



La circulation océanique et son impact sur la biogéochimie marine : de la (sous-)mésos- à la micro-échelle

Andrea M. Doglioli

► To cite this version:

Andrea M. Doglioli. La circulation océanique et son impact sur la biogéochimie marine : de la (sous-)mésos- à la micro-échelle. Océan, Atmosphère. Aix Marseille Université, 2018. tel-02457899

HAL Id: tel-02457899

<https://amu.hal.science/tel-02457899>

Submitted on 28 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire présenté pour obtenir
l'Habilitation à Diriger des Recherches

Discipline : Océanographie

par

Andrea M. Doglioli

MCF à l'OSU Institut Pythéas de l'Université d'Aix-Marseille

Chercheur au MIO - *Mediterranean Institute of Oceanography*

**La circulation océanique et
son impact sur la biogéochimie marine :
de la (sous-)mésos- à la micro-échelle**

Composition du jury :

M J.-C. Poggiale	Aix-Marseille Université, MIO	tuteur
M X. Carton	Université de Bretagne Occidentale, LOPS	rapporteur
Mme I. Dadou	Université de Toulouse III, LEGOS	rapporteur
M J. Verron	CNRS, LEGI	rapporteur
Mme P. Bouruet-Aubertot	Sorbonne Université, LOCEAN	examineur
Mme A. Petrenko	Aix-Marseille Université, MIO	examineur
M M. Saillard	Université de Toulon, MIO	examineur
M R. Sempéré	CNRS, MIO	invité
Mme V. Michotey	Aix-Marseille Université, MIO	invité

13 juillet 2018

À Cosimo et Lorenzo

Remerciements

Ce travail de rédaction m'a permis, en analysant mon activité de recherche et d'enseignement, de mieux me rendre compte de la chance que j'ai eue de rencontrer de nombreux collègues et étudiants merveilleux que je veux remercier ici. J'espère n'oublier personne !

Un grand merci va à mes encadrants de thèse : Roberto Festa, qui après mon stage de *Laurea* avec lui, m'a proposé de continuer en thèse, et Annalisa Griffa, qui m'a appris le goût de la recherche en océanographie physique et m'a ouvert les portes du RSMAS. Je remercie Marcello Magaldi, Patrizia de Gaetano et tous les membres du GFAO dirigé par Corrado Ratto au Département de Physique de l'Université de Gênes.

Je dois remercier de tout cœur Bruno Blanke et Sabrina Speich qui en me prenant en post-doc au LPO à Brest, m'ont donné la belle opportunité de faire partie de la communauté océanographique française. Les deux années de travail avec eux, entouré par la sympathie des collègues du "site UBO", sont gravées dans ma mémoire comme une période intense, enthousiasmante et très enrichissante.

Je suis arrivé ensuite à Marseille où j'ai eu la chance de rencontrer Anne Petrenko avec laquelle nous avons commencé une longue et belle collaboration, tant en recherche qu'en enseignement : un grand merci à elle ! Le travail pour le projet LATEX a été très enrichissant et stimulant, grâce aussi à un groupe soudé de personnes merveilleuses qui m'ont appris plein de choses : Ziyuan Hu, Marion Kersalé, Francesco Nencioli, Jérôme Bouffard et Ivan Dekeyser. Parmi les nombreux collègues qui m'ont aidé à m'intégrer lors de mon arrivée à Marseille je tiens à remercier aussi François Carlotti et Frédéric Diaz ; avec eux, Zhongfeng Qiu et Rose Campbell, j'ai commencé à travailler sur le couplage au sein du LOPB. Merci aussi à Karine Leblanc avec qui j'ai partagé le bureau du TPR2 longtemps et si agréablement !

La création du MIO a été une belle opportunité pour élargir mes collaborations. En particulier l'activité de l'Axe Couplage ne pourrait pas exister sans la précieuse collaboration de Gérald Grégori, dont l'enthousiasme contagieux m'a si souvent motivé ! Pour le beau travail pour la campagne OSCAHR, je dois remercier aussi de tout cœur Lotty Thyssen, Pierre Marrec, Tibahut Wagener, Nagib Bhairy et l'équipe MVP de Genavir. Un remerciement spécial va à Gilles Rougier : ses compétences, sa gentillesse et son calme ont été les compagnons idéaux avec lesquels partir en campagne en mer pendant OSCAHR et PEACETIME ! Les projets OUTPACE et Moana-Maty ont été de magnifiques occasions de changer d'horizon et d'apprendre plein de choses sur le Pacifique : je remercie Thierry Moutin, Sophie Bonnet, Christophe Maes, Élodie Martinez et Hirohiti Raapoto.

Le travail de ces dernières années n'aurait pas été si passionnant et enri-

chissant sans Andrea Costa et Louise Rousselet (que je dois remercier aussi pour ses incitations quotidiennes dans ces derniers mois pour boucler ce travail!). Et un grand merci à Alain de Verneil et Frederic Cyr, leur venue au labo depuis l'autre côté de l'Atlantique a été un véritable coup de chance! Et encore un merci, pour les corrections de ce manuscrit et de la présentation, à Stéphanie Barrillon, venue elle de l'autre côté du CNRS, depuis peu, mais il semble que cela fait déjà des années qu'on travaille ensemble!

Un grand merci à Francesco d'Ovidio pour son soutien constant et notre longue collaboration, riche de discussions toujours passionnantes et de belles perspectives.

Toutes mes activités de recherche et d'enseignement se sont faites et se font avec l'aide précieuse des personnes des services informatiques : merci à Maurice Libes, Christophe Yohia, Didier Mallarino, Frédéric Bloise et leur collègues.

Je veux remercier tous les collègues du MIO, un labo au grand potentiel, et de Oceanomed. En particulier, pour les sorties en mer avec les étudiants et toutes les mille autres choses Michel Lafont ; pour l'aide administrative Dominique Poirot, Aurélia Lozingot, Brigitte Pantat, Dominique Estivale ; Christel Pinazo pour son engagement à maintenir en pleine forme notre cluster de calcul (et l'enseignement et Copernicus et plein d'autres choses!); Madeleine Goutx pour son enthousiasme dans les manip glider ; Léo Berline pour les données LOPC ; Nicolas Barrier, Loic Juillon, David Nerini pour les discussions et les pauses!

Un merci à tous mes étudiants : aux travailleurs pour les satisfactions qu'ils donnent, aux moins travailleurs pour l'incitation les passionner à l'océanographie.

Pour ce travail d'HDR je dois remercier de tout cœur mon tuteur Jean-Christophe Poggiale pour son soutien, ses conseils et ses précieuses corrections. Un grand merci pour leur disponibilité aux rapporteurs Jacques Veron, Xavier Carton et Isabelle Dadou et à tous les membres du jury : encore Anne, Marc Saillard et notre directeur Richard Sempéré et directrice-adjointe Valérie Michotey.

Enfin, un gros merci à ma famille : Heide, Cosimo et Lorenzo pour leur amour et leur patience, mes parents Mara et Giancarlo, mes beaux-parents Nati et Domenico, tata Lalla et zio Mario, pour leur aide et leur soutien qui n'a jamais manqué. Une pensée va aussi à cugino Riki, Giovanni e Daniela avec Milla et Marghe, et à Fratello Giacomo et Chiara avec Francesco et Anna, les premiers chercheurs "Lagrangiens" comme moi, et les autres agriculteurs "Eulériens" !

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Une question d'échelles	1
1.2	Parcours scientifique	7
1.3	Activités pédagogiques	10
1.3.1	Formation initiale	10
1.3.2	Autres activités d'enseignement et de formation	12
1.3.3	Encadrements d'étudiants	13
1.4	Activités collégiales	15
1.5	Organisation du manuscrit	15
2	Méthodes	17
2.1	Modèles numériques Eulériens	17
2.1.1	Modèles de circulation océanique	18
2.1.2	Modèles de fermeture de la turbulence et comparaison avec mesures <i>in situ</i> de microstructure	21
2.2	Approches Lagrangiennes	23
2.2.1	Modèles d'advection-dispersion	24
2.2.2	Quantification des échanges océaniques et suivi de tour- billons	26
2.2.3	Estimation de la connectivité marine	27
2.2.4	Structures lagrangiennes cohérentes	28
2.2.5	Estimation <i>in situ</i> des coefficients de mélange horizontal	30
2.3	Stratégies adaptatives pour les campagnes en mer	36
3	Dynamique océanique de la (sous)méso- à la micro-échelle	41
3.1	Tourbillons de méso-échelle	41
3.1.1	Le Bassin du Cap	42
3.1.2	Mer de Corail	45
3.1.3	Archipel d'Hawaï	46
3.2	Circulation de (sous)méso-échelle en milieu côtier	47
3.2.1	Golfe du Lion	49
3.2.2	Autres sites d'étude	58
3.3	La turbulence océanique	61
3.3.1	Le mélange sur l'horizontale	61
3.3.2	Le mélange vertical	64

4	Couplage physique-biogéochimie-biologie	69
4.1	À l'échelle de bassin	69
4.1.1	Une régionalisation de la Méditerranée	70
4.1.2	Simulation du transport du zooplancton en Méditerranée Nord-Occidentale	71
4.2	À la (sous)méso-échelle	73
4.2.1	Evolution d'un bloom phytoplanctonique dans le Pacifique Sud-Occidental	73
4.2.2	Dynamique de la structure de la communauté phytoplanctonique en Mer Ligure	75
4.2.3	Dynamique du plancton dans un tourbillon côtier du Golfe du Lion	77
4.3	Advection-dispersion et décantation	78
4.3.1	Modèles de chute de particules biogènes	80
4.3.2	Évaluation de l'impact environnemental de fermes aquicoles	81
5	Bilan et perspectives	85
5.1	Bilan des recherches et d'encadrement	85
5.2	Perspectives de recherche	86
5.3	Perspectives d'enseignement	91
6	Annexe : Curriculum Vitae	119

CHAPITRE 1

Introduction

1.1 Une question d'échelles

Historiquement, l'océan a été très peu échantillonné, en raison des difficultés d'organiser, d'effectuer et de réussir des campagnes océanographiques. Ces dernières représentent en effet en même temps un défi méthodologique lié à la complexité des écoulements marins, et aussi technologique (et par conséquent, financier) du à l'hostilité de ce milieu pour l'homme. Les observations systématiques commencent dans les années 1880 avec les campagnes pionnières de Nansen, toutefois pendant toute la première moitié du XX^{ème} siècle, les efforts d'observation et théoriques se sont concentrés sur la description de la circulation à grande échelle. Les modèles classiques de Sverdrup, Stommel ou Munk, proposent une circulation grande échelle stationnaire qui a fortement influencé les océanographes physiciens dans une vision de l'océan comme parcouru par des courants stables. Cette vision a été principalement due d'un coté au manque d'informations *in situ* détaillées et de l'autre à la difficulté, voire l'impossibilité, de la résolution analytique des équations de Navier-Stokes sans poser de très fortes hypothèses simplificatrices. Ce n'est que dans les années 60 du XX^{ème} siècle que le développement technologique a permis d'effectuer les premières mesures à plus haute fréquence temporelle ($\mathcal{O}(10\text{jours})$) et spatiale ($\mathcal{O}(10\text{km})$). L'étude pionnière de *Swallow et Hamon* [1959] au large du Portugal, sur la partie orientale de la gyre subtropicale de l'Atlantique Nord, a mis en évidence comment les courants pouvaient varier sur des périodes de quelques semaines et sur des distances de quelques dizaines de milles nautiques. De plus, ils soulignent qu'aucune décroissance uniforme de l'intensité du courant n'était relevée, rendant impossible la définition d'un niveau de fluide au repos, comme habituellement fait dans les équations de la géostrophie. Ensuite, l'avènement des bouées dérivantes et de l'imagerie satellitaire de la température de surface a montré une variabilité spatio-temporelle qui a bouleversé la vision océanographique du Gulf Stream [e.g. *Richardson* 1980] : du fleuve tranquille à la rivière tourbillonnante. La nomenclature "anneau" ("*ring*" en anglais) est ainsi devenue commune dans les années 70 pour designer les tourbillons cycloniques ou anticycloniques qui se détachent d'un courant

principal, piègent une masse d'eau à l'intérieur et la transportent sur des distances de centaines voire milliers de kilomètres pour des périodes allant du mois aux années [Olson 1991]. La découverte de cette variabilité océanique ¹ a mis les océanographes face à "l'immensité de leur tâche", en citant Semtner [1995]. Ce dernier invoque donc l'aide des supercalculateurs afin de résoudre numériquement les équations qui gouvernent la dynamique océanique. Les modèles numériques peuvent en effet apporter une aide vraiment précieuse dans la compréhension des processus de base et de leur interdépendance, et dans l'interprétation des observations. Si les premiers modèles de circulation développés dans les années 60 avaient une trop faible résolution, la rapide augmentation de la puissance de calcul et la progression des techniques numériques ont permis d'arriver dans la moitié des années 70 à des modèles avec une résolution de l'ordre du premier rayon de déformation de Rossby et ainsi commencer à résoudre des processus tels que les méandres des grands courants et leur possible évolution dans des circulations fermées donnant lieu aux plus grands tourbillons océaniques. C'est grâce à l'intégration des trois approches, l'observation *in situ*, la télédétection satellite et la modélisation numérique, que nous disposons aujourd'hui de l'information nécessaire pour réaliser des animations telle que celle intitulée *Perpetual Ocean* mise en ligne par NASA (<https://www.nasa.gov/topics/earth/features/perpetual-ocean.html>), qui rend efficacement l'idée du caractère tourbillonnaire de la circulation océanique. En admirant ces animations, on ne peut que rester fasciné par ces centaines de tourbillons et de méandres qui remplissent toutes les mers du globe et constituent la variabilité dite de méso-échelle. Les mesures effectuées avec les bouées lagrangiennes dans les années 80 ont mis en évidence comment une grosse partie de l'énergie cinétique océanique est associée aux tourbillons de méso-échelle [Richardson 1983b]. Les cartes d'énergie cinétique tourbillonnaire (EKE - *Eddy Kinetic Energy*) issue des mesures d'altimétrie satellite permettent d'identifier les zones où les courants sont soumis à de grandes instabilités et génèrent des "anneaux" [pour un exemple voir Figure 1.1 tirée de Pascual et al. 2006].

Le nombre des tourbillons de méso-échelle dans l'océan rendent très probables leurs interactions. Ces interactions induisent de forts étirements des masses d'eau qui vont générer de nouvelles structures à des échelles plus petites que le premier rayon interne de déformation de Rossby (R_d). Ces plus petites structures dites de sousméso-échelle sont typiquement agéostrophiques et leur dynamique devient tridimensionnelle. Leur taille représente une barrière

¹Plus précisément, l'existence d'anomalies froides au sud du Gulf Stream était déjà connue depuis les années 30 ainsi que le lien entre ces structures et la présence de tourbillons mise en avant dans la décennie suivante. Voir Richardson [1983a] pour plus de détails.

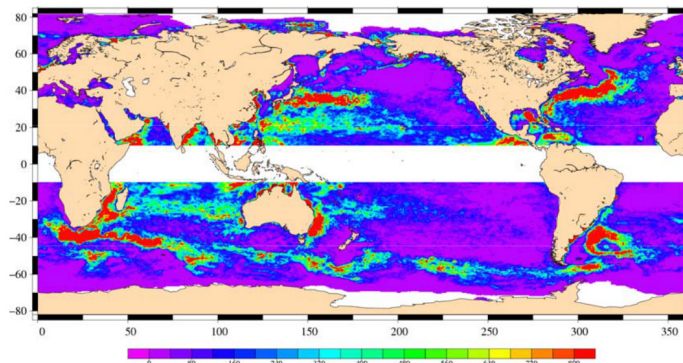


FIGURE 1.1 – Carte de l'énergie cinétique tourbillonnaire [cm^2s^{-2}] dans l'océan global, issue de mesures satellites. D'après [Pascual et al. 2006]

à leur observation, ce qui a longtemps retardé l'appréciation de leur abondance [McWilliams 2016] : trop petites et en évolution rapide pour les mesures classiques de campagnes en mer et pour la première télédétection par satellite, souvent difficiles à distinguer des ondes à inertie dans les séries temporelles à un point fixe ou dans les profils verticaux. De plus, les difficultés liées à leur caractère non-linéaire ont fortement limité les prédictions théoriques. C'est seulement à partir des années 2000 que la résolution des modèles numériques de circulation est devenue suffisante pour les représenter. Ces derniers ajoutés à l'imagerie satellite à très haute résolution, ont constitué le démarrage pour l'étude de ces structures qui a connu un intérêt rapidement grandissant au cours des quinze dernières années. En effet, elles peuvent représenter l'"étape manquante" dans la cascade directe de l'énergie de la méso-échelle à la dissipation [Ferrari et Wunsch 2009] et jouer un rôle clé dans le transfert vertical de la chaleur et du sel et dans l'injection des sels nutritifs dans la zone photique [Mahadevan 2016].

En descendant encore d'échelle, on arrive dans le domaine de la micro-échelle, où la turbulence domine. L'étude de la turbulence océanique est, à la différence de la sous-méso-échelle, très vaste et de longue tradition. Typiquement on suppose qu'à micro-échelle, la turbulence est homogène et stationnaire, pouvant ainsi définir un écoulement turbulent comme l'état d'un fluide dans lequel se superpose au mouvement moyen un mouvement d'agitation aléatoire [Reynolds 1895]. On arrive ainsi à la vision classique de la

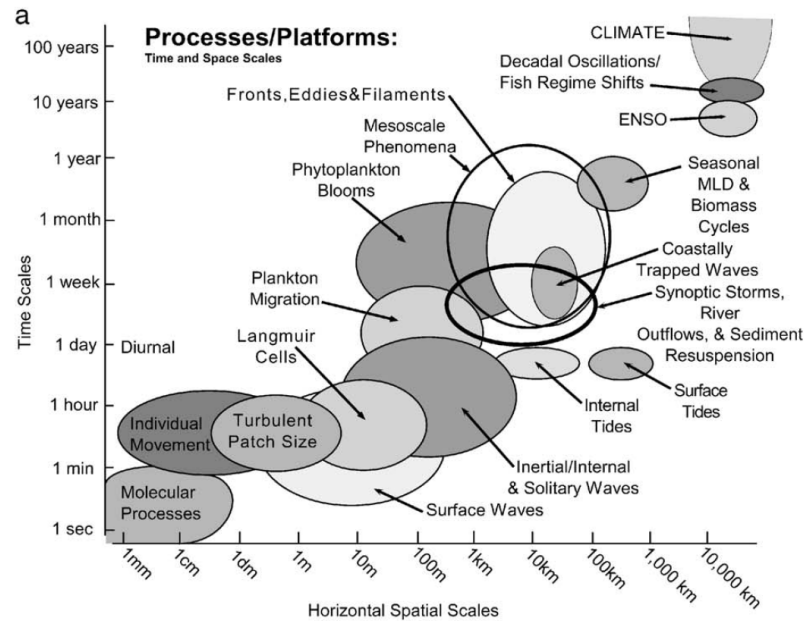


FIGURE 1.2 – Diagramme temps-espace pour le principaux processus physiques et biologiques dans l’océan. D’après [Dickey 2003].

dernière partie de la cascade de l’énergie où les plus petits tourbillons deviennent enfin si petits qu’il peuvent être dissipés par la viscosité du fluide. En générant des gradients très importants de la vitesse sur de petites échelles spatiales, le processus physique de la turbulence domine dans le transfert de masse et de chaleur et dans la dispersion de solutés et petites particules organiques et inorganiques. Malgré la longue histoire des études de la turbulence océanique, nombre de questions restent ouvertes, en particulier en ce qui concerne sa représentation dans les modèles de circulation et son rôle dans la dispersion des traceurs biogéochimiques.

Depuis les travaux historiques de *Riley* [1942] et *Sverdrup* [1953] sur le rôle de la turbulence verticale sur le déterminisme de la floraison printanière, ou ceux de *Haury et al.* [1978] sur le rôle de la dynamique océanique sur la distribution spatiale du plancton (à l’origine de la notion de “*patchiness*”), il est admis que la physique de l’océan affecte la dynamique des communautés planctoniques ². Le lien avec la géochimie est identifiable dès les années 60 via

²Le terme plancton est depuis un peu plus d’un siècle utilisé pour définir les organismes vivant dans l’eau, plus ou moins passivement, en suspension et qui sont donc transportés par les courants [pour une révision sur les études Lagrangiens du plancton, voir *Hitchcock et Cowen* 2007].

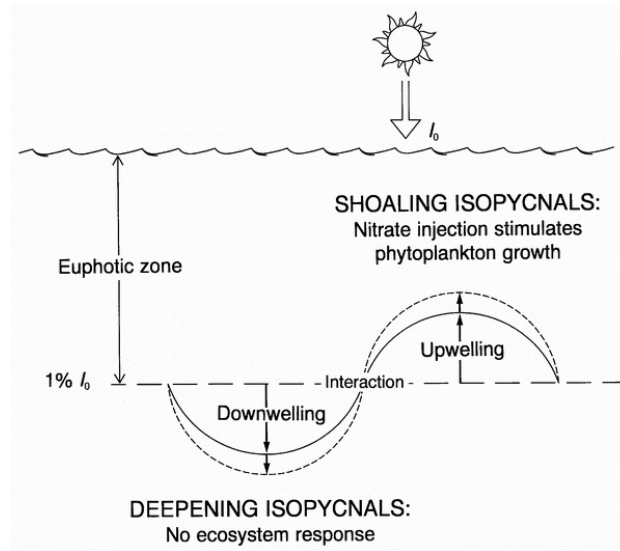


FIGURE 1.3 – Variation verticale de l’isopie associée à la nutricline due à la présence de deux tourbillons adjacents et de signe opposé. D’après [McGillicuddy *et al.* 1998].

les travaux de *Dugdale* [1967] sur la limitation de la production planctonique par les sels nutritifs. L’émergence de la problématique du réchauffement climatique lié au cycle du carbone, amenant la notion de “pompe biologique” [Volk *et Hoffert* 1985; Raven *et Falkowski* 1999], a encore considérablement renforcé cette vision pluridisciplinaire de l’océan et la nécessité d’étudier conjointement et aux échelles spatio-temporelles pertinentes les processus physiques et bio-géochimiques.

La méso-échelle joue un rôle clef dans la dynamique, dans les transports de chaleur et de matière et dans le contrôle de l’activité biologique [e.g. Figure 1.3; pour une révision récente, voir *McGillicuddy* 2016]. Les études numériques montrent toute l’importance de ces processus, mais les confirmations expérimentales de ces effets sont difficiles à obtenir, principalement pour des raisons d’adéquation entre les stratégies expérimentales étudiant l’hydrodynamique et celles étudiant la biogéochimie. La tâche est particulièrement compliquée pour ce qui concerne l’océan côtier à cause de la complexité de la circulation et la variabilité de la distribution des espèces et des grandeurs géochimiques associées et de la difficulté de l’estimation des transferts de matière et d’énergie côte-large et surface-fond. À plus petite échelle, la turbulence verticale et, dans le cas particulier des zones de formation d’eaux profondes, la convection hivernale, jouent un rôle tout aussi important par

leurs effets sur l'enrichissement nutritif de la couche éclairée ainsi que le transfert de matière vers le fond. Une bonne connaissance des processus physiques conduisant à la stratification/déstratification de la colonne d'eau est donc primordiale pour une bonne résolution du cycle saisonnier de production. De plus, la turbulence peut modifier la compétition pour obtenir l'énergie radiative entre des espèces phytoplanctoniques en suspension et d'autres espèces qui sédimentent dans la colonne d'eau [Huisman *et al.* 2004] et peut donc jouer un rôle sur la succession des espèces à l'échelle saisonnière. L'évaluation du mélange vertical induit par la turbulence est aussi un point clef pour l'évaluation de la dispersion du zooplancton, affectant donc possiblement la structure de l'écosystème. A l'échelle globale, une augmentation de cette stratification est prédite suite au réchauffement climatique et la prise en compte d'une représentation fine de la turbulence dans les modèles couplés est susceptible de grandement modifier les bilans biogéochimiques à l'échelle globale [Klein *et Lapeyre* 2009]. Par exemple, différents modèles biogéochimiques conceptuel des tourbillons existent : le modèle fermé (le tourbillon peut être assimilé à un réacteur isolé de l'extérieur) et le modèle ouvert (le tourbillon déclenche les réactions biogéochimiques le long de son déplacement, [e.g. Nencioli *et al.* 2008]). La représentation par l'un ou l'autre de ces modèles conceptuels semble dépendre de l'hydrodynamisme local, en particulier en regard du rôle de la turbulence. A fin de répondre à ce genre de questionnement, la modélisation couplée physique/biogéochimie a connu un formidable essor depuis les 30 dernières années. Basée sur l'équation fondamentale de conservation de la matière et profitant d'outils de modélisation physique de plus en plus performants, la modélisation couplée permet de simuler la réponse de l'écosystème planctonique en terme de production et de biomasse, ainsi que les flux géochimiques associés, à la variabilité des conditions océaniques, incluant les processus de hautes fréquences (cycles diurnes des marées et du transfert radiatif, précipitations), de basses fréquences (passages des perturbations atmosphériques) et saisonniers (variations saisonnières des débits d'eaux douces, convection hivernale, stratification estivale). L'intégration de cette variabilité sur des échelles annuelle, pluri-annuelle, voir séculaire, donne accès à des estimations quantitatives des grandeurs biogéochimiques et des groupes écologiques fonctionnels. Les récents développements d'instrumentation permettant les mesures biogéochimiques *in situ* et en continu (e.g. la cytométrie automatisée) donnent la possibilité d'explorer l'influence des processus physiques sur les processus biogéochimiques pour un continuum d'échelles spatiales et temporelles. Ces mesures sont primordiales pour permettre de calibrer et valider aux mêmes échelles temporelles les processus simulés par les modèles physiques et biogéochimiques couplés ainsi que les produits satellites.

1.2 Parcours scientifique

Ce manuscrit résume mes principales contributions à l'étude de la circulation océanique à une gamme d'échelles qui va de la méso- à la micro-échelle et de son impact sur la biogéochimie marine via les phénomènes de dispersion des traceurs tel que les nutriments, le plancton ou les polluants d'origine anthropique. Il couvre un arc temporel d'une quinzaine d'années qui démarre avec mes travaux de thèse de *Laurea*³. Dans l'organisation du manuscrit je suis un fil conducteur par échelle décroissante sans nécessairement respecter l'ordre chronologique de mes activités. Afin de donner quand même une vue d'ensemble de mon parcours dans cette section, je présente succinctement mes activités pendant mes années de thèse de *Laurea* à l'Université de Gênes (Italie), de thèse de Doctorat toujours à l'Université de Gênes en collaboration avec l'Université de Miami (Floride, USA), de post-doc au LPO (Laboratoire d'Océanographie Physique de Brest) et de maître de conférences à Marseille.

Pendant mon stage de thèse de *Laurea*, j'ai construit le modèle numérique de dispersion lagrangienne LAMP3D (*Lagrangian Assessment for Marine Pollution 3D model*), qui, couplé au modèle de circulation MIKE21 [DHI 2009] a été appliqué à la dispersion des eaux usées rejetées en mer le long de la côte orientale de la Ligurie (Méditerranée nord-occidentale) [Doglioli 2000]. Ce travail m'a plongé dans les problématiques de la modélisation numérique de la circulation côtière, de la dispersion de traceurs biogéochimiques non conservatifs et de l'étude de l'impact anthropique en milieu côtier.

Ayant obtenu une bourse de thèse, j'ai pu ensuite me consacrer à une étude de processus de la circulation dans le secteur du Promontorio di Portofino, toujours sur la côte de la Ligurie orientale, motivé par des mesures historiques de courants suggérant la présence d'un tourbillon côtier en aval du Promontoire. J'ai réalisé une étude de sensibilité dans des cas idéalisés de forçage topographique sur un courant côtier à l'aide du modèle numérique POM [*Princeton Ocean Model*, Mellor 1998]. Mon travail a mis en évidence la présence de circulations secondaires associées au décollement de la couche

³Avant la réforme européenne dite Processus de Bologne, en Italie la thèse de *Laurea* était demandée aux étudiants à la fin d'un parcours pédagogique de 5 ans. Le travail, d'une durée entre neuf et douze mois, consistait en une véritable première expérience de recherche, en particulier dans les facultés scientifiques. La *Laurea* était ainsi au niveau à peu près équivalent au BAC+7 et elle représentait le seul titre d'étude nécessaire pour entreprendre une carrière académique. Actuellement, dans le cadre du parcours universitaire réformé et l'introduction en Italie de l'équivalent du Doctorat, le travail pour obtenir une *Laurea* est en train de se simplifier et sa durée se raccourcit, devenant de plus à plus similaire à un stage de Master 2.

limite en proximité d'un cap et dominées par l'effet de la force de Coriolis et il a abouti à l'implémentation d'une configuration avec bathymétrie réaliste en bon accord avec les mesures *in situ* [Doglioli et al. 2004b].

Ce modèle de circulation a été utilisé en deuxième partie de ma thèse pour la mise en place d'une méthode numérique d'évaluation de l'impact d'une ferme aquacole dont l'installation venait d'être autorisée en proximité de la Réserve Marine du Promontoire de Portofino. Le code lagrangien LAMP3D a été couplé avec le code POM pour obtenir un modèle tridimensionnel d'advection-dispersion forcé par le courant côtier et le vent local. L'attention s'est focalisée sur les dispersions de l'azote, du phosphore et du carbone organique. Les résultats des simulations ont clairement prouvé que les particules dissoutes tendent à s'écarter rapidement et à subir une dilution rapide selon la direction de la circulation marine dominante. En revanche, les particules issues des pelotes fécales et de la nourriture demeurent principalement confinées dans le secteur d'exploitation de la pisciculture en raison de leur vitesse de sédimentation relativement rapide, en impactant le fond marin [Doglioli et al. 2004a]. Un module biologique modélisant la dégradation des particules en fonction des conditions aussi bien physiques que biologiques a été ensuite mis en place, [De Gaetano et al. 2008, 2011], ainsi qu'une expérience en laboratoire pour déterminer la vitesse de chute de différentes typologies de nourriture, ce qui représente un paramètre fondamental pour ce type de modèles de dispersion-dégradation [Vassallo et al. 2006].

Pendant mes deux années comme chercheur post-doctoral au LPO (aujourd'hui LOPS) à Brest, j'ai travaillé sur l'impact des tourbillons de méso-échelle sur la circulation du bassin du Cap (Atlantique Sud-Orientale) et l'échange Indo-Atlantique. J'ai développé une méthode originale pour identifier et suivre dans l'espace tridimensionnel et le temps ces structures dynamiques à partir d'une analyse en ondelettes des champs de vorticité relative issue de modèles numériques de circulation [Doglioli et al. 2007]. J'ai aussi combiné une analyse Lagrangienne de transport avec analyse en vitesse de rotation d'une partie statistiquement significative des trajectoires des particules numériques, en mettant ainsi en évidence l'importance des tourbillons de méso-échelle, et en particulier des cyclones, dans l'échange Indo-Atlantique [Doglioli et al. 2006].

Suite à mon recrutement en tant que Maître de Conférences, je me suis investi sur le projet LATEX (*L*Agrangian *T*ransport *E*Xperiment, PIs A. Petrenko et F. Diaz, www.mio.univ-amu.fr/LATEX) portant sur l'étude de l'impact des structure de méso- et sousméso-échelle de la partie Occidentale du Golfe du Lion [Petrenko et al. 2017]. J'ai contribué à la mise à point d'un modèle numérique dédié [Hu et al. 2009] qui a permis d'expliquer la formation

des tourbillons côtiers [Hu *et al.* 2011] et leur dynamique. En particulier, le modèle a fourni une précieuse information complémentaire aux données des deux campagnes à la mer en 2008 [Latex08, Hu *et al.* 2011b] et en 2009 [Latex09, Kersalé *et al.* 2013]. Ce modèle de circulation a été aussi couplé à un modèle biogéochimique pour étudier l'impact des tourbillons côtiers sur la distributions des traceurs et des premiers échelons trophiques [Campbell *et al.* 2013]. Dans le cadre de la campagne Latex10, j'ai aussi travaillé à la mise à point de la méthodologie de navigation Lagrangienne [Doglioli *et al.* 2013] pour le largage du traceur passif utilisé pour estimer la dispersion horizontale due à la turbulence [Kersalé *et al.* 2016], ainsi que sur la stratégie adaptative pour échantillonner *in situ* les structures Lagrangiennes cohérentes [Nencioli *et al.* 2011] associées à un front entre eaux du plateau et du large [Nencioli *et al.* 2013, 2016]. Les mesures des campagnes LATEX ont aussi été exploitées afin d'améliorer les produits de courantologie issue de l'altimétrie spatiale [Bouffard *et al.* 2014], dans le cadre d'un contrat de post-doc financé par le CNES dont j'ai été responsable scientifique.

J'ai aussi eu occasion d'appliquer les méthodologies développées dans le cadre du projet LATEX, sur d'autres sites d'étude, présentant des processus similaires. En particulier, j'ai contribué à l'étude de la formation des tourbillons côtiers dans les eaux des îles Hawaii à l'aide du modèle numérique ROMS [Kersalé *et al.* 2011] ainsi que à l'application de l'analyse par FSLE (*Finite Size Lyapunov Exponents*) de données de courantologie radar dans le Golfe de Trieste en Nord Adriatique [Berta *et al.* 2014].

À coté de cette activité focalisée sur l'océanographie physique, je me suis aussi dédié à l'étude du couplage entre processus physiques et biologiques. J'ai contribué au développement d'un modèle à particules Lagrangiennes individu centré pour l'étude des processus responsables de la distribution du zooplancton en Méditerranée Nord-Occidentale [Qiu *et al.* 2010, 2011, 2014] et à une analyse Lagrangienne de la circulation générale de la Méditerranée afin de définir une éco-régionalisation du bassin [Berline *et al.* 2014].

Actuellement, ma principale thématique de recherche est le couplage physique-biogéochimie-biologie et le développement de méthodologie innovantes pour échantillonner l'océan *in situ* à fine échelle. Dans le cadre du projet OUTPACE (*Oligotrophy to ULtra-oligotrophy PACific Experiment*, PIs T.Moutin et S.Bonnet, <https://outpace.mio.univ-amu.fr>), je m'intéresse à la circulation de (sous)méso-échelle dans le Pacifique Tropical. En particulier, j'ai contribué à l'étude du rôle de tourbillons de la Mer de Corail dans la connexion entre le Jet Nord Vanatu et le Jet Nord Calédonien [Rousset *et al.* 2016]. Dans le cadre du projet OSCAHR (*Observing Submesoscale Coupling At High Resolution*, PIs A.M.Doglioli et G.Grégori, www.mio.univ-amu.fr/OSCAHR), nous cherchons à démontrer le rôle structurant de

la circulation à sousmésos-échelle sur la distribution du phytoplancton [Marrec et al. 2018]. Dans le cadre du projet PEACETIME (*ProcEss studies at the Air-sEa Interface after dust deposition in the MEditerranean sea*, PIs C.Guieu et K.Desboeufs, <http://peacetime-project.org>), j’ai embarqué sur la campagne qui eu lieu en mai-juin 2017 en Mer Méditerranée et je participe à l’étude de la circulation de surface et son impact sur les flux biogéochimiques associés aux pluies sahariennes. Tout récemment on a commencé les activités de terrain du projet BIOSWOT (PI F.d’Ovidio) avec la campagne Proteus-BIOSWOT en Méditerranée Sud-Occidentale.

1.3 Activités pédagogiques

Je suis fortement convaincu que les enseignants-chercheurs jouent un rôle très important dans la transmission des compétences et du savoir. Ils doivent communiquer un savoir scientifique de base aux étudiants et veiller à constamment élargir ce savoir en fonction des progrès scientifiques et techniques, de manière à ce que les connaissances nouvelles d’aujourd’hui puissent servir de socle solide aux recherches de demain.

J’ai cherché à organiser mon activité d’enseignement et d’encadrement dans un parcours cohérent pour mes étudiants. Ce parcours démarre en Licence avec l’apprentissage des fondamentaux de la mécanique et dynamique des fluides et de la modélisation mathématique et numérique, se poursuit en Master avec l’étude des applications classiques, moderne et récentes de ces connaissances dans le domaine de l’océanographie pour terminer pendant les stages, et surtout les thèses, avec une véritable première expérience de recherche scientifique autour d’un sujet original.

J’ai toujours cherché à privilégier une approche pluridisciplinaire qui permette aux étudiants de développer un savoir-faire méthodologique spécialisé et, en même temps, ouvert au dialogue avec les autres spécialistes, de manière à mieux comprendre la complexité de l’environnement marin. Cette approche m’a aussi poussé à participer à des enseignements d’ouverture afin de passionner les étudiants au métier de l’océanographe au sens large. Enfin, j’ai toujours eu une attention particulière à la sensibilisation des étudiants aux impacts de l’homme sur les écosystèmes marins et à la gestion de l’environnement.

1.3.1 Formation initiale

Depuis mon recrutement à l’Université de la Méditerranée (puis Université d’Aix-Marseille) j’ai effectué un service complet d’enseignement dans

le cadre de la Licence de Sciences de la Mer et de l'Environnement (puis Licence Sciences de la Nature, de la Terre et de l'Environnement, puis Licence de la Vie et de la Terre) et du Master d'Océanographie de l'OSU Centre d'Océanologie de Marseille (puis Institut Pythéas).

En Licence, j'ai participé aux enseignements d'initiation à l'informatique et à la programmation (niveau L1) destinés à fournir les bases d'utilisation du système d'exploitation Linux et du langage de programmation Fortran. Actuellement, j'interviens dans le cours d'Introduction à l'Océanographie (niveau L2) avec une initiation sur les concepts de base de l'océanographie physique, les principaux bassins océaniques et leur courants, les propriétés physiques de l'eau de mer, les techniques d'observation de l'océan et les équations de l'hydrodynamique et je m'occupe aussi des sorties en mer. Au niveau L3, je participe à l'encadrement d'étudiants du cours Projet en Modélisation, visant à permettre aux étudiants de se confronter avec un problème concret et le résoudre en utilisant les compétences et les notions acquises dans les autres unités d'enseignement. Enfin, toujours en L3, je suis le responsable du cours de Dynamique des Océans, visant à poser les bases des équations des mouvements océaniques et à montrer des exemples concrets de leurs applications.

En Master, je participe à l'enseignement d'Océanographie Générale (niveau M1) avec une partie dédiée à l'étude de la circulation générale en mer Méditerranée. Toujours au niveau M1, je suis le responsable du cours de Modélisation de la Circulation Océanique qui associe une partie cours sur les équations primitives et la modélisation de la turbulence à des travaux dirigés visant à amener l'étudiant à implémenter un modèle réaliste de circulation océanique basé sur le code ROMS (*Regional Ocean Modelling System*), qui représente l'état de l'art des modèles numériques de circulation. Au niveau M2, je suis le responsable du cours de Circulation et Dispersion en Eaux Côtières, qui fournit une formation de haut niveau sur les processus physiques en eaux peu profondes, et la modélisation de la dispersion des traceurs, des polluants et des organismes marins. Pendant trois ans (2010-2013), ce dernier cours a été aussi mutualisé avec le Master "Mécanique, Physique et Ingénierie", option FLER (FLuides Environnement Risque) du Département de Mécanique.

Le détail du service effectué pour l'année académique 2014-2015 est donné dans le Table 1.3.1. Pendant l'année académique 2015-2016 j'ai pu bénéficier d'une délégation CNRS à 50% qui a été ensuite renouvelée pour l'année académique 2016-2017. Avec l'année académique 2017-2018, j'effectue à nouveau un service complet. La décharge de service d'enseignement m'a permis de me consacrer à l'organisation de quatre campagnes océanographiques et à leur participation, dont deux comme chef de mission.

<i>Niveau</i>	<i>UE</i>	<i>Resp.</i>	<i>CM</i>	<i>TD</i>	<i>eq.TD</i>
LICENCE	(SNT3U18L) Introduction à l'Océanographie physique chimique biologique	Botha	8	0	12
	(SNT5U27L) Dynamique des Océans	Doglioli	24	0	36
	(SNT6U26L) Projet en Modélisation	Poggiale		10	10
MASTER	(LOCAU1) Océanographie Générale	Millet	10	0	15
	(LOCBU5) Modélisation de la Circulation Océanique	Doglioli	32	28	76
	(LOCCU6) Circulation et Dispersion en Eaux Côtières	Doglioli	38	0	57
TOTAL			104	38	206

TABLE 1.1 – Service effectué pour l'année académique 2014-2015

Enfin, pour fournir à mes étudiants un support souple et à jour pour leur travail d'apprentissage, je me suis investi pour chacun de mes cours dans la rédaction de polycopiés de cours et de TD. Je maintiens à jour régulièrement ces manuscrits qui sont disponibles en téléchargement libre depuis mes pages web personnelles à l'adresse www.mio.univ-amu.fr/~doglioli. La mise à disposition de ces documents avec possibilité de téléchargement libre de la part de mes étudiants, mais aussi d'étudiants et de collègues francophones à été souvent l'occasion d'échanges très enrichissants.

1.3.2 Autres activités d'enseignement et de formation

Pendant ma thèse de doctorat à l'Université de Gênes, j'ai donné des séminaires aux étudiants de la faculté de Sciences, en relation étroite avec mon activité de recherche sur la modélisation et l'évaluation de l'impact environnemental des fermes aquacoles. Ma collaboration scientifique avec l'Université de Gênes a continué après ma thèse et, dans ce cadre, j'ai été invité à intervenir dans les cours de Physique de l'Atmosphère des professeurs C.Ratto et A.Mazzino en 2008, 2009 et 2011. Pendant ma visite scientifique au ISMAR-CNR de Venise en 2010, j'ai été invité à intervenir dans un cours de formation continue pour les agents de l'agence de protection

de l'environnement de la Région Vénétie (ARPAV). Enfin, en juin 2017, j'ai organisé en collaboration avec G.Grégori (MIO, CNRS), F.d'Ovidio (LOCEAN, CNRS) et M.Thyssen (MIO, CNRS), l'atelier et école d'été *Fine-Med* sur les thématique de l'observation *in situ* des processus de fine échelle en Méditerranée (www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/FineMed/). Tous les détails de ces activités sont indiquée dans mon CV joint en annexe.

1.3.3 Encadrements d'étudiants

Depuis 2006, j'ai encadré ou co-encadré un certain nombre d'étudiants en Thèse, en Master, en École d'Ingénieurs ou en Licence ainsi que deux étudiants étrangers en visite dans mon laboratoire. Tous les détails de ces activités sont indiqués dans mon CV joint en annexe. Ci dessous je liste les détails des thèses et des stages de Master 2.

Thèses de doctorat

- Jan. '07 - Avr. '10 : Patrizia De Gaetano, *Numerical modelling of circulation and pollutant dispersion-degradation in coastal waters. An application to the Eastern Ligurian Sea*. Dottorato in Geofisica XXII ciclo, Università degli Studi di Genova; en collaboration avec R. Festa et M. Burlando.
- Oct.'07 - Feb.'11 : Zyuan Hu, *Structures tourbillonnaires à l'ouest du Golfe du Lion : Modélisation numérique et mesures en mer*. École Doctorale de Sciences de l'Environnement, Université de la Méditerranée; en collaboration avec A.A. Petrenko et I. Dekeyser.
- Sep.'10 - Oct.'13 : M.Kersalé, *Dynamique de processus océaniques de méso- et de sousméso-échelle à partir de simulations numériques et de données in situ*. École Doctorale de Sciences de l'Environnement, Université d'Aix-Marseille; en collaboration avec A.A. Petrenko et I. Dekeyser.
- Oct.'13 - Apr.'17 : A.Costa, *Connectivité entre aires marines protégées et bio-régionalisation de la Méditerranée : une approche lagrangienne*. École Doctorale de Sciences de l'Environnement, Université d'Aix-Marseille; en collaboration avec A.A. Petrenko.
- Depuis janvier 2015 : H.Raapoto, *Impacts des cycles climatiques sur l'effet d'île aux Marquises et répercussions sur les ressources marines..* École Doctorale du Pacifique, Université de Polynésie Française et École

Doctorale de Sciences de l'Environnement, Université d'Aix-Marseille ; en collaboration avec J.-C. Gartner, A.A. Petrenko et E.Martinez.

- Depuis octobre 2015 : L.Rousselet, *Étude du couplage entre physique et biogéochimie à la sousmésos-échelle*. École Doctorale de Sciences de l'Environnement, Université d'Aix-Marseille ; en collaboration avec A.A. Petrenko.

Stages Étudiants de Master 2 ou d'École d'Ingénieurs

- 2006 : P. De Gaetano (Tesi di Laurea in Scienze Ambientali, Università di Genova), *Gestione di un impianto di maricoltura : sviluppo del modello advettivo-dispersivo POM-LAMP3D tramite il modulo degradativo e analisi degli impatti ambientali*.
- 2007 : Z. Hu (Master d'Océanographie, Marseille) , *Suivi de structures tourbillonnaires et filamentaires dans le Golfe du Lion*.
- 2008 : R. Campbell (Master d'Océanographie, Marseille), *Évaluation de l'impact d'une structure tourbillonnaire de méso-échelle sur la structuration du réseau trophique planctonique dans le golfe du Lion*.
- 2009 : H. Berger (Master et ISITV, Toulon), *Étude numérique lagrangienne des parcours typiques des masses d'eaux en Méditerranée Nord Occidentale*.
- 2010 : A. Rumyantseva (Master of Physics, University of Moscow), *Turbulent measurements in North Western Mediterranean using SCAMP (Self Contained Autonomous MicroProfiler)*.
- 2010 : M. Kersalé (Master d'Océanographie, Marseille), *Etude numérique de la collision d'un Meddy avec une montagne sous-marine* .
- 2011 : A. Boyron (Ecole normale supérieure de Lyon), *Comparaison de l'activité méso-échelle entre différents modèles numériques 3D de circulation*.
- 2012 : R. Rainaud (Master d'Océanographie, Marseille), *Mesures de turbulence océanique dans le golfe du Lion : expérimentation et interprétation*.
- 2013 : A.-M. Rammou (Master d'Océanographie, Marseille), *Étude numérique Lagrangienne de la connectivité en Mer Méditerranée*.

- 2015 : L. Rousselet (Master d’Océanographie, Marseille) *Étude de la circulation à méso-échelle et ses implications sur la biogéochimie en mer de Corail*.

1.4 Activités collégiales

Depuis la création, en 2012, de l’UMR MIO - Institut Méditerranéen d’Océanologie, je suis responsable de l’animation de l’Axe Transverse “Couplage Physique-Biogéochimie-Biologie”. De ce fait, je suis membre du Comité Exécutif et du Conseil Scientifique du MIO. Au sein du laboratoire MIO, j’ai été aussi pour 6 ans un des responsables de l’organisation des séminaires de laboratoire et membre suppléant du comité de suivi du Service Atmosphère Mer. Auparavant, de 2008 à 2009 et ensuite en 2011, j’ai été membre du Conseil Scientifique de l’UMR 6535 LOPB – Laboratoire d’Océanographie Physique et Biogéochimique.

J’effectue une activité périodique d’expertise pour des revue internationales (J.Geophys.Res., Ocean Sci., Cont.Shelf Res., Nonlin.Processes Geophys., J.Atmos.Ocean.Tech., Ocean Model., Aquaculture, ...) et pour des programmes de financement de la recherche (TOSCA-CNES, CNFC et CNFH, LEFE-CNRS, EC2CO-PNEC, Programme postdoctoral IFREMER,...).

J’ai été deux fois membre d’un comité de sélection pour un poste de Maître de Conférences, à l’Université de Bretagne Occidentale en 2015 et à l’Université d’Aix-Marseille en 2011, ainsi qu’examineur d’une thèse de doctorat en Sciences de la Mer à l’Université de Bretagne Occidentale (A.David, 2012, *Fronts, tourbillons et transferts méridiens dans l’océan Austral au Sud de l’Afrique à partir de l’altimétrie satellitale*). Je suis actuellement membre du comité de thèse de deux étudiantes : A. Ioannou (LMD, Paris) et A.Vladiou (LOCEAN, Paris).

Enfin, de 2005 à 2007, j’ai été Membre du Conseil Scientifique de AISA (Association Italienne de Sciences de l’Environnement), que j’avais contribué à créer en 1996.

1.5 Organisation du manuscrit

La suite du manuscrit s’articule en quatre chapitres. Le prochain chapitre présente les différentes méthodologies que j’ai utilisées pendant mon activité de recherche. Les résultats principaux de mes études sur la dynamique océanique sont présentés dans le chapitre trois, tandis que le quatrième chapitre traite du couplage entre la physique et la biogéochimie. Ces deux cha-

pitres suivent une logique d'échelle descendante, de la méso- à la sousméso- à la micro-échelle. Enfin dans le chapitre cinq, je dresse un bilan de ces activités et je présente mes perspectives en termes de recherche et d'encadrement.

CHAPITRE 2

Méthodes

Afin de donner une vision d'ensemble de mon approche méthodologique, dans ce chapitre je présente de façon succincte l'ensemble des différentes méthodes que j'ai utilisées, appliquées mais aussi développées dans le cadre des mes travaux.

Sur la base des deux types de systèmes de référence qu'on peut utiliser pour décrire le mouvement d'un fluide en mécanique des fluides, je fais la distinction entre approche Eulérienne et Lagrangienne. La première décrit le champ de vitesse comme une fonction de l'espace et du temps. L'observateur est solidaire à un référentiel fixe et voit le champ entier à chaque instant, sans avoir d'information sur le mouvement des différentes particules fluides. La deuxième ne fixe pas un volume de contrôle, mais identifie des particules de fluide spécifiques et suit dans le temps leur déplacement dans l'espace.

Dans la première section j'introduis donc les modèles numériques Eulériens qui m'ont servi pour étudier la circulation océanique à différentes échelles, de la circulation côtière à l'échange inter-océanique et à la circulation de bassin. Selon les différentes périodes et sites d'étude, j'ai implémenté plusieurs codes numériques : POM, ROMS et SYMPHONIE, mais j'ai été aussi utilisateur des sorties de MERCATOR ou d'HYCOM.

Dans la deuxième section, je présente l'approche Lagrangienne, que j'ai utilisée pour travailler sur différents jeux de données issus de modèles numériques de circulation, de télédétection (satellite et radar) ou de bouées dérivantes. Ces travaux couvrent un spectre assez large qui va des modèles numériques à particules, à la connectivité marine, aux structures Lagrangiennes cohérentes et enfin aux techniques de largage et suivi de traceurs chimiques inertes.

Enfin, dans la troisième section, j'aborde la méthodologie plus récente, celle dite de stratégie adaptative d'observation, qui représente d'une certaine façon une synthèse et une combinaison des méthodes précédentes.

2.1 Modèles numériques Eulériens

Jusqu'aux années 60 du XX siècle, les études de dynamique océanique se basaient sur les données des campagnes océanographiques ou sur des modèles

théoriques, amenaient les scientifiques à se concentrer sur la circulation de large échelle et stationnaire, essentiellement par manque de connaissance. À la même période sont apparus aussi les premiers modèles numériques de circulation océanique du GDFL (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, de l'université de Princeton), qui, grâce à la très rapide évolution technologique de calculateurs numériques, ont pu commencer à partir des années 80 à simuler la circulation océanique avec une résolution inférieure au degré de latitude/longitude, au moins pour des domaines restreints [McWilliams 2016; Semtner 1995].

La modélisation numérique de la circulation océanique est donc une discipline très jeune puisqu'elle s'est essentiellement développée au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, bénéficiant de façon continue des progrès en matière d'outils de calcul automatique et s'appuyant, surtout au début, sur les développements de la prévision numérique du temps en météorologie. En effet, les équations qui décrivent le comportement de l'océan et de l'atmosphère sont très similaires. Coiffier [2000] présente un très intéressant aperçu historique des techniques qui ont servi à la construction des modèles de prévision numérique du temps, basés sur la discrétisation et la résolution numérique des ces équations, c'est-à-dire déterminer les valeurs futures de ces grandeurs caractéristiques en partant de valeurs initiales connues grâce aux observations.

2.1.1 Modèles de circulation océanique

Le modèle numérique POM [*Princeton Ocean Model*, <http://www.ccpo.odu.edu/POMWEB>, Mellor 1998] a été développé pour des études de la circulation côtière. À la différence des modèle GFDL à vocation d'étudier la circulation globale, POM a une surface libre, des coordonnées verticales qui suivent la bathymétrie et des coordonnées horizontales curvilignes. Le mélange vertical est simulé grâce au modèle de fermeture de la turbulence de Mellor et Yamada [1974]. Avec le développement du web, POM a été un des premiers codes numériques à être mis en téléchargement libre et gratuit sur le web. Les caractéristiques techniques de POM étaient idéales pour approcher l'étude de la circulation autour du promontoire de Portofino [Doglioli et al. 2004b], basée sur l'implémentation d'abord d'un modèle idéalisé (pente bathymétrique exponentielle, promontoire de forme carrée, jet côtier gaussien) suivi d'une configuration plus réaliste basée sur topographie à haute résolution et mesures courantologiques.

Le code ROMS [*Regional Ocean Model System*, <http://www.myroms.org/>, Shchepetkin et McWilliams 2005] est un modèle océanique à équations primitives avec surface libre et coordonnées suivant la bathymétrie, large-

ment utilisé par la communauté scientifique pour une vaste gamme d'applications. ROMS comprend des algorithmes physiques et numériques précis et efficaces et plusieurs modèles couplés pour les applications biogéochimiques, bio-optiques, sédiments et glaces de mer. Il comprend également plusieurs schémas de mélange vertical et d'emboîtement de grilles à niveaux multiples. *Penven et al.* [2008] ont développé ROMStools (www.brest.ird.fr/Roms-tools), un paquet de logiciels en langage Matlab, qui fournit une aide très précieuse à l'utilisateur de ROMS dans l'implémentation d'une configuration du code pour une région océanique choisie. En exploitant les bases de données globales, ROMStools prépare très rapidement les grilles, la topographie, les forçages à la surface et les conditions initiales et aux frontières pour des simulations climatologiques de circulation océanique. Cette facilité d'usage entre autre me permet d'utiliser un code qui représente l'état de l'art en modélisation numérique de l'océan dans mes enseignements en Master 1 (cours Modélisation de la circulation océanique, voir section Enseignement). Pour ce qui concerne la recherche, j'ai participé au développement de plusieurs modèles numériques de circulation basés sur le code ROMS pour différentes régions océaniques (Figure 2.1) :

- le bassin du Cap [une simulation climatologique décennale, résolution à $1/10^\circ$, *Doglioli et al.* 2007] ;
 - l'archipel d'Hawaii [six simulations décennales avec différents forçages atmosphériques et conditions aux frontières, résolution $1/10^\circ$, *Kersalé et al.* 2011] ;
 - l'archipel des Marquises [simulation décennale, grilles emboîtées avec résolution $1/15^\circ$ et $1/45^\circ$, *Raapoto et al.* 2018] ;
- ainsi que une configuration idéalisée pour étudier la collision d'un Meddy (*Mediterranean Eddy*) contre une montagne sous-marine [Figure 2.2 *Kersalé et al.* 2011].

Pour les études de la circulation en Mer Méditerranée, nous avons utilisé le code SYMPHONIE [<http://sirocco2.omp.obs-mip.fr/outils/Symphonie/Accueil/SymphoAccueil.htm>, *Marsaleix et al.* 2008]. SYMPHONIE résout les équations primitives en adoptant des coordonnées sigma généralisées avec possibilité d'hybridation et une grille horizontale curviligne. Si les caractéristiques techniques de SYMPHONIE sont plutôt similaires à celles de POM et ROMS, l'utilisation de ce code a permis de bénéficier d'implémentations réalistes déjà développées pour la Méditerranée Nord-Occidentale [e.g. *Estournel et al.* 2007] ainsi que d'une fructueuse collaboration avec les collègues de l'Observatoire Midi-Pyrénées qui a mené au développement d'un schéma d'advection-diffusion de type *upwind* [*Hu et al.* 2009]. Cette configuration de SYMPHONIE avec grilles emboîtées à 3 km et 1 km de résolution a été exploitée pour étudier la formation des tourbillons côtiers du Golfe du Lion

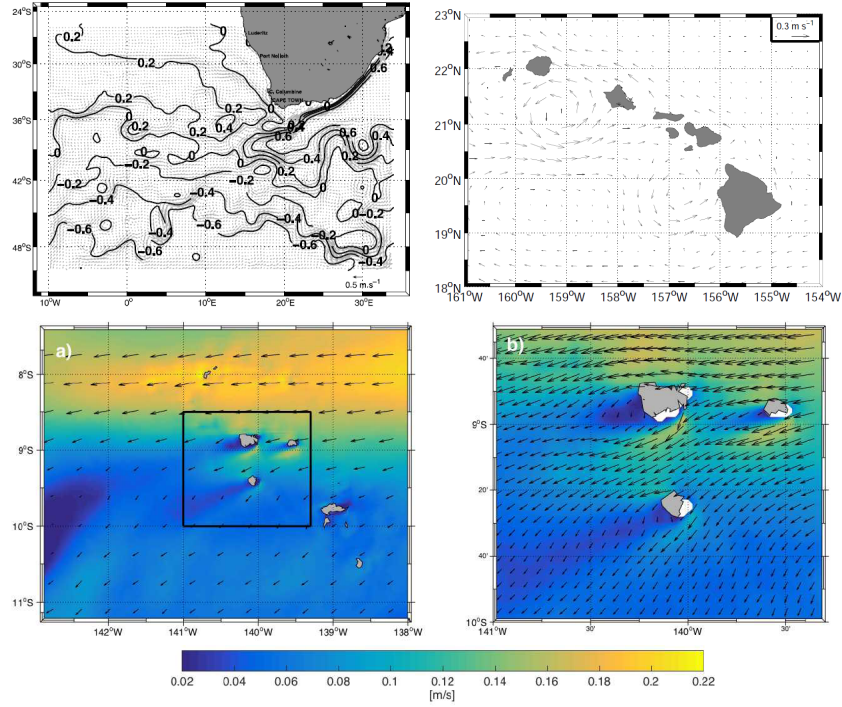


FIGURE 2.1 – Haut à gauche. Moyennes décennales de la surélévation (m, isolignes) et des courants barotropes (ms^{-1} , vecteurs) du modèle de circulation du bassin du Cap. D'après *Doglioli et al.* [2006]. Haut à droite. Moyenne pluriannuelle des courants à 40 m de profondeur autour de archipel d'Hawaii issues du Run-F de *Kersalé et al.* [2011]. Bas. Moyenne pluriannuelle des courants à 10 m de profondeur autour de archipel des Marquises. À droite zoom sur la région entourée par le carré noir de la figure à gauche. D'après *Raapoto et al.* [2018].

en s'appuyant sur les données des campagnes Latex08 et Latex09 [*Hu et al.* 2009, 2011,b; *Kersalé et al.* 2013]. De plus, le modèle SYMPHONIE a été couplé à un modèle biogéochimique basé sur la plate-forme Eco3M [*Baklouti et al.* 2006], qui simule la dynamique non Redfieldienne de plusieurs cycles biogéochimiques découplés d'éléments biogènes et de différent types fonctionnels du plancton. La configuration développé par *Campbell et al.* [2013] prend en compte quatre types de nutriments (Nitrate, Ammonium, Phosphate et silicate), six groupes fonctionnels de plancton distincts (Pico-, Nano- et Micro-phytoplancton, Nano-, micro et meso-zooplancton), un groupe de bactérie hétérotrophes, la matière organique dissoute et particulaire.

Enfin, nous avons exploité les sorties du modèle MERCATOR (www.mercator-ocean.fr) dans ses configuration PSY2V3 [*Berline et al.* 2014]

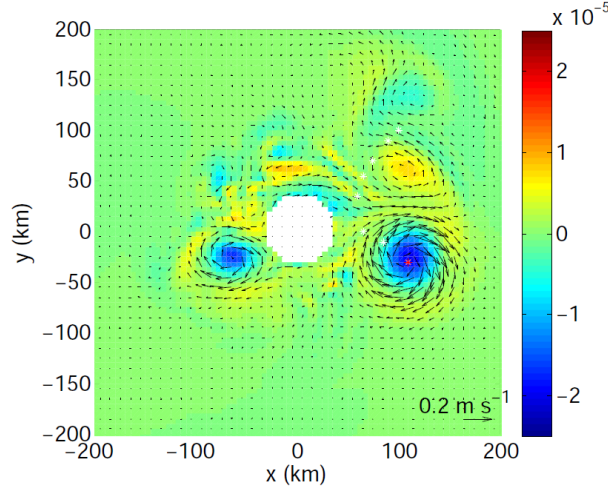


FIGURE 2.2 – Champ de vorticité relative (s^{-1}) et vecteurs de la vitesse à une profondeur de 800 m pour la simulation de la collision d’un Meddy contre une montagne sous-marine de forme idéalisée (cercle blanc) donnant lieu à la séparation en deux tourbillons de taille différente. D’après *Kersalé et al.* [2011].

et PSY4V1R3 ainsi que le modèle NLOM (*Naval Research Laboratory Layered Ocean Model*) [Rousselet et al. 2016].

2.1.2 Modèles de fermeture de la turbulence et comparaison avec mesures *in situ* de microstructure

Dans le cadre de l’utilisation du modèle SYMPHONIE, nous avons travaillé sur la mise au point du schéma de fermeture de la turbulence sur la verticale par comparaison avec les mesures *in situ* effectuées avec un SCAMP (*Self Contained Microstructure Profiler*).

La complexité de la modélisation du mécanisme du mélange vertical dans les modèles numériques de circulation océanique, et les enjeux associés en terme d’estimation des flux verticaux de traceurs, a donné lieu à une très vaste littérature. Nombreux sont les schémas de fermeture de la turbulence qui ont été proposés, se basant sur différentes grandeurs : l’énergie cinétique turbulente k et/ou son taux de dissipation ε et/ou son taux de dissipation spécifique ω et/ou la longueur de mélange ℓ . Dans la communauté de modélisation océanique, les schémas plus fréquemment utilisés sont le $k - k\ell$ de [Mellor et Yamada 1982], le $k - \varepsilon$ de [Rodi 1987], le $k - k\omega$ de [Wilcox 1988], le $k - \ell$ de [Gaspar et al. 1990] et le KPP de [Large et al. 1994]. Une

complexité supplémentaire est ajoutée à la modélisation par l'interaction du schéma de fermeture avec le choix des conditions aux limites (au fond et à la surface), qui lui aussi peut bénéficier d'une vaste documentation visant à modéliser différents mécanismes de forçage [e.g. *Craig et Banner* 1994; *Stacey et Pond* 1997; *Estournel et al.* 2001; *Warner et al.* 2005]. De plus, différentes fonctions de stabilité peuvent être choisies pour inclure l'effet des moments non locaux et des corrélations de contraintes de pression [e.g. *Galperin et al.* 1988; *Kantha et Clayson* 1994; *Canuto et al.* 2001]. Par conséquent, une comparaison avec des données *in situ* des résultats de modélisation numérique est fondamentale pour évaluer la fiabilité des choix de schéma de fermeture, de conditions aux limites et de leur interaction [e.g. *Warner et al.* 2005; *Arneborg et al.* 2007; *Ilicak et al.* 2008].

Sur l'exemple des travaux récents de *Reffray et al.* [2015], nous nous sommes concentrés sur les schémas $k - \varepsilon$ et $k - \ell$. Dans une série de simulations numériques effectuées avec le modèle SYMPHONIE adoptant ces deux schémas, nous avons fait varier les conditions aux frontières et les fonctions de stabilité [*Costa et al.* 2017a].

Les données issues des simulations ont été ensuite comparées avec celles obtenues par des mesures *in situ* réalisées à l'aide du SCAMP, qui fournit des profils verticaux de température T à très haute résolution. En intégrant le spectre des gradient verticaux de T on obtient une estimation directe du taux de dissipation de la variance de la température χ_T . *Batchelor* [1959] proposa un spectre théorique pour la distribution des gradients d'un traqueur conservatif transporté passivement dans un fluide incompressible avec nombre de Prandtl ¹ $Pr > 1$ et en écoulement turbulent. *Gibson et Schwarz* [1963] obtinrent le spectre de Batchelor unidimensionnel pour le gradient de T en fonction de χ_T , de la diffusivité moléculaire de la température D_T et du nombre d'onde de Batchelor $k_B = (\varepsilon/\nu D_T^2)^{1/4}$. Ainsi, en utilisant l'estimation de χ_T , le seul paramètre libre reste k_B . Si on trouve par ajustement de courbe le spectre de Batchelor théorique qui représente au mieux les mesures *in situ*, on peut donc obtenir une mesure de ε en renversant la formule de k_B [pour une explication détaillée, voir *Steinbuck et al.* 2009, et les références citées].

Nous avons analysé un total de 126 profils *in situ* d'étendue verticale variable entre 1 m et 100 m de profondeur. Les profils ont été recueillis au cours de diverses campagnes océanographiques menées par notre laboratoire pendant la période 2010-2014 dans différents sites du golfe du Lion (Figure 2.3). Puisque les mesures SCAMP ont été prises de manière opportuniste dans

¹ Nombre de Prandtl $Pr = \nu/D$, avec ν et D viscosité moléculaire et diffusivité du scalaire, respectivement. Pour l'eau de mer à 20°C, $Pr = 7$

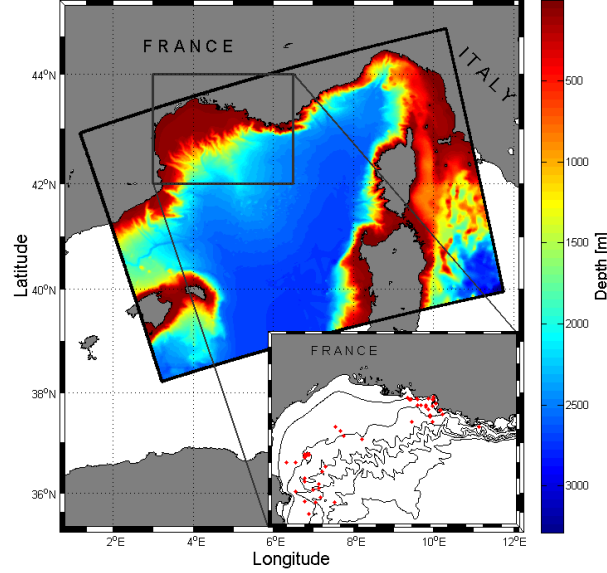


FIGURE 2.3 – Zone d’étude de la comparaison entre différents schémas de fermeture de la turbulence et mesures de microstructure. Le code couleur représente la bathymétrie à l’intérieur du domaine de calcul du modèle SYMPHONIE. Afin de mieux visualiser les sites où ont été effectuées les mesures SCAMP (points rouges) la zone du GdL à été agrandie et les isobathes 0, 50, 100, 500, 1000 et 1500 m représentées par les lignes noires. D’après *Costa et al.* [2017a].

des croisières principalement non dédiées à des mesures de turbulence, la répétition des profils était souvent impossibles par les contraintes d’organisation. Les données ont été recueillies principalement pendant l’été et avec des conditions météorologiques favorables aux opérations avec un petit bateau, généralement avec des hauteurs de vagues de moins d’un demi-mètre. Les précipitations étaient toujours absentes ou négligeables et le flux de flottabilité de surface positif pour 115 profils.

2.2 Approches Lagrangiennes

Depuis longtemps les océanographes ont tiré des informations sur la circulation de surface de l’océan à partir de la dérive d’objets flottants. *Sverdrup et al.* [1942] cite comme exemple les flotteurs des pêcheurs japonais ou les restes de jonques chinoises naufragées qui s’échouaient sur la côte ouest

des États-Unis, en indiquant la présence d’une circulation d’Ouest en Est dans le Pacifique Nord, faisant partie de la gyre subtropicale. L’introduction des bouteilles sans ou avec ancre flottante a permis les premières véritables expériences Lagrangiennes : celles de Benjamin Franklin en 1785 sur la côte Atlantique et celles de l’expédition du N/O Challenger entre 1872–1876 ². Avec la découverte pendant la deuxième guerre mondiale du SOFAR (*Sound Fixing and Ranging channel*), John Swallow a développé dans les années 50 le premier modèle de flotteur pour suivre la circulation de sub-surface ³, tandis que les études de la circulation de surface ont pu bénéficier de la transmission radio (e.g. le CODE - *Coastal Ocean Dynamics Experiment* le long de la côte Californienne en début des années 80) et de l’introduction dans les années 70 de la technologie du positionnement satellite. Ainsi, avec la collecte des premières quantités importantes de données de bouées Lagrangiennes, dérivantes sur de longues distances, les océanographes se sont confrontés au caractère fondamentalement turbulent des écoulements océaniques.

Les premiers modèles numériques à particules Lagrangiennes naissent au début des années 80 pour étudier la dispersion dans l’atmosphère [*Wilson et Sawford* 1996]. Rapidement ces techniques trouvent application aussi aux études de la dispersion en milieu marin [*Hunter* 1987]. Par rapport aux modèles Eulériens, les modèles Lagrangiens présentent certains avantages, comme souligné par *Dimou et Adams* [1993], ils peuvent simuler les trajectoires au dessus de la résolution de la maille de grilles ; ils permettent d’implémenter facilement des processus tels que le comportement des larves ; ils fournissent des estimations des temps de résidence. De plus du point de vue du temps de calcul, ces codes sont plus performants pouvant se concentrer seulement sur la région du domaine où sont présentes les particules et sont naturellement compatibles avec le calcul parallèle.

2.2.1 Modèles d’advection-dispersion

Les modèles numériques Lagrangiens se basent sur l’idée de reconstruire le champs de concentration d’un certain traceur ou polluant à travers l’analyse des trajectoires d’un échantillon statistiquement significatif de particules de fluide avec une certaine concentration initiale de ce traceur. Il faut donc intégrer l’équation

$$\mathbf{r}(t_1 + \Delta t) = \mathbf{r}(t_1) + \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} \mathbf{v}(\mathbf{r}(t), t) dt.$$

² Pour une review sur les mesures Lagrangienne de surface voir *Lumpkin et Pazos* [2007].

³ *Rosby* [2007] présente un historique des méthodologies Lagrangiennes pour la circulation de sub-surface.

où le champs de vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{r}(t), t)$ peut être séparé en une partie moyenne et une partie stochastique, issue des propriétés turbulentes de l'écoulement [Zannetti 1990] : $\mathbf{v} = \mathbf{U} + \mathbf{v}'$. La première composante peut être obtenue à partir d'un modèle Eulérien de circulation, mais aussi par des mesures synoptiques telles que les observations d'altimétrie satellite ou la télédétection radar. La deuxième composante est modélisée avec un processus stochastique Markovien.

Dans nos études sur la dispersion de polluants issus de l'aquaculture avec le code LAMP3D [*Lagrangian Assessment for Marine Pollution 3D model*, Doglioli et al. 2004a; De Gaetano et al. 2008, 2011], nous avons toujours adopté l'approximation dite de “random walk” dans la quelle le processus stochastique est autorégressif d'ordre zéro pour la vitesse [Allen 1982] :

$$\mathbf{r}_{n+1} - \mathbf{r}_n = \mathbf{U}_n \Delta t + \boldsymbol{\varrho}_n ,$$

avec le paramètre $\boldsymbol{\varrho} = (\varrho_x, \varrho_y, \varrho_z)$ qui est assigné à l'aide d'un générateur de nombres pseudo-aléatoires avec distribution de probabilité gaussienne à moyenne nulle et écart type $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$. La solution analytique de l'équation de dispersion en approximation de pure diffusion, fourni une estimation de l'écart type :

$$\sigma_x = \sigma_y = \sqrt{2K_h \Delta t} ,$$

$$\sigma_z = \sqrt{2K_z \Delta t} ,$$

avec K_h et K_z respectivement coefficients de diffusion horizontale et verticale, qui ont été estimés à partir des mesures de Bacciola et al. [1993]. Le logiciel LAMP3D a été développé sous Fortran et il est disponible en téléchargement libre depuis l'adresse www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/downloads.htm

Dans nos études sur la dispersion du zooplancton avec le code ROFF [*ROMS Offline Floats* de Carr et al. 2008] en raison de la plus haute résolution spatiale du modèle, nous avons utilisé un schéma numérique d'advection plus précis (le *Adams-Bashforth-Moulton predictor-corrector scheme*) et, à fin de réduire le nombre de paramètres du modèle, nous avons négligé la dispersion de sous-maille [Qiu et al. 2010, 2011, 2014]. Par contre, la même approche de séparation des composantes de la vitesse a été utilisée pour insérer une vitesse de natation des organismes, également estimée à partir de mesures *in situ* [Mauchline 1998], et ainsi reproduire les migrations nyctémérales de ces organismes.

2.2.2 Quantification des échanges océaniques et suivi de tourbillons

Le calcul de trajectoires des particules Lagrangiennes est une technique aussi très utile dans l'estimation des échanges entre différentes régions océaniques. En se basant sur la conservation de la masse d'un fluide incompressible et en négligeant les phénomènes diffusifs, *Blanke et Raynaud* [1997] ont développé une méthode qui repose sur un algorithme analytique et permet l'intégration à rebours de trajectoires. En régime stationnaire, les trajectoires des particules coïncident avec les lignes de courant et la méthode trouve aussi application pour des champs de courant variables. Le logiciel ARIANE (<http://stockage.univ-brest.fr/~grima/Ariane/ariane.html>) a été donc dédié au calcul des lignes de courant tridimensionnelles d'un champ de vitesse donné et à l'intégration des trajectoires de particules Lagrangiennes, qui ayant associé chacune un transport infinitésimal et des propriétés hydrologiques, permet, *in fine*, l'estimation des transports et des échanges de masses d'eau. Nous avons appliqué ARIANE pour l'étude des connexions entre Océan Indien et Atlantique autour de l'Afrique du Sud [*Doglioli et al.* 2006]. De plus, à fin de quantifier la fraction de ces échanges réalisée effectivement par l'intermédiaire d'une activité tourbillonnaire de méso-échelle nous avons combiné les expériences ARIANE avec une analyse en vitesse de rotation lagrangienne [ou *spin parameter* de *Veneziani et al.* 2004; *Veneziani et al.* 2005]. Ce type d'analyse des trajectoires des particules a été ensuite implémenté directement dans le code ARIANE et a trouvé de nouvelles applications pour nos études en Mer de Corail [*Rousselet et al.* 2016].

Afin de caractériser les transferts de masse associés au déplacement de tourbillons océaniques, nous avons développé un algorithme d'identification et de suivi spatio-temporel de ces structures [WATERS - *Wavelets Analysis for Time-tracking Eddies in Regional modelS*, *Doglioli et al.* 2007]. La première étape de l'algorithme consiste en l'identification des structures tourbillonnaires présentes dans le champ horizontal de vorticité du modèle numérique d'océan. L'identification repose sur des critères utilisant des transformées en paquets d'ondelettes pour représenter un tourbillon [*Jameson et Miyama* 2000; *Luo et Jameson* 2002]. Pour la définition en volume des structures cohérentes identifiées sur chaque plan horizontal, l'algorithme de repérage repose sur l'étude de la vorticité potentielle. L'extension verticale d'un tourbillon est ainsi bornée par l'immersion au-delà de laquelle le signe de l'anomalie de vorticité potentielle (tel qu'il est défini au niveau du cœur de la structure) s'inverse. La description fine de la structure radiale d'anticyclones et de cyclones particuliers se fait en étudiant notamment des sections interceptant le centre des tourbillons. Une fois identifiés certains cyclones

et anticyclones particulièrement bien formés, l’outil permet le suivi spatio-temporel de ces structures tridimensionnelles. La détermination du diamètre, de la vitesse et du volume du tourbillon, à chaque instant de son évolution permet enfin l’estimation de la masse transmise à travers un plan perpendiculaire à sa direction de propagation. Le logiciel WATERS été développé sous Matlab et il est disponible en téléchargement libre depuis l’adresse www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/downloads.htm

2.2.3 Estimation de la connectivité marine

Nous avons développé une méthode de régionalisation basée sur une estimation de la connectivité par le temps de transport qui permet de s’affranchir d’une hypothèse sur la durée maximum du transport, laquelle dépend des espèces. La méthode consiste à réaliser des simulations d’ensembles de trajectoires Lagrangiennes de $M(i, j)$ particules numériques, estimer le temps $T(i, j)$ de transit entre la maille i et la maille j et utiliser cette dernière estimation pour quantifier le temps moyen de transport (MCT , *Mean Connection Time*) entre chaque paire de maille (i, j) d’une grille dans laquelle on divise le domaine de calcul :

$$MCT(i, j) = \frac{1}{M(i, j)} \sum_{n=1}^{n=M(i, j)} T_n(i, j) \quad (2.1)$$

Ce temps de transport nous donne une mesure de la “distance océanographique” (OD , *Oceanographic Distance*) entre les deux mailles :

$$OD(i, j) = \min(MCT(i, j), MCT(j, i)) \quad (2.2)$$

qui est ensuite utilisée comme paramètre d’entrée d’une analyse par grappe pour agréger les mailles entre elles et définir ainsi une partition du domaine en régions connectées, séparées par des frontières plus ou moins perméables. Nous avons appliqué cela à toute la mer Méditerranée en utilisant les courants simulés par le modèle numérique de circulation PSY2V3 de Mercator Océan au $1/12^\circ$ de résolution (~ 8 km) et en divisant le bassin avec des grilles de 50 km de coté [Berline et al. 2014].

Plus récemment, nous avons travaillé sur l’application de la théorie des graphes à ces problèmes de connectivité marine. Nous avons mis en évidence le besoin d’une méthodologie rigoureuse dans le calcul des mesures de la théorie des graphes, quand elle est appliquée à l’issue de simulations numériques Lagrangiennes. En particulier nous proposons une nouvelle métrique pour la distance entre nœuds du graphe qui évite toute inconsistance dans le calcul de l’intermédiarité [Costa et al. 2017b].

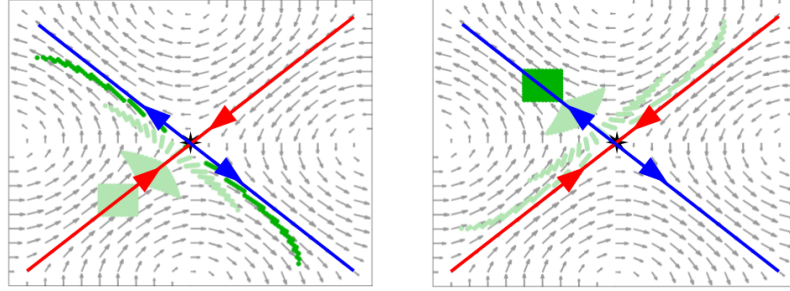


FIGURE 2.4 – Schéma représentant un champs de courant (vecteurs) caractérisé par la présence d'un point hyperbolique (étoile noire) et d'une LCS répulsive (ou variété stable, ligne rouge) et une LCS attractive (ou variété instable, ligne bleue). Dans le temps (du vert clair au vert foncé), les particules se propagent vers des points hyperboliques le long de la LCS répulsive en s'étirant (à gauche) et s'éloignent du point hyperbolique le long du LCS attractive en convergeant (à droite). Crédit : F.Nencioli.

2.2.4 Structures lagrangiennes cohérentes

Ces dernières années, les techniques lagrangiennes sont devenues de plus en plus importantes pour l'analyse des propriétés de mélange horizontal et de transport dans l'océan. Deux des diagnostics lagrangiens les plus couramment utilisés sont l'exposant de Lyapunov à temps fini (FTLE - *Finite Time Lyapunov Exposants*) [Haller et Yuan 2000], et l'exposant de taille finie Lyapunov (FSLE - *Finite Size Lyapunov Exposants*) [Aurell et al. 1997]. Les deux méthodes mesurent le taux de séparation des trajectoires de points initialement proches, et peuvent être appliquées à deux objectifs complémentaires : quantifier les processus de dispersion [e.g. Haza et al. 2010; Lumpkin et Elipot 2010; Schroeder et al. 2011], ou cartographier les structures cohérentes lagrangiennes (LCS - *Lagrangian Coherent Structures*) [e.g. d'Ovidio et al. 2004; Olascoaga et al. 2006; Lehahn et al. 2007; Beron-Vera et al. 2008]. Les LCS répulsives et attractives sont associées à des points hyperboliques de l'écoulement et fournissent des informations directes sur les modes de transport et de mélange [Mancho et al. 2008] : les particules se propagent vers des points hyperboliques le long des LCS répulsives (ou variétés stables) en s'étirant, tandis qu'elles s'éloignent des points hyperboliques le long des LCS attractives (ou variété instables) en convergeant (Figure 2.4). Les LCS attractives constituent donc des barrières de transport et contrôlent la formation des fronts [Lehahn et al. 2007]. La disposition spatiale de ces structures a un

grand impact sur l'environnement, non seulement parce qu'elles influencent la dispersion de tout matériel dans l'eau, mais aussi parce que, en séparant des régions dynamiquement distinctes du flux, elles peuvent définir des niches dynamiques fluides qui contribuent à la structuration des écosystèmes marins [d'Ovidio *et al.* 2010] et même aux distributions des principaux prédateurs [Cotté *et al.* 2011].

Les FSLE et les FTLE peuvent être appliqués aux champs de vitesse géostrophique dérivés de l'altimétrie satellitaire pour détecter de manière fiable les LCS en haute mer. La description ci-dessus du comportement des particules en présence d'un point hyperbolique est valable pour un champ stationnaire, mais il peut être appliquée pour un champ de vitesse variable dans le temps quand l'évolution temporelle de ce dernier est plus lente de l'advection des particules [Lehahn *et al.* 2007]. Dans le cas de l'océanographie cette contrainte est acceptable, étant donné que la vitesse de déplacement des structures cohérentes est beaucoup plus lente que la vitesse moyenne de l'écoulement. En effet, plusieurs études ont confirmé la corrélation étroite entre les structures détectées et les traceurs d'advection, tels que la température de surface de la mer (SST) [d'Ovidio *et al.* 2009] ou la concentration de chlorophylle de surface [Lehahn *et al.* 2007]. Cette approche satellitaire trouve des limites quand elle est appliquée dans les régions côtières, où la dynamique agéostrophique induite par les limites latérales et inférieures ainsi que les forçages littoraux, l'échantillonnage insuffisant, la présence de la côte représentent des facteurs limitants critiques pour l'altimétrie. Afin de contourner ce problème, nous avons travaillé dans deux directions.

D'un côté, des études de comparaison entre LCS identifiées par courantologie radar et par bouées dérivantes tel que celles menées par Haza *et al.* [2010] ont donné des résultats très encourageants, en particulier, tenant en compte l'expansion de la couverture radar le long des côtes (des radar HF mesurent en temps réel sur environ 50% des côtes des États-Unis et presque toute la côte ouest des États - Unis). Nous avons étudié le transport dans le Golfe de Trieste (Adriatique Nord) du champ de courant de surface mesuré par le réseau de radars côtiers à haute fréquence mis en place par les collègues italiens entre août 2007 et août 2008 [Berta *et al.* 2014].

D'un autre côté, dans le cadre du projet LATEX dans le Golfe du Lion, nous avons développé une méthodologie pour détecter directement *in situ* les LCS en milieu côtier par lâchers successifs de bouées dérivantes. Une approche itérative a été employée : une première estimation de la présence des LCS était basée sur les cartes d'altimétrie satellite, ensuite trois groupes de bouées ont été lâchées à quelques jours de distance dans différentes configurations spatiales choisies sur la base de l'analyse en temps réel des trajectoires des bouées lâchées précédemment et des données de courant mesurées par

ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) de coque [Nencioli et al. 2011].

La détection des LCS dans le golfe du Lion nous a permis aussi une estimation fine des échanges entre le milieu côtier et hauturier. À la différence des approches classiques, basées sur des sections dessinées sur les cartes bathymétriques, nous avons en effet calculé des échanges basés sur des sections à travers les LCS identifiées de la façon décrite ci-dessus. Cette approche se base donc sur l’analyse intégrée des observations issues de :

- i) bouées lagrangiennes, dont les trajectoires servent à identifier les LCS mais aussi à supprimer le signal associé aux oscillations quasi-inertielles ;
- ii) ADCP de coque et TSG pour la mesure des profils de courant et des propriétés hydrologiques des différentes masses d’eau ;
- iii) images satellites d’altimétrie et de température de surface pour positionner et suivre ces masses d’eau [Nencioli et al. 2016].

2.2.5 Estimation *in situ* des coefficients de mélange horizontal

Le nombre d’estimations quantitatives du coefficient de diffusion due à la turbulence sur l’horizontale, K_h , à partir d’observations *in situ* en fonction de l’échelle a augmenté avec les progrès technologiques. Des estimations de K_h peuvent être obtenues à partir d’approches eulériennes ou lagrangiennes. En général, les estimations eulériennes sont obtenues à partir de l’analyse par télédétection [Holloway 1986; Ferrari et Nikurashin 2010], alors que des études lagrangiennes ont été développées pour calculer ce coefficient *in situ*. Les estimations Lagrangiennes de K_h peuvent être dérivées des trajectoires d’instruments dérivant librement, tels que les bouées de surface et les flotteurs-profileurs [Davis 1991] ⁴. Les coefficients de dispersion turbulente dérivés par ces méthodes sont caractéristiques des processus de méso-échelle océanique. Au cours des dernières années, le progrès dans la technologie des bouées dérivantes a favorisé le développement d’études lagrangiennes spécialement conçues pour étudier les dynamiques côtières à des échelles spatiales et temporelles plus réduites [e.g. Haza et al. 2010; Ohlmann et al. 2012; Schroeder et al. 2012]. Ces études ont permis d’améliorer notre compréhension de la contribution des processus locaux et non locaux dans la régulation des dispersions relatives à des échelles inférieures au rayon de Rossby de déformation. De plus, la quantification de K_h au sous-mètre a été étudiée récemment par Poje et al. [2014].

Une troisième application de la détection des LCS *in situ* grâce au largage en mer simultané de plusieurs bouées dérivantes (voir section précédente),

⁴Pour une révision étendue de ces méthodes, voir LaCasce [2008].

concerne l'utilisation du taux d'étirement pour l'estimation du coefficient de mélange horizontal K_h à la sousmésos-échelle [Nencioli *et al.* 2013]. Cette méthode est basée sur l'hypothèse d'équilibre entre l'étirement du à la dynamique à mésos-échelle et le mélange à petite échelle. Cette approche est analogue à celle adoptée par *Flament et al.* [1985] qui combinaient les variations de température observées le long d'une radiale à travers un front pendant une campagne en mer avec des images satellite successives de la température de surface. Pour un front à l'équilibre, l'équation d'advection-diffusion peut se simplifier sous la forme :

$$-\gamma(x - x_0) \frac{dT}{dx} = K_H \frac{d^2T}{dx^2}. \quad (2.3)$$

où γ est le taux d'étirement. Une solution analytique de cette équation peut être la fonction d'erreur [e.g. *Abraham et al.* 2000]

$$T(x) = C_1 + C_2 \operatorname{erf}(C_3 (x - C_4)) \quad (2.4)$$

avec

$$C_1 = \frac{T_2 + T_1}{2}; \quad C_2 = \frac{T_2 - T_1}{2}; \quad C_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\gamma}{K_H}}; \quad C_4 = x_0 \quad (2.5)$$

où $T_{x \rightarrow -\infty} = T_1$ et $T_{x \rightarrow \infty} = T_2$ sont les conditions aux limites loin du front. Les quatre coefficients dépendent tous de quantités physiques mesurables en effectuant une section hydrologique à travers le front. En particulier, en renversant l'équation pour le coefficient C_3 on obtient une estimation de K_h :

$$K_h = \frac{\gamma}{2C_3^2} \quad (2.6)$$

à partir de la valeur de C_3 obtenue par interpolation des données de température et salinité (Figure 2.5). Grâce aux données de la campagne Latex10, nous avons à disposition une série d'estimations de la largeur du front obtenues avec des mesures de température et de salinité effectuées avec le thermosalinographe de bord du N/O Téthys II le long de radiales transversales au front. Ainsi nous avons obtenu une estimation statistiquement significative de K_h à l'échelle de la largeur du front (1 à 4 km) [Nencioli *et al.* 2013].

La détermination de K_h , associée à des échelles plus petites, est habituellement développée à partir d'expériences basées sur des traceurs inertes. Parmi les différents types de traceurs, les colorants fluorescents, en particulier la rhodamine B, ont été largement utilisés pour étudier la diffusion turbulente [Emery *et Thomson* 2001]. Bien que de nombreuses expériences de coloration aient également été réalisées dans des milieux côtiers ou des lacs à eau

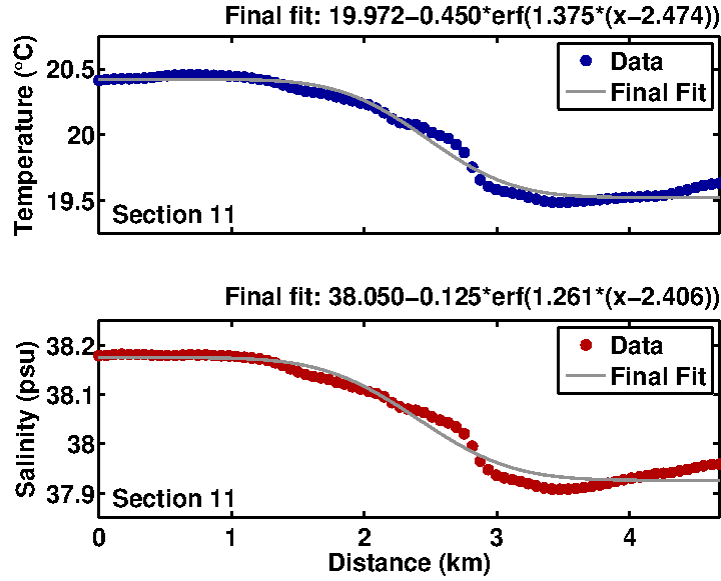


FIGURE 2.5 – Exemple d’interpolation par fonction d’erreur (lignes grises) des données de température (points bleus) et de salinité (points rouges) issue d’une radiale effectuée à travers le front étudié pendant la campagne Latex10. D’après *Nenciooli et al.* [2013].

douce, très peu de ces études ont été réalisées dans des zones côtières stratifiées à forte activité méso-échelle. Parmi les exceptions notables figurent les expériences de teinture de rhodamine dans la baie de Massachusetts [*Geyer et Ledwell* 1994] et le projet Coastal Mixing and Optics (CMO) [*Sundermeyer et Ledwell* 2001]. Des expériences de coloration ont été déployées dans les thermoclines stratifiées sur le plateau continental de la mer Celtique [*Inall et al.* 2013; *Stashchuk et al.* 2014] et dans le nord de la baie de Monterey, en Californie par *Moniz et al.* [2013].

L’hexafluorure de soufre (SF_6), un gaz stable et inerte détectable à des concentrations un million de fois inférieures aux colorants, a été principalement utilisé pour les expériences de traceur en océan ouvert. Le principal avantage du SF_6 est qu’en raison de sa faible concentration de fond dans l’eau de mer, il peut être utilisé par de relativement petites injections d’eau de mer saturée en SF_6 [*Ledwell et al.* 1998]. Néanmoins, sa faible solubilité dans l’eau rend plus difficile l’injection que les traceurs de colorants. Depuis le milieu des années 1980, le SF_6 a été largement utilisé dans les études des processus turbulents horizontaux. Plus récemment, le CF_3SF_5 (pentafluorure de soufre trifluorométhylé), avec les mêmes propriétés et le même comportement,

est apparu comme une alternative viable à SF_6 pour des expériences à grande échelle [Ho et al. 2008; Banyte et al. 2013; Holtermann et al. 2012]. Étant donné que l'utilisation du CF_3SF_5 n'était pas très répandue pendant la mise en œuvre de notre projet, nous avons utilisé plutôt le SF_6 . Les estimations des diffusivités latérales peuvent être utilisées pour comprendre la dynamique et le mélange au sein de patches d'eau spécifiques, et donc pour évaluer les taux de certains processus biogéochimiques. Par exemple, au cours du projet PRIME (*Plankton Reactivity In the Marine Environment*), l'évolution d'un patch SF_6 a permis de comprendre quantitativement l'apport en éléments nutritifs dans la couche mixte d'un tourbillon anticyclonique dans l'Atlantique Nord [Martin et al. 2001; Law et al. 2001]. Combiné à l'enrichissement en fer, le traceur SF_6 a permis d'évaluer les réponses des écosystèmes à l'ajout de fer [Martin et al. 1994; Cooper et al. 1996; Tsumune et al. 2005, 2009; Law et al. 2006].

Pendant la campagne Latex10, nous avons effectué le largage de 7000 litres d'eau de mer saturée en SF_6 et suivi sa dispersion dans les eaux du Golfe du Lion. Pour effectuer le largage du traceur et les cartographies subséquentes dans un cadre de référence Lagrangien, nous avons lâché avant le largage une bouée dérivante qui a été ensuite considérée comme le centre de notre système de référence. Il s'agissait ensuite de résoudre un problème balistique classique pour obtenir, en temps réel et dans une masse d'eau en mouvement, la direction et la distance jusqu'au prochain tournant d'une route géométrique choisie [Doglioli et al. 2013]. En particulier, nous avons décidé, sur la base d'une étude de faisabilité (campagne Latex00 et première partie de la campagne Latex10), une route à forme de spirale carrée (Figure 2.6).

La même étude a montré que la précision et la fréquence d'acquisition des positions du navire et de la bouée de référence sont des aspects clés pour la réussite de la mise en œuvre de cette méthodologie. Le logiciel développé pour l'expérience Latex10 est inclus dans la paquet logiciel LATEXtools. LATEXtools est écrit en Matlab, est également équipé d'une série d'accessoires graphiques et peut être téléchargé gratuitement sur le site web de LATEX www.mio.univ-amu.fr/LATEX ou depuis mes pages web personnelles www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/downloads.htm.

La zone pour l'expérience de dispersion du traceur a été sélectionnée en combinant les résultats du modèle numérique avec ceux de l'analyse en temps quasi réel des FSLE calculés à partir des courants dérivés de l'altimétrie satellitaire [Nencioli et al. 2011]. Le traceur a été libéré dans un patch de dimensions d'environ $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ à une profondeur de 7 m. Après largage, l'évolution horizontale du traceur a été suivie pendant 7 jours au cours d'une série de 4 cartographies horizontales successives effectuées à la profondeur de largage du traceur [Kersalé et al. 2016]. Le système analytique utilisé

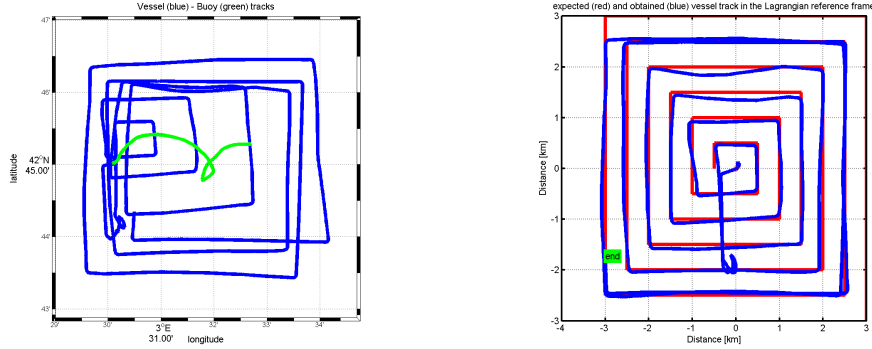


FIGURE 2.6 – Gauche. Trajectoire de la bouée de référence (ligne verte) et route du bateau (ligne bleu) pendant le largage du SF_6 au cours de la campagne Latex10. Droite. Route du bateau (ligne bleu) dans le référentiel de la bouée superposée à la route géométrique espérée (ligne rouge). D’après *Doglioli et al.* [2013].

pour les mesures de SF_6 était basé sur l’extraction par purge et piégeage suivie d’une séparation et d’une détection par chromatographie en phase gazeuse par détecteur à capture d’électrons (voir *Kersalé et al.* [2016] pour une description détaillée).

Pour évaluer l’extension de l’aire impactée par la diffusion du traceur, nous avons utilisé deux méthodes. Les deux sont basés sur l’hypothèse qu’après le largage les concentrations de SF_6 peuvent être approximées par une distribution gaussienne [e.g. *Abraham et al.* 2000; *Sundermeyer et Ledwell* 2001; *Law et al.* 2006].

En suivant *Law et al.* [2006], nous avons effectué une première estimation de l’aire impactée à partir d’une isoligne de concentration choisie en fonction de la valeur maximale observée pendant une cartographie. Pour la seconde méthode, des ellipsoïdes gaussiens ont été ajustés à la cartographie horizontale de SF_6 en utilisant une optimisation non linéaire et non contrainte (Figure 2.7). Ainsi nous avons pu ensuite calculer les valeurs de la longueur de l’axe majeur (σ_l) et mineur (σ_w) de l’ellipse. Avec cette technique, la surface à l’intérieur de l’ellipsoïde gaussien peut être utilisée pour calculer une seconde estimation de la surface totale du patch SF_6 . Les quatre estimations successives de la surface impactée par le SF_6 , basées chacune sur les deux techniques, sont utilisées pour analyser l’évolution temporelle de son étalement. Les estimations de σ_l et σ_w sont utilisées pour calculer le coefficient de mélange de la façon suivante.

Au début la surface impactée est relativement petite, les effets de déformation sont négligeables et on peut appliquer un simple modèle de diffu-

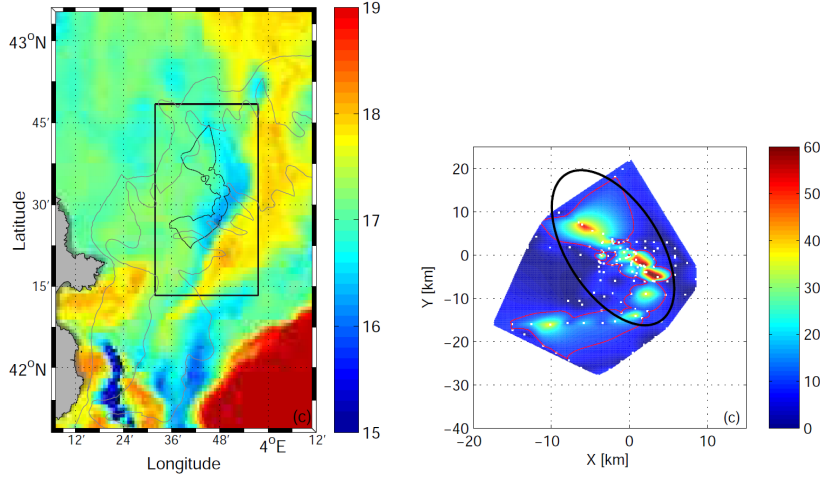


FIGURE 2.7 – Gauche. Isoligne de concentration de SF_6 de référence pendant la troisième cartographie (ligne noire) superposée à la carte de température de brillance satellite (pseudo-SST) du 15 septembre 2010. Droite. Carte de concentration en SF_6 [fmol L^{-1}] dans le référentiel du centre de masse de l’aire impactée à laquelle sont superposées la même isoligne de référence (en rouge) de la figure à gauche et l’ellipse d’interpolation optimisée (en noir). D’après *Kersalé et al.* [2016].

sion horizontale de Fick :

$$K_h = \Delta\sigma_l^2/2\Delta t = \Delta\sigma_w^2/2\Delta t \quad (2.7)$$

avec Δt intervalle de temps entre les cartographies successives.

Pour des temps plus longs, de l’ordre de quelques jours, l’étirement du patch ne peut plus être négligée, de sorte que on a

$$\sigma_l^2 = (\sigma_{l_0}^2 + \frac{K_h}{\gamma})e^{2\gamma t} - \frac{K_h}{\gamma} \quad (2.8)$$

$$\sigma_w^2 = (\sigma_{w_0}^2 - \frac{K_h}{\gamma})e^{-2\gamma t} + \frac{K_h}{\gamma}. \quad (2.9)$$

Cet ensemble d’équations, connu sous le nom de modèle diffusion-déformation, permet de calculer le taux de déformation (γ) et la diffusivité horizontale effective (K_h), comme fait par exemple par *Sundermeyer et Ledwell* [2001].

Dans le cadre de l’expérience Latex10, les mauvaises conditions météorologiques et en particulier le fort vent de Mistral qui a commencé à souffler pendant le largage du traceur et continué pendant les deux premières cartographies, ont généré une forte perte de traceur vers l’atmosphère, empêchant

une application correcte du modèle de Fick. Toutefois, une fois estimée la perte atmosphérique en fonction de la vitesse du vent (détails dans *Kersalé et al.* [2016]), nous avons ensuite utilisé les données de la troisième et quatrième cartographie pour obtenir une estimation du K_h à partir du modèle de diffusion-déformation.

2.3 Stratégies adaptatives pour les campagnes en mer

La communauté océanographique française a su gagner, depuis plusieurs années, une position de leadership dans les études du couplage physique-biogéochimie aux fines échelles, ayant développé une approche interdisciplinaire capable d'intégrer modélisation réaliste haute résolution, analyse multi-satellite et échantillonnage adaptatif dans des campagnes tels que POMME [*Mémery et al.* 2005], LATEX [*Petrenko et al.* 2017], KEOPS2 [*d'Ovidio et al.* 2015], SPURS/STRASSE [*Reverdin et al.* 2015]. Lors du projet LATEX, la stratégie générale était basée sur le déploiement de deux bateaux : l'un dédié à l'analyse en temps réel d'informations issues simultanément de la télédétection spatiale (altimétrie et AVHRR), de mesures *in situ* à haute fréquence des courants (ADCP, bouées dérivantes) et de l'hydrologie de surface (TSG) [*Nencioli et al.* 2011, 2013], l'autre au largage d'un traceur passif [*Doglioli et al.* 2013; *Kersalé et al.* 2016]. C'est dans le cadre de ce projet que nous avons commencé à développer un ensemble de logiciels dédiés à l'aide à la mise en place de stratégies adaptatives d'observation pendant les campagnes en mer, nommé ensuite SPASSO (*Software Package for an Adaptive Satellite-based Sampling for Ocean campaigns*, www.mio.univ-amu.fr/SPASSO). Ce type d'approche peut être résumé de la façon suivante (Figure 2.8). Les mesures satellite fournissent des cartes synoptiques en temps quasi-réel des courants, de la SST et de la concentration de chlorophylle de surface. Ces données sont téléchargées et analysées automatiquement par des algorithmes fonctionnant plusieurs fois par jour sur un ordinateur à terre, qui fournit cartes et diagnostics aux océanographes à terre et sur le bateau. Sur la base de ces informations, l'équipe à terre rédige un bulletin avec l'analyse et les conseils de positionnement des échantillonnages *in situ* qui est envoyé à bord. L'équipe en mer décide le plan de campagne à venir sur la base de ces conseils et des résultats préliminaires obtenus à bord. La fréquence de la mise à jour du plan de campagne dépend de plusieurs facteurs : tout d'abord des objectifs scientifiques (mésos- versus sousmésos-échelle), ensuite des contraintes techniques (fréquence d'émission

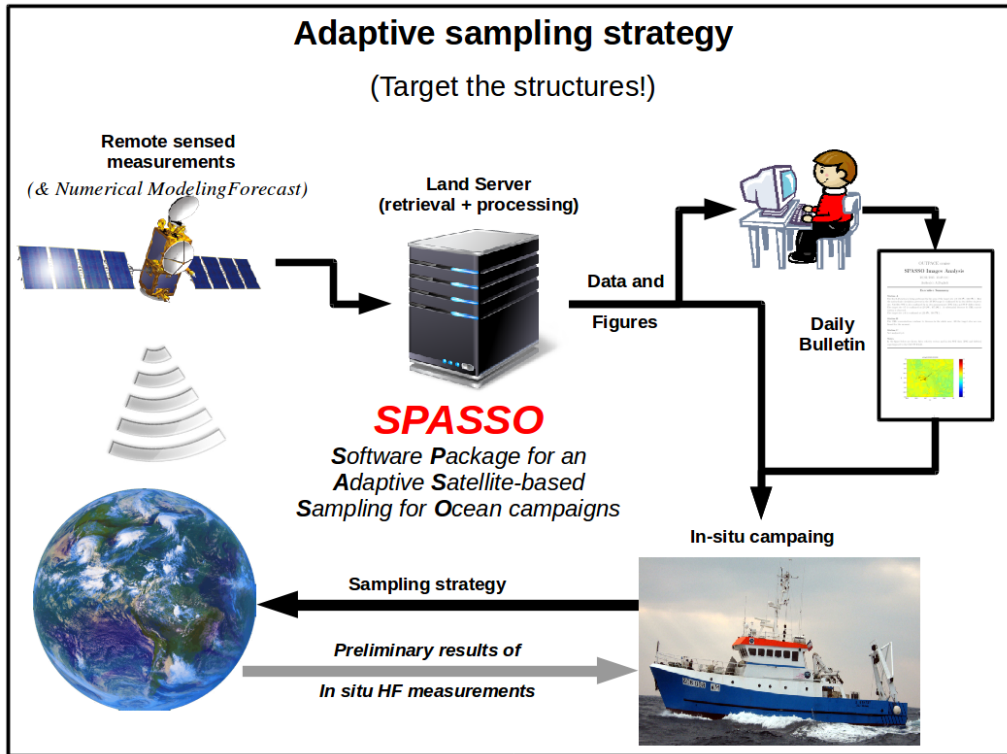


FIGURE 2.8 – Schéma de fonctionnement de la mise en place de stratégies adaptatives pendant les campagnes en mer à l’aide du paquet logiciel SPASSO (*Software Package for an Adaptive Satellite-based Sampling for Ocean campaigns*).

des données satellite, temps de calcul des diagnostics, opérabilité du bateau océanographique). Ci-dessous, je présente deux campagnes récentes pendant lesquelles ce type de stratégie à été mise en œuvre.

L’objectif scientifique du projet OUTPACE était de donner une description zonale de la biogéochimie et de la diversité biologique dans le Pacifique tropical sud-ouest le long d’un gradient de disponibilité nutritive et de produire une étude détaillée de la production biologique et de son devenir dans trois sites contrastés, avec une attention particulière pour la production supportée par la fixation d’azote [Moutin *et al.* 2017]. Pendant la campagne le N/O Atalante a effectué une route le long d’un gradient O-E depuis la Nouvelle-Calédonie jusqu’à Tahiti. Quinze stations de courte durée (~24h) et 3 stations “Lagrangiennes” de longue durée (~7 jours, *LD stations*) ont été effectuées. La route du navire a été guidée sur la base des informations en temps réel issues de l’imagerie satellite (altimétrie AVISO et cartes SST et de couleur de l’océan fournies par le CLS). Les données satellite ont été

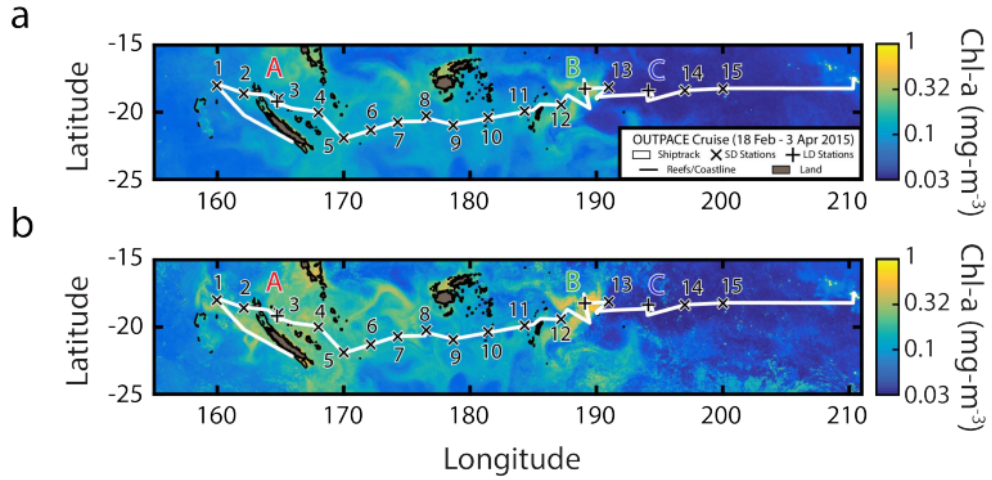


FIGURE 2.9 – Transect de la campagne OUTPACE superposée (en haut) à la moyenne arithmétique et (en bas) à la moyenne quasi-Lagrangienne pondérée de la concentration de la chlorophylle de surface. Dans la carte du bas, les données satellitaires sont pondérées dans le temps par la distance de chaque pixel par rapport à la position quotidienne moyenne du navire pour l'ensemble campagne. La ligne blanche affiche la route effectuée, le long de laquelle sont reporté les positions des stations de courte durée (x et chiffres) et de longue durée (+ et lettres). Les récifs coralliens et les côtes sont affichés en noir, la terre est grise. Les produits satellite de couleur de l'eau a été fourni par CLS avec le soutien du CNES. D'après *Moutin et al.* [2017].

automatiquement traitées par le logiciel SPASSO de façon à obtenir des diagnostics Eulériens et Lagrangiens de la circulation et de la biogéochimie : cartes du paramètre d'Okubo-Weiss, FSLE, taux de rétention, advection zonale et méridienne, cartes de SST et de concentration de Chlorophylle de surface. Les bulletins contenant l'analyse des informations satellite et la proposition des sites d'échantillonnage ont été rédigés chaque jour. La série complète des 42 bulletins rédigés pendant la campagne est téléchargeable depuis le site web du projet OUTPACE (section "Adaptive Strategy") à l'adresse https://outpace.mio.univ-amu.fr/OUT_Figures/Bulletins/. La route de la campagne a été ainsi fortement modifiée par rapport au plan initial basé sur une radiale à latitude 19°S avec stations équidistantes (Figure 2.9).

La station LD-A a été effectuée au sein d'une recirculation anticyclonique caractérisée par une concentration relativement haute en Chlorophylle. Les conditions météorologiques sévères liées au développement du cyclone Pam qui a frappé les îles du Vanuatu, ont forcé à décaler la seconde station longue

LD-B à l'est de la position initialement prévue. L'imagerie satellite a permis de cibler un filament de très haute concentration en chlorophylle (relativement aux concentrations typiques de la zone) qui est mis en évidence grâce à la technique de la carte quasi-Lagrangienne (Figure 2.9b), dans laquelle les données satellitaires journalières sont pondérées dans le temps par la distance de chaque pixel par rapport à la position quotidienne moyenne du navire pour l'ensemble de la croisière. Enfin, la troisième station longue LD-C a été effectuée dans un tourbillon cyclonique dans les eaux des Îles Cook, dans la zone plus oligotrophe de la région du gyre du Pacifique Sud.

Pendant la campagne OSCAHR [*Observing Submesoscale Coupling At High Resolution; Doglioli 2015*], menée à l'automne 2015, nous avons échantillonné une structure de fine échelle en Mer Ligure, qui a été pré-identifiée en utilisant SPASSO pour l'analyse à la fois des données satellite et de modélisation numérique. Afin d'obtenir une cartographie la plus synoptique possible des relations qui existent entre la structure des communautés microbiennes et les concentrations en sels nutritifs au sein d'une structure dynamique à fine échelle, nous avons mis en œuvre un ensemble de moyens d'échantillonnage haute fréquence impliquant i) un système de prélèvement (par pompage) et d'analyse à haute fréquence d'échantillons prélevés en surface sur des radiales en continu à travers la structure et ii) un système de prélèvements d'échantillons d'eau à haute résolution verticale lors des stations de courte durée aux points de changement de cap entre chaque radiales. Ainsi, le long de la route du navire, diverses variables ont été mesurées à la surface (température, salinité, chlorophylle-a et concentrations de nutriments) ainsi que les profils verticaux de vitesse de courant. Nous avons également déployé un nouveau modèle de cytomètre en flux automatisé optimisé pour les cellules de petites tailles et peu fluorescentes, afin de caractériser en temps quasi réel la structure de communauté du phytoplancton des eaux de surface avec une résolution spatiale de quelques kilomètres et une résolution temporelle horaire. La dynamique physique verticale et les propriétés biogéochimiques de la zone étudiée ont été échantillonnées le long de la route par des profils CTD continus à haute résolution effectués grâce à un MVP (*Moving Vessel Profiler*) et lors de stations fixes par un système de pompage à résolution verticale de 1 m déployé à la place de la rosette [Marrec et al. 2018].

Dynamique océanique de la (sous)méso- à la micro-échelle

Dans ce chapitre je présente mes recherches en océanographie physique dynamique avec un fil conducteur de descente d'échelle spatio-temporelle.

Dans la première section, j'introduis tout d'abord la variabilité de méso-échelle pour ensuite résumer mes études sur les tourbillons du Bassin du Cap (Atlantique Sud-Est), de la mer de Corail (Pacifique Sud-Ouest) et autour des îles Hawaïi (Pacifique Nord-Est).

Dans la deuxième section, je présente la problématique de la circulation à méso et sousméso-échelle en milieu côtier, dont je me suis occupé dans trois sites d'étude en Méditerranée : principalement le Golfe du Lion, mais aussi le Golfe de Trieste et la zone du Promontorio de Portofino.

Enfin, je développe la problématique de la dispersion due à la turbulence, que j'ai abordée de nouveau dans le Golfe du Lion.

3.1 Tourbillons de méso-échelle

La variabilité méso-échelle se réfère généralement aux signaux océaniques avec des échelles spatiales de l'ordre du premier rayon de déformation de Rossby ¹. Dans l'océan, l'énergie de ces processus à méso-échelle dépasse généralement celle du débit moyen d'un ordre de grandeur ou plus. La majeure partie de l'énergie de la méso-échelle océanique est associée aux instabilités de la circulation de large échelle [Stammer 1997]. Les courants océaniques s'écoulent sinueusement et forment des méandres, qui peuvent se refermer et générer des tourbillons isolés. Ces processus sont très typiques des courants de bord aux moyennes latitudes et des systèmes frontaux mais des tourbillons de méso-échelle peuvent aussi se former par fusion de tourbillons

¹Le premier rayon de déformation de Rossby R_D mesure l'échelle spatiale à laquelle les effet de rotation de la Terre deviennent du même ordre que les effet de flottabilité. En approximation de flottabilité homogène, il est défini comme $R_D = \frac{NH}{f}$, avec N fréquence de Brunt-Väisälä, H profondeur et f paramètre de Coriolis. R_D varie en première approximation avec la latitude entre environ 300 km à l'équateur, quelques dizaines de km aux moyennes latitudes et quelques km aux hautes latitudes [Chelton *et al.* 1998].

de plus petite taille [e.g. *Di Lorenzo et al.* 2005] et/ou par forçage de vents [e.g. *Mkhinini et al.*] et/ou topographique [e.g. *Aristegui et al.* 1994].

Les tourbillons de méso-échelle peuvent persister longtemps et se propager dans l’océan sur des longues distances. Par conséquent, ils jouent un rôle clé dans les budgets globaux des traceurs océaniques tels que la chaleur, le sel, le carbone et les nutriments. Les processus de méso-échelle ont également un impact important sur l’écosystème marin et sur la plupart des applications océanographiques opérationnelles, tels que la sécurité maritime, la surveillance de la pollution, l’industrie offshore, la pêche.

3.1.1 Le Bassin du Cap

La circulation océanique autour de l’Afrique du Sud joue un rôle clé dans la circulation thermohaline globale [*Gordon* 1986]. Le long de la côte orientale s’écoule le Courant des Aiguilles, qui est le courant de bord ouest le plus intense de l’océan mondial. À l’extrémité sud du continent africain le Courant des Aiguilles, en cessant de suivre la côte et en virant vers l’est, forme la Rétroflexion des Aiguilles, qui, se refermant de temps en temps, génère les tourbillons connus comme Anneaux des Aiguilles. Les Anneaux jouent un rôle clé dans l’échange entre l’Océan Indien et l’Océan Atlantique [*Gordon* 2003; *Richardson et al.* 2003]. Initialement, les Anneaux étaient considérés comme les tourbillons isolés qui pénétraient dans l’Atlantique au niveau du Bassin du Cap associés au courant du Benguela². Ensuite ce concept a été revisité pour mettre en évidence comment la région était caractérisée par la présence de nombreux cyclones et anticyclones interagissant entre eux, donnant lieu à de nombreux filaments et un fort mélange, en particulier dans la partie sud-orientale du bassin, pour cette raison dénommée “Chaudron du Cap”³.

L’activité tourbillonnaire de cette région a offert un cadre d’étude très approprié pour la mise en œuvre d’analyses fines de sortie de modèles numériques. Le logiciel WATERS a été utilisé pour analyser les sorties de la simulation climatologique décennale à $\frac{1}{10}^\circ$ effectué avec ROMS. Deux typologies de tourbillons ont été choisies : les anticyclones associés à la Rétroflexion et les cyclones qui se forment sur le plateau du Benguela (Figure 3.1). Le suivi a mis en évidence les trajectoires divergentes : vers l’équateur pour les anticyclones et vers les pôles pour les cyclones, comme observé aussi par altimétrie satellitaire par *Morrow et al.* [2004]. Les vitesses de translation estimées étaient aussi cohérentes avec celles déduites par altimétrie ou par suivi avec des flotteurs-profileurs RAFOS [*van Ballegooyen et al.* 1994; *Boebel et al.* 2003].

² [*Boebel et al.* 2003] parlent d’ “*isolated Agulhas Rings embedded in a sluggish Benguela Drift*”.

³ “*Cape Cauldron*”, *Gordon* [2003].

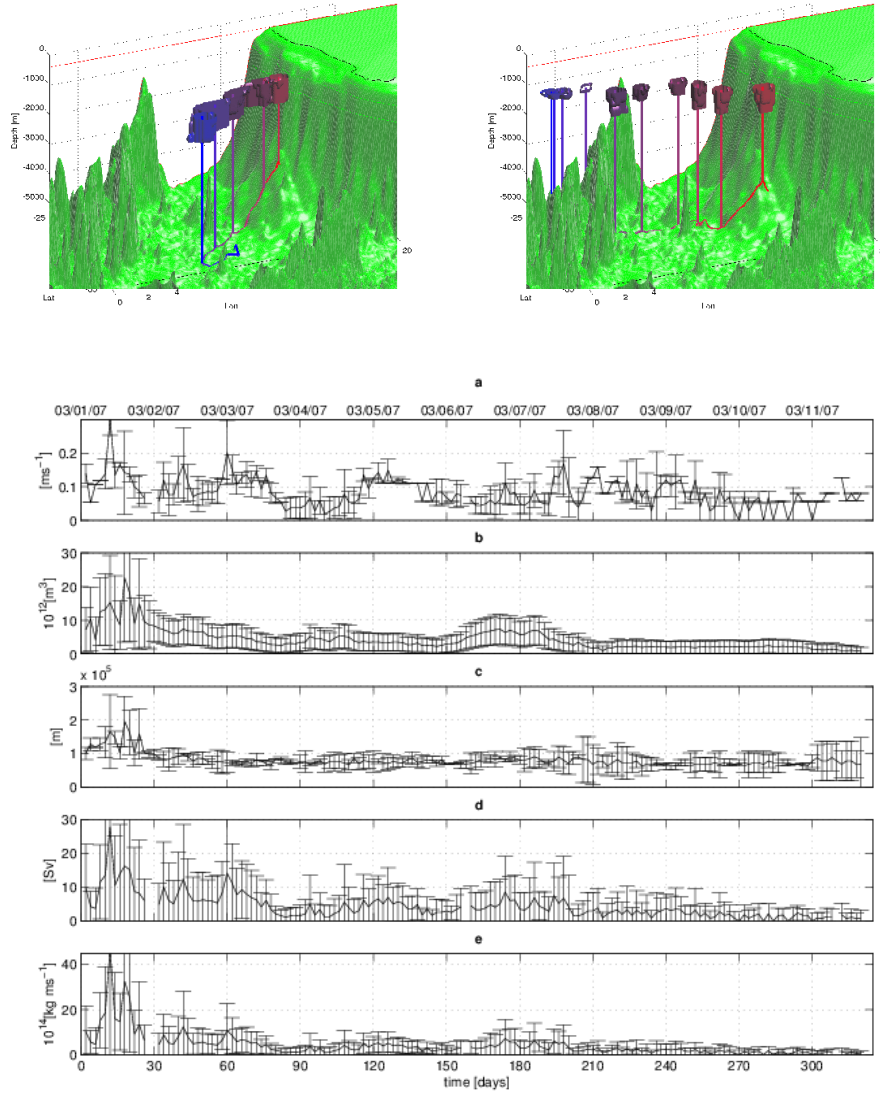


FIGURE 3.1 – Haut. Exemple de trajectoires et volumes d'un cyclone (à gauche) et un anticyclone (à droite) du Bassin du Cap, identifiés par le logiciel WATERS. Bas. Série temporelle de la vitesse de translation (a), du volume (b), du diamètre, du transport instantané (d) et de la quantité de mouvement instantanée (e) de l'anticyclone. D'après *Doglioli et al.* [2007]

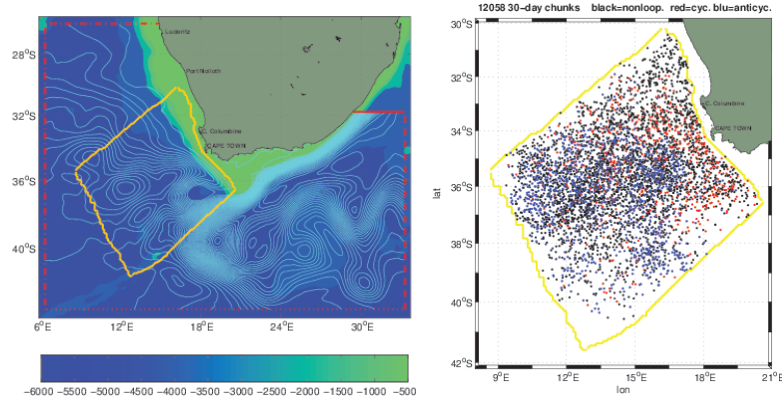


FIGURE 3.2 – Gauche. Isolignes de transport (S_v) entre Océan Indien (section indiquée par la ligne rouge en trait continu) et Atlantique (section indiquée par la ligne rouge en trait pointillé) superposées à la bathymétrie (couleurs). En jaune est indiquée la région d’analyse en vitesse de rotation. D’après [Doglioli et al. 2006] Droite. Portions anticycloniques (bleu), cycloniques (rouge) et sans rotation (noir) des trajectoires assurant un échange entre Océan Indien et Atlantique.

Afin d’effectuer une étude plus générale des connexions entre l’Océan Indien et l’Océan Atlantique, nous avons cherché à quantifier la fraction de ces échanges réalisée effectivement par l’intermédiaire d’une activité tourbillonnaire. Cela a été possible en combinant les expériences lagrangiennes “quantitatives” du logiciel ARIANE [Blanke et Raynaud 1997], pour laquelle les connexions inter-bassins sont décomposées en termes de multiples trajectoires (tubes de courant) élémentaires avec une analyse en vitesse de rotation lagrangienne ou *spin parameter* [Veneziani et al. 2004; Veneziani et al. 2005]. Cette technique a permis de mettre en évidence qu’une partie importante (environ 30%) de l’échange Indo-Atlantique est modulée par l’activité de méso-échelle, avec une contribution remarquable des cyclones [Figure 3.2, Doglioli et al. 2006]. Nos résultats ont été ensuite confirmés par des analyses d’observations *in situ* effectuées par Richardson [2007].

Ces techniques développées pour l’analyse des simulations numériques réalisées pour le Bassin du Cap ont été adaptées avec succès à l’analyse de champs d’élévation absolue de niveau de la mer, permettant d’identifier le rôle des tourbillons dans l’échange côte-large dans la zone du Benguela [Rubio et al. 2009b] et de définir trois routes principales empruntées par les Anneaux des Aiguilles dans leur traversée du Bassin du Cap [Dencausse et al. 2010]. Le logiciel WATERS a été aussi l’objet d’une étude comparative avec d’autres méthodes d’identification et le suivi des tourbillons océaniques [Souza et al.

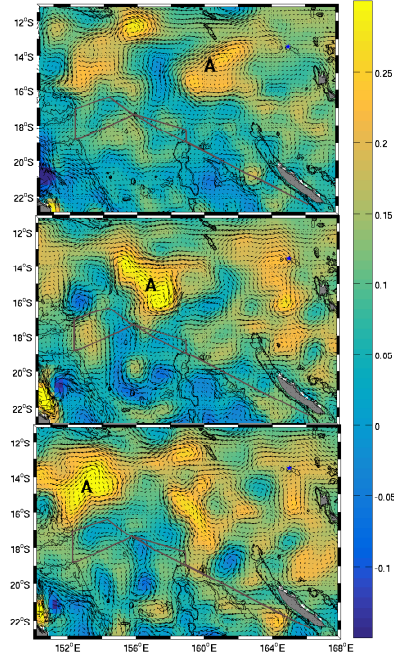


FIGURE 3.3 – Flèches de courant de surface issues de l’altimétrie satellite superposées à la surélévation pour le 5 août (en haut), le 5 septembre (au milieu) et le 5 octobre (en bas) 2012. La lettre A indique le tourbillon anticyclonique étudié, qui croise la route de la campagne BIFURCATION (ligne grise). D’après [Rousselet et al. 2016]

2011] et ensuite appliqué avec succès à l’étude de tourbillons côtiers (voir section 3.2)

3.1.2 Mer de Corail

La mer de Corail est caractérisée par la circulation de deux courants marins zonaux, le Jet Nord Vanuatais (JNV) qui circule d’Est en Ouest aux alentours de 12°S et le Jet Nord Calédonien (JNC) qui circule parallèlement au précédent, donc lui aussi d’Est en Ouest mais vers 18°S. Ces deux courants transportent des eaux aux caractéristiques différentes [Kessler et Cravatte 2013]. Notre étude de données satellite d’altimétrie a mis en évidence la circulation de plusieurs tourbillons de moyenne échelle en mer de Corail et a réussi à identifier plusieurs trajectoires méridionales de ces tourbillons entre le JNV et le JNC.

Les eaux piégées par l’un de ces tourbillons ont été échantillonnées lors d’une campagne océanographique en septembre 2012 [Maes 2012] et présentaient des caractéristiques différentes des eaux environnantes. De plus, des données des flotteurs-profileurs du programme Argo indiquaient que les eaux piégées par le tourbillon portaient la signature des eaux caractéristiques du JNV alors que les eaux environnantes étaient caractéristiques du JNC. L’étude de la trajectoire du tourbillon s’appuyant sur les données altimétriques

a permis de montrer que ce tourbillon s'était formé dans la zone de circulation du JNV et avait ensuite transporté ses eaux vers le Sud de la mer de Corail où les eaux différentes du JNC circulent. Les simulations numériques Lagrangiennes avec le logiciel ARIANE [Blanke et Raynaud 1997] à partir de données issues des modèles NLOM⁴ et MERCATOR⁵ ont enfin confirmé que certaines particules piégées dans des tourbillons connectaient de la même façon les deux courants marins. En particulier, les tourbillons anticycloniques participent de 70 à 90% à cette connexion. Ainsi cette étude montre l'importance des tourbillons de moyenne échelle dans la circulation et les échanges de masses d'eau océaniques mais permet également de reconsidérer la circulation générale en mer de Corail en identifiant un nouveau trajet des masses d'eau via le transport par les tourbillons [Rousselet et al. 2016].

3.1.3 Archipel d'Hawaï

La circulation océanique autour de l'archipel hawaïen est caractérisée par une dynamique complexe et par la présence de tourbillons de méso-échelle à l'ouest des îles. Cette circulation est principalement due aux effets du forçage topographique de l'archipel sur le courant équatorial nord (NEC - *North Equatorial Current*) et l'alizé. Lumpkin [1998] a proposé en premier un schéma montrant le NEC qui après avoir rencontré l'archipel d'Hawaï, est dévié vers le sud, mais génère également une branche nord (Figure 3.4). En aval, le sillage est caractérisé par la présence d'un courant de retour (HLCC - *Hawaiian Lee Counter Current*) et de nombreux tourbillons. Typiquement ces tourbillons se développent et persistent pendant des semaines à plusieurs mois dans cette région soumise à l'alizé. Nous avons réalisé une série de simulations numériques sur la région hawaïenne afin d'examiner l'importance relative du vent, du courant d'entrée et du forçage topographique sur la circulation générale et la génération de tourbillons. Notre étude démontre la nécessité de tenir en compte les trois forçages (vent, courant d'entrée et topographie) afin de reproduire la circulation océanique connue. En particulier, cet effet cumulatif joue un rôle clé sur la génération des tourbillons de méso-échelle. L'effet de blocage de la bathymétrie des îles hawaïennes sur l'écoulement océanique est similaire à celui de la topographie de ces îles sur le vent. Le rotationnel du vent, par l'intermédiaire du mécanisme de pompage

⁴Le *Naval Research Laboratory Layered Ocean Model* du *International Pacific Research Center (Honolulu, Hawaii)* fournit le champ de vitesse de surface à une résolution horizontale de $1/32^\circ$; https://www7320.nrlssc.navy.mil/global_nlom/

⁵La simulation PSY4V1R3 de MERCATOR OCEAN nous a fourni le champ de vitesse à une résolution horizontale de $1/12^\circ$ à la surface et à 100 m de profondeur, <http://www.mercator-ocean.fr/>

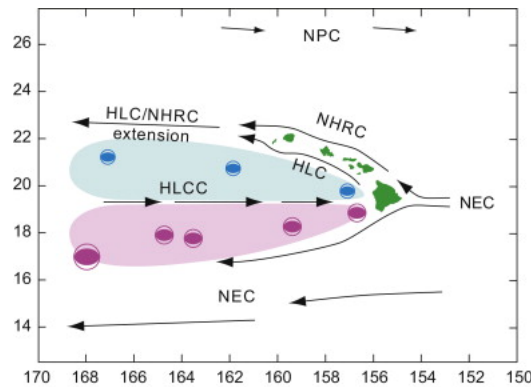


FIGURE 3.4 – Schéma de la circulation autour des îles d’Hawaï. D’après *Lumpkin* [1998].

d’Ekman, a également été identifié comme un mécanisme important pour déterminer l’intensité de l’upwelling en aval de la Grande Île d’Hawaï. Afin de trouver la meilleure configuration d’un modèle océanique régional, nous avons comparé plus précisément les résultats numériques obtenus en utilisant deux bases de données de vent différentes : COADS ⁶ et QuikSCAT ⁷. La résolution spatiale forçant le vent affecte clairement la manière dont le moment du vent alimente les phénomènes de méso-échelle. Plus la résolution est élevée, plus la circulation océanique devient réaliste. Une comparaison avec les résultats de la campagne E-FLUX [*Dickey et al.* 2008] a montré comment la simulation forcée par les données de vent QuikSCAT reproduit mieux les structures méso-échelle énergétiques et leurs caractéristiques et comportements hydrologiques [Figure 3.5, *Kersalé et al.* 2011].

3.2 Circulation de (sous)méso-échelle en milieu côtier

La circulation côtière a un impact direct sur les activités humaines car elle transporte les sédiments, le phytoplancton et les larves des poissons, en déterminant ainsi les caractéristiques de l’écosystème. Les courants côtiers sont aussi responsables du transport et de la dispersion des polluants qui sont principalement produits par les activités humaines sur la côte. La circu-

⁶Le *Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* fournit les données de surface pour l’océan globale à une résolution spatiale de $1^\circ \times 1^\circ$; <http://icoads.noaa.gov/>.

⁷Données de vent de surface à $\frac{1}{4}^\circ$; *Liu et al.* [1998].

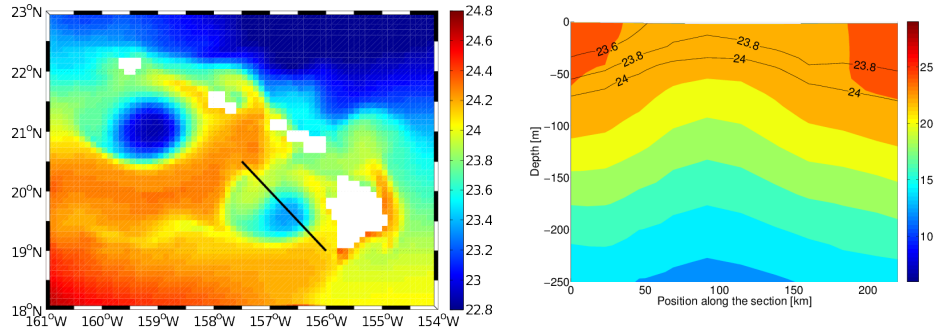


FIGURE 3.5 – Carte de température de surface issue de la simulation forcées par QuickSCAT (gauche) et section verticale correspondante au trait noir traversant le tourbillon en aval de la Grand Île. D’après [Kersalé *et al.* 2011].

lation côtière a aussi une très grande importance sur la circulation générale de l’océan. Les eaux côtières sont en effet une région de dissipation et de mélange, des phénomènes fortement influencés par la conformation de la ligne de côte et de la bathymétrie. La présence de structures comme les canyons et les caps, très nombreux le long de la côte méditerranéenne et caractérisés par différentes échelles spatiales, joue un rôle très important sur la circulation côtière.

La circulation côtière en présence de caps et de promontoires est caractérisée par des phénomènes de séparation de courant, de remontée des eaux et de formation de tourbillons en aval du courant, qui peuvent être piégés ou se propager avec le courant [Pingree 1978; Black et Gay 1987; Pattiaratchi *et al.* 1986; Geyer 1993]. Dans ce domaine, les premières études numériques et les expériences de laboratoire se sont focalisées sur le cas de caps entourés d’eaux peu profondes, avec des flux supposés homogènes et une dynamique principalement bidimensionnelle [Verron *et al.* 1991; Signell et Geyer 1991; Davies *et al.* 1995]. Même s’il s’agit d’un cas simplifié, cette dynamique est toujours complexe et dépend d’un grand nombre de paramètres environnementaux, comme le frottement sur le fond et les caractéristiques du courant incident. Pour le cas de falaises et de pentes raide, l’approximation bidimensionnelle n’est plus valable et des phénomènes tridimensionnels jouent un rôle majeur, en connectant les circulations verticale et horizontale. Dans quelques études expérimentales, ce type de circulation secondaire a été observé dans un plan vertical transverse au courant [Geyer 1993]. Ces phénomènes ont été mis en relation avec le cisaillement d’un écoulement avec courbure [e.g. Kalkwijk et Booij 1986] et des remontées d’eaux plus profondes. En présence d’une forte stratification de la masse d’eau et d’un front, des phénomènes

d'inclinaison de l'axe des tourbillons côtiers ont aussi été observés [*Farmer et Jiang* 2002].

3.2.1 Golfe du Lion

Le golfe du Lion (GdL) se trouve sur la marge continentale dans la partie nord du bassin occidental de la Méditerranée. La circulation générale de la Méditerranée occidentale est caractérisée par une circulation cyclonique. La partie nord de ce gyre est formée par le Courant Nord (CN) qui s'écoule le long du talus continental de la mer de Ligure vers la mer Catalane, ayant une influence importante sur le GdL. En effet, le CN peut constituer une barrière dynamique qui bloque les eaux côtières sur le plateau. Le CN montre une variabilité saisonnière assez marquée [*Conan et Millot* 1995; *Sammari et al.* 1995]. En été, la veine du courant est localisée plutôt au large, est plus étendue et moins profonde. En hiver le courant s'approche de la côte, est étroit et s'étend jusqu'à environ 400 mètres de profondeur. Durant cette saison, le CN est plus instable et présente une grande variabilité de méso-échelle. Des études sur cette variabilité ont été effectuées au large de Nice par *Albérola et al.* [1995] et *Sammari et al.* [1995]; au large de Marseille par *Conan et Millot* [1995] et dans le GdL par *Flexas et al.* [2002] et *Petrenko* [2003]. Cette variabilité peut induire la formation de méandres et d'intrusions sur le plateau [*Petrenko et al.* 2005]. L'interaction entre le CN et l'activité méso-échelle des filaments et des tourbillons peut induire des échanges entre les eaux du plateau et les eaux du large.

Le Golfe du Lion est un site privilégié pour étudier les processus d'échange côte-large (Figure 3.6) :

- i) sa morphologie est caractérisée par un large plateau continental suivi d'une pente continentale abrupte intersectée par de nombreux canyons ;
- ii) des vents continentaux forts induisent des remontées d'eau côtières [*Millot* 1979], des oscillations d'inertie [*Millot et Crépon* 1981; *Petrenko* 2003] et formation d'eaux denses [*Dufau-Julliand et al.* 2004; *Ulses et al.* 2008a,b] ;
- iii) le fleuve Rhône constitue un apport important d'eau douce [*Estournel et al.* 1997; *Gatti et al.* 2006] ;
- iv) le Courant Nord Méditerranéen longe la pente continentale avec des intrusions sur le plateau [*Albérola et Millot* 2003; *Petrenko* 2003; *Petrenko et al.* 2005; *Gatti et al.* 2006; *Petrenko et al.* 2008] et des instabilités *Flexas et al.* [2002] ;
- v) des tourbillons de sousméso- à méso-échelle y sont présents [*Estournel et al.* 2003; *Allou et al.* 2010; *Schaeffer et al.* 2011] .

En particulier, une circulation tourbillonnaire anticyclonique à l'ouest du Golfe du Lion a été évoquée pour la première fois par *Millot* [1979, 1982]

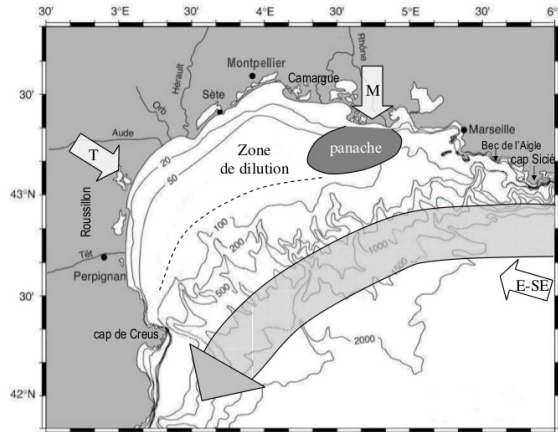


FIGURE 3.6 – Carte du Golfe du Lion sur laquelle sont indiqués les 3 secteurs de vent principaux (flèches blanches) : E-SE, le Mistral (M) et la Tramontane (T), le panache (zone grise foncée) et la zone de dilution (délimitée par les pointillés) du Rhône, et le Courant Nord (flèche grise) - Image tirée de *Gatti* [2008].

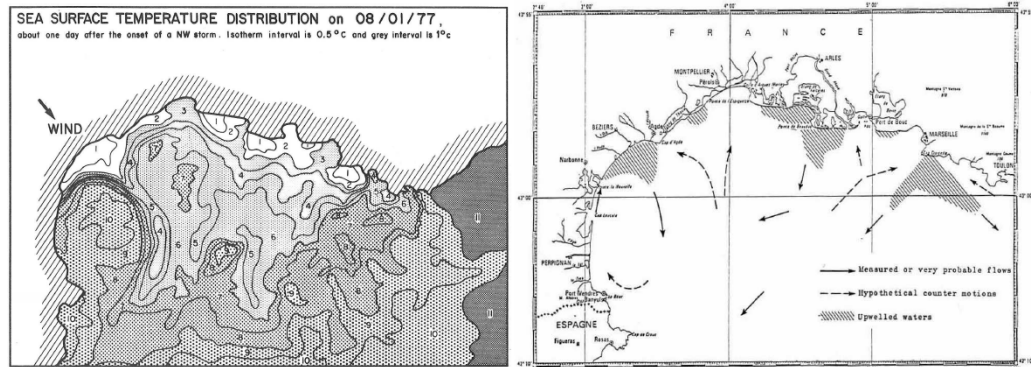


FIGURE 3.7 – Gauche. Température de surface le 1^{er} Août 1977 à 09 00 TU ; tirée de [Millot 1982]. Droite. Schéma de la circulation de surface induite par le vent d'après l'analyse des vues satellitaires et de mesures *in situ* ; tirée de Millot [1979].

à partir de données satellites et courantologiques (Figure 3.7). L'apparition de cette structure faisait suite à la présence d'un upwelling au sud du Cap d'Agde après une forte Tramontane. *Millot et Crépon* [1981] suggèrent qu'à la suite d'un épisode de Tramontane créant un upwelling à l'ouest du Golfe du Lion, une circulation de type anticyclonique pourrait se développer dans la couche de surface afin de compenser le transport off-shore. *Petrenko et al.* [2008] ont montré, à l'aide de simulations numériques académiques, que les rotationnels d'une Tramontane favorisent le développement d'une circulation anticyclonique dans la partie nord et une circulation cyclonique sur la partie ouest du plateau du Golfe du Lion. Le fait d'être sur le côté interne, anticyclonique, du Courant Nord permet à ces structures de durer plus longtemps que les tourbillons cycloniques.

Dans le cadre du projet LATEX (*LAgrangian Transport EXperiment*, PIs A.Petrenko et F.Diaz, www.mio.univ-amu.fr/LATEX) nous nous sommes intéressés aux tourbillons anticycloniques de méso-échelle qui se développent près de la côte du Roussillon, à l'ouest du Golfe du Lion. Les courants forts associés aux mouvements rotationnels des tourbillons entraînent vers le large des éléments nutritifs venant de la zone côtière du Roussillon et exportent par un mouvement descendant la matière organique vers les profondeurs. Par ailleurs, les tourbillons étaient potentiellement influencés par l'extension distale du panache du Rhône qui peut atteindre cette région sous certaines conditions de vent [*Estournel et al.* 1997] et amener des nutriments dans les tourbillons [*Minas et Minas* 1989; *Ludwig et al.* 2009]. Les interactions entre les tourbillons et le Courant Nord étaient considérées d'importance capitale pour leurs influence sur les échanges côte-large. Les difficultés de cette étude consistaient en l'acquisition des mesures *in situ* qui donneraient une vision complète de la structure et rendraient compte simultanément de la variabilité spatiale et temporelle des processus en jeu. De plus, étant donnée la grande variabilité en milieu côtier par rapport au milieu hauturier, les observations *in situ* en zone côtière sont parfois très complexes à interpréter.

Nous avons donc commencé par le développement du modèle 3D côtier à surface libre SYMPHONIE [*Marsaleix et al.* 2006, 2008]. SYMPHONIE a été utilisé de façon fort satisfaisante pour l'étude d'un certain nombre de processus présents sur le talus continental du golfe du Lion. À titre d'exemple on peut citer : les circulations induites par le vent [*Auclair et al.* 2003; *Estournel et al.* 2003; *Petrenko et al.* 2005, 2008] ; les intrusions du Courant Nord sur le plateau [*Auclair et al.* 2001; *Gatti et al.* 2006] ; la formation et les plongées d'eau dense sur le plateau [*Dufau-Julliand et al.* 2004; *Ulses et al.* 2008a,b] ; la propagation du panache du Rhône [*Marsaleix* 1998; *Estournel et al.* 2001].

Nous avons développé une simulation à haute résolution (1km) restreinte au Golfe du Lion, imbriquée dans une simulation à plus basse résolution

(3km) étendue sur toute la région nord-ouest du bassin Méditerranéen, avec un forçage de la simulation à basse résolution vers celle à haute résolution (*one-way nesting*). Le schéma d’advection-diffusion utilisé est un schéma de type “upwind centré” dont le terme diffusif est ajusté par un coefficient d’atténuation qui varie entre 0 et 1. Plusieurs tests de sensibilité sur la résolution du modèle et sur la valeur du coefficient d’atténuation ont été effectués afin d’optimiser la reproduction des tourbillons côtiers observés dans la partie ouest du Golfe du Lion. Le logiciel WATERS [Doglioli et al. 2007] a été appliqué aux champs de vorticité relative calculés à partir des sorties du modèle pour identifier et suivre les structures tourbillonnaires dans le Golfe du Lion. Une comparaison quantitative entre les surfaces des tourbillons simulés numériquement et celles des tourbillons observés par imagerie satellite a permis de valider les résultats du modèle et de choisir la meilleure configuration pour reproduire les structures tourbillonnaires de méso-échelle dans la partie ouest du Golfe du Lion [Hu et al. 2009] .

Ce travail a constitué l’appui pour avancer dans deux directions : d’un coté l’étude numérique des processus de formation de ces structures tourbillonnaires, de l’autre l’observation *in situ* afin de confirmer les résultats numériques.

Avec la configuration optimisée par Hu et al. [2009], nous avons effectué une simulation pluri-annuelle de 2001 à 2010 avec un forçage météorologique issu des sorties du modèle Aladin de Météo-France. Des tourbillons anticycloniques apparaissent régulièrement à l’ouest du Golfe du Lion. Les tourbillons qui perdurent plus de 15 jours ont été appelés ‘tourbillons de longue durée de vie’. Ils apparaissent pendant la saison stratifiée de juillet jusqu’à début octobre. Ceux qui ont une durée de vie inférieure à 15 jours sont qualifiés de ‘transitoires’. Notre étude a mis en évidence que la présence d’un vent du nord-ouest fort et persistant et d’une forte stratification sont les deux conditions nécessaires pour engendrer un tourbillon de longue durée de vie. Nous avons schématisé ce processus de la façon suivante (Figure 3.8). Pendant la saison où le milieu marin est stratifié, un vent fort du nord-ouest soufflant au moins 3 jours dans la partie ouest du golfe engendre un upwelling au sud du cap d’Agde avec un courant de surface s’éloignant de la côte nord (Figure 3.8a). Ce courant vers le large tourne sous l’effet des forces de Coriolis vers la côte ouest entre le cap Béar et le cap Creus où le niveau de la mer est donc plus élevé que celui près du cap d’Agde. Un courant côtier vers le nord le long de la côte Roussillon induit par le gradient de pression, qui rejoint le courant vers le large, peut créer un tourbillon anticyclonique (Figure 3.8b). Ce dernier peut perdurer tant que les coups de vent du nord-ouest sont présents (Figure 3.8c). L’effet combiné de ces deux facteurs, vent et stratification, nous a permis d’expliquer également la présence de tourbillons transitoires

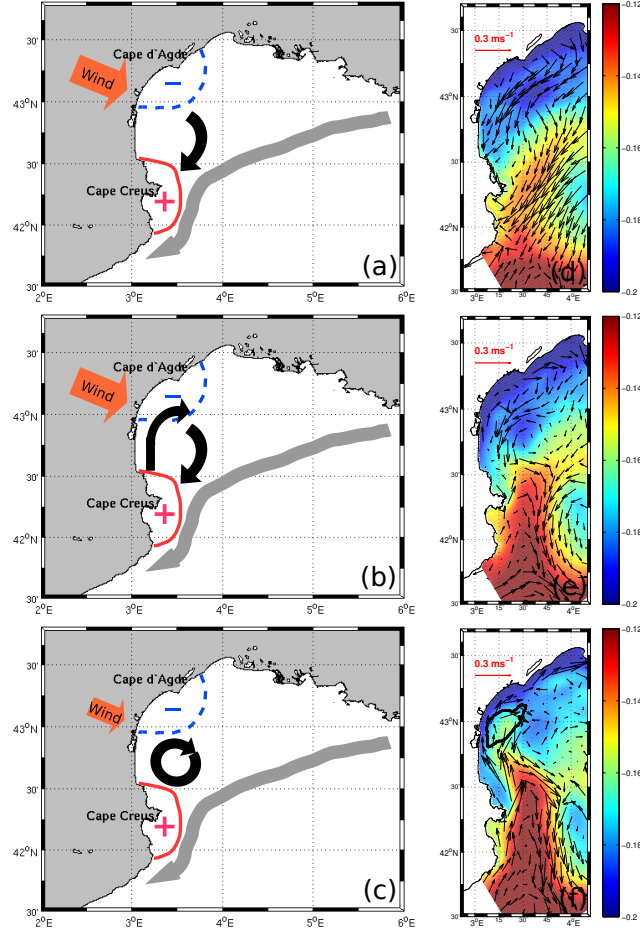


FIGURE 3.8 – Schéma de la génération d'un tourbillon anticyclonique dans l'Ouest du GdL proposé par *Hu et al.* [2011]. Colonne à gauche. Les trois phases qui peuvent diviser le processus : a) upwelling côtier, transport d'Ekman et accumulation d'eau près du Cap Creus, b) génération un jet côtier vers le Nord, c) fermeture de la recirculation et développement du tourbillon. Le courant est représenté par les flèches noires, le vent et son intensité par les flèches oranges ; le Courant Nord qui bloque le transport vers le large par la flèche grise. La zone d'upwelling, caractérisée par une anomalie négative de surélévation, est délimitée par la ligne pointillée bleue, tandis que la zone d'accumulation d'eau près de Cape Creus est délimitée par la ligne pointillée rouge. Colonne à droite. Exemple issue des simulations numériques. Élévation de la surface libre (couleurs) et courant de surface (profondeur 5 m, flèches noires) issues du modèle numérique pour les dates du 2, 7 et 10 juillet 2005. Figures tirées de *Petrenko et al.* [2017]

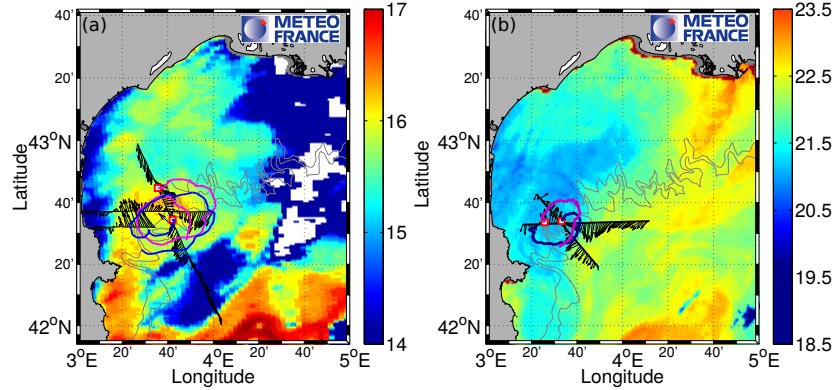


FIGURE 3.9 – Tourbillons anticycloniques étudiés pendant les campagnes Latex08 (à gauche) et Latex09 (à droite). Les flèches noires représentent le courant horizontal à 15 m de profondeur mesuré par l’ADCP de coque. Les lignes bleues et magenta représentent les trajectoires des bouées dérivantes ancrées à 15 m pendant les 6 (en 2008) et 3 (en 2009) jours suivant leur lâcher à la position indiquée par le carré rouge. Sur l’arrière les couleurs représentent la température de brillance satellite (pseudo-SST par AVHRR) le 2 septembre 2008 et 28 août 2009. D’après *Petrenko et al.* [2017]

et de tourbillons de longue durée de vie, ces derniers étant présents pendant les mois allant de juillet à octobre.

À partir de la connaissance des tourbillons basée sur la modélisation, deux campagnes en mer ont été réalisées dans la zone et à la période pour lesquelles la probabilité d’observation était maximale. Les campagnes Latex08 et Latex09 se sont déroulées à bord du N/O *Téthys II* ; la première du 1 au 6 septembre 2008 [*Petrenko* 2008], la deuxième l’année suivante du 24 au 28 août [*Petrenko* 2009].

Au cours de ces campagnes, nous avons réalisé des mesures à l’aide de l’ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) de coque et de la sonde CTD (*Conductivity Temperature Depth*) ou, en cas de mauvaises conditions, XBT (*eXpendable Bathy Thermograph*). Ces mesures, combinées avec des images satellites de SST et des trajectoires de bouées Lagrangiennes, indiquent la présence de deux tourbillons anticycloniques à l’ouest du golfe (Figure 3.9). Ils montrent une forme elliptique avec un diamètre moyen d’environ 20 km et une vitesse tangentielle maximale entre les 0.3 et 0.4 ms^{-1} . Les deux tourbillons étaient baroclines et confinés dans la couche mélangée (environ 30 m). Nous avons comparé les observations avec les sorties du modèle, indiquant en général un bon accord [*Hu et al.* 2011; *Kersalé et al.* 2013]. Ainsi, grâce à la modélisation numérique nous avons pu reconstruire les mécanismes de for-

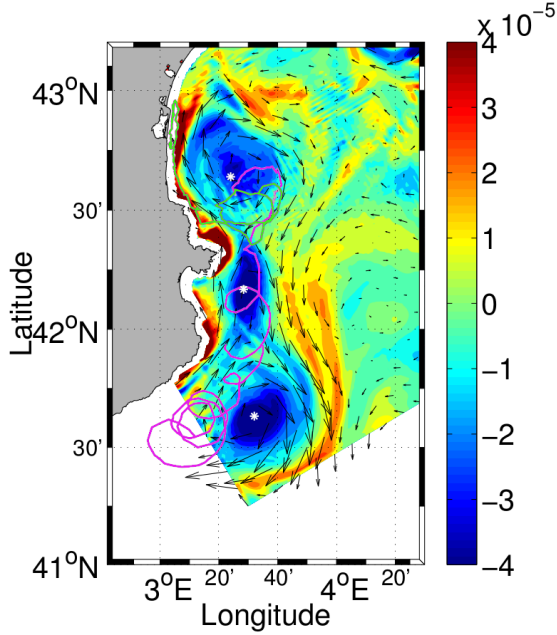


FIGURE 3.10 – Champs de vorticité relative [s^{-1}] et de courant (flèches noire) à 20 m de profondeur le 3 septembre 2009 issus du modèle numérique SYMPHONIE. En gris et magenta sont superposées les trajectoires du 26 août au 11 septembre de deux bouées dérivantes. Les étoiles blanches indiquent le centre du tourbillon LATEXA2_09 (au nord), de la structure transitoire (au centre) qui s'en détache et interagit avec un deuxième tourbillon anticyclonique présent plus au sud sur le plateau Catalan. D'après *Petrenko et al.* [2017].

mation des deux structures. Si la formation du tourbillon de 2008 s'inscrivait dans le mécanisme déjà décrit ci dessus (Figure 3.8), le cas du tourbillons de 2009, présentait des nouveautés. En effet, en 2009, le tourbillon naissait de la séparation en deux structures tourbillonnaires d'une plus grande recirculation anticyclonique sous les contraintes bathymétrique de la côte et dynamique d'un méandre du Courant Nord [*Kersalé et al.* 2013]. De plus, une dizaine de jours après la génération de ce tourbillon, sa collision avec le Cap Creus a amené à la formation d'une troisième structure transitoire de plus petite échelle (Figure 3.10). La présence de cette dernière structure dans la simulation numérique nous a permis d'expliquer la trajectoire complexe des bouées dérivantes. De plus, nous avons pu estimer le volume de la structure transitoire à $12.1 \pm 0.1 \text{ km}^3$ et mettre en évidence le rôle important de ces petites structures tourbillonnaires sur la régulation des échanges entre le plateau du GdL et le plateau Catalan [*Kersalé et al.* 2013].

Une troisième campagne, Latex10, s'est déroulée du 1 au 24 septembre 2010 avec l'implication de deux navires, le Téthys II [*Petrenko* 2010] et Le Suroît [*Quéguiner* 2010]. A ce moment la circulation était très différente des précédentes campagnes : aucune structure anticyclonique n'était présente. L'analyse en Exposants de Lyapunov de Taille Finie (FSLE) des champs de courant issus de l'altimétrie satellite et de la température de brillance satellite (pseudo-SST par AVHRR), validées par des lâchers de bouées et des radiales ADCP et TSG, a montré que la circulation dans la partie occidentale

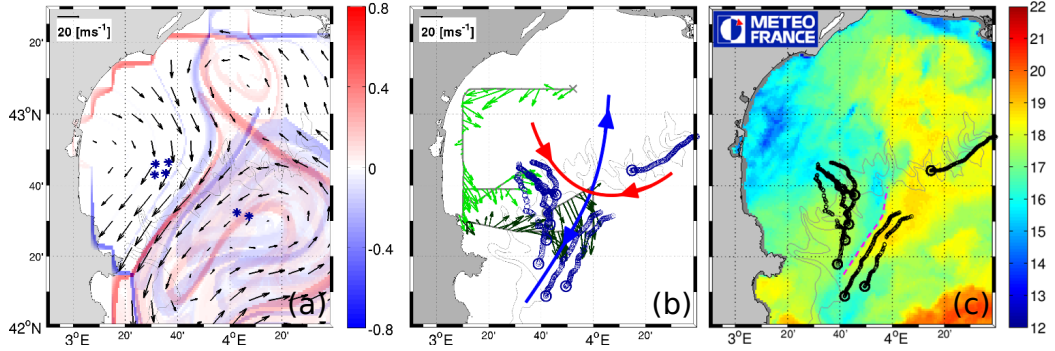


FIGURE 3.11 – Gauche. Analyse FSLE (s^{-1} , les structures répulsives en rouge, attractives en bleu) et champs de courant issus de l’altimétrie satellite du 14 septembre 2010. Les étoiles bleues indiquent les positions des lâchers de bouées dérivantes. Centre. Courant à 15 m de profondeur mesuré par ADCP, trajectoires sur 3 jours des bouées Lagrangiennes (les cercles représentent les positions finales) et positions des LCS issues de l’interprétation des données *in situ*. Droite. Image satellite de la température de brillance satellite (pseudo-SST) du 14 septembre 2010 et les trajectoires du panneau central. La ligne pointillée en magenta représente la position du front. D’après *Petrenko et al.* [2017].

du GdL était caractérisée au contraire par le développement d’un fort front thermique (Figure 3.11), associé à un écoulement intense de 10 km de large et à peu près parallèle à la côte, à travers lequel les eaux du plateau continental quittaient le GdL vers le bassin catalan [*Nencioli et al.* 2011]. Le front a été formé en raison de la convergence et de l’étirement résultant, des eaux plus chaudes de la Méditerranée Nord-Ouest, avec des eaux plus froides sur le plateau continental [*Nencioli et al.* 2016]. L’analyse des données du vent et des trajectoires des bouées dérivantes a indiqué que le mouvement des eaux chaudes était principalement dû à la dynamique du Courant Nord le long de la pente continentale, alors que les eaux froides ont été advectées vers le sud à partir du GdL par le transport d’Ekman généré par des forts vents de Mistral et Tramontane. Par conséquent, la formation du front était principalement générée par l’interaction entre la circulation induite par le vent et la circulation à grande échelle. L’analyse des données de température, de salinité et de densité des radiales à travers le front a montré qu’il était principalement compensé en densité [*Nencioli et al.* 2013]. Les gradients de température et salinité pourraient atteindre respectivement $2^{\circ}C$ et 0,4 sur moins de 4 km à travers le front. La distribution du nombre de Rossby en vorticité ⁸ a montré

⁸ $R_0 = \zeta/f$, avec ζ la composante verticale de la vorticité relative et f le paramètre Coriolis, [e.g. *Klein et al.* 2008]

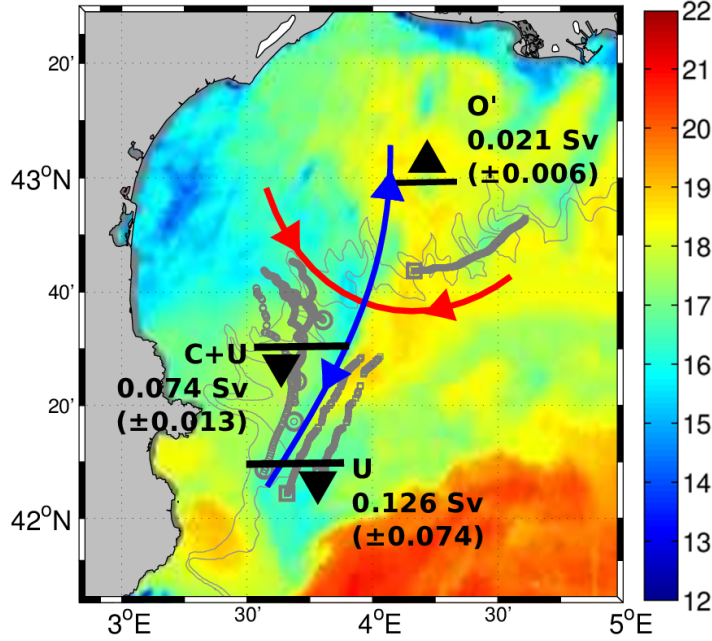


FIGURE 3.12 – Représentation schématique des flux moyens associés au front étudié pendant la campagne Latex10, superposés à la carte satellite de température de brillance (pseudo-SST), aux trajectoires des bouées (en gris, avec les cercles et les carrés représentant les positions finales pour celles ancrées à 15 et à 50 mètres, respectivement) et aux LCS in situ (en rouge et en bleu). D’après *Nencioli et al.* [2016].

des valeurs prédominantes inférieures à $\mathcal{O}(1)$, avec des maxima occasionnels autour de $\mathcal{O}(1)$ [*Nencioli et al.* 2016, SI, fig. 6]. Nous avons alors considéré le front comme principalement associé à une dynamique géostrophique (c’est-à-dire de méso-échelle). Par conséquent, bien qu’un écoulement géostrophique intensifié en surface associé à des vitesses verticales plus fortes ait parfois pu se produire lorsque le gradient de densité horizontal et la vorticité verticale relative étaient importants, le rôle de la dynamique frontale locale n’a pas été exploré. L’hypothèse implicite est que l’advection horizontale par les écoulements géostrophiques et d’Ekman qui a induit la formation du front a eu un impact plus fort sur la dynamique du front et son évolution temporelle que la circulation agéostrophique secondaire [*Nencioli et al.* 2013, 2016]. La description précise de la dynamique du front, nous a enfin permis d’estimer un débit moyen sortant associé au front de 0.074 ± 0.012 Sv et un débit entrant de 0.021 ± 0.006 Sv. En intégrant sur la durée de vie du front de deux semaines, un tel écoulement induirait une exportation totale de l’eau

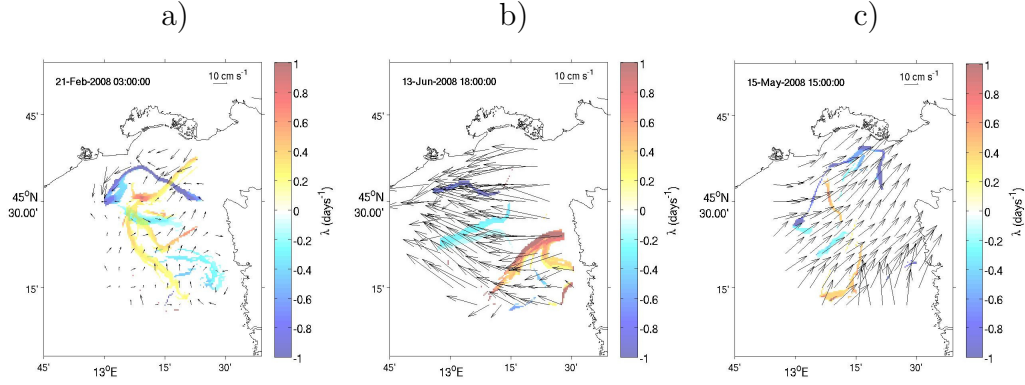


FIGURE 3.13 – Cartes du courant de surface (flèches noires) dans le Golfe de Trieste superposé au Exposants de Lyapunov de Taille Finie (couleurs). a) 21 février 2008, situation typique de calme de vent ; b) 13 juin 2008, situation typique de vent Bora ; c) 15 mai 2008, situation typique de vent Sirocco. D’après *Berta et al.* [2014].

de $\sim 90 \pm 14 \text{ km}^3$. Ainsi, 3 à 4 de ces événements seraient suffisants pour renouveler complètement les eaux de surface du GdL. Par contre la quantité totale d’eau importée ne représentait que $\sim 25 \pm 7 \text{ km}^3$, soit moins d’un tiers de l’écoulement, ce qui suggère des afflux plus importants en profondeur ou dans la partie orientale pour maintenir le bilan volumétrique du GdL [*Nencioli et al.* 2016].

3.2.2 Autres sites d’étude

Golfe de Trieste

Le forçage de la circulation dans le Golfe de Trieste (GdT) présente certaines similitudes avec celle du GdL, étant donnés : i) la présence du courant Oriental Adriatique (EAC - it Eastern Adriatic Current) qui pénètre dans le GdT et génère une circulation cyclonique le long de la côte [*Bogunović et Malačič* 2009] ; ii) des apports d’eau douce importants par les fleuves Isonzo et Tagliamento et enfin iii) que la zone est soumise, surtout en hiver, à l’influence de la Bora, vent du NE très intense, froid et sec [e.g. *Orlić et al.* 1994].

Nous avons identifié trois situations typiques pour la circulation à partir du vent dominant : calme, Bora (vent de Nord) et Sirocco (vent de Sud-Sud Est). L’analyse FSLE montre des structures récurrentes pendant les trois régimes de vent étudiés : calme, Bora et Sirocco (Figure 3.2.2). L’analyse

FSLE pendant le vent calme révèle plusieurs structures plus persistantes par rapport aux deux autres régimes de vent. En particulier une LCS attractive (caractérisé par des valeurs négatives de FSLE) traverse l'entrée du GdT, marquant la zone de convergence entre les eaux de l'Adriatique Nord et celles sortantes du GdT (Figure 3.2.2a). Au cours des épisodes de Bora, le courant s'intensifie sensiblement et la LCS attractive se déplace vers l'ouest et un LCS répulsif se développe au large de la côte istrienne (Figure 3.2.2b). Enfin, quand souffle le vent Sirocco, le courant change de direction, l'eau s'empile le long de l'extrémité nord du GdT, où on trouve un LCS attractant, s'étendant principalement dans la direction SW-NE (Figure 3.2.2a). L'afflux d'eaux Adriatiques induit par le Sirocco dans le GdT se fait principalement le long de la côte italienne, comme en témoigne l'orientation du LCS attractant. Sous l'état de Sirocco, comme avec la Bora, il n'y a pas de barrière au transport entre les eaux du large et celle du GdT.

Promontoire de Portofino

Le Promontoire de Portofino est situé le long de la côte orientale de Ligurie, dans le Golfe de Gênes (Méditerranée Nord-Occidentale), dans une zone d'une grande importance touristique, à proximité du port majeur de Gênes. Depuis 1998, le Promontorio et ses environs ont été déclarés Aires Marines Protégées, dans le but de préserver l'écosystème côtier marin [*Salmona et Veradi* 2001]. Le Promontorio est un cap de forme abrupte, presque carrée, qui s'étend vers le large sur environ 4 km, sur un plateau continental très étroit. Dans cette zone, on a donc une falaise très raide qui se prolonge en mer allant de 50 à 500m de profondeur en quelques kilomètres. La circulation générale dans le Golfe de Gênes est connue pour être dominée par un gyre cyclonique bien défini, avec un cycle saisonnier lié aux variations saisonnières du forçage atmosphérique [*Esposito et Manzella* 1982]. Dans la zone côtière, l'eau provenant des deux côtés ouest et est de l'île de Corse (Figure 3.14) se joignent au courant littoral ligure, qui coule le long du littoral à peu près suivant la bathymétrie [*Astraldi et Gasparini* 1986]. Il est maintenant établi que, en hiver, l'écoulement dans le canal de la Corse augmente, tandis que le débit sur la partie occidentale de la Corse reste stable pendant toute l'année [*Buffoni et al.* 1997]. La circulation qui en résulte dans la zone côtière d'intérêt se trouve dans la direction générale vers le nord-ouest, suivant la côte, avec seulement une courte période d'inversion, associée aux vents du nord [*Astraldi et Gasparini* 1986]. La variabilité temporelle des courants est habituellement dominée par des fréquences sous-inertielles, avec des périodes dominantes de l'ordre de 2-3 jours [*Astraldi et al.* 1990] et 15-20 jours [*Astraldi et Manzella* 1983], probablement associées au forçage météorologique direct et les ondes

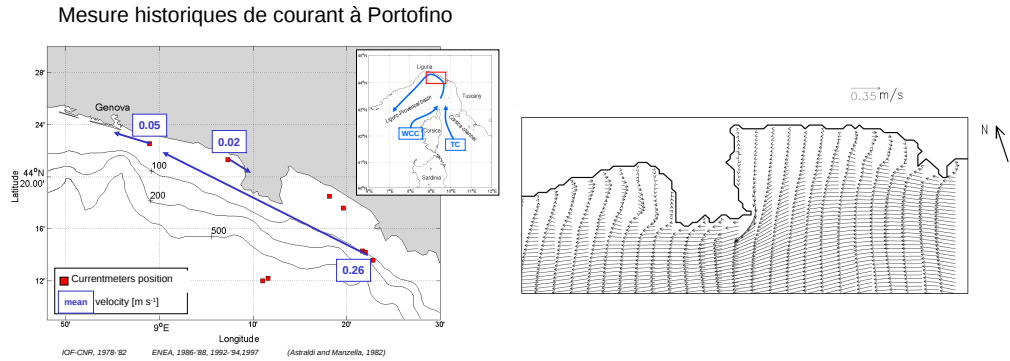


FIGURE 3.14 – Gauche. Schéma de résultats de mesures de courant auprès du Promontoire de Portofino et, dans l’encadré en haut à droite, de la circulation générale dans le Golfe de Gênes. Droite. Circulation issue des simulations numériques effectuées avec le modèle POM par *Doglioli et al.* [2004b].

topographiques, respectivement [*Esposito et Manzella* 1982]. Les fréquences des marées sont caractérisées par une faible teneur en énergie dans cette zone.

Une série historique de données de courantologie à la fois en aval et en amont du cap (voir les positions des carrés noirs à la Figure 3.14) nous a amenés à trouver une explication à la présence d’un contre courant tout près de la côte en aval du Promontoire. L’hypothèse de travail était la présence d’un tourbillon dans le sillage du cap de la même taille que ce dernier. En effet, il existe une vaste littérature sur le phénomène de la séparation du courant côtier et de la formation de tourbillons dans le sillage de cap, en termes d’expérimentations, de calculs numériques et théoriques [e.g. *Boyer et Tao* 1987; *Freeland* 1990; *Geyer* 1993; *Denniss et al.* 1995; *Sadoux et al.* 2000; *Malgaldi et al.* 2008]. De nombreuses études numériques se sont concentrées sur la dynamique bidimensionnelle (2-D) à moyenne verticale [e.g. *Verron et al.* 1991; *Davies et al.* 1995], en considérant des courants de marée fortement énergétiques, dépendants du temps et des structures de cap lisses idéalisées [*Signell et Geyer* 1991]. D’autres études, surtout en ce qui concerne les effets des écoulements en aval d’îles en milieu hauturier, se concentrent sur la limite d’eau très profonde [e.g. *Coutis et Middleton* 2002; *Calil et al.* 2008]. La géométrie et la bathymétrie particulière du Promontorio di Portofino nous a amenés à considérer si la dynamique tridimensionnelle conduit ou non à des caractéristiques de tourbillons différentes. Une série d’expériences de sensibilité a été réalisée en considérant une topographie idéalisée et en variant les paramètres environnementaux dans une plage réaliste. Les résultats sont ensuite appliqués au cas avec topographie réaliste et qualitativement com-

parés aux résultats de mesure. La présence d'un tourbillon en aval du cap a ainsi été démontrée par ces simulations numériques, qui ont ensuite trouvé confirmation dans des études successives [voir figure 2b de *Cattaneo-Vietti et al.* 2015]. Nous avons mis en évidence que pour un flux tridimensionnel non-stratifié, les caractéristiques du tourbillon qui se forme en aval d'un cap dépendent fortement de la circulation verticale et du transport vertical de quantité de mouvement [*Doglioli et al.* 2004b]. Le cas du fluide stratifié, i.e. la situation typiquement estivale dans cette zone d'étude, a été ensuite étudié par *Magaldi et al.* [2008] qui ont mis en évidence comment la stratification peut favoriser le décollement de tourbillons et par conséquent la dispersion horizontale. Ces travaux soulignent le rôle clé de la viscosité due à la turbulence dans la modélisation de la circulation à (sous)méso-échelle.

3.3 La turbulence océanique

L'un des principaux défis dans les études de la dynamique et du mélange des océans réside dans l'estimation de la dispersion des particules par des processus turbulents. Pour le décrire, des études théoriques classiques ont introduit le coefficient de diffusion due à la turbulence, qui reproduit les effets de la turbulence à petite échelle. Ce coefficient est analogue à celui de la première loi de Fick sur la diffusion. Cependant, cette dernière est associée au mélange induit par une petite turbulence plutôt qu'à une diffusion moléculaire. De plus, la turbulence océanique n'étant pas homogène spatialement, il faut distinguer deux coefficients différents : un pour l'horizontale, K_h , et un pour la verticale, K_z .

3.3.1 Le mélange sur l'horizontale

L'étude pionnière sur la turbulence atmosphérique de *Richardson* [1926] a montré que K_h dépend de l'échelle de longueur des processus turbulents paramétrés, introduisant le concept de dispersion dépendant de l'échelle. Dans les années suivantes, cette dépendance à l'échelle a été confirmée par plusieurs expériences en mer par *Richardson et Stommel* [1948]; *Stommel* [1949]; *Okubo* [1971].

K_h est un paramètre clé pour les schémas de fermeture turbulente des modèles numériques globaux et régionaux. Les schémas de fermeture les plus simples supposent habituellement une diffusivité turbulente horizontale isotrope et constante; les plus complexes sont basées sur la variable spatio-temporelle K_h , qui dépend des caractéristiques dynamiques des processus à grande échelle résolus [e.g. *Smagorinsky* 1963; *James* 1996; *Fox Kemper*

et Menemenlis 2008]. Le réglage précis des valeurs de la diffusivité due à la turbulence est un aspect clé pour les expériences numériques, car celle-ci contrôle fortement la dispersion des traceurs physiques et biogéochimiques [Bracco *et al.* 2009]. Dans le cas de l'étude de *Hu et al.* [2009] nous avons par exemple effectué ce travail pour le cas de la circulation dans le GdL. Les estimations *in situ* de K_h fournissent donc des informations cruciales pour améliorer la performance et la précision des modèles océaniques.

Des diffusivités latérales à des échelles inférieures à 100 km ont été obtenues au cours de diverses expériences de traceurs SF₆ (NATRE, *Ledwell et al.* [1998], IronEx-I, *Stanton et al.* [1998], SOIREE, *Abraham et al.* [2000]; *Martin et al.* [2001]). Ces estimations sont basées sur l'hypothèse que, sous agitation locale à méso-échelle (qui peut être approximée, au premier ordre, comme bidimensionnelle et sans divergence), la forme initiale de la tache du traceur s'allongera le long d'une direction tout en s'amincissant le long du autre. La largeur du patch va diminuer jusqu'à ce que les effets de l'agitation méso-échelle soient équilibrés par une diffusion à plus petite échelle. Ainsi, la diffusivité latérale peut être calculée en combinant des estimations du taux d'étirement avec des mesures *in situ* de la largeur du patch. Le taux d'étirement est habituellement estimé à partir de cartographies successives *in situ* [Ledwell *et al.* 1998] ou à partir de l'analyse d'images satellitaires de traceurs de surface [e.g. chlorophylle de surface in *Abraham et al.* 2000]. Les diffusivités latérales calculées en utilisant cette approche varient de 0,5 à 25 m²s⁻¹ pour les filaments de traceurs dont la largeur varie entre 1 et 10 km. À des échelles similaires mais dans des systèmes énergétiques inférieurs, des diffusivités latérales ont également été estimées en négligeant la déformation et en mesurant la croissance de la tache approximativement circulaire du traceur : du SF₆ dans le bassin de Santa Monica [Ledwell *et Watson* 1991] ou du CF₃SF₅ dans la Mer Baltique [Holtermann *et al.* 2012]. Suivant cette méthode, les diffusivités latérales étaient de l'ordre de 10 m²s⁻¹ à des échelles de l'ordre de 10 km.

Lors de la campagne Latex10, nous avons estimé le coefficient de mélange horizontal effectué après le largage du traceur hexafluorure de soufre (SF₆) au large de la côte du Roussillon dans le GdL (Figure 3.15).

La dispersion du traceur a été surveillée pendant sept jours afin d'évaluer les coefficients horizontaux de diffusion dans cette zone d'étude. À partir de cartographies successives du traceur, effectuées dans un référentiel lagrangien, le taux de déformation ($\gamma=2.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) et le coefficient de diffusion horizontal ($K_h=23.2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) ont été estimés. Au cours du temps, une diminution importante des concentrations de SF₆ a été observée et reliée à la perte atmosphérique, qui a été quantifiée grâce à l'utilisation de modèles théoriques montrant l'impact du vent soufflant les trois premiers jours de l'expérience.

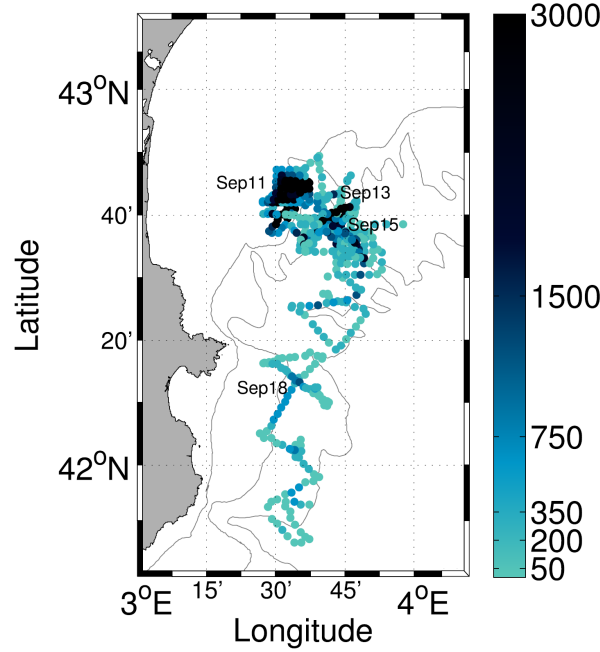


FIGURE 3.15 – Carte des points de mesure de la concentration en SF_6 [fmol L^{-1}] pendant la campagne Latex10. Les dates et les isobathes 100, 200 et 1000 m sont aussi indiquées. D’après *Kersalé et al.* [2016].

Il faut souligner que le SF_6 n’avait jamais été utilisé en milieu côtier à cause de la difficulté de l’acquisition de ces mesures à petite échelle dans ce type de milieu. Néanmoins les estimations de ces coefficients et leurs validations, en accord avec les estimations réalisées en océan ouvert, témoignent de la validité de ces méthodes lorsqu’une bonne stratégie d’échantillonnage est mise en œuvre [*Kersalé et al.* 2016].

L’analyse des images satellites de la température de surface a mis en évidence la présence d’un front entre les eaux froides du plateau et les eaux plus chaudes transportées par le CN. À proximité de ce front, la dynamique du patch est fortement contrainte par cette barrière dynamique induisant une sortie des eaux du plateau vers le bassin Catalan. Nous avons alors pu appliquer la méthode basée sur l’hypothèse d’équilibre entre l’étirement dû à la dynamique à méso-échelle et le mélange à petite échelle telle que celle adoptée pour expérience avec le traceur passif. La largeur du front a été estimée avec les mesures de température et de salinité effectuées avec le thermosalinographe de bord du N/O Téthys II le long de radiales transversales au front. Le largage en mer en même temps de plusieurs flotteurs Lagrangiens

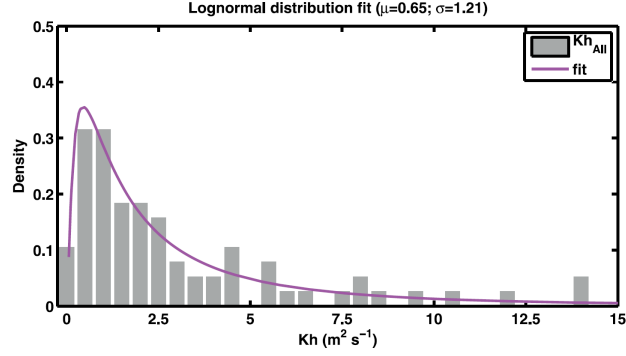


FIGURE 3.16 – Histogramme de fréquence des estimations du coefficient de mélange horizontal K_h basées sur les données de la campagne Latex10. La courbe en violet représente la courbe d'ajustement par une fonction log-normale avec espérance $\mu = 0.65$ et écart-type $\sigma = 1.21$. D'après Nencioli et al. [2013]

a fourni le taux d'étirement. Les multiples estimations de K_h ainsi obtenues ont été utilisées pour tester la robustesse de la méthode et obtenir des estimations statistiquement significatives. L'histogramme de fréquence montre une forte asymétrie positive (Figure 3.16) et la meilleure fonction d'ajustement est une distribution log-normale avec espérance $\mu = 0.65$ et écart-type $\sigma = 1.21$. Nous avons trouvé que 75% des valeurs de K_h sont comprises entre 0.5 et 5 m^2s^{-1} .

Les valeurs moyennes de K_h obtenues pendant Latex10 correspondent aux échelles spatiales de l'ordre de la largeur du patch [~ 10 km, in Kersalé et al. 2016] ou la largeur transversale du front [ici inférieure à 5 km pour Nencioli et al. 2013]. À des échelles de l'ordre de 10 km [Ledwell et Watson 1991; Holtermann et al. 2012] des diffusivités latérales de l'ordre de 10 m^2s^{-1} ont été trouvées. Ces résultats sont également en accord avec les estimations du projet LatMix à l'été 2011, un an après Latex10. LatMix a utilisé différents traceurs (rhodamine et fluorescéine) et des techniques de cartographie (lidar monté sur avion) que LATEX. Les diffusivités isopycnales ont également été calculées à partir de trajectoires de bouées dérivantes. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 1 m^2s^{-1} aux échelles de l'ordre de 1 à 5 km [Shcherbina et al. 2015].

3.3.2 Le mélange vertical

Dans notre étude comparative entre résultats issus de schémas numériques de fermeture de la turbulence et mesures de microstructure, nous avons effectué

	SMC	Boundary Conditions	$k_{\min}$ [m^2/s^2]	Stability Functions	l_{PAR}
KEset	$k - \varepsilon$	Equilibrium	10^{-8}	Kantha and Clayson (1994)	11 m
KEflu	$k - \varepsilon$	Flux	10^{-8}	Kantha and Clayson (1994)	11 m
KEfluCAN	$k - \varepsilon$	Flux	10^{-8}	Canuto et al. (2001)	11 m
KEfluCANMINK	$k - \varepsilon$	Flux	10^{-7}	Canuto et al. (2001)	11 m
KEfluCANMINKOpt	$k - \varepsilon$	Equilibrium	10^{-7}	Canuto et al. (2001)	23 m
KLset	$k - \ell$	Equilibrium	10^{-8}	none	11 m
KLflu	$k - \ell$	Flux	10^{-8}	none	11 m
KLsetMINK	$k - \ell$	Equilibrium	10^{-7}	none	11 m
KLfluMINK	$k - \ell$	Flux	10^{-7}	none	11 m

TABLE 3.1 – Résumé des configurations pour les neuf simulations numériques effectuées. D’après *Costa et al.* [2017a].

neufs simulations (Table 3.1). Afin d’évaluer les performances de chaque simulation, nous avons ensuite comparé les résultats numériques avec les estimations *in situ* de ε , N et K_z . En Figure 3.17 est montrée la comparaison entre les fonctions de densité de probabilité pour ε issus des données *in situ* et des simulations numériques. Dans la couche mélangée, les données *in situ* du taux de dissipation affichent clairement un comportement bimodal avec un pic à $\varepsilon \approx 5 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ et un à $\varepsilon \approx 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$. Les distributions numériques montrent cette caractéristique de manière moins marquée et ont des valeurs généralement plus faibles. La distribution la plus alignée sur les données *in situ* est KEfluMINKOpt. En dessous de la couche mélangée, toutes les distributions issues des simulations numériques sont beaucoup plus étroites que les données *in situ*, les expériences numériques avec schéma $k - \ell$ ont des valeurs moyennes plus élevées que celles avec schéma $k - \varepsilon$ et les expériences numériques avec un seuil sur k ont des valeurs moyennes supérieures aux expériences correspondantes sans seuil. Les comparaisons des distributions de probabilité pour les valeurs de K_z montrent des différences moins significatives entre les différentes simulations et ne permettent pas d’identifier clairement la meilleure configuration numérique par rapport aux données.

Notre étude montre que l’utilisation de la fonction de stabilité de *Canuto et al.* [2001] améliore les performances du schéma de fermeture et que le choix de la valeur du seuil d’énergie cinétique joue un rôle important pour améliorer l’accord entre les prédictions et les mesures. Néanmoins, nous

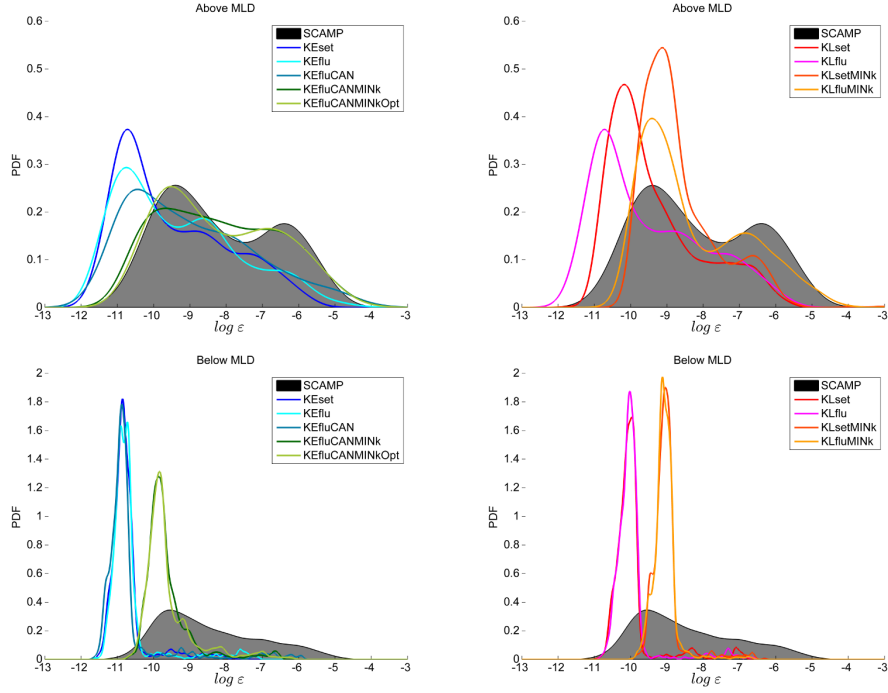


FIGURE 3.17 – Fonctions de densité de probabilité pour ε issues des données *in situ* (ligne noire et zone grise) et des simulations numériques (lignes en couleur). Colonne de gauche : groupe des simulations avec le schéma $k - \ell$; colonne de droite : groupe des simulations avec le schéma $k - \varepsilon$. Ligne du haut : dans la couche mélangée de surface ; ligne du bas : au dessous de la couche mélangée. D’après *Costa et al. [2017a]*.

avons trouvé un comportement non physique des expériences numériques pour des niveaux d’énergie cinétique faible. Ceci conforte l’idée que le minimum d’énergie cinétique devrait être paramétré en fonction de différents mécanismes turbulents plutôt que d’être un seuil fixé [comme déjà suggéré par *Gaspar et al. 1990*]. Enfin, nous avons trouvé que la longueur d’atténuation du rayonnement photosynthétiquement disponible joue un rôle important dans la détermination de la stratification et, par conséquent, la performance du modèle pour prédire ε et K_z . Ce résultat souligne comment l’activité biologique peut influencer les processus physiques. Notre étude montre que la comparaison avec des données de microstructures *in situ* peut aider efficacement à la mise en œuvre d’un schéma de fermeture de la turbulence pour un modèle numérique océanique. Comme il impact les coefficients de mélange dû à la turbulence, ce choix peut être très important pour les études concer-

nant le couplage entre physique et biogéochimie et/ou physique et biologie qui font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4

Couplage physique-biogéochimie-biologie

Les courants océaniques jouent un rôle clé dans le transport des traceurs biogéochimiques, des organismes vivants et des polluants. Selon l'échelle spatio-temporelle, la circulation peut interagir avec différents processus biogéochimiques et influencer la distribution de ces derniers. Dans ce chapitre je présente mes études sur l'impact de la circulation océanique sur les traceurs biogéochimiques en suivant, comme auparavant, une descente d'échelle. Dans la première section, j'aborde la problématique à l'échelle de bassin, avec les études de régionalisation de la Méditerranée ou d'impact de la circulation sur le zooplancton de la Méditerranée Nord-Occidentale. Ensuite, je présente les travaux sur la dynamique du plancton associée à des structure tourbillonnaires en milieu hauturier (Pacific Sud-Occidentale et Mer Ligure) ou côtier (Golfe du Lion). Enfin, j'expose les travaux, toujours concernant la Mer Ligure, sur l'advection-dispersion de particules biogènes en milieu hauturier et des rejets des fermes aquicoles en milieu côtier.

4.1 À l'échelle de bassin

Au niveau global, la circulation générale forcée par le vent crée des régions océaniques bien différenciées en termes de propriété de dispersion : les courants de bord Ouest, les grands systèmes d'upwelling et les gyres océaniques. Ces derniers sont devenus récemment tristement connus en raison de leur tendance à accumuler les débris plastiques en zone de convergence [e.g. *Law et al.* 2010; *Pichel et al.* 2007]. Les courants marins dessinent donc un paysage qu'il est devenu commun d'appeler *seascape* en anglais. Décrire ce paysage d'une façon objective et précise est une étape importante, voir nécessaire, à la gestion et à l'étude du milieu marin. De nombreuses études de régionalisation se basent soit sur la distribution des espèces [e.g. *Ekman* 1953], soit sur la distribution des propriétés physiques et biogéochimiques des eaux [e.g. *d'Ortenzio et Ribera d'Alcalà* 2009], moins nombreuses sont celles qui tiennent compte de la dispersion par la circulation océanique, qui connecte certaines régions et en isole d'autres. À cette fin, on peut introduire le concept de

connectivité hydrodynamique, qui peut être mesurée soit par une probabilité de transport entre régions distinctes, soit par le temps de transport d’une région à une autre. Au niveau de l’océan global, le travail de *Froyland et al.* [2014] est un exemple récent d’étude sur la connectivité entre régions marines et de définition et identification des zones où les débris peuvent s’accumuler. La même approche trouve des applications aussi dans le domaine de l’écologie. La variabilité spatio-temporelle du paysage, chose qui peut raisonnablement être négligée en milieu terrestre, peut par contre impacter la structuration des communautés planctoniques (bactéries, phytoplancton et zooplancton). Comme bien résumé par *Jönsson et Watson* [2016], deux paradigmes différents sont généralement utilisés pour expliquer cette structuration en milieu marin. Une première idée postule que les courants relieraient les différentes régions océaniques, dispersant le plancton partout. Ensuite, la réponse des différentes espèces aux conditions environnementales organise la structure de la communauté. L’alternative est que les différentes régions océaniques ne sont pas si bien connectées, et que cet isolement conduit à une évolution divergente. Bien qu’il soit difficilement envisageable d’exclure complètement un des deux paradigmes, l’étude de la dispersion par les courants, souvent un peu négligée, peut apporter une information importante pour aboutir à des nouveaux modèles.

4.1.1 Une régionalisation de la Méditerranée

La méthode de régionalisation basée sur la distance océanographique nous a permis d’identifier jusqu’à 22 régions en mer Méditerranée [Figure 4.1, *Berline et al.* 2014]. Ces régions sont cohérentes avec la circulation générale des eaux de surface du bassin, les frontières entre les différentes régions étant situées le long de courants pérennes ou autour de gyres [*Millot et Taupier-Letage* 2005]. Nos résultats sont cohérents avec ceux de *Rossi et al.* [2014], qui utilisent la même approche par simulation numérique à particules Lagrangiennes, mais analysent les matrices de connectivité avec une méthode basée sur la théorie des réseaux. Plus récemment *Reygondeau et al.* [2017] proposent une partition 3D du bassin Méditerranéen basée sur une analyse multivariée de données physiques, chimiques et biologiques. Leurs résultats dans la couche épipélagique confirment que notre approche permet effectivement d’identifier les frontières liées à la dynamique horizontale de large échelle et de méso-échelle.

Par rapport à d’autres régionalisations existantes, notre approche apporte de nouvelles informations sur les processus affectant la distribution de certaines espèces planctoniques et sur les différents types d’environnement marins et leur variabilité. De plus, elle peut aider à suivre la dispersion des

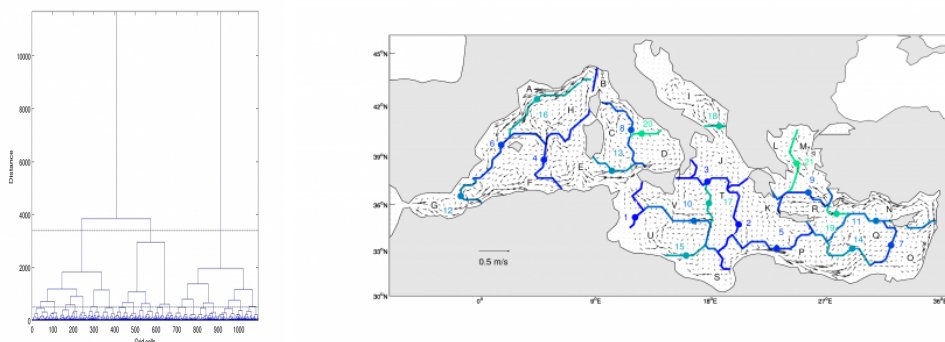


FIGURE 4.1 – Gauche. Dendrogramme illustrant l'agrégation des mailles du domaine de calcul selon la connectivité. Du bas vers le haut du dendrogramme, les régions les plus connectées sont agrégées de proche en proche et donc de plus en plus grandes. Les pointillés horizontaux montrent deux niveaux de coupure correspondant à une régionalisation en 3 et 22 régions. Droite. Régionalisation de la Méditerranée superposée aux courants moyens dans la couche 0-100 m issus du modèle PSY2V3 de Mercator Océan. La variation du bleu au vert des couleurs des frontières correspond à une régionalisation à une échelle de plus en plus fine (de plus en plus bas niveau de coupure du dendrogramme), c'est-à-dire à des temps de transport de plus en plus faibles et une connectivité de plus en plus forte. D'après *Berline et al.* [2014].

espèces entrant en mer Méditerranée par le canal de Suez ou à identifier les zones de dispersion de polluants. Cette méthode systématique et rigoureuse de régionalisation est complémentaire des méthodes basées sur la niche environnementale des espèces et généralisable à d'autres régions océaniques et d'autres échelles spatiales.

4.1.2 Simulation du transport du zooplancton en Méditerranée Nord-Occidentale

Afin d'étudier l'influence des processus hydrodynamiques sur le transport et les distributions du zooplancton dans la Méditerranée Nord-Occidentale, nous avons développé, à partir du code *ROFF* [*ROMS Offline Floats*, Carr et al. 2008] un module Lagrangien de type individu centré [*Qiu et al.* 2011] qui a été couplé avec le modèle 3D de circulation Symphonie [*Hu et al.* 2009]. Les individus sont libérés tous les 3 jours de mars à août 2001 en deux zones initiales : autour de la station d'échantillonnage DYFAMED au large de Nice et dans la zone du panache fluvial du Rhône et à trois différentes profon-

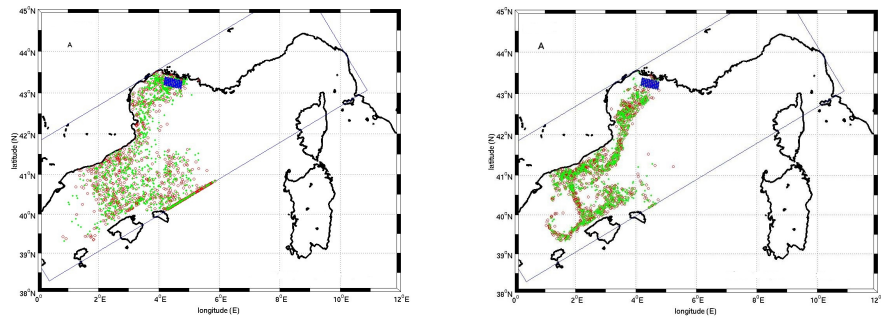


FIGURE 4.2 – Distribution finale des particules lâchées en mars 2001 dans le panache du Rhône (carré bleu) à 5 m (cercles rouges) ou à 20 m (losanges verts) de profondeur. Gauche. Simulations sans migration verticale. Droite. Simulation avec migration verticale. D'après *Qiu et al.* [2010].

deurs : 5 m, 20 m (pour le panache) et 100 m (pour DYFAMED). Ensuite, les individus sont suivis pendant 40 jours et deux différents comportements sont simulés : particules passives ou avec un simple modèle de migration verticale nycthémerale. Les destinations des particules sont analysées sur la base de 9 secteurs différents dans lesquels le domaine de calcul a été divisé.

Nos résultats suggèrent que le transport et les distributions de particules sont fortement liés aux structures hydrodynamiques du plateau associées au Courant Nord. À l'échelle régionale, les particules relâchées autour de la station DYFAMED après avoir été transportées pendant 40 jours se répandent presque partout dans le bassin. Dans les conditions du printemps et de l'été, les courants favorisent un échange de particules du plateau vers le large, tandis que le transport du large vers le plateau est presque inhibé par la présence du Courant Nord, qui agit comme une barrière hydrodynamique. Ainsi la plupart des particules larguées dans le panache du Rhône restent dans le GdL ou se retrouvent sur le plateau catalan. En introduisant la migration nycthémerale, nous avons observé des changements de destinations de particules, en particulier pour les périodes où le courant devient plus cisailé, mais cela, en général, n'a pas donné lieu à une plus grande rétention de particules sur le plateau [Figure 4.2, *Qiu et al.* 2010]. En utilisant un modèle plus complexe, couplé physique-biogéochimique simulant la distribution de la population de *Centropages typicus*, *Carlotti et al.* [2014] obtiennent des résultats qui s'accordent bien avec les nôtres.

4.2 À la (sous)méso-échelle

La (sous)méso-échelle est un régime très énergétique qui présente des échelles temporelles (du jour à la semaine) en résonance avec des processus biologiques clés tels que la croissance des cellules phytoplanctoniques ainsi que de la composition, l'étendue et la durée des blooms [e.g. Lévy 2008; d'Ovidio *et al.* 2010; Lévy *et al.* 2015; Mahadevan 2016]. Les tourbillons de méso-échelle peuvent influencer les cycles biogéochimiques dans l'océan supérieur grâce à l'advection verticale et horizontale de nutriments et d'organismes marins selon la polarité d'un tourbillon (cyclonique ou anticyclonique) et les conditions biologiques initiales du fluide piégé dans le cœur du tourbillon au moment de sa formation [e.g. Gaube *et al.* 2013]. Récemment, Lehahn *et al.* [2017] ont montré que les fines échelles peuvent aussi renforcer une floraison, en particulier en milieu oligotrophe, en intervenant sur la régulation de la dynamique entre nutriments, phyto- et zooplancton.

4.2.1 Evolution d'un bloom phytoplanctonique dans le Pacifique Sud-Occidental

Dans le cadre du projet *OUTPACE* [*Oligotrophy to UlTra-oligotrophy Pacific Experiment*, Moutin *et al.* 2017], nous avons étudié l'évolution temporelle d'un bloom phytoplanctonique dans le Pacifique Sud-Occidental. Cette région est habituellement caractérisée par des conditions largement oligotrophes, i.e. des faibles concentrations d'éléments nutritifs inorganiques à la surface et à des maxima de chlorophylle profonds. Par conséquent, la présence d'une floraison de surface, telle que celle qui a été échantillonnée à la station LD-B, représente une perturbation importante de l'état écologique moyen (Figure 2.9). En combinant les données *in situ* et de télédétection satellite, nous avons caractérisé à la fois les propriétés biogéochimiques de la floraison ainsi que la circulation physique responsable de sa structuration. Les observations biogéochimiques montrent en séquence la floraison elle-même suivie d'une diminution de la chlorophylle-a de surface, une forte réduction des concentrations en surface de phosphate par rapport à l'eau de la gyre subtropicale plus à l'est et un découplage de la chlorophylle-a de la nitracline profonde. Toutes ces caractéristiques sont compatibles avec la fixation de l'azote dans la floraison. Les données physiques suggèrent que la circulation de surface à méso-échelle est le mécanisme principal qui entraîne l'advection du bloom (Figure 4.3), alors que le rôle de la sousméso-échelle semble très réduit. Nous pouvons donc conclure que les eaux de la gyre subtropicale peuvent produire des concentrations significatives de chlorophylle-a à la sur-

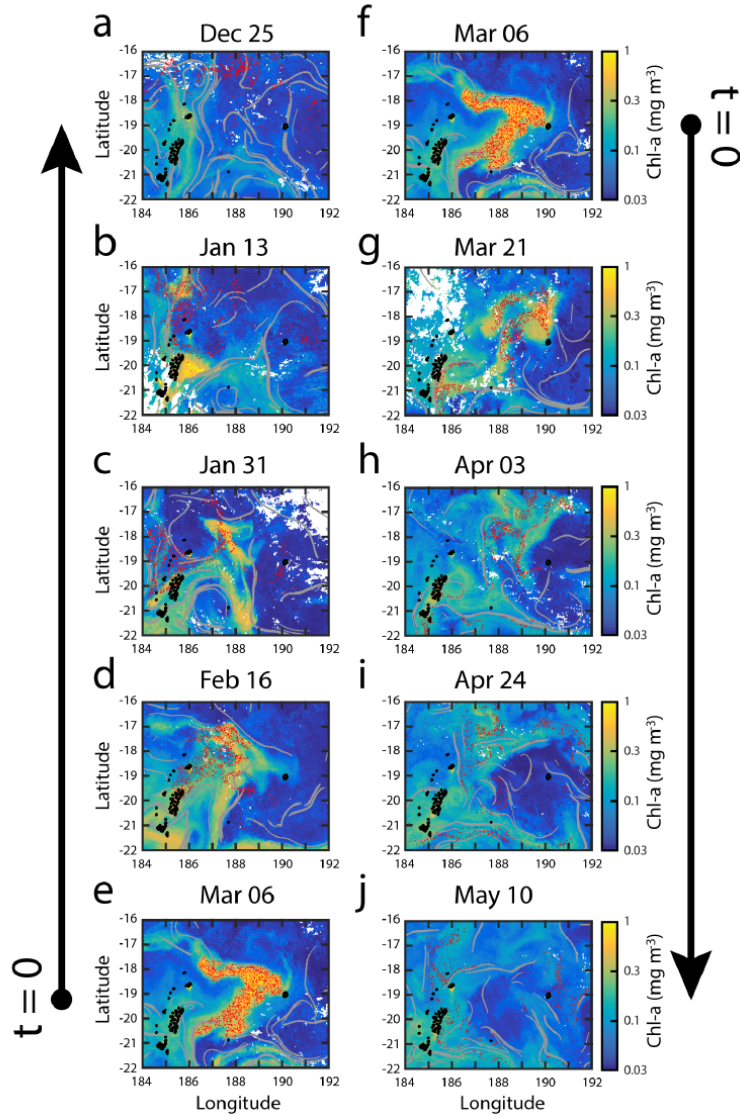


FIGURE 4.3 – Cartes satellite de la concentration de surface de la chlorophylle montrant l'évolution temporelle du bloom échantillonné à la station LD-B de la campagne OUTPACE. Les filaments caractérisés par des $FSLE > 0.15$ [jour⁻¹] sont superposés en gris, tandis que les point rouges indiquent les positions des particules numériques Lagrangiennes. Ces deux derniers diagnostics sont calculés à partir des données de courant de surface issu des champs d'altimétrie satellite. D'après *de Verneil et al. [2017]*.

face qui sont étirées, déformées et transportées sur de grandes distances par la circulation de méso-échelle. De plus, dans ce cas d'étude, pour la période considérée, le transport est orienté vers l'est, contrairement à l'écoulement à grande échelle et au mouvement moyen de la méso-échelle. En conséquence, les études futures sur la production de surface dans la région doivent tenir compte du rôle que jouent les structures complexes de méso-échelle dans la redistribution de l'eau de la gyre subtropicale [de Verneil et al. 2017].

4.2.2 Dynamique de la structure de la communauté phytoplanctonique en Mer Ligure

Pendant la campagne OSCAHR [Doglioli 2015], menée à l'automne 2015, l'analyse effectuée par le logiciel SPASSO nous a conduit à échantillonner une structure de fine échelle en Mer Ligure. La dynamique physique verticale et les propriétés biogéochimiques de la zone étudiée ont été échantillonnées le long de la route par des profils CTD continus à haute résolution effectués grâce à un MVP et lors de stations fixes par un système de pompage à résolution verticale de 1 m déployé à la place de la rosette. La structure étudiée présentait une structure cyclonique (Figure 4.4, première ligne), avec un noyau relativement froid entouré d'eaux plus chaudes (Figure 4.4, deuxième ligne). La remontée des isopycnes en correspondance avec le centre de la structure avait été renforcée par pompage d'Ekman associé à un fort coup de vent. Les eaux de surface étaient totalement épuisées en nitrate et phosphate. Les eaux de subsurface plus froides et plus riches en nutriments montraient une augmentation de la concentration de surface en chlorophylle (Figure 4.4, troisième ligne). Une variation à fine échelle de l'abondance des différents groupes phytoplanctoniques a pu être mise en évidence clairement. *Prochlorococcus*, pico- et nano-eucaryotes étaient plus abondants dans les eaux du centre de la structure, plus froides, tandis que *Synechococcus* dominait dans les eaux en bordure de la structure, plus chaudes (Figure 4.5). Cela nous a permis de confirmer que même à ces fines échelles, la dynamique physique impacte la distribution des espèces phytoplanctoniques. De plus, les mesures à haute fréquence de cytométrie, combinées aux propriétés physiques, ont permis de distinguer plus finement les différents types de masses d'eaux présentes en surface. Enfin, la stratégie Lagrangienne d'échantillonnage a permis l'application d'un modèle de croissance de population qui a fourni des estimations du taux de croissance *in situ* pour *Prochlorococcus* et *Synechococcus*. Ces dernières corroborent les observations de distribution de surface opposée entre intérieur et extérieur de la structure pour ces deux groupes fonctionnels [Marrec et al. 2018].

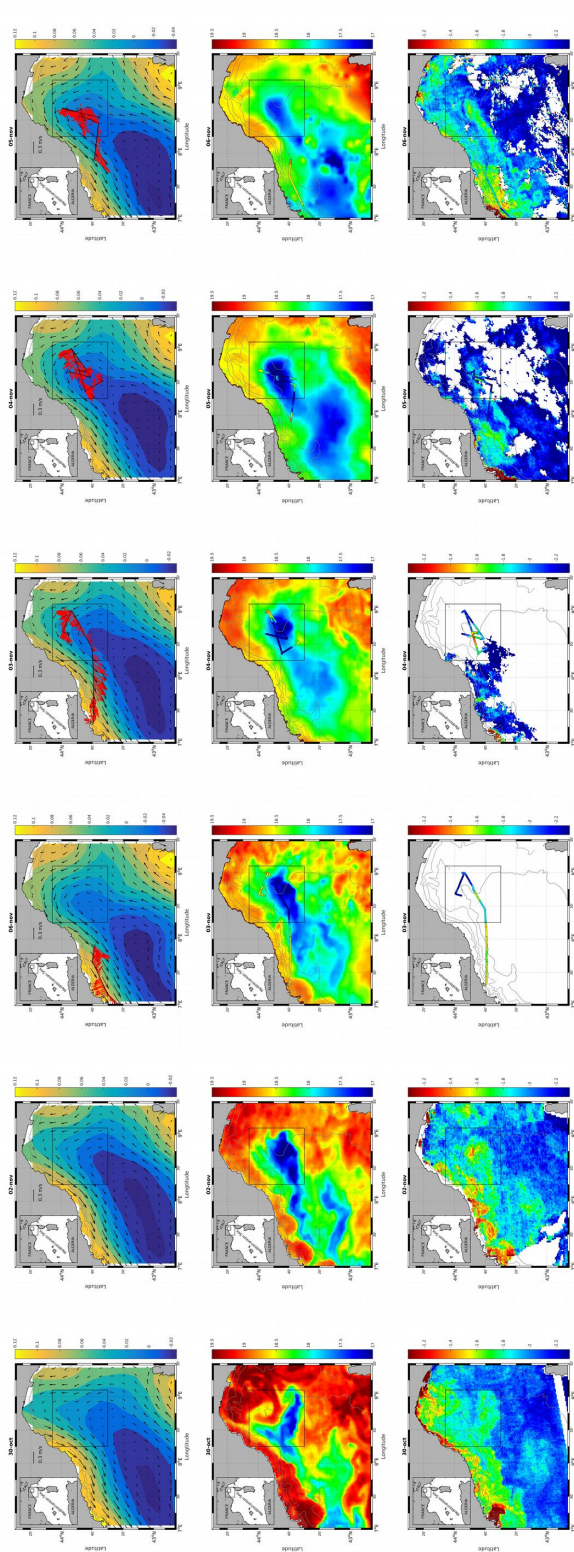


FIGURE 4.4 – Mesures le long de la route de la campagne OCAHR superposées aux données satellite CMEMS - *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*). Première ligne : données ADCP (flèches rouges) et courants (flèches noires) issue de l'altimétrie (couleurs). Deuxième ligne : mesures de température (point colorés) issues du thermosalinographe de bord et carte de SST. Troisième ligne : comme pour la ligne dessus mais pour la concentration en chlorophylle de surface. Les colonnes correspondent aux jours du 2 au 6 novembre 2015.

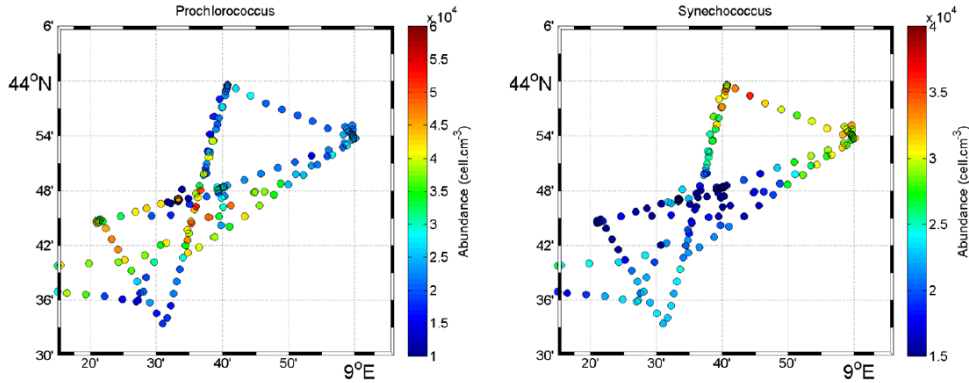


FIGURE 4.5 – Abondances de surface de *Prochlorococcus* (gauche) et *Synechococcus* (droite) mesurées par cytométrie en flux automatisée du 3 au 5 novembre 2015 pendant la campagne OSCAHR. D’après *Marrec et al.* [2018].

4.2.3 Dynamique du plancton dans un tourbillon côtier du Golfe du Lion

Afin d’estimer les impacts des tourbillons côtiers étudiés dans le cadre du projet LATEX (voir section 3.2.1) sur la distribution des nutriments et du plancton dans la partie ouest du GdL, nous avons couplé au modèle hydrodynamique SYMPHONIE le modèle biogéochimique de type fonctionnel ECO3M [*Baklouti et al.* 2006].

Cette étude, basée sur une simulation réaliste de l’année 2001, se concentre sur un tourbillon anticyclonique de longue durée détecté pendant l’été [*Hu et al.* 2011b]. Cette structure a des caractéristiques biogéochimiques similaires à celles observées pour des anticyclones dans l’océan ouvert, comme par exemple une faible productivité dans le centre et une remontée de la nutricline sur les bords. Cependant, son fonctionnement et son impact sur la distribution des nutriments et du plancton sont compliqués par des interactions potentielles avec la topographie, l’upwelling côtier et le Courant Nord.

Au début, le tourbillon agit principalement comme un transporteur sur l’horizontale du bloom associé à l’upwelling provoqué par le vent de Tramontane le long de la côte du Languedoc (Figure 4.6). Ensuite, des vitesses verticales se développent sur les bords du tourbillon créant l’apparition d’eaux enrichies en éléments nutritifs. Le processus d’upwelling est renforcé sur le côté occidental du tourbillon en raison de la topographie du plateau le long de la côte du Roussillon. Un deuxième bloom se développe près du côté nord-ouest du tourbillon. Le bloom provoqué par le tourbillon et celui provoqué

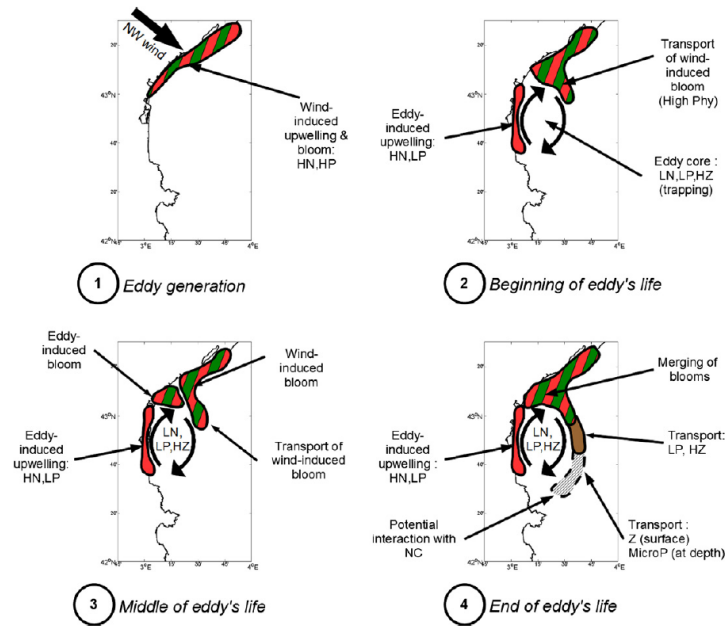


FIGURE 4.6 – Séquence temporelle du fonctionnement schématisé du tourbillon côtier étudié. Acronymes : HN ou LN, concentrations élevées ou faibles en éléments nutritifs ; HP ou LP, biomasse élevée ou faible de phytoplancton ; HZ, biomasse élevée du zooplancton, MicroP, microphytoplancton. Les zones rouges sont riches en nutriments ; les zones vertes sont riches en phytoplancton ; les zones brunes sont enrichies en zooplancton. D'après *Campbell et al.* [2013].

par le vent fusionnent ensuite sur le côté Est. Ce processus d'agrégation peut expliquer l'apparition persistante d'un filament de chlorophylle élevée observé sur le bord offshore du tourbillon pendant toute la durée de l'étude. Ici se développe aussi du zooplancton qui par processus *top-down* contribue à la disparition du filament au sud de 43°N à la surface. Enfin, la proximité du bord sud du tourbillon avec le Courant Nord permet d'échanger de la matière organique de la zone côtière vers le domaine du large [*Campbell et al.* 2013].

Des structures similaires de vitesses verticales ont été trouvées par *Borrione et al.* [2016] dans une étude numérique d'un tourbillon observé et modélisé en Mer Ligure.

4.3 Advection-dispersion et décantation

La chute de particules dans l'océan représente un problème de physique particulièrement intéressant et complexe.

Sa complexité dépend essentiellement de la nature turbulente de l'océan. Par conséquent, on émet souvent l'hypothèse que la vitesse de chute en milieu océanique W est la même que celle dans un fluide au repos w , tout en sachant qu'il s'agit une forte approximation. L'observation en laboratoire, mais surtout *in situ*, de ce processus étant difficile, la modélisation numérique peut apporter des informations clés. Par exemple, dans un modèle bidimensionnel d'écoulement aléatoire *Pasquero et al.* [2003] obtiennent deux différents types de trajectoires pour des particules identiques : certaines particules sont transportées dans les courants descendants entre tourbillons et d'autres restent piégées dans des trajectoires fermées avec des mouvements verticaux oscillatoires. On en déduit une distribution bimodale des déplacements verticaux, impliquant qu'en moyenne W peut être plus grande ou plus petite que w selon la quantité de particules en suspension. Cela dépend alors de l'échelle de temps d'évolution des structures tourbillonnaires : si elle est supérieure au temps caractéristique pour le processus de décantation, la distribution des déplacements verticaux à un moment donné devient beaucoup plus étendue que dans le cas d'écoulement spatialement non corrélé. Par modélisation LES (*Large Eddy Simulation*), *Noh et al.* [2006] trouvent qu'en présence d'une circulation de Langmuir, W dans la couche de mélange océanique est toujours plus petite que w , avec donc des particules qui restent en suspension et tendent à s'accumuler dans les régions à forte vorticité. Une vitesse de chute plus faible permet au phytoplancton de passer plus de temps dans la région euphotique de surface, ainsi la turbulence impacte les processus de compétition du plancton, comme proposé par *Margalef* [1978]¹. Les résultats numériques de *Sciascia et al.* [2013] confirment cette vision, montrant comment la taille et la forme des cellules, ainsi que la variabilité temporelle liée à la turbulence influencent la vitesse de sédimentation et, à terme, la compétition.

   côté de ces questions plus écologiques, la compréhension de ces processus devient importante aussi pour estimer correctement la pompe biologique et la sédimentation de polluants particuliers.

La pompe biologique de carbone est un processus qui, au travers de la subduction de matière organique dissoute et la chute de particules organiques, transfère une partie du carbone atmosphérique vers les profondeurs océaniques. Une modélisation appropriée du processus de chute des particules dans des champs de vitesse réalistes tridimensionnels devient donc nécessaire pour évaluer correctement la quantité de carbone séquestrée dans l'océan et, en général, pour mieux comprendre le cycle biogéochimique mondial et son influence sur le climat terrestre [*Monroy et al.* 2017].

¹Pour une présentation étendue, voir aussi *Mann et Lazier* [2005]

D'autre part, une catégorie spécifique de polluants particuliers en milieu côtier est constituée par les rejets des fermes aquicoles. L'aquaculture mondiale connaît une croissance rapide au cours des soixante dernières années. Elle est passée d'une production de moins d'un million de tonnes au début des années 1950 à 73.8 millions de tonnes en 2014. Malgré quelques différences régionales, cette augmentation est généralisée à l'ensemble des continents. Le taux d'augmentation annuel moyen de la décennie 2005-2014, bien qu'en diminution par rapport à la décennie précédente de 1.5%, reste de 5,8% [FAO 2016]. En 2014, l'aquaculture marine et côtière représentent 30% de la production totale de l'aquaculture et l'élevage intensif d'espèces nourries par les aquaculteurs augmente en termes de production plus rapidement que l'élevage extensif. Son expansion continue a toujours suscité des inquiétudes quant aux impacts possibles sur les écosystèmes côtiers et, par conséquent, de l'intérêt pour les outils prédictifs permettant d'évaluer ces impacts.

4.3.1 Modèles de chute de particules biogènes

Dans le cadre du projet français MOOSE (*Mediterranean Ocean Observing System for the Environment*), une série temporelle eulérienne dite DYFA-MED est réalisée depuis 1991 en Mer Ligure au large de Nice. En plus des profils CTD mensuels, un mouillage autonome est déployé avec CTD et capteurs de courant (depuis 2009) et deux pièges à sédiments (Technicap PPS5) pour la collecte de grandes particules et du zooplancton tous les 15 jours (48 échantillons par an). Ces pièges à sédiments ont été largement utilisés au cours des trois dernières décennies pour obtenir des estimations du «flux vertical» [Buesseler et al. 2007].

Nous avons utilisé un modèle Lagrangien pour évaluer les régions sources de particules collectées dans les pièges à sédiments à la station DYFAMED en nous basant sur une simulation réaliste de l'année 2001. L'analyse suggère que les régions sources associées dépendent fortement des champs d'écoulement horizontal et de la vitesse de décantation des particules. On observe des variations mensuelles dans les schémas de distribution des régions sources, impactant assez fortement les interprétations 1D des observations de flux de particules (Figure 4.7). Nos résultats indiquent que le modèle Lagrangien est utile pour estimer les régions sources de particules collectées par des pièges à sédiment et son adaptabilité pourra permettre l'implémentation des processus physiques (e.g. turbulence verticale) et biogéochimiques (e.g. flocculation, dégradation) [Qiu et al. 2014]. Récemment Van Sebille et al. [2015], grâce à ce type de modélisation, ont montré comment les courants océaniques peuvent en effet laisser une empreinte importante dans les sédiments profonds et ainsi impacter fortement les estimations climatiques de la température basées sur

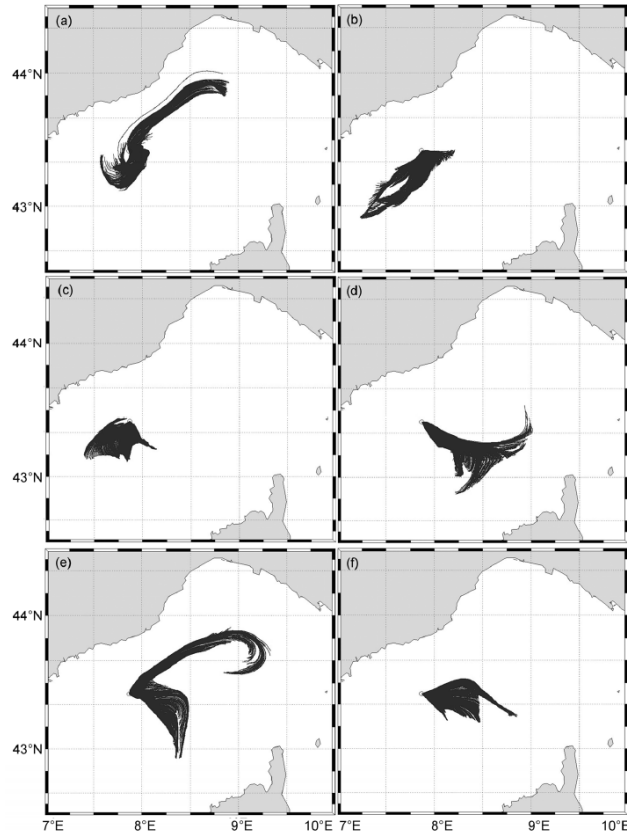


FIGURE 4.7 – Trajectoires des particules de taille $100\ \mu\text{m}$ calculées à rebours à partir du piège à sédiment situé à 200 m de profondeur au site DYFAMED (cercle) pour les mois de (a) mars, (b) avril, (c) mai, (d) juin, (e) juillet et (f) août 2001. D’après *Qiu et al.* [2014].

les fossiles des micro-organismes marins.

4.3.2 Évaluation de l’impact environnemental de fermes aquicoles

Au début des années 2000, la réalisation d’un élevage de poissons à proximité de la réserve marine du Promontorio di Portofino et de sites de grand intérêt touristique, avait déclenché un certain débat public. Les travaux que nous avons menés sur la circulation côtière dans cette zone [*Doglioli et al.* 2004b] ont été la base pour une étude sur l’impact environnemental de cette ferme aquicole.

Le code lagrangien LAMP3D a été couplé au modèle POM pour obte-

nir un modèle tridimensionnel d'advection-dispersion forcé par le courant côtier et le vent local (Figure 4.8). L'attention s'est concentrée sur les dispersions de l'azote, du phosphore et du carbone organique. Elles ont été calculées en utilisant une grille 3D de haute résolution, puis comparées aux données expérimentales *in situ*. Dans les simulations numériques, la dispersion de différents rejets de l'aquiculture (aliments dissous, matière fécale et granules d'alimentation non consommés) a été évaluée en changeant les vitesses de sédimentation des particules et leurs caractéristiques de dégagement (continu ou périodique). Les particules dissoutes tendent à s'écarter rapidement et à subir une dilution rapide selon la direction de la circulation marine dominante. En revanche, les particules en voie de sédimentation demeurent principalement confinées dans le secteur d'exploitation de la pisciculture et descendent rapidement vers le fond. Les concentrations prévues se sont avérées basses dans les compartiments définis par la colonne d'eau et par les sédiments, et n'excèdent jamais le seuil des crises environnementales [Doglioli *et al.* 2004a].

Dans la mesure où les aliments non consommés sont à l'origine des impacts les plus importants sous les élevages puisque la vitesse de sédimentation des granules d'alimentation représente un paramètre principal pour les modèles de dispersion, une expérience physique en laboratoire a été mise en place pour pallier l'absence, dans la littérature scientifique, des résultats sur les conditions méditerranéennes. En effet, si quelques données sur les propriétés physiques des granules d'alimentation ont été éditées dans le cadre des salmonidés élevés dans les eaux froides, on pouvait déplorer le manque complet d'information en Méditerranée, sur les valeurs typiques de température, de salinité et de composition d'alimentation pour les espèces les plus communes. Nous avons déterminé les propriétés d'adsorption de l'eau, les temps de flottement et les vitesses de sédimentation pour des conditions en laboratoire reproduisant l'eau méditerranéenne [Vassallo *et al.* 2006]. De plus, afin de mieux tenir compte de la dégradation des particules en fonction des conditions aussi bien physiques que biologiques un module benthique a été développé [FOAM - *Finite Organic Accumulation Module*, De Gaetano *et al.* 2008] et ensuite optimisé à partir de mesures en laboratoire et *in situ* dédiées [De Gaetano *et al.* 2011]. Les résultats de ces travaux ont confirmé le faible impact environnemental local de la ferme aquicole (Figure 4.8). À côté de notre cas d'étude, de nombreux autres travaux ont été menés sur l'impact des fermes aquicoles mettant en avant des situations très différentes selon les zones géographiques et les techniques d'élevage [pour une comparaison détaillée au niveau mondial, voir Price *et Morris, Jr.* 2013]. Ces études ont confirmé que la modélisation numérique est un outil puissant pour des prévisions d'impact et peuvent contribuer à la gestion de l'environnement

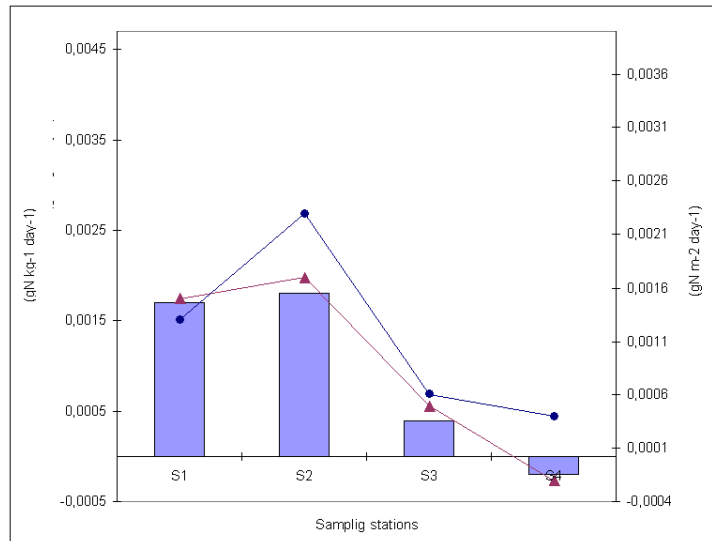
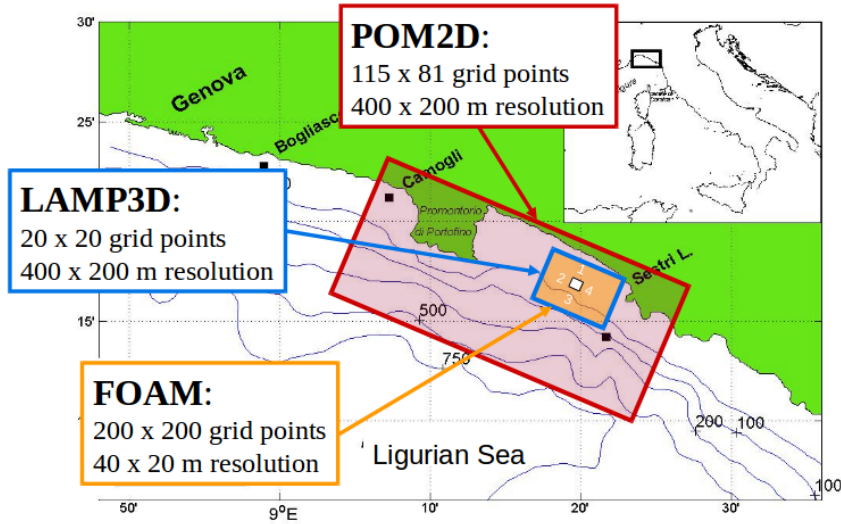


FIGURE 4.8 – Haut. Configuration des différents modèles numériques pour la simulation de la dispersion des rejets d’une ferme aquicole (carré blanc). Les stations de mesure pour l’évaluation d’impact sont indiquées par les chiffres de 1 à 4. Bas. Flux journalier d’azote mesuré *in situ* (barres, ordonnée gauche) et simulé par le modèle (ordonnée droite) sans (points bleus) et avec (triangles rouges) module benthique de dégradation aux quatre stations de contrôle. Modifiée d’après *Doglioli et al. [2004a]*; *De Gaetano et al. [2008]*.

côtier.

Bilan et perspectives

Dans ce dernier chapitre, je fais d'abord un bilan succinct de résultats des recherches menées depuis ma thèse. Ensuite je présente mes perspectives pour mon activité de recherche et pour celle d'enseignement.

5.1 Bilan des recherches et d'encadrement

Bien que je me sois spécialisé pendant ma thèse en océanographie physique et modélisation numérique, ma formation universitaire en sciences de l'environnement marin m'a toujours poussé à (et en même temps permis de) m'intéresser à des questions nécessitant une approche multidisciplinaire. Mon recrutement à Marseille m'a ensuite donné la possibilité de m'engager de plus en plus dans les campagnes en mer et l'océanographie satellite, en participant au développement de nouvelles approches.

Mes activités de recherche ont permis de mieux comprendre la dynamique des tourbillons dans une large gamme d'échelle et de sites : des tourbillons côtiers en aval du Promontoire de Portofino ou dans le Golfe du Lion, à ceux du sillage des îles Hawaï ou Marquises, aux tourbillons océaniques du Bassin du Cape ou de la mer de Corail. J'ai pu identifier les différents processus de genèse de ces structures et mettre en évidence leur rôle dans les échanges de masses d'eau et d'autres propriétés. Je me suis intéressé ensuite aux plus petits filaments, en appliquant des techniques Lagrangiennes de pointe telles que les FSLE aux données satellite, radar ou de bouées dérivantes. Ainsi j'ai pu contribuer à une des premières identifications *in situ* d'un point hyperbolique, ce qui a ensuite amené à une nouvelle approche dans la définition des échanges côte-large avec des nouvelles estimations pour le Golfe du Lion. J'ai travaillé sur l'estimation *in situ* du mélange turbulent sur l'horizontale et sur la verticale et sur sa modélisation, en participant au développement d'une méthodologie avancée pour le suivi Lagrangien des masses d'eau, à une expérience de largage et suivi de traceur en eaux côtières, ainsi qu'à la mise au point de nouvelles recettes numériques pour la fermeture de la turbulence dans les modèles à équations primitives. J'ai combiné ces études focalisées principalement sur l'océanographie physique avec de nombreux questionnements autour de la thématique du couplage entre physique et biogéochimie.

Mon approche Lagrangienne a trouvé naturellement des applications dans mes études de la dispersion des polluants, la connectivité marine, la dynamique du plancton et la chute des particules. Dans ce cas aussi, j'ai travaillé sur plusieurs échelles et sites (Mer Ligure, Golfe du Lion, Méditerranée et Pacifique sud-occidental).

Je considère cette variété de questions scientifiques, de méthodologies et de zones d'étude très enrichissante et, d'une certaine façon, caractéristique du travail de l'enseignant-chercheur universitaire.

Les résultats de ces recherches ont donné lieu à plus d'une trentaine d'articles dans des revues internationales à comité de lecture et à plus d'une cinquantaine de participations à des conférences internationales et d'autres nationales. Une partie importante de cette production scientifique s'insère dans le cadre de mon travail d'encadrement de stagiaires et doctorants ou de collaboration avec des chercheurs post-doctoraux. J'ai aussi contribué au développement d'outils numériques pour l'étude de sorties des modèles de circulation (WATERS), pour la simulation de la dispersion (LAMP3D & FOAM), pour l'analyse de données de campagne (LATEXtools) ou d'aide aux stratégies échantillonnage *in situ* (SPASSO), qui sont distribués librement (voir section “*Downloads*” de mes pages web personnelles).

Ces acquis sont à mon avis une base solide sur laquelle je peux envisager de bâtir mon activité future de recherche et d'encadrement, ainsi que mes enseignements.

5.2 Perspectives de recherche

À court terme, j'envisage de finaliser la valorisation des campagnes en mer OUTPACE et OSCAHR et des études numériques sur le sillage des îles Marquises et sur la connectivité marine.

Concernant OUTPACE, nous nous intéressons à la dynamique aux trois différentes stations longue durée afin de fournir le contexte physique des mesures biogéochimiques et à la circulation horizontale de surface dès l'échelle régionale à la sousmésos-échelle et son impact sur la distribution des traceurs biogéochimiques et du phytoplancton.

Concernant OSCAHR, d'un côté nous investiguons les vitesses verticales et la dynamique de la structure physique à laquelle sont associées les variations dans la distribution du phytoplancton observées à petite échelle. De l'autre, nous travaillons sur une validation des mesures altimétriques par comparaison fine avec les mesures MVP et ADCP le long de traces satellite et synchrones avec elles.

Les travaux de modélisation numérique dans les eaux des îles Marquises

seront finalisés afin de valoriser les études de sensibilité pour la mise au point d'une première configuration du modèle physique et ensuite d'une deuxième configuration pour le modèle couplé physique-biogéochimie, ainsi que l'étude de la dynamique du sillage en aval des îles et les mécanismes générant l'effet d'îles.

Enfin, pour ce qui concerne les travaux sur l'application de la théorie des graphes aux problèmes de connectivité marine, la nouvelle méthodologie développée par *Costa et al.* [2017b] sera utilisée dans une comparaison avec un modèle de metapopulation. Nous travaillons aussi afin de diffuser ce qui nous semble une approche méthodologique correcte pour l'application de la théorie des graphes aux études de connectivité en écologie marine et aussi terrestre.

À moyen terme, je m'investirai sur les projets PEACETIME et BIOS-WOT.

Concernant PEACETIME, nous venons de commencer la valorisation des mesures de la campagne de mai-juin 2017. Ce travail s'insère dans la même approche que celle de la campagne OUTPACE, c'est à dire de fournir le contexte physique des mesures biogéochimiques, tout en bénéficiant cette fois de notre solide connaissance de la région Méditerranéenne. La spécificité du projet PEACETIME, qui se concentre sur les flux atmosphériques et l'interface atmosphère-mer, nous amènera, j'envisage, au développement de nouvelles approches Lagrangiennes qui puissent combiner les effets de la dynamique rapide de l'atmosphère à celle, plus lente, océanique.

En 2018, nous commençons aussi les travaux de préparation pour les campagnes associées au lancement du satellite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*, <https://swot.cnes.fr/>). Cette mission mettra en orbite en 2021 l'instrument appelé KaRIn, un radar en bande Ka fonctionnant suivant le principe d'un SAR (*Synthetic Aperture Radar* ou Radar à Synthèse d'Ouverture). Les radars altimétriques actuels sont limités à une bande de moins de quelques kilomètres à la verticale du satellite. Par contre, KaRIn pourra réaliser des mesures le long d'une fauchée large d'environ 120 km, grâce à 2 antennes radars situées aux extrémités d'un mât de 10 m (Figure 5.1). Cette mission fournira aux hydrologues le champ spatialisé des niveaux de tous les plans d'eau de la planète de largeur supérieure à 100 m. En océanographie, SWOT fournira des champs d'altimétrie sur une largeur d'environ 150 km avec une résolution spatiale s'approchant enfin des mesures satellite de SST ou de couleur de l'eau. À la différence de ces deux dernières mesures, celles de SWOT ne seront pas affectées par la présence de nuages. On pourra donc observer par satellite la circulation de fine échelle et la circulation côtière. Par contre, le cycle temporel de répétition des traces de

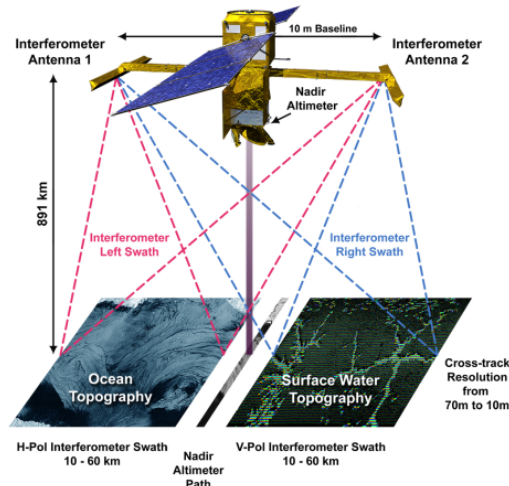


FIGURE 5.1 – Schéma de fonctionnement du satellite SWOT *Surface Water and Ocean Topography*. Figure tirée du site <https://swot.cnes.fr/>.

SWOT sera entre 10 et 20 jours, ce qui n'est pas complètement satisfaisant pour des études sur la sous-méso-échelle océanique. Toutefois, au début de la mission, il y aura une période de 6 mois dite *fast-sampling phase* pendant laquelle le satellite ne recouvrira pas la totalité de la surface de la Terre, mais, à des fins d'étalonnage, répétera certaines traces tous les jours (Figure 5.2). De plus, dans les points de croisement de ces traces il y aura même deux passages par jour. Les résolutions spatiales et temporelles seront alors en parfaite adéquation. Il s'agit donc d'une occasion unique pour étudier les fines échelles dans certaines zones océaniques. Je participe au consortium de chercheurs qui ont lancé le projet BIOSWOT (PI F.d'Ovidio) envisageant d'effectuer une campagne de mesures physiques et biogéochimiques dans la zone océanique du point de croisement au large de la côte Algérienne (cercle rouge dans la Figure 5.2) sur la base de l'expérience de la campagne OSCAHR. De plus, nous avons l'ambition de mener un consortium international qui effectuerait une série de campagnes coordonnées dans d'autres points de croisement (*“Adopt a cross-over initiative”*). Grâce au colloque FineMed (www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/FineMed/) nous avons déjà développé une collaboration avec les collègues de la *Middle-East Technical University* (Ankara, Turkey) qui travaillent sur le point de croisement dans le bassin oriental de la Méditerranée. D'autres campagnes sont envisagées en Atlantique dans la Rétroflexion des Aiguilles, au large de Terranova et en Mer du Labrador, tandis qu'au Pacifique, il y aura très probablement une campagne dans le Courant de Californie et peut-être une autre dans la partie

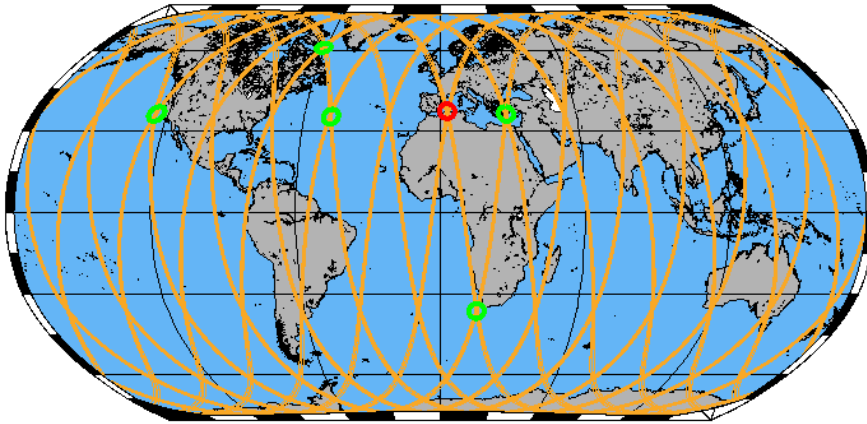


FIGURE 5.2 – Traces du satellite SWOT pendant la phase de répétition rapide (version CalVal de juin 2015, données issus du site web www.aviso.altimetry.fr/fr/missions/missions-futures/swot/orbite.html). En orange la bande d’altimétrie interférométrique autour de la trace d’altimétrie nadir. Le cercle rouge montre le point de croisement qui sera étudié lors de la campagne BIOSWOT, tandis que les cercles verts, les zones des campagnes océanographiques de la collaboration internationale “*Adopt a cross-over initiative*”.

Sud-Occidentale.

Dans le cadre du projet BIOSWOT, nous proposons d’aborder les questions scientifiques suivantes, qui sont aussi au cœur de l’Axe Transverse du MIO, que je continuerai à animer pour la période 2018-2022 en collaboration avec G. Grégori et P. Hinghamp. Comment les dynamiques des filaments de sous-méso-échelle et le mélange turbulent influencent-ils le *patchiness* du plancton ? Les filaments agissent-ils comme des barrières au transport et au mélange, contribuant ainsi à la structuration (diversité et abondances) du plancton ? Comment les *patches* sont-ils advectés et étirés dans ces filaments, allant jusqu’à être finalement mélangés par la turbulence à micro-échelle ?

Pour répondre à ces questions il est indispensable de développer des méthodologies d’observation à haute résolution spatiale et temporelle des propriétés tant physiques que biologiques, chimiques, et biogéochimique. L’apport de la physique en termes de dynamique de sous-méso-échelle et de micro-turbulence est indispensable pour le suivi des masses d’eau, l’estimation du mélange turbulent et des flux associés. Des nouveaux capteurs montés sur des plateformes autonomes pourront nous apporter des nouvelles informations sur la dynamique de la matière organique dissoute [voir *Cyr et al.* 2017, pour les mesures de tryptophane et phénanthrène par glider.] Le contenu biologique sera sondé selon trois approches complémentaires. Premièrement, des

analyses par cytométrie en flux automatisée et avec images sont nécessaires pour l'identification et la quantification des grands groupes fonctionnels et l'étude de la dynamique cellulaire à l'origine de la répartition spatiale et temporelle de ces groupes (estimation des taux de croissance) [Dugenne et al. 2014; Thyssen et al. 2014]. Deuxièmement, les analyses de génomique environnementale, qui produisent des profils de la diversité à l'échelle de l'espèce (métabarcodes) et des indices fonctionnels de l'activité biologique (métagénomes/métatranscriptomes), pourraient permettre un suivi à plus haute résolution de l'évolution du plancton lors des processus physiques observés [Guidi et al. 2016]. Étant données les coûts unitaires des analyses de génomique encore trop importants pour envisager les mêmes fréquences que pour la cytométrie, les analyses de cette dernière permettront d'identifier les échantillons discrets représentatifs à soumettre aux analyses de génomique environnementale. Enfin, les niveaux supérieurs seront observés *in situ* via des capteurs automatisés - LOPC, LISST, UVP- et la plateforme MVP. L'acquisition de données à haute fréquence nécessite le développement de méthodes d'analyse adaptées. Ce type de données qui peuvent être considérées comme des courbes et le champ des statistiques de l'analyse de données fonctionnelles s'avère un outil indispensable lorsqu'on s'intéresse à des processus continus à sous-méso-échelle [Bayle et al. 2015; Pauthenet et al. 2017]. Enfin, la modélisation numérique couplée physique-biogéochimie constitue une aide très utile à l'interprétation des données de terrain et indispensable au développement de nouveaux modèles.

Ces questions et techniques concernent surtout la dynamique et le couplage dans la couche de surface. À moyen terme, j'envisage de m'intéresser ensuite à la couche mésopélagique pour mieux comprendre les flux associées à la pompe biologique. Mes travaux numériques sur la chute de particules, m'ont amené depuis un certain temps à réfléchir sur la possibilité d'effectuer des expériences *in situ* similaires aux expériences numériques, ce qui représente un véritable défi méthodologique. Ce genre d'expériences semble pourtant primordial pour affiner les estimations et les projections de l'export de carbone dans l'océan. Nous avons commencé à déposer un tout premier projet pour une étude pilote pour la faisabilité et développement de cette nouvelle méthodologie (*MarBleSS - Marine Biodegradable particle Settling Study*, PI A.M.Doglioli). L'originalité de ce projet réside dans la fabrication de microparticules biodégradables, de taille et de propriétés optiques connues (fluorescence et diffusion). Cela permettra, à terme, de suivre l'évolution spatio-temporelle (verticale et horizontale) de leur dispersion induite par les processus physiques. La première étape passe par la fabrication de ces microparticules par des techniques physico-chimiques de production développées

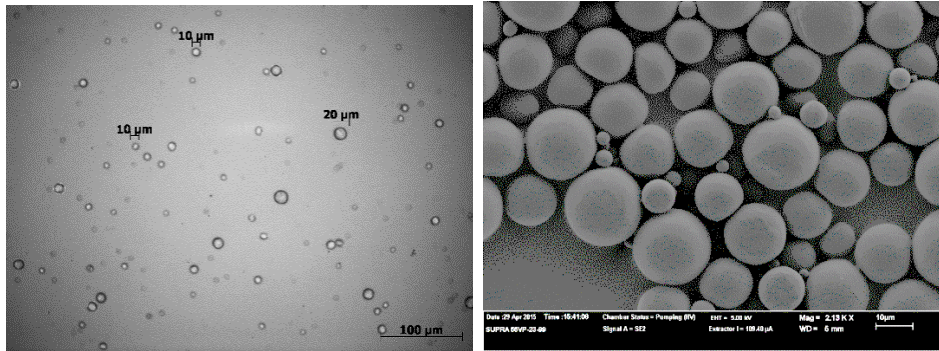


FIGURE 5.3 – Images des microparticules produites à l’Université de Warwick et à l’étude comme possible traceur passif avec vitesse de chute. À gauche microscopie optique. À droite microscopie SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Images de A.Dove.

par A.Dove à l’Université de Birmingham (Royaume Uni) (voir Figure 5.3). Nous envisageons ensuite des tests d’échantillonnage et de calibration en milieu contrôlé (facteurs abiotiques : pression, agrégation, etc. . .) puis en milieu naturel (facteurs biotiques : ingestion, dégradation, etc. . .). La mesure de l’abondance des microparticules sera effectuée grâce à la cytométrie en flux qui par son analyse optique multiparamétrique permettra de discriminer et de compter les microparticules. En complément, des pièges à particules tels que ceux habituellement déployés lors des campagnes en mer, seront utilisés dans le but de réaliser une véritable étude de sensibilité sur l’influence de la dynamique physique sur nos estimations de flux de particules. Les résultats obtenus pourront être alors combinés aux simulations des phénomènes de turbulence et viendront valider, voire paramétrer les modèles. Si les études de faisabilité se révélaient concluantes, nous pourrions ensuite envisager des expériences *in situ* d’envergure dans les sites où nous aurions déjà effectué les études en couche de surface.

5.3 Perspectives d’enseignement

Récemment, je me suis fortement investi dans le renouvellement de mes enseignements en Licence et en Master pour les années à venir.

En Licence je prendrai la responsabilité de l’UE d’Introduction à l’Océanographie, qui aura vocation à offrir aux étudiants un panorama complet et pluridisciplinaire des concepts de base utilisés par l’océanographe de terrain. Dans ce cadre, je me chargerai aussi d’accompagner les étudiants pour

une toute première expérience de sortie en mer avec le bateau de station de l'OSU Institut Pytheas, l'Antedon II. Je continuerai aussi à être responsable de l'unité de Dynamique des Océans, avec l'intention de mieux exploiter le matériel pédagogique développé dans les années passées afin de développer des nouvelles approches pédagogiques de type "classe inversée".

En Master, je souhaite renforcer mon enseignement de M1 en modélisation numérique de l'océan en utilisant la nouvelle plate-forme CROCO, dans le cadre de la collaboration nationale naissante. En Master 2, je voudrais renforcer la pluridisciplinarité de mon enseignement autour des approches Lagrangiennes en développant les thématiques du couplage physique-biologie, de la dispersion larvaire et de la connectivité marine dans la continuité de mes recherches récentes. De plus, j'envisage de profiter des opportunités offertes par la nouvelle plate-forme européenne de partage des données CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, <http://marine.copernicus.eu/>) en inscrivant mes enseignements dans le cadre de la *Copernicus Academy* (<http://copernicus.eu/main/copernicus-academy>). Dans le même cadre, je souhaite renforcer les échanges avec d'autres universités européennes, grâce au programme Erasmus+ destiné aux étudiants ayant obtenu leur diplôme de Master (<http://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/>).

Concernant le doctorat, en raison du besoin de suivre le développement rapide des nouvelles connaissances, je pense que le troisième volet du parcours LMD devient de plus en plus une véritable étape de formation fondamentale et pas seulement de formation par la recherche. Par conséquent, j'envisage de monter un projet de formation de haut niveau en sciences de l'environnement pour les doctorants de l'École Doctorale 251, décrit ci-dessous.

Projet d'“École Méditerranéenne d'Océanologie”

Les cours seront en français avec des interventions en anglais d'invités étrangers de façon à s'insérer dans la tradition de notre université d'attirer des étudiants francophones, mais en même temps d'habituer les futurs chercheurs aux échanges en anglais typiques de l'activité de recherche dans les matières scientifiques. Cette formation pourrait intégrer une série d'UE de la deuxième année du futur Master de Sciences de la Mer et une période de formation concentrée sur une semaine. Comme pour l'École FineMed (www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/FineMed/), ce deuxième volet pourra s'effectuer sur le campus de Luminy en dehors des périodes de cours, sera ouvert aussi à des étudiants étrangers avec une attention particulière à l'égalité homme-femme et au financement d'un certain nombre de bourses pour les étudiants du pourtour Méditerranéen.

J'envisage d'organiser cette formation autour de trois axes, chacun avec plusieurs thématiques :

1. Les avancées en océanographie multidisciplinaire
 - Les stratégies adaptatives d'observation pendant les campagnes en mer
 - Les futurs *big data* océanographiques : robots, satellite et modèles
 - Les perspectives de la génomique marine
2. La gestion des ressources marines
 - L'évolution du droit de la mer et les contraintes et opportunités pour les océanographes
 - Une nouvelle économie de la mer
 - Les réserves marines et leur évolution
3. La méthode scientifique pour les mesures en mer
 - Statistiques avancées pour les données océanographiques
 - Déontologie professionnelle de l'océanographe moderne

Cette structuration générale est naturellement censée évoluer suite aux discussions avec les collègues intervenant dans les enseignements afin de définir les détails des contenus. Des premiers contacts ont commencé à être pris en vue d'une soumission d'un projet plus avancé suite à la mise en place du nouveau Master de Science de la Mer de l'Institut Pytheas.

Bibliographie

- Abraham, E., C. Law, P. Boyd, S. Lavender, M. Maldonado, et A. Bowie (2000), Importance of stirring in the development of an iron-fertilized phytoplankton bloom, *Nature*, *407*, 727–730.
- Albérola, C., et C. Millot (2003), Circulation in the French Mediterranean coastal zone near Marseilles : the influence of the wind and the Northern Current, *Cont. Shelf Res.*, *23*, 587–610.
- Albérola, C., C. Millot, et J. Font (1995), On the seasonal and mesoscale variabilities of the Northern Current during the PRIMO-0 experiment in the western Mediterranean Sea, *Oceanol. Acta*, *18*(2), 163–192.
- Allen, C. (1982), Numerical simulation of contaminant dispersion in estuarine flow., *Proc. R. Soc. Lond., A* *381*, 179–194.
- Allou, A., P. Forget, et J. L. Devenon (2010), Submesoscale vortex structures at the entrance of the Gulf of Lions in the Northwestern Mediterranean Sea, *Cont. Shelf Res.*, *30*, 724–732, doi :10.1016/j.csr.2010.01.006.
- Aristegui, J., P. Sangra, S. Henandez-Leon, M. Canton, et A. Hernandez-Guerra (1994), Island-induced eddies in the Canary Islands, *Deep-Sea Res. I*, *41*(10), 1509–1525, doi :10.1016/0967-0637(94)90058-2.
- Arneborg, L., V. Fiekas, L. Ulmaf, et H. Burchard (2007), Gravity current dynamics and entrainment - a process study based on observation in the Arkona basin, *J. Phys. Oceanogr.*, *37*, 2094–2113.
- Astraldi, M., et G. Gasparini (1986), La circolazione costiera nel mar ligure orientale, *Boll. Mus. Ist. Biol. Univ. Genova*, *52 suppl*, 317–331.
- Astraldi, M., et G. Manzella (1983), Some observations on current measurements on the East Ligurian Shelf, Mediterranean Sea, *Cont. Shelf Res.*, *2*, 183–193.
- Astraldi, M., G. Gasparini, et G. Manzella (1990), Temporal variability of currents in the Eastern Ligurian Sea, *J. Geophys. Res.*, *95*(C2), 1515–1522.
- Auclair, F., P. Marsaleix, et C. Estournel (2001), The penetration of the Northern Current over the Gulf of Lion (Mediterranean) as a downscaling problem, *Oceanol. Acta*, *24*, 529–544.
- Auclair, F., P. Marsaleix, et P. De Mey (2003), Space-time structure and dynamics of the forecast error in a coastal circulation model of the Gulf of Lions, *Dyn. Atmos. Oceans*, *36*, 309–346, doi :10.1016/S0377-0265(02)00068-4.

BIBLIOGRAPHIE

- Aurell, E., G. Boffetta, A. Crisanti, G. Paladin, et A. Vulpiani (1997), Predictability in the large : an extension of the concept of lyapunov exponent, *Journal of Physics A : Mathematical and General*, 30(1), 1.
- Bacciola, D., M. Borghini, F. Degl’Innocenti, C. Galli, E. Lazzoni, R. Meloni, S. Sparnocchia, S. Cannarsa, V. Di Fesca, G. M. R. Manzella, P. Marri, et G. Raso (1993), Esperimenti per la determinazione del coefficiente di diffusione locale, *Tech. rep.*, ENEA, RTI/AMB/GEM-MAR/93/07.
- Baklouti, M., F. Diaz, C. Pinazo, V. Faure, et B. Quéguiner (2006), Investigation of mechanistic formulations depicting phytoplankton dynamics for models of marine pelagic ecosystems and description of a new model, *Progress in Oceanography*, 71(1), 1 – 33, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2006.05.002>.
- Banyte, D., M. Visbeck, T. Tanhua, T. Fischer, G. Krahmann, et J. Karstensen (2013), Lateral diffusivity from tracer release experiments in the tropical north atlantic thermocline, *J. Geophys. Res.*, doi :10.1002/jgrc.20211.
- Batchelor, G. (1959), The spectrum of small-scale variation of convected quantities like temperature in turbulent fluid. part 1. general discussion and the case of small conductivity, *J. Fluid Mech.*, 5, 113–133.
- Bayle, S., P. Monestiez, C. Guinet, et D. Nerini (2015), Moving toward finer scales in oceanography : Predictive linear functional model of chlorophyll a profile from light data, *Progress in Oceanography*, 134 (Supplement C), 221 – 231, doi :<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.02.001>.
- Berline, L., A.-M. Rammou, A. Doglioli, A. Molcard, et A. Petrenko (2014), A connectivity-based eco-regionalization method of the Mediterranean Sea, *PLoS ONE*, 9(11), 1–9, doi :10.1371/journal.pone.0111978.
- Beron-Vera, F. J., M. J. Olascoaga, et G. J. Goni (2008), Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures, *Geophys. Res. Lett.*, 35(12), doi : {10.1029/2008GL033957}.
- Berta, M., L. Ursella, F. Nencioli, A. M. Doglioli, A. A. Petrenko, et S. Cosoli (2014), Surface transport in the Northeastern Adriatic Sea from FSLE analysis of HF radar measurements, *Cont. Shelf Res.*, 77, 14 – 23, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.016>.
- Black, K., et S. Gay (1987), Eddy formation in unsteady flows, *J. Geophys. Res.*, 92, 9514–9522.
- Blanke, B., et S. Raynaud (1997), Kinematics of the Pacific Equatorial Undercurrent : An Eulerian and Lagrangian approach from GCM results, *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 1038–1053.

- Boebel, O., J. Lutjeharms, C. Schmid, W. Zenk, T. Rossby, et C. Barron (2003), The cape cauldron : a regime of turbulent inter-ocean exchange, *Deep-Sea Res. II*, 50, 57–86.
- Bogunović, B., et V. Malačič (2009), Circulation in the Gulf of Trieste : measurements and model results, *Il Nuovo Cimento (C)*, 31(C3), 301–326, doi :10.1393/ncc/i2008-10310-9.
- Borland, D., et R. M. Taylor II (2007), Rainbow color map (still) considered harmful, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 27(2), 14–17, doi : 10.1109/MCG.2007.323435.
- Borrione, I., S. Falchetti, et A. Alvarez (2016), Physical and dynamical characteristics of a 300m-deep anticyclonic eddy in the ligurian sea (northwest mediterranean sea) : Evidence from a multi-platform sampling strategy, *Deep-Sea Res. II*, 116, 145–164.
- Bouffard, J., F. Nencioli, R. Escudier, A. M. Doglioli, A. A. Petrenko, A. Pascual, P.-M. Poulain, et D. Elhmaidi (2014), Lagrangian analysis of satellite-derived currents : Application to the North Western Mediterranean coastal dynamics, *Adv. Space Res.*, 53(5), 788 – 801, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.020>.
- Boyer, D., et L. Tao (1987), On the motion of linearly stratified rotating fluids past capes, *J. Fluid Mech.*, 180, 429–449.
- Bracco, A., S. Clayton, et C. Pasquero (2009), Horizontal advection, diffusion, and plankton spectra at the sea surface, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 114(C2), n/a–n/a, doi :10.1029/2007JC004671.
- Buesseler, K. O., C. H. Lamborg, P. W. Boyd, P. J. Lam, T. W. Trull, R. R. Bidigare, J. K. Bishop, K. L. Casciotti, F. Dehairs, M. Elskens, et al. (2007), Revisiting carbon flux through the ocean’s twilight zone, *Science*, 316(5824), 567–570.
- Buffoni, G., P. Falco, A. Griffa, et E. Zambianchi (1997), Dispersion processes and residence times in a semi-enclosed basin with recirculating gyres. An application to the Tyrrhenian Sea, *J. Geophys. Res.*, 102(C8), 18,699–18,713.
- Calil, P. H. R., K. J. Richards, J. Yanli, et R. R. Bidigare (2008), Eddy activity in the lee of the Hawaiian Islands, *Deep-Sea Res. II*, 55(10-13), 1179–1194.
- Campbell, R., D. F., Z. Hu, A. Doglioli, A. Petrenko, et I. Dekeyser (2013), Nutrients and plankton spatial distributions induced by a coastal eddy in the Gulf of Lion. Insights from a numerical model, *Prog. Oceanogr.*, 109, 47–69.

BIBLIOGRAPHIE

- Canuto, V., A. Howard, Y. Cheng, et M. Dubovikov (2001), Ocean turbulence. Part I : One-point closure model—momentum and heat vertical diffusivities., *J. Phys. Oceanogr.*, *31*, 1413–1426.
- Carlotti, F., L. Eisenhauer, R. Campbell, et F. Diaz (2014), Modeling the spatial and temporal population dynamics of the copepod *centropages typicus* in the northwestern mediterranean sea during the year 2001 using a 3d ecosystem model, *Journal of Marine Systems*, *135*, 97 – 116, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.11.007>, assessing and modelling ecosystem changes in the Mediterranean and the Black Sea pelagic ecosystem - SESAME.
- Carr, S., X. Capet, J. McWilliams, J. Pennington, et F. Chavez (2008), The influence of diel vertical migration on zooplankton transport and recruitment in an upwelling region : estimates from a coupled behavioral-physical model, *Fisheries Oceanography*, *17*(1), 1–15, doi :[10.1111/j.1365-2419.2007.00447.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2007.00447.x).
- Cattaneo-Vietti, R., V. Cappanera, M. Castellano, et P. Povero (2015), Yield and catch changes in a mediterranean small tuna trap : a warming change effect ?, *Marine Ecology*, *36*(2), 155–166, doi :[10.1111/maec.12127](https://doi.org/10.1111/maec.12127).
- Chelton, D. B., R. A. deSzoeke, M. G. Schlax, K. El Naggar, et N. Siwertz (1998), Geographical variability of the first-baroclinic Rossby radius of deformation, *J. Phys. Oceanogr.*, *28*, 433–460, doi :[10.1175/1520-0485\(1998\)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2).
- Coiffier, J. (2000), Un demi-siècle de prévision numérique du temps, *Météorologie*, *30*, 11–31.
- Conan, P., et C. Millot (1995), Variability of the Northern Current off Marseilles, western Mediterranean Sea, from February to June 1992, *Oceanol. Acta*, *18*(2), 193–205.
- Cooper, D. J., A. J. Watson, et P. D. Nigthingale (1996), Large decrease in ocean-surface CO₂ fugacity in response to in situ iron fertilization, *Nature*, *383*(6600), 511–513.
- Costa, A., A. M. Doglioli, P. Marsaleix, et A. A. Petrenko (2017a), Comparison of in situ microstructure measurements to different turbulence closure schemes in a 3-d numerical ocean circulation model, *Ocean Model.*, *120*(Supplement C), 1 – 17, doi :[10.1016/j.ocemod.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.10.002).
- Costa, A., A. A. Petrenko, K. Guizien, et A. M. Doglioli (2017b), On the calculation of betweenness centrality in marine connectivity studies using transfer probabilities, *PLOS ONE*, *12*(12), 1–10, doi :[10.1371/journal.pone.0189021](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189021).

- Cotté, C., F. d'Ovidio, A. Chaigneau, M. Lévy, I. Taupier-Letage, B. Mate, et G. Christophe (2011), Scale-dependent interactions of mediterranean whales with marine dynamics, *Limnology Oceanography*, *106*(20), 219–232, doi :{10.4319/lo.2011.56.1.0219}.
- Coutis, P., et J. Middleton (2002), The physical and biological impact of a small island wake in the deep ocean, *Deep Sea Res.I*, *49*, 1341–1361.
- Craig, P., et M. Banner (1994), Modelling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer., *J. Phys. Oceanogr.*, *24*, 2546–2559.
- Cyr, F., M. Tedetti, F. Besson, L. Beguery, A. M. Doglioli, A. A. Petrenko, et M. Goutx (2017), A new glider-compatible optical sensor for dissolved organic matter measurements : Test case from the nw mediterranean sea, *Front.Mar.Sci.*, *4*, 89, doi :10.3389/fmars.2017.00089.
- Davies, P., J. Dakin, et R. Falconer (1995), Eddy formation behind a coastal headland, *J. Coast. Res.*, *11*(1), 154–167.
- Davis, R. E. (1991), Observing the general circulation with floats, *Deep-Sea Res. I*, *38*, S531–S571.
- De Gaetano, P., A. M. Doglioli, M. G. Magaldi, P. Vassallo, et M. Fabiano (2008), FOAM, a new simple benthic degradative module for the LAMP3D model : an application to a Mediterranean fish farm, *Aquac. Res.*, *39*(11), 1229–1242, doi :10.1111/j.1365-2109.2008.01990.x.
- De Gaetano, P., P. Vassallo, M. Bartoli, D. Nizzoli, A. M. Doglioli, M. G. Magaldi, et M. Fabiano (2011), Impact of new measured Mediterranean mineralization rates on the fate of simulated aquaculture wastes, *Aquac. Res.*, *42*(9), 1359–1370, doi :10.1111/j.1365-2109.2010.02724.x.
- de Verneil, A., L. Rousselet, A. M. Doglioli, A. A. Petrenko, et T. Moutin (2017), The fate of a southwest pacific bloom : Gauging the impact of submesoscale vs. mesoscale circulation on biological gradients in the subtropics, *Biogeosciences Discussions*, *2017*, 1–25, doi :10.5194/bg-2017-84.
- Dencausse, G. J., M. Arhan, et S. Speich (2010), Routes of agulhas rings in the south eastern Cape basin, *Deep-Sea Res. I*, *57*, 1406–1421, doi :10.1016/j.dsr.2010.07.008.
- Denniss, T., J. Middleton, et R. Manasseh (1995), Recirculation in the lee of complicated headlands : A case study of Bass Point, *J. Geophys. Res.*, *100*(C8), 16,087–16,100.
- DHI (2009), MIKE 21 & MIKE3 Flow Model FM Hydrodynamic and Transport Module, scientific Documentation. DHI Software, pp. 50.

BIBLIOGRAPHIE

- Di Lorenzo, E., M. G. G. Foreman, et W. R. Crawford (2005), Modelling the generation of Haida Eddies, *Deep-Sea Res. II*, 52, 853–873, doi :10.1016/j.dsr2.2005.02.007.
- Dickey, T. D. (2003), Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems, *Journal of Marine Systems*, 40–41, 5 – 48, doi :[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963\(03\)00011-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963(03)00011-3), the Use of Data Assimilation in Coupled Hydrodynamic, Ecological and Bio-geo-chemical Models of the Ocean. Selected papers from the 33rd International Liege Colloquium on Ocean Dynamics, held in Liege, Belgium on May 7-11th, 2001.
- Dickey, T. D., F. Nencioli, V. S. Kuwahara, C. Leonard, W. Black, Y. M. Rii, R. R. Bidigare, et Q. Zhang (2008), Physical and bio-optical observations of oceanic cyclones west of the island of Hawaii, *Deep-Sea Res. II*, 55, 1195–1217.
- Dimou, K., et E. Adams (1993), A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal waters, *Estuar. Coast. Shelf S.*, 37(1), 99 – 110, doi :<https://doi.org/10.1006/ecss.1993.1044>.
- Doglioli, A. (2000), LAMP3D, un modello Lagrangiano per lo studio della dispersione di inquinanti in acque costiere, tesi di Laurea, Università degli Studi di Genova.
- Doglioli, A., M. Magaldi, L. Vezzulli, et S. Tucci (2004a), Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean), *Aquaculture*, 231(1-4), 215–235, doi :10.1016/j.aquaculture.2003.09.030.
- Doglioli, A., F. Nencioli, A. A. Petrenko, J.-L. Fuda, G. Rougier, et N. Grima (2013), A software package and hardware tools for in situ experiments in a Lagrangian reference frame), *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 30(8), doi :10.1175/JTECH-D-12-00183.1.
- Doglioli, A. M. (2015), OSCAHR cruise, RV Téthys II, <http://dx.doi.org/10.17600/15008800>.
- Doglioli, A. M., A. Griffa, et M. G. Magaldi (2004b), Numerical study of a coastal current on a steep slope in presence of a cape : The case of the Promontorio di Portofino, *J. Geophys. Res.*, 109, C12033, doi :10.1029/2004JC002422.
- Doglioli, A. M., M. Veneziani, B. Blanke, S. Speich, et A. Griffa (2006), A Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14611, doi :10.1029/2006GL026498.
- Doglioli, A. M., B. Blanke, S. Speich, et G. Lapeyre (2007), Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis : application to Cape Basin Eddies, *J. Geophys. Res.*, 112, C05043, doi :10.1029/2006JC003952.

- d'Ortenzio, F., et M. Ribera d'Alcalà (2009), On the trophic regimes of the mediterranean sea : a satellite analysis, *Biogeosciences*, 6(2), 139–148.
- d'Ovidio, F., V. Fernández, E. Hernández-García, et C. López (2004), Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite-size Lyapunov exponents, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17,203.
- d'Ovidio, F., J. Isern-Fontanet, C. Lopez, E. Hernandez-Garcia, et E. Garcia-Ladona. (2009), Comparison between Eulerian diagnostics and finite-size Lyapunov exponents computed from altimetry in the Algerian basin, *Deep-Sea Res. II*, 56(1), 15–31.
- d'Ovidio, F., A. Della Penna, T. W. Trull, F. Nencioli, M.-I. Pujol, M.-H. Rio, Y.-H. Park, C. Cotté, M. Zhou, et S. Blain (2015), The biogeochemical structuring role of horizontal stirring : Lagrangian perspectives on iron delivery downstream of the kerguelen plateau, *Biogeosciences*, 12(19), 5567–5581, doi : 10.5194/bg-12-5567-2015.
- Dufau-Julliand, C., P. Marsaleix, A. Petrenko, et I. Dekeyser (2004), Three-dimensional modeling of the Gulf of Lion's hydrodynamics (northwest Mediterranean) during January 1999 (MOOGLI3 Experiment) and late winter 1999 : Western Mediterranean Intermediate Water's (WIW's) formation and its cascading over the shelf break, *J. Geophys. Res.*, 109, C11002, doi : 10.1029/2003JC002019.
- Dugdale, R. (1967), Nutrient limitation in the sea : dynamics, identification, and significance, *Limnol. Oceanogr.*, 12(4), 685–695.
- Dugenne, M., M. Thyssen, D. Nerini, C. Mante, J.-C. Poggiale, N. Garcia, F. Garcia, et G. J. Grégori (2014), Consequence of a sudden wind event on the dynamics of a coastal phytoplankton community : an insight into specific population growth rates using a single cell high frequency approach, *Front. Microbiol.*, 5, 485, doi :10.3389/fmicb.2014.00485.
- d'Ovidio, F., S. De Monte, S. Alvain, Y. Dandonneau, et M. Lévy (2010), Fluid dynamical niches of phytoplankton types, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 107(43), 18,366–18,370, doi :10.1073/pnas.1004620107.
- Ekman, S. (1953), *Zoogeography of the sea*, Sidgwick and Jackson.
- Emery, W. J., et R. E. Thomson (2001), *Data analysis methods in physical oceanography*, 638 pp., Elsevier Science, Amsterdam, doi :10.1016/B978-044450756-3/50000-9.
- Esposito, A., et G. Manzella (1982), Current circulation in the Ligurian Sea, in *Hydrodynamics of semi-enclosed seas*, edited by J. Nihoul, pp. 187–204, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

BIBLIOGRAPHIE

- Estournel, C., V. Kondrachoff, P. Marsaleix, et R. Vehil (1997), The plume of the Rhône : numerical simulation and remote sensing, *Cont. Shelf Res.*, 17(8), 899 – 924, doi :DOI:10.1016/S0278-4343(96)00064-7.
- Estournel, C., P. Broche, P. Marsaleix, J. L. Devenon, F. Auclair, et R. Vehil (2001), The rhone river plume in unsteady conditions : Numerical and experimental results, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(1), 25 – 38, doi : DOI:10.1006/ecss.2000.0685.
- Estournel, C., X. Durrieu de Madron, P. Marsaleix, F. Auclair, C. Julliand, et R. Vehil (2003), Observation and modeling of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lion under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment), *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 8059, doi : 10.1029/2001JC000825.
- Estournel, C., F. Auclair, M. Lux, C. Nguyen, et P. Marsaleix (2007), "Scale oriented" embedded modeling of the North-Western Mediterranean in the frame of MFSTEP, *Ocean Science Discussions, Volume 4, Issue 1, 2007, pp.145-187*, 4, 145–187.
- FAO (2016), Fisheries and Aquaculture topics. The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA). Topics Fact Sheets. Text by Jean-François Pulvenis. In : *FAO Fisheries and Aquaculture Department* [online]. Rome. Updated 7 July 2016, <http://www.fao.org/fishery/sofia/en>.
- Farmer, R., D. Pawlowicz, et R. Jiang (2002), Tilting separation flows : a mechanism for intense vertical mixing in the coastal ocean, *Dyn. Atmos. Oceans*, 36, 43–58.
- Ferrari, R., et M. Nikurashin (2010), Suppression of eddy diffusivity across jets in the southern ocean., *J. Phys. Oceanogr.*, 40(7).
- Ferrari, R., et C. Wunsch (2009), Ocean Circulation Kinetic Energy : Reservoirs, Sources, and Sinks, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 41, 253–282, doi :10.1146/annurev.fluid.40.111406.102139.
- Flament, P., L. Armi, et L. Washburn (1985), The evolving structure of an upwelling filament, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 90(C6), 11,765–11,778, doi :10.1029/JC090iC06p11765.
- Flexas, M. M., X. Durrieu de Madron, M. A. Garcia, M. Canals, et P. Arnau (2002), Flow variability in the Gulf of Lions during the MATER HFF experiment (March-May 1997), *J. Mar. Sys.*, 33-34, 197–214, doi :10.1016/S0924-7963(02)00059-3.

- Fox Kemper, B., et D. Menemenlis (2008), *Can Large Eddy Simulation Techniques Improve Mesoscale Rich Ocean Models ?*, pp. 319–337, American Geophysical Union, doi :10.1029/177GM19.
- Freeland, H. (1990), The flow of a coastal current past a blunt headland, *Atmosphere-Ocean*, *28*, 288–302.
- Froyland, G., R. M. Stuart, et E. van Sebille (2014), How well-connected is the surface of the global ocean ?, *Chaos*, *24* (3), 033,126, doi :10.1063/1.4892530.
- Galperin, B., L. Kantha, S. Hassid, et A. Rosati (1988), A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows, *J. Atmos. Sci.*, *55*, 45–62.
- Gaspar, P., Y. Grégoris, et J.-M. Lefevre (1990), A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing : Tests at Station Papa and long-term upper ocean study site, *J. Geophys. Res.*, *95*, 179–193.
- Gatti, J. (2008), Intrusions du Courant Nord Méditerranée sur la partie est du plateau continental du Golfe du Lion, Ph.D. thesis, Université de la Méditerranée.
- Gatti, J., A. Petrenko, J.-L. Devenon, Y. Leredde, et C. Ulses (2006), The Rhone river dilution zone present in the northeastern shelf of the Gulf of Lion in December 2003, *Cont. Shelf Res.*, *26*, 1794–1805, doi :10.1016/j.csr.2006.05.012.
- Gaube, P., D. B. Chelton, P. G. Strutton, et M. J. Behrenfeld (2013), Satellite observations of chlorophyll, phytoplankton biomass, and ekman pumping in non-linear mesoscale eddies, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, *118*(12), 6349–6370, doi :10.1002/2013JC009027.
- Geyer, W. (1993), Three-dimensional tidal flow around headlands, *J. Geophys. Res.*, *98*(C1), 955–966.
- Geyer, W., et J. Ledwell (1994), Final report : Massachusetts bay dye study, *Mass. Water Resour. Auth., Charlestown, Mass.*, *17*, 13 pp.
- Gibson, C., et W. Schwarz (1963), The universal equilibrium spectra of turbulent velocity and scalar fields., *J. Fluid Mech.*, *16*, 365–384.
- Gordon, A. L. (1986), Inter-ocean exchange of thermocline water, *J. Geophys. Res.*, *91*, 5037–5046.
- Gordon, A. L. (2003), The brawniest retroflection, *Nature*, *421*(6926), 904–905, doi :10.1038/421904a.
- Guidi, L., S. Chaffron, L. Bittner, D. Eveillard, A. Larhlimi, S. Roux, Y. Darzi, S. Audic, L. Berline, J. R. Brum, et al. (2016), Plankton networks driving carbon export in the oligotrophic ocean, *Nature*, *532*(7600), 465–470.

BIBLIOGRAPHIE

- Haller, G., et G. Yuan (2000), Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence, *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 147(3-4), 352 – 370, doi :DOI:10.1016/S0167-2789(00)00142-1.
- Haury, L., J. McGowan, et P. Wiebe (1978), Patterns and processes in the time-space scales of plankton distributions, in *Spatial pattern in plankton communities*, pp. 277–327, Springer.
- Haza, A. C., T. M. Ozgokmen, A. Griffa, A. Molcard, P.-M. Poulain, et G. Peggion (2010), Transport dispersion processes in small-scale coastal flows : relative dispersion from VHF radar measurements in the Gulf of La Spezia, *Ocean Dynam.*, 60, 861–882.
- Hitchcock, G. L., et R. K. Cowen (2007), *Plankton : Lagrangian inhabitants of the sea*, pp. 349–400, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ho, D. T., J. R. Ledwell, et W. M. Smethie (2008), Use of sf5cf3 for ocean tracer release experiments, *Geophys. Res. Lett.*, 35(4).
- Holloway, G. (1986), Estimation of oceanic eddy transports from satellite altimetry, *Nature*, 23, 243–244.
- Holtermann, P. L., L. Umlauf, T. Tanhua, O. Schmale, G. Rehder, et J. J. Waniek (2012), The baltic sea tracer release experiment : 1. mixing rates, *J. Geophys. Res.*, 117(C1), doi :10.1029/2011JC007439.
- Hu, Z. Y., A. A. Doglioli, A. M. Petrenko, P. Marsaleix, et I. Dekeyser (2009), Numerical simulations of eddies in the Gulf of Lion, *Ocean Model.*, 28(4), 203 – 208, doi :10.1016/j.ocemod.2009.02.004.
- Hu, Z. Y., A. A. Petrenko, A. M. Doglioli, et I. Dekeyser (2011), Study of mesoscale anticyclonic eddy in the western part of the Gulf of Lion, *J. Mar. Sys.*, 88, 3–11, doi :10.1016/j.jmarsys.2011.02.008.
- Hu, Z. Y., A. A. Petrenko, A. M. Doglioli, et I. Dekeyser (2011b), Numerical study of eddy generation in the western part of the Gulf of Lion, *J. Geophys. Res.*, 116, C12030, doi :10.1029/2011JC007074.
- Huisman, J., J. Sharples, J. M. Stroom, P. M. Visser, W. E. A. Kardinaal, J. M. Verspagen, et B. Sommeijer (2004), Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species, *Ecology*, 85(11), 2960–2970.
- Hunter, J. (1987), The application of lagrangian particle-tracking techniques to modelling of dispersion in the sea, in *Numerical Modelling : Applications to Marine Systems, North-Holland Mathematics Studies*, vol. 145, edited by J. Noye, pp. 257 – 269, North-Holland, doi :https://doi.org/10.1016/S0304-0208(08)70037-9.

- Ilicak, L., T. Özgökmen, H. Peters, H. Baumert, et M. Iskandarini (2008), Performance of two-equation turbulence closures in three-dimensional simulations of the Red Sea overflow, *Ocean Modell.*, *24*, 122–139.
- Inall, M. E., D. Aleynik, et C. Neil (2013), Horizontal advection and dispersion in a stratified shelf sea : The role of inertial oscillations, *Prog. Oceanogr.*, *117*, 25–36.
- James, I. (1996), Advection schemes for shelf sea models, *J. Mar. Sys.*, *8*, 237–254, doi :10.1016/0924-7963(96)00008-5.
- Jameson, L., et T. Miyama (2000), Wavelet analysis and ocean modeling : A dynamically adaptive numerical method “WOFD-AHO”, *Mon. Wea. Rev.*, *128*, 1536–1548, doi :10.1175/1520-0493(2000)128<1536:WAAOMA>2.0.CO;2.
- Jönsson, B. F., et J. R. Watson (2016), The timescales of global surface-ocean connectivity, *Nat. Commun.*, *7*, 11,239.
- Kalkwijk, J., et R. Booij (1986), Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow, *J. Hydraul. Eng.*, *24*, 19–37.
- Kantha, L., et C. Clayson (1994), An improved mixed layer model for geophysical applications., *J. Geophys. Res.*, *99*, 25,235–25,266.
- Kersalé, M., A. M. Doglioli, et A. A. Petrenko (2011), Sensitivity study of the generation of mesoscale eddies in a numerical model of Hawaii islands, *Ocean Sci.*, *7*, 277–291, doi :10.5194/os-7-277-2011.
- Kersalé, M., A. M. Doglioli, A. A. Petrenko, I. Dekeyser, et F. Nencioli (2013), Physical characteristics and dynamics of the coastal Latex09 Eddy derived from in situ data and numerical modeling, *J. Geophys. Res.*, *118*, 1–11, doi :10.1029/2012JC008229.
- Kersalé, M., A. Peliz, A. Doglioli, et A. Petrenko (2011), A numerical study on the collision of a Meddy with a seamount, in *Geophysical Research Abstracts*, vol. 13, EGU2011-3478, European Geosciences Union.
- Kersalé, M., A. Petrenko, A. Doglioli, F. Nencioli, J. Bouffard, S. Blain, F. Diaz, T. Labasque, B. Quéguiner, et I. Dekeyser (2016), Lateral diffusivity coefficients from the dynamics of a SF6 patch in a coastal environment, *J. Mar. Sys.*, *153*, 42 – 54, doi :10.1016/j.jmarsys.2015.09.003.
- Kessler, W. S., et S. Cravatte (2013), Mean circulation of the coral sea, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, *118*(12), 6385–6410, doi :10.1002/2013JC009117.

BIBLIOGRAPHIE

- Klein, P., et G. Lapeyre (2009), The oceanic vertical pump induced by mesoscale and submesoscale turbulence, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 351–375.
- Klein, P., B. L. Hua, G. Lapeyre, X. Capet, S. L. Gentil, et H. Sasaki (2008), Upper ocean turbulence from high-resolution 3d simulations, *J. Phys. Oceanogr.*, 38(8), 1748–1763, doi :10.1175/2007JPO3773.1.
- LaCasce, J. (2008), Statistics from lagrangian observations, *Progress in Oceanography*, 77(1), 1–29.
- Large, W., J. McWilliams, et S. Doney (1994), Oceanic vertical mixing : a review and a model with a non-local boundary layer parametrization, *Rev. Geophys.*, 32, 363–403.
- Law, C., W. Crawford, M. Smith, P. Boyd, C. Wong, Y. Nojiri, M. Robert, E. Abraham, W. Johnson, V. Forsland, et M. Arychuk (2006), Patch evolution and the biogeochemical impact of entrainment during an iron fertilisation experiment in the sub-arctic pacific, *Deep-Sea Res. II*, 53(20-22), 2012 – 2033, doi :10.1016/j.dsr2.2006.05.028.
- Law, C., A. Martin, M. Liddicoat, A. Watson, K. Richards, et E. Woodward (2001), A Lagrangian SF6 tracer study of an anticyclonic eddy in the North Atlantic : patch evolution, vertical mixing and nutrient supply to the mixed layer, *Deep-Sea Res. II*, 48(4-5), 705–724, doi :{10.1016/S0967-0645(00)00112-0}.
- Law, K. L., S. Morét-Ferguson, N. A. Maximenko, G. Proskurowski, E. E. Peacock, J. Hafner, et C. M. Reddy (2010), Plastic accumulation in the north atlantic subtropical gyre, *Science*, 329(5996), 1185–1188.
- Ledwell, J. R., et A. J. Watson (1991), The Santa-Monica Basin tracer experiment - A study of diapycnal and isopycnal mixing, *J. Geophys. Res.*, 96(C5), 8695–8718, doi :{10.1029/91JC00102}.
- Ledwell, J. R., A. J. Watson, et C. S. Law (1998), Mixing of a tracer in the pycnocline, *J. Geophys. Res.*, 103(C10), 21,499–21,529.
- Lehahn, Y., F. d’Ovidio, M. Levy, et E. Heifetz (2007), Stirring of the northeast Atlantic spring bloom : A Lagrangian analysis based on multisatellite data, *J. Geophys. Res.*, 112(C8), C08,005.
- Lehahn, Y., I. Koren, S. Sharoni, F. d’Ovidio, A. Vardi, et E. Boss (2017), Dispersion/dilution enhances phytoplankton blooms in low-nutrient waters, *Nat. Commun.*, 8.
- Lévy, M. (2008), The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence, Lect. Notes Phys., in *Transport in Geophysical flow : Ten years*

- after*, edited by J. B. Weiss et A. Provenzale, 744, pp. 219–261, Springer, doi : 10.1007/978-3-540-75215-8-9.
- Lévy, M., O. Jahn, S. Dutkiewicz, M. J. Follows, et F. d’Ovidio (2015), The dynamical landscape of marine phytoplankton diversity, *J. R. Soc. Interface*, 12(111), doi :10.1098/rsif.2015.0481.
- Liu, W. T., W. Tang, et P. S. Polito (1998), NASA scatterometer provides global ocean-surface wind fields with more structures than numerical weather prediction, *Geophys. Res. Lett.*, 25(6), 761–764, doi :10.1029/98GL00544.
- Ludwig, W., E. Dumont, M. Meybeck, et S. Heussner (2009), River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea : Major drivers for ecosystem changes during past and future decades ?, *Prog. Oceanogr.*, 80(3-4), 199–217, doi :10.1016/j.pocean.2009.02.001.
- Lumpkin, C. F. (1998), Eddies and currents in the Hawaii islands, Ph.D. thesis, University of Hawaii.
- Lumpkin, R., et S. Elipot (2010), Surface drifter pair spreading in the North Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 115, doi :10.1029/2010JC006338.
- Lumpkin, R., et M. Pazos (2007), Measuring surface currents with surface velocity program drifters : the instrument, its data, and some recent results, *Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics*, pp. 39–67.
- Luo, J., et L. Jameson (2002), A wavelet-based technique for identifying, labeling, and tracking of ocean eddies, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 19(3), 381–390, doi : 10.1175/1520-0426(2002)019<0381:AWBTFI>2.0.CO;2.
- Maes, C. (2012), Bifurcation cruise, alis r/v, <http://dx.doi.org/10.17600/12100100>.
- Magaldi, M., T. Özgökmen, A. Griffa, E. Chassignet, M. Iskandarani, et H. Peters (2008), Turbulent flow regimes behind a coastal cape in a stratified and rotating environment, *Ocean Modelling*, 25(1–2), 65 – 82, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.06.006>.
- Mahadevan, A. (2016), Impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 8, 161–184, doi :10.1146/annurev-marine-010814-015912.
- Mancho, A. M., E. Hernandez-Garcia, D. Small, S. Wiggins, et V. Fernandez (2008), Lagrangian transport through an ocean front in the northwestern Mediterranean sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 38(6), 1222–1237, doi :{10.1175/2007JPO3677.1}.

BIBLIOGRAPHIE

- Mann, K., et J. Lazier (2005), *Biology and Boundary Layers*, pp. 7–67, Blackwell Publishing Ltd., doi :10.1002/9781118687901.ch2.
- Margalef, R. (1978), Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment, *Oceanologica acta*, 1(4), 493–509.
- Marrec, P., A. M. Doglioli, G. Grégori, M. Dugenne, A. Della Penna, N. Bhairy, T. Cariou, S. Hélias Nunige, S. Lahbib, G. Rougier, T. Wagener, et M. Thyssen (2018), Coupling physics and biogeochemistry thanks to high resolution observations of the phytoplankton community structure in the north-western mediterranean sea, *Biogeosciences*, 15, 1579–1606, doi :10.5194/bg-15-1579-2018.
- Marsaleix, P. (1998), A numerical study of the formation of the Rhône River plume, *J. Mar. Sys.*, 14, 99–115, doi :10.1016/S0924-7963(97)00011-0.
- Marsaleix, P., F. Auclair, et C. Estournel (2006), Considerations on Open Boundary Conditions for Regional and Coastal Ocean Models, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 23, 1604–1613, doi :10.1175/JTECH1930.1.
- Marsaleix, P., F. Auclair, J. Floor, M. Herrmann, C. Estournel, I. Pairaud, et C. Ulses (2008), Energy conservation issues in sigma-coordinate free-surface ocean models, *Ocean Model.*, 20, 61–89, doi :10.1016/j.ocemod.2007.07.005.
- Martin, A. P., K. J. Richards, C. S. Law, et M. Liddicoat (2001), Horizontal dispersion within an anticyclonic mesoscale eddy, *Deep-Sea Res. II*, 48(4–5), 739 – 755, doi :10.1016/S0967-0645(00)00095-3.
- Martin, J., K. Coale, K. Johnson, S. Fitzwater, R. Gordon, S. Tanner, C. Hunter, V. Elrod, J. Nowicki, T. Coley, et al. (1994), Testing the Iron Hypothesis in Ecosystems of the Equatorial Pacific-Ocean, *Nature*, 371(6493), 123–129.
- Mauchline, J. (1998), The biology of calanoid copepods., *Blaxter, J. Southward, A. eds. Advances in Marine Biology*, 33. 23 cm. 710 p.
- McGillicuddy, D. J., A. R. Robinson, D. A. Siegel, H. W. Jannasch, R. Johnson, T. D. Dickey, J. McNeil, A. F. Michaels, et A. H. Knap (1998), Influence of mesoscale eddies on new production in the sargasso sea, *Nature*, doi :10.1038/28367.
- McGillicuddy, J., D.J. (2016), Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale., *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 8, 125–159.
- McWilliams, J. C. (2016), Submesoscale currents in the ocean, *Proc. R. Soc. A*, 472(2189), doi :10.1098/rspa.2016.0117.

- Mellor, G. (1998), *Users Guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model.*, Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710, program in Atmospheric and Oceanic Sciences.
- Mellor, G., et T. Yamada (1974), A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, *31*, 1791–1896.
- Mellor, G., et T. Yamada (1982), Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Physics*, *20*(4), 851–875.
- Millot, C. (1979), Wind induced upwellings in the Gulf of Lions, *Oceanol. Acta*, *2*, 261–274.
- Millot, C. (1982), *Analysis of upwelling in the Gulf of Lions - Hydrodynamics of semi-enclosed seas : Proceedings of the 13th International Liège Colloquium on Ocean Hydrodynamics.*, vol. 34, 143-153 pp., Elsevier Oceanogr. Ser., Amsterdam, The Netherlands.
- Millot, C., et M. Crépon (1981), Inertial Oscillations on the Continental Shelf of the Gulf of Lions, *jpo*, *11*, 639–657, doi :10.1175/1520-0485(1981)011.
- Millot, C., et I. Taupier-Letage (2005), Circulation in the mediterranean sea, in *The Mediterranean Sea*, pp. 29–66, Springer.
- Minas, M., et H. Minas (1989), Primary production in the Gulf of Lions with considerations to the Rhône River input, *Water Pollution Research Reports*, *32*(5), 112–125.
- Mkhinini, N., A. L. S. Coimbra, A. Stegner, T. Arsouze, I. Taupier-Letage, et K. Béranger (), Long-lived mesoscale eddies in the eastern Mediterranean Sea : Analysis of 20 years of AVISO geostrophic velocities, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, *119*(12), 8603–8626, doi :10.1002/2014JC010176.
- Moniz, R. J., D. A. Fong, C. B. Woodson, S. K. Willis, M. T. Stacey, et S. G. Monismith (2013), Scale-dependent dispersion within the stratified interior on the shelf of northern monterey bay, *J. Phys. Oceanogr.*, *44*, 1049–1064.
- Monroy, P., E. Hernández-García, V. Rossi, et C. López (2017), Modeling the dynamical sinking of biogenic particles in oceanic flow, *ArXiv e-prints arXiv :1612.04592v2 [physics.ao-ph]* .
- Morrow, R., F. Birol, D. Griffin, et J. Sudre (2004), Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies, *Geophys. Res. Lett.*, *31*, L24311, doi :10.1029/2004GL020974.

BIBLIOGRAPHIE

- Moutin, T., A. M. Doglioli, A. de Verneil, et S. Bonnet (2017), Preface : The oligotrophy to the ultra-oligotrophy pacific experiment (outpace cruise, 18 february to 3 april 2015), *Biogeosciences*, *14*(13), 3207–3220, doi :10.5194/bg-14-3207-2017.
- Mémery, L., G. Reverdin, J. Paillet, et A. Oschlies (2005), Introduction to the pomme special section : Thermocline ventilation and biogeochemical tracer distribution in the northeast atlantic ocean and impact of mesoscale dynamics, *J. Geophys. Res.*, *110*(C7), n/a–n/a, doi :10.1029/2005JC002976, c07S01.
- Nencioli, F., V. S. Kuwahara, T. D. Dickey, Y. M. Rii, et R. R. Bidigare (2008), Physical dynamics and biological implications of a mesoscale eddy in the lee of Hawai'i : Cyclone Opal observations during E-FLUX III, *Deep-Sea Res. II*, *55*(10-13), 1252–1274, doi :10.1016/j.dsr2.2008.02.003.
- Nencioli, F., F. d'Ovidio, A. M. Doglioli, et A. A. Petrenko (2011), Surface coastal circulation patterns by in-situ detection of Lagrangian coherent structures, *Geophys. Res. Lett.*, *38*(L17604), doi :10.1029/2011GL048815.
- Nencioli, F., F. d'Ovidio, A. Doglioli, et A. Petrenko (2013), In situ estimates of submesoscale horizontal eddy diffusivity across an ocean front, *J. Geophys. Res.*, *118*(12), 7066–7080.
- Nencioli, F., A. A. Petrenko, et A. M. Doglioli (2016), Diagnosing cross-shelf transport along an ocean front : An observational case study in the Gulf of Lion, *J. Geophys. Res. Oceans*, *121*(10), 7218–7243, doi :10.1002/2016JC011908.
- Noh, Y., I. S. Kang, M. Herold, et S. Raasch (2006), Large eddy simulation of particle settling in the ocean mixed layer, *Phys. Fluids*, *18*(8), 085,109, doi : 10.1063/1.2337098.
- Ohlmann, J. C., J. H. LaCasce, L. Washburn, A. J. Mariano, et B. Emery (2012), Relative dispersion observations and trajectory modeling in the santa barbara channel, *J. Geophys. Res.*, *117*(C5), 1978–2012.
- Okubo, A. (1971), Oceanic diffusion diagrams, in *Deep sea research and oceanographic abstracts*, vol. 18, pp. 789–802, Elsevier.
- Olascoaga, M. J., I. I. Rypina, M. G. Brown, F. J. Beron-Vera, H. Kocak, L. E. Brand, G. R. Halliwell, et L. K. Shay (2006), Persistent transport barrier on the West Florida Shelf, *Geophys. Res. Lett.*, *33*(22), doi :{10.1029/2006GL027800}.
- Olson, D. (1991), Rings in the ocean, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, *19*(1), 283–311, doi :10.1146/annurev.ea.19.050191.001435.
- Orlić, M., M. Kuzmić, et Z. Pasarić (1994), Response of the Adriatic Sea to the Bora and Sirocco forcing, *Cont. Shelf Res.*, *14*, 91–116.

- Pascual, A., Y. Faugere, G. Larnicol, et P.-Y. Le Traon (2006), Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters, *Geophys. Res. Lett.*, *33*(2), doi :10.1029/2005GL024633.
- Pasquero, C., A. Provenzale, et E. A. Spiegel (2003), Suspension and fall of heavy particles in random two-dimensional flow, *Phys. Rev. Lett.*, *91*, 054,502, doi : 10.1103/PhysRevLett.91.054502.
- Pattiaratchi, C., A. James, et M. Collins (1986), Island wakes and headland eddies : a comparison between remotely sensed data and laboratory experiments, *J. Geophys. Res.*, *92*(C1), 783–794.
- Pauthenet, E., F. Roquet, G. Madec, et D. Nerini (2017), A linear decomposition of the southern ocean thermohaline structure, *J. Phys. Oceanogr.*, *47*(1), 29–47, doi :10.1175/JPO-D-16-0083.1.
- Penven, P., P. Marchesiello, L. Debreu, et J. Lefevre (2008), Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations, *Environmental Modelling & Software*, *23*(5), 660–662.
- Petrenko, A., A. Doglioli, F. Nencioli, M. Kersalé, Z. Hu, et F. d’Ovidio (2017), A review of the LATEX project : mesoscale to submesoscale processes in a coastal environment, *Ocean Dynam.*, *SUBMITTED*.
- Petrenko, A. A. (2003), Variability of circulation features in the Gulf of Lion NW Mediterranean Sea. Importance of inertial currents, *Oceanol. Acta*, *26*, 323–338.
- Petrenko, A. A. (2008), Latex08 cruise, RV Téthys II, <http://dx.doi.org/10.17600/8450140>.
- Petrenko, A. A. (2009), Latex09 cruise, RV Téthys II, <http://dx.doi.org/10.17600/9450140>.
- Petrenko, A. A. (2010), Latex10 cruise, RV Téthys II, <http://dx.doi.org/10.17600/10450150>.
- Petrenko, A. A., Y. Leredde, et P. Marsaleix (2005), Circulation in a stratified and wind-forced Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea : in situ and modeling data, *Cont. Shelf Res.*, *25*, 7–27, doi :10.1016/j.csr.2004.09.004.
- Petrenko, A. A., C. Dufau, et C. Estournel (2008), Barotropic eastward currents in the western Gulf of Lion, northwestern Mediterranean Sea, during stratified conditions, *J. Mar. Sys.*, *74*(1-2), 406–428, doi :10.1016/j.jmarsys.2008.03.004.
- Pichel, W. G., J. H. Churnside, T. S. Veenstra, D. G. Foley, K. S. Friedman, R. E. Brainard, J. B. Nicoll, Q. Zheng, et P. Clemente-Colón (2007), Marine debris collects within the north pacific subtropical convergence zone, *Mar. Pollut. Bull.*, *54*(8), 1207 – 1211, doi :10.1016/j.marpolbul.2007.04.010.

BIBLIOGRAPHIE

- Pingree, R. (1978), The formation of the shambles and other banks by tidal stirring of the seas, *J.Mar. Biol. Ass. U.K.*, 58, 211–226.
- Poje, A. C., T. M. Özgökmen, B. L. Lipphardt, B. K. Haus, E. H. Ryan, A. C. Haza, G. A. Jacobs, A. Reniers, M. J. Olascoaga, G. Novelli, et al. (2014), Sub-mesoscale dispersion in the vicinity of the deepwater horizon spill, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(35), 12,693–12,698.
- Price, C., et J. Morris, Jr. (2013), Marine cage culture and the environment : Twenty-first century science informing a sustainable industry., *Tech. rep.*, NOAA, NOS NCCOS 164.
- Qiu, Z., A. Doglioli, Z. Hu, P. Marsaleix, et F. Carlotti (2010), The influence of hydrodynamic processes on zooplankton transport and distributions in the North Western Mediterranean : Estimates from a Lagrangian model, *Ecol. Model.*, 221(23), 2816 – 2827, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.07.025>.
- Qiu, Z., A. M. Doglioli, Y. He, et F. Carlotti (2011), Lagrangian model of zooplankton dispersion : numerical schemes comparisons and parameter sensitivity tests, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 29(2), 438–445, doi :10.1007/s00343-011-0015-9.
- Qiu, Z., A. M. Doglioli, et F. Carlotti (2014), Using a Lagrangian model to estimate source regions of particles in sediment traps, *Sci. China Earth Sci.*, 57(10), 2447–2456, doi :10.1007/s11430-014-4880-x.
- Quéguiner, B. (2010), LATEX 2010 cruise, RV Le Suroît, <http://dx.doi.org/10.17600/10020030>.
- Raapoto, H., E. Martinez, A. Petrenko, A. Doglioli, et C. Maes (2018), Modeling the wake of the Marquesas archipelago, *J. Geophys. Res.*, 123, 1213–1228, doi : 10.1002/2017JC013285.
- Raven, J., et P. Falkowski (1999), Oceanic sinks for atmospheric co₂, *Plant, Cell & Environment*, 22(6), 741–755.
- Reffray, G., R. Bourdalle-Badie, et C. Calone (2015), Modelling turbulent vertical mixing sensitivity using a 1-D version of NEMO, *Geosci. Model Dev.*, 8, 69–86.
- Reverdin, G., S. Morisset, L. Marié, D. Bourras, G. Sutherland, B. Ward, J. Salvador, J. Font, Y. Cuyppers, L. Centurioni, V. Hormann, N. Koldziejczyk, J. Boutin, F. D’Ovidio, F. Nencioli, N. Martin, D. Diverres, G. Alory, et R. Lumpkin (2015), Surface salinity in the north atlantic subtropical gyre : During the strasse/spurs summer 2012 cruise, *Oceanography*, 28(1), 114–123.
- Reygondeau, G., C. Guieu, F. Benedetti, J.-O. Irisson, S.-D. Ayata, S. Gasparini, et P. Koubbi (2017), Biogeochemical regions of the mediterranean sea : An

- objective multidimensional and multivariate environmental approach, *Progress in Oceanography*, 151, 138 – 148, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2016.11.001>.
- Reynolds, O. (1895), On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion., *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 186, 123–164.
- Richardson, L. F. (1926), Atmospheric diffusion shown on a distance-neighbour graph, in *Proc. R. Soc. London, Series A.*, vol. 110, pp. 709–737.
- Richardson, L. F., et H. Stommel (1948), Note on eddy diffusion in the sea, *Journal of Meteorology*, 5(5), 238–240.
- Richardson, P. L. (1980), Gulf stream ring trajectories, *J. Phys. Oceanogr.*, 10(1), 90–104, doi :[10.1175/1520-0485\(1980\)010<0090:GSRT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<0090:GSRT>2.0.CO;2).
- Richardson, P. L. (1983a), *Gulf Stream Rings*, pp. 19–45, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, doi :[10.1007/978-3-642-69003-7_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69003-7_2).
- Richardson, P. L. (1983b), Eddy kinetic energy in the north atlantic from surface drifters, *J. Geophys. Res.*, 88(C7), 4355–4367, doi :[10.1029/JC088iC07p04355](https://doi.org/10.1029/JC088iC07p04355).
- Richardson, P. L. (2007), Agulhas leakage into the atlantic estimated with sub-surface floats and surface drifters, *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 54(8), 1361 – 1389, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2007.04.010>.
- Richardson, P. L., J. R. E. Lutjeharms, et O. Boebel (2003), Introduction to the “Inter-ocean exchange around southern Africa”, *Deep-Sea Res. II*, 50, 1–12, doi :[10.1016/S0967-0645\(02\)00376-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00376-4).
- Riley, G. A. (1942), The relationship of vertical turbulence and spring diatom flowerings, *J. Mar. Res.*, 5(1), 67–87.
- Rodi, W. (1987), Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids, *J. Geophys. Res.*, 92, 5305–5328.
- Rossby, T. (2007), Evolution of lagrangian methods in oceanography, *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics*, pp. 1–38.
- Rossi, V., E. Ser-Giacomi, C. López, et E. Hernández-García (2014), Hydrodynamic provinces and oceanic connectivity from a transport network help designing marine reserves, *Geophysical Research Letters*, 41(8), 2883–2891, doi : [10.1002/2014GL059540](https://doi.org/10.1002/2014GL059540).

BIBLIOGRAPHIE

- Rousselet, L., A. M. Doglioli, C. Maes, B. Blanke, et A. A. Petrenko (2016), Impacts of mesoscale activity on the water masses and circulation in the Coral Sea, *J. Geophys. Res. Oceans*, *121*(10), 7277–7289, doi :10.1002/2016JC011861.
- Rubio, A., B. Blanke, S. Speich, N. Grima, et C. Roy (2009b), Mesoscale eddy activity in the southern Benguela upwelling system from satellite altimetry and model data, *Prog. Oceanogr.*, *83*(1-4), 288–295, doi :10.1016/j.pocean.2009.07.029.
- Sadoux, S., J.-M. Baey, A. Fincham, et D. Renouard (2000), Experimental study of the stability of an intermediate current and its interaction with a cape, *Dyn. Atmos. Oceans*, *31*, 165–192.
- Salmona, P., et D. Veradi (2001), The marine protected area of Portofino, Italy : a difficult balance, *Ocean Coast. Manage.*, *44*, 39–60.
- Sammari, C., C. Millot, et L. Prieur (1995), Aspects of the seasonal and mesoscale variabilities of the Northern Current inferred from the PROLIG-2 and PROS-6 experiments, *Deep-Sea Res. I*, *42*(6), 893–917, doi :10.1016/0967-0637(95)00031-Z.
- Schaeffer, A., A. Molcard, P. Forget, P. Fraunié, et P. Garreau (2011), Generation mechanisms for mesoscale eddies in the Gulf of Lions : radar observation and modeling, *Ocean Dynam.*, *61*, 1587–1609, doi :10.1007/s10236-011-0482-8.
- Schroeder, K., J. Chiggiato, A. Haza, A. Griffa, T. Özgökmen, P. Zanasca, A. Molcard, M. Borghini, P.-M. Poulain, R. Gerin, et al. (2012), Targeted lagrangian sampling of submesoscale dispersion at a coastal frontal zone, *Geophys. Res. Lett.*, *39*(11).
- Schroeder, K., A. C. Haza, A. Griffa, T. M. Ozgoekmen, P. M. Poulain, R. Gerin, G. Peggion, et M. Rixen (2011), Relative dispersion in the Liguro-Provençal basin : From sub-mesoscale to mesoscale, *Deep-Sea Res. I*, *58*(3), 209–228, doi : {10.1016/j.dsr.2010.11.004}.
- Sciascia, R., S. D. Monte, et A. Provenzale (2013), Physics of sinking and selection of plankton cell size, *Phys. Lett. A*, *377*(6), 467 – 472, doi :http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2012.12.020.
- Semtner, A. J. (1995), Modeling ocean circulation, *Science*, *269*(5229), 1379–1385, doi :10.1126/science.269.5229.1379.
- Shchepetkin, A. F., et J. C. McWilliams (2005), The regional oceanic modeling system (ROMS) : a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Model.*, *9*, 347–404, doi :10.1016/j.ocemod.2004.08.002.

- Shcherbina, A. Y., M. A. Sundermeyer, E. Kunze, E. D'Asaro, G. Badin, D. Birch, A.-M. E. G. Brunner-Suzuki, J. Callies, B. T. K. Cervantes, M. Claret, B. Concannon, J. Early, R. Ferrari, L. Goodman, R. R. Harcourt, J. M. Klymak, C. M. Lee, M.-P. Lelong, M. D. Levine, R.-C. Lien, A. Mahadevan, J. C. McWilliams, M. J. Molemaker, S. Mukherjee, J. D. Nash, T. Özgökmen, S. D. Pierce, S. Ramachandran, R. M. Samelson, T. B. Sanford, R. K. Shearman, E. D. Skillingstad, K. S. Smith, A. Tandon, J. R. Taylor, E. A. Terray, L. N. Thomas, et J. R. Ledwell (2015), The latmix summer campaign : Submesoscale stirring in the upper ocean, *Bull. Am. Met. Soc.*, *96*(8), 1257–1279, doi : 10.1175/BAMS-D-14-00015.1.
- Signell, R. P., et W. R. Geyer (1991), Transient eddy Formation Around Headlands, *J. Geophys. Res.*, *96*(C2), 2561–2575, doi :10.1029/90JC02029.
- Smagorinsky, J. (1963), General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment, *Mont. Weather Rev.*, *91*, 99–164.
- Souza, J. M. A. C., C. de Boyer Montégut, et P. Y. Le Traon (2011), Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean, *Ocean Sc.*, *7*, 317–334, doi :10.5194/os-7-317-2011.
- Stacey, M., et S. Pond (1997), On the Mellor–Yamada turbulence closure scheme : The surface boundary condition for q^2 , *J. Phys. Oceanogr.*, *27*, 2081–2086.
- Stammer, D. (1997), Global characteristics of ocean variability estimated from regional topex/poseidon altimeter measurements, *J. Phys. Oceanogr.*, *27*(8), 1743–1769.
- Stanton, T., C. Law, et A. Watson (1998), Physical evolution of the IronEx-I open ocean tracer patch, *Deep-Sea Res. II*, *45*(6), 947 – 975, doi :10.1016/S0967-0645(98)00018-6.
- Stashchuk, N., V. Vlasenko, M. E. Inall, et D. Aleynik (2014), Horizontal dispersion in shelf seas : High resolution modelling as an aid to sparse sampling, *Prog. Oceanogr.*, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.007>.
- Steinbuck, J., M. Stacey, et S. Monismith (2009), An evaluation of χ_t estimation techniques : Implications for Batchelor fitting and ϵ , *J. Atmos. Oceanic Technol.*, *26*, 1652–1662.
- Stocker, R. (2012), Marine microbes see a sea of gradients, *Science*, *338*(6107), 628–633, doi :10.1126/science.1208929.
- Stommel, H. (1949), Horizontal diffusion due to oceanic turbulence, *J. Mar. Res.*, *8*(3), 199–225.

BIBLIOGRAPHIE

- Sundermeyer, M. A., et J. R. Ledwell (2001), Lateral dispersion over the continental shelf : Analysis of dye release experiments, *J. Geophys. Res.*, *106*(C5), 9603–9621.
- Sverdrup, H. U. (1953), On conditions for the vernal blooming of phytoplankton, *ICES J. Mar. Sci.*, *18*(3), 287–295, doi :10.1093/icesjms/18.3.287.
- Sverdrup, H. U., M. W. Johnson, et R. H. Fleming (1942), *The Oceans : Their physics, chemistry, and general biology*, 1087 pp., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., <http://publishing.cdlib.org/ucpressebooks/view?docId=kt167nb66r&chunk.id=0&doc.view=print>.
- Swallow, J., et B. Hamon (1959), Some measurements of deep currents in the eastern north atlantic, *Deep-Sea Res. (1953)*, *6*, 155 – 168, doi :[http://dx.doi.org/10.1016/0146-6313\(59\)90066-8](http://dx.doi.org/10.1016/0146-6313(59)90066-8).
- Thyssen, M., G. J. Grégori, J.-M. Grisoni, M. L. Pedrotti, L. Mousseau, L. F. Artigas, S. Marro, N. Garcia, O. Passafiume, et M. J. Denis (2014), Onset of the spring bloom in the northwestern mediterranean sea : influence of environmental pulse events on the in situ hourly-scale dynamics of the phytoplankton community structure, *Front.Microbiol.*, *5*, 387, doi :10.3389/fmicb.2014.00387.
- Tsumune, D., J. Nishioka, A. Shimamoto, S. Takeda, et A. Tsuda (2005), Physical behavior of the SEEDS iron-fertilized patch by sulphur hexafluoride tracer release, *Prog. Oceanogr.*, *64*(2-4), 111–127, doi :{10.1016/j.pocean.2005.02.018}.
- Tsumune, D., J. Nishioka, A. Shimamoto, Y. W. Watanabe, T. Aramaki, Y. Nojiri, S. Takeda, A. Tsuda, et T. Tsubono (2009), Physical behaviors of the iron-fertilized patch in SEEDS II, *Deep-Sea Res. II*, *56*(26), 2948–2957, doi :{10.1016/j.dsr2.2009.07.004}.
- Ulses, C., C. Estournel, J. Bonnin, X. Durrieu de Madron, et P. Marsaleix (2008a), Impact of storms and dense water cascading on shelf-slope exchanges in the Gulf of Lion (NW Mediterranean), *J. Geophys. Res.*, *113*, C02010, doi :10.1029/2006JC003795.
- Ulses, C., C. Estournel, P. Puig, X. Durrieu de Madron, et P. Marsaleix (2008b), Dense shelf water cascading in the northwestern mediterranean during the cold winter 2005 : Quantification of the export through the gulf of lion and the catalan margin, *Geophys. Res. Lett.*, *35*, L07610, doi :10.1029/2008GL033257.
- van Ballegooyen, R. C., M. L. Gründlingh, et J. R. E. Lutjeharms (1994), Eddy fluxes of heat and salt from the southwest Indian Ocean into the southeast Atlantic Ocean : A case study, *J. Geophys. Res.*, *99*(C7), 14,053–14,070, doi :10.1029/94JC00383.

- Van Sebille, E., P. Scussolini, J. V. Durgadoo, F. J. Peeters, A. Biastoch, W. Weijer, C. Turney, C. B. Paris, et R. Zahn (2015), Ocean currents generate large footprints in marine palaeoclimate proxies, *Nat. Commun.*, *6*.
- Vassallo, P., A. M. Doglioli, F. Rinaldi, et I. Beiso (2006), Determination of physical behaviour of feed pellets in Mediterranean water, *Aquac. Res.*, *37*(2), 119–126, doi :10.1111/j.1365-2109.2005.01403.x.
- Veneziani, M., A. Griffa, Z. D. Garraffo, et E. P. Chassignet (2004), Lagrangian spin parameter and coherent structures from trajectories released in a high-resolution ocean model, *J. Phys. Oceanogr.*, *34*(8), 1884–1906, doi :10.1175/1520-0485(2004)034<1884:OTASMF>2.0.CO;2.
- Veneziani, M., A. Griffa, A. M. Reynolds, Z. D. Garraffo, et E. P. Chassignet (2005), Parameterizations of eddy statistics and particle dispersion in the presence of coherent vortices, *J. Mar. Res.*, *63*, 1057–1083.
- Verron, J., P. A. Davies, et J. M. Dakin (1991), Quasigeostrophic flow past a cape in a homogeneous fluid, *Fluid Dyn. Res.*, *7*, 1–21.
- Volk, T., et M. I. Hoffert (1985), Ocean carbon pumps : Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric co2 changes, *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, *32*, 99–110.
- Warner, J., C. Sherwood, H. Arango, et R. P. Signell (2005), Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method., *Ocean Model.*, *8*, 81–113.
- Wilcox, D. (1988), Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models, *AIAA Journal*, *26*, 1299–1310.
- Wilson, J. D., et B. L. Sawford (1996), Review of lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere, *Bound. Layer Meteorol.*, *78*(1), 191–210.
- Zannetti, P. (1990), *Air Pollution Modeling*, Computational Mechanics Publications, Boston.

BIBLIOGRAPHIE

Annexe : Curriculum Vitae

Curriculum Vitae of Andrea M. Doglioli

June 28, 2018

Name: Andrea Michelangelo

Surname: Doglioli

Birth: Alessandria (Italy), Jan 30th, 1974

Nationality: Italian

Civil status: Married; two sons.

Domicile: 61, chemin de Morgiou, 13009 Marseille, France.

phone: +33 (0)4 86 97 52 08

mobile: +33 (0)7 61 94 92 09 or +39 339 160 43 06

Languages: Italian (mother tongue), French, English.

Position: Assistant Professor (*Maître de Conférences*)

Address: Mediterranean Institute of Oceanography,
Campus de Luminy - Case 901,
13288 MARSEILLE CEDEX 9, France

Phone: +33 (0)4 86 09 06 08

E-mail: andrea.doglioli@univ-amu.fr

Web: www.mio.univ-amu.fr/~doglioli

STUDIES

May '04	<i>PhD in Marine Science</i> , Università di Genova. Genoa, Italy. Advisors: M. Fabiano, R. Festa, A. Griffa.
Jul '02,'03,'04	<i>Visiting PhD student at RSMAS</i> (Rosenstiel School of Marine & Atmospheric Science), University of Miami. Miami, Florida.
Feb '00	<i>Five Years Degree in Environmental Sciences (specialization in Marine Environment)</i> , Università di Genova. Genoa, Italy. Advisors: R. Festa, A. Griffa, M. Fabiano, S. Tucci.
Jul '93	High school diploma, Liceo Classico "G. Plana". Alessandria, Italy.

COURSES

26-30 Oct '09	Institute on <i>Lyapunov analysis, from theory to geophysical applications</i> , ISC-Institut des Systèmes Complexes, Paris, France.
8-19 Sep '03	12th <i>Summer School for Parallel Computing</i> at the Interuniversity Consortium CINECA, Bologna, Italy.
19-21 Jun '02	CNR-MIT Cooperation on Climate Change and Hydrogeological Disasters - Summer Course: <i>The Steady Circulation of the Oceans</i> by Paola Malanotte-Rizzoli (M.I.T.), Departement of Civil and Environmental Engineering, Università di Perugia, Perugia, Italy.
27 May - 7 Jun '02	Environmental Engineering PhD course: <i>Fluid Mechanics</i> . Departement of Environmental Engineering, Università di Genova, Genova, Italy.
5-6 Jul. '01	Course promoted by CILEA (Lombard Interuniversity Consortium for Automatic Elaboration): <i>The FORTRAN 90 for the Intensive Scientific Calculation</i> , Milano, Italy.
A.Y. 1996-1999	Selected courses to get the degree in Environmental Sciences: Mathematical models, Physical Oceanography, Coastal Hydrodynamics, Marine Geophysics, Meteorology, Physics of the Atmosphere, Physics of the Earth, Evolution of Coast and Shelf, Chemical Oceanography, Biological Oceanography and Marine Geology.

COMPUTER KNOWLEDGE

Hardware Platforms: PC; PC clusters; workstations.

Operative Systems: Linux; Unix; Windows.

Languages: Programming: FORTRAN77,90; Visual FORTRAN; openMP, MPI.
Scripting: Shell; Matlab; Python.
Writing: LaTeX; HTML.

Applications: ODV; GrADS; SeaGrid; M_Map; OpenOffice; MS Office; GIMP; Paint Shop Pro.

WORK EXPERIENCE

Sep '06 - current	Assistant Professor (<i>Maître de Conférences</i>) at Mediterranean Institute of Oceanography, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France.
Apr-May '18	Participant to the oceanographic cruise Proteus-BIOSWOT in the Western Mediterranean Sea.
June '17	Organizer of the workshop & summer school FineMed2017 in collaboration with G.Grégori, F.d'Ovidio et M.Thyssen.
May-June '17	Participant to the oceanographic cruise Peacetime in the Mediterranean Sea.
May '16	Chief scientist of the oceanographic cruise EssMVP in the NW Mediterranean Sea [doi: 10.17600/15008800].
Apr '16	Participant to the oceanographic cruise SeaQUEST in the NW Mediterranean Sea.
Nov '15	Chief scientist of the oceanographic cruise OSCAHR in the NW Mediterranean Sea

	[doi: 10.17600/15008800].
Sep '10	Participant to the oceanographic cruises Latex10 in the Gulf of Lion [doi: 10.17600/10450150 and 10.17600/10020030].
May - Jul '10	Visiting Researcher at ISMAR - Istituto di Scienze Marine , Consiglio Nazionale delle Ricerche. Venice, Italy.
Sep '09	Participant to the oceanographic cruise Latex09 in the Gulf of Lion [doi: 10.17600/9450140].
Aug '08	Participant to the oceanographic cruise Latex08 in the Gulf of Lion [doi: 10.17600/8450140].
Jui '07	Participant to the oceanographic cruise Latex00 in the Gulf of Lion [doi: 10.17600/7450130].
Nov '04 - Aug '06	Post-doc Researcher at Laboratoire de Physique des Océans UMR 6523, Université de Bretagne Occidentale. Brest, France.
Nov '00 - Oct '04	Fellow Researcher (<i>Assegnista di Ricerca</i>) at Dipartimento di Fisica, Università di Genova. Genoa, Italy.
1996	collaboration with Elettronica Enne (Savona, Italy), a company specialized in building ROV (Remote Operated Vehicle) and oceanographical buoys.
Jui '96	Oceanographic cruise in the Gulf of Genova as part of the project SAREF supported by Università di Genova.
Jul '95	Oceanographic cruise at Eolie Islands as part of the project EOCUUM supported by Università di Genova and Italian Navy.

TEACHING AND TUTORING (selected)

Since Oct '15	PhD thesis supervisor. Title: <i>Ocean physics-biogeochemistry coupling at the submesoscale</i> . Student: L. Rousselet. École Doctorale "Sciences de l'Environnement", Université d'Aix-Marseille. In collaboration with A.A. Petrenko.
Since Jan '15	PhD thesis supervisor. Title: <i>Impact of the seasonal cycles on the island effect of the Marquesas Islands and on their marine resources</i> . Student: H. Raapoto. École Doctorale "du Pacifique", Université de Polynésie Française et École Doctorale "Sciences de l'Environnement", Université d'Aix-Marseille. In collaboration with J.-C. Gartener, A.A. Petrenko and E.Martinez.
Feb-Sep '18	Internship supervisor. Title: <i>Biodegradable Settling Microparticles: numerical modeling and laboratory experiments</i> . Student: S. Spadoni . Erasmus+ program , Università di Genova and Université d'Aix-Marseille. In collaboration with G. Grégori.
A.Y. 2017-2018	Batchelor and Master courses : <i>Introduction to Physical Oceanography</i> (level 2), <i>Ocean Dynamics and Modeling Project</i> (level 3), <i>Ocean Circulation Modelling and Mediterranean Sea Circulation for General Oceanography</i> (level 4) and <i>Circulation and Dispersion in Coastal Waters</i> (level 5), Université d'Aix-Marseille.
Oct '13 - Apr '17	PhD thesis supervisor. Title: <i>Marine connectivity: exploring the role of currents and turbulent processes in driving it</i> . Student: A. Costa. École Doctorale "Sciences de l'Environnement", Université d'Aix-Marseille. In collaboration with A.A. Petrenko. [see thesis PDF]
A.Y. 2016-2017	Batchelor and Master courses : <i>Introduction to Physical Oceanography</i> (level 2), <i>Ocean Dynamics</i> (level 3), <i>Ocean Circulation Modelling and Mediterranean Sea Circulation for General Oceanography</i> (level 4) and <i>Circulation and Dispersion in Coastal Waters</i> (level 5). Université d'Aix-Marseille.
A.Y. 2015-2016	Batchelor and Master courses : <i>Introduction to Physical Oceanography</i> (level 2), <i>Ocean Dynamics</i> (level 3), <i>Ocean Circulation Modelling</i> (level 4) and <i>Circulation and Dispersion in Coastal Waters</i> (level 5). Université d'Aix-Marseille.
2015	Master's thesis supervisor. Title: <i>Étude de la circulation à mésoéchelle et ses implications sur la biogéochimie en mer de Corail</i> . Student: L.Rousselet, Master d'Océanographie, Université d'Aix-Marseille. In collaboration with C.Maes. [see report]
A.Y. 2014-2015	Batchelor and Master courses : <i>Introduction to Physical Oceanography</i> (level 2), <i>Ocean Dynamics and Modeling Project</i> (level 3), <i>Ocean Circulation Modelling and Mediterranean</i>

	<i>Sea Circulation for General Oceanography</i> (level 4) and <i>Circulation and Dispersion in Coastal Waters</i> (level 5). Université d'Aix-Marseille.
Sep '10 - Oct '13	PhD thesis supervisor. Title: <i>Dynamics of meso- and submesoscale oceanic processes from numerical simulations and in situ data</i> . Student: M. Kersalé . École Doctorale "Sciences de l'Environnement", Université d'Aix-Marseille. In collaboration with A.A. Petrenko and I. Dekeyser. Prix de thèse de l'Académie de Marine . Prix de thèse d'Aix-Marseille Université . [see thesis PDF see presentation PDF]
A.Y. 2013-2014	Batchelor and Master courses : <i>Introduction to Physical Oceanography</i> (level 2), <i>Ocean Dynamics and Modeling Project</i> (level 3), <i>Ocean Circulation Modelling and Mediterranean Sea Circulation for General Oceanography</i> (level 4) and <i>Circulation and Dispersion in Coastal Waters</i> (level 5). Université d'Aix-Marseille.
2013	Master's thesis supervisor. Title: <i>Etude numérique Lagrangienne de la connectivité en Mer Méditerranée</i> . Student: A.-M. Rammou, Master d'Océanographie, Aix-Marseille Université. In collaboration with A. Molcard. [see report]
A.Y. 2012-2013	Batchelor and Master courses : <i>Introduction to Physical Oceanography</i> (level 2), <i>Ocean Dynamics and Modeling Project</i> (level 3), <i>Ocean Circulation Modelling and Mediterranean Sea Circulation for General Oceanography</i> (level 4) and <i>Circulation and Dispersion in Coastal Waters</i> (level 5). Aix-Marseille Université.
2012	Master's thesis supervisor. Title: <i>Mesures de turbulence océanique dans le golfe du Lion: expérimentation et interprétation</i> . Student: R. Rainaud, Master d'Océanographie, Aix-Marseille Université. In collaboration with A. Petrenko [see report].
2011	Visiting Student Supervisor. Title: <i>Surface transport in the Northeastern Adriatic Sea inferred from Finite-Size Lyapunov Exponents (FSLE)</i> . Student: Maristella Berta, Doctorate School in Environmental and Industrial Fluid Mechanics, Università di Trieste, Italy.
A.Y. 2011-2012	Batchelor and Master courses : <i>Ocean Dynamics</i> (level 3), <i>Regional Ocean Circulation Modelling</i> (level 4) and <i>Coastal Oceanography, Mediterranean Sea Circulation, Mesoscale Dynamics, Lagrangian Methods</i> (level 5). Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée.
2011	Stage supervisor. Title: <i>Comparaison de l'activité mésoéchelle entre différents modèles numériques 3D de circulation</i> . Student: Antoine Boyron, Ecole normale supérieure de Lyon. In collaboration with A.A. Petrenko [see report].
May '11	Lecturer. Title: <i>Seminari d'introduzione all'Oceanografia Fisica</i> , in the framework of the course 'Fisica dell'Atmosfera' by Dr. Andrea Mazzino, Facoltà di Scienze M.F.N., Università degli Studi di Genova. [see notes and slides]
Oct '07 - Feb '11	PhD thesis supervisor. Title: <i>Study of eddies and filaments in the Gulf of Lion</i> . Student: Z.Hu . École Doctorale "Sciences de l'Environnement", Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée. In collaboration with A.A. Petrenko and I. Dekeyser. [see abstract in French and English PDF , see thesis PDF , see presentation PDF]
A.Y. 2010-2011	Batchelor and Master courses : <i>Ocean Dynamics</i> (level 3), <i>Modelling, Ocean Modelling</i> (level 4) and <i>Coastal Oceanography, Mediterranean Sea Circulation, Mesoscale Dynamics, Lagrangian Methods</i> (level 5). Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée.
2010	Master's thesis supervisor. Title: <i>Turbulent measurements in North Western Mediterranean using SCAMP (Self Contained Autonomous MicroProfiler)</i> . Student: Anna Rumyantseva, Master of Physics, University of Moscow. In collaboration with A.A. Petrenko [see report].
2010	Master's thesis supervisor. Title: <i>High resolution modeling study of Meddy collision with seamounts</i> . Student: M. Kersalé , Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée. In collaboration with Dr. A. Peliz, Instituto de Oceanografia, Universidade de Lisboa, Portugal [see report].
Jul '10	Training courses for ARPAV (Regional Agency for Environmental Protection of Veneto) Modelling Staff. Titles: 1) <i>Breve storia della modellistica numerica fluido-dinamica</i> ; 2) <i>Introduzione all'uso di un modello numerico di circolazione: ROMS-AGRIF</i> ; 3) <i>Esempi di implementazione del modello ROMS-AGRIF: il mare Adriatico</i> ; 4) <i>Aspetti caratteristici della</i>

- circolazione oceanica in prossimità di ostacoli*. ISMAR-CNR, Venezia, Italy [see slides [#1](#), [#2](#), [#3](#), [#4](#)].
- Jan '07 - Apr '10 PhD thesis supervisor. Title: *Numerical modelling of circulation and pollutant dispersion-degradation in coastal waters. An application to the Eastern Ligurian Sea*. Student: [P. De Gaetano](#). Dottorato in Geofisica XXII ciclo, Università degli Studi di Genova. In collaboration with R. Festa and M. Burlando. [[see thesis PDF](#)]
- A.Y. 2009-2010 [Batchelor and Master courses](#): *Ocean Dynamics* (level 3), *Modelling, Ocean Modelling* (level 4) and *Coastal Oceanography, Mediterranean Sea Circulation, Mesoscale Dynamics, Lagrangian Methods* (level 5). Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée.
- 2009 Master's thesis supervisor. Title: *Numerical Lagrangian study of main pathways of water masses in Northwestern Mediterranean*, Student: H. Berger, Université du Sud Toulon Var [[see report](#)].
- 29 Apr '09 Lecturer. Title: *La circolazione oceanica generale forzata dal vento e tematiche recenti in oceanografia*, in the framework of the course 'Fisica dell'Atmosfera 1' by Prof. Corrado Ratto, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Genova.
- A.Y. 2008-2009 Batchelor and Master courses: *Ocean Dynamics* (level 3), *Modelling, Ocean Modelling* (level 4) and *Coastal Oceanography, Mediterranean Sea Circulation, Mesoscale Dynamics, Lagrangian Methods* (level 5). Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée.
- 2008 Master's thesis supervisor: *Impact evaluation of a mesoscale eddy on the structure of the trophic web of the Gulf of Lion*. Student: [R. Campbell](#). Master d'Océanographie, Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée. In collaboration with F. Diaz and A.A. Petrenko. [[see report](#)]
- 12 May '08 Lecturer. Title: *Modellizzazione della dispersione in mare. Introduzione ai modelli numerici ed esempi di applicazioni nelle acque costiere liguri*, in the framework of the course 'Fisica dell'Atmosfera 1' by Prof. Corrado Ratto, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Genova.
- A.Y. 2007-2008 Batchelor and Master courses: *Informatics and programming* (level 1), *Ocean Dynamics, Modelling* (level 3), *Ocean Modelling* (level 4) and *Coastal Oceanography* (level 5). Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée.
- 2007 Master's thesis supervisor. Title: *Mesoscale eddies in the Gulf of Lion*. Student: [Z. Hu](#). Master d'Océanographie, Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée. [[see report](#)]
- A.Y. 2006-2007 Batchelor and Master courses: *Informatics and programming* (level 1), *Ocean Dynamics, Modelling* (level 3), *Ocean Modelling* (level 4) and *Coastal Oceanography* (level 5). Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée.
- 2006 Master's thesis supervisor. Title: *Gestione di un impianto di maricoltura: sviluppo del modello advettivo-dispersivo POM-LAMP3D tramite il modulo degradativo e analisi degli impatti ambientali*. Student: [P. De Gaetano](#). Corso di Laurea in Scienze Ambientali, Università di Genova. In collaboration with M. Fabiano and P. Vassallo. [[see report PDF, HTML](#)]
- Apr '04 Lecturer. Title: *Modelli numerici per lo studio della dispersione di rifiuti da maricoltura* in the framework of the Advanced Master 'Acquacoltura: risorse, impatto, gestione', organized by Prof. M. Fabiano, in collaboration between Università degli Studi di Genova and Universidad Austral de Chile.
- Apr '03 Lecturer. Title: *Applicazione di modelli matematici ad una maricoltura* in the framework of the course 'Fondamenti di Analisi dei Sistemi Ecologici' by Prof. C. Nike Bianchi, Facoltà di Scienze M.F.N., Università degli Studi di Genova.

RESEARCH PROGRAMS (selected)

Sep'17 - current	Title: MARBLESS: Marine Biodegradable particle Settling Study. PI: A.M. Doglioli , supported by Erasmus+ EU program.
Apr'17- current	Title: BIOSWOT : Fine-scale biophysical applications of SWOT. PI: F. d'Ovidio (CNRS) supported by CNES.
2014-2018	Title: PEACETIME: ProcEss studies at the Air-sEa Interface after dust deposition in the MEditerranean sea. PI: C.Guieu (CNRS) and K.Desboeufs (Université Paris Diderot), supported by CNRS INSU-MISTRAL, France.
2013-2017	Title: <u>OSCAHR: Observing Submesoscale Coupling At High Resolution</u> . PI: A.M.Doglioli and G.Grégori (CNRS), supported by MIO, CNFC and CNES, France.
2013-2017	Title: <u>OUTPACE: Oligotrophy to UlTra-oligotrophy PACific Experiment</u> . PI: T.Moutin (Université d'Aix-Marseille) and S.Bonnet (IRD), funded by CNRS, ANR, CNES and GOPS, France.
2012-2015	Title: <u>CoCoNet: Towards COast to COast NETworks of marine protected areas (from the shore to the high and deep sea), coupled with sea-based wind energy potential</u> . PI: N. Boero (University of Bari), funded by FP7 program, EU. [see project website]
2010-2014	Title: <i>SPECiMed : Structures of Planktonic Ecosystems in the North-western Mediterranean</i> . PI: B. Quéguiner (MIO), funded by CNRS-Centre National de la Recherche Scientifique, France. [see project website]
2010	Title: <i>STOMiC_PB : Study of Turbulence Ocean Mixing for Coupling Physics-Biochemistry</i> . PIs: A.M. Doglioli , A.A. Petrenko (LOPB UMR 6535), funded by ANR-Agence Nationale de la Recherche, in the framework of the program BQR-Bonus Qualité Recherche-Préciput 2010, and by CNRS-Centre Nationalpo de la Recherche Scientifique, France.
2010-2011	Title: <i>WASSCO: Waters - Application de Suivi de Structures COhérentes 3D dans des modèles de circulation océanique haute résolution MERCATOR et comparaison avec des données altimétriques</i> . PI: N.Grima (LPO UMR 6523), funded by Groupe Mission MERCATOR-CORIOLIS, France.
2009-2011	Title: <i>MASSILIA - Modélisation de la baie de Marseille : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin</i> . PI: C. Pinazo (LOPB UMR 6535), funded by EC2CO-PNEC, France.
2009-2012	Title: <i>JELLYWATCH - projet de recherche finalisé, visant à comprendre et à prévoir l'apparition massive de la méduse Pelagia noctiluca dans les zones côtières de la région PACA</i> . PI: G.Gorski (LOV UMR7093), funded by Region PACA and FEDER-Fonds Européen de Développement Régional, France.
2008-2011	Title: <u>LATEX - Lagrangian Transport Experiment</u> . PI: A. Petrenko and F. Diaz (LOPB UMR 6535), funded by LEFE-IDAO/CYBER, CNRS, France.
2008-2009	Title: <i>LAPLACE - LAgrangian zooPLankton Computation and Experiment</i> . PI: F. Carlotti (LOB UMR 6535), funded by EC2CO-PNEC, France.
2008-2009	Title: <i>42N5E: suivi de la zone de convection profonde dans le Golfe du Lion</i> . PI: P. Testor (LOCEAN-IPSL UMR 7159), funded by LEFE-IDAO, CNRS, France.
2007	Title: <i>LATEX00 - Lagrangian Transport Experiment - phase pilote, 2007</i> . PI: A. Petrenko and F. Diaz (LOB UMR 6535), funded by LEFE-IDAO/CYBER, CNRS, France.
2004-2006	Title: <i>Diagnostic lagrangien du transport de masse associé au déplacement de tourbillons</i> , PI: B. Blanke (LPO UMR 6523), funded by PEA SHOM, France.
2003-2004	Title: <i>Nuovi modelli di flusso C,N,P e di dispersione per ridurre l'impatto ambientale di allevamenti off-shore</i> , PI: M. Fabiano (DIPTERIS-UNIGE), funded by Regione Puglia, Italy.
2002-2004	Title: <i>Indagine delle specifiche fluidodinamiche e dispersive in un insieme di siti nell'area marina costiera ligure, finalizzato alla valutazione della dispersione di inquinanti da maricoltura</i> , PI: R. Festa (DIFI-UNIGE), funded by Regione Liguria.

REVIEWING AND ADVISING

2017	Reviewer for Programme LEFE (CNRS, France) , Commission Nationale Flotte Côtière (France) .
2016	Reviewer for Commission Nationale Flotte Côtière (France) .
2015	Reviewer for Programme TOSCA (CNES, France); Programme LEFE (CNRS, France) . Member of the selection committee for an Assistant Professorship at Université de Bretagne Occidentale.
2014	Reviewer for Commission Nationale Flotte Côtière (France); Commission Nationale Flotte Hauturière (France).
2013	Reviewer for Programme LEFE (CNRS, France) , Commission Nationale Flotte Hauturière LEFE (France).
2012	Reviewer for Programme LEFE (CNRS, France) . Member of the PhD thesis jury of A.David (supervisor: S.Speich), Université de Bretagne Occidentale.
2011	Reviewer for Continental Shelf Research . Member of the selection committee for an Assistant Professorship at Université d'Aix-Marseille.
2010	Reviewer for Volume Mare CNR (Italy) , Ocean Science , Nonlinear Processes in Geophysics .
2009	Reviewer for Journal of Atmospheric and Oceanic Technology , Ocean Modelling , The Open Oceanography Journal .
2008	Reviewer for IFREMER Post-Doc Program (France).
2007	Reviewer for EC2CO-PNEC National Program (France).
2005	Reviewer for Aquaculture , Il Nuovo Cimento .
2004	Reviewer for Journal of Environmental Radioactivity , Indian Journal of Marine Sciences .
2003	Reviewer for Aquaculture .

ACHIEVEMENTS

Jan '12 – current	Member of Executive Committee of MIO - Mediterranean Institute of Oceanography. Marseille, France.
Sep '15 - Aug '17	Associate Researcher CNRS (<i>Accueil en délégation au CNRS</i>) at MIO - Mediterranean Institute of Oceanography. Marseille, France.
Jan '11 – Dec '11	Member of Scientific Committee of LOPB - Laboratoire d'Océanographie Physique et de Biogéochimique, UMR 6535, Centre d'Océanologie de Marseille. Marseille, France.
Oct '09	Eligibility as <i>ricercatore CNR - III livello professionale, conseguita tramite concorso pubblico per titoli ed esami, Bando n.364.13, Area Scientifica (VIII) 'Scienze dell'Ambiente', Posizione A - Codice OR2/1, punti 95,70/120 e Posizione H - Codice VE80/1, punti 90,20/120, graduatoria pubblicata nella G.U. n.82 del 23/10/2009.</i>
Feb '08 -Dic '09	Member of Scientific Committee of LOPB - Laboratoire d'Océanographie Physique et de Biogéochimique, UMR 6535, Centre d'Océanologie de Marseille. Marseille, France.
15 Feb '06	Qualification as Assistant Professor (<i>Maître de conférences</i>) for meteorology, physical oceanography and environmental physics, the French Ministry of Education and Research.
Nov '05 - Nov '07	Member of Scientific Committee of AISA (Italian Association of Environmental Sciences).
Jun '01 - Oct '04	Member of the board of directors of the fair trade cooperative La Bottega Solidale srl.
1996 – 1999	Student Delegate and Vice-President of the Joint Committee of Università di Genova.
1996 – 1997	Promoter and National Councillor of AISA.
1995 – 1997	Promoter and President of the genoese section of AISA.
Jul '91	Open Water Diver (PADI Scuba Diving Course).

SPORTS AND HOBBIES

Trekking, cross-country skiing, bicycle touring, diving & swimming, fishing, spearfishing, gardening, cooking.

PUBLICATIONS

REFEREED PAPERS

- Meloni, M., Bouffard, J., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Valladeau, G. (in revision). *Toward new validation concept for coastal altimetry: application to the Ligurian Sea*. Remote Sensing of Environment.
- Bouruet-Aubertot, P., Cuypers, Y., **Doglioli, A.M.**, Caffin, M., Yohia, C., de Verneil, A., Petrenko, A., Lefèvre, D., Le Goff, H., Rougier, G., Picheral, M., and Moutin, T. (in review). *Longitudinal contrast in Turbulence along a ~19S section in the Pacific and its consequences on biogeochemical fluxes* Biogeosciences Discuss., doi:[10.5194/bg-2018-170](https://doi.org/10.5194/bg-2018-170).
- Caffin, M., Moutin, T., Foster, R.A., Bouruet-Aubertot, P., **Doglioli, A.M.**, Berthelot, H., Grosso, O., Helias-Nunige, S., Leblond, N., Gimenez, A., Petrenko, A.A., de Verneil, A., Bonnet, S. (2018). *Nitrogen budgets following a Lagrangian strategy in the Western Tropical South Pacific Ocean: the prominent role of N₂ fixation (OUTPACE cruise)*. Biogeosciences, 15, 2565-2585, doi:[10.5194/bg-15-2565-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-2565-2018).
- Rousselet, L., De Verneil, A., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Duhamel, S., Maes, C., Blanke, B. (2018). *Large to submesoscale surface circulation and its implications on biogeochemical/biological horizontal distributions during the OUTPACE cruise (SouthWest Pacific)*. Biogeosciences, 15, 2411-2431, doi:[10.5194/bg-15-2411-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-2411-2018).
- de Verneil, A., Rousselet, L., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Maes, C., Bouruet-Aubertot, P., Moutin, T. (2018). *OUTPACE long duration stations: physical variability, context of biogeochemical sampling, and evaluation of sampling strategy*. Biogeosciences, 15, 2125-2147, doi:[10.5194/bg-15-2125-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-2125-2018).
- Marrec, P., Grégori, G., **Doglioli, A.M.**, Dugenne, M., Della Penna, A., Bhairy, N., Cariou, T., Hélias Nunige, S., Lahbib, S., Rougier, G., Wagener, T., Thyssen M. (2018). *Coupling physics and biogeochemistry thanks to high resolution observations of the phytoplankton community structure in the North-Western Mediterranean Sea*. Biogeosciences, 15, 1579-1606, doi:[10.5194/bg-15-1579-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-1579-2018). Popularization paper in French [HTML](#) [PDF](#)
- Raapoto, H., Martinez, E., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Maes, C. (in press). *Modeling the wake of the Marquesas archipelago*. J. Geophys. Res. Oceans, 123, 1213–1228, doi: [10.1002/2017JC013285](https://doi.org/10.1002/2017JC013285).
- Costa, A., Petrenko, A.A., Guizien, K., **Doglioli, A.M.** (2017). *On the calculation of betweenness centrality in marine connectivity studies using transfer probabilities*. PLOS ONE, 12, 1-10. [10.1371/journal.pone.0189021](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189021). see preprint [PDF](#) [biorxiv](#) [source code & data](#)
- Costa, A., **Doglioli, A.M.**, Marsaleix, P., Petrenko A.A. (2017). *Comparison of in situ microstructure measurements to different turbulence closure schemes in a 3-D numerical ocean circulation model*. Ocean Model., 120, 1-17, doi:[10.1016/j.ocemod.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.10.002). see preprint
- de Verneil A., Rousselet, L., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Moutin, T. (2017). *The Fate of a Southwest Pacific Bloom: Gauging the impact of submesoscale vs. mesoscale circulation on biological gradients in the subtropics*. Biogeosciences, 14, 3471-3486, doi:[10.5194/bg-14-3471-2017](https://doi.org/10.5194/bg-14-3471-2017).
- Moutin, T., **Doglioli, A.M.**, de Verneil, A., Bonnet, S. (2017). *Preface: The Oligotrophy to the ULtra-oligotrophy PACific Experiment (OUTPACE cruise, 18 February to 3 April 2015)*. Biogeosciences, 14, 3207-3220, doi:[10.5194/bg-14-3207-2017](https://doi.org/10.5194/bg-14-3207-2017).
- Cyr, F., Tedetti, M., Besson, F., Beguery, L., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A., Goutx, M. (2017). *A new glider-compatible optical sensor for dissolved organic matter measurements: test case from the NW Mediterranean Sea*. Front. Mar. Sci., 4:89, doi:[10.3389/fmars.2017.00089](https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00089).
- Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Nencioli, F., Kersalé, M., Hu, Z., d'Ovidio, F. (2017). *A review of the LATEX project: mesoscale to submesoscale processes in a coastal environment*. Ocean Dynam., 67:513, doi:[10.1007/s10236-017-1040-9](https://doi.org/10.1007/s10236-017-1040-9). see preprint
- Rousselet, L., **Doglioli, A.M.**, Maes, C., Blanke, B., Petrenko, A.A. (2016). *Impacts of mesoscale activity on the water masses and circulation in the Coral Sea*. J. Geophys. Res. Oceans, 121, 7277-7289, doi:[10.1002/2016JC011861](https://doi.org/10.1002/2016JC011861). see preprint Popularization paper in French [HTML](#) [PDF](#)
- Nencioli, F., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.** (2016). *Diagnosing cross-shelf transport along an ocean front: an observational case study in the Gulf of Lion*. J. Geophys. Res. Oceans, 121, 7218-7243.

- doi:[10.1002/2016JC011908](https://doi.org/10.1002/2016JC011908). [see preprint](#)
- Kersalé, K., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Nencioli, F., Bouffard, J., Blain, S., Diaz, F., Labasque, T., Quéguiner, B., Dekeyser, I. (2016). *Lateral diffusivity coefficients from the dynamics of a SF6 patch in a coastal environment*. J. Mar. Syst., Vol.153, pp.42-54, doi:[10.1016/j.jmarsys.2015.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.09.003). [see preprint](#)
- Qiu, Z., **Doglioli, A.M.**, Carlotti, F. (2014). *Using a Lagrangian model to estimate source regions of particles in sediment traps*. Sci. China Earth Sci., Vol.57, pp.2447-2456, doi:[10.1007/s11430-014-4880-x](https://doi.org/10.1007/s11430-014-4880-x).
- Berline, L., Rammou, A.-M., **Doglioli, A.M.**, Molcard, A., Petrenko, A.A. (2014). *A connectivity-based ecoregionalization of the Mediterranean Sea*. PLoS ONE, Vol.9, 11, e111978, doi:[10.1371/journal.pone.0111978](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111978). [see preprint](#) Popularization paper in French [HTML](#) [PDF](#)
- Berta, M., Ursella, L., Nencioli, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Cosoli, S. (2014). *Surface transport in the Northeastern Adriatic Sea from FSLE analysis of HF radar measurements*. Cont. Shelf Res., Vol.77, pp.14-23, doi:[10.1016/j.csr.2014.01.016](https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.016) [see preprint](#)
- Bouffard, J., Nencioli, F., Escudier, R., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Pascual, A., Poulain, P.-M. (2014). *Lagrangian analysis of satellite-derived currents: Application to the North Western Mediterranean coastal dynamics*. Adv. Space Res., Vol.53, 5, pp.788-801, doi:[10.1016/j.asr.2013.12.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.020). [see preprint](#)
- Nencioli, F., d'Ovidio, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2013). *In-situ estimate of submesoscale horizontal eddy diffusivity across an ocean front*. J. Geophys. Res., Vol.118, 12, pp. 7066-7080, doi:[10.1002/2013JC009252](https://doi.org/10.1002/2013JC009252). [see preprint](#) [see JGR Editor's Highlight](#) [see JGR Homepage Slide Show](#) [see EOS related article](#)
- Doglioli, A.M.**, Nencioli, F., Petrenko, A.A., Fuda, J.-L., Rougier, G., Grima, N. (2013). *A software package and hardware tools for in situ experiments in a Lagrangian reference frame*. J. Atmos. Ocean. Tech., Vol.30, pp.1940-1950, doi:[10.1175/JTECH-D-12-00183.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00183.1). [see preprint](#)
- Kersalé, M., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Dekeyser, I., Nencioli, F. (2013). *Physical characteristics and dynamics of the coastal Latex09 Eddy derived from in situ data and numerical modeling*. J. Geophys. Res., Vol.118, pp.1-11, doi:[10.1029/2012JC008229](https://doi.org/10.1029/2012JC008229). [see preprint](#)
- Campbell, R., Diaz F., Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Dekeyser, I. (2013). *Nutrients and plankton spatial distributions induced by a coastal eddy in the Gulf of Lion. Insights from a numerical model*. Progr. Oceanogr., Vol.109, pp.47-69, doi:[10.1016/j.pocean.2012.09.005](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.09.005). [see preprint](#)
- Nencioli, F., d'Ovidio, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2011). *Surface coastal circulation patterns by in-situ detection of Lagrangian Coherent Structures*. Geophys. Res. Lett., Vol.38, L17604, doi:[10.1029/2011GL048815](https://doi.org/10.1029/2011GL048815). [see preprint](#)
- Hu, Z.H., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Dekeyser, I. (2011). *Numerical study of eddy generation in the western part of the Gulf of Lion*. J. Geophys. Res., Vol.116, C12030, doi:[10.1029/2011JC007074](https://doi.org/10.1029/2011JC007074). [see preprint](#)
- Kersalé, M., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2011). *Sensitivity study of the generation of mesoscale eddies in a numerical model of Hawaii islands*. Ocean Sci., Vol.7, pp.277-291, doi:[10.5194/os-7-277-2011](https://doi.org/10.5194/os-7-277-2011). [see Open Access paper](#) or [see preprint](#)
- Hu, Z.H., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Dekeyser, I. (2011). *Study of a mesoscale anticyclonic eddy in the western part of the Gulf of Lion*. J. Mar. Syst., Vol.88/1, pp.3-11, doi:[10.1016/j.jmarsys.2011.02.008](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.02.008). [see preprint](#)
- De Gaetano, P., Vassallo, P., Bartoli, M., Nizzoli, D., **Doglioli, A.M.**, Magaldi, M.G., Fabiano, M. (2011). *Impact of new measured Mediterranean mineralization rates on the fate of simulated aquaculture wastes*. Aquac. Res., Vol.42, pp.1359-1370, doi:[10.1111/j.1365-2109.2010.02724.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02724.x). [see preprint](#)
- Qiu, Z.F., **Doglioli, A.M.**, He, Y.J., Carlotti, F. (2011). *Lagrangian model of Zooplankton dispersion: numerical schemes comparisons and parameter sensitivity tests*. Chin. J. Oceanol. Limn., Vol. 29/2, pp.438-445, doi:[10.1007/s00343-011-0015-9](https://doi.org/10.1007/s00343-011-0015-9). [see preprint](#)
- Qiu, Z.F., **Doglioli, A.M.**, Hu, Z.Y., Marsaleix, P., Carlotti, F. (2010). *The influence of hydrodynamic processes on zooplankton transport and distributions in the North Western Mediterranean: estimates from a Lagrangian model*. Ecol. Model., Vol.221/23, pp.2816-2827, doi:[10.1016/j.ecolmodel.2010.07.025](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.07.025). [see preprint](#)
- Hu, Z.H., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Marsaleix, P., Dekeyser, I. (2009). *Numerical simulations of eddies in the Gulf of Lion*. Ocean Model., Vol.28/4, pp.203-208, doi:[10.1016/j.ocemod.2009.02.004](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.02.004). [see preprint](#)
- De Gaetano, P., **Doglioli, A.M.**, Magaldi, M.G., Vassallo, P., Fabiano, M. (2008). *FOAM, a new simple benthic degradative module for the LAMP3D model: an application to a Mediterranean fish farm*. Aquac. Res., Vol.39/11, pp.1229-1242, doi:[10.1111/j.1365-2109.2008.01990.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.01990.x). [see preprint](#)

- Doglioli, A.M.**, Blanke, B., Speich, S., Lapeyre, G. (2007). *Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: application to Cape Basin Eddies*. J. Geophys. Res., 112, C05043, doi:[10.1029/2006JC003952](https://doi.org/10.1029/2006JC003952). [see preprint](#)
- Doglioli, A.M.**, Veneziani, M., Blanke, B., Speich, S., Griffa, A. (2006). *A Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model*. Geophys. Res. Lett., 33, L14611, doi:[10.1029/2006GL026498](https://doi.org/10.1029/2006GL026498). [see preprint](#)
- Vassallo, P., **Doglioli, A.M.**, Rinaldi, F., Beiso, I. (2006). *Determination of physical behaviour of feed pellets in Mediterranean water*. Aquac. Res., Vol.37/2, pp.119-126, doi:[10.1111/j.1365-2109.2005.01403.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01403.x). [see preprint](#)
- Doglioli, A. M.**, Griffa, A., Magaldi, M.G. (2004). *Numerical study of a coastal current on a steep slope in presence of a cape: The case of the Promontorio di Portofino*. J. Geophys. Res., 109, C12033, doi:[10.1029/2004JC002422](https://doi.org/10.1029/2004JC002422). [see preprint](#)
- Doglioli, A. M.**, Magaldi, M. G., Vezzulli, L., Tucci, S. (2004). *Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean)*. Aquaculture. Vol.231/1-4, pp.215-235, doi:[10.1016/j.aquaculture.2003.09.030](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.09.030). [see preprint](#)

CONFERENCE PROCEEDINGS AND OTHER PAPERS

- Marrec P., **Doglioli A.M.**, Grégori G., Della Penna A., Wagener T., Rougier G., Bhairy N., Dugenne M., Lahbib S., Thyssen M. (2017). *Unravel the submesoscale dynamics of the phytoplanktonic community in the NW Mediterranean Sea by in situ observations: the 2015 OSCAHR cruise* Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, [EGU2017-14839](https://doi.org/10.1029/2017EGU14839). European Geosciences Union.
- Boero, F., Fogliini, F., Frascchetti, S., Goriup, P., Macpherson, E., Planes, S., ... & CoCoNet Consortium. (2016). *CoCoNet: towards coast to coast networks of marine protected areas (from the shore to the high and deep sea), coupled with sea-based wind energy potential*. SCIRES-IT-SCientific REsearch and Information Technology, 6, 1-95, doi: [10.2423/i22394303v6Sp1](https://doi.org/10.2423/i22394303v6Sp1).
- Costa A., **Doglioli A.M.**, Dekeyser I., Jullion L., Malengros D., Petrenko A.A. (2015). *In situ measurements of K_z and ϵ compared to numerical models in the Gulf of Lion*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, [EGU2015-10819](https://doi.org/10.1029/2015EGU10819). European Geosciences Union.
- Fraunié P., Forget P., Barbin Y., Bellomo L., **Doglioli A.M.**, Lecuyer E., Malengros D., Marmain J., Molcard A., Petrenko A., Quentin C., Sentchev A. (2014). *Experimental investigation of the relationship between HF radar measurements of currents and the dynamical properties of the upper ocean*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, [EGU2014-13078](https://doi.org/10.1029/2014EGU13078). European Geosciences Union.
- Petrenko, A.A., Kersale, M., Nencioli, F., Gatti, J., **Doglioli, A. M.**, Dekeyser, I. (2013). *Coastal circulation in the Gulf of Lion, the influence of mesoscale processes on interregional exchanges*. [40th CIESM Congress proceedings](https://doi.org/10.1029/2013EGU10819). [see preprint](#)
- Pinazo C., **Doglioli, A. M.**, Faure, V., Fraysse, M., Pairaud, I., Petrenko, A., Thouvenin, B., Tronczynski, J., Verney, R., Yohia, C. (2013). *MASSILIA Project - Modelling of the Bay of Marseille: Impact of the Anthropogenic supply on the marine coastal ecosystem..* [40th CIESM Congress proceedings](https://doi.org/10.1029/2013EGU10819). [see preprint](#)
- Doglioli, A. M.**, Rousselet, L. (2013). *Users Guide for LATEXtools*, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00859246>.
- Pinazo C., Fraysse M., **Doglioli A.**, Faure V., Pairaud I., Petrenko A., Thouvenin B., Tronczynski J., Verney R., Yohia C. (2013). *MASSILIA: Modélisation de la baie de MARSeILLE : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin*. Technical report IFREMER. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00145/25592/>.
- Nencioli, F., d'Ovidio, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2013). *In-situ estimate of submesoscale horizontal eddy diffusion coefficients across a front*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, [EGU2013-8237-2EGU](https://doi.org/10.1029/2013EGU10819). European Geosciences Union.
- Kersalé, Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Nencioli, F., Bouffard, J. and Dekeyser I. (2012). *Role of mesoscale eddies on exchanges between coastal regions*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, [EGU2012-858](https://doi.org/10.1029/2012EGU10819). European Geosciences Union.
- Nencioli, F., d'Ovidio, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2011). *Real-time in-situ tracking of Lagrangian*

- coherent structures in a coastal region*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, [EGU2011-3778-3](#). European Geosciences Union.
- Campbell, R., Diaz F., Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Dekeyser, I. (2011). *Eddy induced coastal plankton community changes in a coupled numerical model of the Gulf of Lion*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, [EGU2011-8036-1](#). European Geosciences Union.
- Doglioli, A.M.**, Fuda, J.-L., Grima, N., Nencioli, F., Petrenko, A.A., Rougier, G. (2011). *LATEX_tools : a software package for navigation in a Lagrangian reference frame*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, [EGU2011-3759](#). European Geosciences Union.
- Petrenko, A.A., Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Dekeyser, I. (2011). *Generation of coastal mesoscale anticyclonic eddies in the Gulf of Lion (NW Mediterranean)*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, [EGU2011-3996](#). European Geosciences Union.
- Nencioli, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., d'Ovidio, F. (2011). *Influence of (sub)mesoscale anticyclones on the coastal biogeochemical processes in the western part of the Gulf of Lion (NW Mediterranean)*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, [EGU2011-6287-1](#). European Geosciences Union.
- Kersalé, M., Peliz, A., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2011). *A numerical study on the collision of a Meddy with a seamount*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, [EGU2011-3478](#). European Geosciences Union.
- Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Campbell, R., Diaz F. and Dekeyser, I. (2010). *Study of Mesoscale Eddies in the Gulf of Lion and their role in the coastal-offshore exchanges*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, [EGU2010-11392](#). European Geosciences Union.
- Griffa, A., Schroeder, K., Aliani, S., **Doglioli, A. M.**, Molcard A., Taillandier, V., Ozgokmen, T., Haza, A. (2011). *The roads of the sea - can we predict the motion of particles carried by ocean currents?* [Marine Research at CNR, 4-Oceanography](#), 1257-1268. Consiglio Nazionale delle Ricerche - Roma. [[PDF](#)]
- De Gaetano, P., Burlando, M., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2010) *Wind forcing effects on coastal circulation and eddy formation around a cape*. Ocean Sci. Discuss., 7, 207-249. [printer-friendly PDF](#)
- De Gaetano, P., **Doglioli, A.M.**, Magaldi, M.G., Sacchetti, D. and Corazza, M. (2009). *High resolution wind forcing effects on coastal circulation and eddy formation around a cape*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, [EGU2009-778-3](#). European Geosciences Union.
- Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Marsaleix, P. and Dekeyser, I. (2009). *Coastal (Sub)Mesoscale Eddies in the Gulf of Lion*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, [EGU2009-933](#). European Geosciences Union.
- De Gaetano, P., Vassallo, P., **Doglioli, A.M.** and Magaldi, M.G. (2009). *FOAM, the new benthic degradation model and its calibration in Mediterranean condition: an application to a fish farm*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, [EGU2009-538-2](#). European Geosciences Union.
- Doglioli, A.M.**, Blanke, B., Speich, S., Lapeyre, G. (2006). *Tracking Mesoscale Eddies within a Regional Model of the Cape Basin*. Eos Trans. AGU, 87(36), Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract [OS25E-06](#). Vassallo, P., **Doglioli, A.M.**, Fabiano, M. (2006). *Aquaculture Impact Modelling in Eastern Ligurian Coastal Waters (Mediterranean Sea)*. Eos Trans. AGU, 87(36), Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract [OS25J-12](#).
- Doglioli, A.M.**, Blanke, B., Speich, S. (2005). *Tracking eddy properties within a regional model of the Southern Africa basin*. In: [Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 03328, 2005](#). European Geosciences Union.
- Speich, S., Penven, P., Blanke, B., **Doglioli, A.M.**, Lutjeharms, J. (2005). *The Agulhas-Benguela transition: A key region for large-scale ocean circulation and climate*. In: [Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 07304, 2005](#). European Geosciences Union.
- Doglioli, A. M.** (2004). *Studio della circolazione e della dispersione nelle acque costiere del Promontorio di Portofino (Mar Ligure)*. PhD Thesis, Università degli Studi di Genova. [[PDF, Italian with extended abstract in English](#)]
- Doglioli, A. M.**, Magaldi, M. G., Griffa, A., Festa, R. (2003). *Numerical study of a coastal current on a steep slope in presence of a cape: the case of the Promontorio di Portofino*. In: [Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 04132](#). European Geophysical Society.
- Rinaldi, F., **Doglioli A.M.**, Magaldi, M.G. (2003) *Indagine numerica dei fenomeni dispersivi nei siti per impianti di maricoltura in Liguria*. [S.It.E. Lettera ai Soci 2003, 2:27](#). **Doglioli, A. M.**, Magaldi, M. G. (2003). *I movimenti del mare*. In: Oceanografia ed ecosistemi marini. AISA/Artesetima Edizioni, Parma.
- Doglioli, A. M.**, Magaldi, M. G. (2003). *I movimenti del mare*. In: Oceanografia ed ecosistemi marini. AISA/Artesetima Edizioni, Parma.

- Magaldi, M. G., **Doglioli, A. M.** (2003). *L'approccio modellistico per una maricoltura ecocompatibile*. In: Oceanografia ed ecosistemi marini. AISA/artesetima Edizioni, Parma.
- Doglioli, A. M.**, Magaldi, M. G., Vezzulli, L. (2002). *Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean)*. In: Aquaculture Europe 2002 - Seafarming Today and Tomorrow. EAS Special Publication No.32. pp.212-213.
- Doglioli, A. M.** (2000). *LAMP3D, un modello Lagrangiano per lo studio della dispersione di inquinanti in acque costiere*. Master's thesis, Università degli Studi di Genova. [[thesis ZIPPED PDF](#), [appendices ZIPPED DOC](#)]

LECTURE NOTES

- Doglioli, A.M.** (2015). *Notes de Cours et Travaux Dirigés de Modélisation de la Circulation Océanique*, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France, pp. 108. [[PDF](#)]
- Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2015). *Notes de Cours et Travaux Dirigés de Dynamique des Océans*, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France, pp. 116. [[PDF](#)]
- Doglioli, A.M.** (2014). *Notes de Cours et Travaux Dirigés de Circulation et Dispersion en Eaux Côtières*, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France, pp. 186. [[PDF](#)]
- Doglioli, A.M.** (2014). *Notes de Cours de Circulation Générale en Méditerranée*, Université de la Méditerranée, Marseille, France, pp. 62. [[PDF](#)]
- Doglioli, A.M.** (2015). *Notes de Cours d'Introduction à l'Océanographie Physique*, Université d'Aix-Marseille, Marseille, France, pp. 40. [[PDF](#)]
- Doglioli, A.M.** (2011). *Notes du Cours Océanographie Côtière*, Université de la Méditerranée, Marseille, France, pp. 78. [[PDF](#)]
- Doglioli, A.M.** (2011). *Notes de Cours de Modèles à Particules Lagrangiennes*, Université de la Méditerranée, Marseille, France, pp. 61. [[PDF \(draft version\)](#)]
- Doglioli, A.M.** (2011), *Notes de Cours de Mesoéchelle Océanique*, Université de la Méditerranée, Marseille, France, pp. 66. [[PDF \(draft version\)](#)]

ORAL PRESENTATIONS (selected)

- Jun '18 Meloni M., **Doglioli A.**, Petrenko A., Bouffard J., Valladeau G. *Multi-Scale Analysis and Applications of Coastal Altimetry Observations Over the Ligurian Sea*. 11th Coastal Altimetry Workshop, Frascati, Italy. [Abstract](#)
- Feb '18 Rousselet L., De Verneil A., **Doglioli A.M.**, Petrenko A.A., Duhamel S., Maes C., Caffin. M., Blanke B., *Overview from the large to submesoscale surface circulations and their implications on biogeochemical-biological distribution during the OUTPACE cruise (SouthWest Pacific)*. 2018 Ocean Sciences meeting, Portland, Oregon (USA). [Abstract](#)
- May '17 Costa A., **Doglioli A.M.**, Marsalaix P., Petrenko A.A., *Comparison of in situ microstructure measurements to different turbulence closure schemes in a 3-D numerical ocean circulation model*. 49th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium. [Abstract](#)
- Apr '17 Marrec P., **Doglioli A.M.**, Grégori G., Della Penna A., Wagener T., Rougier G., Bhairy N., Dugenne M., Lahbib S., Thyssen M., *Unravel the submesoscale dynamics of the phytoplanktonic community in the NW Mediterranean Sea by in situ observations: the 2015 OSCAHR cruise*. EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria. [Abstract](#)
- Feb '17 Bouruet-Aubertot P., Cuypers Y., Le Goff H., Picheral M., Rougier G., Yohia C., Petrenko A., De Verneil A., **Doglioli A.**, Caffin M., Moutin M., *Longitudinal contrast in small scale turbulence along 20S: origin and impact on biogeochemical fluxes*. ASLO 2017 Aquatic Sciences Meeting, Honolulu,

- Hawai'i (USA). [Abstract](#)
- Feb '17 de Verneil A., Rousselet L., **Doglioli A. M.**, Petrenko A., Rougier G., *What goes where? Identifying and validating sampling sites to enhance Lagrangian sampling during biogeochemical cruises.* ASLO 2017 Aquatic Sciences Meeting, Honolulu, Hawai'i (USA). [Abstract](#)
- Feb '17 Ross O.N., **Doglioli A.M.**, Klun K., Talaber I., Rousselet L., Berline L., Guillemain D., Yohia C., Petrenko A.A., Pinazo C., *Meso- & submeso-scale physico-biogeochemical dynamics in a coastal NW Mediterranean Sea: quantifying & understanding ecosystem structure & transport (SEAQUEST).* ASLO 2017 Aquatic Sciences Meeting, Honolulu, Hawai'i (USA). [Abstract](#)
- Feb '17 Caffin M., Moutin T., Bouruet-Aubertot P., **Doglioli A.**, Grosso O., Helias-Nunige S., Leblond N., Gimenez A., de Verneil A., Bonnet S., *N₂ fixation and N-budget in the photic layer of three stations representatives of the SW Pacific Ocean (OUTPACE cruise, 2015).* ASLO 2017 Aquatic Sciences Meeting, Honolulu, Hawai'i (USA). [Abstract](#)
- Feb '17 Rousselet L., de Verneil A., **Doglioli A. M.**, Petrenko A. A., Maes C., Blanke B., *Characterization of the mesoscale circulation during the OUTPACE Cruise (SouthWest Pacific).* ASLO 2017 Aquatic Sciences Meeting, Honolulu, Hawai'i (USA). [Abstract](#)
- Feb '17 Bouffard J., Meloni M., Fernandes J., Lázaro C., Casadio S., **Doglioli A.M.**, Petrenko A., Femenias P., *Coastal Altimetry in Support to Marine Observatory and Marine Observatory in Support to Coastal Altimetry: Multi-Platform Validations of Altimetry for Monitoring the Variability of Coastal Fronts.* 10th Coastal Altimetry Workshop, Florence, Italy. [Abstract Book](#)
- Jul '16 Maes C., Rousselet L., Guimbard S., Drushka K., **Doglioli A.**, Kolodziejczyk N., Reul N., Charria G., Reagan J., Blanke B., Martinez E., Petrenko A., Boutin J., Ansorge I., *Small Scales of variability of the Sea Surface Salinity: a regional and global survey.* Third International Workshop on Nonlinear Processes in Oceanic and Atmospheric Flows, Madrid, Spain. [Abstract Slides](#)
- May '16 **Doglioli, A.M.**, Grégori G., Thyssen M., Wagener T., Marrec P., Rougier G., Bhairy N., Fenouil J., de Verneil A., Rousselet L., Cyr F., Petrenko A.A., André J.-M., d'Ovidio F., Pietri A., Nencioli F., Jullion L., Pinazo C., Yohia C., Marsalaix P., *Mapping the planktonic community across submesoscale physical features: the 2015 OSCAHR cruise in the NW Mediterranean.* 48th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium. [Abstract Slides](#)
- Oct '15 Rousselet, L., **Doglioli, A.M.**, Maes, C., *Observed surface thermohaline variability at mesoscale to submesoscale in the Coral Sea, southwest Pacific Ocean.* Open Science Conference on Salinity and Freshwater Changes in the Ocean, Hambourg, Germany. [Abstract Slides](#)
- Apr '15 Costa A., **Doglioli, A.M.**, Dekeyser, I., Jullion, L., Malengros, D., Petrenko, A.A., *In situ measurements of K_z and ϵ compared to numerical models in the Gulf of Lion.* EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria. [Abstract Slides](#)
- Feb '15 Costa A., **Doglioli, A.M.**, Guizien K., Petrenko A.A., *Estimation of connectivity in marine biological networks: graph theory versus metapopulation models. An application to the Gulf of Lion.* ASLO Aquatic Science Meeting, Grenada, Spain. [Abstract Slides](#)
- Aug '14 Bouffard J., Marmain J., Bosse Anthony, Petrenko A., Forget P., Doglioli A., Testor P., Mortier L., *Variability of slope current positioning from space: Application to the Northern Current in the North Western Mediterranean Sea.* 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia.
- Apr '13 Nencioli, F., d'Ovidio, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., *In-situ estimate of submesoscale horizontal eddy diffusion coefficients across a front.* EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria. [Abstract Slides](#)
- Sep '12 Bouffard, J., Petrenko, A., **Doglioli, A.**, Escudier, R., Pascual, A., Nencioli, F. *3D coastal Mesoscale from lagrangian Analysis of Altimetry and multi-sensor Observations.* "20 years of progress in radar altimetry" Symposium, Venice, Italy. [Slides](#)
- Apr '12 Kersalé, M., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Nencioli, F., Bouffard, J. and Dekeyser I., *Role of mesoscale eddies on exchanges between coastal regions.* EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria. [Abstract Slides](#)
- Apr '12 Kersalé, M., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Nencioli, F., Bouffard, J., Dekeyser, I. *Physical characteristics and dynamics of the coastal LATEX09 eddy Gulf of Lion (NW Mediterranean Sea).* WORKSHOP TURBINTERMED: Turbulence and Internal Waves in Mediterranean Sea, Toulon,

- France. [see Talk](#)
- Apr '12 **Rainaud, R.**, Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Malengros, D., Nencioli, F. *Turbulence measurements with SCAMP in the Gulf of Lion* WORKSHOP TURBINTERMED: Turbulence and Internal Waves in Mediterranean Sea, Toulon, France. [see Talk](#)
- Oct '11 **Bouffard, J.B.**, **Doglioli, A.M.**, Escudier, R.E. Petrenko, A.A., Pascual, A.P., Qiu, Z.F., Carlotti, F., *On the Influence of Coastal Mesoscale Dynamics on the Jellyfish Trajectories and Distributions.*, 5th Coastal Altimetry Workshop, San Diego, USA. [Abstract Slides](#)
- Apr '11 **Nencioli, F.**, d'Ovidio, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., *Real-time in-situ tracking of Lagrangian coherent structures in a coastal region.*, EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria. [Abstract](#), [slides PDF](#)
- Apr '11 **Campbell, R.**, Diaz F., Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Dekeyser, I., *Eddy induced coastal plankton community changes in a coupled numerical model of the Gulf of Lion.* EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria. [Abstract](#), [slides PDF](#)
- May '10 **Hu, Z.Y.**, **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Campbell, R., Diaz F. and Dekeyser, I., *Study of Mesoscale Eddies in the Gulf of Lion and their role in the coastal-offshore exchanges.*, EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria. [abstract PDF](#)
- Sep '09 Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, Hu, Z.Y., Diaz, F., Campbell, R., Dekeyser, I. and LATEX group, *LATEX (LAgrangian Transport EXperiment): strategy and preliminary results.*, LAPCOD 2009 meeting, La Londe Les Maures, France.
- Apr '09 De Gaetano, P., Vassallo, P., **Doglioli, A.M.** and Magaldi, M.G., *FOAM, the new benthic degradation model and its calibration in Mediterranean condition: an application to a fish farm*, EGU General Assembly 2009, Vienna, Austria.
- May '06 Vassallo, P., **Doglioli, A.M.**, Fabiano, M., *Aquaculture Impact Modelling in Eastern Ligurian Coastal Waters.* World Aquaculture Conference AQUA 2006. Firenze, Italy.
- Feb '06 **Doglioli, A.M.**, Speich, S., Blanke, B., Lapeyre, G., *Tracking Mesoscale Eddies within a Regional Model of the Cape Basin.* Ocean Sciences 2006 meeting. Honolulu, Hawaii.
- Apr '05 Speich, S., Penven, P., Blanke, B., **Doglioli, A.M.**, Lutjeharms, J., *The Agulhas-Benguela transition: A key region for large-scale ocean circulation and climate.* EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria.
- Jun '05 **Doglioli, A. M.**, Speich, S., Blanke, B., Lapeyre, G., *Tracking mesoscale exchange within a regional model of the Southern Africa Basin.* LAPCOD 2005 meeting. Lerici, Italy. [abstract](#)
- Jul '04 **Doglioli, A.M.**, Rinaldi, F., Vassallo, P., Vezzulli, L., Festa, R., *Aquacultural wastes dispersion modelling in eastern ligurian coastal waters.* International Conference on the Marine and Coastal Environment in the Euro-Mediterranean Area. Genova, Italy.
- Apr '03 **Doglioli, A. M.**, Magaldi, M.G., Griffo, A., Festa, R., *Numerical study of a coastal current on a steep slope in presence of a cape: the case of the Promontorio di Portofino.* EGS-AGU-EUG 2003 Joint Assembly. Nice, France.
- Oct '02 **Doglioli, A.M.**, Magaldi, M.G., Vezzulli, L., *Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean).* Aquaculture Europe 2002 - Seafarming Today and Tomorrow. Trieste, Italy.

POSTER PRESENTATIONS (selected)

- May '17 **Doglioli A.M.**, Petrenko A.A., Nencioli F., d'Ovidio F., Rousselet L., Della Penna A., Ody A., André J.-M., Berline L., Yohia C., Libes M., *Software Package for an Adaptive Satellite-based Sampling for Ocean campaigns: SPASSO.* Third International Ocean Colour Science Meeting, Lisbon, Portugal.
- May '17 Ody A., André J.-M., Berline L., Chevalier C., **Doglioli A.M.**, Petrenko A.A., Gower J.F.R., King S.A., *High quality Sargassum mapping in the W-Atlantic with OLCI (Sentinel-3): Implications for Sargassum raft detection, monitoring and dynamics understanding.* Third International Ocean Colour Science Meeting Lisbon, Portugal.

- Nov '17 Meloni M., Bouffard J., **Doglioli A.M.**, Petrenko A.A. *Multi-scale analysis of coastal altimetry data, multi-sensor observations and numerical modelling over the North Western Mediterranean Sea*. 10th Coastal Altimetry Workshop, Florence, Italy. [Abstract Book Poster](#)
- Nov '16 Rousselet L., **Doglioli A.M.**, Petrenko A., Maes C., Blanke B., De Verneil A., Pujol M.I., Taburet G., Nencioli F., d'Ovidio F., *Comparison between high resolution altimetric products and in situ observations to guide oceanographic cruises* 48th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium. [Abstract Poster](#)
- May '16 de Verneil, A., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., Bouruet-Aubertot, P., Rougier, G., Bonnet, S., Moutin, T., *Mesoscale to Submesoscale variability during the OUTPACE cruise: Contrasting Biological and Physical regimes in the oligotrophic SW Pacific*. 48th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium. [Abstract Poster](#)
- May '16 Cyr, F., Goutx M., Tedetti M., Beguery L., Besson F., Mery M., Bairhy N., Petrenko A.A., **Doglioli, A.M.** *Submesoscale dynamics of dissolved organic matter across the Northern Mediterranean Current revealed from a new glider-mounted optical sensor*. 48th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium. [Abstract Poster](#)
- May '16 Nencioli, F., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, d'Ovidio, F. *Multi-platform synergy for the direct investigation of ocean fronts: a case study in the North-western Mediterranean*. 48th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium. [Abstract Poster](#)
- May '16 Pietri, A., Capet, X., d'Ovidio, F., Le Sommer, J., Molines, J.M., **Doglioli, A.M.**, Giordani, H., *Meso and Submeso-scale Vertical Velocity Estimations in Different Dynamical Regimes in Preparation for the High Resolution Observations of the SWOT Altimetry Mission*. 48th International Liège Colloquium on Ocean Dynamics, Liège, Belgium. [Abstract Poster](#)
- Feb '16 Rousselet, L., **Doglioli, A.M.**, Maes, C., Blanke, B., Petrenko A.A., *Impacts of meso-to submeso-scale features on the ocean circulation in the Coral Sea*. 2016 Ocean Sciences Meeting, AGU/ASLO/TOS, New Orleans, USA. [Abstract Poster](#)
- Feb '16 Raapoto, H., Martinez, E., Doglioli, A.M., Petrenko, A.A., *Modeling the Wake of the Marquesas Archipelago : a First Step to Assess this Island Mass Effect*. 2016 Ocean Sciences Meeting, AGU/ASLO/TOS, New Orleans, USA. [Abstract Poster](#)
- Feb '16 Jullion, L., Groeskamp, S., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, *Mediterranean water-mass variability in T-S coordinates*. 2016 Ocean Sciences Meeting, AGU/ASLO/TOS, New Orleans, USA. [Abstract Poster](#)
- Feb '16 Pietri, A., Capet, X., d'Ovidio, F., Le Sommer, J., Molines, J.-M., **Doglioli, A.M.**, *Estimations of vertical velocities using the omega equation in different flow regimes in preparation for the high resolution observations of the SWOT altimetry mission*. 2016 Ocean Sciences Meeting, AGU/ASLO/TOS, New Orleans, USA. [Abstract](#)
- Apr '14 Fraunié P., Forget P., Barbin Y., Bellomo L., **Doglioli A.M.**, Lecuyer E., Malengros D., Marmain J., Molcard A., Petrenko A., Quentin C., Sentchev A (2014). *Experimental investigation of the relationship between HF radar measurements of currents and the dynamical properties of the upper ocean*. EGU General Assembly 2014. Vienna, Austria. [Abstract Poster](#)
- Feb '14 Kersalé, M., Petrenko, A. A., **Doglioli, A. M.**, Nencioli, F., Dekeyser, I., *Dynamics of meso- and submesoscale processes from in situ data and numerical modeling in a coastal environment*. 2014 Ocean Sciences meeting. Honolulu, Hawaii. [poster](#)
- Feb '14 Nencioli, F., d'Ovidio, F., Petrenko, A., **Doglioli, A.M.**, Bouffard, J., *Linking sea surface height to (sub)mesoscale ocean dynamics: the SeaGoLSWOT campaigns in the NW Mediterranean (Fall 2014 - Spring 2015)*. 2014 Ocean Sciences meeting. Honolulu, Hawaii. [poster](#)
- Oct '13 Petrenko, A.A., Kersale, M., Nencioli, F., Gatti, J., **Doglioli, A. M.**, Dekeyser, I. (2013). *Coastal circulation in the Gulf of Lion, the influence of mesoscale processes on interregional exchanges*. 40th CIESM Congress. Marseille, France. [Poster](#)
- Oct '13 Pinazo C., **Doglioli, A. M.**, Faure, V., Fraysse, M., Pairaud, I., Petrenko, A., Thouvenin, B., Tronczynski, J., Verney, R. Yohia, C. (2013). *MASSILIA Project - Modelling of the Bay of Marseille: Impact of the Anthropogenic supply on the marine coastal ecosystem*. 40th CIESM Congress. Marseille, France. [Poster](#)

- Oct '13 Nencioli, F., d'Ovidio, F., **Doglioli, A.**, Petrenko, A., Bouffard, J., *SeaGoLSWOT: an oceanographic campaign in support of the AirSWOT mission in the Northwestern Mediterran.* Ocean Surface Topography Science Team (OSTST) Meeting and 7th Coastal Altimetry Workshop (CAW-7), Boulder (CO), USA. [Abstract](#)
- Sep '12 d'Ovidio, F., Zhou, M., Park, Y.H., Nencioli, F., Resplandy, L., **Doglioli, A.**, Petrenko, A., Queguiner, B., Blain, S., *Guiding biogeochemical campaigns with high resolution altimetry: waiting for the SWOT mission.* "20 years of progress in radar altimetry" Symposium, Venice, Italy. [Abstract](#) [Poster](#)
- Feb '12 Nencioli, F., A. Petrenko, **A. Doglioli**, F. d'Ovidio, P. Testor, M. Kersalé and J. Bouffard (2012), *A multi-platform approach to investigate submesoscale structures in a coastal region and their impacts in regulating cross-shelf exchanges.* Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City (UT), USA
- Feb '12 Quéguiner, B., F. Carlotti, S. Blain, I. Obernoster, J.-I. Devenon, M. Zhou, **A. Doglioli**, A. Petrenko, K. Leblanc, U. Christaki, F. Diaz, I. Pairaud, M. Pagano, D. Botha, C. Pinazio, I. Salter, R. Vuillemin, D. Banaru, M. Hrmelin-Vivien, G. Gregori, F. Van Wambeke *SPEciMed: A multi-year survey program of mediterranean pelagic coastal ecosystems in a context of global change.* Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City (UT), USA. [Abstract](#)
- Feb '12 Carlotti, F., Qiu, Z.F., **Doglioli, A.M.**, Marsaleix, P., *The influence of hydrodynamic processes on zooplankton transport and distributions in the North Western Mediterranean estimated from a Lagrangian model.* Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City (UT), USA. [Abstract](#)
- Oct '11 Bouffard, J.B., **Doglioli, A.M.**, Escudier, R.E. Petrenko, A.A., Pascual, A.P., Nencioli, F., Qiu, Z.F., Carlotti, F. (2011), *Lagrangian analysis of 3D mesoscale dynamics from altimetry and modelling. Application to jellyfish tracking in the north western Mediterranean.*, 5th Coastal Altimetry Workshop, San Diego, USA. [Poster](#)
- Apr '11 **Doglioli, A.M.**, Fuda, J.-L., Grima, N., Nencioli, F., Petrenko, A.A., Rougier, G. (2011), *LATEX_tools : a software package for navigation in a Lagrangian reference frame.* EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria. [abstract](#) [PDF](#) [poster](#) [PDF with ADDENDA](#) [short talk](#) [PDF](#)
- Apr '11 Petrenko, A.A., Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Dekeyser, I. (2011), *Generation of coastal mesoscale anticyclonic eddies in the Gulf of Lion (NW Mediterranean).* EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria. [abstract](#) [PDF](#) [poster](#) [PDF](#)
- Apr '11 Nencioli, F., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A., d'Ovidio, F. (2011), *Influence of (sub)mesoscale anticyclones on the coastal biogeochemical processes in the western part of the Gulf of Lion (NW Mediterranean).* EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria. [abstract](#) [PDF](#) [poster](#) [PDF](#)
- Apr '11 Kersalé, M., Peliz, A., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A.A. (2011), *A numerical study on the collision of a Meddy with a seamount.* EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria. [abstract](#) [PDF](#) [poster](#) [PDF](#)
- Sep '09 Berger, H., Petrenko, A.A., **Doglioli, A.M.**, *Numerical Lagrangian study of typical pathways for water masses in the North Western Mediterranean.* LAPCOD 2009 meeting, La Londe Les Maures, France. [abstract](#) [HTML](#), [poster](#) [PDF](#)
- Jul '09 Qiu, Z.F., **Doglioli, A.M.**, Carlotti, F. *Zooplankton Transport and Distributions in the Gulf of Lion: Estimates from a Lagrangian Model and Optical Remote Sensing Data.* IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Cape Town, Africa. [poster](#) [PDF](#), [extended abstract](#) [PDF](#)
- Apr '09 De Gaetano, P., **Doglioli, A.M.**, Magaldi, M.G., Sacchetti, D. and Corazza, M. *High resolution wind forcing effects on coastal circulation and eddy formation around a cape.* EGU meeting, Vienna, Austria. [poster](#) [PDF](#) [abstract](#) [PDF](#)
- Apr '09 Hu, Z.Y., **Doglioli, A.M.**, Petrenko, A., Marsaleix, P., Dekeyser, I. *Coastal (Sub)Mesoscale Eddies in the Gulf of Lion.* EGU meeting, Vienna, Austria. [poster](#) [PDF](#) [abstract](#) [PDF](#)
- Jan '09 Campbell, R., Diaz, F., Ulses, C., Hu, Z.Y., Estournel, C., Petrenko, A., **Doglioli, A.M.**, Dekeyser, I. *Impact of a mesoscale eddy on the structure of the trophic foodweb in the Gulf of Lions (NW Mediterranean)* ASLO Aquatic Sciences Meeting, Nice, France. [abstract](#) [poster](#) [PDF](#)
- Jun '08 **Doglioli, A.M.**, Hu, Petrenko, A., Marsaleix, P., *Modeling the (sub)-mesoscale eddies of the Gulf of Lion.* 2nd HyMeX workshop, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France. [abstract](#) [poster](#) [PDF](#)
- Jun '08 Qiu, Z. F., **Doglioli, A.M.**, Hu, Z. Y., Marsaleix, P., Carlotti F., *The influence of hydrodynamic processes on zooplankton distributions and displacements in the North Western Mediterranean Sea:*

- estimates from a Lagrangian model*. Advances in Marine Ecosystem Modelling Research Symposium, Plymouth, UK. [poster PDF](#)
- Jan '07 Petrenko, A., Diaz, F., **Doglioli, A.M.**, Blain, S., *LATEX (Lagrangian Transport EXperiment) dans le golfe du Lion*. 1st Mediterranean-HyMeX workshop, Toulouse, France [abstract & poster](#)
- Feb '06 Vassallo, P., **Doglioli, A.M.**, Fabiano, M., *Aquaculture Impact Modelling in Eastern Ligurian Coastal Waters (Mediterranean Sea)*. Ocean Sciences 2006 meeting. Honolulu, Hawaii. [abstract](#) [poster](#)
- Jun '05 Fioravanti, S., Grandi, V., de Strobel, F., Gualdesi, L., Carta, A., **Doglioli, A.M.**, Cattaneo-Vietti, R., Castellano, R., Ruggieri, N., Povero, P., *SEPTR, a new system for marine coastal monitoring in real time configuration: application in a marine protected area (Portofino, Italy)*. 2005 International Ocean Research Conference, Paris, France. [abstract](#)
- Apr '05 Doglioli, A.M., Blanke, B., Speich, S., *Tracking eddy properties within a regional model of the Southern Africa basin*. EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria. [poster PDF \(3.4Mb\)](#) [abstract](#)
- Oct '04 Ruggieri, N., de Strobel, F., Grandi, V., Gualdesi, G., Carta, A., Fioravanti, S., Cattaneo-Vietti, R., Castellano, M., **Doglioli, A.M.**, Povero, P., *New system for marine coastal monitoring in real time configuration (SEPTR): application in a marine protected area (Portofino, Italy)*. Le scienze naturali, economiche e giuridiche nello studio e per la gestione degli ambienti acquatici. Incontro scientifico congiunto CoNISMa-AIOL d'intesa con la S.I.B.M. e la S.It.E., Città del mare - Terrasini (PA), Italy. [poster PDF \(1.7Mb\)](#)
- Dec '02 Magaldi, M.G., **Doglioli, A.M.**, *A Lagrangian model for the dispersion of nutrients in coastal waters*. LAPCOD 2002 meeting. Key Largo, Florida. [poster HTML \(2.0Mb\)](#) [abstract](#)

POPULARIZATION

- May-Jun'18 Popular science articles about the Proteus-BIOSWOT cruise: (*in English*) [PRECYM webpages](#), (*in French*) [Odatis webpages](#), [MIO webpages #1](#), [MIO webpages #2](#), [The French Navy website](#), [SHOM twitter account](#).
- Mar '18 Meeting with the students in nautical sciences at the High School "Don Michele Arena" (Sciacca, Italy) about the Lagrangian buoys and the Peacetime project. See slides (*in Italian*) [[PDF](#)], news videos of local TVs (*in Italian*) [[RMK](#), [TRS](#)], articles (*in Italian*) in the regional daily newspaper "Giornale di Sicilia" [[PDF](#)] and in several online newspapers [[HTML PDF](#), [HTML PDF](#), [HTML PDF](#), [HTML PDF](#)] and pictures [[PDF](#)].
- Feb '18 Popular science article in French about the OSCAHR cruise results on physical-biological coupling: INSU-CNRS website [[HTML](#) or [PDF](#)], MIO newsletter [[HTML](#) or [PDF](#)].
- Dec '17 Articles about one of the [PEACETIME](#) drifters landed on the Sicily coast:
 - *in Italian*
 regional daily newspaper "La Sicilia" [11/12 [PDF](#), 18/12 [PDF](#), 22/12 [PDF](#)], online newspaper of the town of Trapani [16/12 [HTML](#) or [PDF](#), 18/12 [HTML](#) or [PDF](#)], online newspaper of the town of Palermo [16/12 [HTML](#) or [PDF](#), 18/12 [HTML](#) or [PDF](#)], online newspaper of the town of Agrigento [16/12 [HTML](#), [PDF](#)], online newspaper of the town of Ribera [11/12 [HTML](#) or [PDF](#), 18/12 [HTML](#) or [PDF](#), 23/12 [HTML](#) or [PDF](#)], online newspaper of the town of Sciacca [18/12 [HTML](#) or [PDF](#)], WWF newsletter [16/12 [PDF](#)];
 - *in French*
 MIO newsletter [[HTML](#) or [PDF](#)];
 - *in English*
 MERMEx newsletter [[HTML](#) or [PDF](#)], Tweet by Peacetime [[HTML](#) or [PDF](#)].
- Mar '17 Member of the stand of the MIO at "La journée de la planète" in Marseille. [[PDF](#)].
- Dec '16 Meeting with high-school students at MIO (Marseille) about the history of the atmosphere and ocean numerical modelling.
- Dec '16 Popular science article in French about Coral Sea eddies [INSU-CNRS website [HTML](#)]
- Jan-Feb '15 Popular science articles in French about Mediterranean Eco-regionalization [INSU-CNRS website [HTML PDF](#); Futura Sciences Magazine [HTML PDF](#)]

- Apr '14 Educational material in French about Marine Fronts: [Lettre AMU, n.20, pp.30-31](#) and [page web MIO](#)
- Jan '09 Meeting with the high-school students from Liceo Plana (Alessandria, Italy), *Short history of ocean modelling and some examples of recent applications* [[PDF](#) in Italian].
- Mar '08 Interview with the students from Université de Provence (Marseille, France), *What is the job of an oceanographer?* [[HTML](#) in French] .
- Dec '06 Interview with the high-school students from Lycée Périer (Marseille, France), *Can the Gulf Stream stop?* [[video MPEG](#) in French (500Mb)].
- Oct '04 « *Which is the fate of aquacultural waste?* », interview (in italian) appeared on the magazine specialized in aquaculture *Il pesce, numero 5, anno 2004*, [[HTML](#) and [PDF](#) in italian]