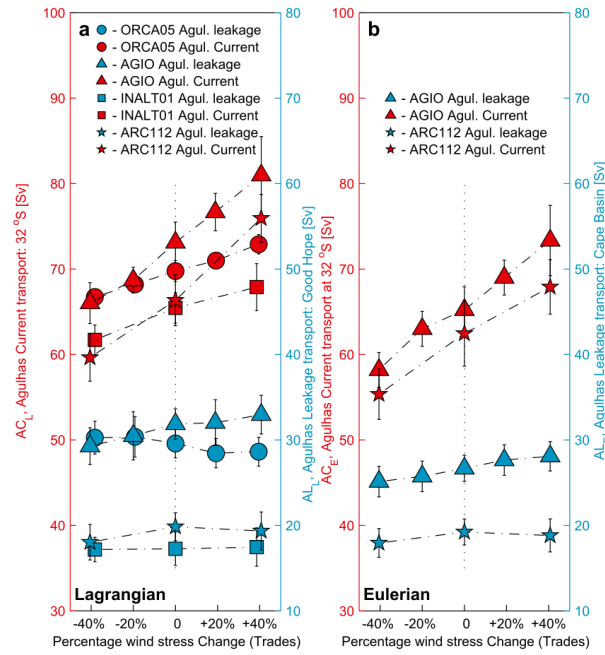


FIGURE 33 – Changements du transport du déversement des Aiguilles (marques bleues) et du courant des Aiguilles (marques rouges) en fonction de l’anomalie de tension de vent appliquée sur les alizés dans l’océan Indien. Valeurs moyennes obtenues à partir de particules Lagrangiennes (a) et d’un traceur passif Eulérien (b). ORCA05 et INALT01 sont les simulations basées sur NEMO à des résolutions de $1/2^\circ$ et $1/10^\circ$. AGIO et ARC112 sont les simulations basées sur ROMS_AGRIF à une résolution de $1/4^\circ$ et $1/12^\circ$. Figure tirée de l’article rédigé par Loveday *et al.* (2014).

de variabilité annulaire austral SAM). Le rapport entre ces composantes variant aux échelles décennales, en plus de l’augmentation de la turbulence observée dans la rétroflexion du courant des Aiguilles, la partie non turbulente jouerait un rôle important dans la modulation de la connexion entre l’Atlantique et l’océan Indien.

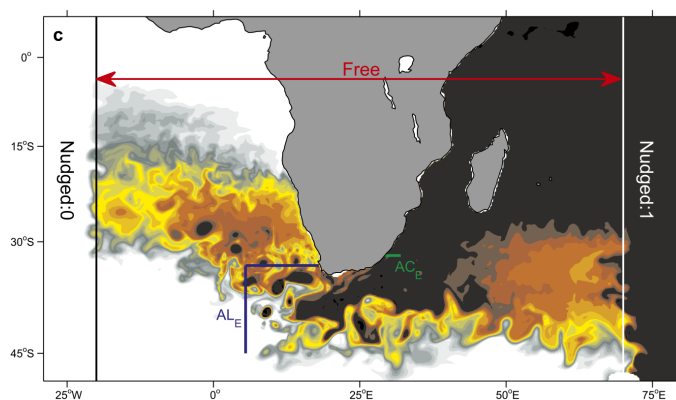


FIGURE 34 – Concentration à 100 m du traceur utilisé pour estimer le déversement des Aiguilles dans la simulation basée sur ROMS_AGRIF. Le traceur est libre d'évoluer entre 20°O et le 70°E. Il est rappelé vers 1 dans l'océan Indien et vers 0 dans l'Atlantique hors de cette zone. Figure tirée de l'article rédigé par Loveday *et al.* (2014).

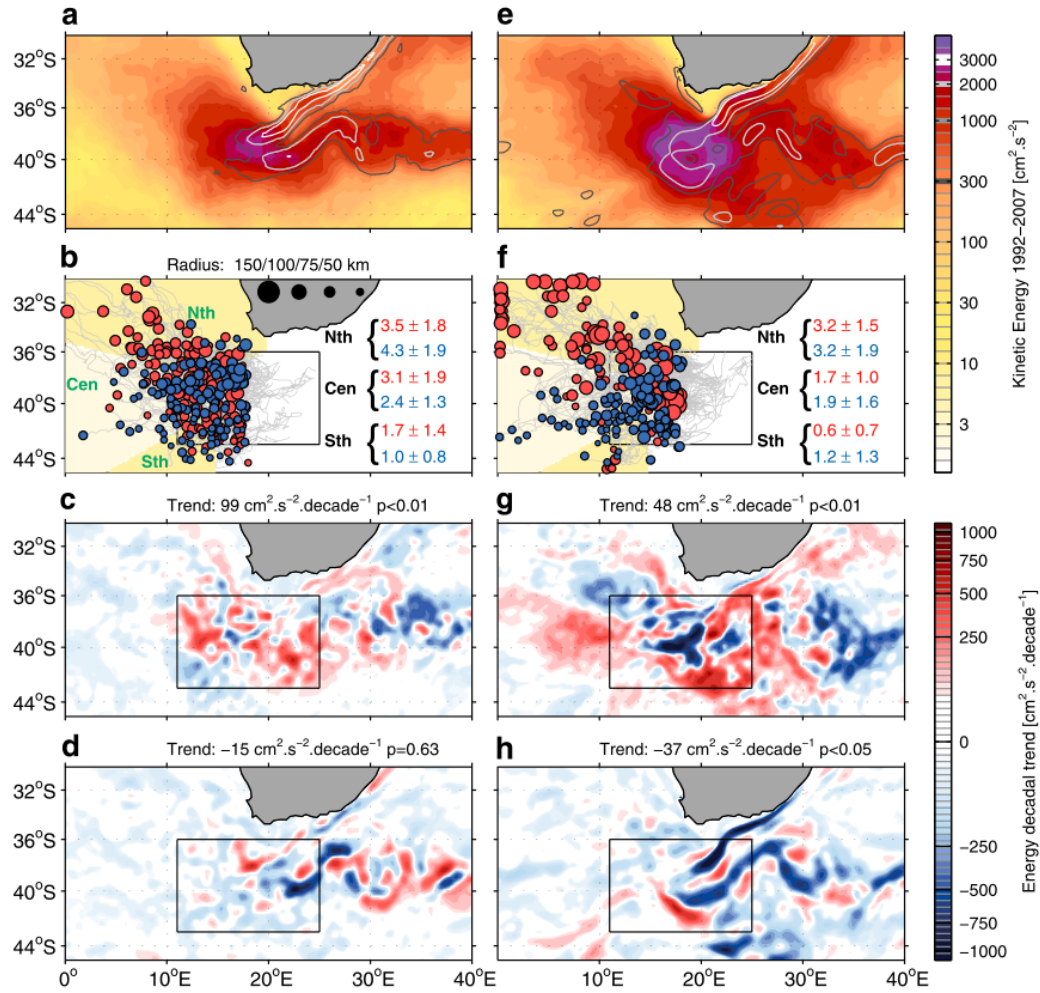


FIGURE 35 – Première ligne : énergies cinétiques moyenne (contours) et turbulente (couleurs) $[\text{cm}^2 \text{s}^{-2}]$ calculées à partir des vitesses géostrophiques de 1992 à 2007. Deuxième ligne : trajectoires et positions finales des tourbillons cycloniques (bleus) et anticycloniques (rouges) générés à partir de la rétroflexion des Aiguilles. Troisième ligne : tendances décennales d'énergie cinétique turbulente $[\text{cm}^2 \text{s}^{-2}/\text{décennie}]$. Dernière ligne : tendances décennales d'énergie cinétique moyenne $[\text{cm}^2 \text{s}^{-2}/\text{décennie}]$. La colonne de gauche représente l'altimétrie satellite AVISO, celle de droite le modèle. Figure tirée de l'article rédigé par [Loveday et al. \(2015\)](#).

Cinquième partie

Résultats scientifiques : C - dynamique tourbillonnaire et écosystèmes marins dans le canal du Mozambique

Sommaire

9	Les tourbillons dans le canal du Mozambique	72
9.1	Modélisation des tourbillons dans le canal du Mozambique	72
9.2	Influence des tourbillons sur la production biologique dans le Canal du Mozambique	76
10	Processus de transport sur le plateau et dynamique côtière autour du canal du Mozambique	79
10.1	Marées et transport larvaire sur le banc de Sofala	79
10.2	Modélisation des tourbillons cycloniques dans la région de la baie de Delagoa	80
10.3	Variabilité interannuelle au large de la Tanzanie	81

“Aux antipodes la terre tourne dans l’autre sens.” Jean-Marie Gourio “Les nouvelles brèves de comptoir”

Situé au sud ouest de l’océan Indien, entre l’île de Madagascar et le continent africain, le canal du Mozambique est aussi un chantier historique de l’IRD (Ménaché, 1961; Piton *et al.*, 1981; Donguy and Piton, 1991). La présence de Madagascar, agissant comme une barrière au travers du courant Equatorial Sud (Penven *et al.*, 2006b), résulte dans le canal en une circulation caractérisée par une activité tourbillonnaire intense (Figure 22), dominée par de grands tourbillons anticycloniques (Biaستoch and Krauß, 1999; de Ruijter *et al.*, 2002; Ridderinkhof and de Ruijter, 2003; Schouten *et al.*, 2003). Les effets de ces tourbillons sont tels que la notion d’un “courant du Mozambique” coulant le long de la côte africaine comme décrit dans les manuels (Glickman, 2000; Tomczak and Godfrey, 2003) est désormais obsolète (Lutjeharms, 2006a; Lutjeharms *et al.*, 2012), (Penven *et al.*, 2006b). Un transport moyen vers le sud d’environ 14 Sv traverse tout de même le canal (Ganachaud and Wunsch, 2000) mais est sujet à d’importantes variations (Harlander *et al.*, 2009).

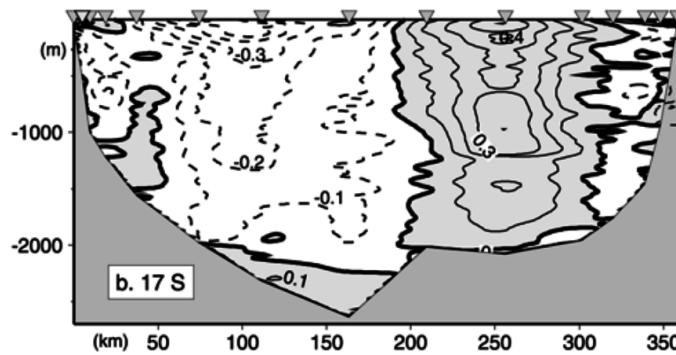


FIGURE 36 – Vitesses méridionales [m s^{-1}] observées par LADCP au travers du canal du Mozambique à 17°S . Figure tirée de l’article rédigé par de Ruijter *et al.* (2002).

Les grands tourbillons anticycloniques du canal du Mozambique sont générés relativement régulièrement (environ 4 par an) et atteignent jusqu’à 300 à 350 km de large (de Ruijter *et al.*, 2002; Ridderinkhof and de Ruijter, 2003; Schouten *et al.*, 2003). Bien qu’intensifiés en surface, ils présentent une composante barotrope significative, résultant en des vitesses importantes (de l’ordre de 0.1 m s^{-1}) au fond du canal (de Ruijter *et al.*, 2002) (Figure 36). Ils se propagent vers le sud, le long du talus à l’ouest du canal, à des vitesses de l’ordre de 6 km/jour (Schouten *et al.*, 2003). Plus au sud, ces tourbillons peuvent provoquer la formation de pulsations du Natal dans le courant des Aiguilles (Lutjeharms and Roberts, 1988) (Tsugawa and Hasumi, 2010) (Rouault and Penven, 2011), ces derniers pouvant affecter la génération d’anneaux des Aiguilles (van Leeuwen *et al.*, 2000). Nous avons cependant montré que la suppression de ces perturbations ne changeait pas de manière significative le déversement du courant des Aiguilles (Penven *et al.*, 2006b).

Weimerskirch *et al.* (2004) ont observé que ces tourbillons structurent spatialement et temporellement les écosystèmes marins du canal du Mozambique. L’effet est visible à travers la chaîne trophique dans son ensemble, du phytoplancton jusqu’aux grands prédateurs. Dans le cadre d’un partenariat scientifique entre la France et l’Afrique du Sud, un programme pluridisciplinaire impliquant directement l’IRD (MESOBIO) a été mis en place pour adresser les effets des tourbillons sur les écosystèmes marins dans le canal du Mozambique (Ternon *et al.*, 2014b). MESOBIO est principalement axé sur des observations en mer réalisées au cours de 12 campagnes océanographiques multidisciplinaires

entre 2002 et 2010. Les objectifs spécifiques étaient d'identifier comment les tourbillons affectent les sources de nutriments, d'évaluer l'importance relative des sources d'énergie pour les niveaux trophiques supérieurs et de quantifier le rôle des tourbillons sur l'abondance et la répartition spatiale du zooplancton et des prédateurs supérieurs dans le canal du Mozambique (Ternon *et al.*, 2014b). Les résultats des modèles présentés dans ce chapitre contribuent au volet modélisation de MESOBIO. Bien que les tourbillons océaniques soient connus pour héberger des circulations secondaires verticales pouvant renforcer la production biologique (McGillicuddy and Robinson, 1997), les processus liant les tourbillons du canal du Mozambique aux écosystèmes marins restaient encore à clarifier.

Dans le contexte de MESOBIO et du LMI ICEMASA une collaboration riche s'est développée avec nos partenaires du Mozambique. J'ai donné une formation de 15 jours en modélisation numérique à l'université Eduardo Mondlane (UEM, Maputo, Mozambique) en décembre 2009. Plusieurs étudiants du Mozambique ont suivi le cursus du département d'océanographie de l'université de Cape Town. J'ai ainsi co-encadré 2 masters et 4 thèses de doctorat :

- Issufo Halo (Master, UCT, 2007-2008, "Influence des dorsales océaniques sur la circulation au sud du canal du Mozambique et de Madagascar" ; co-encadrants : I. J. Ansorge, P. Penven et J. R. E. Lutjeharms)
- Clousa Maueua Chevane (Master, UCT, 2011-2012, "Caractéristiques générales des marées modélisées sur le banc de Sofala, Mozambique" ; co-encadrants : P. Penven et C. J. C. Reason)
- Issufo Halo (Thèse, UCT 2008-2012, "Les tourbillons du Canal du Mozambique : formation, comportement, et rôle pour les écosystèmes ; une étude de modélisation" ; co-encadrants : P. Penven, I. J. Ansorge et J. R. E. Lutjeharms),
- Yonss José (Thèse, UCT 2010-2014, "Structuration par l'activité méso-échelle de l'écosystème pélagique dans le canal du Mozambique" ; co-encadrants : F. Shillington, C. L. Moloney, O. Maury, O. Aumont, P. Penven et E. Machu),
- Bernardino Malauene (Thèse, UCT, 2011-2015, "Influences environnementales sur la population de crevettes pénéidées sur le banc de Sofala, canal du Mozambique" ; co-encadrants : C. L. Moloney, M. J. Roberts, F. Marsac, P. Penven et C. Lett),
- Obadias Cossa (Thèse, UCT, démarrée en mars 2013, "Modélisation numérique de la dynamique côtière et des ondes de marée interne en Baie de Maputo" ; co-encadrants : S. Pous, P. Penven et C. J. C. Reason).

Cette activité a conduit à la constitution de la Jeune Equipe Associée à l'IRD "Mozambique Oceanic and Atmospheric sciences" (JEAI_MOCA) pour la période 2013-2015 (Halo *et al.*, 2013). Le montage de la JEAI_MOCA est le fruit d'une coopération entre les chercheurs du DEA (département des affaires environnementales, Afrique du Sud), de IIP (Instituto Nacional de Investigação Pesqueira, Mozambique), de INAHINA (Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, Mozambique), de l'IRD (Institut de Recherche pour le développement, France), de UCT (University of Cape Town, Afrique du Sud) et de UEM (Universidade Eduardo Mondlane, Mozambique). Les membres sont : B. Backeberg (UCT), A. Brito (IIP), C. Maueua Chevane (INAHINA), C. Collins (UCT), I. Halo (UCT), Y. Jose (UCT), B. Loveday (UCT), B. Malauene (IIP), A. Mavume (resp. JEAI_MOCA, UEM), F. Marsac (IRD), O. Maury (IRD), F. Nehama (UEM), P. Penven (correspondant IRD), S. Pous (MHN) et C. Reason (UCT). La JEAI_MOCA est construite autour de trois axes de recherche :

1. l'impact des Cyclones tropicaux sur l'océan dans le canal du Mozambique.
2. les tourbillons à méso-échelle dans le canal du Mozambique et leurs effets sur les écosystèmes marins.
3. les processus de transport sur les plateaux et la dynamique côtière dans la région.

Le premier axe étant encore trop peu abouti, je ne présenterai dans ce chapitre que les résultats des deuxième et troisième axes.

9 Les tourbillons dans le canal du Mozambique

Comme présenté précédemment, les tourbillons à méso-échelle constituent une caractéristique dominante du canal du Mozambique. Dans le cadre du programme MESOBIO et de la JEAI_MOCA, deux thèses de doctorat ont été financées par l'IRD sur le sujet. La première, conduite par I. Halo (2012), vise à modéliser ces tourbillons pour établir leurs caractéristiques et leur processus de génération. La seconde, par Y. José (2013), a consisté en la mise au point d'un modèle couplé physique/biogéochimie/écosystème pour tester les effets de ces tourbillons sur la production biologique.

9.1 Modélisation des tourbillons dans le canal du Mozambique

Pour étudier les tourbillons dans le canal du Mozambique, I. Halo a mis en place une configuration spécifique de ROMS_AGRIF pour le sud-ouest de l'océan Indien à une résolution de $1/5^\circ$: SWIM (South West Indian ocean Model) (Figure 37). Les simulations sont climatologiques, forcées par des tensions de vent QuickSCAT en surface et des données WOA 2005 aux frontières.

L'outil de détection présenté dans le chapitre II a été utilisé pour étudier les propriétés des tourbillons dans le canal du Mozambique dans la configuration SWIM, mais aussi dans une configuration du modèle HYCOM à une résolution de $1/10^\circ$ (Backeberg *et al.*, 2009) et les observations altimétriques AVISO (Halo *et al.*, 2014a). SWIM, HYCOM et AVISO montrent des trajectoires et des régimes similaires pour les tourbillons à méso-échelle (Figure 38). Alors que les rayons des cyclones se répartissent approximativement autour du rayon interne de Rossby (ils sont un peu plus petits pour HYCOM), les rayons des anticyclones montrent dans les 3 cas une séparation entre les tourbillons avec des rayons inférieurs à 100 km (c.à.d. les tourbillons aux échelles du rayon interne de Rossby, comme les cyclones) et les grands anticyclones avec des rayons supérieurs à 100 km (représentés en rouge sur la figure 38). Ces grands anticyclones sont les structures décrites par de Ruijter *et al.* (2002). Ils suivent pour SWIM, HYCOM et AVISO un parcours privilégié le long du talus à l'ouest du canal du Mozambique (Figure 37). La zone de génération se situe principalement au niveau du gyre des Comores. Halo *et al.* (2014a) montrent un autre site de génération pour de plus petits anticyclones, à l'ouest de Madagascar. La répartition des cyclones est quant à elle plus homogène (Figure 38). Le profil de vorticité moyen des grands anticyclones présentant un plateau au centre (c.à.d. une rotation solide) et des valeurs négatives à la périphérie est typique d'un anneau (Figure 39), nous appellerons désormais ces grands anticyclones les "anneaux du canal du Mozambique" (Halo *et al.*, 2014a).

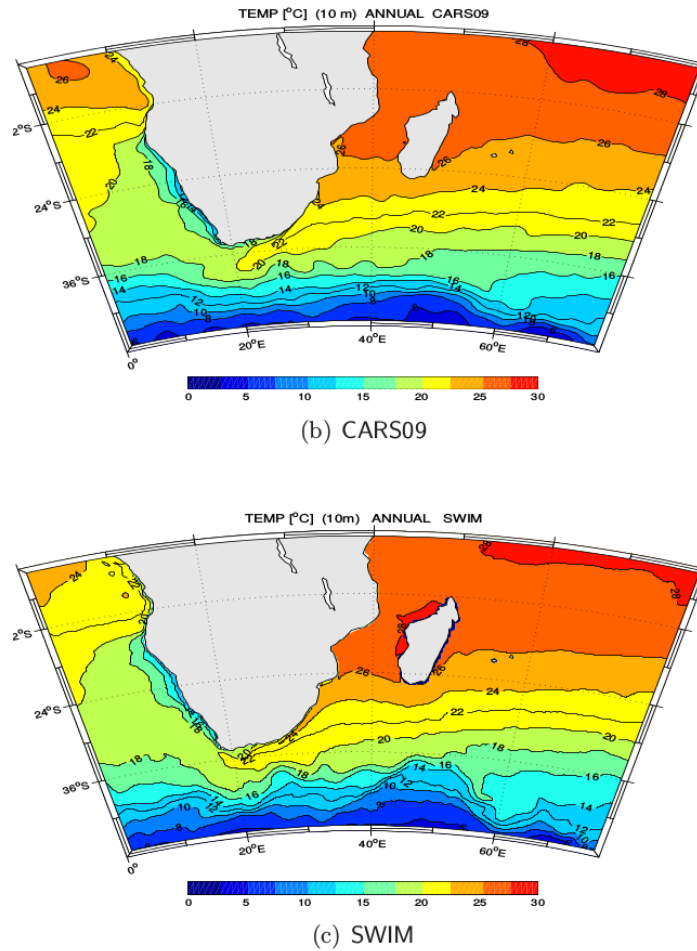


FIGURE 37 – Température moyenne à 10 m [°C] pour la climatologie CARS (haut) et la simulation SWIM (bas). Figure tirée de la thèse rédigée par Halo (2012).

SWIM a été par la suite utilisé pour étudier un autre site particulier de génération de tourbillons à l'extrémité sud de Madagascar (Halo *et al.*, 2014b). L'analyse des termes de conversion d'énergie montre dans cette zone une coexistence des instabilités barotrope et barocline, la première dominant au sud-est de Madagascar et la seconde au sud-ouest, après le détachement du courant est Madagascar du plateau continental. La saisonnalité de la formation des tourbillons est liée à l'intensification saisonnière du courant est Madagascar. Les tourbillons formés au sud-ouest de Madagascar montrent des caractéristiques distinctes de ceux qui sont formés dans le sud-est. Néanmoins, ces tourbillons étant hautement non linéaires, ils sont tous des vecteurs potentiels pour la connectivité des populations marines entre Madagascar et le continent africain (Halo *et al.*, 2014b).

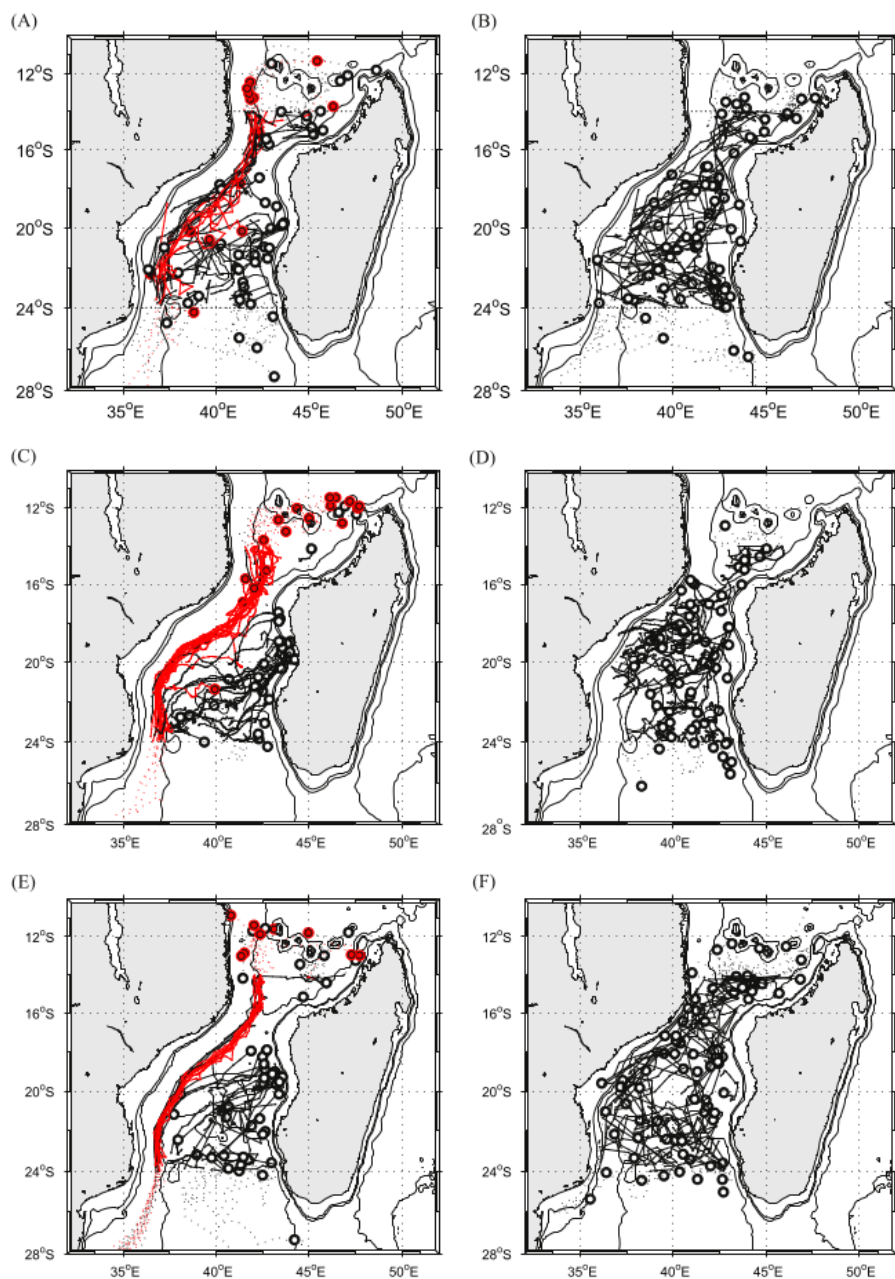


FIGURE 38 – Trajectoires et sites de formation (cercles) des tourbillons détectés sur une période de 5 ans. Colonne de gauche : anticyclones. Colonne de droite : cyclones. Ligne du haut : AVISO. Ligne du milieu : SWIM. Ligne du bas : HYCOM. Les trajectoires en rouges représentent les anticyclones possédant un rayon supérieur à 100 km. Figure tirée de l'article rédigé par Halo *et al.* (2014a).

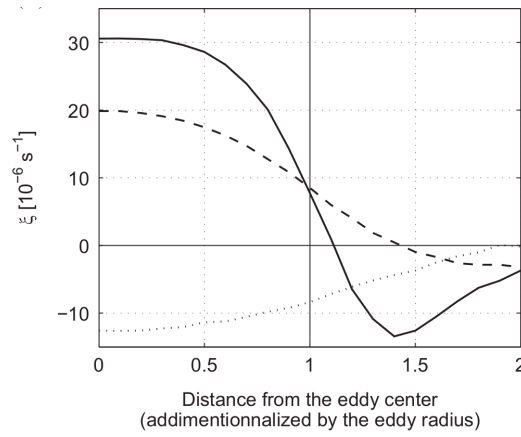


FIGURE 39 – Composite moyenne de la composante verticale de vorticité [10⁻⁶ s⁻¹] en fonction de la distance au centre du tourbillon pour les cyclones (pointillés), les anticyclones avec des rayons inférieurs à 100 km (tirets) et les anticyclones avec des rayons supérieurs à 100 km (trait plein). Figure tirée de l'article rédigé par Halo *et al.* (2014a).

9.2 Influence des tourbillons sur la production biologique dans le Canal du Mozambique

Le projet de thèse de Y. José comprenant la mise au point d'un modèle couplé de l'écosystème marin dans son ensemble (dynamique océanique / biogéochimie / poissons) était particulièrement ambitieux (José, 2013). L'utilisation du système d'emboîtement de grilles de ROMS_AGRIF (Debreu *et al.*, 2012) a été utilisé pour réaliser un modèle couplé physique / biogéochimie résolvant les tourbillons dans le canal du Mozambique. Le modèle biogéochimique utilisé est PISCES (Aumont and Bopp, 2006), comportant 24 compartiments dont 2 classes de phytoplancton (nanophytoplancton et diatomées) et 2 classes de zooplancton (microzooplancton et mésozooplancton). La grille parent est à une résolution de $1/2^\circ$ alors que la grille enfant, centrée sur le canal du Mozambique est à une résolution de $1/6^\circ$. Les simulations sont climatologiques et utilisent les sorties d'une simulation couplée physique - biogéochimie à plus grande échelle (Koné *et al.*, 2013) pour assurer la cohérence entre les variables aux frontières. Le modèle représente le cycle saisonnier de chlorophylle de surface observé dans la région (Figure 40).

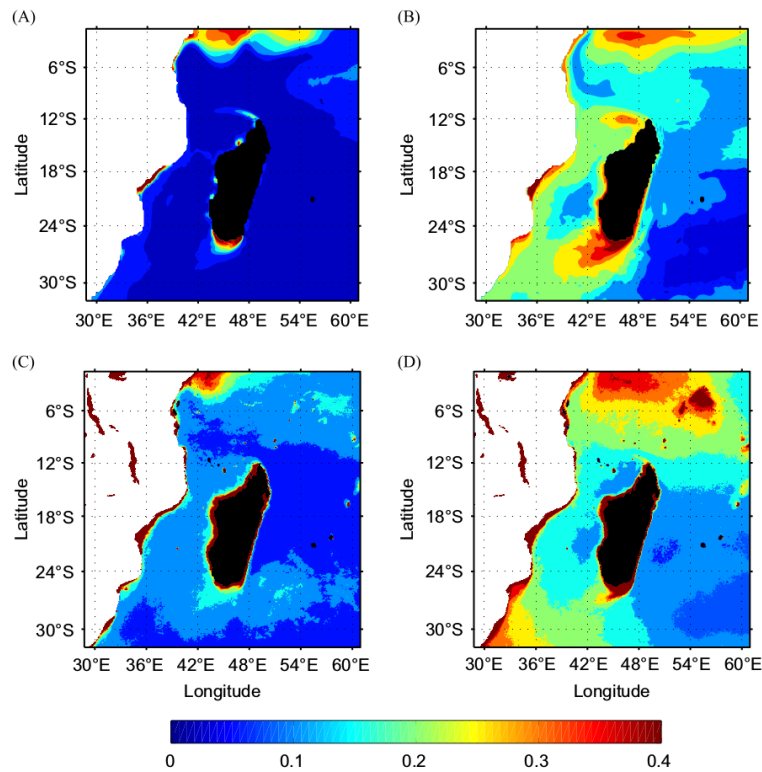


FIGURE 40 – Concentration de chlorophylle de surface [mgChl m⁻³] en été (colonne de gauche) et en hiver (colonne de droite) pour le modèle (ligne du haut) et les observations SeaWiFS (ligne du bas). Figure tirée de l'article rédigé par José *et al.* (2014).

Le modèle illustre différents exemples typiques des effets des tourbillons sur la biogéochimie dans le Canal du Mozambique (José *et al.*, 2014). Ainsi des tourbillons cycloniques productifs et des tourbillons anticycloniques non-productifs ont été détectés (Figure 41 A,B,C et D) en accord avec la littérature. En revanche, en contradiction avec l'hypothèse généralement admise, des tourbillons cycloniques non productifs et des tourbillons anticycloniques productifs ont aussi été détectés (Figure 41 C,D,E et F). Ceci est

visible dans le modèle et les observations. Le suivi des concentrations des nutriments et des flux au cours de la durée de vie des tourbillons dans la simulation montre l'importance de l'historique de ces structures sur leur production (José *et al.*, 2014). Ainsi, la distribution des nutriments dépend fortement de l'advection latérale des eaux côtières lors des interactions avec la topographie. Les conditions environnementales aux endroits où les tourbillons ont été générés ont aussi un effet important sur les concentrations de nutriments au sein de ces structures (José *et al.*, 2014).

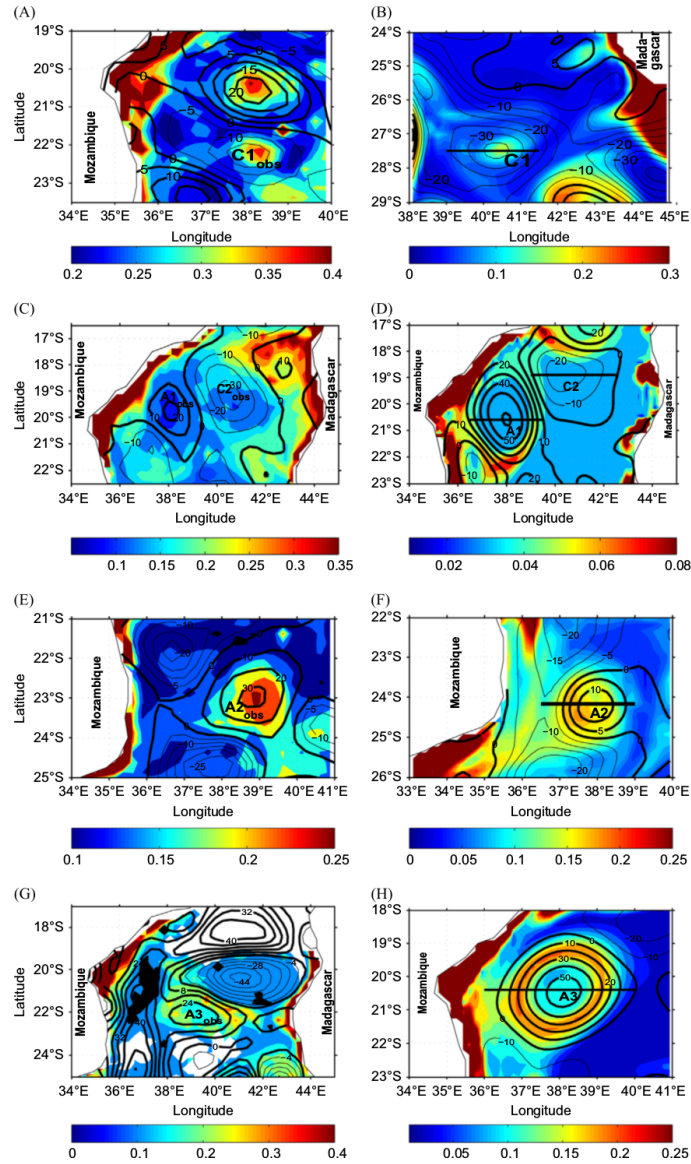


FIGURE 41 – Concentration de chlorophylle de surface [mgChl m^{-3}] et hauteur de l'eau (contours noirs [cm]) pour différents exemples de tourbillons à partir d'observations (SeaWiFS and AVISO ; colonne de gauche) et du modèle (colonne de droite). (A) et (B) : cyclones productifs. (C) et (D) : cyclones et anticyclones non-productifs. (E) et (F) : anticyclones productifs. (G) et (H) : production autour d'un anticyclone. Figure tirée de l'article rédigé par José *et al.* (2014).

Une expérience idéalisée dans laquelle les termes d'advection du moment ont été annulés a été réalisée pour quantifier le rôle des tourbillons sur la production biologique dans le canal du Mozambique (José *et al.*, 2016). L'annulation de l'advection de moment

résulte en la suppression des tourbillons, alors que la circulation à grande échelle (quasi-linéaire) est approximativement préservée. La comparaison entre l'expérience "sans tourbillons" et l'expérience originale de référence (Figure 42) montre en présence des termes non-linéaires :

1. une diminution de la production côtière dans le canal du Mozambique central due à une réduction de la disponibilité des nutriments par le transport tourbillonnaire.
2. une augmentation de la production au large dans le canal du Mozambique en raison de l'injection par les tourbillons d'eaux côtières, riches en éléments nutritifs.

De plus, les termes d'inertie, en provoquant le détachement du courant est Madagascar, intensifient fortement l'upwelling côtier au Sud de Madagascar (Figure 42) (José *et al.*, 2016).

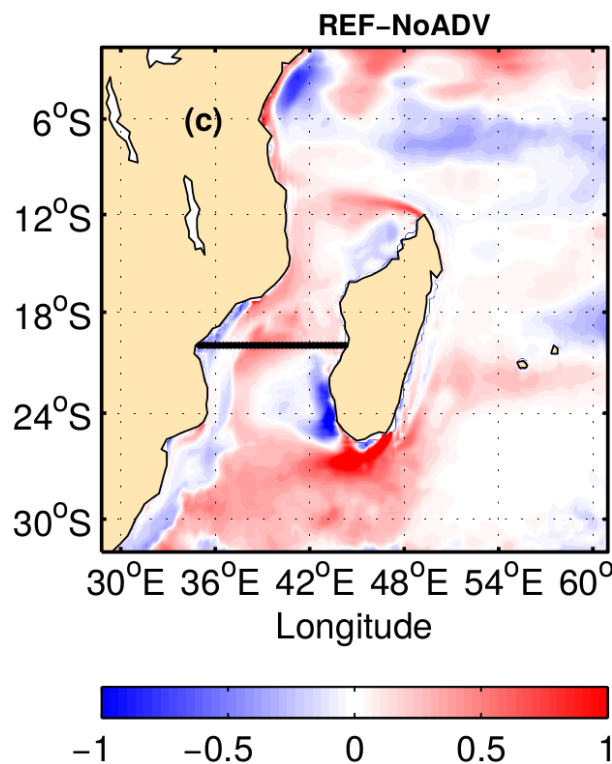


FIGURE 42 – Différence de concentration moyenne de phytoplancton en surface [$\mu\text{molC l}^{-1}$] entre l'expérience de référence et celle sans terme d'advection du moment. Figure tirée de l'article rédigé par José *et al.* (2016).

10 Processus de transport sur le plateau et dynamique côtière autour du canal du Mozambique

Les côtes du Mozambique présentent deux plateaux côtiers importants : La baie de Delagoa au sud s'étendant sur à peu près 150 km de long et 150 km de large entre 25°S et 27°S et le banc de Sofala plus au nord s'étendant entre 16°S et 24°S et atteignant aussi 150 km de large (Figure 43). Le banc de Sofala est un plateau large et assez peu profond qui constitue un habitat essentiel pour les crevettes pénaïdées. Le total des prises annuelles sont d'environ 7000-8000 tonnes, participant à hauteur de 55 millions de dollars au PIB du Mozambique. Au cours des dernières années, la ressource a montré des fluctuations importantes qui ont été attribuées aux changements environnementaux et à la surpêche.

10.1 Marées et transport larvaire sur le banc de Sofala

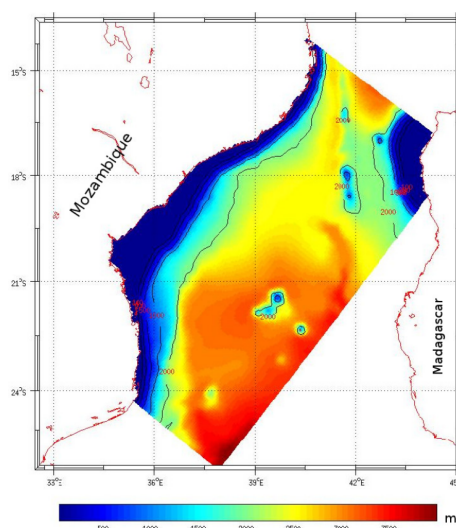


FIGURE 43 – Topographie [m] du modèle du Banc de Sofala le long de la côte mozambicaine. Figure tirée du manuscrit de master rédigé par Maueua Chevane (2013).

La dynamique océanique sur le banc de Sofala est fortement influencée par la marée avec des amplitudes pouvant atteindre 6.6 m. Durant son master, C. Maueua Chevane (2013) s'est concentrée sur l'étude de la marée sur le banc de Sofala. Elle a réalisé une configuration côtière de ROMS_AGRIF centrée sur le banc de Sofala à une résolution moyenne de 6 km (Figure 43). Les marées forcées aux frontières proviennent de TPXO 7.0 (Egbert and Erofeeva, 2002) et l'influence des anneaux du Mozambique est assurée par l'utilisation des sorties de la configuration SWIM aux frontières (en se basant sur la technique "Roms2Roms" (Mason *et al.*, 2010)). La résolution du modèle est cependant encore trop grossière pour reproduire toute l'amplitude de la marée observée dans l'estuaire de la rivière Pungwe (Figure 44). Le modèle montre que les courants de marée seraient assez forts pour générer un mélange suffisant pour créer un front de marée sur la partie sud du banc.

La thèse de B. Malauene (2014) s'est concentrée sur les processus de transport des larves de crevettes pénaïdées sur le banc de Sofala. B. Malauene a repris la configuration

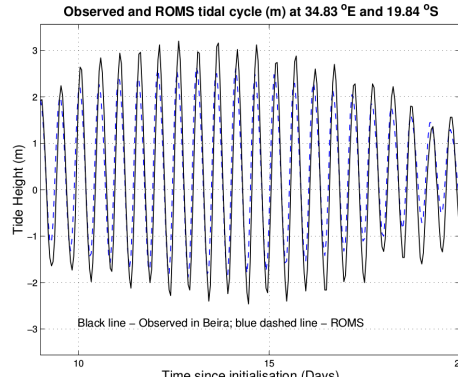


FIGURE 44 – Élévation de la mer [m] près du port de Beira (19.84°S ; 34.83°E). Ligne noire : observations. Ligne bleue : modèle. Figure tirée du manuscrit de master rédigé par Maueua Chevane (2013).

mise en place lors du master de C. Maueua Chevane et a ajouté un zoom AGRIF à une résolution de 2 km sur le banc de Sofala. Les fleuves sont aussi représentés. Une analyse statistique montre que les structures des panaches des fleuves sont fortement influencées par le passage des anneaux du canal du Mozambique (Figure 45).

Les processus de transport larvaire de crevettes pénéidées sont testés par un modèle de type "individu centré" (IBM) (Lett *et al.*, 2007, 2008). Le modèle montre que les larves peuvent être emportées au large lors du passage des tourbillons de méso-échelle dans le canal (Figure 45). Cependant, en l'absence de ces tourbillons, bien que la rétention sur le plateau soit plus élevée, la fixation à la côte est plus faible. Sur la partie sud du banc de Sofala (vers le port de Beira), les larves restent piégées par un fort courant de marée, résultant en une rétention importante sur le plateau, mais aussi un retour faible à la côte (Figure 46). Ni les migrations verticales nyctémérales, ni les marées n'améliorent le succès du recrutement. Ainsi 3 zones ont été identifiées pour les processus de transport larvaire sur le Banc de Sofala (Figure 46) :

1. à la côte, assurant la fixation,
2. au sud du Banc de Sofala, favorisant la rétention et la perte,
3. au large, favorisant la perte.

10.2 Modélisation des tourbillons cycloniques dans la région de la baie de Delagoa

L'objectif de la thèse de O. Cossa est de documenter la circulation autour de la région de la baie de Delagoa dans le sud du canal du Mozambique. En collaboration étroite avec S. Pous, O. Cossa a mis au point une simulation côtière de la baie de Delagoa en utilisant aussi les données du modèle SWIM aux frontières (Cossa *et al.*, 2016). Cette configuration réussit à reproduire un tourbillon cyclonique semi-permanent dans la baie de Delagoa (Figure 46). Ce tourbillon est présent environ 25 % du temps. La méthode de suivi de tourbillons décrite dans le chapitre II appliquée au modèle ainsi qu'aux données AVISO confirme le réalisme de la simulation. Le diamètre du tourbillon de la baie de Delagoa varie entre environ 60 et 150 km et la durée de vie moyenne est supérieure à 20 jours. Le modèle révèle aussi d'autres cyclones générés plus au nord se déplaçant vers les

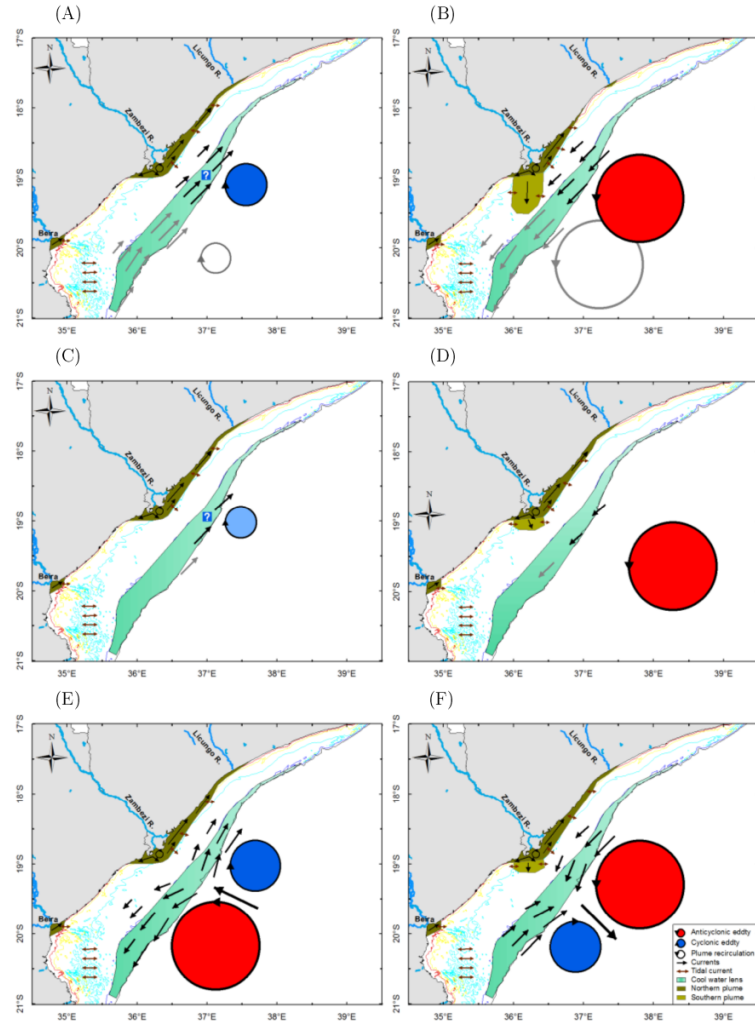


FIGURE 45 – Représentation conceptuelle des processus de circulation sur le banc de Sofala en fonction de la présence de tourbillons de méso-échelle au large, des marées et des panaches des fleuves. Figure tirée du manuscrit de thèse rédigé par Malauene (2014).

pôles (les “cyclones de Inhambane”). Leur génération semble être associée à la présence d’anneaux du canal du Mozambique.

10.3 Variabilité interannuelle au large de la Tanzanie

Bien que située au nord, hors du canal du Mozambique, la région du plateau tanzanien est sous l’influence des courants venant du nord de Madagascar (Manyilizu *et al.*, 2016). Durant sa thèse de doctorat, M. Manyilizu (2013) a mis au point une configuration régionale basée sur ROMS_AGRIF pour étudier les variations interannuelles de température de surface de la mer de 1980 à 2007 dans la région du plateau tanzanien et au large de celui-ci (Manyilizu *et al.*, 2014) (Figure 48). Les variations interannuelles les plus faibles se produisent dans les eaux côtières au large de la Tanzanie, montrant une forte corrélation avec le transport au nord de Madagascar. Les eaux côtières sont dominées par une variabilité à environ 5 ans. Plus au large, les variations sont plus fortes et sont dominées par deux périodes : à environ 2.7 ans et à près de 5 ans. La variabilité de la région est liée à des événements de type El Niño et

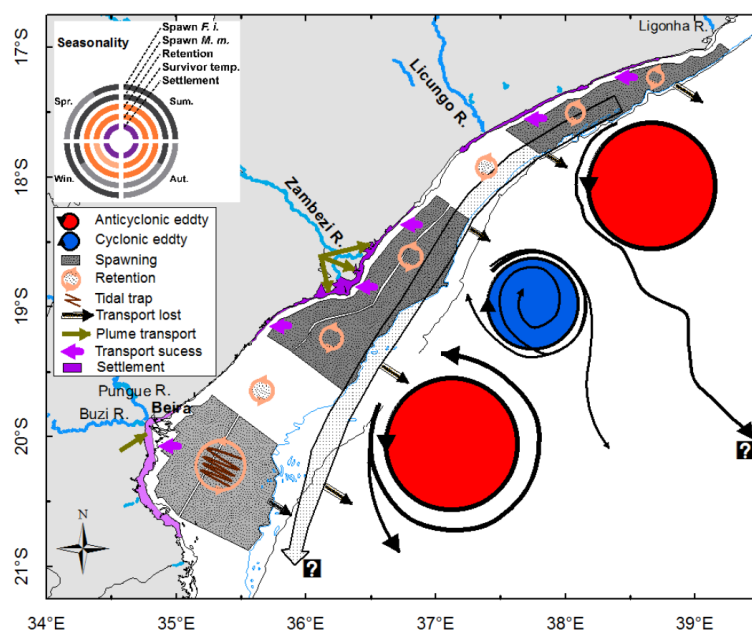


FIGURE 46 – Schémas conceptuel des premiers stades de vie des crevettes pénéidées sur le banc de Sofala. Les anneaux en haut à gauche indiquent la saisonnalité des processus. Les couleurs claires indiquent des valeurs faibles et les couleurs sombres des valeurs plus fortes. Figure tirée du manuscrit de thèse rédigé par Malauene (2014).

du dipôle de l'Océan Indien (IOD) qui induisent des changements dans la thermocline et dans les flux de chaleur de surface.

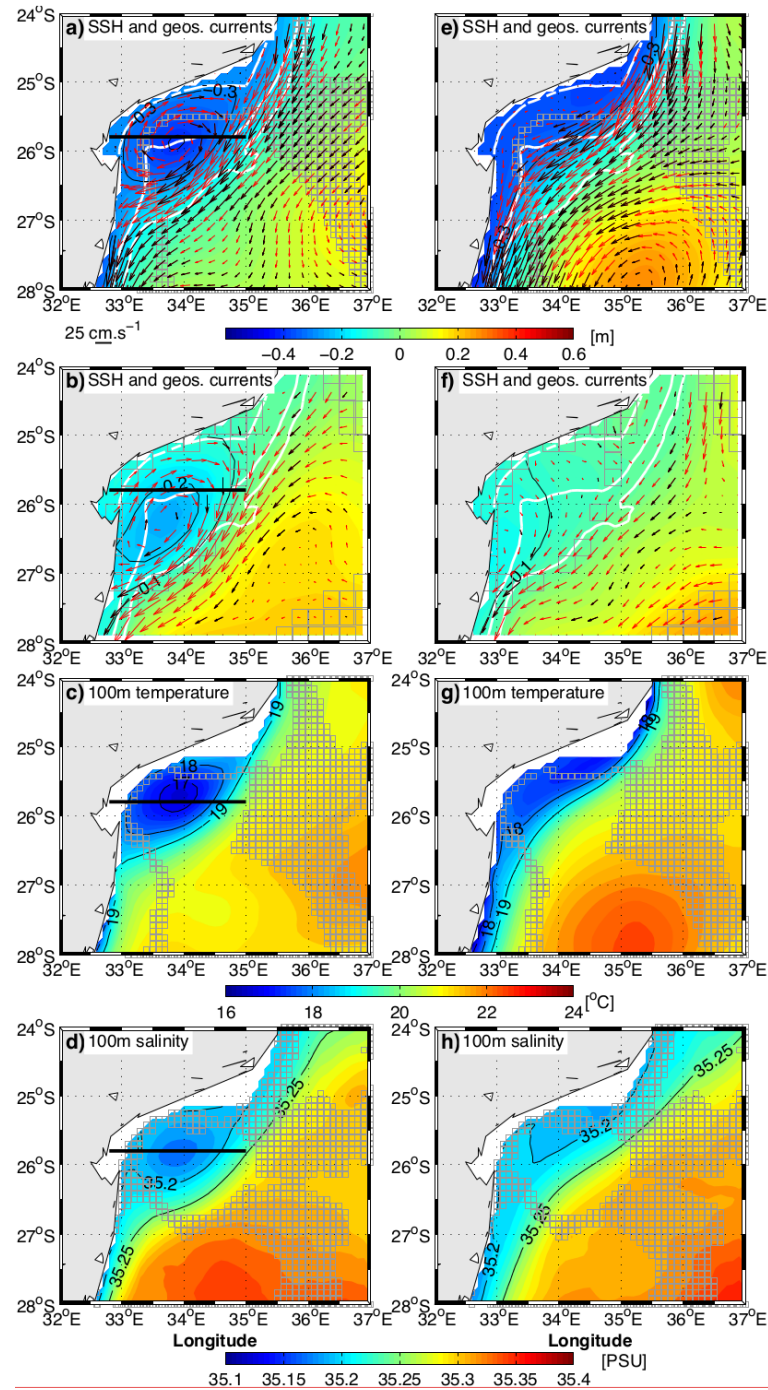


FIGURE 47 – Composites de hauteur de la mer [m] et de courants géostrophiques pour le modèle (a et e) et AVISO (b et f), de température [°] (c et g) et de salinité (d et h) pour le modèle à 100 m. Colonne de gauche : En présence du tourbillon. Colonne de droite : Sans le tourbillon. Les zones grisées indiquent les régions où la différence entre les composites n'est pas significative. Les vitesses significativement différentes sont représentées en rouge. Figure tirée de l'article rédigé par *Cossa et al.* (2016).

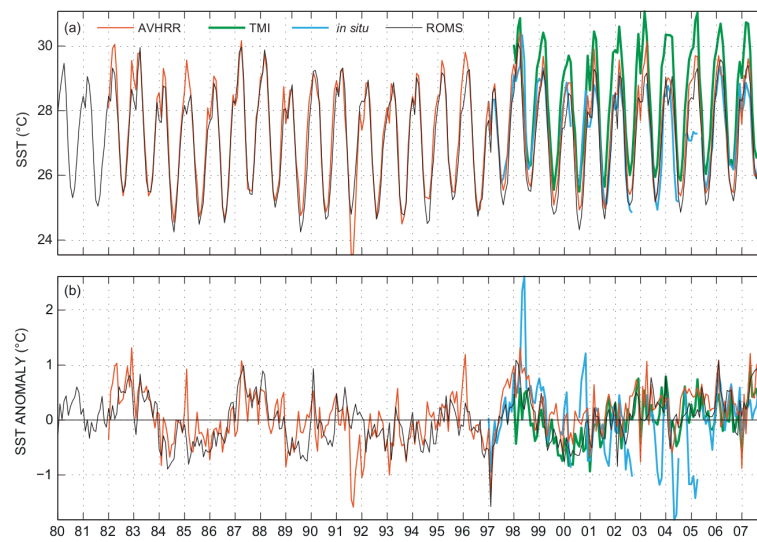


FIGURE 48 – Séries temporelles de la température de surface de mer mensuelles [$^{\circ}\text{C}$] (a) et de ses anomalies [$^{\circ}\text{C}$] (b). Courbe noire : modèle (1980-2007). Courbe rouge : AVHRR (1982-2007). Courbe verte : TMI (1998-2007). Courbe bleue : mesures in situ (1997-2007) effectuées dans le Chumbe Island Coral Park dans le Canal de Zanzibar. Figure tirée de l'article rédigé par Manyilizu *et al.* (2014).

Sixième partie

Conclusion - Perspectives

Sommaire

11 Conclusion	87
12 Perspectives	88
12.1 Participation au travail sur CROCO	89
12.2 Puit d'énergie à l'ouest de l'océan Indien	89

“L’eau qui s’évapore en Méditerranée retombe en Méditerranée. L’eau qui s’évapore en Atlantique repleut en Atlantique. Et les mers seront bien gardées !” Jean-Marie Gourio
“Les nouvelles brèves de comptoir”

11 Conclusion

Ce manuscrit rend compte d'une activité de recherche en océanographie physique effectuée sur un peu plus d'une décennie (à peu près de 2003 à 2015). Durant cette période, un outil de modélisation numérique régional (ROMS_AGRIF) a été employé dans le cadre de collaborations avec les partenaires au sud sur différents chantiers autour du continent africain. Ce travail en collaboration a bénéficié de plusieurs affectations et de plusieurs missions de longue durée (principalement à l'université de Cape Town, Afrique du Sud). Ceci a conduit au co-encadrement d'étudiants au sud dans le cadre de 13 thèses de doctorat et de 3 masters. ROMS_AGRIF a ainsi été utilisé dans des expériences idéalisées de processus, des simulations climatologiques et des études réalistes de variabilité climatique.

L'environnement de modélisation autour de ce modèle régional a fait l'objet d'une attention continue. L'outil de génération et d'analyse de configurations ROM-STOOLS a facilité l'accès à la modélisation numérique pour nos partenaires du sud (Penven *et al.*, 2008). Plusieurs méthodes d'analyses diagnostiques, ont été mises en place dans le cadre des différents travaux (comme par exemple la détection de tourbillons, les bilans et transferts d'énergie, l'équation de vorticité ou les transports de traceurs). Le modèle ROMS_AGRIF a bénéficié de l'expertise de plusieurs développeurs (Debreu *et al.*, 2012). Nous pouvons ici signaler le travail effectué par nos collègues du LEGOS et de l'INRIA pour les développements de ROMS_AGRIF et désormais du nouveau modèle CROCO. CROCO est un modèle en pleine évolution et les différentes applications sur lesquelles nous travaillons constituent des bancs d'essais plutôt sélectifs. J'espère pouvoir contribuer par ces aspects à ce développement.

Le travail sur les upwellings côtiers a été principalement motivé par des applications halieutiques. Ainsi les configurations ont autorisé une caractérisation des processus affectant le transport des œufs et larves de petits pélagiques dans les systèmes d'upwelling du Pérou et du Benguela. Au niveau du Benguela, le modèle a montré les processus responsables du courant vers le pôle dans le nord Benguela et les effets du Courant des Aiguilles dans le sud Benguela (Veitch *et al.*, 2009, 2010). Il a montré aussi les branches du courant du Benguela distinctes à la côte et au large. Pour l'upwelling côtier du Golfe de Guinée, le modèle a mis en lumière des processus originaux comme les tourbillons très énergétiques en aval des caps (Djakouré *et al.*, 2014) et a amené à la mise en évidence des mécanismes responsables de la présence de l'upwelling (Djakouré *et al.*, 2017). Les bilans d'énergie au niveau de l'Atlantique Tropical ont montré comment une rétroaction de Bjerknes agissait de manière saisonnière d'avril à septembre (Burls *et al.*, 2011). Le mode zonal de variabilité apparaît alors lié aux modulations interannuelles de ces rétroactions saisonnières (Burls *et al.*, 2012).

Les modèles numériques ont été déterminants dans la compréhension du système du courant des Aiguilles. Nous avons pu contribuer à la description des changements dans le déversement du courant des Aiguilles et à la compréhension des contrôles de ce déversement (Rouault *et al.*, 2009). Nous avons montré ainsi que les changements du déversement des Aiguilles sont contrôlés par les changements dans le régime des vents d'ouest (Durgadoo *et al.*, 2013), alors que les changements du courant des Aiguilles lui-même répondent aux variations des alizés (Loveday *et al.*, 2014). Cette démonstration du découplage entre déversement des Aiguilles et courant des Aiguilles résout un long

débat au sein de la communauté internationale. Ces variations s'effectuent dans un contexte de changements dans l'océan Indien liés à l'accélération du gyre subtropical (Backeberg *et al.*, 2012b). La variabilité interannuelle du déversement des Aiguilles est quant à elle liée au mode de variabilité annulaire austral (Loveday *et al.*, 2015). Ces changements du système du courant des Aiguilles influencent la dynamique côtière (Rouault *et al.*, 2010a).

Au niveau du canal du Mozambique, une jeune équipe associée à l'IRD a été constituée autour des travaux de modélisation régionale (Halo *et al.*, 2013). Nous avons caractérisé les processus tourbillonnaires qui dominent la circulation océanique dans le canal du Mozambique (Halo *et al.*, 2014a,b). Nous avons pu ainsi identifier et décrire les anneaux du canal du Mozambique. Nous avons quantifié le rôle des tourbillons sur la production biologique dans le canal du Mozambique (José *et al.*, 2014, 2016). Il apparaît que le transport tourbillonnaire assure principalement un transfert des eaux côtières riches en éléments nutritifs vers le large (José *et al.*, 2016). Sur le banc de Sofala, le long des côtes mozambicaines, un processus de refroidissement lié à la marée a été identifié (Chevane *et al.*, 2016). Le rôle des mécanismes de transport, et en particulier du passage des anneaux du canal du Mozambique et du panache des fleuves, sur le recrutement des larves de crevettes pénéidées a été déterminé pour le banc de Sofala. Plus au nord, le long des côtes tanzaniennes, le modèle a illustré les importances respectives des influences locales et grandes échelles dans la variabilité de la température océanique de surface (Manyilizu *et al.*, 2014, 2016).

Ces résultats montrent que bien que la modélisation numérique régionale ne se substitue pas aux observations in-situ, elle apporte un éclairage sur les processus en jeu et sur leurs évolutions dans le temps. Ces simulations montrent les mécanismes et les équilibres fondamentaux au niveau de la dynamique océanique régionale et côtière. Ceci constitue un travail amont avec un fort potentiel pour des applications régionales, que ce soit pour les écosystèmes marins, la vulnérabilité côtière, la variabilité climatique ou les systèmes opérationnels. Cependant, au niveau de la recherche pour le développement, mon sentiment au vu de mon expérience au cours de cette décennie est que l'apport le plus significatif de ces outils de modélisation se situe au niveau de la formation des étudiants. En effet, grâce à ces outils, les étudiants peuvent appréhender à un coût réduit (ce qui n'est pas négligeable au sud) les mécanismes océaniques fondamentaux et l'analyse de processus essentiels. Ceci apporte un éclairage sur la dynamique océanique qui, je l'espère, pourra accompagner leur démarche scientifique au cours de leur carrière future.

12 Perspectives

Mon activité future s'inscrit dans le contexte de l'équipe "Interactions d'Échelles" (dont je suis co-animateur) de la nouvelle UMR LOPS (2016-2021) et de la deuxième phase du LMI ICEMASA (2014-2018). L'équipe "Interactions d'Échelles" s'appuie sur un dénominateur commun au sein du groupe basé sur une approche conceptuelle de processus, mais aussi sur la confrontation systématique des résultats de modèles idéalisés de complexité croissante avec des modèles réalistes (et dans la mesure du possible des observations) de très haute résolution. L'objectif est d'obtenir une vision intégrée des interactions entre des phénomènes à très fine échelle et des circulations océaniques

à moyenne et à grande échelle. La deuxième phase du LMI ICEMASA poursuit une action en collaboration avec nos partenaires sud-africains et mozambicains axée sur les liens entre les variations de la dynamique océanique et les écosystèmes marins sur les pourtours de l'Afrique australe.

12.1 Participation au travail sur CROCO

Dans un futur proche, l'objectif méthodologique est de participer à la consolidation du modèle régional CROCO. Issu d'un effort de coopération de la communauté de modélisation numérique française dans le cadre du projet ANR COMODO, CROCO vise à intégrer les développements des équipes françaises de modélisation côtières et régionales. CROCO se base sur le cœur numérique de ROMS_AGRIF. Des développements se font au niveau de la dynamique côtière, en incluant les écoulements littoraux, le transport sédimentaire et la morphodynamique ; le couplage avec les vagues et les interactions vagues-courants ; le couplage avec l'atmosphère ; les couplages avec les modèles de biogéochimie et d'écosystèmes marins. Au niveau du cœur numérique, des développements se font au niveau de la résolution des équations sous des formes non-hydrostatiques et non-Boussinesq. En effet, les simulations numériques arrivent désormais à un niveau de résolution tel que nous sommes proches de la limite de validité de l'approximation non-hydrostatique. Des travaux sur les gestions des entrées sorties et des préparations / analyses de configurations devront faciliter l'usage de simulations numériques à haute résolution pour nos partenaires du sud.

12.2 Puit d'énergie à l'ouest de l'océan Indien

Mon travail scientifique futur s'inscrira dans les programmes de l'équipe "Interactions d'Échelles" et du LMI ICEMASA et vise à mieux comprendre les processus à fine échelle sur les pourtours de l'Afrique australe et leurs effets sur la circulation à grande échelle et les écosystèmes marins. Cette activité sera structurée dans le cadre du projet GENCI WOES (Western Indian Ocean Energy Sinks). L'objectif de ce projet est de comprendre et de modéliser les puits d'énergie tourbillonnaire au sud-ouest de l'océan Indien. L'accent se portera sur les processus dynamiques à fine échelle autour du système de courant de bord ouest du gyre subtropical de l'océan Indien.

Nous avons vu précédemment que le pourtour du continent Africain héberge un courant de bord Ouest majeur (le courant des Aiguilles) qui rétroflète à proximité d'un des systèmes d'upwelling côtier de bord Est le plus productif au monde (le courant du Benguela). En amont du courant des Aiguilles, dans le canal du Mozambique, le transport méridien est essentiellement tourbillonnaire (Halo *et al.*, 2014a). Les anneaux du Mozambique (Halo *et al.*, 2014a), tourbillons parmi les plus énergétiques de la planète, structurent directement les écosystèmes marins de la région (Ternon *et al.*, 2014b; José *et al.*, 2014). Ils perturbent en aval le comportement du courant des Aiguilles, qui peut alors générer de larges méandres (les Natal Pulses) (Rouault and Penven, 2011). Les anneaux des Aiguilles, grands tourbillons issus de la rétroflexion du courant des Aiguilles, ont un rôle reconnu pour la cellule de retournement méridienne de l'Atlantique (via ce qu'on appelle le déversement du courant des Aiguilles). Les effets du courant des Aiguilles sur les cycles climatiques ont été

démontrés (Beal *et al.*, 2011). Des changements significatifs dans le gyre subtropical de l'Océan Indien, le transport du courant des Aiguilles et du déversement des Aiguilles ont été diagnostiqués (Backeberg *et al.*, 2012b; Rouault *et al.*, 2009, 2010b; ?,a) ainsi que les contrôles de ces processus (Durgadoo *et al.*, 2013; Loveday *et al.*, 2014).

La turbulence océanique dans la région est telle qu'il est difficile de modéliser de manière satisfaisante le courant des Aiguilles (Penven *et al.*, 2010). Ainsi, les simulations réalistes du système courant des Aiguilles présentent souvent un comportement anormal : une position de la rétroflexion plus à l'est (en amont) et des anneaux des Aiguilles suivant une ligne droite en Atlantique Sud (Lutjeharms and Webb, 1995; Barnier *et al.*, 2006; Maltrud and McClean, 2005; Sasaki *et al.*, 2005; Backeberg *et al.*, 2009; Wallcraft *et al.*, 2002; Thoppil *et al.*, 2011). À l'exception des modèles régionaux où des traitements spécifiques ont été appliqués (Biaśtoch and Krauß, 1999; Biaśtoch *et al.*, 2008; Backeberg *et al.*, 2009; Penven *et al.*, 2006b), une grande majorité des modèles réalistes ont rencontré un biais équivalent dans leur représentation de la dynamique de la rétroflexion du courant des Aiguilles. C'est un problème qui semble ne pas se corriger avec la résolution (Thoppil *et al.*, 2011).

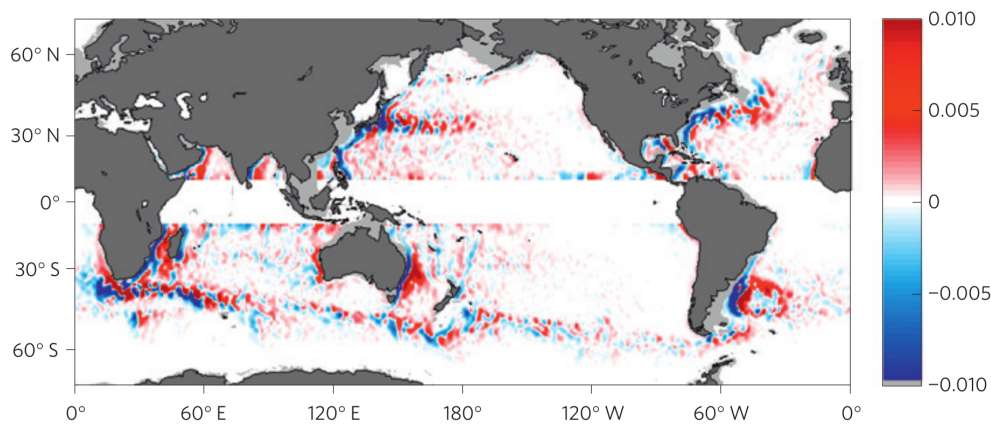


FIGURE 49 – Sources (rouge) et les puits (bleu) de l'énergie cinétique turbulente [W m^{-2}] du premier mode barocline estimées à partir de données altimétriques. Figure tirée de l'article rédigé par Zhai *et al.* (2010).

Ce biais a pu être réduit (ou même supprimé) en améliorant la précision numérique (Backeberg *et al.*, 2009) ou les propriétés de conservation (Barnier *et al.*, 2006) des schémas numériques ou en travaillant la topographie et en ajoutant une paramétrisation horizontale de la viscosité (Penven *et al.*, 2006b). Néanmoins, il n'existe pas d'explication satisfaisante pour ce biais et il n'existe pas de méthode systématique pour le contenir. Un puits d'énergie tourbillonnaire semble manquer à la côte dans le Sud-ouest de l'Océan Indien. Les tourbillons océaniques se propageant en majorité vers l'Ouest (Chelton *et al.*, 2007), les bords ouest sont des zones privilégiées pour leur dissipation (Zhai *et al.*, 2010) (Figure 49). La figure (49) montre bien la dissipation le long des côtes Est de l'Afrique, mais une quantification précise ainsi qu'une classification des processus en jeu reste à être réalisée. Les processus assurant cette perte d'énergie sont en effet mal connus. Par exemple, les anneaux du canal du Mozambique subissent une dissipation importante le long des côtes Africaines. Ce processus est mal représenté dans les modèles où ces structures gardent leur cohérence dans le courant des Aiguilles et perturbent la rétroflexion plusieurs milliers de kilomètres en aval. La partie amont du courant des Aiguilles s'ajuste sur des pentes abruptes. Ceci peut affecter le cisaillement du courant

et la propagation des ondes côtières. Ces phénomènes peuvent affecter la dissipation des structures cohérentes.

Les anneaux du Canal du Mozambique sont des tourbillons très spécifiques s'étendant sur toute la colonne d'eau et où les vitesses peuvent atteindre 2 m s^{-1} . Ils peuvent ainsi développer des instabilités qui affectent leur évolution. Nous appréhenderons ces propriétés dans un contexte idéalisé.

Un autre processus possible affectant la dissipation des tourbillons est l'effet de la rétroaction des courants océaniques de surface sur la tension de vent (Gaube *et al.*, 2015; Renault *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2016). Au niveau d'un tourbillon, ce mécanisme résulte en un travail de vent négatif net, assurant une dissipation significative (Renault *et al.*, 2016). Les effets de cette rétroaction seront testés dans le cadre d'expériences forcées et dans le cadre d'expériences couplées océan - atmosphère.

Pour résumer, nous tâcherons de cerner les processus assurant la dissipation des grandes structures cohérentes dans le sud-ouest de l'océan Indien dans une série d'expériences numériques côtières et régionales du courant des Aiguilles au sens large et de ses interactions à fine échelle avec la topographie. Ces processus affectant la stabilité de la réflexion du courant des Aiguilles, ils ont une influence sur la structure de la branche retour de la circulation thermohaline à grande échelle (Beal *et al.*, 2011).

Nous avons montré que les anneaux du Canal du Mozambique et les structures tourbillonnaires en général affectaient la circulation océanique et la production sur les bancs adjacents (comme le banc de Sofala et la baie de Delagoa le long des côtes mozambicaines). Dans le cadre des simulations à haute résolution résolvant le puits d'énergie dans l'océan Indien Sud-Ouest, l'accent se portera aussi sur les effets des fines structures sur la dynamique côtière, les upwellings côtiers et le transport des ressources halieutiques au travers des plateaux.

Références

- Albert, A., Echevin, V., Lévy, M., and Aumont, O. (2010). Impact of nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary productivity in the Peru upwelling system. *J. Geophys. Res.*, **115**, C12033.
- Auclair, F., Estournel, C., Floor, J. W., Herrmann, M., Nguyen, C., and Marsaleix, P. (2011). A non-hydrostatic algorithm for free-surface ocean modelling. *Ocean Model.*, **36**, 49–70.
- Aumont, O. and Bopp, L. (2006). Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **20**, GB2017.
- Backeberg, B. C., Bertino, L., and Johannessen, J. A. (2009). Evaluating two numerical advection schemes in HYCOM for eddy-resolving modelling of the Agulhas Current. *Ocean Sci.*, **5**, 173–190.
- Backeberg, B. C., **Penven, P.**, and Rouault, M. (2012a). Accelerated eddies moving around Africa’s southern tip. *SANCOR Newsletter*, **200**, 1–3.
- Backeberg, B. C., **Penven, P.**, and Rouault, M. (2012b). Impact of intensified Indian Ocean winds on the mesoscale variability of the Agulhas system. *Nature Climate Change*, **2**, 608–612.
- Bakun, A. (1998). Ocean triads and radical interdecadal stock variability : bane and boon for fisheries management. In T. Pitcher, P. J. B. Hart, and D. Pauly, editors, *Reinventing fisheries management*, pages 331–358. Chapman and Hall, London, UK.
- Bard, E. and Rickaby, R. E. M. (2009). Migration of the subtropical front as a modulator of glacial climate. *Nature*, **460**, 380–383.
- Barnier, B., Madec, G., Penduff, T., Molines, J.-M., Treguier, A.-M., Le Sommer, J., Beckmann, A., Biastoch, A., Böning, C., Dengg, J., Derval, C., Durand, E., Gulev, S., Remy, E., Talandier, C., Theetten, S., Maltrud, M., McClean, J., and Cuevas, B. D. (2006). Impact of partial steps and momentum advection schemes in a global ocean circulation model at eddy-permitting resolution. *Ocean Dyn.*, **56**, 543–567.
- Beal, L. M., Chereskin, T. K., Lenn, Y. D., and Elipot, S. (2006). The sources and mixing characteristics of the Agulhas Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **36**, 2060–2074.
- Beal, L. M., de Ruijter, W. P. M., Biastoch, A., Zahn, R., and the members of SCOR/WCRP/IAPSO Working Group 136 (2011). On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. *Nature*, **472**, 429–436.
- Beal, L. M., Elipot, S., Houk, A., and Leber, G. M. (2015). Capturing the transport variability of a western boundary jet : Results from the Agulhas Current Time-Series Experiment (ACT). *J. Phys. Oceanogr.*, **45**, 1302–1324.
- Biastoch, A. and Krauß, W. (1999). The role of mesoscale eddies in the source regions of the Agulhas Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 2303–2317.
- Biastoch, A., Böning, C. W., and Lutjeharms, J. R. E. (2008). Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in atlantic overturning circulation. *Nature*, **456**, 489–492.

- Biastoch, A., Böning, C. W., Schwarzkopf, F. U., and Lutjeharms, J. R. E. (2009). Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature*, **462**, 495–498.
- Blanke, B., Roy, C., **Penven, P.**, Speich, S., McWilliams, J., and Nelson, G. (2002a). Assessing wind contribution to the Southern Benguela interannual dynamics. *GLOBEC international Newsletter*, **8**, 15–18.
- Blanke, B., Roy, C., **Penven, P.**, Speich, S., McWilliams, J., and Nelson, G. (2002b). Linking wind and upwelling interannual variability in a regional model of the southern Benguela. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2188–2191.
- Blanke, B., **Penven, P.**, Roy, C., Chang, N., and Kokoszka, F. (2009). Ocean variability over the Agulhas Bank and its dynamical connection with the southern Benguela upwelling system. *J. Geophys. Res.*, **114**, C12028.
- Blayo, E. and Debreu, L. (2005). Revisiting open boundary conditions from the point of view of characteristic variables. *Ocean Model.*, **9**, 231–252.
- Borges, R., Carmona, M., Costa, B., and Don, W. S. (2008). An improved weighted essentially non-oscillatory scheme for hyperbolic conservation laws. *J. Comp. Phys.*, **227**, 3191–3211.
- Bryden, H. L., Beal, L. M., and Duncan, L. M. (2005). Structure and transport of the Agulhas Current and its temporal variability. *J. Oceanogr.*, **61**, 479–492.
- Burls, N. J. (2010). *The role of ocean dynamics within tropical Atlantic climate variability*. Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Burls, N. J., Reason, C. J. C., **Penven, P.**, and Philander, S. G. (2011). Similarities between the Tropical Atlantic seasonal cycle and ENSO : an energetics perspective. *J. Geophys. Res.*, **116**, C11010.
- Burls, N. J., Reason, C. J. C., **Penven, P.**, and Philander, S. G. (2012). Energetics of the Tropical Atlantic zonal mode. *J. Clim.*, **25**, 7442–7466.
- Capet, X. J., Marchesiello, P., and McWilliams, J. C. (2004). Upwelling response to coastal wind profiles. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L13311.
- Capet, X. J., Colas, F., **Penven, P.**, Marchesiello, P., and McWilliams, J. C. (2008). Eddies in eastern boundary subtropical upwelling systems. In M. W. Hecht and H. H. Hasumi, editors, *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, volume 177. Washington, D. C.
- Chaigneau, A., Gizolme, A., and Grados, C. (2008). Mesoscale eddies off Peru in altimeter records : Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Prog. Oceanogr.*, **79**, 106–119.
- Chan, F., Barth, J. A., Lubchenco, J., Kirincich, A., Weeks, H., Peterson, W. T., and Menge, B. A. (2008). Emergence of anoxia in the california current large marine ecosystem. *Science*, **319**, 920.

- Chang, N. (2009). *Numerical Ocean model study of the Agulhas Bank and Cool Ridge*. Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M., and Szoek, R. A. (2007). Global observations of large oceanic eddies. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L15606.
- Chevane, C. M., **Penven, P.**, Nehama, F. P. J., and Reason, C. J. C. (2016). Modelling the tides and their impacts on the vertical stratification over the Sofala Bank, Mozambique. *Afr. J. mar. Sci.*, **38**, 465–479.
- Chever, F., Bucciarelli, E., Sarthou, G., Speich, S., Arhan, M., **Penven, P.**, and Tagliabue, A. (2010). Iron physical speciation in the atlantic sector of the Southern Ocean, along a transect from the subtropical domain to the Weddell Sea Gyre. *J. Geophys. Res.* in revision.
- Colas, F., McWilliams, J. C., Capet, X., and Kurian, J. (2011). Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system. *Clim. Dyn.*, **39**, 509–529.
- Cossa, O., Pous, S., **Penven, P.**, Capet, X., and Reason, C. J. C. (2016). Modelled cyclonic eddies in the Delagoa Bight region. *Cont. Shelf Res.* sous presse.
- Couvelard, X., Marchesiello, P., Gourdeau, L., and Lefèvre, J. (2008). Barotropic zonal jets induced by islands in the southwest Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **38**, 2185–2204.
- Cronin, M. F., Bond, N., Booth, J., Ichikawa, H., Joyce, T. M., Kelly, K., Kubota, M., Qiu, B., Reason, C., Rouault, M., Sabine, C., Saino, T., Small, J., Suga, T., Talley, L. D., A. Thompson, L., and Welle, R. A. (2010). Monitoring ocean-atmosphere interactions in western boundary current extensions. In *Proceedings of the "OceanObs'09 : Sustained Ocean Observations and Information for Society", ESA Publication, WPP-306 . OceanObs'09, Venice, Italy*.
- de Ruijter, W. P. M., van Leeuwen, P. J., and Lutjeharms, J. R. E. (1999a). Generation and evolution of Natal pulses : Solitary meanders in the Agulhas current. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 3043–3055.
- de Ruijter, W. P. M., Biastoch, A., Drijfhout, S. S., Lutjeharms, J. R. E., Matano, R. P., Pichevin, T., van Leeuwen, P. J., and Weijer, W. (1999b). Indian-Atlantic interocean exchange : Dynamics, estimation and impact. *J. Geophys. Res.*, **104**, 20885–20910.
- de Ruijter, W. P. M., Ridderinkhof, H., Lutjeharms, J. R. E., Schouten, M. W., and Veth, C. (2002). Observations of the flow in the Mozambique Channel. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1401–1403.
- de Ruijter, W. P. M., van Aken, H. M., Beier, E. J., Lutjeharms, J. R. E., P. Matano, R., and Schouten, M. W. (2003). Eddies and dipoles around south Madagascar : Formation, pathways and large-scale impact. *Deep Sea Res., Part I*, **51**, 383–400.
- de Ruijter, W. P. M., van Aken, H. M., Beier, E. J., Lutjeharms, J. R. E., Matano, R. P., and Schouten, M. W. (2004). Eddies and dipoles around South Madagascar : formation, pathways and large-scale impact. *Deep Sea Res., Part I*, **51**, 383–400.

- Debreu, L., Marchesiello, P., **Penven, P.**, and Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models : algorithms, implementation and validation. *Ocean Model.*, **49-50**, 1–21.
- Dencausse, G., Arhan, M., and Speich, S. (2010a). Routes of Agulhas rings in the southeastern Cape Basin. *Deep Sea Res., Part I*, **57**, 1406–1421.
- Dencausse, G., Arhan, M., and Speich, S. (2010b). Spatio-temporal characteristics of the Agulhas Current retroflection. *Deep Sea Res., Part I*, **57**, 1392–1405.
- Djakouré, S. (2015). *Analyse numérique de la circulation océanique de la région Nord du Golfe de Guinée*. Ph.D. thesis, Université d’Abomey Calavi, Bénin.
- Djakouré, S., **Penven, P.**, Bourlès, B., Veitch, J., and Koné, V. (2014). Coastally trapped eddies in the north of the Gulf of Guinea. *J. Geophys. Res.*, **119**, 2014JC010243.
- Djakouré, S., **Penven, P.**, Bourlès, B., Koné, V., and Veitch-Jackson, J. (2017). Respective roles of the Guinea Current and local winds on the coastal upwelling in the northern Gulf of Guinea. *J. Phys. Oceanogr.* in revision.
- Donguy, J. and Piton, B. (1991). The Mozambique channel revisited. *Oceanolo. Acta*, **14**, 549–558.
- Dufois, F., **Penven, P.**, Whittle, C., and Veitch, J. (2012). On the warm nearshore bias in Pathfinder monthly SST products over eastern boundary upwelling systems. *Ocean Model.*, **47**, 113–118.
- Durgadoo, J., Loveday, B., Reason, C., **Penven, P.**, and Biastoch, A. (2013). Agulhas leakage predominantly responds to the Southern Hemisphere Westerlies. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 2113–2131.
- Échevin, V., Marchesiello, P., and **Penven, P.** (2005). Modélisation des régions d’upwelling de bord est à l’aide du système Mercator. *La lettre trimestrielle Mercator Océan*, **18**, 18–22.
- Échevin, V., Colas, F., Chaigneau, A., and **Penven, P.** (2011). Sensitivity of the northern Humboldt current system nearshore modeled circulation to initial and boundary conditions. *J. Geophys. Res.*, **116**, C07002.
- Egbert, G. and Erofeeva, S. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atm. Ocean. Tech.*, **19**, 183–204.
- Fratantoni, D. M. (2001). North Atlantic surface circulation during the 1990’s observed with satellite-tracked drifters,. *J. Geophys. Res.*, **106**, 22,067–22,093.
- Ganachaud, A. and Wunsch, C. (2000). Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data. *Nature*, **408**, 453–457.
- Gaube, P., Chelton, D. B., Samelson, R. M., Schlax, M. G., and O’Neill, L. W. (2015). Satellite observations of mesoscale eddy-induced ekman pumping. *J. Phys. Oceanogr.*, **45**, 104–132.

- Giraud, X. and Paul, A. (2010). Interpretation of the paleo-rimary production record in the NW African coastal upwelling system as potentially biased by sea level change. *Paleoceanog.*, **25**, 4224.
- Glickman, T. S. (2000). *Glossary of Meteorology, 2nd edn.* Amer. Meteor. Soc.
- Gruber, N., Frenzel, H., Doney, S. C., Marchesiello, P., McWilliams, J. C., Moisan, J. R., Oram, J., G.-K., P., and Stolzenbach, K. D. (2006). Simulation of phytoplankton ecosystem dynamics in the California Current System. *Deep Sea Res., Part I*, page accepted.
- Gründlingh, M. L. (1995). Tracking eddies in the southeast Atlantic and southwest Indian Oceans with TOPEX/Poseidon. *J. Geophys. Res.*, **100**, 24,977–24,986.
- Gutknecht, E., Dadou, I., Vu, B. L., Cambon, G., Sudre, J., Garçon, V., Machu, E., Rixen, T., Kock, A., Flohr, A., A., P., and Lavik, G. (2013). Coupled physical/biogeochemical modeling including O₂-dependent processes in the eastern boundary upwelling systems : application in the Benguela. *Biogeosciences*, **10**, 3559–3591.
- Halo, I. (2012). *The Mozambique Channel eddies : Characteristics and Mechanisms of formation.* Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Halo, I., Backeberg, B., Brito, A., Collins, C., Cossa, O., Gemo, F., Jose, Y., Loveday, B., Malauene, B., Marsac, F., Maueua, C., Maury, O., Mavume, A., Nehama, F., **Penven, P.**, Pous, S., Reason, C., Roberts, M., and Shillington, F. (2013). JEAI-MOCAs : A multi-institutional initiative to build marine research capacity in Mozambique. *S. Afr. J. Sci.*, **109**, 1–2.
- Halo, I., Backeberg, B., **Penven, P.**, Ansorge, I., Reason, C., and Ullgren, J. (2014a). Eddy properties in the Mozambique Channel : A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. *Deep Sea Res., Part II*, **100**, 38–53.
- Halo, I., **Penven, P.**, Backeberg, B., Ansorge, I., Shillington, F., and Roman, R. (2014b). Mesoscale eddy variability in the southern extension of the East Madagascar Current : Seasonal cycle, energy conversion terms, and eddy mean properties. *J. Geophys. Res.*, **119**, 2014JC009820.
- Harlander, U., Ridderinkhof, H., Schouten, M. W., and de Ruijter, W. P. M. (2009). Long-term observations of transport, eddies, and Rossby waves in the Mozambique channel. *Geophys. Res. Lett.*, **114**, C02003.
- Huggett, J., Fréon, P., Mullon, C., and **Penven, P.** (2003). Modelling the transport success of anchovy (*engraulis encrasicolus*) eggs and larvae in the southern Benguela : the effect of spatio-temporal spawning patterns. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **250**, 247–262.
- José, Y. S. (2013). *Mesoscale structuring of the pelagic ecosystem in the Mozambique Channel : a modelling approach.* Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.
- José, Y. S., Aumont, O., Machu, E., **Penven, P.**, Moloney, C. L., and Maury, O. (2014). Influence of mesoscale eddies on biological production in the Mozambique Channel : Several contrasted examples from a coupled ocean- biogeochemistry model. *Deep Sea Res., Part II*, **100**, 79–93.

- José, Y. S., **Penven, P.**, Aumont, O., Machu, E., Moloney, C. L., Shillington, F., and Maury, O. (2016). Suppressing and enhancing effects of mesoscale dynamics on biological production in the Mozambique Channel. *J. Mar. Sys.*, **158**, 129–139.
- Karnauskas, K. B. and Cohen, A. L. (2012). Equatorial refuge amid tropical warming. *Nature Climate Change*, **2**, 530–534.
- Koné, V., Machu, E., **Penven, P.**, Andersen, V., and Fréon, P. (2004). Modelling the annual and seasonal distribution of plankton in the Southern Benguela upwelling system. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 6, page 07253.
- Koné, V., Machu, E., **Penven, P.**, Andersen, V., Garçon, V., Demarcq, H., and Fréon, P. (2005). Modelling the primary and secondary productions of the Southern Benguela upwelling system : a comparative study through two biogeochemical models. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **19**, GB4021.
- Koné, V., Aumont, O., Lévy, M., and Resplandy, L. (2013). Physical and biogeochemical controls of the phytoplankton seasonal cycle in the Indian Ocean : A modeling study. In J. D. Wiggert, R. R. Hood, S. Wajih, A. Naqvi, K. H. Brink, and S. L. Smith, editors, *Indian Ocean Biogeochemical Processes and Ecological Variability*, pages 147–166. American Geophysical Union, Washington DC, USA.
- Koné, V., Lett, C., **Penven, P.**, Bourlès, B., and Djakouré, S. (2017). A biophysical model of *Sardinella aurita* early life history in the northern Gulf of Guinea. *Prog. Oceanogr.*, **151**, 83–96.
- Large, W. G., McWilliams, J. C., and Doney, S. C. (1994). Oceanic vertical mixing : a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, **32**, 363–403.
- Le Bars, D., De Ruijter, W. P. M., and Dijkstra, H. A. (2012). A new regime of the Agulhas Current retroflexion : Turbulent choking of Indian Atlantic leakage. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 1158–1172.
- Lemarié, F., Kurian, J., Shchepetkin, A. F., Molemaker, M. J., Colas, F., and McWilliams, J. C. (2012a). Are there inescapable issues prohibiting the use of terrain-following coordinates in climate models? *Ocean Model.*, **42**, 57–79.
- Lemarié, F., Debreu, L., Shchepetkin, A., and McWilliams, J. C. (2012b). On the stability and accuracy of the harmonic and biharmonic isoneutral mixing operators in ocean models. *Ocean Model.*, **52-53**, 9–35.
- Lett, C., **Penven, P.**, Ayón, P., and Fréon, P. (2007). Enrichment, concentration and retention processes in relation to anchovy (*Engraulis ringens*) eggs and larvae distributions in the northern Humboldt upwelling ecosystem. *J. Mar. Sys.*, **64**, 189–200.
- Lett, C., Verley, P., Mullon, C., Parada, C., Brochier, T., **Penven, P.**, and Blanke, B. (2008). Ichthyop : a Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Env. Model. Soft.*, **23**, 1210–1214.
- Liu, X.-D., Osher, S., and Chan, T. (1994). Weighted essentially non-oscillatory schemes. *J. Comp. Phys.*, **115**, 200–212.

- Loveday, B. (2014). *Modelling wind-driven inter-ocean exchange in the greater Agulhas with the Regional Ocean Modelling System*. Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Loveday, B., Durgadoo, J., Reason, C., Biastoch, A., and **Penven, P.** (2014). Decoupling of the Agulhas leakage from the Agulhas current. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 1776–1797.
- Loveday, B. R., **Penven, P.**, and Reason, C. J. C. (2015). Southern Annular Mode and westerly-wind driven changes in Indian-Atlantic exchange mechanisms. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 2015GL064256.
- Lutjeharms, J., **Penven, P.**, and Roy, C. (2003). Modelling the shear edge eddies of the southern Agulhas Current. *Cont. Shelf Res.*, **23**, 1099–1115.
- Lutjeharms, J. R. E. (2006a). *The Agulhas Current*. Springer-Verlag.
- Lutjeharms, J. R. E. (2006b). Three decades of research on the greater Agulhas Current. *Ocean Science Discussions*, **3**, 939–995.
- Lutjeharms, J. R. E. and Roberts, H. R. (1988). The Natal Pulse ; an extreme transient on the Agulhas Current. *J. Geophys. Res.*, **93**, 631–645.
- Lutjeharms, J. R. E. and van Ballegooyen, R. C. (1988). The retroflection of the Agulhas Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **18**, 1570–1583.
- Lutjeharms, J. R. E. and Webb, D. J. (1995). Modelling the Agulhas current system with FRAM (fine resolution antarctic model). *Deep Sea Res., Part I*, **42**, 523–551.
- Lutjeharms, J. R. E., Biastoch, A., Van der Werf, P. M., Ridderinkhof, H., and De Ruijter, W. P. M. (2012). On the discontinuous nature of the Mozambique current. *S. Afr. J. Sci.*, **108**, 1–5.
- Machu, E., Ettahiri, O., Kifani, S., Benazzouz, A., Makaoui, A., and Demarcq, H. (2009). Environmental control of the recruitment of sardines (*sardina pilchardus*) over the western Saharan shelf between 1995 and 2002 : a coupled physical/biogeochemical modelling experiment. *Fish. Oceanogr.*, **18**, 287–300.
- Malauene, B. S. (2014). *Environmental influences on banana shrimps of the Sofala Bank, Mozambique Channel*. Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Maltrud, M. E. and McClean, J. L. (2005). An eddy resolving 1/10° ocean simulation. *Ocean Model.*, **8**, 31–34.
- Manyilizu, M., Dufois, F., **Penven, P.**, and Reason, C. (2014). Interannual variability in the tropical western Indian Ocean. *Afr. J. mar. Sci.*, **36**, 233–252.
- Manyilizu, M., **Penven, P.**, and Reason, C. (2016). Annual cycle of the upper-ocean dynamics and their influences on ocean properties in the tropical western Indian Ocean. *Afr. J. mar. Sci.*, **38**, 81–99.
- Manyilizu, M. C. (2013). *Simulation of Variability in the Tropical Western Indian Ocean*. Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.

- Marchesiello, P., Herbette, S., Nykjaer, L., and Roy, C. (2004). Eddy-driven dispersion processes in the Canary Current upwelling system : comparison with the California system. *Globec int. newsletter*, **10**, 5–7.
- Marchesiello, P., Lefèvre, J., **Penven, P.**, Lemarié, F., Debreu, L., Douillet, P., Vega, A., Derex, P., Echevin, V., and Dewitte, B. (2008). Keys to affordable regional marine forecast systems. *La lettre trimestrielle Mercator Océan*, **30**, 38–48.
- Marchesiello, P., Debreu, L., and Couvelard, X. (2009). Spurious diapycnal mixing in terrain-following coordinate models : the problem and a solution. *Ocean Model.*, **26**, 156–169.
- Mason, E., Molemaker, J., Shchepetkin, A. F., Colas, F., McWilliams, J. C., and Sangrà, P. (2010). Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Model.*, **35**, 1–15.
- Mason, E., Colas, F., Molemaker, J., Shchepetkin, A. F., Troupin, C., McWilliams, J. C., and Sangrà, P. (2011). Seasonal variability of the Canary Current : A numerical study. *J. Geophys. Res.*, **116**, C06001.
- Maueua Chevane, C. (2013). *General characteristics of modelled tides on the Sofala Bank, Mozambique*. Master's thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Maximenko, N. and Niiler, P. (2006). Mean surface circulation of the global ocean inferred from satellite altimeter and drifter data. In *Proceeding of the Symposium on 15 years of Progress in Radar Altimetry*, Eur. Space Agency Spec. Publ., page 614.
- McGillicuddy, D. J. and Robinson, A. R. (1997). Eddy-induced nutrient supply and new production in the Sargasso sea. *Deep Sea Res., Part I*, **44**, 1427–1450.
- McWilliams, J. C., Restrepo, J. M., and Lane, E. M. (2004). An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters. *J. Fluid Mech.*, **511**, 135–178.
- Ménaché, M. (1961). Découverte d'un phénomène de remontée d'eaux profondes au sud du canal du Mozambique. *Mémoires de l'Institut scientifique de Madagascar, série F : océanographie*, **4**, 167–173.
- Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., and Wang, W. (2004). The weather research and forecast model : Software architecture and performance. In *proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology*, Reading, U.K. George Mozdzynski.
- Mullon, C., Cury, P., and **Penven, P.** (2002a). Evolutionary individual-based model for the recruitment of the anchovy in the southern Benguela. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **59**, 910–922.
- Mullon, C., Parada, C., Cury, P., Huggett, J., Fréon, P., Van der Lingen, C. D., **Penven, P.**, Moloney, C., and Richardson, A. (2002b). Individual based modelling (IBM) of the early stages of anchovy in the Southern Benguela System. In C. D. Van der Lingen, C. Roy, P. Fréon, M. Barange, L. Castro, M. Gutierrez, L. Nykjaer, and F. Shillington, editors, *GLOBEC Report : Report of a GLOBEC-SPACC/IDYLE/ENVIFISH*

- workshop on spatial Approaches to the Dynamics of Coastal Pelagic Resources and their Environment in Upwelling Areas*, volume 16, pages 87–90.
- Ou, H. W. and de Ruijter, W. P. M. (1986). Separation of an inertial boundary current from a curved coastline. *J. Phys. Oceanogr.*, **16**, 280–289.
- Parada, C., Van der Lingen, C. D., Mullon, C., and **Penven, P.** (2003). Modelling the effect of buoyancy on the transport of anchovy (*engraulis capensis*) eggs from spawning to nursery grounds in the southern Benguela : an IBM approach. *Fish. Oceanogr.*, **12**, 170–184.
- Peeters, F. J. C., Acheson, R., Brummer, G.-J. A., de Ruijter, W. P. M., Ganssen, G. G., Schneider, R. R., Ufkes, E., and Kroon, D. (2004). Vigorous exchange between indian and atlantic ocean at the end of the last five glacial periods. *Nature*, **400**, 661–665.
- Penven, P.** (2000). *A numerical study of the Southern Benguela circulation with an application to fish recruitment*. Ph.D. thesis, Université de Bretagne Occidentale.
- Penven, P.**, Roy, C., Colin de Verdière, A., and Largier, J. (2000). Simulation and quantification of a coastal jet retention process using a barotropic model. *Oceanolo. Acta*, **23**, 615–634.
- Penven, P.**, Lutjeharms, J. R. E., Marchesiello, P., Roy, C., and Weeks, S. J. (2001a). Generation of cyclonic eddies by the Agulhas Current in the lee of the Agulhas Bank. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1055–1058.
- Penven, P.**, Roy, C., Lutjeharms, J. R. E., Colin de Verdière, A., Johnson, A., Shillington, F., Fréon, P., and Brundrit, G. (2001b). A regional hydrodynamic model of the Southern Benguela. *S. Afr. J. Sci.*, **97**, 472–476.
- Penven, P.**, McWilliams, J. C., and Marchesiello, P. (2002). Coastal upwelling response to atmospheric forcing along the Pacific coast of the United States. In S. Salinas, H.-J. Urban, and W. E. Arntz, editors, *Extended abstracts of the El Niño symposium and workshop, Investigaciones Marinas*, volume 30, pages 99–101.
- Penven, P.**, Pasapera, J., Tam, J., and Roy, C. (2003). Modeling the Peru Upwelling System seasonal dynamics mean circulation, seasonal cycle and mesoscale dynamics. *GLOBEC international Newsletter*, **9**, 23–25.
- Penven, P.**, Échevin, V., Pasapera, J., Colas, F., and Tam, J. (2005). Average circulation, seasonal cycle and mesoscale dynamics of the Peru Current System : a modeling approach. *J. Geophys. Res.*, **110**, C10021.
- Penven, P.**, Debreu, L., Marchesiello, P., and McWilliams, J. C. (2006a). Application of the ROMS embedding procedure for the central California Upwelling System. *Ocean Model.*, **12**, 157–187.
- Penven, P.**, Lutjeharms, J. R. E., and Florenchie, P. (2006b). Madagascar : a pacemaker for the Agulhas Current system ? *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17609.
- Penven, P.**, Chang, N., and Shillington, F. (2006c). Modelling the Agulhas Current using SAfE (Southern Africa Experiment). In *Proc. EGU General Assembly, Vienna, Austria*.

- Penven, P.**, Marchesiello, P., Debreu, L., and Lefèvre, J. (2008). Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Env. Model. Soft.*, **23**, 660–662.
- Penven, P.**, Herbette, S., and Rouault, M. (2010). Ocean modelling in the Agulhas current system. In *Proceedings of the Joint Nansen-Tutu Scientific Opening Symposium and OceansAfrica Meeting, Nansen-Tutu Centre for Marine Environmental Research*, pages 17–21, Cape Town, South Africa.
- Penven, P.**, Halo, I., Pous, S., and Marie, L. (2014). Cyclogeostrophic balance in the mozambique channel. *J. Geophys. Res.*, **119**, 1054–1067.
- Piton, B., Pointeau, J., and Ngoumbi, J. (1981). Atlas hydrologique du canal du Mozambique (océan Indien). Technical report, Travaux et documents de l’O.R.S.T.O.M., Paris, France.
- Pous, S., Lazure, P., André, G., Dumas, F., Halo, I., and **Penven, P.** (2014). Circulation around La Réunion and Mauritius islands in the South-western Indian Ocean : a modeling perspective. *J. Geophys. Res.*, **119**, 1957–1976.
- Quartly, G. D. and Srokosz, M. A. (2003). A visible record of eddies in the southern Mozambique Channel. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS ’03. Proceedings. IEEE International*, volume 2, pages 957–959.
- Renault, L., Molemaker, J., McWilliams, J. C., Shchepetkin, A. F., Lemarié, F., Chelton, D., Illig, S., and Hall, A. (2016). Modulation of wind-work by oceanic current interaction with the atmosphere. *J. Phys. Oceanogr.* in press.
- Richardson, P. L. (2007). Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters. *Deep Sea Res., Part I*, **54**, 1361–1389.
- Ridderinkhof, H. and de Ruijter, W. P. M. (2003). Moored current observations in the Mozambique Channel. *Deep Sea Res., Part II*, **50**, 1933–1955.
- Rio, M.-H. and Hernandez, F. (2004). A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model. *J. Geophys. Res.*, **109**, C12032.
- Rio, M.-H., Mulet, S., and Picot, N. (2014). Beyond GOCE for the ocean circulation estimate : Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 8918–8925.
- Risien, C. M. and Chelton, D. B. (2008). A global climatology of surface wind and wind stress fields from eight years of QuikSCAT scatterometer data. *J. Phys. Oceanogr.*, **38**, 2379–2413.
- Rouault, M. and **Penven, P.** (2011). New perspectives on Natal Pulses from satellite observations. *J. Geophys. Res.*, **116**, C07013.
- Rouault, M., **Penven, P.**, and Pohl, B. (2009). Warming in the Agulhas Current system since the 1980’s. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L12602.
- Rouault, M., Pohl, B., and **Penven, P.** (2010a). Coastal oceanic climate change and variability from 1982 to 2009 around South Africa. *Afr. J. mar. Sci.*, **32**, 237–246.

- Rouault, M., **Penven, P.**, and Pohl, B. (2010b). On the recent warming of the Agulhas current. In *Observations on Environmental Change in South Africa*, pages 268–270. SAEON, South Africa.
- Roy, C., **Penven, P.**, Johnson, A., Lutjeharms, J., Shillington, F., Bergman, S., and de Verdière, A. C. (2002). A regional hydrodynamic model of the southern benguela upwelling. In V. C., C. Roy, P. Fréon, M. Barange, L. Castro, M. Gutierrez, L. Nykjaer, and F. Shillington, editors, *GLOBEC Report : Report of a GLOBEC-SPACC/IDYLE/ENVIFISH workshop on spatial Approaches to the Dynamics of Coastal Pelagic Resources and their Environment in Upwelling Areas*, volume 16, pages 5–7.
- Roy, C., **Penven, P.**, and Van der Lingen, C. D. (2005). Investigation of interannual dynamics of suitable spawning habitat for anchovy (*engraulis encrasicolus*) in the Southern Benguela using a 3D hydrodynamic model. In C. L. R., P. Fréon, C. D. Van der Lingen, and A. Uriarte, editors, *GLOBEC Report : Report of a GLOBEC / SPACC Meeting on Characterizing and Comparing the Spawning Habitats of Small Pelagic Fish*, volume 22, pages 4–5.
- Sasaki, H., Komori, N., Takahashi, K., Masumoto, Y., and Sakuma, H. (2005). Fifty years time-integration of global eddy-resolving simulation. Technical report, Earth Simulator Center, Yokohama, Japan.
- Schouten, M. W., de Ruijter, W. P. M., and van Leeuwen, P. J. (2002). Upstream control of Agulhas ring shedding. *J. Geophys. Res.*, **107**, JC000804.
- Schouten, M. W., de Ruijter, W. P. M., van Leeuwen, P. J., and Ridderinkhof, H. (2003). Eddies and variability in the Mozambique Channel. *Deep Sea Res., Part II*, **50**, 1987–2003.
- Seo, H., Miller, A., and Norris, J. (2016). Eddy-wind interaction in the California Current System : dynamics and impacts. *J. Phys. Oceanogr.*, **46**, 439–459.
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS) : a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model.*, **9**, 347–404.
- Silva, M., Araujo, M., Servain, J., **Penven, P.**, and Lentini, C. A. D. (2009). High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern Tropical Atlantic. *Ocean Model.*, **30**, 256–269.
- Silva, M., Araujo, M., Servain, J., **Penven, P.**, and Lentini, C. (2010). High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic. In J. Servain, J. N. B. Campos, E. S. P. R. Martins, and D. S. Reis, editors, *Clima do Atlantico Tropical e impactos sobre o Nordeste (CATIN) = Climat de l'Atlantique Tropical and impacts sur le Nordeste (CATIN)*, pages 76–116. Oceanografia e Meteorologia da Funceme, FUNCEME and IRD, Fortaleza, Brazil.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with primitive equations. *Mon. Weather Rev.*, **91**, 99–164.

- Speich, S., Lutjeharms, J. R. E., **Penven, P.**, and Blanke, B. (2006). Role of bathymetry in agulhas current configuration and behaviour. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23611.
- Stommel, H. (1948). The westward intensification of wind driven ocean currents. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **29**, 202–206.
- Swart, N. C., Lutjeharms, J. R. E., Ridderinkhof, H., and de Ruijter, W. P. M. (2010). Observed characteristics of Mozambique Channel eddies. *J. Geophys. Res.*, **115**, C09006.
- Ternon, J. F., Roberts, M. J., Morris, T., Hancke, L., and Backeberg, B. (2014a). In situ measured current structures of the eddy field in the Mozambique Channel. *Deep Sea Res., Part II*, **100**, 10–26.
- Ternon, J. F., Bach, P., Barlow, R., Huggett, J., Jaquemet, S., Marsac, F., Ménard, F., **Penven, P.**, Potier, M., and Roberts, M. J. (2014b). The Mozambique Channel : From physics to upper trophic levels. *Deep Sea Res., Part II*, **100**, 1–9.
- Tew-Kai, E., Rossi, V., Sudre, J., Weimerskirch, H., Lopez, C., Hernandez-Garcia, E., Marsac, F., and Garçon, V. (2009). Top marine predators track Lagrangian coherent structures. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **106**, 8245–8250.
- Thoppil, P. G., Richman, J. G., and Hogan, P. J. (2011). Energetics of a global ocean circulation model compared to observations. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L15607.
- Tomczak, M. and Godfrey, J. S. (2003). *Regional Oceanography : an Introduction 2nd edn.* Amer. Meteor. Soc.
- Tsugawa, M. and Hasumi, H. (2010). Generation and growth mechanism of the Natal Pulse. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1597–1612.
- Uchiyama, Y., McWilliams, J. C., and Shchepetkin, A. F. (2010). Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex-force formalism : Application to the surf zone. *Ocean Model.*, **34**, 16–35.
- Umlauf, L. and Burchard, H. (2003). A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *J. Mar. Res.*, **61**, 235–265.
- Valcke, S., Craig, T., and Coquart, L. (2015). Oasis3-mct user guide. Technical report, CERFACS/CNRS SUC URA No 1875, Toulouse, France.
- van Leeuwen, P. J., de Ruijter, W. P. M., and Lutjeharms, J. R. E. (2000). Natal Pulses and the formation of Agulhas rings. *J. Geophys. Res.*, **105**, 6425–6436.
- van Sebille, E., Biastoch, A., van Leeuwen, P. J., and de Ruijter, W. P. M. (2009). A weaker Agulhas Current leads to more Agulhas leakage. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03601.
- van Sebille, E., Beal, L., and Biastoch, A. (2010). Sea surface slope as a proxy for Agulhas Current strength. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L09610.
- Veitch, J. (2010). *Equilibrium dynamics of the Benguela system : a numerical modelling approach.* Ph.D. thesis, University of Cape Town, South Africa.

- Veitch, J., **Penven, P.**, and Shillington, F. A. (2010). Modelling equilibrium dynamics of the Benguela Current system. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1942–1964.
- Veitch, J. A., **Penven, P.**, and Shillington, F. A. (2009). The Benguela : a laboratory for comparative studies. *Prog. Oceanog.*, **83**, 296–302.
- Wallcraft, A. J., Hurlburt, H. E., Rhodes, R. C., and Shriver, J. F. (2002). 1/32° global ocean modeling and prediction. Technical report, Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS 39529-5004.
- Wallcraft, A. J., Kara, A. B., Hurlburt, H. E., and Rochford, P. A. (2003). The NRL Layered Global Ocean Model (NLOM) with an embedded mixed layer submodel : formulation and tuning. *J. Atm. Ocean. Tech.*, **20**, 1601–1615.
- Warner, J. C., Sherwood, C. R., Arango, H. G., and Signell, R. P. (2005). Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method. *Ocean Model.*, **8**, 81–113.
- Warner, J. C., Defne, Z., Haas, K., and Arango, H. G. (2013). A wetting and drying scheme for ROMS. *Comp. Geos.*, **58**, 54–61.
- Weijer, W., de Ruijter, W. P. M., Dijkstra, H. A., and van Leeuwen, P. J. (1999). Impact of interbasin exchange on the Atlantic overturning circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 2266–2284.
- Weimerskirch, H., Le-Corre, M., Jaquemet, S., and Marsac, M. P. F. (2004). Foraging strategy of a top predator in tropical waters : great frigatebirds in the Mozambique Channel. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **275**, 297–308.
- Wu, L., Cai, W., Zhang, L., Nakamura, H., Timmermann, A., Joyce, T., McPhaden, M. J., Alexander, M., Qiu, B., Visbeck, M., Chang, P., and Giese, B. (2012). Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nature Climate Change*, **2**, 161–166.
- Zahn, R. (2009). Climate change : Beyond the CO2 connection. *Nature*, **460**, 335–336.
- Zhai, X., Johnson, H. L., and Marshall, D. P. (2010). Significant sink of ocean-eddy energy near western boundaries. *Nature Geosc.*, **3**, 608–612.

Septième partie

Annexes

“Mars ça se rechauffe aussi, et c’est pas la faute aux bagnoles !” Jean-Marie Gourio
“Les nouvelles brèves de comptoir”

A Recherche en partenariat pour le développement

A.1 Co-construction de programmes de recherche dans et avec des pays en développement

- 2015 - 2020** Membre du Laboratoire Mixte International (LMI) IRD entre la France (LPO, LEMAR, EME), ACCESS et ses partenaires en Afrique du Sud “ICE-MASA - International Centre for Education, Marine and Atmospheric Sciences over Africa”, PIs F. Marsac (IRD - France) et J. Field (UCT - South Africa).
- 2014 - 2016** Projet NRF (Afrique du Sud) “Developing coastal ocean modeling for research and management”, PI Juliet Hermes (SAEON - South Africa) - expertise.
- 2013 - 2016** Correspondant IRD de la Jeune Équipe Associée à l’IRD MOCA “Mozambique OCEanic Atmospheric sciences”, PI Alberto Mavume (UEM - Mozambique).
- 2012 - 2015** Projet ACEP (Afrique du Sud) “Eddies as potential vectors of connectivity between Madagascar and South Africa”, PI Mike Roberts (DEA - South Africa) - expertise.
- 2012 - 2014** Coordinateur IRD du projet AIRD BEST “Etudes des interactions environnementales et trophiques dans le Golfe de Guinée”, PI Vamara Kone (Centre de Recherches Océanologiques - Côte d’Ivoire).
- 2010 - 2012** SCOR Working Group 136 on the Climatic Importance of the Greater Agulhas System, PIs L. Beal (RSMAS - USA) et A. Biastoch (Geomar - Germany) - membre associé.
- 2009 - 2014** Membre du Laboratoire Mixte International (LMI) IRD entre la France (LPO, LEMAR, EME), ACCESS et ses partenaires en Afrique du Sud “ICE-MASA - International Centre for Education, Marine and Atmospheric Sciences over Africa”, PIs F. Marsac (IRD - France) et J. Field (UCT - South Africa).
- 2007 - 2010** Projet WRC (Afrique du Sud) MAHYVA “Multi-disciplinary Analysis of Hydro-climatic Variability at the catchment scale” PI Mathieu Rouault - expertise.
- 2007 - 2009** Projet FLAGSHIP CHPC (Centre de Calcul, Afrique du Sud) “Regional Coupled Ocean-Atmosphere Modelling”, PI Frank Shillington (UCT - South Africa) - expertise.
- 2006 - 2008** Projet FUNCEME (Brésil) CATIN “Climat de l’Atlantique Tropical et Impacts sur le Nordeste”, PI J. Servain (IRD - France) et J. N. B. Campos (UFC/FUNCEME - Brazil) - expertise.

A.2 Expérience de travail dans les pays en développement

1. 26 Novembre 2010 - 25 Mai 2013 : Affectation à UCT, Cape Town, Afrique du Sud.
2. Février 2008 - Avril 2008 : Mission de longue durée à UCT, Cape Town, Afrique du Sud.
3. Mars 2007 - Mai 2007 : Mission de longue durée à UCT, Cape Town, Afrique du Sud.

4. Juin 2004 - Juin 2006 : Affectation à UCT, Cape Town, Afrique du Sud.
5. Mars 2003 - Mai 2003 : Mission de longue durée à l'IMARPE, Lima, Pérou.

A.3 Participation au renforcement des capacités au sud

A.3.1 Enseignement dispensé

1. "Western Boundary Currents", niveau master II, Master of Climate Dynamics, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 15-19 Avril 2013, 15 heures.
2. "Introduction to Ocean Modelling", en collaboration avec Issufo Halo, niveau honours, UCT Department of Oceanography honours program, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 8 Avril 2013, 4 heures.
3. "Introduction to Ocean Modelling", niveau postgraduate, LMI ICEMASA winter course : "Modelling the marine ecosystem from the ocean to the fish", University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 18-29 Juin 2012, 6 heures.
4. "Ocean Modelling", en collaboration avec Steven Herbette, niveau honours, UCT Department of Oceanography honours program, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 28 Mai - 7 June 2012, 40 heures.
5. "Western Boundary Currents", niveau master II, Master of Climate Dynamics, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 19-23 Mars 2012, 15 heures.
6. "Introduction to Ocean Modelling", en collaboration avec Steven Herbette, niveau postgraduate, ICEMASA short course : "Modelling the marine ecosystem from the ocean to the fish", University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 26-30 Septembre 2011, 6 heures.
7. "Introduction to Ocean Modelling", en collaboration avec Steven Herbette, niveau postgraduate, Nansen-Tutu winter school, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 20-24 Juin 2011, 30 heures.
8. "Introduction to Ocean Modelling", en collaboration avec Arne Biastoch, MDT Capacity Building, Second In-region capacity building workshop of the WMO/IOC data buoy cooperation panel (DBCP) and partners, SCOR working group 136, Balaclava, Ile Maurice, 2-6 Mai 2011, 4 heures.
9. "Ocean Modelling", en collaboration avec Steven Herbette, niveau honours and master, UCT applied marine sciences masters coursework et UCT Department of Oceanography honours program, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 18 Avril - 12 Mai 2011, 40 heures.
10. Workshop "How to build a habitable planet" UCT and ACCESS, Cape Town, Afrique du Sud, 26 Janvier - 4 Février 2011, 3 heures.
11. 3rd Development Partnerships in Higher Education (DePHE) Satellite Remote Sensing Course 2009 : "Introduction to Marine Remote Sensing, GIS and Hydrodynamic Modelling", Université de Cape Town (UCT), Université Eduardo Mondloane (UEM), Maputo, Mozambique, 30 Novembre - 11 December 2009, 60 heures.

12. "Introduction to Ocean Numerical Modelling", Workshops on Climate Modeling, MA-RE Institute (UCT) and ACCESS, Cape Town, Afrique du Sud, 10-20 Mars 2008, 15 heures.
13. "Modélisation des upwellings", Visite du campus IFREMER par les étudiants de master II "océanographie physique" de Brest et Paris 6, Plouzané, France, 18 Septembre 2007, 0.5 heures.
14. "How to build a shallow water model", Oceanography Department, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, Mars 2007, 4 heures.
15. "Introduction to Ocean modelling", niveau master, UCT masters coursework, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, Février-Mars 2006, 7×3 heures.
16. "ROMS installation parties", niveau master et doctorat, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, Novembre-Décembre 2005, 5×3 heures.
17. "Ocean modelling in the Benguela Upwelling System", niveau licence, UCT honours lecture, University of Cape Town, Cape Town, Afrique du Sud, 1 Novembre 2004, 3 heures.

A.3.2 Encadrement d'étudiants

1. Sarah Asdar. Thèse de doctorat en co-tutelle entre UCT et UBO démarrée en janvier 2015. Sujet : "Impact du changement climatique sur les écosystèmes de l'archipel du Prince-Édouard : rôle des processus océaniques à mésoéchelle". Encadrants : I. Ansorge (UCT, South Africa), J. Deshayes (CNRS, France), P. Penven (IRD, France), T. Gorgues (IRD, France) et X. Carton (UBO, France). Financement : NRF (South Africa).
2. Heriniaina Juliano Dani Ramanatsoa. Thèse de doctorat de UCT démarrée en mai 2014. Encadrants : M. Krug (CSIR, South Africa), M. Rouault (UCT, South Africa) and P. Penven (IRD, France) Sujet : "Coastal upwelling south of Madagascar, Interactions with the East Madagascar Current". Financement : Science Faculty UCT (South Africa).
3. Fehmi Dilmahamod. Thèse de doctorat de UCT démarrée en octobre 2014. Sujet : "Modélisation du courant Est Madagascar et de l'efflorescence planctonique de Madagascar avec un modèle couplé physique-biogéochimie". Encadrants : J. Hermes (SAEON, South Africa), P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : NRF / SAEON (South Africa).
4. Obadias Cossa. Thèse de doctorat de UCT démarrée en mars 2013. Sujet : "Modélisation numérique de la dynamique côtière et des ondes de marée interne en baie de Maputo". Encadrants : S. Pous (MHN), P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : gouvernement Mozambique.
5. Sandrine Djakouré. Thèse de doctorat de l'Université Abomey Calavi (Bénin) et l'Université de Cocody (Côte d'Ivoire), démarrée en septembre 2011 et obtenue en février 2015. Sujet : "Analyse numérique de la circulation océanique de la région nord du golfe de Guinée". Encadrants : B. Bourles (IRD, France) et P. Penven (IRD, France). Financement : bourse IRD, France.
6. Bernardino Malauene. Thèse de doctorat de UCT démarrée en juin 2011 et obtenue en juin 2015. Sujet : "Influences environnementales sur la population de

- crevettes pénéidées sur le banc de Sofala, canal du Mozambique”. Encadrants : C. L. Moloney (UCT, South Africa), M. J. Roberts (DEA, South Africa), F. Marsac (IRD, France), P. Penven (IRD, France) et C. Lett (IRD, France). Financement : bourse IRD, France.
7. Yonss José. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2010 et obtenue en juin 2014. Sujet : “Structuration par l’activité méso-échelle de l’écosystème pélagique dans le canal du Mozambique”. Encadrants : O. Maury (IRD, France), O. Aumont (IRD, France), P. Penven (IRD, France), E. Machu (IRD, France), C. L. Moloney (UCT, South Africa) et F. Shillington (UCT, South Africa). Financement : bourse IRD, France.
 8. Benjamin Roger Loveday. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2010 et obtenue en juin 2014. Sujet : “Modélisation des échanges interocéaniques forcés par le vent : dans quelle mesure les forçages distants du courant des Aiguilles contrôlent les flux entre les bassins océaniques sous des conditions climatiques contrastées?”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : GATEWAYS.
 9. Majuto Clement Manyilizu. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2010 et obtenue en juin 2014. Sujet : “Modélisation de la variabilité du sud ouest de l’océan Indien Tropical”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), F. Dufois (UCT, South Africa) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : WIORISE.
 10. Clousa Maueua Chevane. Master de UCT démarré en septembre 2011 et obtenu en juin 2012. Sujet : “Caractéristiques générales des marées modélisées sur le banc de Sofala, Mozambique”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et C. Reason (UCT, South Africa). Financement : SIDA.
 11. Issufo Halo. Thèse de doctorat de UCT démarrée en avril 2008 et obtenue en décembre 2012. Sujet : “Les tourbillons du Canal du Mozambique : formation, comportement et rôle pour les écosystèmes ; une étude de modélisation”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), I. Ansorge (UCT, South Africa) et J. Lutjeharms (UCT, South Africa). Financement : bourse IRD, France.
 12. Nathalie Burls. Thèse de doctorat de UCT démarrée en février 2008 et obtenue en décembre 2010. Sujet : “Rôle de la dynamique océanique dans la variabilité climatique de l’Atlantique Tropical”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), C. Reason (UCT, South Africa) et G. Philander (UCT, South Africa). Financement : NRF (South Africa).
 13. Yonss José. Stage de Master 2 de l’Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II démarré en mars 2009 et obtenu en juin 2009. Sujet : “Circulation hydrodynamique dans l’archipel de Quirimbas : influence de la circulation méso-échelle - impact des ouragans”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et C. Chevalier (IRD, France). Financement : Bourse ambassade de France au Mozambique.
 14. Jennifer Veitch. Thèse de doctorat de UCT démarrée en janvier 2006 et obtenue en juin 2010. Sujet : “Modélisation du système d’upwelling du Benguela - comparaisons entre le Benguela Sud et le Benguela Nord”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et F. Shillington (UCT, South Africa). Financement : bourse IRD, France / NRF (South Africa).
 15. Nicolette Chang. Thèse de doctorat de UCT démarrée en janvier 2004 et obtenue en juin 2009. Sujet : “Dynamique de la langue d’eau froide à l’est du banc des Ai-

guilles (Afrique du Sud)”. Encadrants : P. Penven (IRD, France) et F. Shillington (UCT, South Africa). Financement : NRF / CSIR (South Africa).

16. Issufo Halo. Master de UCT obtenu en novembre 2008. Sujet : “Influence des dorsales océaniques sur la circulation océanique au sud du canal du Mozambique et de Madagascar”. Encadrants : P. Penven (IRD, France), I. J. Ansorge (UCT, South Africa) et J. R. E. Lutjeharms (UCT, South Africa). Financement : NRF / Canon Collin Trust (South Africa).

A.4 Co-publications des résultats des recherches

A.4.1 Articles indexés

1. Cossa, O., S. Pous, P. Penven, X. Capet et C. Reason, Modelled cyclonic eddies in the Delagoa Bight region, *Cont. Shelf Res.*, 2016, sous presse.
2. José, Y., P. Penven, O. Aumont, E. Machu, C. Moloney, F. Shillington et O. Maury, Suppressing and enhancing effects of mesoscale dynamics on biological production in the Mozambique Channel, *J. Mar. Sys.*, 2016, sous presse.
3. Manyilizu, M., P. Penven et C. J. C. Reason, Annual cycle of the upper-ocean dynamics and their influences on ocean properties in the tropical western Indian Ocean, *Afr. J. Mar. Sci.*, 2016, sous presse.
4. Loveday, B. R., P. Penven et C. J. C. Reason, Southern Annular Mode and westerly-wind driven changes in Indian-Atlantic exchange mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, 2015, 42, doi :10.1002/2015GL064256.
5. Djakouré, S., P. Penven, B. Bourlès, J. Veitch et V. Koné, Coastally trapped eddies in the north of the Gulf of Guinea, *J. Geophys. Res.*, 2014, 119, doi :10.1002/2014JC010243.
6. Halo, I., P. Penven, B. Backeberg, F. Shillington, I. Ansorge et R. Roman, Mesoscale eddy variability in the southern extension of the East Madagascar Current : Seasonal cycle, energy conversion terms, and eddy mean properties, *J. Geophys. Res.*, 119, doi :10.1002/2014JC009820.
7. Loveday, B. R., J. V. Durgadoo, C. J. C. Reason, A. Biastoch et P. Penven, Decoupling of the Agulhas Current from the Agulhas leakage, *J. Phys. Oceanogr.*, 2014, 44, 1776-1797, doi : <http://dx.doi.org/10.1175/JPO-D-13-093.1>.
8. Manyilizu, M., F. Dufois, P. Penven et C. Reason, Interannual variability in the tropical western Indian Ocean, *Afr. J. Mar. Sci.*, 2014, 36, 233-252, doi : 10.2989/1814232X.2014.928651.
9. Pous, S., P. Lazure, G. André, F. Dumas, I. Halo et P. Penven, Circulation around La Réunion and Mauritius islands in the South-western Indian Ocean : a modeling perspective, *J. Geophys. Res.*, 2014, 119, doi : 10.1002/2013JC009704.
10. Penven, P., I. Halo, S. Pous et L. Marié, Cyclogeostrophic balance in the Mozambique Channel, *J. Geophys. Res.*, 2014, 119, doi : 10.1002/2013JC009528.
11. Ternon, J. F., P. Bach, R. Barlow, J. Huggett, S. Jaquemet, F. Marsac, F. Ménard, P. Penven, M. Potier et M. J. Roberts, Mozambique Channel : from physics to upper trophic levels, *Deep Sea Res. II*, 2014, 100, 1-9, doi : 10.1016/j.dsr2.2013.10.012.

12. Halo, I., B. Backeberg, P. Penven, I. Ansorge, C. Reason et J. Ullgren, Eddy properties in the Mozambique Channel : A comparison between observations and two numerical Ocean circulation models, *Deep Sea Res. II*, 2014, 100, 38-53, doi : 10.1016/j.dsr2.2013.10.015.
13. José, Y. J. S., O. Aumont, E. Machu, P. Penven, C. Moloney et O. Maury, Influence of mesoscale eddies on biological production in the Mozambique Channel : Several contrasted examples from an Ocean Model, *Deep Sea Res. II*, 2014, 100, 79-93, doi : 10.1016/j.dsr2.2013.10.018.
14. Durgadoo, J., B. Loveday, C. Reason, P. Penven et A. Biastoch, Agulhas leakage predominantly responds to the Southern Hemisphere Westerlies, *J. Phys. Oceanogr.*, 2013, 43, 2113-2131, doi : 10.1175/JPO-D-13-047.1.
15. Halo I, B. Backeberg, Brito A, Collins C, Cossa O, Gemo F, Y. Jose, B. Loveday, B. Malauene, F. Marsac, C. Maueua, O. Maury, A. Mavume, F. Nehama, P. Penven, S. Pous, C. Reason, M. Roberts et F. Shillington, JEA-MOCAs : A multi-institutional initiative to build marine research capacity in Mozambique, 2013, *S. Afr. J. Sci.*, 109, doi : 10.1590/sajs.2013/a002.
16. Burls N. J., C. Reason, P. Penven et G. Philander, Energetics of the Tropical Atlantic Zonal Mode, *J. Clim.*, 2012, 25, 7442-7466, doi : 10.1175/JCLI-D-11-00602.1.
17. Backeberg, B. C., P. Penven et M. Rouault, Impact of intensified Indian Ocean winds on the mesoscale variability of the Agulhas system, *Nature Climate Change*, 2012, 2, 608-612, doi : 10.1038/NCLIMATE1587.
18. Debreu L, P. Marchesiello, P. Penven et G. Cambon, Two-way nesting in split-explicit ocean models : algorithms, implementation and validation, *Ocean Model.*, 2012, 49-50, 1-21.
19. Dufois, F., P. Penven, C. Whittle et J. Veitch, On the warm nearshore bias in Pathfinder monthly SST products over Eastern Boundary Upwelling Systems, *Ocean Model.*, 2012, 47, 113-118.
20. Burls N. J., C. J. C Reason, P. Penven, et S. G. Philander, Similarities between the Tropical Atlantic Seasonal Cycle and ENSO : an Energetics Perspective, *J. Geophys. Res.*, 2011, 116, C11010, doi : 10.1029/2011JC007164.
21. Rouault, M. et P. Penven, New perspectives on Natal Pulses from satellite observations, *J. Geophys. Res.*, 2011, 116, C07013, doi : 10.1029/2010JC006866.
22. Échevin, V., F. Colas, A. Chaigneau et P. Penven, Sensitivity of the Northern Humboldt Current System nearshore modeled circulation to initial and boundary conditions, *J. Geophys. Res.*, 2011, 116, C07002, doi : 10.1029/2010JC006684.
23. Beal, L. M., W. P. M. De Ruijter, A. Biastoch, R. Zahn and the members of SCOR/WCRP/IAPSO Working Group 136, On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate, *Nature*, 2011, 472, 429-436.
24. Rouault, M., B. Pohl et P. Penven, Coastal Oceanic climate change and variability from 1982 to 2009 around South Africa, *Afr. J. Marine Sci.*, 2010, 32, 237-246.
25. Chever, F., E. Bucciarelli, G. Sarthou, S. Speich, M. Arhan, P. Penven et A. Tagliabue, Physical speciation of iron in the Atlantic sector of the Southern Ocean, along a transect from the subtropical domain to the Weddell Sea Gyre, *J. Geophys. Res.*, 2010, 115, C10059, doi : 10.1029/2009JC005880.

26. Veitch, J., P. Penven et F. Shillington, Modelling equilibrium dynamics of the Benguela Current system, *J. Phys. Oceanogr.*, 2010, 40, 1942-1964, doi :10.1175/2010JPO4382.1.
27. Blanke, B., P. Penven, C. Roy, N. Chang et F. Kokoszka, Ocean variability over the Agulhas Bank and its dynamical connection with the southern Benguela upwelling system, *J. Geophys. Res.*, 2009, 114, C12028, doi :10.1029/2009JC005358.
28. Veitch, J.A., P. Penven et F.A. Shillington, The Benguela : a laboratory for comparative studies, *Prog. Oceanogr.*, 2009, 83, 296-302, doi :10.1016/j.pocean.2009.07.008.
29. Silva, M., M. Araujo, J. Servain, P. Penven et C. Lentini, High-Resolution Regional Ocean Dynamics Simulation in the South-Western Tropical Atlantic, *Ocean Model.*, 2009, 30, 256-269, doi :10.1016/j.ocemod.2009.07.002.
30. Rouault, M., P. Penven et B. Pohl, Warming in the Agulhas Current system since the 1980's, *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36, L12602, doi :10.1029/2009GL037987.
31. Penven, P., P. Marchesiello, L. Debreu et J. Lefèvre, Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations, *Env. Model. Soft.*, 2008, 23, 660-662, doi :10.1016/j.envsoft.2007.07.004.
32. Lett, C., P. Verley, C. Mullon, C. Parada, T. Brochier, P. Penven et B. Blanke, A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics, *Env. Model. Soft.*, 2008, 23, 1210-1214, doi :10.1016/j.envsoft.2008.02.005.
33. Lett, C., P. Penven, P. Ayón et P. Fréon, Enrichment, concentration and retention processes in relation to anchovy (*Engraulis ringens*) eggs and larvae distributions in the northern Humboldt upwelling ecosystem, *J. Marine Syst.*, 2007, 64, 189-200.
34. Speich, S., J.R.E. Lutjeharms, P. Penven et B. Blanke, Role of bathymetry in Agulhas Current configuration and behaviour, *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33, L23611, doi :10.1029/2006GL027157.
35. Penven, P., J.R.E. Lutjeharms et P. Florenchie, Madagascar : a pacemaker for the Agulhas Current system?, *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33, L17609, doi :10.1029/2006GL026854.
36. Penven, P., L. Debreu, P. Marchesiello et J.C. McWilliams, Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central california upwelling system, *Ocean Model.*, 2006, 12, 157-187, Top 10 des citations de Ocean Modelling (4eme en 2010).
37. Koné, V., E. Machu, P. Penven, V. Andersen, V. Garçon, H. Demarcq et P. Fréon, Modelling the primary and secondary productions of the Southern Benguela upwelling system : a comparative study through two biogeochemical models, *Global Biogeochem. Cy.*, 2005, 19, GB4021, doi : 10.1029/2004GB002427.
38. Penven, P., V. Échevin, J. Pasapera, F. Colas et J. Tam, Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System : A modeling approach *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, C10021, doi : 10.1029/2005JC002945.
39. Lutjeharms, J.R.E., P. Penven et C. Roy, Modelling the shear edge eddies of the southern Agulhas Current, *Cont. Shelf Res.*, 2003, 23, 1099-1115.
40. Parada, C., C.D. van der Lingen, C. Mullon et P. Penven, Modelling the effect of buoyancy on the transport of anchovy (*Engraulis capensis*) eggs from spawning

- to nursery grounds in the southern Benguela : an IBM approach, 2003, *Fish. Oceanogr.*, *12*, 170-184.
41. Huggett, J., P. Fréon, C. Mullon, et P. Penven, Modelling the transport success of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) eggs and larvae in the southern Benguela : the effect of spatio-temporal spawning patterns, 2003, *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, *250*, 247-262.
 42. Blanke, B., C. Roy, P. Penven, S. Speich, J.C. McWilliams et G. Nelson, Linking wind and upwelling interannual variability in a regional model of the southern Benguela, 2002, *Geophys. Res. Lett.*, *29*, 2188-2191.
 43. Mullon, C., P. Cury et P. Penven, Evolutionary Individual-Based Model for the Recruitment of the Anchovy in the southern Benguela, 2002, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, *59*, 910-922.
 44. Penven, P., C. Roy, J.R.E. Lutjeharms, A. Colin de Verdière, A. Johnson, F. Shillington, P. Fréon et G. Brundrit, A regional hydrodynamic model of the Southern Benguela, 2001, *S. Afr. J. Sci.*, *97*, 472-476.
 45. Penven, P., J.R.E. Lutjeharms, P. Marchesiello, C. Roy et S. J. Weeks, Generation of cyclonic eddies by the Agulhas Current in the lee of the Agulhas Bank, 2001, *Geophys. Res. Lett.*, *34*, 1055-1058.
 46. Penven, P., C. Roy, A. Colin de Verdière et J. Largier, Simulation and quantification of a coastal jet retention process using a barotropic model, 2000, *Oceanol. Acta*, *23*, 615-634.

A.4.2 Articles non-indexés

1. Backeberg, B., P. Penven et M. Rouault, Accelerated eddies moving around Africa's southern tip, 2012, *SANCOR Newsletter*, *200*, 1-3.
2. Silva, M., M. Araujo, J. Servain et P. Penven, Circulation and heat budget in a regional climatological simulation of the Southwestern Tropical Atlantic, 2009, *Tropical Oceanography*, Recife, *37*, 41-57.
3. Marchesiello, P., J. Lefèvre, P. Penven, F. Lemarié, L. Debreu, P. Douillet, A. Vega, P. Derex, V. Echevin et B. Dewitte, Keys to affordable regional marine forecast systems, 2008, *La lettre trimestrielle Mercator Océan*, *30*, 38-48.
4. Echevin, V., P. Marchesiello et P. Penven, Modélisation des régions d'upwelling de bord est à l'aide du système Mercator, 2005, *La lettre trimestrielle Mercator Océan*, *18*, 18-22.
5. Penven, P., J. Pasapera, J. Tam et C. Roy, Modeling the Peru Upwelling System seasonal dynamics Mean circulation, seasonal cycle and mesoscale dynamics, 2003, *GLOBEC international Newsletter*, *9*, 23-25.
6. Blanke, B., C. Roy, P. Penven, S. Speich, J.C. McWilliams et G. Nelson, Assessing wind contribution to the Southern Benguela interannual dynamics, 2002, *GLOBEC international Newsletter*, *8*, 15-18.

A.4.3 Manifestations organisées dans un pays du Sud ou co-organisées avec des partenaires du Sud

1. Co-organisation du JEA MOCA (Mozambique Oceanic Atmospheric sciences [2013-2015]), mid-term workshop, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 14-16 April 2014.
2. Chairman de la session "Ecosystem modelling : challenges, advancements and integration with observations", Global Change and Southern African Marine Ecosystem Research Strategic workshop jointly hosted by ICEMASA, NTC and Ma-Re/UCT, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 8-10 April 2014.
3. Chairman de la session IV du 28 Octobre 2013 de 11h a 12h30 "Offshore ecosystem functioning of the KwaZulu-Natal Bight" au Eighth WIOMSA Scientific Symposium, Maputo, Mozambique, 28 Octobre - 2 Novembre 2013.
4. Co-organisation du meeting inaugural de la JEA MOCA (Mozambique Oceanic Atmospheric sciences [2013-2015]), Ile d'Inhaca, Maputo, Mozambique, 7-9 Mai 2013.
5. Co-organisation avec les membres du groupe SCOR 136 de la conférence Chapman AGU : "The Agulhas System and its Role in Changing Ocean Circulation, Climate, and Marine Ecosystems", Stellenbosch, South Africa, 8-12 Octobre 2012.
6. Co-animateur de la session discussion "Future trends in research on physical-biological coupling" au : "MA-RE BASICS workshop, Physical-biological coupling in Southern African Oceans : Past, present and future directions of interdisciplinary research field", Cape Town, Afrique du Sud, 21 Juillet 2011.
7. Co-organisateur avec J. Hermes du "Workshop on the assessment of climate variability impacts on coastal communities of East Africa using ocean models", SAEON, Cape Town, Afrique du Sud, 29 Juin - 3 Juillet 2009.
8. Co-chairman de la session : "Physical oceanography and biogeochemistry technical issues (comparative approach, modelling and retrospective analysis)" au 2nd Joint EUR-OCEANS/ECO-UP Upwelling Systems workshop, Lima, Peru 4-6 Décembre 2006.
9. Co-chairman de la session : "Theme 1 : coupling climate-atmosphere-physics-biogeochemistry" au Joint ECO-UP / EUR-OCEANS Upwelling Systems workshop Casablanca, Maroc, 26-30 Septembre 2005.

A.4.4 Expertise

1. Novembre 2008 - Juillet 2009 : Consultance privée pour la société HOCER : "Conseil et expertise en méthodes numériques pour la simulation de la marée interne au dessus d'un talus continental".

B Application et valorisation sociale, économique et culturelle de la recherche

B.1 Participation à des articles de vulgarisation scientifique

1. Bonal, I. N. El Kente et P. Penven, MOCA : la première JEAi en pays lusophone, *Recto-Verso*, 118, mai-juin 2013.
2. Carrard, M., Courcoux, G., B. Backeberg, P. Penven et M. Rouault, L'effet de la fonte des glaces compensé ? 2012, *Sciences au Sud*, 65, 2.
3. Courcoux, G., B. Backeberg, P. Penven et M. Rouault, Le courant des Aiguilles atténuerait l'effet de la fonte des glaces 2012, *Fiches d'Actualité Scientifique de l'IRD*, 408.
4. Interview pour un article dans "Pêche en mer magazine" : Les grands courants océaniques, B. Soulard, Juin 2011, *Pêche en mer magazine*, 311, 72-76.
5. Carrard, M., P. Penven et M. Rouault, Un acteur de la circulation océanique atlantique 2010, *Sciences au Sud*, 57, 10.
6. Marchesiello, P., P. Penven et L. Debreu, Zoom sur l'environnement côtier, 2005, *Sciences au Sud*, 30, 7.

B.2 Participation à la production audiovisuelle

2006 Fourniture d'images pour le court métrage Eurocéans "Upwelling du Benguela"

C Directions, animation et administration de la recherche

Depuis 2016 Co-animateur avec Claire Menesguen de l'équipe "Interactions d'échelles océaniques" au Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS)

2013 - 2016 Correspondant IRD de la Jeune Equipe Associée à l'IRD MOCA : "Mozambique Oceanic Atmospheric sciences", PI Alberto Mavume (UEM - Mozambique).

2012 - 2014 Coordinateur IRD du projet AIRD BEST : "Etudes des interactions environnementales et trophiques dans le Golfe de Guinée", PI Vamara Kone (Centre de Recherches Océanologiques - Côte d'Ivoire).

52 évaluations d'articles scientifiques (pour les journaux : Progress in Oceanography, Deep-Sea Research, Journal of Geophysical Research, Climate Dynamics, Ocean Modelling, Journal of Physical Oceanography, Marine Environmental Research, Environmental Modelling and Software, Geophysical Research Letters, Ocean Dynamics, International Council for Science, Atmospheric Research, Annales Geophysicae, New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, Indian Journal of Marine Sciences, Scientific Data, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology).

16 évaluations de projets scientifiques (pour les organismes : IRD (France), National Research Foundation (Afrique du Sud), National Science Foundation (États Unis), Flotte océanographique Française).

D Participation à la formation

Membre de 2 jurys de thèse de doctorat (dont 1 fois rapporteur).

Rapporteur de 4 thèses de master.

Co-encadrement de 13 étudiants en thèse de doctorat (9 ont soutenu).

Co-encadrement de 3 étudiants de master.

Interventions dans 7 formations collectives de type école d'été et 10 modules d'enseignement (9 à UCT, Afrique du Sud) pour un volume total de 299 heures de cours dispensées.