



HAL
open science

APPORT DE L'ALTIMETRIE SPATIALE A L'OCEANOGRAPHIE HAUTURIERE ET COTIERE

Florence Birol

► **To cite this version:**

Florence Birol. APPORT DE L'ALTIMETRIE SPATIALE A L'OCEANOGRAPHIE HAUTURIERE ET COTIERE. Planète et Univers [physics]. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2014. <tel-04766021>

HAL Id: tel-04766021

<https://hal.science/tel-04766021v1>

Submitted on 4 Nov 2024

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.



HAL Authorization

APPORT DE L'ALTIMETRIE SPATIALE A L'OCEANOGRAPHIE HAUTURIERE ET COTIERE

Mémoire présenté pour obtenir
l'Habilitation à Diriger des Recherches

Université Paul Sabatier - Toulouse III

Florence Birol

Physicien Adjoint – LEGOS/OMP
14 avenue E. Belin
31400 Toulouse

Soutenance le XX MOIS 2014 à l'Observatoire Midi Pyrénées de Toulouse, devant le jury
composé de :

Sabine Arnault, Directeur de Recherche IRD, LOCEAN/IPSL – Rapporteur
Jean Tournadre, Cadre de Recherche Ifremer – Rapporteur
Pascal Bonnefond, Physicien adjoint Géoazur/OCA – Rapporteur
Thierry Delcroix, Directeur de Recherche IRD, LEGOS – Examineur

En préambule

Avant d'aborder ce document, je souhaite remercier Rosemary Morrow pour m'avoir permis de réaliser ma thèse au LEGOS, laboratoire que j'ai à nouveau rejoint depuis en tant que physicien adjoint. Je remercie également Pierre Brasseur et Jacques Verron pour m'avoir permis de réintégrer un parcours postdoctoral « classique » après mon passage à CLS, ainsi que pour leur soutien pendant mes années à Grenoble et au delà. Merci à Jean-Michel Brankart pour son aide précieuse lors de mes premiers pas dans le monde de l'assimilation de données. Je souhaite aussi remercier Rosemary Morrow, Florent Lyard, Yves Ménard (qui n'est malheureusement plus là pour nous faire partager son enthousiasme et son expertise sur l'altimétrie spatiale) et Patrick Monfray, qui m'ont fait confiance et consacré beaucoup de temps en discussion lors de la préparation du concours de physicien adjoint CNAP, ce qui m'a permis d'intégrer cette institution. Merci à mon équipe du CTOH du travail qu'elle fait tous les jours pour soutenir à sa modeste (mais utile !) échelle les développements de l'altimétrie spatiale. Je remercie l'ensemble des personnels technique et administratif que j'ai rencontré au cours de toutes ces années, sans qui rien ne serait vraiment possible. Merci également à toutes les personnes croisées dans les différents laboratoires où j'ai travaillé et qui font que toutes ces années de recherche ont été une aventure humaine aussi bien qu'une aventure scientifique.

Je remercie Thierry Delcroix pour avoir accepté de parrainer la rédaction de cette HDR et à tous les membres du jury (et spécialement les rapporteurs) pour avoir accepté de me consacrer un peu de leur temps pour lire et évaluer ce travail.

Merci enfin à l'équipage, Jean-Michel, Juliette et Sacha, de m'accompagner quotidiennement, par beau temps comme par temps nuageux.

Contenu du document

Chapitre 1 - Parcours scientifique et Curriculum Vitae

- 1.1 - Introduction
- 1.2 - Curriculum Vitae
- 1.3 - Les collaborations

Chapitre 2 – Activités de recherche

- 2.1 – Introduction
 - 2.2 - L'altimétrie spatiale – un outil précieux pour analyser la dynamique de l'océan
 - 2.1.a - Variabilité océanique dans l'Océan Indien Sud Est (1996-1999) : une histoire d'ondes et de tourbillons.
 - 2.2.b - D'une observation 2D de l'océan avec l'altimétrie à une analyse 3D
 - 2.2.c Comment combiner de manière cohérente les informations fournies par les observations altimétriques et in-situ ? Le cas de l'assimilation multivariée.
 - 2.3 - De l'observation de la dynamique hauturière de l'océan vers celle de la dynamique régionale et côtière
 - 2.3.a Des problèmes... et des solutions
 - 2.3.b Etude de la circulation régionale en Méditerranée Nord Occidentale.
- Références bibliographiques

Chapitre 3 – Enseignement et service

Chapitre 4 - Bilan et perspectives de recherche

Chapitre 1 – Parcours scientifique et Curriculum Vitae

1.1 Introduction

Ce document synthétise mes activités de recherche depuis mon doctorat, soutenu au Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale (LEGOS : UMR5566 CNES/CNRS/IRD/UPS) en 1999, jusqu'à ce jour. Entre ces deux moments, j'ai construit mon parcours scientifique au travers de différents contrats post-doctoraux : à la Division Océanographie Spatiale de la société Collecte Localisation Satellites (CLS, Toulouse), au Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI, Grenoble) et dans le centre d'analyse et de prévisions Mercator Océan (Toulouse). En 2005 j'ai ré-intégré le LEGOS en tant que physicien adjoint. Différents séjours de quelques mois à Hobart (Australie) m'ont également permis de construire de solides collaborations avec des collègues australiens (et de me familiariser avec une autre culture de la pratique de la recherche).

Tout au long de ce parcours, j'ai été amenée à changer régulièrement de chantier d'étude (Océan Indien Tropical et Sub-Tropical, puis Océan Atlantique Tropical et Nord, Mer Méditerranée et Golfe de Gascogne enfin ces dernières années), de moyen d'étude (télédétection spatiale, modèles, observations in-situ) et d'approche méthodologique (analyse statistique, modèle simplifié, méthodes inverses, modélisation numérique, assimilation de données).

Cette démarche peut paraître au premier abord non linéaire mais je la qualifierai de contemporaine car elle reflète le caractère multi-méthodologique et/ou multi-régional du quotidien de plus en plus de chercheurs, tout simplement parce que de plus en plus de questions scientifiques nécessitent ce type d'approche. D'autre part, le fil directeur de l'ensemble de ces années de recherche, outre l'océanographie physique, est l'altimétrie spatiale. Mon travail de recherche a en effet toujours été associé à l'interprétation de la physique contenue dans les observations altimétriques, avec l'objectif de :

1) mieux comprendre le rôle des processus méso-échelles (ondes et tourbillons) dans les échanges tropiques-subtropiques (Océan Indien Sud-Est) ou côte-large (Océan Indien Sud-Est et Golfe de Gascogne),

2) mieux documenter et comprendre la circulation océanique (de grande échelle ou côtière, en Atlantique Nord et Tropical ou en Méditerranée Nord Occidentale), ainsi que sa variabilité.

Ces travaux sont passés quasi-systématiquement par une analyse combinée de l'altimétrie spatiale avec des données in-situ ou des modèles (simplifiés ou numériques, avec ou sans technique d'assimilation), ou encore avec d'autres types de mesures spatiales ou in-situ. Les faits marquants de ces différents travaux sont présentés dans le chapitre 2.

L'altimétrie spatiale a permis un progrès majeur dans l'observation des océans et dans la compréhension de leur dynamique. Lorsque j'ai commencé ma thèse en 1996, bien que les missions altimétriques aient été conçues initialement pour l'étude de la circulation océanique à l'échelle des bassins océaniques, elles avaient déjà largement prouvé leur utilité pour l'étude de la mésoéchelle océanique (notamment grâce à l'association des mesures de plusieurs missions), ainsi que pour d'autres objectifs (surveillance du niveau des eaux continentales sur les grands lacs, mers intérieures ou bassins fluviaux). L'idée courante à ce moment là était néanmoins que la qualité des mesures altimétriques était bien trop mauvaise au large de toute terre émergée (jusque ~50 km des côtes) pour qu'elles soient utiles pour l'étude du domaine océanique côtier. Ce n'est que vers les années 2000 que les premières tentatives de retraitement altimétrique adaptées aux

zones littorales ont démontré l'intérêt de ce type d'approche... et leur faisabilité. Depuis, une importante activité de recherche s'est développée autour de l'altimétrie côtière. Des missions altimétriques (basées sur de nouvelles technologies) mieux adaptées à l'observation et l'étude de l'océan côtier voient le jour (SARAL/AltiKa, Cryosat-2, Sentinel-3) ou sont à l'étude (SWOT).

C'est dans ce contexte que je suis passée progressivement de l'utilisation de produits altimétriques classiques pour des problématiques scientifiques de type océan hauturier à l'acquisition d'une expertise sur le retraitement et l'exploitation de mesures altimétriques pour l'étude de la dynamique océanique côtière. Après une phase (2005-2008) consistant à résoudre des problèmes d'ordre essentiellement technique, le constat est que la thématique de l'altimétrie côtière est maintenant solidement implantée au LEGOS et que nous apportons une contribution significative et reconnue à ce domaine : participation à différents projets de recherche, nombreuses collaborations scientifiques à l'intérieur ou extérieur du LEGOS, participation active à la communauté d'altimétrie côtière, formation, rôle d'Investigateur Principal (PI) pour les missions altimétriques, expertise (voir CV).

Dans ce document, je ne ferai état que brièvement dans le chapitre 3 de l'activité de service que j'exerce depuis 2005 (en tant que physicien adjoint) au Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH). Toutefois mes activités de recherche et de service sont étroitement liées et il m'est difficile de mettre une limite stricte entre les deux. Ma tâche de service a souvent consisté (et continue) à implémenter au CTOH des outils développés dans mes projets de recherche et/ou dans le cadre de collaborations avec différents collègues sur différents projets de recherche, et à coordonner ainsi l'évolution de l'altimétrie côtière vers une phase plus accessible pour la communauté de recherche (et pas seulement elle).

Mon CV est résumé ci dessous.

1.2 Curriculum Vitae

Florence Birol
Née le 12 Avril 1973 à Montauban (82).
Pacsée, 2 enfants.

✉ LEGOS, OMP
14 av. Edouard Belin
31400 Toulouse
FRANCE
E-mail : florence.birol@legos.obs-mip.fr

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

Physicien adjoint au Laboratoire d'Etudes Géophysiques et Océanographie Spatiale (depuis Février 2005) – Toulouse.

Développement des applications dérivées de l'altimétrie satellitale dans le domaine côtier.

Chercheur postdoctoral – Mercator-Océan (Août 2004 – Janvier 2005) – Toulouse.

Etude de l'impact de l'assimilation de mesures de salinité de surface de type SMOS.

Chercheur postdoctoral au Laboratoire d'Etudes Géophysiques et Océanographie Spatiale (Janvier 2004 – Mars 2004) – Toulouse.

Etude du comportement des tourbillons océaniques.

Chercheur postdoctoral au Laboratoire des Ecoulements Géophysique et Industriel (Mars 2002 – Novembre 2003) – Grenoble.

Assimilation multivariée de données satellites et in-situ dans une configuration Atlantique Nord d'un modèle d'océan à coordonnée verticale hybride.

Ingénieur de recherche à CLS (Collecte et Localisation par Satellite - Janvier 2000 – Février 2002) – Toulouse.

Développement d'une méthode inverse pour l'estimation de champs tridimensionnels de température et de salinité de l'océan à partir d'observations océaniques de surface.

Thèse de doctorat au Laboratoire d'Etudes Géophysiques et Océanographie Spatiale (Septembre 1996 – Octobre 1999) - Toulouse.

Mécanismes de forçage dans l'océan Indien sud-est et étude de la réponse océanique.

FORMATION

- 1999** Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III.
1996 Diplôme d'Etudes Approfondies Océan, Atmosphère, Biosphère, spécialité Dynamique de l'océan et de l'Atmosphère, de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III.
1995 Maîtrise de physique de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III.

ACTIVITE D'ENCADREMENT

Encadrement de thèse doctorale :

- Jérôme Bouffard (2004-2007), **co-encadrement (25%)** de thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier : « *Amélioration de l'altimétrie côtière appliquée à l'étude de la circulation dans la partie nord du bassin occidental méditerranée* ».
- Renaud Dussurget (2008-2012), **encadrement (100%)** de thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier (grâce à une dérogation de l'école doctorale) : « *Apport de l'altimétrie à l'étude des tourbillons à méso et subméso-échelle : application régionale au Golfe de Gascogne* ».

Encadrement de stage:

- Frédéric Castruccio (5 mois en 2003), **co-encadrement de stage d'ingénieur** : « *Analyse de simulations numériques pour l'étude des circulations océaniques et de leur variabilité dans l'océan Atlantique Nord et Tropical* ».
- Lionel Renault (6 mois en 2004), **co-encadrement de stage d'ingénieur** : « *Impact de la haute résolution sur l'estimation de la paramétrisation statistique du système d'assimilation de données MERCATOR dans des zones régionales* ».
- Eric De Boisseson (4 mois en 2006), **encadrement de stage de master 2** : « *Analyse de simulations numériques pour l'étude des circulations océaniques et de leur variabilité dans l'océan Atlantique Nord et Tropical* ».
- Quentin Carlier (5 mois en 2008), **encadrement de stage d'ingénieur** : « *Combinaison altimétrie/marégraphie* ».
- Gaël Picoulet (3 mois en 2009), **encadrement de stage de master 1** : « *Documentation de la variabilité interannuelle du champs de vent en Méditerranée Nord Occidentale et impact sur la circulation du Courant Liguro-Provençal* ».
- Brice Rouzies et Rémi Guittard (3 mois en 2011), **encadrement de stage de master 1** : « *Etude de la circulation en Méditerranée Nord Occidentale à partir de mesures altimétriques et du modèle Symphonie* ».
- Florent Garnier (4 mois en 2012), **co-encadrement de stage de master 2** : « *Modélisation barotrope de la marée au niveau du golfe de Khambhat, comparaison avec l'altimétrie* ».
- Dac Da Nguyen (5 mois en 2013), **co-encadrement de stage de master 2** : « *The performance of SARAL/AltiKa in coastal region: examples of the NW Mediterranean Sea and the South China Sea* ».

Autre encadrement (contrat postdoctoral, ingénieur, CDD):

- Mathilde Cancet (Juillet 2007- Novembre 2009), **ingénieur de recherche (CDD)** sur le projet DYCOMED (financements IRD puis TOSCA/CNES).
- Jérôme Bouffard (2008), **ingénieur de recherche (CDD)** sur le projet PISTACH (financement CNES).
- Caroline Delebecque (Janvier 2010 - Octobre 2013), **ingénieur d'étude (CDD)** sur les projets MARINA (financement OSTST/CNES) et activité CTOH (financement Observatoire Midi Pyrénées).

- Hela Sekma (depuis Janvier 2013), **chercheur postdoctoral (co-encadrement)** : « *Analyse altimétrique à fine échelle dans le Golfe de Lion* » (financement sur les projets MyOcean et MCGS).
- Co-encadrement scientifique des ingénieurs d'études et ingénieurs de recherche du Service d'Observation CTOH entre Février 2005 et Aout 2012.
- Encadrement scientifique des ingénieurs d'études et ingénieurs de recherche du Service d'Observation CTOH depuis Septembre 2012 (3 I.E. et 2 I.R en ETP en 2012/2013).

PROJETS DE RECHERCHE

2006-2009 : PI du projet « *Etude de la dynamique côtière et des processus d'échange côte-large en Méditerranée Nord-Occidentale (DYCOMED)* ». Financement TOSCA/CNES (92 k€).

2006-2009 : participation au projet « *Value added satellite Altimetry for COastal REgions: ALTICORE* ». Financement de la Commission Européenne (INTAS).

2007-2011 : participation au projet « *European Coastal-shelf sea Operational observing and Forecasting system: ECOOP* ». Financement de la Commission Européenne (FP6).

2007-2008 : participation au projet « *Prototype Innovant de Système de Traitement pour les Applications Côtières et l'Hydrologie: PISTACH* ». CNES/CLS/LEGOS. Financement CNES.

2008-2011 : PI du projet « *Regional CAL/VAL at CTOH* ». Financement OSTST/CNES (120 k€).

2008-2011 : co-I du projet « *Multisensor Impact assessment in Coastal and Shelf Seas (MICSS)* ». Financement OSTST/CNES.

2008-2011 : co-I du projet « *ALTIKA/SARAL: Etude de la circulation océanique mésoéchelle par altimétrie en bande Ka* ». Financement OSTST/CNES.

2008-2011 : co-I du projet « *Altiwaveforms - Altimetric Waveforms In Coastal Regions and Continental Surfaces* ». Financement OSTST/CNES.

2009-2013: participation au projet “*Etudes Physiques Intégrées en Gascogne et Région Atlantique-Manche : EPIGRAM*”. Financements ANR (490 k€) et CNRS/INSU/LEFE/IDAO (145 k€).

2009-2012 : participation au volet « *Sea level* » de *MYOCEAN* (GMES Marine Core Services).

2010-2011 : PI du projet « *MARgin INtegrated Approach (MARINA)* ». Financement OSTST/CNES.

2011-2014 : participation au projet « *Marine Collaborative Ground Segment : MCGS* ». Financement du Fond Unique Interministériel), des régions Bretagne & Provence Alpes Côte d'Azur et du Fond Européen de Développement Régional (FEDER).

2012-2015 : PI du projet « *Multisensor Impact assessment in Coastal and Shelf Seas-II (MICSS-2)* ». Financement OSTST/CNES (200 k€).

2011-2013 : Participation au projet “*Estimation et analyse de la variabilité biogéochimique aux échelles saisonnière, inter-annuelle et décennale des eaux côtières globales par télédétection spatiale et impact vers les niveaux trophiques supérieurs : Globcoast* ». Financement ANR.

EXPERTISE SCIENTIFIQUE

- 2005-2009 : Membre du Conseil Scientifique de l'Observatoire Midi Pyrénées (2005-2009).
- 2008-2009 : Membre du comité TOSCA (CNES).
- Depuis 2012 : Membre nommée de la C.S.O.A. (Comité Scientifique Océan Atmosphère) de l'INSU.
- PI pour les missions spatiales Jason-2 (depuis 2007) et SARAL/AltiKa (depuis 2011).
- Expertise sur l'altimétrie côtière auprès des Agences Spatiales (CNES et ESA).

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Thèse de Doctorat :

F. Birol, *Mécanismes de forçage dans l'océan Indien sud-est et étude de la réponse océanique*. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III.

Publications dans des revues spécialisées avec comité de lecture :

1. R. Morrow and **F. Birol**, 1998: Variability in the southeast Indian Ocean from altimetry – forcing mechanisms for the Leeuwin Current. *J. Geophys. Res.*, 103, 18,529-18,544.
2. **F. Birol** and R. Morrow, 1999: A study of the southeast Indian Ocean from altimetric, wind and XBT data. *Phys. Chem. Earth* (a), 24, n° 4, 387-391.
3. **F. Birol** and R. Morrow, 2001: Source of the baroclinic waves in the southeast Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 106, 9,145 – 9,160.

4. **F. Birol** and R. Morrow, 2003: Separation of quasi-semiannual Rossby waves from the eastern boundary of the Indian Ocean. *J. of Marine Res.*, 61, 707-723.
5. **F. Birol**, J.M. Brankart, F. Castruccio, P. Brasseur and J. Verron, 2004: Impact of mean dynamic topography on multivariate data assimilation hindcasts. *J. of Marine Geodesy*, 27, 59-78.
6. R. Morrow, **F. Birol**, D. Griffin and J. Sudre, 2004: Divergent pathways of warm and cold-core ocean eddies. *Geophys. Res. Letters*, 31: L24311, doi:10.1029/2004GL020974.
7. **F. Birol**, J.M. Brankart, J.M. Lemoine, P. Brasseur and J. Verron, 2005: Assimilation of satellite altimetry referenced to the new GRACE geoid estimate. *Geophys. Res. Letters*, 32, doi:10.1029/2004GL021329.
8. P. Brasseur, P. Bahurel, L. Bertino, **F. Birol**, J.-M. Brankart, N. Ferry, E. Remy, J. Schröter, C.-E. Testut, B. Tranchant, J. Verron, P.J. van Leeuwen, 2006: Data assimilation in the MERCATOR/MERSEA operational ocean forecasting systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, doi:10.1256/qj.05.142.
9. D. Rozier, **F. Birol**, E. Cosme, P. Brasseur, J.M. Brankart and J. Verron, 2007: A reduced-order Kalman filter for data assimilation in physical oceanography. *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, 49, doi:10.1137/050635717.
10. Lebedev S., Sirota A., Medvedev D., Khlebnikova S., Vignudelli S., Snaith H. M., Cipollini P., Venuti F., Lyard F., Cretaux J. F., **Birol F.**, **Bouffard J.**, Roblou L., Kostianoy A., Ginzburg A., Sheremet N., Kuzmina E., Mamedov R., Ismatova K., Alyev A., Mustafayev B., 2007: **Exploiting satellite altimetry in coastal ocean through the ALTICORE project.** *Russian Journal of Earth Sciences*, 10, ES1002, doi:10.2205/2007ES000262.
11. B. Tranchant, C.E. Testut, **L. Renault**, N. Ferry, **F. Birol** and P. Brasseur, 2008: Expected impact of the future SMOS and Aquarius Ocean surface salinity missions in the MERCATOR operational systems: New perspectives to monitor the ocean circulation. *Remote Sensing of Environment*, doi:10.1016/j.rse.2007.06.023.
12. F. Durand, D. Shankar, **F. Birol**, S.S.C. Shenoi, 2008: An algorithm to estimate coastal currents from satellite altimetry: a case study for the East India Coastal Current. *Journal of Oceanography*, 64, pp 831-845.
13. F. Durand, D. Shankar, **F. Birol**, S.S.C. Shenoi, 2009: Spatio-temporal structure of the East India Coastal Current from satellite altimetry. *J. of Geophys Res.*, 114, C02013, doi:10.1029/2008JC004807.
14. **J. Bouffard**, L. Roblou, **F. Birol**, A. Pascual, Fenoglio, **M. Cancet**, R. Morrow and Y. Ménard, 2011: Validation and application of improved coastal altimetry strategies over the North Western Mediterranean Sea, **Coastal Altimetry**. Chapter 12 in S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste (eds.), Coastal Altimetry, Springer Berlin Heidelberg.
15. L. Roblou, J. Lamouroux, **J. Bouffard**, F. Lyard, M. Le Hénaff, A. Lombard, P. Marsalaix, P. De Mey and **F. Birol**: 2011: Post-processing altimeter data toward coastal applications and integration into coastal models. Chapter 9 in S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste (eds.), Coastal Altimetry, Springer Berlin Heidelberg.

16. **F. Birol, M. Cancet, C. Estournel**, 2010: Aspects of the seasonal variability of the Northern Current (NW Mediterranean Sea) observed by altimetry. *J. of Mar. Systems*, 10.1016/j.jmarsys.2010.01.005.
17. **R. Dussurget, F. Birol, R. Morrow and P. Demey**, 2011: Fine-resolution altimetry data for a regional application in the Bay of Biscay. *Marine Geodesy, Marine Geodesy*, DOI: 10.1080/01490419.2011.584835.
18. L. Testut, **F. Birol and C. Delebecque**, 2012: Regional tidal modeling and evaluation of tidal geophysical correction for Jason-2 altimeter data: a case study over the Kerguelen Plateau, Southern Indian Ocean. *Marine Geodesy*, DOI: 10.1080/01490419.2012.718642.
19. **F. Birol and C. Delebecque**, 2013: Using high sampling rate (10/20 Hz) altimeter data for the observation of coastal surface currents: A case study over the northwestern Mediterranean Sea, *J. Mar. Syst.*, DOI:10.1016/j.jmarsys.2013.07.009.

Publications en préparation:

R. Dussurget, F. Birol and R. Morrow: Constructing fine-scale multi-mission altimeter maps for regional and coastal applications in the Bay of Biscay. *In preparation*.

K. Guihou, C. Langlais, P. Oke, R. Coleman and **F. Birol**. Study of the Leeuwin Current from Jason-1 high resolution altimetry products, *J. Gophys. Res.* soumis.

Proceedings

1. Brasseur, P., P. Bahurel, L. Bertino, **F. Birol**, J. M. Brankart, N. Ferry, S. Losa, E. Remy, J Schroter, S. Skachko, C. E. Testut, B. Tranchant, P. J. Van Leeuwen, and J. Verron, 2005: Data assimilation systems and the MERSEA developments. 4th WMO International Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, Prague, Avril 2005.
2. **F. Birol**, L. Roblou, F. Lyard, W. Llovel, F. Durand, L. Renault, B. Dewitte, R. Morrow and Y. Ménard , 2006: Towards using satellite altimetry for the observation of coastal dynamics. Proceedings of “Fifteen Years of Progress in Radar Altimetry”, Venice, Italy, 13-18 March 2006.
3. B. Legresy, F. Papa, F. Blarel, J.F. Creteaux, **F. Birol**, A. Cazenave, K. Dominh, F. Frappart, S. Calmant, M.C. Gennero, A. Kouraev and F. Rémy, 2006: OSCAR : looking at continental surfaces with radar altimetry. Proceedings of “Fifteen Years of Progress in Radar Altimetry”, Venice, Italy, 13-18 March 2006.
4. C. Maraldi, L. Testut, **F. Birol** and L. Roblou, 2006: Validation of T/P data in the South Indian Ocean. Proceedings of “Fifteen Years of Progress in Radar Altimetry”, Venice, Italy, 13-18 March 2006.
5. R. Morrow, Y. Ménard, J. Sudre, M. Faillot, **F. Birol**, S. Daillet-Rochette and F. Blarel, 2006: CTOH – 17 years of altimetric service, 2006. Proceedings of “Fifteen Years of Progress in Radar Altimetry”, Venice, Italy, 13-18 March 2006.
6. Vignudelli S., L. Roblou, M. H. Snaith, P. Cipollini, F. Venuti, A. Kostianoy, A. Ginzburg, F. Lyard, J.-F. Creteaux, **F. Birol**, S. Lebedev, A. Sirota, D. Medvedev, S. Khlebnikova, R. Mamedov, K. Ismatova, A. Alyev, T. Nabiyev: ALTICORE - A consortium serving european seas with coastal altimetry, Geoscience and Remote Sensing

7. R. Dussurget, **F. Birol** and R. Morrow, 2010: Investigating Bay of Biscay mesoscale and coastal ocean dynamics from a combination of satellite and in-situ observations. Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, Venice, Italy, 21-25 September 2009. ESA Publication WPP-306.
8. K. Guihou, P. Oke, R. Coleman, **F. Birol** and C. Langlais, 2010: Coastal High Resolution Altimetric Data: Application of the Regional CTOH product in South-West Australia. Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, Venice, Italy, 21-25 September 2009, ESA Publication WPP-306.
9. M. Cancet, **F. Birol**, L. Roblou, C. Langlais, K. Guihou, J. Bouffard, R. Dussurget, R. Morrow, F. Lyard, 2010: CTOH regional altimetry products: examples of applications. Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, Venice, Italy, 21-25 September 2009, ESA Publication WPP-306.
10. **F. Birol**, C. Delebecque, L. Roblou and R. Morrow, 2012: Using high rate altimeter measurements for coastal studies: example in the NW Mediterranean Sea. Proceedings of 20YPRA symposium: Venice, Italy, 24-29 Septembre 2012.
11. P. Cipollini, J. Benveniste, L. Miller, N. Picot, R. Scharroo, T. Strub, D. Vandemark, S. Vignudelli, S. Zoffoli, O. Andersen, L. Bao, **F. Birol**, Emanuel Coelho, X. Deng, W. Emery, L. Fenoglio, J. Fernandes, J. Gomez-Enri, D. Griffin, G. Han, J. Hausman, K. Ichikawa, A. Kostianoy, V. Kourafalou, S. Labroue, R. Ray, M. Saraceno, W. Smith, P. Thibaut, J. Wilkin, S. Yenamandra, 2012 : Conquering the coastal zone: a new frontier for satellite altimetry. Proceedings of 20YPRA symposium: Venice, Italy, 24-29 Septembre 2012.
12. R. Dussurget, **F. Birol** and R. Morrow, 2012: Contribution from altimetry to the study of oceanic eddies: a regional application to the Bay of Biscay and NW Mediterranean. Proceedings of 20YPRA symposium: Venice, Italy, 24-29 Septembre 2012.
13. M. Cancet, F. Lyard, **F. Birol**, L. Roblou, J. Lamouroux, M. Lux, E. Jeansou, D. Boulze and E. Jeansou, D. Boulze and E. Bronner: Latest improvements in tidal modelling : a regional approach. Proceedings of 20YPRA symposium: Venice, Italy, 24-29 Septembre 2012.
14. R. Morrow, **F. Birol**, S. Fleury, F. Niño, 2012: CTOH: > 20 years of altimetry data service. Proceedings of 20YPRA symposium: Venice, Italy, 24-29 Septembre 2012.

Communications dans des conférences internationales et nationales.

1. Morrow R. and **F. Birol**, Forcing mechanisms for the southeast Indian Ocean from Topex/Poseidon altimetry and ERS-1 scatterometry. Topex/Poseidon SWT, Southampton, 1996.
2. **Birol F.** and R. Morrow, Variability in the southeast Indian Ocean from T/P and ERS-1 combined data. European Geophysical Society, Vienne, 1997.
3. **Birol F.** and R. Morrow, A Study of the southeast Indian Ocean from altimetric, wind and XBT data. European Geophysical Society, Nice, 1998.

4. **Birol F.** and R. Morrow, Variability in the southeast Indian ocean from satellite, hydrographic and currentmeter data. The Ocean Observing System for Climate, St Raphael, 1999.
5. **Birol F.**, P. Faucher, G. Larnicol and K.R. Ridgway, Vertical EOFs and their observability from altimetry in the southeast Indian Ocean. European Geophysical Society, Nice, 2000.
6. Piccinali J.G., **F. Birol**, J.M. Brankart, P. Brasseur and J. Verron, Multivariate assimilation of satellite and in situ data in a high-resolution layered model of the North Atlantic. Symposium "En route to GODAE", Biarritz, 2002.
7. **Birol F.**, J.G. Piccinali, J.M. Brankart, P. Brasseur and J. Verron, Projet TOPAZ: Assimilation multivariée dans une configuration Atlantique Nord d'un modèle d'océan à coordonnée verticale hybride. Atelier de modélisation de l'atmosphère, Toulouse, 2002.
8. **Birol F.**, J.M. Brankart, P. Brasseur and J. Verron, Multivariate assimilation into layered ocean models of the North Atlantic using the SEEK filter. Layered Ocean Model Workshop, Miami, 2003.
9. **Birol F.**, J.M. Brankart, P. Brasseur and J. Verron, Multivariate assimilation into layered ocean models of the North Atlantic using the SEEK filter. European Geophysical Society, Nice, 2003.
10. **Birol F.**, J.M. Brankart, P. Brasseur and J. Verron, Sensitivity of an ocean general circulation prediction system to mean dynamic topography products. Jason SWT, Arles, 2003.
11. **Birol F.**, J.M. Brankart, P. Brasseur and J. Verron, Sensitivity of ocean general circulation prediction systems to mean dynamic topography. AGU, Portland, 2004.
12. Rozier D., **F. Birol**, J.M. Brankart, P. Brasseur and J. Verron, Multivariate data assimilation into HYCOM using the SEEK filter: impact studies. Layered Ocean Model Workshop, Miami, 2004.
13. R. Morrow, **F. Birol**, J. Sudre and D. Griffin. Divergent Pathways of anticyclonic and cyclonic eddies. SWT, St Peterbourg, 2004.
14. R. Morrow, **F. Birol**, A. Chaigneau, J.-R. Donguy, D. Griffin, J.-B. Sallee, S. Rintoul, K. Speer, J. Sudre, N. Wienders. Eddy heat and salt transport in the Southern Ocean. Christian Le Provost Colloquium, Toulouse, 2005.
15. **F. Birol**, J.M. Brankart, J.M. Lemoine, P. Brasseur and J. Verron, Impact of the new GRACE geoid estimate on ocean data assimilation. EGU, Vienna, 2005.
16. C.E. Testut, B. Tranchant, **F. Birol**, N. Ferry and P. Brasseur, SAM2: The Second Generation of MERCATOR Assimilation System. EGU, Vienna, 2005.
17. B. Tranchant, Testut C.E., Ferry N., **F. Birol** and Brasseur P. SAM2 : The Second Generation of Mercator Assimilation System, 4th EUROGGOS Conference, Brest, 6-9 June 2005.
18. P. Brasseur, P. Baharel, L. Bertino, **F. Birol**, J. M. Brankart, N. Ferry, S. Losa, E. Remy, J. Schroter, S. Skachko, C. E. Testut, B. Tranchant, P. J. Van Leeuwen, and J. Verron: Data assimilation for marine monitoring and prediction: The MERCATOR operational assimilation systems and the MERSEA developments. 4th WMO International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, Prague, Avril 2005.

19. **F. Birol**, L. Roblou, F. Lyard, J. Bouffard, F. Durand, R. Morrow, Y. Ménard, J. Sudre and M. Faillot: Satellite altimetry for the observation of coastal dynamics. DOWNDAC Workshop, Toulouse, 2005.
20. **F. Birol**, F. Durand, D. Shankar, S.S.C. Shenoi, L. Roblou, F. Lyard, W. Llovel and Y. Ménard: Satellite altimetry for the observation of coastal dynamics: a case study for the Northern Indian Ocean, IMPA2006, Delhi, 2006.
21. R. Morrow, Y. Ménard, **F. Birol**, S. Daillet-Rochette, J. Sudre, F. Blarel and M. Faillot: CTOH : Centre for Topographic studies of the Oceans and Hydrosphere, “15 years of progress in radar altimetry.”, Venice, 2006.
22. **F. Birol**, L. Roblou, F. Lyard, W. Llovel, F. Durand, L. Renault, B. Dewitte, R. Morrow and Y. Ménard: Towards using satellite altimetry for the observation of coastal dynamics, “15 years of progress in radar altimetry.”, Venice, 2006.
23. B. Tranchant, C.E. Testut, N. Ferry, P. Brasseur, **F. Birol** and L. Renault: Interest of assimilating data in an operational oceanographical context: The MERCATOR OCEAN experience, 1rst Joint GOSUD/SAMOS Workshop, Boulder, 2006.
24. J. Bouffard, S. Vignudelli, F. Lyard, **F. Birol**, P. Marsaleix, L. Roblou, G.P. Gasparini, G. Manzella, P. Cipollini: Advances in Coastal Altimetry over the Northwestern Mediterranean, “International workshop on coast and land applications of satellite altimetry”, Beijing, 2006.
25. Y. Ménard, R. Morrow, **F. Birol**, J. Sudre, M. Faillot, F. Blarel, M.C. Gennero and S. Daillet: Altimetry and new applications at the CTOH – Centre for Topographic studies of the Oceans and Hydrosphere, COSPAR, Beijing, 2006.
26. F. Durand, D. Shankar, **F. Birol**, S.S.C. Shenoi, L. Roblou, F. Lyard, Y. Menard: Improved satellite altimetry for the observation of coastal dynamics: a case study for the northern Indian Ocean, Asia-Pacific remote Sensing, Goa, 2006.
27. S. Vignudelli, H.M. Snaith, F. Lyard, P.P. Cipollini, F. Venuti, **F. Birol**, J. Bouffard, L. Roblou: Satellite radar altimetry: from open ocean to coasts, challenges and perspectives, Asia-Pacific remote Sensing, Goa, 2006.
28. J. Bouffard, Vignudelli S., Hermann M., Lyard F., Marsaleix P., Menard Y., **Birol F.**, Cipollini P.: Comparison of Ocean Dynamics with a Regional Circulation Model and Improved altimetry in the Northwestern Mediterranean, Hydrological Cycles in the Mediterranean Experiment (HYMEX), Toulouse, France, January 9-11, 2007.
29. J. Bouffard, Y. Ménard, L. Roblou, **F. Birol**, F. Lyard and R. Morrow: Improved satellite altimetric data dedicated to coastal areas: Validation over the Northwestern Mediterranean, Ocean Surface Topography Science Team Meeting, Hobart, Australia, March 12-15, 2007.
30. J. Bouffard J., Hermann M., Vignudelli S., Marsaleix P., **Birol F.**, Lyard F., Ménard Y., Cipollini P.: Improved satellite altimetric data dedicated to coastal areas: applications over the Northwestern Mediterranean, EGU, Vienna, Austria, April 15-20, 2007.
31. J. Bouffard, F. Venuti, R. Mamedov, S. Vignudelli, H. M. Snaith, P. Cipollini, F. Lyard, J.-F. Crétaux, **F. Birol**, L. Roblou: ALTICORE - a consortium serving European Sea with Coastal Altimetry, Workshop INTAS - South Caucasus 2007 Scientific Cooperation and Collaborative Call, Tbilisi, Georgia, March 28-30, 2007

32. F. Durand, **F. Birol**, D. Shankar, S.S.C. Shenoi, L. Roblou, F. Lyard, Y. Menard: Improved satellite altimetry for the observation of coastal dynamics, OSTST, Hobart, 2007.
33. F. Lyard, **F. Birol**, J. Bouffard, P. Cipollini, J.F. Crétaux, P. Marsaleix, Y. Ménard, L. Roblou, S. Vignudelli: Margin Altimetry Project: a joined effort toward shelf, coastal and continental altimetry processing and applications, OSTST, Hobart, 2007.
34. S. Vignudelli, Snaith H. M., Cipollini P., Venuti F., Lyard F., Cretaux J. F., **Birol F.**, Bouffard J., Roblou L., Kostianoy A., Ginzburg A., Sheremet N., Kuzmina E., Lebedev S., Sirota A., Medvedev D., Khlebnikova S., Mamedov R., Ismatova K., Alyev A., Nabiyevev T.: **Extending the use of satellite altimetry for coastal applications: the ALTICORE project**, Joint 15th American Meteorological Society (AMS) Satellite Meteorology & Oceanography and annual Eumetsat Satellite Meteorological conferences, Amsterdam, The Netherlands, September 24-28, 2007.
35. S. Vignudelli, L. Roblou, M. H. Snaith, P. Cipollini, F. Venuti, A. Kostianoy, A. Ginzburg, F. Lyard, J.-F. Cretaux, **F. Birol**, S. Lebedev, A. Sirota, D. Medvedev, S. Khlebnikova, R. Mamedov, K. Ismatova, A. Alyev, T. Nabiyevev: ALTICORE - A consortium serving European seas with coastal altimetry, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007, IGARSS 2007, IEEE International, Barcelona, Spain, 23-28 July 2007.
36. Cipollini P., Snaith H. M., Vignudelli S., Lyard F., **Birol F.**, Bouffard J., Roblou L.: **Recent advances and forthcoming initiatives in coastal altimetry**, NATO Undersea Research Centre (NURC) Rapid Environmental Assessment (REA) Conference, Lerici, La Spezia, Italy, September 25-27, 2007.
37. Roblou L., Vignudelli S., Lyard F., Bouffard J., Cipollini P., **Birol F.**, Durand F., Maraldi C., Le Henaff M.: **X-track, a new processing tool for altimetry in coastal regions**, International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, Spain, July 23-27, 2007.
38. Cipollini P., Snaith H. M., Vignudelli S., Lyard F., **Birol F.**, Bouffard J., Roblou L.: **Recent advances and forthcoming initiatives in coastal altimetry**, International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, Spain, July 23-27, 2007.
39. Kostianoy A., S. Vignudelli, H.M. Snaith, P. Cipollini, F. Venuti, F. Lyard, J.-F. Crétaux, **F. Birol**, J. Bouffard, L. Roblou, A. Kostianoy, A. Ginzburg, N. Sheremet, E. Kuzmina, S. Lebedev, A. Sirota, D. Medvedev, S. Khlebnikova, R. Mamedov, K. Ismatova, A. Alyev, T. Nabiyevev: Revisiting fifteen years of satellite altimetry near the European coasts: the ALTICORE project, 27th European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSEL) Symposium, 3rd Workshop Remote Sensing of Coastal Zone from Inland to Marine Waters, Bolzano, Italy, June 4-9, 2007.
40. M. Cancet, **F. Birol** and F. Lyard: Regional comparison of sea level time series from altimetry and tide gauges in the Northwestern Mediterranean Sea, EGU, Nice, 2008.
41. J. Bouffard, L. Roblou, S. Vignudelli, P. Marsaleix, P. Cipollini, Y. Ménard and **F. Birol**: Improved coastal altimetry applied to monitor small scale dynamics over the Mediterranean sea, IGARRS, Boston 2008.
42. The CTOH team: Regional CAL/VAL and altimetry activities at the Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH), OSTST, Nice, 2008.
43. **F. Birol**, J. Bouffard, L. Roblous, M. Cancet, F. Lyard and R. Morrow: Toward coastal altimetry, OSTST, Nice, 2008.

44. J. Bouffard, L. Roblou, F. Lyard, **F. Birol**, C. Maraldi and L. Carrere: Assessment of regional barotropic models toward the de-aliasing of altimetry over coastal and shelf seas, OSTST, Nice, 2008.
45. L. Testut, N. pouvreau, G. Woppelmann, **F. Birol** and M. Karpitchev: Long Term Trend Components in Sea Level from Tide Gauge and Satellite Altimetry Records, OSTST, Nice, 2008.
46. G. Herbert, M. Le Hénaff, **F. Birol**, N. Ayoub, J. Bouffard and M. cancel, Signature of coastal dynamical processes in satellite altimetry, OSTST, Nice, 2008.
47. M. Cancet, **F. Birol**, F. Lyard et S. Melachroinos : Exemples d'applications de l'altimétrie spatiale en zone côtière, CNFGG, Paris, 2008.
48. Vignudelli S., H. M. Snaith, P. Cipollini, F. Venuti, F. Lyard, J.-F. Crétaux, **F. Birol**, J. Bouffard, L. Roblou, A. Kostianoy, A. Ginzburg, N. Sheremet, E. Kuzmina, S. Lebedev, A. Sirota, D. Medvedev, S. Khlebnikova, R. Mamedov, K. Ismatova, A. Alyev, T. Nabyev: ALTICORE - A Collaborative Experience in Exploring Coastal Altimetry in Mediterranean, Caspian, White and Barents Seas, Ocean Surface Topography Science Team Meeting (OSTST) and Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE) Symposium, Nice, France, November 10-15, 2008.
49. P. Cipollini, L. Roblou, **F. Birol** and S. Vignudelli : The contribution of improved altimetry to a study of NW Mediterranean Sea coastal dynamics (MARINA project insight), Cape Town, IGARSS, 2009.
50. M. Cancet, **F. Birol**, L. Roblou, R. Morrow and F. Lyard: CTOH regional altimetry products: example of applications, OSTST, Seattle, 2009.
51. **F. Birol**, M. Cancet, L. Roblou, R. Morrow and F. Lyard: CTOH regional altimetry products: example of applications, 3rd Coastal Altimetry Workshop, Frascati, 2009.
52. L. Roblou, C. Delebecque, S. Vignudelli, J. Bouffard, P. Cipollini, R. Morrow and **F. Birol**, Latest insights of the MARINA project. COSPAR, Bremen, 2010.
53. **F. Birol**, C. Delebecque, L. Roblou, S. Fleury, R. Morrow, F. Niño and G. Pernot: Coastal altimetry at the Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH). OSTST, Lisbonne, 2010.
54. R. Dussurget, **F. Birol**, N. Martignago, B. meyssignac and R. Morrow: Fine-resolution altimetry data for a refional application in the Bay of Biscay. 4th Coastal Altimetry Workshop, Porto, 2010.
55. **F. Birol**, C. Delebecque, L. Roblou, S. Fleury, R. Morrow, F. Niño and G. Pernot: Coastal altimetry at the Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH). 4th Coastal Altimetry Workshop, Porto, 2010.
56. L. Testut, **F. Birol**, B. Martin-Miguez, G. Wöppelmann and M. Cancet, 2010. Calibration of satellite altimeters mission at Kerguelen Island, Southern Indian Ocean. OSTST, Lisbonne, 2010.
57. R. Morrow, **F. Birol**, F. Nino, S. Fleury, G. pernot and C. Naskas: CTOH altimeter data service for coastal, hydrology and cryosphere applications, OSTST, Lisbonne, 2010.
58. **F. Birol**, Caroline Delebecque, Renaud Dussurget, Laurent Roblou, Rosemary Morrow, Sara Fleury and Fernando Niño: Regional processing of altimetry data at the Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere (CTOH), AltiKa workshop, Amhedabad, 2011.

59. K. Guihou, C. Langlais, P. Oke, R. Coleman and **F. Birol** : Study of the Leeuwin Current from JASON-1 high rate Altimeter SLA processed with the X-TRACK software, EGU, Vienna, 2011.
60. S. Fleury, F. Niño, B. Picinbono, **F. Birol** and R. Morrow: CTOH Altimeter Data Service - What's new in 2011 ?, OSTST, San Diego, 2011.
61. **F. Birol**, C. Delebecque, R. Dussurget, L. Roblou, R. Morrow, S. Fleury and F. Niño: Regional applications based on CTOH altimeter data, 5th Coastal Altimetry Workshop, San Diego, 2011.
62. R. Dussurget, **F. Birol**, R. Morrow, L. Roblou and P. De Mey : Fine Scale Mapping from a Multi-mission XTRACK Data Set : mesoscale studies in the Bay of Biscay, 5th Coastal Altimetry Workshop, San Diego, 2011.
63. M. Cancet, V. Kourafalou, M. Le Hénaff, C. Dufau, **F. Birol**, S. Labroue, E. Johns, R. Smith, E. Jeansou, R. Morrow, N. Picot, A. Guillot, G. Dibarboure, E. Bronner : Comparing in situ current data with current anomalies derived from the PISTACH products: the Florida Current case, 5th Coastal Altimetry Workshop, San Diego, 2011.
64. C. Delebecque, R. Dussurget, **F. Birol**, L. Roblou, R. Morrow, S. Fleury, F. Nino and P. Picinbono: Applications based on Regional Altimeter Products, OSTST, San Diego, 2011.
65. S. Labroue, C. Dufau, F. Collard, S. Peyridieu, M. Urvoy, A. Guillot, N. Picot, T. Guinle, M. Cancet and **F. Birol**: Level 3 PISTACH products for coastal studies, OSTST, San Diego, 2011.
66. L. Roblou, **F. Birol**, C. Delebecque, R. Dussurget, C. Estournel, M. Lux and R. Morrow : Multi-mission coastal altimetry at CTOH data centre: enhanced products and future developments, Workshop on unresolved issues in Mediterranean Sea Level Research, Mallorca, 2011.
67. **F. Birol**, C. Delebecque, L. Roblou, R. Morrow, S. Fleury, F. Niño and F. Lyard: CTOH studies on regional altimetry in 2011/2012, 6th Coastal Altimetry Workshop, Venice, 2012.
68. M. Cancet, S. Labroue, **F. Birol**, L. Beal, C. Dufau, E. Jeansou, R. Morrow, A. Guillot and N. Picot: Comparing In Situ Current Data with Current Anomalies Derived from the PISTACH Products: the Agulhas Current, 6th Coastal Altimetry Workshop, Venice, 2012.
69. F. Nino, **F. Birol**, D. Blumstein and B. Legresy: Radar waveform inversion: an application to coastal altimetry, OSTST, Venice, 2012
70. L. Roblou, F. Lyard, C. Delebecque, **F. Birol** and R. Morrow: Evaluation of CTOH new along-track tidal constants database for dealiasing coastal altimetry over the North-West European continental shelf. OSTST, Venice, 2012.
71. R. Morrow, S. Fleury, F. Nino and **F. Birol**: CTOH: 20 years of altimeter data, OSTST, Venice, 2012.
72. **F. Birol** et al., SARAL/AltiKa – (Very!) Early results over coastal areas: example of the NW Mediterranean Sea. ALtiKa CAL/VAL workshop, Toulouse, 2013.
73. J. Verron, **F. Birol**, S. Calmant, A. Cazenave, B. Chapron, L. Eymard, J. M. Lefevre, F. Marin, F. Remy, F. Seyler, L. Testut, J. Vialard, SARAL/AltiKa: a satellite altimeter in Ka band for oceanographic science studies. ESA symposium, Edinburgh, 2013.
74. M. Cancet, E. Jeansou, J. Lamouroux, F. Crespon, **F. Birol**, F. Lyard, R. Morrow, E. Bronner and J. Benveniste: Coastal altimetry, from data processing to industrial applications: some illustrations. ESA symposium, Edinburgh, 2013.

75. L. Amarouche, E. Obligis, G. Dibarboure, S. Labroue, V. Rosmorduc, F. Fabry, S. Baudel, A. Vemier, **F. Birol**, N. Picot, R. Matthias: Marine collaborative Ground Segment: Overview of the Sentinel-3 Topography platform. ESA symposium, Edinburgh, 2013.
 76. **F. Birol**, C. Delebecque, F. Niño, F. Lyard, R. Morrow, S. Fleury, F. Blarel, M. Rogé and D. Blumstein: Regional Products and Studies Based on CTOH Altimeter Data. 7th Coastal Altimetry Workshop, Boulder, 2013.
 77. C. Delebecque, F. Lyard, **F. Birol**, N. Ayoub, L. Testut and L. Roblou: Using CTOH Tidal Constants for Coastal Studies. 7th Coastal Altimetry Workshop, Boulder, 2013.
 78. F. Niño, **F. Birol**, D. Blumstein and D. Nguyen Duc: Coastal Altimetry with the Ka Band. 7th Coastal Altimetry Workshop, Boulder, 2013.
 79. M. Cancet, F. Lyard, E. Jeansou, **F. Birol** and C. Delebecque: Regional Tidal Modelling from 2D to 3D. 7th Coastal Altimetry Workshop, Boulder, 2013.
 80. D. Blumstein, F. Nino, N. Steunou, F. Boy and **F. Birol**: Retracking Saral/AltiKa Data Near the Coasts. 7th Coastal Altimetry Workshop, Boulder, 2013.
 81. C. Delebecque, F. Lyard, **F. Birol**, N. Ayoub, L. Testut and L. Roblou: Using CTOH Tidal Constants for Coastal Studies. OSTST, Boulder, 2013.
 82. F. Baup, F. Frappart, J. Maubant and **F. Birol**: Combined Use of High Resolution Satellite Images and Altimetry to Estimate Volume of Small Lakes. OSTST, Boulder, 2013.
 83. H. Sekma, R. Morrow, **F. Birol** and P. Testor: Analysis of fine scale coastal process in the Gulf of Lion. OSTST, Boulder, 2013.
 84. F. Briol, **F. Birol**, E. Bronner, G. Dibarboure, T. Guinle, O. Lauret, R. Morrow, C. Nicolas, F. Nino and V. Rosmorduc: AVISO: online data extraction service for all altimetry users. OSTST, Boulder, 2013.
 85. S. Fleury, F. Blarel, D. Blumstein, **F. Birol**, C. Delebecque, F. Niño, R. Morrow and M Rogé: CTOH: from L1 to L4 altimeter data. OSTST, Boulder, 2013.
-

1.3 Les collaborations

Une caractéristique constante et importante de mon parcours de recherche est son aspect collaboratif, à travers de très nombreux projets scientifiques. Cela se traduit notamment par de nombreux co-auteurs dans mes publications et mes présentations à des congrès. En pratique, j'ai mené mon activité de recherche en partenariat étroit avec différentes personnes : Rosemary Morrow (LEGOS, 1996-1999 puis très régulièrement par la suite), Pierre Brasseur et Jean-Michel Brankart (LEGI, 2002-2004), Charles-Emmanuel Testut et Benoit Tranchant (Mercator Océan, 2004), Florent Lyard (LEGOS, depuis 2005), Claude Estournel (L.A., depuis 2008), Jérôme Bouffard (étudiant en thèse, 2004-2007), Mathilde Cancet (ingénieur LEGOS, 2007-2009), Renaud Dussurget (étudiant en thèse, 2008-2012) et Caroline Delebecque (ingénieur LEGOS, 2010-2013). J'ai aussi collaboré de manière plus ponctuelle avec quelques autres à travers différents projets : Gary Meyers, David Griffin, Ken Ridgway et Karen Guihou (CSIRO, Australie), Pierre-Yves LeTraon et Gilles Larnicol (CLS), Stefano Vignudelli (CNR), Pierre De Mey, Nadia Ayoub, Fabien Durand et Laurent Testut (LEGOS). Cela rend très difficile (et peu représentatif de la réalité!) en pratique d'utiliser le « je » et non le « nous » pour présenter les travaux qui suivent.

La suite de ce mémoire est organisée de la façon suivante : dans le chapitre 2 sont présentés les principaux résultats de mes activités de recherche. Le Chapitre 3 résume brièvement mes activités de service et d'enseignement. Finalement, le chapitre 4 présente mes perspectives de recherche en lien étroit avec mes travaux de recherche précédents.

Chapitre 2 – Activités de recherche

2.1 - Introduction

L'altimétrie spatiale s'est développée à la fin des années 70 avec les missions Geos 3 (1975), Seasat (1978) puis Geosat (1985-1989). Elle a tout d'abord concerné des études sur le géoïde marin et ses applications. Son utilisation pour des études océanographiques, nécessitant plus de précision sur la mesure, s'est développée ensuite au cours des années 1990, grâce aux missions franco-américaine Topex/Poseidon (T/P, 1992-2006), européennes ERS-1 (1991-1996), ERS-2 (1995-2003) et de l'US Navy GFO (1998-2008). Ont succédé les missions Jason-1 (2001-2013) et Envisat (2002-2012), et des missions encore actives aujourd'hui: Jason-2 (2008-), Cryosat-2 (2010-), HY-2A (2011-) et SARAL/AltiKa (2013-).

Avant de continuer, je tiens à préciser que l'altimétrie spatiale est aujourd'hui arrivée à un tel niveau de maturité que l'utilisateur qui veut exploiter ce type de données pour un grand nombre d'applications océanographiques n'a besoin que d'en connaître des généralités. Des produits validés combinant l'information de l'ensemble des satellites disponibles sont distribués sous forme de grille, dans des formats standardisés, par des services opérationnels tels qu'AVISO (CNES/CLS). Des informations géophysiques encore plus élaborées sont extraites et également disponibles : courant de surface, tendance du niveau de la mer, indicateurs climatiques, etc... En revanche, l'utilisateur cherchant à extraire des informations pour des applications émergentes se doit d'acquérir un minimum d'expertise lui permettant de retraiter, partiellement ou totalement, les données à partir de produits plus complexes (Geophysical Data Records ou Waveform Altimetry Product). Passer progressivement de l'utilisation de produits altimétriques standards au calcul de mes propres jeux de données altimétriques est le chemin (pas tout à fait rectiligne) que j'ai suivi au cours de mon parcours scientifique.

Le concept de l'altimétrie spatiale est assez simple, sa mise en application nécessite la réalisation d'instruments de très haute précision. Le principe est d'obtenir la distance entre un radar altimètre embarqué à bord d'un satellite et la surface terrestre située à sa verticale (appelée range, cf. Figure 2.1). Celle-ci est déduite de la mesure du temps mis par le signal (émis par le radar) pour parcourir le chemin aller-retour entre le satellite et la surface réfléchissante sous-jacente. Connaissant l'orbite du satellite (ses coordonnées dans le référentiel terrestre) on peut alors en déduire la hauteur de la surface réfléchissante considérée par rapport à une surface simple de référence, en l'occurrence un ellipsoïde de référence terrestre. En pratique, dans le cas de l'océan, la hauteur de la mer est déduite selon la formule $SSH = \text{altitude} - \text{range}$. La précision du résultat dépend donc de la précision de l'orbite (de l'ordre de 1 cm rms radialement à l'heure actuelle pour la mission Jason-2, Cerri *et al.*, OSTST 2013), et de l'interaction de l'onde radar incidente avec l'atmosphère d'une part et avec la surface rugueuse considérée d'autre part (très variable d'un type de surface à une autre). On devine donc que, bien que le cas qui nous intéresse ici soit l'océan, cette technique peut à priori servir pour étudier les propriétés d'autres types de surface (à condition de comprendre les interactions onde é.m./surface).

La Figure 2.2 illustre de manière théorique comment le signal se réfléchit sur la surface de la mer vers l'antenne réceptrice de l'altimètre pour obtenir un signal de puissance variable en fonction du temps, appelé forme d'onde. La fréquence des tirs est relativement importante : plusieurs milliers de tirs par seconde. Les formes d'ondes réelles sont très bruitées et la pratique courante est de moyennner (Figure 2.2) celles acquises sur une période

de 1 seconde pour obtenir un signal proche du modèle de Brown (Brown, 1977). On sait alors déduire plusieurs paramètres géophysiques de la comparaison entre le signal réfléchi sur la surface de la mer et ce modèle d'écho. La mesure de temps (époque) qui nous intéresse pour calculer la hauteur de la mer (SSH) sera déduite de la valeur enregistrée à mi-pente du front de montée de la forme d'onde, pente quant à elle représentative de l'état de la mer (hauteur des vagues). Il faut toutefois garder en mémoire que la compression (à travers l'opération de moyenne) des échos radar impose une limitation en résolution (temporelle et spatiale) du signal altimétrique.

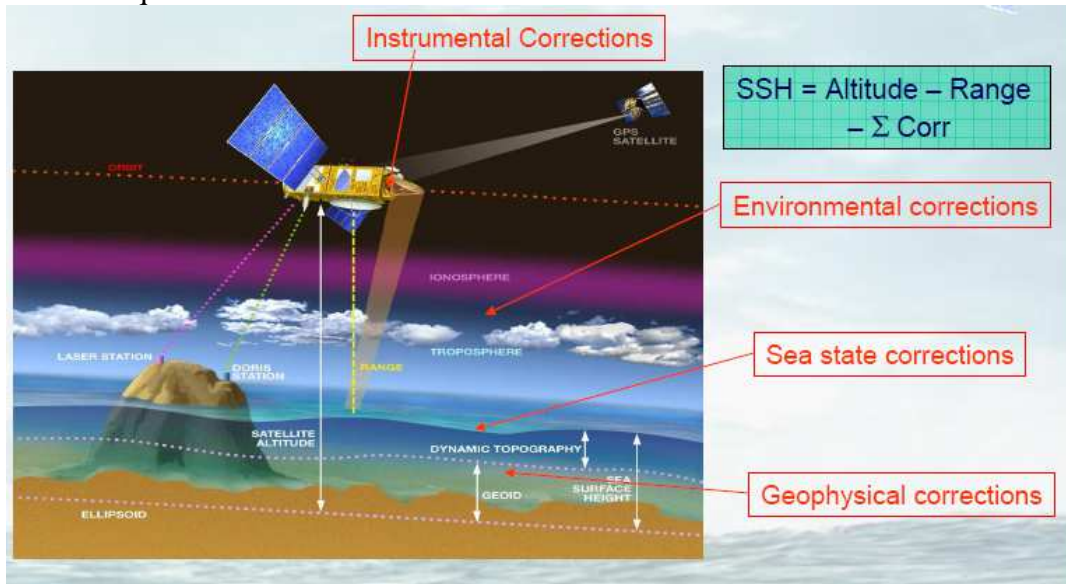


Figure 2.1: Principe de fonctionnement de l'altimétrie spatiale (image AVISO, CNES/CLS).

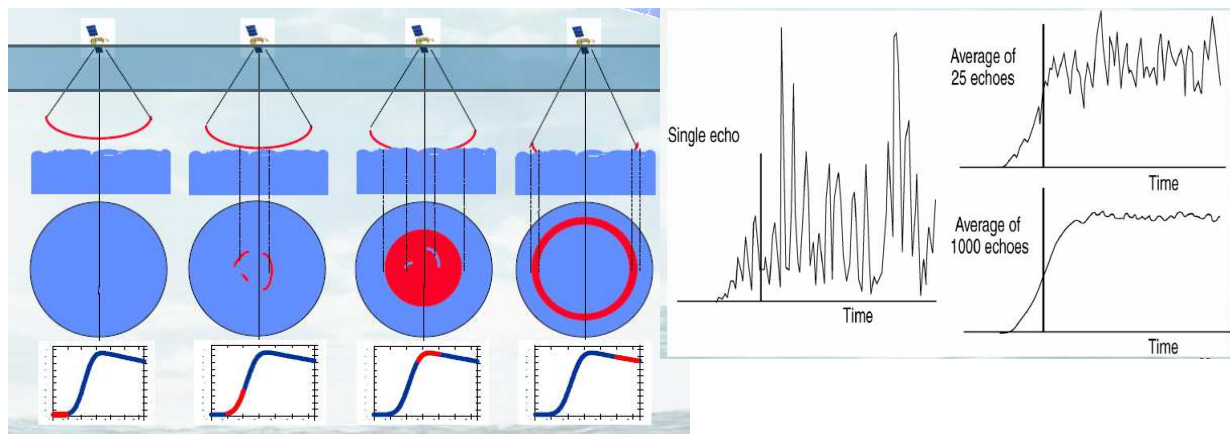


Figure 2.2: A gauche) Formulation théorique des formes d'ondes à partir des caractéristiques du radar et de l'état de mer. A droite) Formes d'ondes réelles et détermination de l'époque (trait noir).

La précision de la mesure requise va dépendre du signal océanique que l'on cherche à observer (amplitude et échelles spatio-temporelles associées). L'ordre de grandeur de celui-ci sera tout au plus de quelques dizaines de centimètres. En pratique on détecte des variations du niveau de la mer de l'ordre de quelques centimètres sur les missions récentes (Lambin et al., 2010). Cela nécessite, non seulement d'effectuer des mesures altimétriques précises mais également d'être capable de leur apporter des corrections de bonne qualité. Il existe plusieurs types de corrections altimétriques (Figure 2.3): 1) des corrections instrumentales, 2) des corrections dues à l'allongement de la durée du signal au cours de son trajet dans l'atmosphère (traversée de l'ionosphère et de la troposphère) et 3) des corrections géophysiques (biais

d'état de mer, vagues, marée, pression atmosphérique et géoïde). Certaines ont une amplitude bien supérieure à celle des signaux que l'on cherche à mesurer. La précision de la mesure altimétrique étant un facteur limitant fortement la dynamique océanique observable par cette technique, de nombreuses activités de recherche concernent le développement des modèles les plus adéquats pour la corriger (par exemple : Förste et al., 2012 ; Haussman and Zlotnicki, 2010 ; Lyard et al., 2006 ; Obligis et al., 2011).

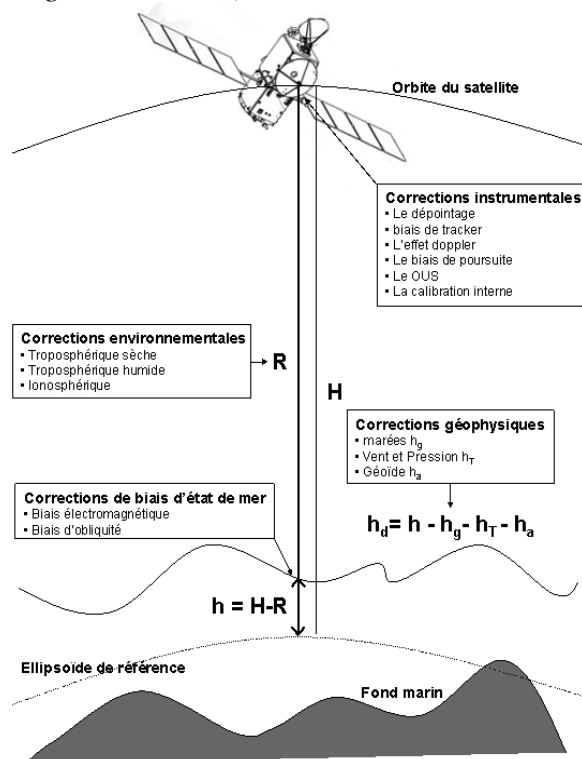


Figure 2.3: Termes correctifs de la mesure altimétrique (d'après Chelton et al., 2001).

Parmi les techniques spatiales d'observation de l'océan, l'altimétrie a une place à part car la hauteur de la mer mesurée intègre l'ensemble de la dynamique océanique présente dans la colonne d'eau, depuis la surface jusqu'au fond. En effet, les variations de topographie observées à la surface reflètent l'ensemble des changements de densité à l'intérieur de l'océan et de nombreux processus physiques ont donc une signature sur ce paramètre (expansion thermique, courants, ondes, tourbillons, etc...). Ceci explique qu'au cours des 20 dernières années l'altimétrie spatiale ait permis de formidables avancées en termes de connaissance de la dynamique océanique (Fu and Chelton, 2001). Ceci explique aussi qu'elle puisse être utilisée pour de nombreuses applications scientifiques tout aussi bien qu'opérationnelles.

Si l'altimètre est le seul capteur spatial qui nous fournit une vision intégrée de la dynamique interne de l'océan, il faut toutefois savoir interpréter les variations de hauteur de la mer observées pour exploiter ce type de mesure. En un point donné, la variabilité océanique est la conséquence de plusieurs processus physiques. Ceux observables par l'altimétrie spatiale sont uniquement ceux ayant une signature sur la topographie de surface. L'amplitude de cette signature doit par ailleurs être supérieure à la précision de la mesure (quelques cm). L'altimétrie étant une mesure nadir, la structure spatio-temporelle associée doit quant à elle être supérieure à la résolution des observations. Par exemple, sur la Figure 2.4, les traits pointillés indiquent la limite théorique de résolution d'une mission altimétrique telle que T/P ou Jason-1/2 qui ne peut observer complètement que les processus ayant une échelle spatiale supérieure à 300 km entre les traces et supérieure à quelques dizaines de kilomètres le long de la trace (Chelton, 2001). Différentes études (Le Traon et al., 2003 ; Pascual et al., 2006 ; Pujol et al., 2012) ont montré comment la combinaison de mesures provenant de plusieurs

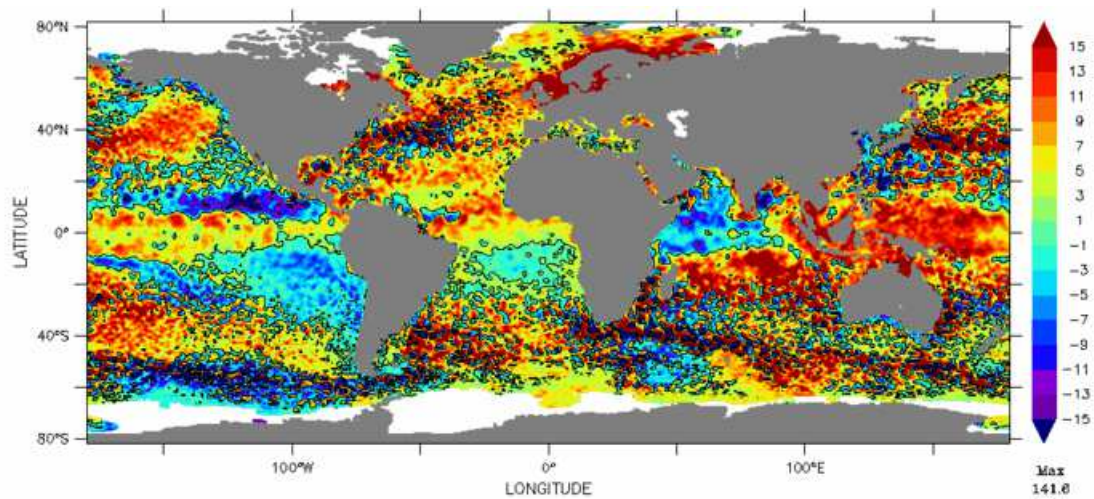


Figure 2.6 : Carte d'anomalies de hauteur de mer (en cm) estimées le 17 Décembre 2013 à partir des observations des satellites altimétriques JASON-2, Cryosat-2, HY-2 et SARAL/AltiKa (AVISO).

Pour interpréter des variations du niveau de la mer (SLA) comme celles observées sur la Figure 2.6 en terme de processus physique, il faut donc faire appel à des techniques d'analyse de données, notamment statistiques, plus ou moins sophistiquées, régionales ou globales. La démarche consiste généralement à identifier les caractéristiques d'un signal, à faire une hypothèse sur son origine puis à la vérifier. L'altimétrie ne fournit par ailleurs pas d'information sur la structure verticale des processus physiques détectés, ni sur les processus physiques d'échelle spatio-temporelle trop fine. Il faut alors s'appuyer sur des informations complémentaires : autres mesures spatiales et/ou in-situ, projection verticale/horizontale grâce à des modèles analytiques, statistiques ou numériques, assimilation de données.

Au cours des 17 dernières années j'ai été amenée à mettre en œuvre un certain nombre de ces techniques dans le but d'identifier et comprendre des processus océaniques différents dans des régions océaniques variées. Le chronogramme de la Figure 2.7 illustre la succession des approches méthodologiques que j'ai mises en œuvre dans mon activité de recherche (notez que cette répartition ne reflète que les méthodologies dominantes que j'ai utilisées à un instant donné). Sur la période de ma thèse (1996-1999), je me suis concentrée sur l'analyse d'observations spatiales altimétriques et in-situ et le développement d'un modèle analytique simplifié. Mes deux années passées à CLS ont concerné la projection verticale d'information altimétrique via un modèle statistique. La période 2002-2004 a été consacrée à l'assimilation de données dans un modèle numérique avec HYCOM, puis NEMO. Depuis 2005, j'ai à nouveau essentiellement travaillé sur l'analyse de données spatiales altimétriques, cette fois pour des applications scientifiques côtières. Les produits standards n'étant pas du tout adaptés pour ce type d'utilisation, une large partie de ces années a été consacrée à résoudre des problèmes techniques ou scientifiques afin de récupérer le maximum d'informations exploitables, à analyser les processus que l'on pouvait observer et comment (via des méthodes d'analyses adaptées). Au cours de cette période j'ai été amenée à utiliser conjointement à l'altimétrie d'autres types d'observations (spatiales et in-situ) et la modélisation numérique (sans assimilation cette fois) avec Symphonie. Cette phase à engranger une expertise solide sur le traitement et l'utilisation de l'altimétrie spatiale pour l'application non mûre qu'est celle de l'océanographie côtière a demandé un certain effort et s'est parfois faite au détriment du temps consacré à la publication d'articles scientifiques. Cependant, cette thématique de recherche n'en étant qu'à ses débuts, notamment grâce aux missions spatiales altimétriques de nouvelle génération juste lancées ou planifiées, cela me permet d'aborder sereinement mes perspectives de recherche dans les années à venir.

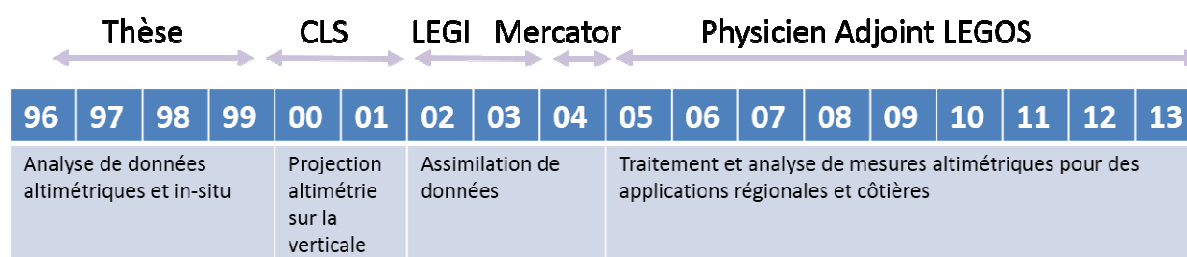


Figure 2.7 : Approches méthodologiques suivies au cours de mon parcours.

2.2 - L'altimétrie spatiale – un outil précieux pour analyser la dynamique de l'océan

L'altimétrie spatiale a été conçue initialement pour observer l'océan à l'échelle du bassin. Son utilisation pour étudier la circulation océanique méso échelle (phénomènes physiques d'échelle spatiale comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres et d'échelle temporelle comprise entre quelques jours et plusieurs mois) a été largement démontrée dans les années 1990 (*Morrow and Le Traon, 2008* par exemple pour avoir une revue). La méso échelle océanique intègre de fait une large gamme de processus physiques (tourbillons, vortex, fronts, jets et méandres des courants, filaments, ondes planétaires à moyenne latitude : cf. Figure 2.4) et joue un rôle très important dans le transport et la redistribution de chaleur et de matière sur la colonne d'eau et entre les différentes régions océaniques.

On peut utiliser directement les observations altimétriques faites le long de la trace des satellites, avec une résolution de ~6-7 km, c.à.d. relativement haute (même si le bruit de mesure limite en réalité la résolution à quelques dizaines de km). L'échantillonnage spatial et temporel est alors strictement réduit aux traces et dates de passage des différents altimètres en orbite et nécessite des méthodes d'analyse prenant en compte le caractère multi-missions (biais inter-missions et erreurs de mesure différentes notamment) et l'inhomogénéité spatiale et temporelle des observations. Une autre approche consiste à cartographier les observations altimétriques existantes sur une grille régulière. La méthode de loin la plus employée est l'Analyse Objective, adaptée de la météorologie à l'océanographie par *Bretherton (1976)*, puis à une approche altimétrique multi-mission par *Le Traon et al. (1998)*. Avoir les données altimétriques projetées sur des grilles régulières rend leur analyse bien plus aisée (voir un exemple Figure 2.8) ! Cependant il faut garder en mémoire que cela limite la résolution spatio-temporelle à quelques dizaines de jours et à ~100 km (on trouvera une quantification détaillée de comparaisons faites entre données altimétriques le long de la trace et grillées dans la thèse de Renaud Dussurget, 2012, que j'ai encadrée). Au début de ma thèse, j'ai été amenée à mettre en oeuvre une méthode d'analyse objective régionale pour cartographier les données des satellites T/P et ERS-1&2 (l'objectif était d'étudier la dynamique océanique de l'Océan Indien Sud Est sur les années 1992-1996). Rapidement par la suite, des cartes, calculées de manière globale au 1/3° sur une grille Mercator, avec une résolution temporelle de 7 jours ont été générées et distribuées par le service opérationnel Ssalto/DUACS (AVISO).

2.2.a - Variabilité océanique dans l'Océan Indien Sud Est (1996-1999) : une histoire d'ondes et de tourbillons.

Au moment où j'ai démarré ma thèse sur l'Océan Indien, celui-ci bénéficiait d'un intérêt grandissant de la part de la communauté océanographique internationale. Plusieurs particularités lui confèrent un caractère unique : l'absence de région océanique tempérée au

Nord de 25°N, une réponse saisonnière (et interannuelle) très importante au forçage par la mousson, la présence d'une voie d'échange à basses latitudes avec l'Océan Pacifique à l'Est, via les détroits indonésiens. *Godfrey* (1996) et *Reason et al.* (1996) ont montré que cette dernière n'est pas seulement une distinction locale intéressante, mais affecte la circulation océanique à grande échelle. Dans la région Sud-Est du bassin, une autre originalité tient à la dynamique du bord Est, le long des côtes australiennes, très différente de la situation classiquement observée au bord Est des autres bassins océaniques. En effet, le courant côtier (Courant Leeuwin) y circule vers le pôle, en totale opposition avec le forçage local par le vent, et on y note également l'absence d'upwelling. Dans cette thèse, notre objectif était d'accroître la connaissance de cette région océanique alors peu étudiée, ainsi que son rôle dans les échanges océaniques plus globaux. En particulier, nous voulions comprendre la façon dont les variations interannuelles de la bande tropicale (détroits Indonésien) sont advectées vers l'intérieur de l'Océan Indien via les ondes planétaires et le Courant Leeuwin. Un problème majeur venant de la faible couverture spatio-temporelle des observations de terrain dans la zone, nous nous sommes tout naturellement tourné vers les observations spatiales altimétriques. Notez que ce constat (et l'intérêt qui en résulte pour l'altimétrie spatiale) est encore vrai aujourd'hui pour de très nombreuses régions de l'océan mondial, peu ou non échantillonnées par des mesures in-situ (malgré les énormes progrès réalisés grâce aux programmes internationaux type ARGO).

Cette étude a confirmé l'existence d'une variabilité océanique importante dans cette région de l'océan (Figure 2.8). L'analyse des données altimétriques a montré la présence de deux bandes zonales de forte variance, légèrement orientées du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Une analyse spectrale a permis d'associer ces signaux 1) à des variations essentiellement annuelles et interannuelles vers 10°S et 2) à des variations quasi-semi-annuelles dominant les variations annuelles et interannuelles vers 20-35°S (*Morris and Birol*, 1998). Les caractéristiques temporelles et spatiales (longueurs d'onde de plusieurs centaines au millier de km), ainsi que les latitudes concernées désignaient les ondes planétaires (ondes de Rossby) comme origine potentielle des variations détectées. *Tokmanian and Challenor* (1993) ou *Schlax and Chelton* (1994) ont montré que ces ondes (notamment le premier mode barocline) étaient parfaitement observables par altimétrie car les variations de la thermocline ont une signature (par effet miroir) sur la topographie de surface de l'ordre de quelques centimètres. Ces ondes sont aussi marquées par des anomalies de température de surface, qui peuvent avoir une influence directe sur l'atmosphère locale. Les ondes de Rossby se propagent vers l'Ouest et cette caractéristique, ainsi que leur vitesse de déplacement, peut être déterminée de manière visuelle simple par l'extraction de diagrammes de Hovmuller des SLA (en considérant la pente distance/temps, cf. Figure 2.9). Ensuite la vitesse estimée peut être comparée à celle prédite par la théorie. On peut également utiliser des méthodes plus objectives comme la transformée de Radon (*Birol*, 1999).

En analysant les mesures altimétriques de cette région et de cette période, nous avons observé deux bandes zonales associées à un important niveau d'énergie cinétique et à une nette propagation vers l'ouest :

1) des ondes de Rossby essentiellement annuelles vers 10°S. Celles-ci avaient déjà été observées par *Perigaud and Delecluse* en 1992 avec les mesures du satellite Geosat. L'analyse des observations des missions T/P et ERS, plus longues et plus précises, confirmait leur existence.

2) des ondes quasi semi-annuelles dans la bande 20-35 S (*Morrow et Birol*, 1998 ; *Birol*, 1999). Ces signaux, discutés pour la première fois dans cette étude, étaient également marqués par une importante modulation interannuelle.

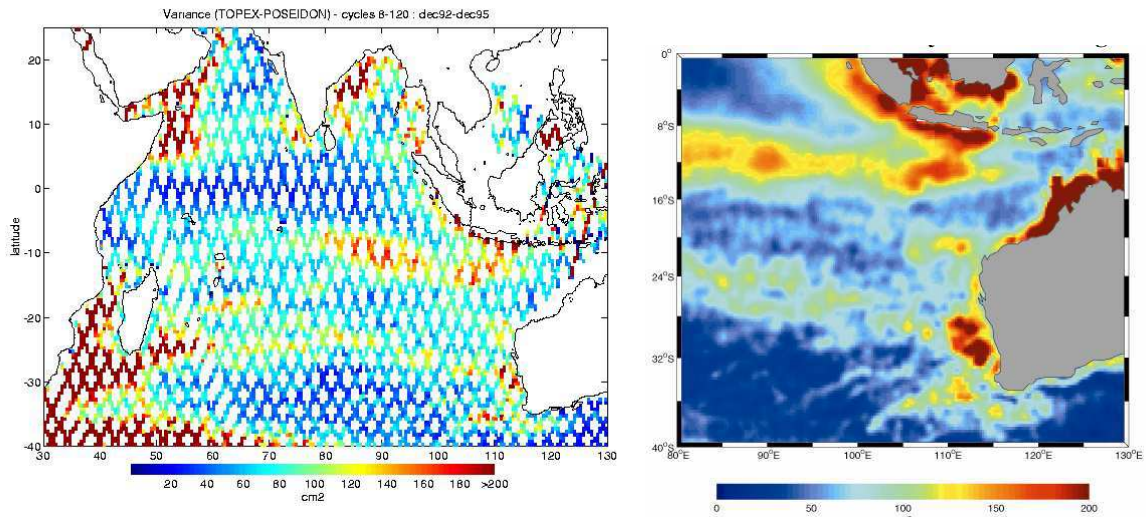


Figure 2.8 : A gauche) Variance en cm² du niveau de la mer vue par Topex/Poséidon pour la période 1992-1995 (données le long de la trace). A droite) Zoom de la variance (même unité) dans la partie Sud-Est de l'Océan Indien, vue par les altimètres Topex/Poseidon et ERS entre 1992 et 1997 (données grillées par analyse objective).

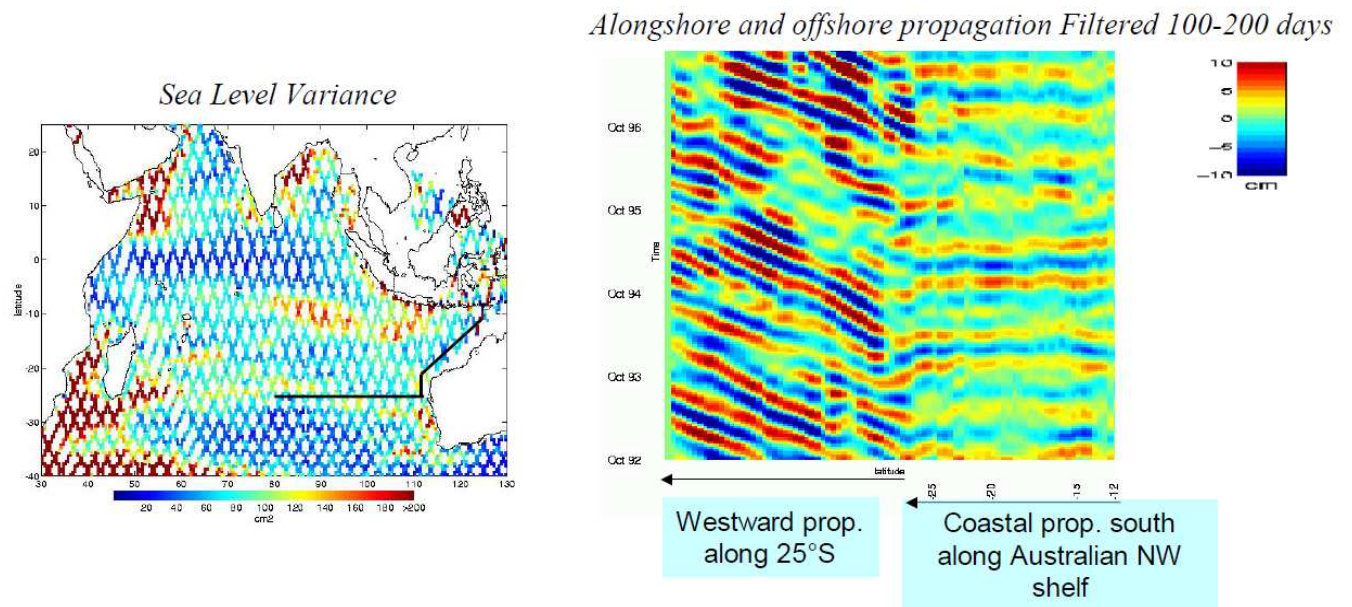


Figure 2.9 : A droite : Diagramme de Hovmuller des SLA (en cm) extraites entre Octobre 1992 et Octobre 1999 le long de la côte ouest australienne, puis à 25°S (entre la côte et 80°E). La zone géographique d'extraction est représentée par le trait noir indiqué sur la carte de variance de SLA de gauche.

Après nous être intéressées à la nature des signaux observés, nous nous sommes interrogées sur leur origine. Pour cela nous avons utilisé un modèle conceptuel intégrant deux types de forçages seulement : 1) le vent et 2) les conditions aux limites, soit séparément, soit simultanément. Les perturbations du niveau de la mer modélisées avec ce modèle à la physique simplifiée, ont été comparées aux observations altimétriques. Il est apparu que (Birol and Morrow, 2001) :

- le modèle simple forcé par le vent était capable de reproduire les ondes annuelles à 10°S avec un bon accord en phase et en amplitude, malgré un signal interannuel un peu trop faible (Figure 2.10). Par la suite il a également été montré la présence d'ondes intra-saisonnières, surtout liées aux instabilités du courant Equatorial Sud (Feng and Wijffels,

2002). Des ondes libres générées au bord Est, ainsi que des instabilités venant du détroit de Lombok au nord, semblent avoir une influence secondaire sur la zone (Biol, 1999).

- dans la bande 20-35°S, la réponse au forçage du vent local devient par contre négligeable (Figure 2.10). Le signal observé est en phase avec un signal quasi semi-annuel se propageant vers le sud tout le long de la côte australienne (Figure 2.9) puis librement au large depuis le bord Est du bassin.

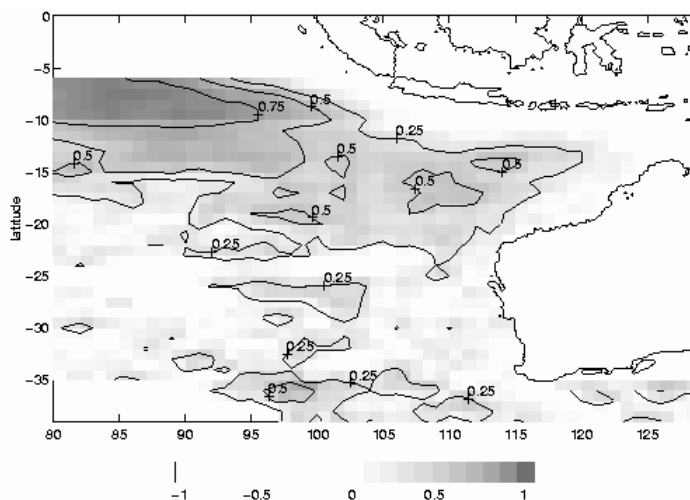


Figure 2.10 : Corrélation entre les anomalies de topographie de la mer simulées par un modèle simple forcé par le vent uniquement et les SLA observées par altimétrie entre 1992 et 1997.

Pour aller plus loin dans la compréhension des causes et conséquences du signal semi-annuel observé entre 20-35°S et qui est d'ailleurs observé sur toute la largeur du bassin Indien (Figure 2.8), nous avons utilisé les données in-situ disponibles (hydrographiques, marégraphiques, XBT et courantométriques), et les sorties d'un modèle numérique (POCM) en complément de l'altimétrie (Biol, 1999 ; Biol and Morrow, 2003). Les résultats ont montré la présence d'un signal quasi semi-annuel se propageant depuis l'Indonésie le long la côte NW de l'Australie sous forme d'une onde piégée à la côte (Figure 2.11). Ce signal est en avance de phase d'un mois par rapport au vent local, ce qui signifie qu'il n'est pas forcé localement. Potemra (2001) utilisant le modèle POCM a montré que ces anomalies semi-annuelles étaient probablement forcées par des vents du Pacifique équatorial, ayant une forte composante semi-annuelle et se propageaient ensuite via les détroits d'Indonésie dans la forme d'ondes côtières.

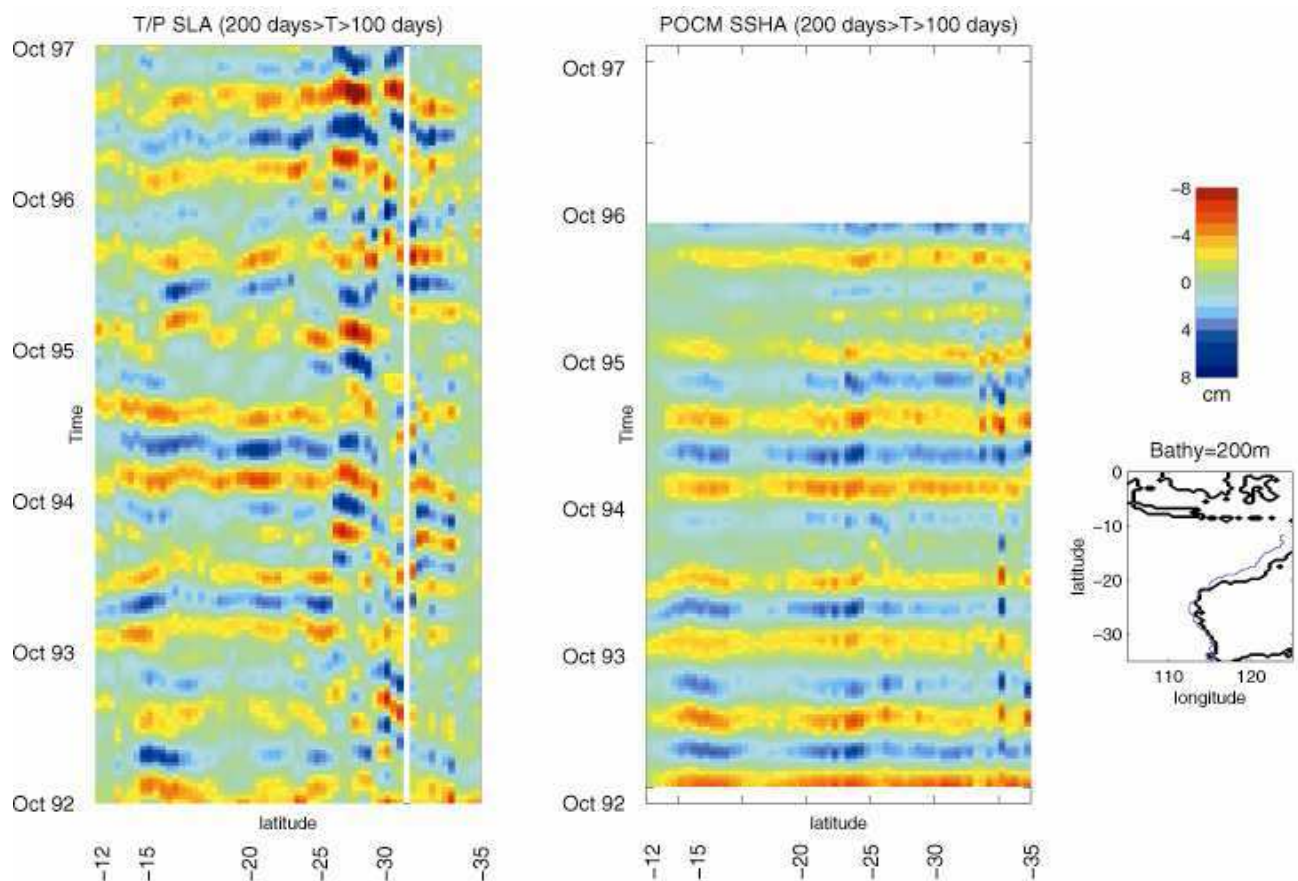


Figure 2.11 : Propagation des anomalies du niveau de la mer le long la côte ouest d'Australie, entre 12°S et 35°S, filtrées pour garder la période quasi annuelle entre 100-200 jours. A gauche, les données altimétriques, à droite, d'un modèle numérique (POCM).

La structure verticale des anomalies semi-annuelles observées à la côte (et donc leur nature exacte) s'est avérée difficile à décrire en raison du très faible nombre de mesures in-situ alors disponible (limité à quelques sections hydrographiques, des marégraphes côtiers et une ligne de courantmètres). Il nous a cependant semblé que ces ondes côtières semi-annuelles entraînent en interaction complexe avec le courant de Leeuwin à partir de 22°S (changement de vitesse de propagation notamment), ce qui pouvait avoir pour résultat de générer des méandres et instabilités plus au sud. Ceux-ci semblaient ensuite parfois se séparer du courant et se propager vers l'ouest avec une période quasi-semi-annuelle (*Birol, 1999 ; Birol and Morrow, 2003*).

La question que nous nous sommes posée à la fin de cette thèse était de savoir si les anomalies de niveau de la mer observées au large étaient toujours des ondes de Rossby, ou bien pouvaient être des vortex isolés se propageant vers l'ouest à une vitesse proche de celle des ondes de Rossby. La différence est très significative car si les ondes impliquent un transfert d'énergie, les tourbillons peuvent entraîner un transport de masse, de sels nutritifs, et de chaleur sur des distances importantes, en l'occurrence ici de l'Est vers l'Ouest de l'Océan Indien. Dans *Birol and Morrow (2003)*, nous avons suggéré que, au sud de la latitude critique pour l'existence des ondes de Rossby semi-annuelles linéaires (27°S), les anomalies observées dans l'altimétrie pouvaient être essentiellement des vortex non linéaires, générés à une fréquence quasi semi-annuelle par l'interaction entre ondes côtières et le courant de Leeuwin (via des mécanismes d'instabilité barotrope ou barocline).

Pour vérifier cette hypothèse, en Septembre 2000, nous avons participé à la campagne à la mer TIP2000. Notre objectif était mesurer la structure verticale des anomalies de niveau

de la mer détectées par satellite. Si les anomalies de hauteur de mer observées étaient des tourbillons, elles devaient être associées à des caractéristiques différentes de celles des masses d'eaux environnantes. Mais comment être sûr d'observer un tourbillon pendant une campagne à la mer ? Un des avantages de l'altimétrie étant d'être opérationnelle, nous nous sommes servis de ces observations transmises à bord par les équipes d'AVISO pour piloter la stratégie de mesure et de prélèvement. Cette démarche s'est avérée efficace (alors et depuis également pour de nombreuses campagnes océanographiques) : pendant TIP 2000, nous avons fait 4 sections hydrographiques qui ont traversé 3 structures s'étant révélées être effectivement 3 tourbillons anti-cycloniques. Des études ont ensuite montré qu'ils se propagent dans l'océan Indien Est (*Fang and Morrow, 2003*), mais également de l'autre côté du bassin (*Palastanga et al., 2007*).

Les caractéristiques de ces vortex (nombres en fonction du temps, durée de vie, chemin de propagation, quantités de chaleur et de sel transportées, ...) ont ensuite été étudiées en détails par *Morrow et al. (2003)*, *Fang and Morrow (2003)* et *Fieux et al. (2004)*, non seulement en utilisant les mesures faites lors de TIP2000, mais également les données altimétriques (l'objectif étant de comparer les tourbillons mesurés in situ avec ceux observés sur une période bien plus longue). Leur importance dans la redistribution de chaleur a été confirmé (*Morrow et al., 2003*).

En suivant les trajectoires des anti-cyclones de l'Océan Indien Sud Est avec l'altimétrie, *Fang and Morrow (2003)* ont montré qu'ils ont tendance à se propager vers l'ouest et vers l'équateur. Cette observation nous a incité par la suite à analyser si ce comportement était une caractéristique générale de ces structures et si les cyclones se comportaient de manière différente. Nous avons étudié les tourbillons dans 3 différentes zones de bord Est, toujours à partir des mesures altimétriques : dans l'Indien sud-est, mais également dans l'Atlantique sud-est, et dans le Pacifique nord-est. Différentes techniques existent afin de détecter et suivre des tourbillons océaniques sur des cartes de SLA (basées sur leurs propriétés statistiques ou non). Parmi elles, nous avons utilisé l'approche d'*Isern-Fontanet et al., 2003*:

- de la pente de la topographie de surface déduite des cartes altimétriques de SLA, en assumant l'hypothèse géostrophique, on déduit un champs de vitesses 2D (u,v) ;
- on cherche à déterminer les régions elliptiques où la rotation l'emporte sur la composante de déformation du champ de vitesse. On utilise en pratique le paramètre

$$Q = -\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \text{ (équivalent à celui d'Okubo-Weiss) ;}$$

- on utilise une technique de suivi automatique des structures détectées d'une carte à la suivante. Dans notre cas, on définit simplement un rayon de recherche possible autour du cœur du vortex identifié, basé sur des valeurs réalistes de vitesse de propagation des structures tourbillonnaires.

Si $Q > 0$ et a une valeur significative (à définir en fonction des zones considérées), la rotation l'emporte et on peut associer localement un vortex au champ de SLA. Il est possible de dériver plusieurs caractéristiques des tourbillons une fois ceux-ci détectés : amplitude, vitesse, durée de vie, trajectoire, ... Cependant il faut garder en mémoire que, comme toutes les méthodes statistiques, celle-ci possède certaines limitations. Tout d'abord, la rotation peut l'emporter sur la déformation ailleurs que dans les centres de rotation des tourbillons. D'autre part, le paramètre Q nécessite le calcul de dérivées secondes au carré à partir des cartes de SLA : de très faibles erreurs et/ou discontinuités dans les observations peuvent engendrer de grosses erreurs dans le résultat (d'autant plus que l'amplitude des structures recherchées est faible). Il est recommandé de l'utiliser plutôt dans des régions où les tourbillons sont assez énergétiques, ce qui est le cas dans les zones analysées dans cette étude.

Dans les régions étudiées, caractérisées par la présence de tourbillons assez énergétiques et des courants moyens faibles, les anticyclones ont tendance à se propager vers l'équateur et les cyclones vers les pôles (Figure 2.12). *Morrow et al.* (2004) suggèrent que la théorie simple de *Cushman-Roisin* (1994) de propagation d'un vortex sur un plan- β peut expliquer cette divergence. Cependant, d'autres mécanismes sont également à considérer pour comprendre la propagation des tourbillons. Par exemple, *Le Cann et al.* (2005) ont montré que dans l'Atlantique Nord-Est, la direction préférentielle des tourbillons était surtout contrainte par la bathymétrie et les courants moyens, plutôt que par la divergence liée à l'effet- β .

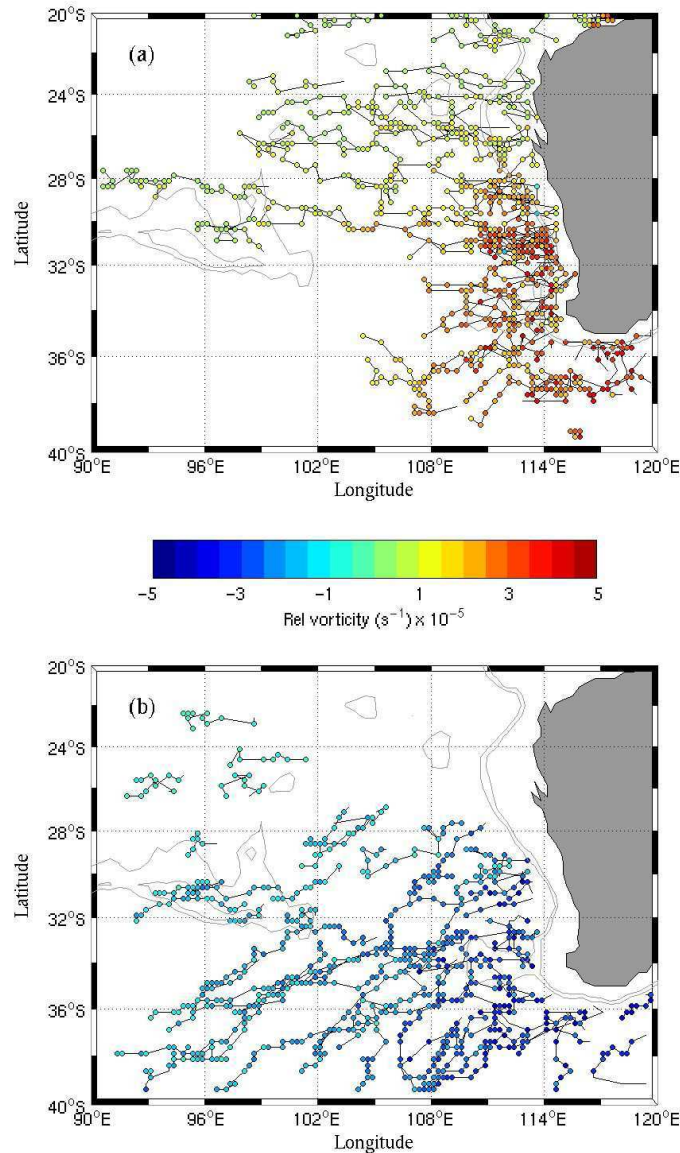


Figure 2.12 : Trajectoires des a) anti-cyclones et b) cyclones dans l'océan Indien sud. Leur vorticité relative est représentée par un cercle en couleur tous les 10 jours le long de leur trajet.

Il y a eu depuis bien d'autres études globales ou régionales sur les tourbillons à partir de mesures altimétriques, utilisées seules ou conjointement à d'autres observations et/ou modèle d'océan. *Chelton et al.* (2007) ou plus récemment *Chelton et al.*, (2011) ont appliqué de manière globale une technique de suivi des tourbillons à partir de mesures altimétriques similaire à la notre (Figure 2.13). Leurs résultats confirment notre étude : hors de la région équatoriale, les tourbillons montrent une nette divergence. Ils semblent aussi étayer notre

«vieuse» hypothèse concernant la dynamique de l’océan Indien sud : aux moyennes et hautes latitudes (au-delà de $\sim 25^\circ$), la propagation vers l’ouest des anomalies observées par altimétrie serait attribuée, au moins partiellement, à la présence de tourbillons non linéaires plutôt qu’à des ondes de Rossby linéaires. Les ondes planétaires de Rossby se propagent vers l’Ouest avec des vitesses qui dépendent de la latitude. Prévues par la théorie et observées de manière sporadique, il a fallu attendre l’altimétrie spatiale pour les observer de manière détaillée. Plusieurs études ont cherché à expliquer pourquoi les anomalies du niveau de la mer observées par altimétrie se propagent vers l’ouest nettement plus vite que ne le prévoit la théorie linéaire des ondes de Rossby (*Chelton and Schlax, 1996 ; Killworth et al., 1997*). Cela pourrait bien être du à la présence de très nombreux vortex non linéaires à certaines latitudes. Les implications sur les bilans de chaleur sont bien entendu très importantes, entre autre pour les échanges méridiens.

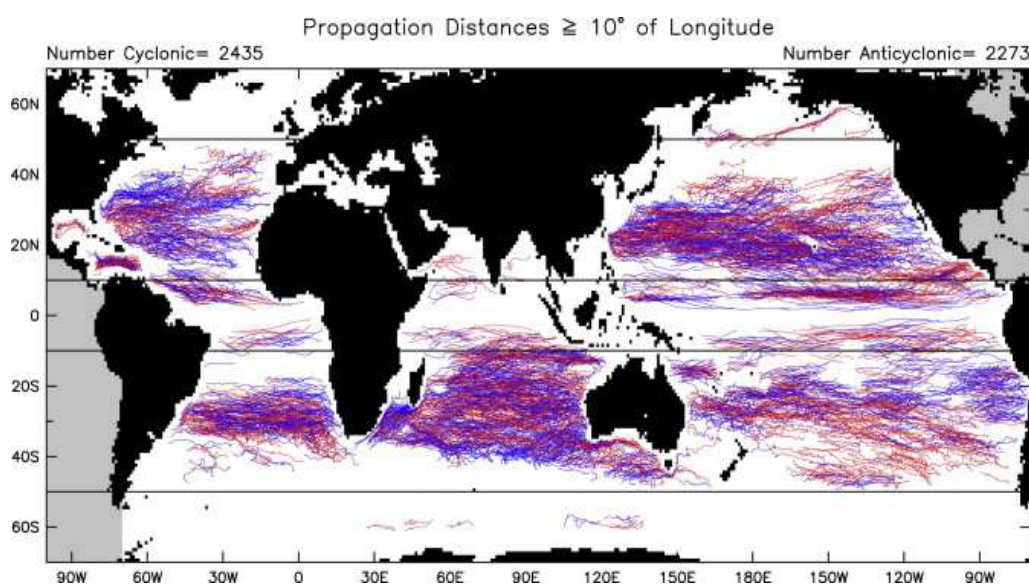


Figure 2.13 : Trajectoires des cyclones (en bleu) et des anticyclones (en rouge) détectés dans les cartes altimétriques de SLA entre Octobre 1992 et Décembre 2008. Seules les structures dont la durée de vie est supérieure à 16 semaines et qui se propagent sur une distance supérieure à 10° de longitude sont conservés. *Chelton, et al. (2011)*.

L’étude des ondes planétaires et des tourbillons est un sujet de recherche très actif, aussi bien du côté des observations, de la modélisation, que de la théorie (par exemple, les projets LATEX, SMOC, EPIGRAM, ...). Il faut dire qu’elle a bénéficié de la nette augmentation de la résolution spatiale des modèles numériques d’océan et du nombre de mesures in-situ, notamment ARGO, depuis une dizaine d’années. Je dois cependant avouer que mon intérêt suivi pour ce sujet, dans l’Océan Indien comme dans les autres bassins, s’est arrêté là pour le moment. Il m’est pourtant arrivé (et il m’arrivera certainement dans l’avenir) de m’y intéresser de manière plus ponctuelle, notamment dans la thèse de Renaud Dussurget. Beaucoup de tourbillons naissent au niveau des bords Est, notamment créés au niveau des forts cisaillements des courants côtiers. On remarque pourtant sur la Figure 2.13 que, dans l’Atlantique Nord Est, au large du Golfe de Gascogne, ceux-ci semblent apparaître au large. Or différentes études régionales ont montré l’existence de vortex bien plus près de la côte dans cette zone (*Pingree and Le Cann, 1992; Garcia-Soto et al. 2002; Sanchez and Gil, 2004*). Cela a motivé toute une étude sur la limite d’observabilité de l’altimétrie actuelle sur laquelle je reviendrai plus loin dans la section 2.3.

2.2.b - D'une observation 2D de l'océan avec l'altimétrie à une analyse 3D multi-données

Comparativement aux mesures in-situ, l'utilisation de mesures spatiales offrent de nombreux avantages : couverture spatio-temporelle relativement bonne (bien que la qualité de celle-ci dépende du processus physique considéré), répartition quasi-globale (y compris dans des zones difficiles d'accès), synopticit , homog n sation des observations relativement facile à atteindre, accès facile et rapide à des données calibrées et précises. Par rapport aux autres observations spatiales de l'océan, l'altimétrie a l'intérêt supplémentaire de contenir une information sur la structure verticale de la colonne d'eau et non juste sur l'état de la surface de la mer. C'est pour cette raison que, comme illustré dans la section précédente, elle est si utile à la compréhension de la dynamique océanique. Cependant, l'information qui nous intéresse n'est accessible que de manière intégrée depuis l'espace. La structure thermohaline verticale de l'océan, indispensable pour pouvoir estimer plus directement et plus précisément l'origine physique des signaux observés à la surface, n'est fournie que par des mesures in-situ qui présentent le gros inconvénient d'être très  pars es dans l'espace et le temps.

C'est pour tenter de tirer au mieux partie des avantages respectifs des données altimétriques et des mesures in-situ de température et salinité que nous nous sommes lancé en 2000 dans un des premiers projets d'analyse combinée de données océanographiques in-situ et spatiales : le projet ARMOR pour « Analyse de Routine Multivariée des Observations MERCATOR ». Ce projet, ambitieux pour l'époque étant donné le faible nombre de mesures in-situ alors faites en routine, a été réalisé à CLS avec la collaboration de Pierre de Mey (LEGOS). L'objectif était de développer à la fois des méthodes d'inter-comparaison et de combinaison optimale de données océanographiques (in-situ et spatiales) et de les opérer en routine dans le cadre du projet MERCATOR (  la fois pour analyser les observations en entrée du système d'assimilation et pour des objectifs de validation de modèles numériques). Plus précisément, il s'agissait de (cf. Figure 2.14) :

- ✓ Quantifier la compatibilité de l'altimétrie et des mesures in-situ (estimation de la composante barotrope, contenu de la mesure, statistiques d'erreur).
- ✓ Diagnostiquer d'éventuels problèmes sur les données.
- ✓ Calculer une analyse tridimensionnelle de l'océan indépendante de tout modèle.

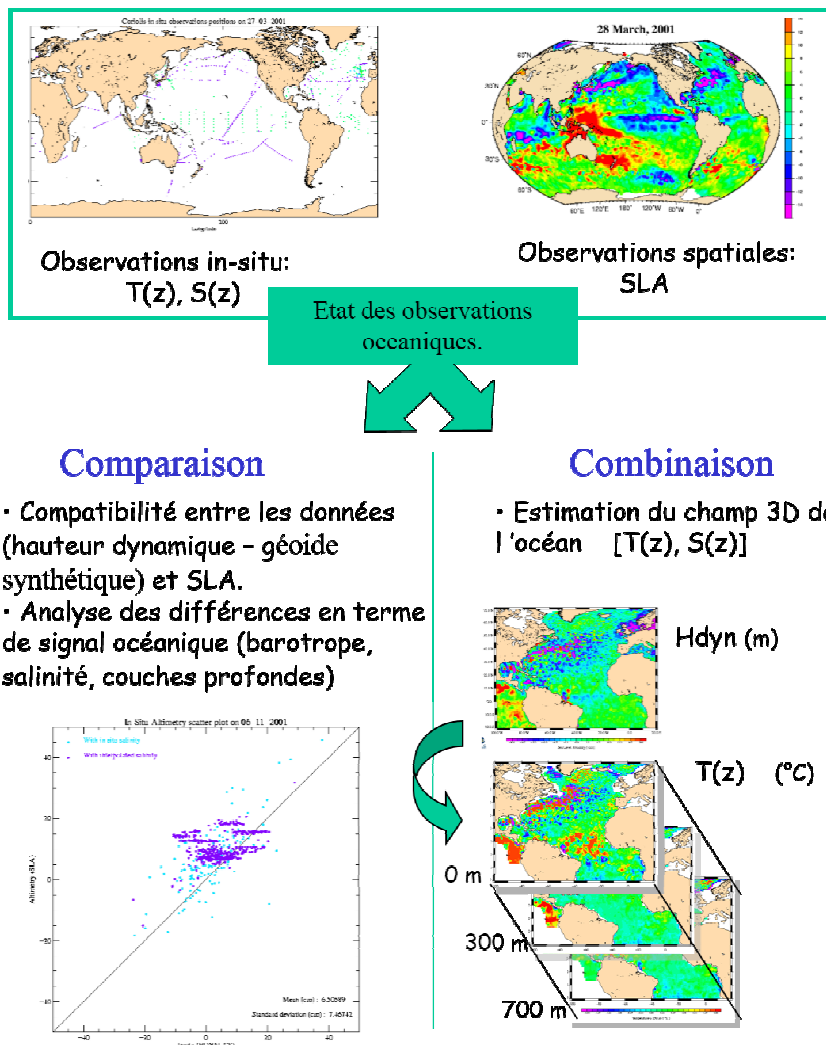


Figure 2.14 : Illustration des objectifs du projet ARMOR.

Au-delà de l'intérêt du projet pour tenter d'accéder de manière indirecte à des informations 3D sur l'état de l'océan à partir d'observations spatiales opérationnelles, celui-ci explorait des problèmes communs à ceux des méthodes d'assimilation multi-données et multivariées, dont l'utilisation était alors envisagée (dans le cas de MERCATOR, ce type de technique n'a été implémentée en opérationnel qu'en 2005, avec des outils d'ailleurs très proches de ceux utilisés ici). La variabilité verticale de la structure thermohaline était d'abord analysée à partir d'un jeu de mesures historiques (les profils individuels des climatologies *Reynaud et al.*, 1998, puis Levitus) en terme de fonctions empiriques orthogonales (EOFs) multivariées (Figure 2.16). Un premier problème consiste à définir un vecteur d'état X qui soit représentatif de la variabilité du système considéré : la température et la salinité sur la verticale dans notre cas. Ensuite, si on veut espérer relier les mesures altimétriques et l'état de l'océan sur la verticale, il s'agit d'examiner l'observabilité des modes dominants des EOFs à partir de l'altimétrie (en comparant la hauteur dynamique correspondante aux modes verticaux dominants les variations thermohalines aux hauteurs de la mer spatiales). Un autre objectif étant de réduire l'ordre du problème d'estimation (problème central des schémas d'assimilation de données océaniques), il faut analyser la représentativité physique de chaque mode de variance. Les résultats de thèse de Pascal Faucher (*Faucher et al.*, 2002), montrant que le premier mode EOF vertical calculé à partir de profils historiques de température et de salinité pouvait expliquer une partie significative de la variabilité de la hauteur dynamique de surface de l'Atlantique Nord a d'ailleurs été un facteur motivant ce projet.

D'un point de vue formalisme mathématique, on cherche en chaque point, à estimer l'état de l'océan X à partir d'observations Y de divers types (SLA, température T , salinité S). La première étape consiste à choisir les paramètres du système les plus appropriés pour définir le vecteur d'état X .

$X^T = [T1, T2, \dots, Tk, S1, S2, \dots, Sk]$ avec k niveaux sur la verticale.

$Y^T = [SLA1, SLA2, \dots, Ti(z), Tj(z), \dots, Si(z), Sj(z), \dots]$, p observations.

La solution s'écrit: $Xa = Xe + BeH^T (HBeH^T + R)^{-1} (Y - HXe)$, avec:

B : matrice de covariance entre les variables d'état ($B = \langle XX^T \rangle$), H : opérateur d'observation, R : covariance d'erreur d'observations, Xe : ébauche (climatologie Levitus mensuelle dans notre cas) et Xa : analyse.

Pour résoudre le problème, il faut connaître les covariances B entre les variables d'état. En pratique, on utilise une approximation pour modéliser B , basée sur une connaissance à priori du comportement statistique du système. En l'occurrence ici, on se sert des modes dominants la variabilité thermohaline sur la verticale (EOFs 1D) calculés au préalable à partir des profils de la base de données LEVITUS (Figure 2.15). Le recours aux EOFs permet de réduire l'ordre du problème d'estimation (proportionnellement au nombre de modes choisis, d'où l'intérêt qu'un minimum de ceux-ci soit représentatif de la plus grande partie possible de la variabilité océanique).

On obtient alors :

$Xa = Xe + S^{-1} BeHr^T (HrBeHr^T + Rr)^{-1} (Y - HXe)$ avec :

Indice r : état réduit et S : opérateur de simplification

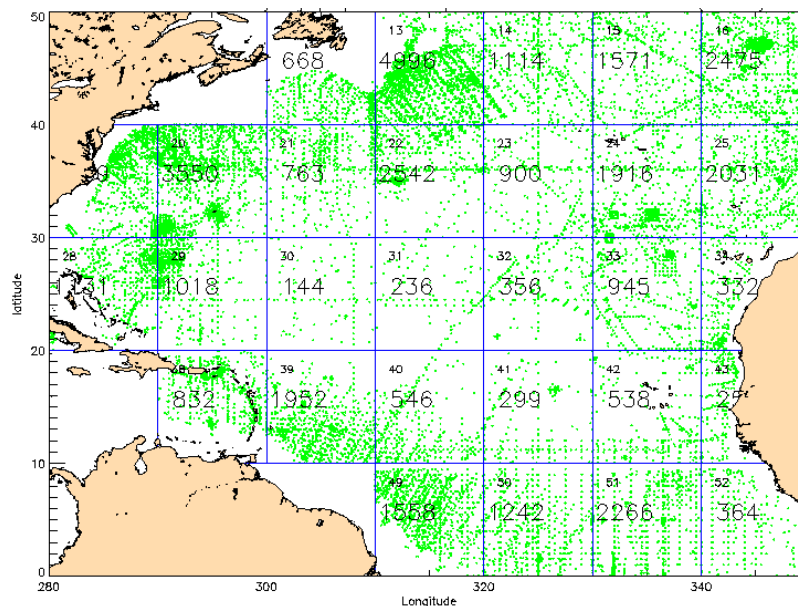


Figure 2.15 : Répartition géographique des profils verticaux long (>1000m) de la climatologie LEVITUS utilisés pour le calcul des EOFs du projet ARMOR (calculées par boîte glissante de $10^\circ \times 10^\circ$).

Nous nous sommes focalisés pour cette étude sur l'Atlantique Nord et Tropical. Après différents tests, l'approche que nous avons retenue parce qu'elle permettait de mieux prendre en compte les spécificités de chaque type d'observation considéré (contenu physique, répartition géographique, erreurs, etc.) consistait en 2 étapes :

- 1) projection de l'altimétrie sur la verticale (données grillées) et dans l'état réduit,
- 2) interpolation sur l'horizontale et dans l'état réduit des pseudo-profiles issus de l'étape 1 et des profils observés.

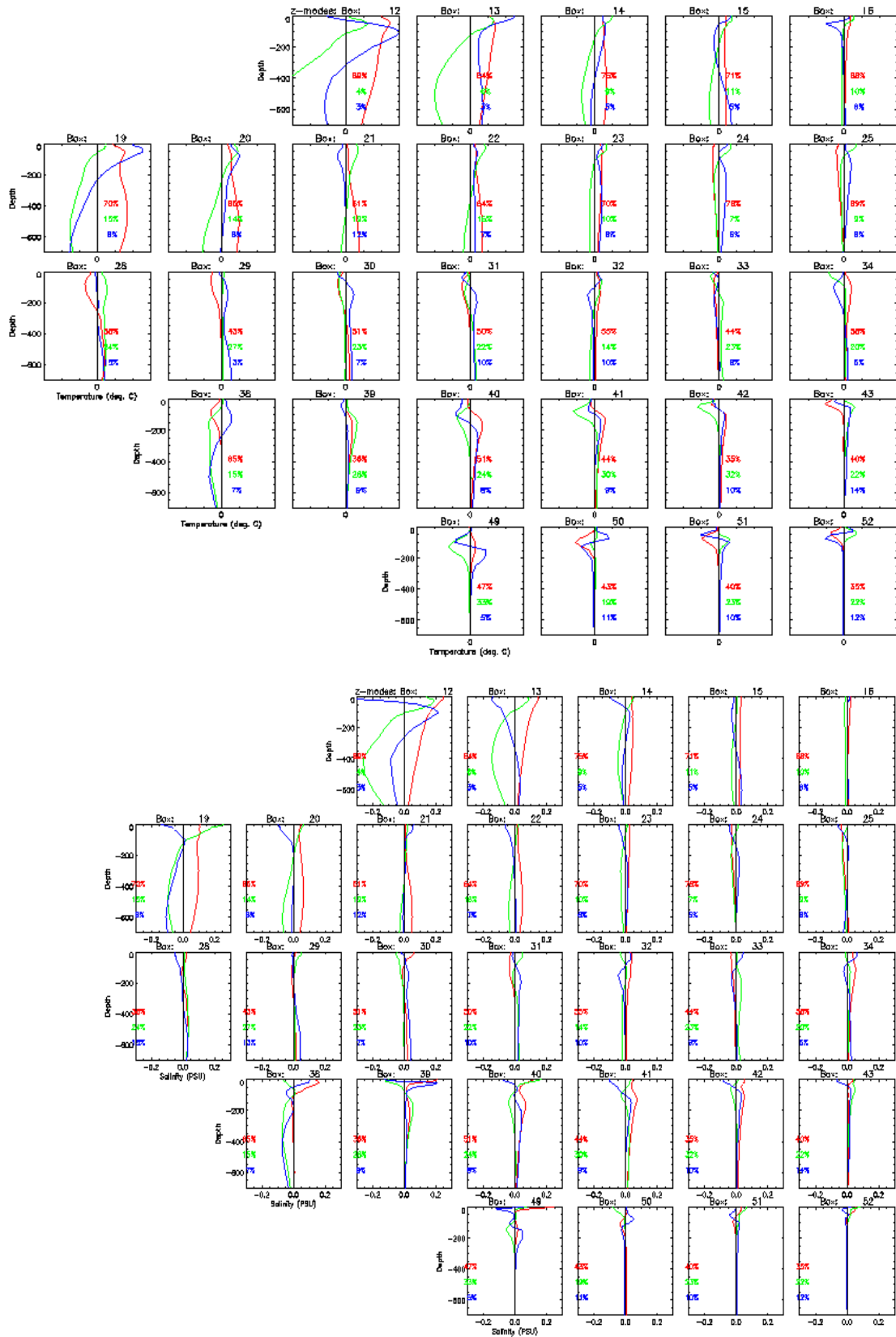


Figure 2.16 : Structure verticale en température (en haut) et en salinité (en bas) des 3 premiers modes EOFs calculés à partir des profils verticaux long (>1000m) de la climatologie LEVITUS (calculées par boîte glissante de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$).

- Au cours de cette étude, nous nous sommes heurtés à un certain nombre de difficultés:
- ✓ la mauvaise répartition spatio-temporelle des observations utilisées pour calculer les EOFs (Figure 2.15),
 - ✓ la médiocre représentativité des modes dominants en termes de hauteur dynamique (mauvaises propriétés d'observabilité) dans de nombreuses zones (en dehors des régions de fort courant en gros),
 - ✓ la difficulté d'interprétation physique et donc de validité des modes empiriques obtenus,
 - ✓ des problèmes entre informations physiques contenues dans les diverses observations, les fortes différences de distribution spatiale entre types d'observations et le manque de données in-situ (cf. l'analyse ARMOR de la Figure 2.17).

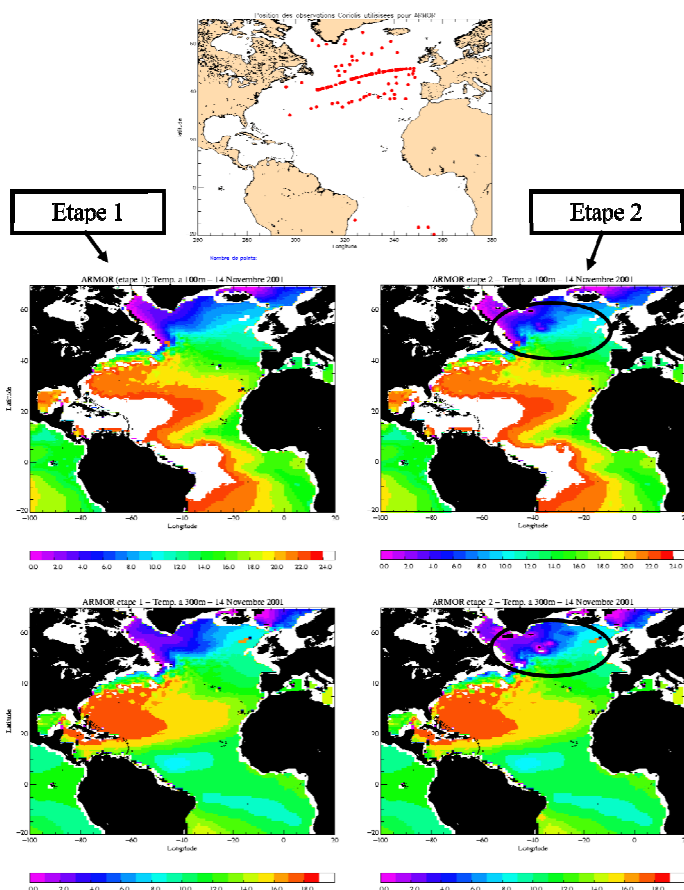


Figure 2.17 : Analyse ARMOR du 14 Novembre 2001 – exemple de la température à 100m. La carte du haut indique la position des observations in-situ disponibles pour cette analyse (origine : CORIOLIS).

Ces difficultés ont été néanmoins très instructives. Dans l'absolu on sait/peut combiner des données in-situ et altimétriques (et des mesures spatiales en général) mais à condition de s'assurer au préalable 1) de la bonne cohérence entre les observations et/ou de savoir les ramener à des contenus physiques similaires, 2) d'une prise en compte des spécificités de chaque type de mesure (résolution spatio-temporelle et précision notamment), 3) d'un nombre suffisant de chaque type d'observation dans la région considérée et 4) de baser l'analyse sur une information (statistique ou numérique) réellement représentative de la variabilité physique du système. Ces constatations finalement assez simples m'ont beaucoup servi dans la suite de mon travail (et me servent encore régulièrement aujourd'hui !) lorsque j'utilise plusieurs outils méthodologiques (et pas seulement les observations) pour étudier un

problème scientifique. Depuis la période où nous avons démarré ce projet (2000), le nombre de profils verticaux mesurant l'état physique de l'océan a considérablement augmenté (Figure 2.18), notamment grâce au programme Argo fournissant de plus en plus de données depuis 2002 (plus de 3000 flotteurs en service depuis novembre 2007, délivrant ~100000 profils par an). Cela change bien évidemment fondamentalement les données du problème à traiter. Le système ARMOR est né de cette étude et est devenu opérationnel dès 2001, dans le cadre du projet Mercator (Larnicol et al., 2006). Son développement s'est poursuivi dans le cadre du projet MyOcean. C'est aujourd'hui encore un système opérationnel qui fournit indépendamment de tout modèle numérique une estimation de champs 3D de température et de salinité de l'océan (par combinaison de mesures altimétriques, de profils de température et de salinité, de climatologie et de température satellite de surface de la mer). Ces analyses servent à diverses études sur le climat (Lombard, 2005, Dhomps, 2010) ou à valider les systèmes d'assimilation océaniques (MERCATOR notamment). Elles permettent également d'analyser le contenu de la mesure altimétrique (cf. rapports annuels de validation de données altimétriques par comparaison aux profils in-situ Argo).

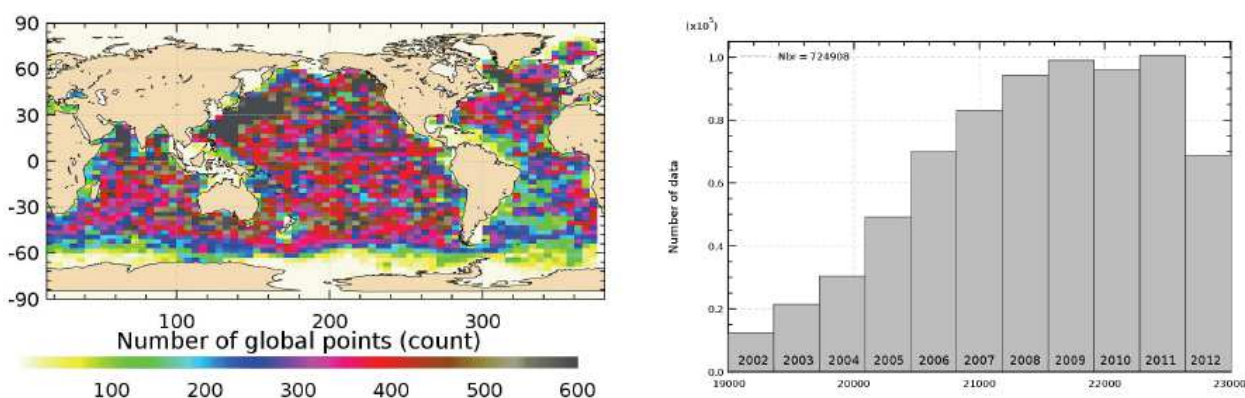


Figure 2.18 : Distribution spatiale (gauche) et temporelle (droite) des profils de température et salinité ARGO depuis 2002 (d'après le rapport SALP-RP-MA-EA-22176-CLS, Valladeau G. , 2012).

2.2.c Comment combiner de manière cohérente les informations fournies par les observations altimétriques et in-situ ? Le cas de l'assimilation multivariée.

Les limitations rencontrées en analysant la physique de l'océan, complexe, non-linéaire et turbulent, uniquement à partir d'observations, fussent elles de plusieurs types, et de modèles statistiques (pour représenter les mesures manquantes) m'ont amené à m'intéresser tout naturellement aux modèles numériques. Ceux-ci présentent l'avantage d'être construits sur des équations qui ne sont certes qu'une approximation de la réalité, mais qui sont basées sur des théories rendant le problème compréhensible.

Dans un contexte où le domaine de l'océanographie opérationnelle était en plein développement, j'ai cherché à compléter mon expérience sur la combinaison de données océaniques en utilisant cette fois la physique apportée par les modèles. Dans le cadre du projet européen TOPAZ (« *Towards an Operational Prediction system for the North Atlantic European coastal Zones* », financé par l'Europe depuis 2002), suite du projet DIADEM, j'ai rejoint alors l'équipe du LEGI, responsable du développement d'un module d'assimilation multivarié (prenant en compte simultanément des observations spatiales et in situ) et de son

implémentation dans le modèle d'océan HYCOM (Bleck, 2002). Les deux projets européens DIADEM et TOPAZ visaient à mettre en place un système pré-opérationnel de prévision océanique, physique et biologique, couvrant le domaine de l'Atlantique Nord, des mers nordiques et du bassin arctique afin d'améliorer le potentiel européen en matière d'océanographie opérationnelle et de management des écosystèmes marins. DIADEM avait pour objectif de mettre en œuvre l'algorithme du filtre SEEK (Singular Evolutive Extended Kalman filter) développé au LEGI (Pham *et al.*, 1998) avec le modèle d'océan MICOM sur le domaine de l'Atlantique Nord. TOPAZ reposait sur les avancées scientifiques de DIADEM (Brankart *et al.*, 2003) avec les objectifs supplémentaires :

- 1) d'intégrer au système opérationnel un nouveau modèle numérique (HYCOM) utilisant une coordonnée verticale hybride,
- 2) de développer un module d'assimilation multivarié basé sur le filtre SEEK, de façon à prendre en compte simultanément des observations spatiales et in situ de type ARGO et,
- 3) de poursuivre l'expérience de prévision océanique en temps réel sur le bassin Atlantique Nord initiée dans DIADEM.

Ces projets regroupaient, outre le LEGI, des partenaires norvégiens (G. Evensen et L. Bertino, NERSC), allemands (AWI) et français (CLS). Ils reposaient également sur le support en expertise des modélisateurs de l'Université de Miami (E. Chassignet). Ils couvraient l'Océan Atlantique Nord et Tropical.

Le modèle HYCOM a été élaboré à partir du modèle à coordonnées isopycnales MICOM, en introduisant la notion de coordonnée "hybride" qui tire parti des avantages de chacune des coordonnées traditionnelles. Isopycnale dans les régions stratifiées de l'océan hauturier, elle se transforme en coordonnée sigma en région côtière peu profonde et suit les niveaux z dans la couche de mélange océanique et dans les zones faiblement stratifiées (cf. Figure 1 de Birol *et al.*, 2004). De cette manière, le modèle prend en compte l'hétérogénéité des propriétés marines dans la colonne d'eau. La configuration utilisée dans le cadre du projet, couvrant l'Atlantique Nord et Tropical (28°S-70°N) d'une résolution au 1/3° (tout à fait classique au début des années 2000) et avec 26 couches hybrides sur la verticale, avait été développée à l'université de Miami (Chassignet *et al.*, 2003).

Le filtre SEEK est une version du filtre de Kalman étendu, dans lequel la propagation de l'erreur de prévision est réalisée dans un espace de dimension réduite. Cet espace est défini initialement à partir d'une analyse en fonctions empiriques multivariées tridimensionnelles (EOFs 3D) de la variabilité du modèle. Pour limiter l'effet de la réduction d'ordre, une paramétrisation locale de la covariance de l'erreur d'ébauche s'est avérée nécessaire dans une configuration aussi complexe que celle de TOPAZ. Le filtre SEEK est multivarié dès lors que l'espace d'estimation contient différentes variables corrélées (Figure 2.19). Le passage à l'assimilation multivariée, de plus dans un modèle à coordonnée verticale changeante, n'a pas été trivial pour autant. Il s'agissait d'abord de choisir un espace d'estimation qui puisse garantir une estimation statistique robuste (dans notre étude, il incluait la température, la salinité, les épaisseurs de couches et l'élévation de surface). Une autre difficulté était d'estimer correctement les covariances entre variables observées et non observées. On était d'autre part face aux mêmes problèmes que ceux rencontrés dans l'analyse multi-données du projet ARMOR : observations de nature et de distribution spatio-temporelle différentes (propriétés d'observabilité différentes, compatibilité spatio-temporelle, compatibilité dynamique,...).

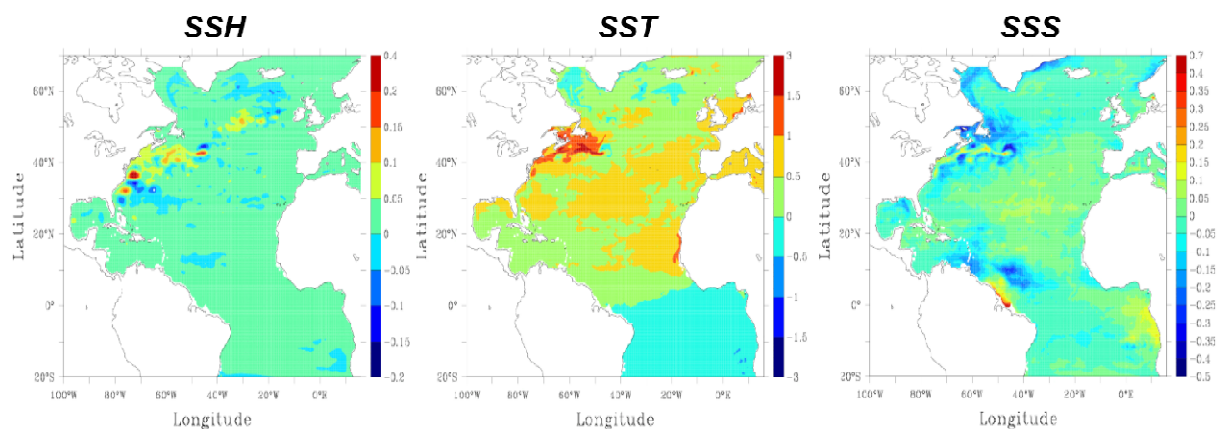


Figure 2.19 : Premier mode d'erreur multivarié du modèle HYCOM.

Au démarrage de TOPAZ, un nombre conséquent de flotteurs profilant s'apprêtait à être déployé dans le cadre du programme ARGO. Cette source d'information importante devait être valorisée. D'une analyse SEEK en 3D mais contrainte seulement par des observations 2D de surface, on pouvait passer à une analyse contrainte également par des observations sur la colonne d'eau. C'était un progrès considérable par rapport à la seule utilisation de covariances d'erreur, plus ou moins robustes, pour propager l'information sur la verticale. La distribution spatiale (et temporelle) des profils disponibles restant alors très éparse, et l'assimilation d'observations de nature et de distribution spatio-temporelle aussi différentes que celles des données satellitaires et in-situ n'étant pas triviale, une partie conséquente de cette étude a été d'analyser les difficultés potentielles, ainsi que de quantifier l'apport des observations hydrographiques dans le système d'assimilation. Dans un premier temps, nous avons remplacé les observations hydrographiques encore non disponibles par des profils climatologiques. La liste des observations finalement assimilées dans le système SEEK-HYCOM, ainsi que leur origine, se trouvent dans le tableau 1 ci-dessous : hauteur de la mer (SLA+MDT), température de surface (SST), salinité de surface (SSS) et profils verticaux de température et de salinité (T et S). Un opérateur d'observation particulier était utilisé pour les observations climatologiques afin qu'elles ne puissent corriger que les grandes échelles spatiales du modèle. Une succession de développements et d'expériences de tests a bien entendu été nécessaire pour comprendre et optimiser le fonctionnement du système et atteindre notre objectif de départ. J'ai travaillé sur cette étude basée sur des outils très complexes en binôme avec Jean-Michel Brankart (ingénieur de recherche au LEGI), ce qui a été une expérience très riche (scientifique, technique et humaine) du travail d'équipe au quotidien.

Les principales conclusions de cette étude peuvent être synthétisées dans l'analyse des 5 expériences réalisées sur l'année 1993 et listées dans le tableau 2.1 (EXP0 → EXP4). On peut les retrouver de manière détaillée dans les articles *Birol et al.*, 2004 et *Birol et al.*, 2005. Je les résume ci-dessous.

List of observation data sets		EXP0	EXP1	EXP2	EXP3	EXP4
SLA	along-track T/P	no	assimilated	assimilated	assimilated	assimilated
	along-track ERS	no	assimilated	assimilated	assimilated	assimilated
MDT			CLS (MDT1)	P. Legrand (MDT2)	SMO_CLS01 MSSH minus EIGEN_GRACE01S (MDT3)	P. Legrand (MDT2)
SST	high resol. AVHRR	no	assimilated	assimilated	assimilated	assimilated
SSS	Levitus 98 climatology	no	assimilated	assimilated	assimilated	assimilated
Profiles T&S	Levitus 98 climatology in hybrid coordinates	no	no	no	no	assimilated

Tableau 2.1: Liste d'expériences d'assimilation réalisées dans le cadre du projet TOPAZ.

Comme signalé précédemment, assimiler (ou combiner de manière plus générale) des observations au contenu physique différent, voire incohérent, engendre nécessairement de grosses difficultés. C'est à ce niveau que, de mon point de vue, une connaissance suffisante (ou un support par des experts) du contenu physique et des faiblesses (résolution réelle et erreurs) de chaque type d'observation s'avère non seulement utile mais nécessaire (quelle que soit leur utilisation d'ailleurs). Dans notre cas, un des problèmes majeurs rencontrés en voulant assimiler des profils de mesures in-situ est venu des incohérences 1) de la structure moyenne horizontale et 2) de la référence verticale contenues dans les profils T et S (issus de la climatology Levitus) et de la topographie dynamique moyenne (MDT) rajoutée aux SLA altimétriques (afin d'obtenir la topographie dynamique absolue, inaccessible par l'altimétrie seule). La stratégie adoptée ci-dessous a donné des résultats positifs :

Le problème apparaît de manière simple une fois défini de la manière suivante. En chaque point (x,y) :

$$MDT(x,y) = S0 + S1(x,y), \text{ avec}$$

$$\iint_D S1(x,y) dx dy = 0, \text{ D étant le domaine océanique global.}$$

- S1 peut être reliée à la composante permanente de la circulation océanique, variant d'un point à l'autre et définissant ainsi une structure horizontale spécifique.
- S0 est la moyenne de la différence horizontale entre la MDT et le géoïde (notez que ce dernier se résume à une surface plane dans un modèle d'océan et la surface moyenne est alors confondue avec la topographie dynamique moyenne). C'est donc un paramètre purement conventionnel qui par définition, en moyenne sur l'océan global, est nul.

Il existe plusieurs modèles de MDT (régionaux ou globaux) obtenus généralement par inversion d'observations in-situ et spatiales. Parce que la référence choisie pour leur calcul peut parfaitement ne pas être la même que celle du modèle numérique concerné (surtout s'il est régional) et parce que les modèles dérivent de leur état initial au cours du temps, un biais horizontal existe de fait entre l'état du modèle et les MDT et S0 est alors non nul. Lorsqu'on n'assimile que des observations de surface, la pratique courante est de calculer la valeur de S0 et de la retrancher au champ de MDT considéré. Par contre, si des profils in-situ sont considérés dans le système, on doit corriger les biais du modèle et donc S0. Autrement, les corrections verticales correspondantes aux mesures T et S seront incohérentes avec les autres contraintes du système d'assimilation (observations de surface et état du modèle), menant à de fortes erreurs.

Pour prendre en compte simultanément des observations de source différente et ne contenant pas la même information, la méthode la plus simple consiste à décorrélérer les contraintes qu'elles imposent au système d'analyse tout en prenant en compte la spécificité de chaque type d'observation. Dans notre cas, nous avons choisi que la composante S1 soit contrainte par la MDT et que la composante S0 le soit par les profils verticaux T et S. La validité de cette approche a été bien entendu testée (EXP4 dans la liste du tableau 2.1) et les

résultats de l'expérience d'assimilation correspondante comparés à ceux d'une expérience similaire mais sans assimilation de profils verticaux (EXP2) et à des mesures in-situ indépendantes. La Figure 2.20 illustre l'efficacité de cette méthode pour corriger l'erreur de l'état initial du modèle (courbe verte versus courbe rouge). Les Figures 2.21 et 2.22 montrent le net apport des mesures verticales in-situ dans le système d'assimilation pour une meilleure représentation des propriétés des masses d'eau en subsurface.

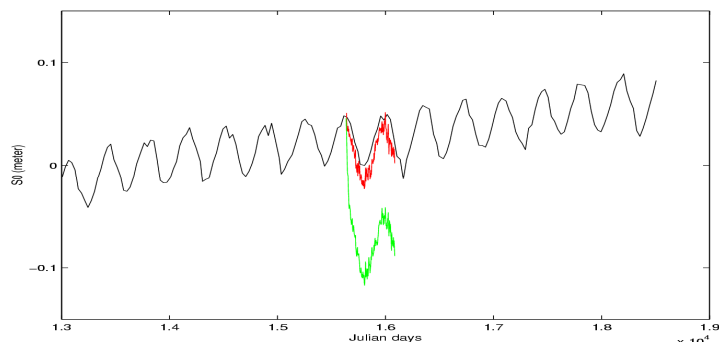


Figure 2.20 : Evolution de la surface moyenne du modèle (en mètres) pour le run libre (courbe noire), l'expérience EXP2 (courbe rouge) et l'expérience EXP4 (courbe verte).

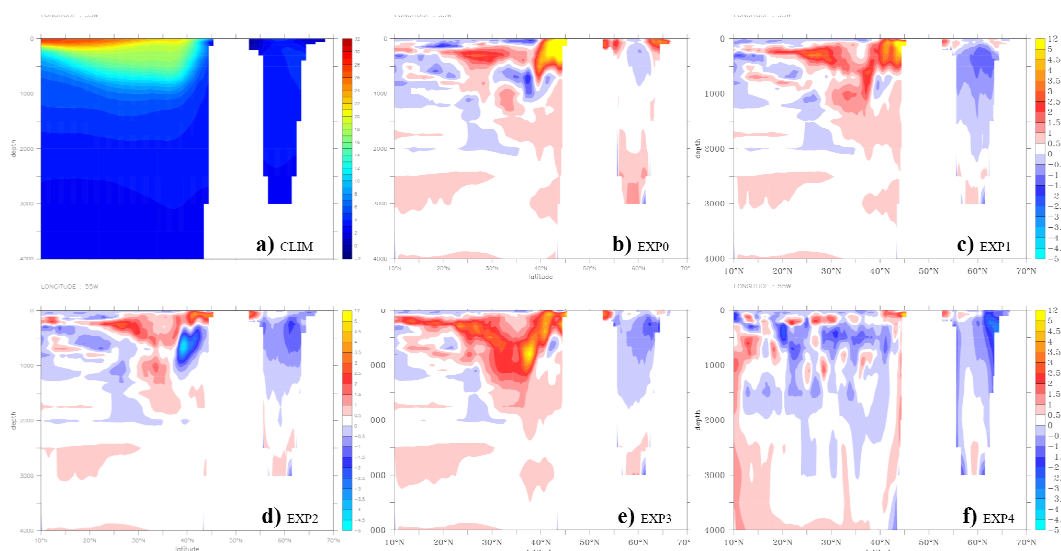


Figure 2.21: (a) Section de température à 55°O issue de la climatologie Levitus. Différence entre la température climatologique représentée en a) et la température moyenne du run de contrôle (b) et des expériences EXP1 (c), EXP2 (d), EXP3 (e) et EXP4 (f).

Le système d'assimilation SEEK multivarié et multi-données développé au cours des projets DIADEM et TOPAZ a été ensuite amélioré pour prendre en compte des profils verticaux plus réalistes (issus du centre Coriolis), et supporter des contraintes opérationnelles. Il a été implémenté à la Navy dans les années qui ont suivies. Il a évolué au cours du temps pour s'adapter à des modèles de résolution spatiale toujours plus grande et de physique améliorée et à des observations de l'océan en nombre toujours plus grand et de sources plus variées. Il a servi de laboratoire pour la génération SAM-2 des systèmes d'assimilation implémenté dans MERCATOR de manière opérationnelle en 2007 (Brasseur et al., 2006). Les résultats théoriques de cette étude réalisée en mode recherche mais avec des objectifs « pré-opérationnels » ont donc été utilisés à l'échelle nationale et internationale dans le domaine de l'océanographie dite opérationnelle. Le projet TOPAZ, initialement financé par le

FP5 (Commission Européenne), l'a été ensuite successivement par le FP6 (projets MERSEA et BOSS4GMES) et plus récemment par le FP7 (projet MyOcean).

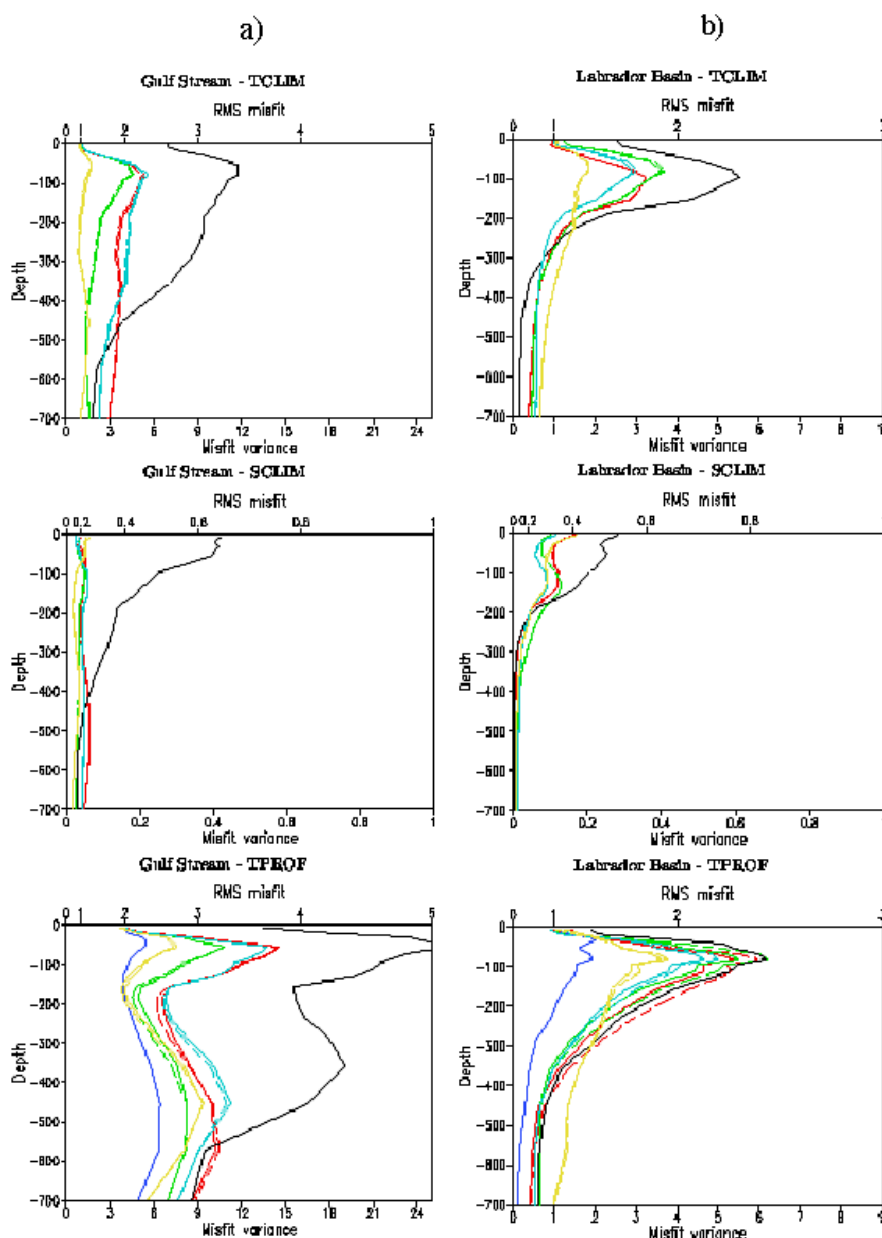


Figure 2.22: RMS des différences de température (en °C) et de salinité (en PSU) entre les résultats des expériences EXPO (en noir), EXP1 (en turquoise), EXP2 (en vert), EXP3 (en rouge) et EXP4 (en jaune), et la climatologie (en haut et au milieu) ou les XBT (en bas). Pour chaque expérience, les prévisions à 3 jours sont représentées par les courbes continues et les analyses par les courbes pointillées. Les résultats sont représentés pour la région du Gulf Stream (a) et de la mer du Labrador (b).

Au cours du temps, grâce à d'énormes avancées technologiques combinées à l'effort et l'expertise de très nombreux acteurs (chercheurs et ingénieurs), les systèmes d'observation de l'océan deviennent toujours plus nombreux et toujours plus complexes. Les paramètres observés sont toujours plus variés. C'est un des facteurs qui explique les forts progrès réalisés par l'océanographie opérationnelle depuis le début des années 2000 (et dans laquelle la France joue un rôle de premier plan au niveau international). Cependant, outre l'amélioration des modèles numériques, cela doit s'accompagner d'une évolution des systèmes d'assimilation de données. Cette évolution passe par des études comme celle illustrée précédemment, afin de

décortiquer et améliorer le fonctionnement de l'assimilation de données, la gestion de l'information apportée par les différentes observations et de préparer l'arrivée de nouveaux types de mesure. Pour cela, en complément de considérations théoriques, les expériences d'études d'impacts d'observations (OSEs/OSSEs pour Observing System Simulation Experiments) constituent une approche pratique très utile ! Elles sont en outre maintenant largement utilisées dans la définition du besoin, puis la préparation de nouvelles missions spatiales (SWOT notamment à l'heure actuelle). J'en illustre quelques unes ci-dessous.

L'altimétrie spatiale reste le pilier des systèmes d'assimilation de l'océan, pour des raisons historiques (c'était la première donnée opérationnelle disponible) et pratique (distribution et facilité d'accès). La MDT est donc une quantité centrale dans les systèmes de prédiction de l'océan et le restera tant que, pour des problèmes de méconnaissance du géoïde, nous ne pourrons accéder directement à la mesure de topographie dynamique absolue à la résolution voulue avec l'altimétrie mais seulement à la SLA. Différents produits de MDT existent (*LeGrand et al.*, 2003 ; *Rio et al.*, 2007, 2011 ; *Maximenko et al.*, 2009 ; *Andersen and Knudsen*, 2009). Ils ont beaucoup évolués ces dernières années avec le nombre croissant de données in-situ disponible pour leur calcul mais présentent néanmoins des différences significatives (*Biol et al.*, 2004 ; *Rio et al.*, 2011). Pour évaluer la meilleure solution à adopter (à l'époque de cette étude) aussi bien que pour comprendre l'impact des erreurs associées à ce type de produit, et quantifier les progrès à attendre de nouvelles missions gravimétriques telles que GOCE (lancée en 2009) nous avons réalisé plusieurs expériences d'assimilation similaires dans lesquelles seule la MDT changeait (appelées EXP1, EXP2 et EXP3, voir tableau 1 et *Biol et al.*, 2004, 2005 pour une description précise des MDTs concernées). Les résultats, illustrés dans les figures 2.22 à 2.25 indiquent clairement que

- malgré un impact globalement positif de l'assimilation, le choix de la MDT utilisé a un impact très fort sur la représentation de différentes quantités océaniques : les courants de surface comme attendu, mais également la position et l'intensité des structures de courants, le volume des transports et la situation thermohaline (*Biol et al.*, 2004).
- pour le calcul de la topographie dynamique, l'utilisation directe d'un géoïde satellite basé sur les premières mesures GRACE, au lieu d'un produit de MDT, montre déjà dans cette étude de bons résultats à l'échelle du bassin. Même si ce géoïde ne résout que les grandes échelles (>330 km), ce qui constitue nécessairement un problème pour des études de l'océan à moyennes et haute latitude, il permet d'avoir un degrés de réalisme similaire au passage par une MDT (*Biol et al.*, 2005).

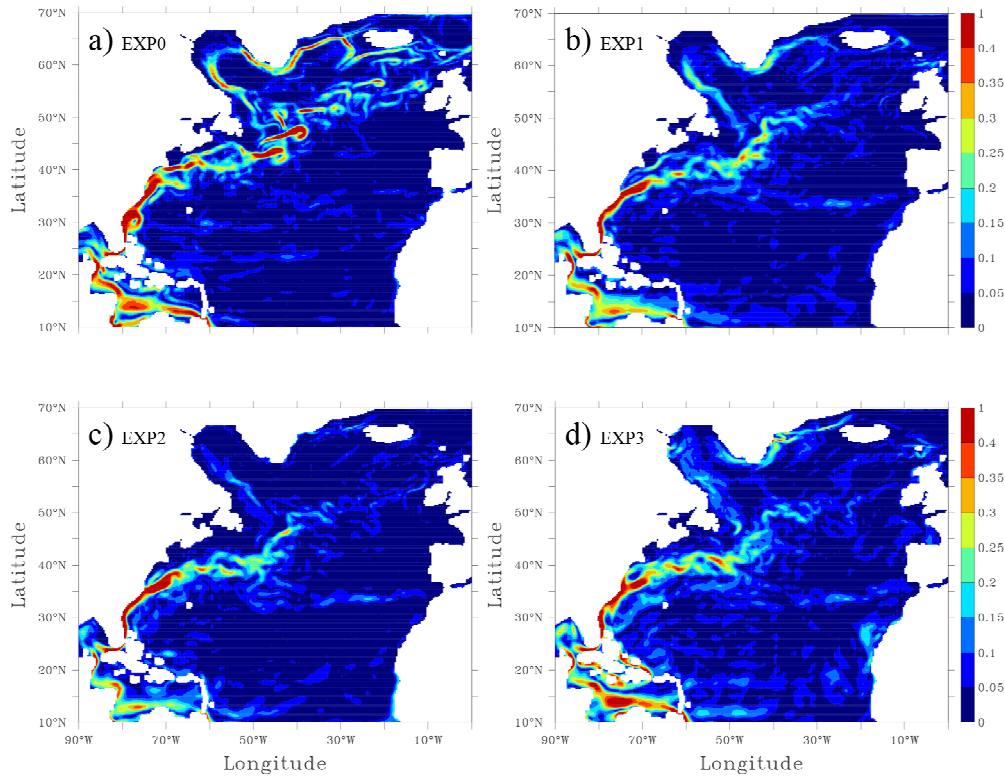


Figure 2.23: Moyenne des courants de surface (en m/s) sur l'année 1993 pour les expériences EXP0 (a), EXP1(b), EXP2 (c) et EXP3 (d).

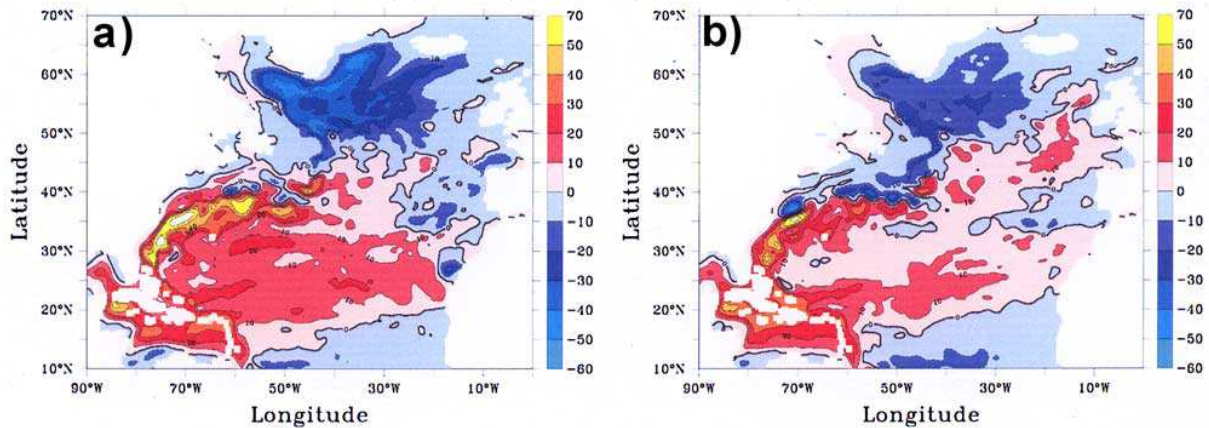


Figure 2.24: Fonction barotrope moyenne (1993) pour les expériences EXP3 (a) et EXP2 (b).

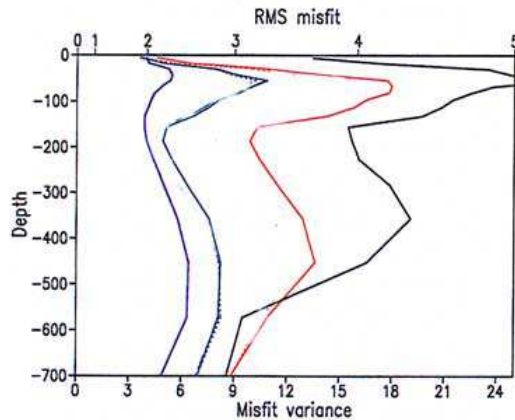


Figure 2.25: Moyenne des écarts de température (°C) entre les expériences EXP0 (en noir), EXP2 (en rouge), EXP3 (en vert), la climatologie Levitus (en bleu) et les XBTs dans la région du Gulf Stream pour l'année 1993.

Depuis cette étude, la qualité et la résolution spatiale des géoïdes ont fortement crû, avec l'accumulation de mesures GRACE et le lancement de GOCE. Elles sont maintenant utilisées dans le calcul des MDTs, ce qui minimise bien évidemment les différences constatées alors et les rend plus réalistes. Je me suis ensuite intéressée à l'impact d'autres missions spatiales sur la représentation de l'océan par les systèmes d'assimilation, les missions SMOS (ESA, lancée en 2009) et Aquarius (NASA/Agence spatiale argentine, lancée en 2011), amenant pour la première fois à la communauté océanographique des mesures de salinité de surface. Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'équipe de MERCATOR et est détaillée dans *Tranchant et al.* (2008).

2.3 - De l'observation de la dynamique hauturière de l'océan vers celle de la dynamique régionale et côtière

Depuis le début, mes objectifs scientifiques ont toujours été guidés par le désir d'analyser comment les mesures issues de l'altimétrie spatiale, en complément d'autres systèmes d'observation (mesures spatiales et in-situ) et outils (méthodes statistiques, modèles) peuvent permettre d'observer et comprendre les variations de l'océan. En 2004-2005, une nouvelle application de l'altimétrie spatiale, jusqu'alors considérée comme anecdotique, commençait à émerger : l'altimétrie côtière. J'ai eu l'opportunité (et la chance) de pouvoir m'engouffrer dans cette dynamique et participer aux travaux pionniers sur cette thématique. Cela m'a bien occupée jusqu'à aujourd'hui, où l'altimétrie côtière tend à devenir un outil scientifique (presque) comme un autre, d'une part parce que des produits adaptés commencent à être diffusés (par le CNES, l'ESA, le CTOH/LEGOS) et exploités pour des études variées, et d'autre part grâce au développement de nouveaux instruments (SARAL/AltiKa, Cryosat-2, Sentinel-3, SWOT, ...).

2.3.a Des problèmes... et des solutions

De manière générale, la dynamique côtière se caractérise par une large gamme d'échelles, de la sub-méso échelle aux oscillations interannuelles (*Chelton, 2001*), affectées par toute une variété de processus qui répondent de manière vigoureuse aux forçages locaux et à distance. La compréhension du compartiment côtier et de ses échanges avec l'océan ouvert à travers le talus continental est un enjeu majeur pour les questions relatives aux écosystèmes, aux transferts de polluants et au changement climatique. Malgré son recours significatif à la mesure altimétrique pour un panel important d'études, la communauté des océanographes n'avait pas accès à ce type de mesure pour l'océan côtier jusque très récemment. Et même aujourd'hui cet accès reste relativement limité, malgré les besoins.

En effet, les missions altimétriques actuelles ont été conçues pour l'observation de l'océan hauturier, où le traitement du signal et les corrections à appliquer à la mesure sont bien connues. Près des côtes, à une distance d'environ 50 km, la précision des données décroît de manière drastique pour atteindre des niveaux d'erreur supérieurs à 1 m (rendant ainsi l'observation de tout processus physique impossible). Cela est dû à trois types de causes : 1) Les modèles géophysiques utilisés pour corriger les effets de marée et de forçage atmosphérique haute-fréquence ne sont pas adaptés à la physique côtière et introduisent des erreurs importantes. 2) Les corrections (notamment la correction de troposphère humide) et traitements standards appliqués à la mesure ne prennent pas en compte les conditions océaniques non hauturières. 3) L'écho radar lui-même (forme d'onde), qui dépend directement des caractéristiques de la surface observée, se trouve fortement modifié par la

présence de terres (Figures 2.26 et 2.27) et se met à dévier du modèle de Brown caractéristique des surfaces purement océaniques.

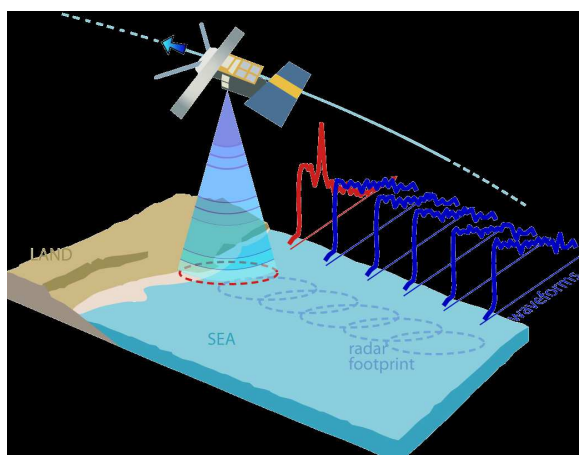


Figure 2.26 : Schéma représentant l'arrivée d'un satellite altimétrique sur une zone côtière et le signal réfléchi correspondant à la surface observée.

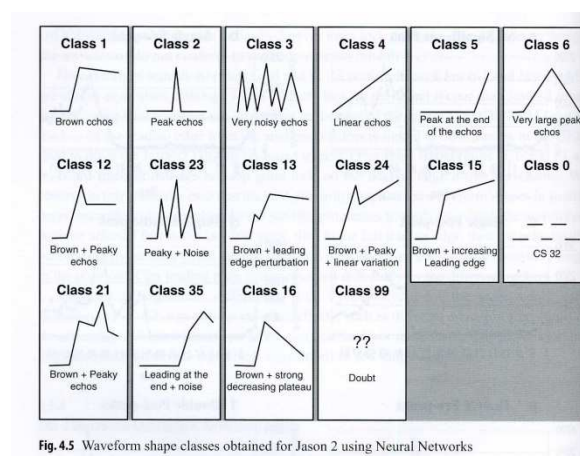


Fig. 4.5 Waveform shape classes obtained for Jason 2 using Neural Networks

Figure 2.27: Classification des formes d'onde Jason-2 par type et % de chaque type observé en fonction de la distance à la côte (Gommenginger et al., 2011).

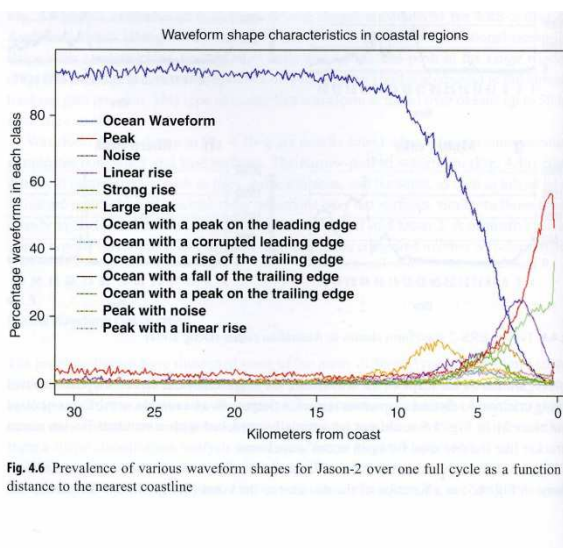


Fig. 4.6 Prevalence of various waveform shapes for Jason-2 over one full cycle as a function of distance to the nearest coastline

Une question fondamentale qui se pose avant de rechercher des solutions aux problèmes listés plus haut est celle de la pertinence des observations altimétriques pour l'étude du côtier, étant donné la couverture spatio-temporelle des mesures. Une mission altimétrique telle que T/P ou Jason-1,2 ne résout complètement que les processus ayant une échelle spatiale supérieure à 300 km entre les traces et supérieure à quelques dizaines de kilomètres le long de la trace. Les échelles caractéristiques de la dynamique côtière sont bien plus fines (Chelton, 2001). On doit toutefois considérer que la plupart des processus côtiers sont influencés par la dynamique méso-échelle se trouvant immédiatement au large, c.à.d. dans une zone où les données des produits altimétriques standards ne sont également pas ou peu disponibles. Pouvoir observer la dynamique méso-échelle de ces zones signifie déjà améliorer la connaissance de la dynamique côtière. Par ailleurs, on a vu précédemment qu'une approche largement utilisée pour augmenter la résolution des mesures altimétriques est la combinaison de données provenant de différentes missions spatiales. En considérant l'extension le long de la côte de certains mécanismes comme les courants, les ondes et certains upwellings, à défaut de les résoudre tous, cette méthode doit permettre d'en résoudre

certain. Pour analyser les échelles spatio-temporelles les plus fines de la circulation côtière, on peut faire ensuite appel à l'approche multi-données (notamment l'imagerie spatiale puisque les observations de température de surface et de couleur de l'eau ont une couverture spatio-temporelle de l'ordre du kilomètre) et à l'assimilation des données altimétriques dans des modèles d'océan.

Lorsque je me suis intéressée à ce problème en 2005, différentes études (concernant différentes régions de l'océan) avaient déjà démontré que les mesures altimétriques étaient en effet capables de capturer une part de la variabilité côtière (par exemple : *Strub and James, 1997* ; *Anzenhofer et al., 1999* ; *Vignudelli et al., 2000* ; *Birol and Morrow, 2003* ; *Vignudelli et al., 2005*). D'autre part, pour chacune des sources d'erreur sur les mesures altimétriques côtières, des recherches importantes ont été menées ces dix dernières années, permettant d'apporter certaines solutions, sur les corrections altimétriques (*Lux et al., 2010* ; *Desportes et al., 2007* ; *Obligis et al., 2011*), pour le retraitement des formes d'onde (*Bao et al., 2009* ; *Deng and Featherstone, 2006* ; *Gommenginger et al., 2011* ; *Thibaut and Poisson, 2008*) ou les techniques de post-traitement (*Vignudelli et al., 2005* ; *Roblou et al., 2011* ; *Birol and Delebecque, 2013*). Des développements de prototypes de produits tournés vers le domaine océanique côtier ont été financés par le CNES (projet PISTACH) et l'ESA (projet COASTALT). Parallèlement, les agences spatiales ont conçu des missions basées sur des instruments plus adaptés à l'observation côtière : Jason-2, incluant une boucle de poursuite (basée sur un modèle numérique de terrain) pour obtenir des mesures plus près de la ligne de côte, SARAL/AltiKa en bande Ka pour avoir une meilleure résolution, Cryosat-2 et son mode SAR plus haute fréquence. Un radar interférométrique permettant la mesure de la topographie dans une fauchée de 120 km sous la trajectoire du satellite (SWOT) est également en développement.

Au LEGOS, le travail d'amélioration des mesures altimétriques en région côtière a été initié en 2002 au sein du projet ALBICOCCA (« Altimeter-Based Investigations in Corsica, Capraia and Contiguous Areas »), en collaboration avec des partenaires italiens (Stefano Vignudelli et Pietro Gasparini, CNR ; Capra Alessandro, Université de Bologne), et français (Patrick Marsaleix, L.A. et Pascal Bonnefond, OCA-CERGA). L'objectif principal était la calibration et la validation de la mesure altimétrique en Méditerranée Nord Occidentale. Cette étude a débouché sur la définition d'une première version de chaîne de traitement altimétrique dédiée au côtier. Cette chaîne a été nommée X-TRACK depuis, moyennant pas mal d'évolutions successives (*Vignudelli et al., 2005* ; *Roblou et al., 2010* ; *Durand et al., 2008* ; *Bouffard, 2007* ; *Birol et al., 2013*) auxquelles j'ai largement contribué, au travers de différents projets scientifiques financés essentiellement par le CNES : ALBICOCCA (jusqu'en 2006), DYCOMED (« Etude de la Dynamique Côtière en Méditerranée Nord Occidentale », 2007-2009), MARINA (« Margin Integrated Approach » 2009-2011) ou MICSS-1&2 (« Multisensor Impact assessment in Coastal and Shelf Seas », depuis 2009). Initié en mode recherche, ce travail a débouché sur un outil de traitement qui fonctionne à présent de manière opérationnelle au Service d'Observation CTOH et fournit des produits altimétriques régionaux (les produits X-TRACK) à de très nombreux utilisateurs. Je reviendrai là-dessus plus en détails dans le chapitre 3.

Par rapport aux traitements standards, la chaîne X-TRACK :

- utilise les corrections géophysiques issues de modèles régionaux haute résolution quand ils existent (MOG2D/T-UGO) ou des modèles globaux les plus récents,
- extrapole la correction de troposphère humide mesurée à 50 km de la côte jusqu'à la terre,
- se base sur des critères d'édition qui ont été redéfinis pour le côtier prenant en compte les conditions régionales et interpole les corrections manquantes à partir des corrections valides,

- permet d'exploiter des mesures haute résolution le long de la trace (jusqu'à ~2 km de résolution au lieu des 7 km, au mieux, pour les produits standards),
- reconstruit une surface moyenne haute résolution cohérente avec le contenu des observations traitées par inversion des données,
- utilise des algorithmes de post-traitement adaptés à la problématique du côtier.

Par rapport aux autres traitements expérimentaux (PISTACH, COASTALT), X-TRACK possède la particularité de s'adapter facilement d'une mission altimétrique à l'autre. Les produits X-TRACK sont aujourd'hui multi-missions (T/P, Jason-1&2, GFO et Envisat). Le gain par rapport à un traitement standard a été quantifié dans différentes études (Vignudelli *et al.*, 2005 ; Bouffard *et al.*, 2011 ; Birol *et al.*, 2010) et est illustré sur la figure 2.28.

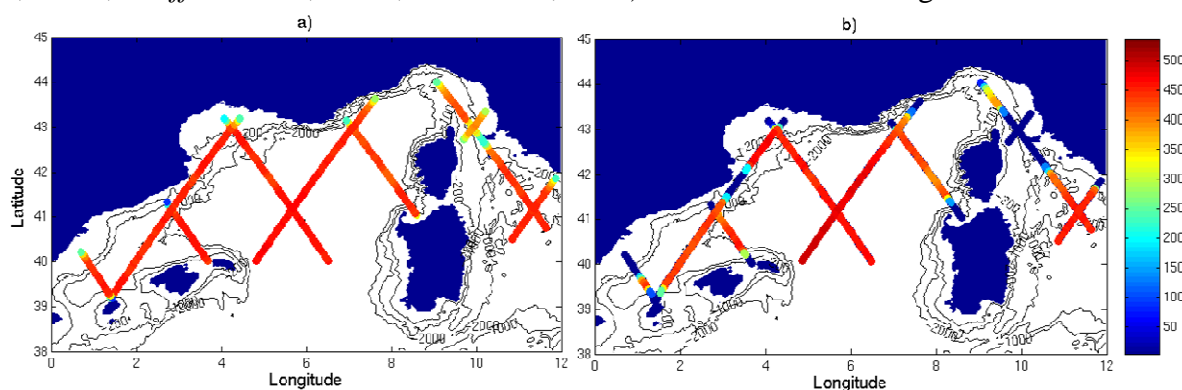


Figure 2.28 : Nombre de données d'anomalie de courant géostrophique dérivée des mesures altimétriques de la mission T/P sur un total de 540 cycles traités. Situations obtenues à partir a) de données retraitées avec X-TRACK et b) d'un produit AVISO. Les isobathes 200m, 1000m et 2000m sont représentées. D'après Birol *et al.*, 2010.

2.3.b La question de l'observabilité

Les développements méthodologiques sur l'altimétrie côtière m'ont pris beaucoup de temps ces dernières années mais ils ne sont au fond qu'un outil pour générer des observations de hauteur de la mer exploitables pour les études de l'océan côtier. Les questions auxquelles je m'intéresse plus particulièrement sont les suivantes :

- Quelle partie de la dynamique côtière est observable par les observations altimétriques ? Et via quelles méthodes d'analyse ?
- Peut-on quantifier, à l'échelle régionale, les différents niveaux de variabilité temporelle (de la haute fréquence à l'interannuel) et spatiale observables à proximité du trait de côte ?
- Quels sont les principaux verrous limitant l'utilisation de l'altimétrie spatiale en côtier ? Peut on, au moins partiellement, les dépasser dans le futur ? Comment ?

La stratégie que j'ai choisie est de travailler sur des chantiers géographiques cibles pour analyser comment ces données peuvent servir l'étude de questions scientifiques particulières à chaque zone. C'est l'inter-comparaison des observations (spatiales et in situ) et des simulations numériques qui nous permet, en exploitant la redondance partielle des informations fournies par ces outils, d'étudier le contenu réellement informatif des données altimétriques et les limitations de leur exploitation. Cette méthode m'a forcément amenée à une importante collaboration avec différents groupes de recherche, que ce soit en amont, sur les algorithmes de traitement de la mesure, ou en aval, sur l'utilisation des produits. Je me suis néanmoins particulièrement investie sur le chantier Méditerranée Nord Occidentale dont je parlerai dans la section 2.3.b.

Une des toutes premières zones sur lesquelles nous avons testé les algorithmes du futur logiciel X-TRACK (hors de la Méditerranée) fut le long des côtes Est de l'Inde et du Sri

Lanka. L'étude portait sur l'observabilité des ondes côtières et de l'East India Coastal Current (EICC) s'écoulant le long des côtes indiennes. Nous avons retraité les données du satellite Topex/Poseidon, sur la période 1992-2001 ; les traces au sol et la zone considérée sont présentées sur la Figure 2.29. La première étape a été de valider les données obtenues. En l'absence de données in situ de niveau de la mer disponible sur la période concernée, nous avons dû limiter notre validation à l'analyse du cycle saisonnier. Nous avons considéré la climatologie mensuelle du niveau de la mer marégraphique fournie par le Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) sur quelques sites le long des côtes indiennes. La Figure 2.30 présente l'exemple du marégraphe de Vishakapatnam, situé à proximité de la trace n° 116. Les variations saisonnières observées près de la côte par les observations altimétriques retraitées sont en bon accord avec celles vues par le marégraphe. L'analyse ayant été faite avec un produit altimétrique standard (ligne pointillée) et avec les données issues de la nouvelle chaîne (ligne en tiret), cela met en évidence l'apport significatif du traitement développé en terme d'extraction du contenu physique (qui permet de récupérer bien plus de données exploitables dans le premier rayon interne de déformation ; Durand et al., 2008).

Nous avons ainsi pu disposer de 10 années (nous en avons 20 à l'heure actuelle) d'observations régulières (tous les 10 jours) et continues (1993-2002) à divers endroits le long des côtes Est de l'Inde et du Sri Lanka. De la connaissance du niveau de la mer le long de traces altimétriques orientées quasi perpendiculairement à la côte (Figure 2.29), on peut déduire la composante de courant géostrophique dans la direction parallèle à la côte (le long de l'EICC). En pratique, pour limiter les effets du bruit de mesure, plus élevé près des terres et aux échelles spatiales considérées, nous avons développé un algorithme objectif de calcul de courant basé sur une sélection d'échelle (détaillé dans Durand et al., 2008). Cette étude a permis d'établir, pour la première fois, le spectre de la variabilité de l'EICC sur une large bande de périodes (20 jours à 4 ans) tout au long de son trajet depuis le Nord du Golfe du Bengale jusqu'à la pointe Sud du Sri Lanka (Durand et al., 2009). Outre le cycle annuel (forcé par le cycle des moussons et ayant déjà fait l'objet d'études), le spectre montre également un certain nombre de pics secondaires, aux fréquences intra-annuelles et interannuelles. Grâce à une analyse des informations inter-traces, nous avons pu interpréter ces échelles de variabilité, jamais observées jusqu'alors, comme une signature de structures de méso-échelles (tourbillons, boucles de recirculation), présentes tout le long de l'EICC (Durand et al., 2009). Cet exemple illustre comment l'altimétrie côtière nous fournit des clés précieuses pour comprendre la dynamique océanique dans des zones où les observations in-situ sont rares ou inexistantes. Elle fournit également un repère réaliste pour les modèles numériques régionaux.

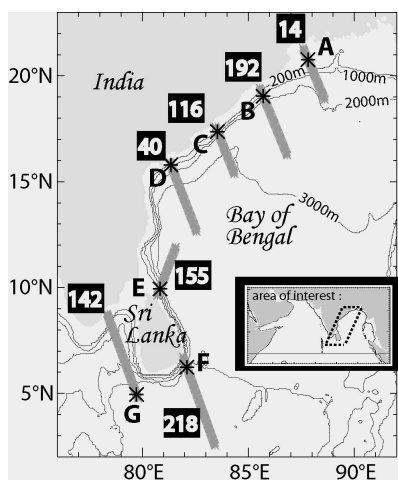


Figure 2.29 : Partie des traces au sol du satellite Topex/Poseidon (T/P) utilisée dans l'étude Durand et al., 2009.

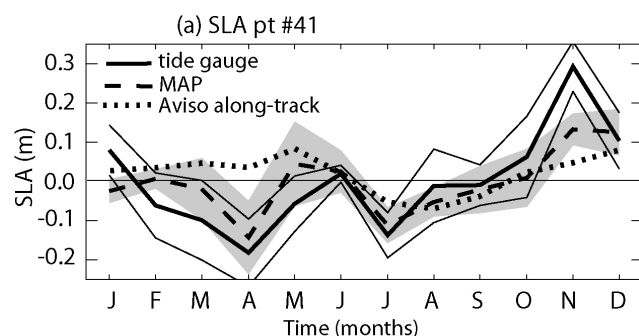


Figure 2.30 : Cycles saisonniers du niveau de la mer observés par le marégraphe de Vishakapatnam (trait plein), par les mesures T/P retraitées au LEGOS au point C de la Figure 2.28 (appelé "MAP" ici, tirés) et par les mesures T/P AVISO (pointillés). Les bandes définies par les traits fins et la bande grise matérialisent l'écart-type autour de ces climatologies saisonnières.

De la même manière, à travers différentes collaborations scientifiques, on a pu mettre en évidence qu'une partie du spectre de la variabilité associé à différents processus océaniques côtiers, étaient observable (et analysable) à partir de mesures altimétriques : circulation et sa variabilité, ondes côtières, upwelling, tourbillons et méandres (*Bouffard et al.*, 2008a,b ; *Durand et al.*, 2008,2009 ; *Biol et al.*, 2010 ; *Guihou et al.*, 2009 ; *Melet et al.*, 2010 ; *Dussurget et al.*, 2011).

Cette question de l'information scientifique qui peut être extraite des observations (pas seulement altimétriques) est en fait un thème récurrent dans mon parcours scientifique. Elle me paraît être fondamentale pour optimiser l'utilisation des mesures océaniques, quelle que soit leur origine. Nous l'avons traitée en détails dans la thèse de Renaud Dussurget (2008-2012) pour le cas particulier des processus de méso échelle et sub-méso échelle dans le Golfe de Gascogne. Beaucoup de résultats de ce travail sont en fait extrapolables pour d'autres études régionales (hors de la région considérée).

Si l'utilité des mesures altimétriques (retraitées) a été démontrée pour étudier les tourbillons et la circulation côtière du Golfe de Gascogne (*Caballero et al.*, 2008 ; *Le Hénaff et al.*, 2010 ; *Herbert et al.*, 2011), il faut toutefois considérer que nous nous positionnons aux limites de performances des systèmes altimétriques actuels. Pour tenter de quantifier cette limitation et ses conséquences, nous avons commencé par analyser comment les produits 2D standards distribués par le centre AVISO/DUACS (classiquement utilisés pour étudier les tourbillons, cf. section 2.1.a) et les données originales le long de la trace, retraitées avec le logiciel X-TRACK, nous permettent respectivement de dériver les caractéristiques principales de la méso-échelle dans la zone d'étude. L'analyse de spectres de variabilité spatiale et temporelle du niveau de la mer permet de mettre en évidence d'importantes différences de contenu entre les 2 types de données altimétriques considérés (Figure 2.31). Les cartes de SLA montrent un déficit d'énergie en dessous de 150 km et de 200 jours (pour une analyse détaillée des différences, voir *Dussurget*, 2011). Afin de comprendre l'impact de ces écarts, nous avons adapté une analyse en ondelettes qui nous permette de détecter et caractériser des tourbillons à partir de données altimétriques le long de la trace (*Dussurget et al.*, 2011). Cela a permis de mettre en évidence un manque systématique d'amplitude et d'échelle des structures détectées dans les produits 2D à l'intérieur du Golfe de Gascogne (Figure 2.32). Les vitesses géostrophiques autour de ces tourbillons sont sous-estimées d'environ 33%, impliquant une réduction de moitié de l'EKE correspondante. Vers l'Ouest, les échelles spatiales des tourbillons deviennent progressivement suffisamment proche du rayon de décorrélation utilisé dans l'analyse des cartes AVISO/DUACS (~120 km) pour que celles ci les détectent. Ceci explique l'apparition de tourbillons seulement au large dans la carte de *Chelton et al.*, (2011 ; Figure 2.13).

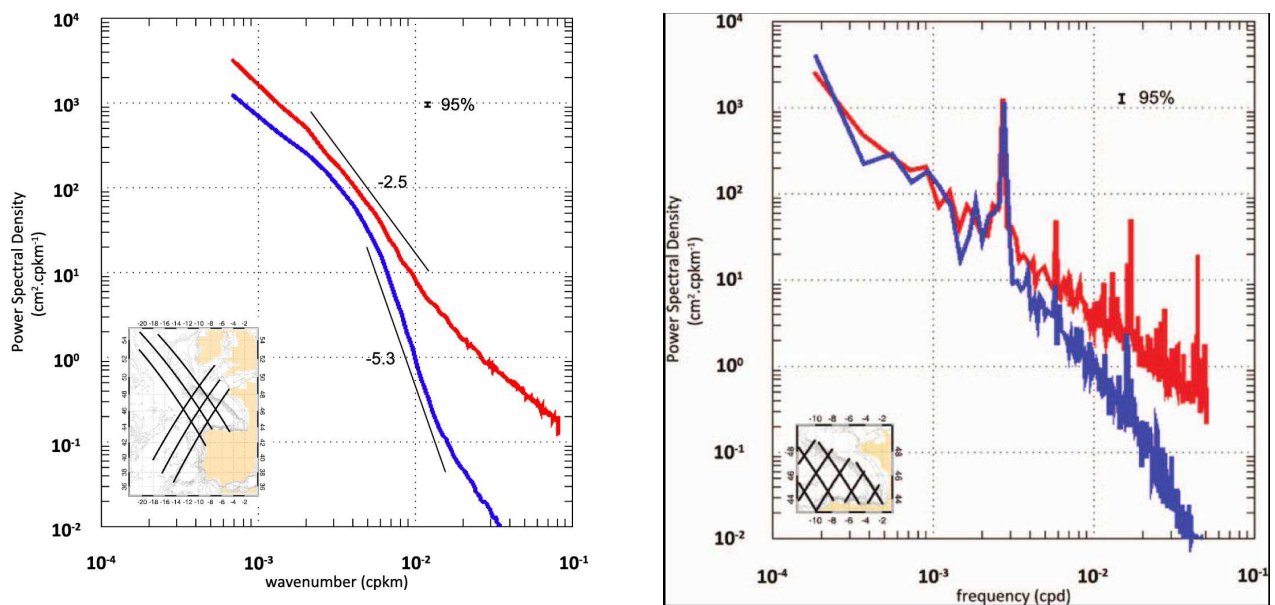


Figure 2.31 : Densité spectrale de puissance calculé dans le domaine spatial (à gauche) et temporel (à droite) à partir de mesures altimétriques de SLA grillées AVISO (en bleu) et le long des traces T/P-Jason1&2 (produit X-TRACK, en rouge). Les unités utilisées sont le cycle par km (cpkm, à gauche) et le cycle par jour (cpd, à droite). D'après Dussurget et al., 2011.

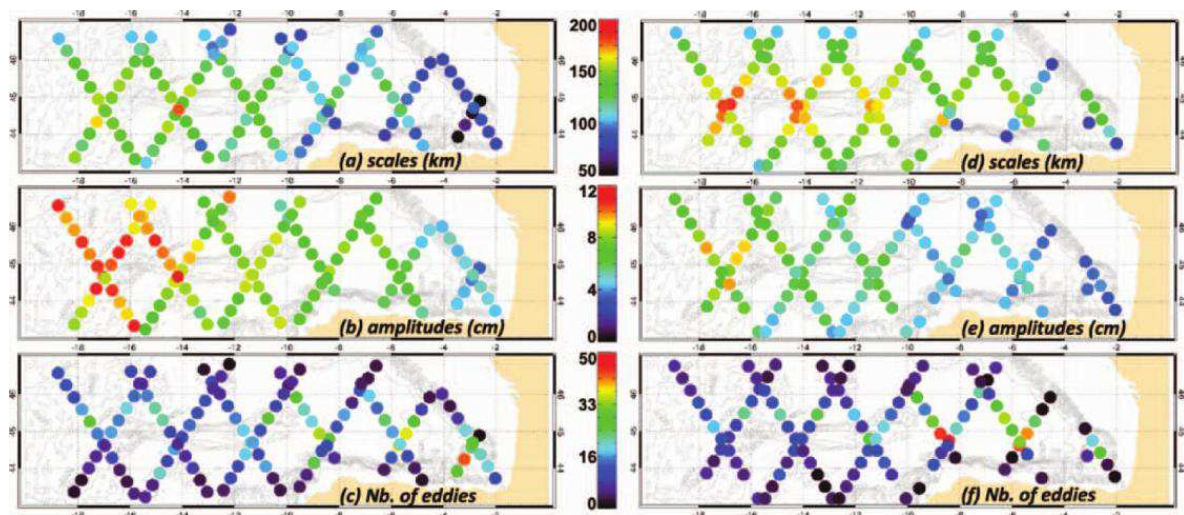


Figure 2.32 : Echelles (a, d), amplitudes (b, e) et nombre (c, f) des tourbillons détectés par analyse en ondelettes à partir de données le long des traces (X-TRACK, à gauche) et de données grillées (AVISO/DUACS) extraites sous les traces (à droite). Pour cette étude, les données des satellites T/P, Jason-1&2 sont considérées. D'après Dussurget et al., 2011.

Ce travail nous a amené à proposer une méthode de cartographie adaptée aux échelles régionales de variabilité (dans la limite du possible). Celle-ci, présentée dans *Dussurget et al.* (2011), a ensuite été optimisée pour prendre en compte les résultats de la confrontation des analyses de hauteur de la mer calculées (et les informations physiques dérivées) à d'autres types d'observations (spatiales et in-situ). Cette étude poussée d'inter-comparaison de données (deux exemples sont présentés dans les Figures 2.33 et 2.34), ainsi que différentes considérations techniques sur les traitements de la mesure ont été utilisées pour discuter les limitations d'une approche basée sur les seules mesures altimétriques (cartographie de données à partir des constellations de satellites existants) et l'intérêt d'une analyse combinée à des mesures indépendantes (mais alors, quel type de mesure pour quel type d'information ?).

L'étude correspondante est détaillée dans le rapport de thèse de Renaud Dussurget ainsi que dans une publication à soumettre (Dussurget et al., 2014).

Une implémentation opérationnelle de la méthode de cartographie développée au cours de ce travail est en cours au centre AVISO/DUACS.

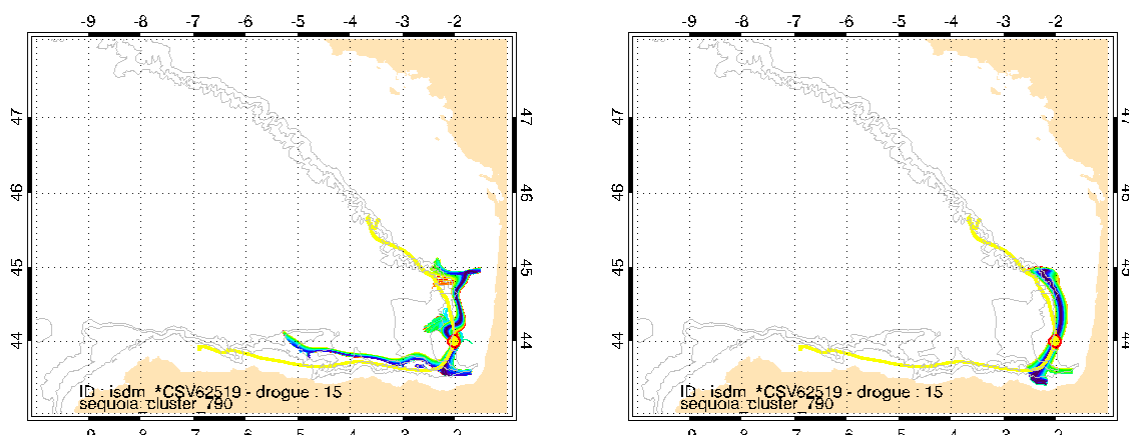


Figure 2.33: Trajectoires de bouées dérivantes (en jaune) 14 jours avant et après le 1er janvier 2003 (date symbolisée par un cercle rouge) comparées à des trajectoires simulées à partir des cartes altimétriques régionales de Dussurget, 2011 (à gauche) et globales AVISO (à droite). Les couleurs des trajectoires (bleu à rouge) correspondent à la distance de la particule simulée à la position de la bouée à la date initiale (de 0 à 25 km, respectivement). Ce type d'analyse intégrée permet d'analyser la dispersion du flux aussi bien que l'impact de la résolution du produit grillé sur la représentation des courants. D'après Dussurget, 2011.

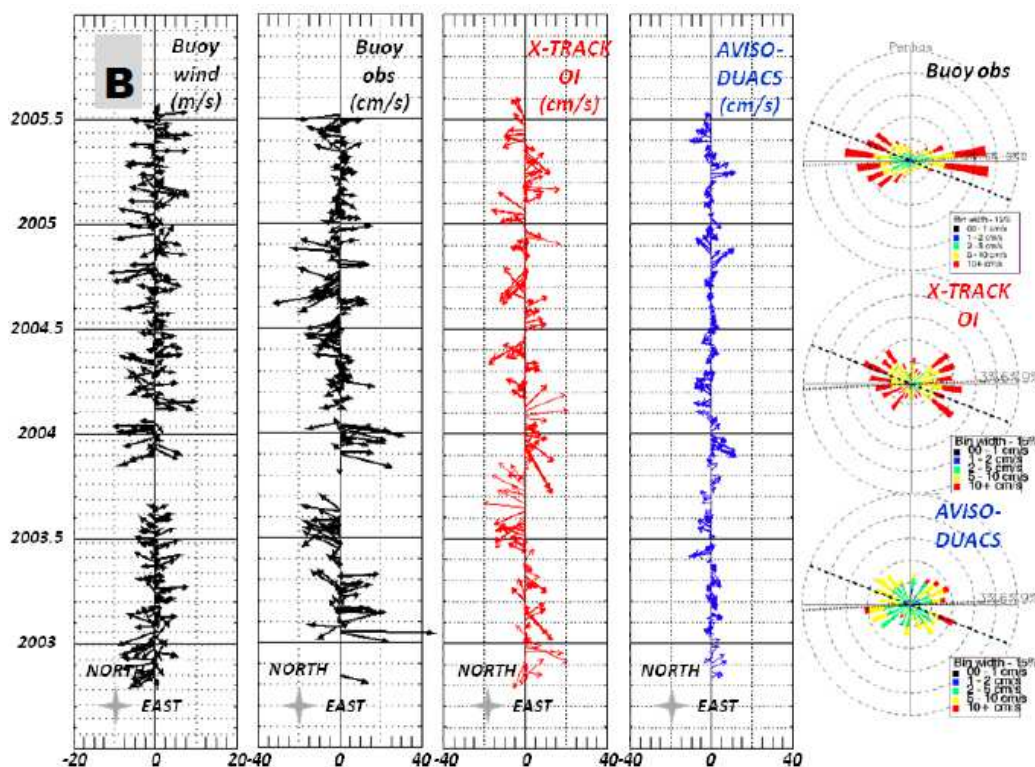


Figure 2.34 : A gauche) vecteurs vent et courant de surface (en noir) mesurés à la bouée côtière de Cabo de Penhas ($6.2^{\circ}O/43.7^{\circ}N$), vecteurs courant de surface dérivés au même point des cartes altimétriques (AVISO en bleu et méthode régionale de Dussurget, 2011 en rouge). A droite) roses de courant dérivées des observations in-situ (en haut), des cartes altimétriques régionales (au milieu) et globales AVISO (en bas).

2.3.c Etude de la circulation régionale en Méditerranée Nord Occidentale

Parallèlement aux chantiers géographiques considérés ci-dessus, je me suis plus particulièrement investie depuis 8 ans dans l'étude de la circulation océanique en Méditerranée Nord-Occidentale, toujours en utilisant l'altimétrie spatiale comme outil principal (et toujours en combinaison d'autres outils). Cette zone a d'ailleurs constamment servi pour tester et étudier l'impact des développements réalisés sur les traitements altimétriques côtiers développés au LEGOS.

L'intérêt de cette région océanique est qu'on y dispose d'un panel extrêmement riche et complémentaire de moyens d'étude. Plusieurs expériences de plus ou moins grande envergure ont permis d'y accumuler au cours du temps une importante quantité de mesures courantométriques, météorologiques et hydrologiques (campagnes DYOME, PRIMO, CANALES, MEDOC, FETCH, ECOLOPHY, ...). D'autre part, depuis peu, le programme MOOSE (intégré au chantier MISTRALS de l'INSU depuis 2012 et sur lequel je reviendrai dans les perspectives) met en place un réseau d'observation régional long terme, entre autre pour les besoins de l'océanographie opérationnelle. Différentes configurations régionales de modèles numériques (NEMO et SYMPHONIE) ont été également développées sur la zone d'étude. Les observations spatiales sont quant à elles disponibles partout mais la Méditerranée Nord Occidentale possède l'heureuse particularité de ne pas être trop nuageuse (ce qui permet d'avoir plus d'observations de couleur de l'eau ou de température de surface). Un autre intérêt de cette zone est d'être un terrain de jeu intéressant pour les études d'observabilité liées à l'altimétrie spatiale : les structures physiques y sont complexes, de petite taille (de l'ordre du kilomètre à la dizaine de kilomètre) et d'amplitude modérée et le spectre de leur variabilité intègre toutes les échelles de temps. L'utilisation de l'altimétrie spatiale est loin d'y être triviale et apparaît d'ailleurs tout à fait marginale dans l'avancée des connaissances scientifiques régionales.

Dans la région d'étude, la composante principale de la circulation est le courant Liguro-Catalan-Provençal (ou Courant Nord, noté LPC dans ce qui suit), partie de la circulation thermohaline de la Mer Méditerranée (*Herbaut et al.*, 1996). La connaissance de ce courant résulte surtout de la mise bout à bout d'informations fournies par de nombreuses mesures in-situ et images spatiales (*Millot*, 1991, 1995 ; *Albérola et al.*, 1995 ; *Pinot et al.*, 2002 ; ...). Formé en Mer Ligure par la rencontre des Courants Ouest et Est Corse, ce courant de pente s'écoule ensuite dans le sens cyclonique le long des côtes italiennes, françaises et espagnoles jusqu'en Mer Baléares où une partie recircule vers l'Est (Figure 2.35). Caractéristique permanente de la circulation, ce courant présente un cycle saisonnier important (avec un flux maximum en hiver et minimum en été). La région est par ailleurs sous l'influence de fortes interactions océan-atmosphère (*Herbaut et al.*, 1997 ; *Estournel et al.*, 2003), caractérisées par des échelles de variabilité allant de la haute fréquence à l'interannuel (*Hermann et al.*, 2008). Le LPC est associé à une forte activité méso échelle et sub-méso échelle.

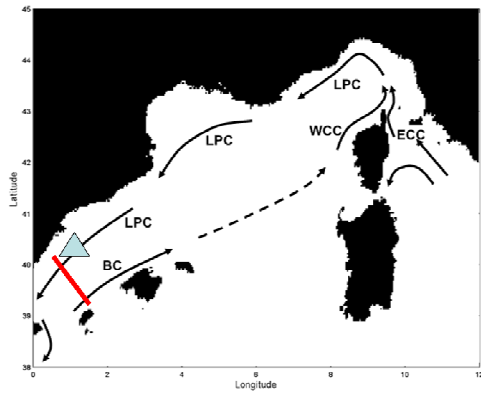
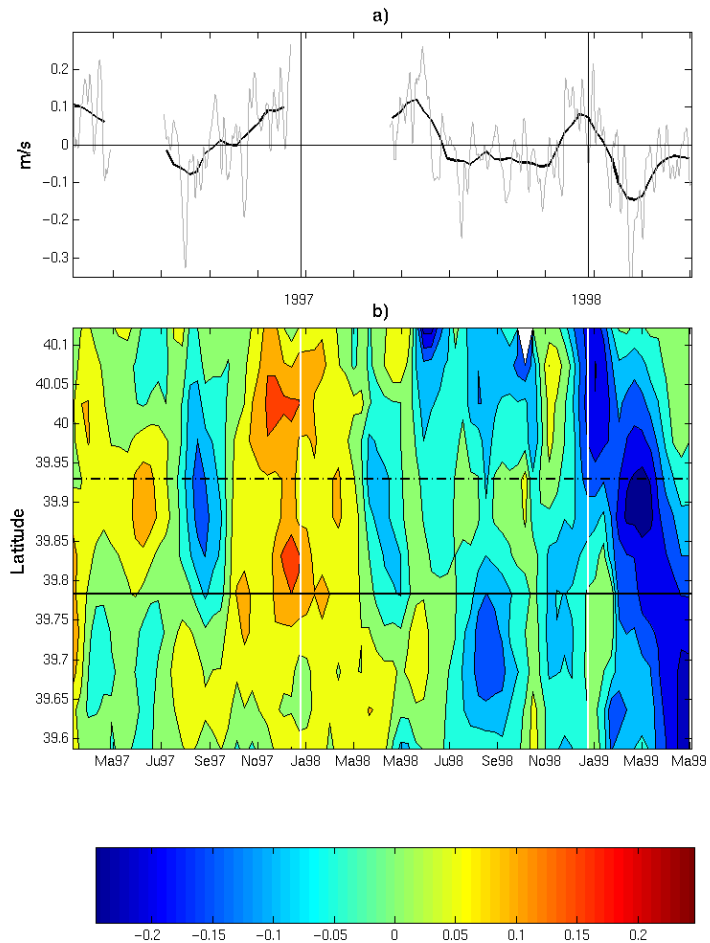


Figure 2.35 (ci-dessus): Schéma de la circulation permanente en Méditerranée Nord Occidentale.

Figure 2.36 (ci-contre): a) Anomalie de la composante de courant parallèle au talus mesurée par le courantomètre (triangle de la figure 2.35). Une version filtrée (30 jours; trait gras) et brute (trait fin) des données est représentée. b) diagramme latitude-temps des anomalies de courant dérivées de la trace T/P 248 (trait rouge sur la figure 2.35). Les traits pleins et pointillés correspondent respectivement aux isobathes 1000 et 200m.



La question à laquelle je me suis intéressée est de savoir si l'altimétrie spatiale pouvait servir pour l'étude du LPC et ce que ce type d'observation pouvait apporter comme information supplémentaire sur les caractéristiques de ce courant (par rapport aux mesures in-situ et modèles régionaux). Le LPC est un courant de densité théoriquement détectable à partir de la hauteur de la mer mais il est étroit (~20 à 50 km) et son observation impose donc une résolution spatiale tout à fait en limite de ce que permet l'altimétrie actuelle. Pour étudier cette question, nous avons retraité plus de 14 ans de mesures T/P et Jason-1 (1993-2007) avec le logiciel X-TRACK et calculé les anomalies de courant géostrophique correspondantes le long des traces des satellites considérés (seule la composante de courant perpendiculaire à la trace est accessible). A différents endroits du LPC, les séries obtenues ont été comparées avec des mesures de courant ADCP (*Biol et al., 2010*). On a pu observer une très bonne cohérence aux échelles saisonnières et un accord plus faible aux hautes fréquences (Figure 2.36). La résolution spatiale de l'altimétrie étant largement inférieure aux échelles physiques considérées, l'amplitude des courants calculés est inférieure à celle des mesures in-situ. Cette comparaison a permis de montrer que les mesures altimétriques sont néanmoins capables de capturer une partie de la variabilité du LPC (aux échelles saisonnières à basses fréquence, et certains évènements haute fréquence) et d'estimer la sous-évaluation des courants dérivés par rapport aux courants réels.

Une climatologie saisonnière des anomalies de courant (par rapport à une moyenne de courant calculée sur la période 1993-2007) a ensuite été calculée à partir des mesures altimétriques. Elle a été comparée à une climatologie équivalente réalisée à partir d'images de température de surface de la mer AVHRR (SST) et à la connaissance des courants de la zone décrite dans la littérature (Figure 2.37). Un bilan détaillé de cette étude se trouve dans *Biol et al., 2010*. On a pu observer une grande cohérence entre les informations apportées par

l'altimétrie, la SST et les études passées (basées sur des mesures in-situ ou des modèles numériques). Cependant, un des intérêts de l'altimétrie est d'autoriser une analyse synoptique des variations du système de courant régional, ce qui a permis de révéler des aspects nouveaux de sa structure spatio-temporelle. Sur la Figure 2.37 on observe le renforcement de tout le système de circulation côtière en hiver (dans le sens anticyclonique) qui apparaît alors continu de la Mer Tyrrhénienne à la Mer des Baléares. En été, le LPC diminue mais la connexion avec la Mer Baléares apparaît plus complexe. Il y a une concordance certaine entre l'altimétrie et la SST, mais la signature du LPC n'est pas toujours claire en température, notamment en été, alors que dans l'altimétrie, elle reste visible tout au long de l'année.

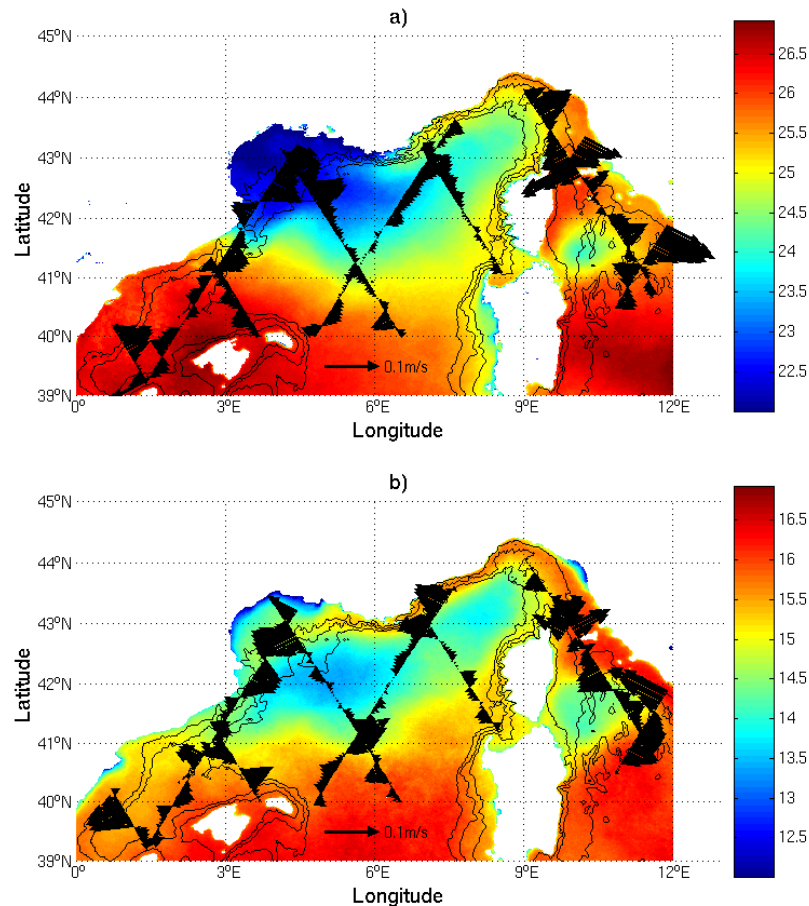


Figure 2.37 : Climatologie mensuelle des anomalies de courant géostrophique (composante perpendiculaire à la trace : flèches noires) dérivées des pentes de hauteur de mer altimétriques (données des missions T/P et Jason-1 entre 1993 et 2007), superposée à une climatologie mensuelle de SST (calculée à partir d'image AVHRR entre 1998 et 2007), pour a) Août et b) Décembre.

Une des difficultés auxquelles on a été confronté dans cette étude est la résolution spatiale trop lâche (entre les traces et le long des traces) des données considérées, ce qui limite malgré tout l'analyse et l'interprétation d'un certain nombre de signaux observés. De même l'accès à l'information reste incomplet dans les 30 premiers km au trait de côte alors que le LPC circule dans cette bande littorale à certains endroits (au sud des côtes varoises notamment). Bien entendu, la solution la plus simple consiste à utiliser les informations fournies par les autres missions altimétriques (ERS/Envisat, GFO, T/P et Jason-1 intercalés, non exploitées ici), mais les séries temporelles correspondantes, plus courtes et/ou non continues, demandent une analyse différente. Une approche que nous avons testée est d'exploiter directement les mesures haute résolution (10/20-Hz selon les missions, au lieu de 1-Hz le long des traces altimétriques, i.e. 0.7/0.35 km au lieu de 7 km) également fournies par les agences dans les produits de type GDRs. Malgré un bruit de mesure nettement plus élevé,

leur intérêt a été démontré dans des études comme *Ablain et al., 2006* ou *Bouffard et al., 2008*. Après avoir adapté nos traitements et post-traitements (en utilisant le jeu de données 1Hz utilisé dans *Birol et al., 2010* et les données des marégraphes régionaux comme références), nous avons comparé les jeux de données altimétriques obtenus (1-Hz versus 10/20-Hz) en terme d'observations côtières exploitables (nombre, erreurs associées) et les conséquences sur l'observation des variations du LPC (*Birol et al., 2013*). Comme le montre la Figure 2.38, l'évolution saisonnière des courants dérivés des données à 10/20-Hz est cohérente avec celle obtenue avec les mesures 1-Hz correspondantes, mais le plus grand nombre de mesures disponibles après traitement dans les 30 km les plus proches de la côte (+4.5% pour T/P, +10.3 pour Jason-1 et +13% pour Jason-2) entraîne une meilleure restitution du courant de pente.

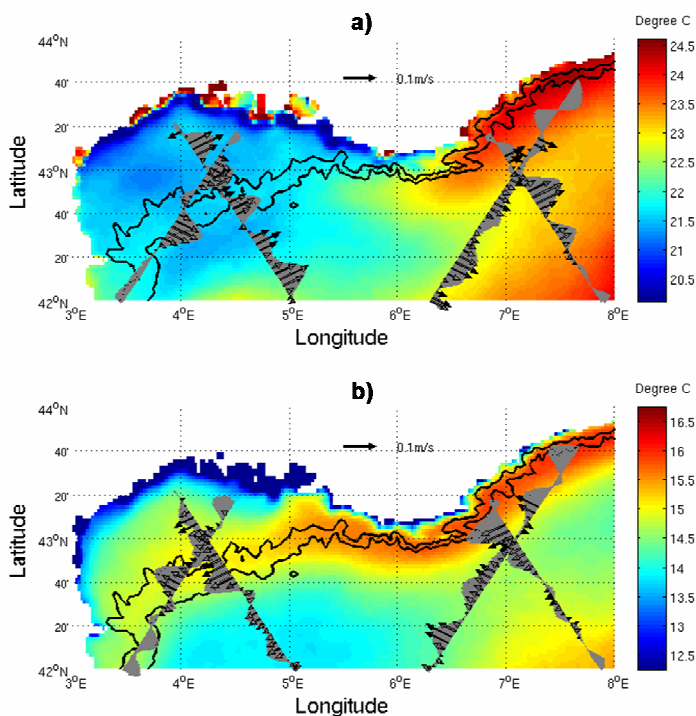


Figure 2.38 : Climatologie mensuelle des anomalies de courant géostrophique (composante perpendiculaire à la trace) dérivées des mesures 1-Hz (flèches noires) et 20-Hz (flèches grises) de la mission Jason-1 entre 2002 et 2008, superposée à une climatologie mensuelle de SST (AVHRR, 1998-2007), pour a) l'été (Juillet-Aout-Septembre) et b) l'hiver (Novembre-Décembre-Janvier). Les isobathes 200-m et 1000-m sont également représentées. D'après *Birol et al., 2013*.

L'étude présentée ci-dessus s'est focalisée sur les échelles saisonnières, plus faciles à extraire des observations, car dominantes en amplitude et correspondant à une information redondante d'une année sur l'autre. Cela ne représente qu'une partie du spectre de la variabilité océanique de la Méditerranée Nord Occidentale. L'altimétrie permet d'accéder à de très longues séries d'observations (20 ans aujourd'hui). Nous avons pu observer de larges modulations du cycle saisonnier du LPC d'une année sur l'autre (*Birol et al., 2010*), mais pas toujours cohérentes d'un endroit à l'autre du système de courant. Leur documentation reste à faire et leur origine à comprendre (lien avec le forçage atmosphérique local? Et avec la circulation à l'échelle du bassin?). Les variations haute fréquence apparaissent également très importantes dans les séries de courant géostrophique déduites des mesure altimétriques. Au niveau du Golfe du Lion, une partie de ces signaux semblent associée au vent (*Bouffard et al., 2011*) mais cela reste à creuser. Certains aspects de la circulation saisonnière restent également à étudier (la variabilité et le rôle du Courant Ouest Corse, la formation du LPC en Mer Ligure, l'existence d'éventuelles recirculations le long du trajet du système de courant,

...,). Ces questions complexes ne pourront être résolues avec les séries de données altimétriques seules. Les modèles numériques apparaissent comme une composante fondamentale pour interpréter les signaux observés par les observations ou pour comprendre les aspects complexes de la dynamique océanique, surtout en région côtière, où à la fois les interactions entre processus physiques sont très importantes et l'erreur sur les mesures considérées est significative.

En 2011, en collaboration avec Claude Estournel et Patrick Marsaleix (Laboratoire d'Aérodynamique), lors d'un stage de Master 1, nous avons utilisé une simulation régionale haute résolution (2,5 km) réaliste du modèle Symphonie (Marsaleix *et al.*, 2008) pour analyser l'information capturée par l'altimétrie. L'idée était de comparer observations spatiales et modèle afin d'interpréter les anomalies saisonnières de courant discutées dans l'étude *Biol et al.* (2010). Ce travail (cf. Figure 2.39) nous a permis d'avancer sur l'interprétation de signaux détectés par l'altimétrie en terme de circulation absolue, mais a également mis en évidence des défauts du modèle limitants pour nos objectifs scientifiques (manque d'énergie, conditions aux limites pas assez réalistes, état initial biaisé entraînant une mauvaise position du LPC à certains endroits, recirculations peu réalistes). Il a été décidé de développer une nouvelle configuration du modèle, plus grande (incluant la Corse et la Sardaigne), plus haute résolution (avec une résolution horizontale variable allant de 0.7 à 5.8 km) et partant d'un état initial corrigé. La même approche d'inter-comparaison modèle/altimétrie a été réalisée sur différentes configurations avant de converger vers une simulation nous paraissant satisfaisante. Nous pensons donc disposer à présent d'outils précieux pour avancer sur les questions scientifiques listées ci-dessus, mais qui au-delà de notre curiosité propre serviront dans un cadre plus large (préparation de la mission altimétrique SWOT et des campagnes aéroportées AirSWOT, programmes HyMex et MERMex, océanographie opérationnelle).

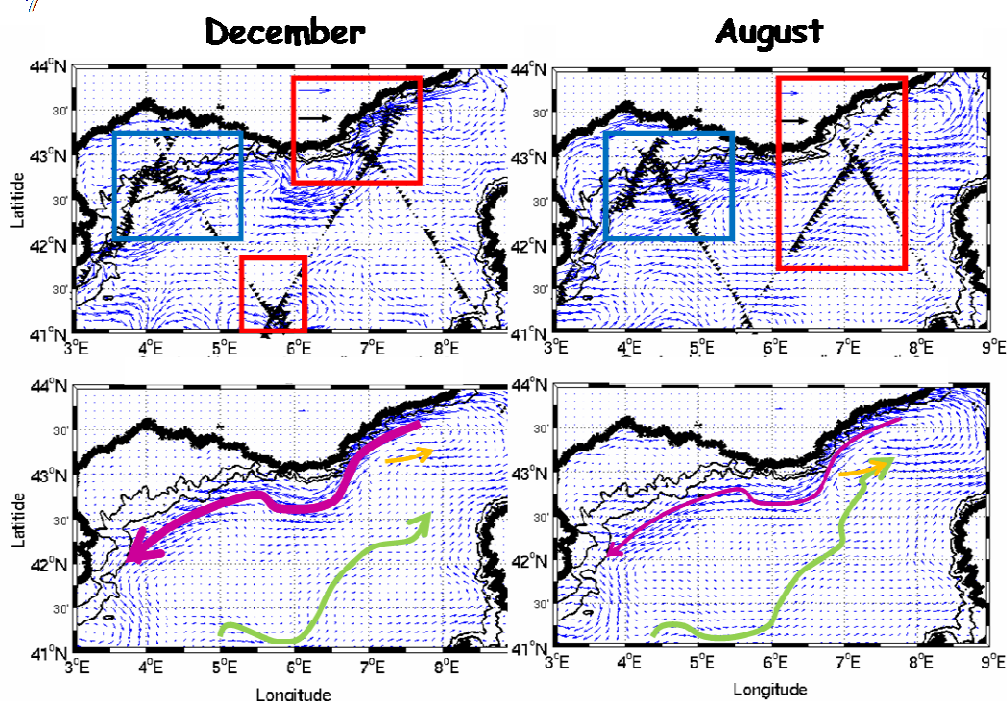


Figure 2.39 : Climatologie mensuelle pour les mois de Décembre et d'Aout : en haut) des anomalies de courant géostrophique dérivées des mesures altimétriques 1-Hz (flèches noires) et du modèle Symphonie (flèches bleus) et, en bas) des courants géostrophiques absolus dérivés du modèle. Les cadres rouges/bleus indiquent les régions de bonne/mauvaise concordance. Quelques éléments de la circulation régionale, telles que vu par le modèle, sont également indiquées (flèches de couleur).

Bibliographie

- Ablain, M., Dorandeu, J., Le Traon, P.-Y., and Sladen A.: High resolution altimetry reveals new characteristics of the December 2004 Indian Ocean tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21602, doi:10.1029/2006GL027533, 2006
- Albérola C., C. Millot and J. Front, 1995. On the seasonal and mesoscale variabilities of the Northern Current during the PRIMO-0 experiment in the western Mediterranean Sea. *Oceanologica Acta* 18, pp. 163–192.
- Andersen, O. B, and P. Knudsen, 2009. DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models. *J. Geophys. Res.*, VOL. 114, C11001, 12 pp., doi:10.1029/2008JC005179.
- Anzenhofer, M., Shum, C. K., Rentsh, M., 1999. Coastal altimetry and applications. Tech. Rep. n. 464, Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University Columbus, USA, pp 1-40. Crout, R. L., 1997, Coastal currents from satellite altimetry. *Sea Technology*, 8, pp 33-37.
- Bao, L., Y. Lu, and Y. Wang. 2009. Improved retracking algorithm for oceanic altimeter waveforms. *Prog. Nat. Sci.* 19:195-203.
- Birol, F., 1999. Sources et structures des ondes planétaires dans l’océan Indien sud-est. PhD Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Birol, F., Morrow, R.A., 2001. Source of the baroclinic waves in the southeastern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research* 106 (C5), 9145–9160.
- Birol, F. and R.A. Morrow, 2003. Separation of quasi-semiannual Rossby waves from the eastern boundary of the Indian Ocean, *J. Mar. Res.*, 61, 707-723.
- Birol F. , J.M. Brankart, F. Castruccio, P. Brasseur and J. Verron, 2004: Impact of mean dynamic topography on multivariate data assimilation hindcasts. *J. of Marine Geodesy*, 27, 59-78.
- Birol F., J.M. Brankart, J.M. Lemoine, P. Brasseur and J. Verron, 2005: Assimilation of satellite altimetry referenced to the new GRACE geoid estimate. *Geophys. Res. Letters*, 32, doi:10.1029/2004GL021329.
- Birol F., M. Cancet, C. Estournel, 2010: Aspects of the seasonal variability of the Northern Current (NW Mediterranean Sea) observed by altimetry. *J. of Mar. Systems*, 10.1016/j.jmarsys.2010.01.005.
- Birol F. and C. Delebecque, 2013: Using high sampling rate (10/20 Hz) altimeter data for the observation of coastal surface currents: A case study over the northwestern Mediterranean Sea, *J. Mar. Syst.*, DOI:10.1016/j.jmarsys.2013.07.009.
- Bleck, R., 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 4, 5588.
- Bouffard J., 2007. Application de l’altimétrie côtière pour l’étude de la circulation en Mer Méditerranée. PhD Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Bouffard, J., S. Vignudelli, P. Cipollini, et Y. Menard. 2008. Exploiting the potential of an improved multimission altimetric data set over the coastal ocean ». *Geophysical Research Letters*.
- Bouffard, J., S. Vignudelli, M. Herrmann, F. Lyard, P. Marsaleix, Y. Ménard, et P. Cipollini. 2008a. Comparison of ocean dynamics with a regional circulation model and improved altimetry in the North-western Mediterranean. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19: pp. 117–133.
- Bouffard J., S. Vignudelli, P. Cipollini, and Y. Menard 2008b. Exploiting the potential of an improved multimission altimetric data set over the coastal ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L10601, doi:10.1029/2008GL033488.
- Bouffard J. , L. Roblou, F. Birol, A. Pascual, Fenoglio, M. Cancet, R. Morrow and Y. Ménard, 2011: Validation and application of improved coastal altimetry strategies over the North Western

- Mediterranean Sea, Coastal Altimetry. Chapter 12 in S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste (eds.), *Coastal Altimetry*, Springer Berlin Heidelberg.
- Brankart, J.-M., Testut, C.-E., Brasseur, P., and Verron, J. (2003). Implementation of a multivariate data assimilation scheme for isopycnic coordinate ocean models: Application to a 1993-96 hindcast of the North Atlantic Ocean circulation. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3), 19(1-20).
- Brasseur P., P. Bahurel, L. Bertino, F. Birol, J.-M. Brankart, N. Ferry, E. Remy, J. Schröter, C.-E. Testut, B. Tranchant, J. Verron, P.J. van Leeuwen, 2006: Data assimilation in the MERCATOR/MERSEA operational ocean forecasting systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, doi:10.1256/qj.05.142.
- Bretherton, FP. 1976. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep Sea Res. Oceanogr.* 23, pp 559–582.
- Brown, G.S., 1977. The Average Impulse Response of a rough Surface and its Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.AP-25, No.1, pp 67-74.
- Caballero, A., A. Pascual, G. Dibarboure, et M. Espino. 2008. Sea level and Eddy Kinetic Energy variability in the Bay of Biscay, inferred from satellite altimeter data. *Journal of Marine Systems*, 72: pp. 116-134. doi:10.1016/j.jmarsys.2007.03.011.
- Chassignet, E.P., L.T. Smith, G.R. Halliwell, and R. Bleck, 2003: North Atlantic simulations with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference density, and thermobaricity. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 2504-2526.
- Chelton, D.B. and M.G. Schlax, 1996. Global observations of oceanic Rossby waves, *Science*, 272, pp. 234-238.
- Chelton, D. B, M. G Schlax, R. M Samelson, et R. A de Szoek. 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophys. Res. Lett* 34 (08).
- Chelton, D.B., P. Gaube, M.G. Schlax, J.J. Early, et R.M. Samelson. 2011. The Influence of Nonlinear Mesoscale Eddies on Near-Surface Oceanic Chlorophyll. *Science*, 334, pp. 328 -332. doi:10.1126/science.1208897.
- Cushman-Roisin, B. 1994. *Introduction to geophysical fluid dynamics*. Prentice Hall.
- Deng, X. and Featherstone, W.E., 2006. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia. *Journal of Geophysical Research* 111: doi: 10.1029/2005JC003039. issn: 0148-0227.
- Durand F., D. Shankar, F. Birol, S.S.C. Shenoi, 2008. An algorithm to estimate coastal currents from satellite altimetry: a case study for the East India Coastal Current. *Journal of Oceanography*, 64, pp. 831-845.
- Cerri et al., 2013. Status of GDR orbits for ocean topography missions and prospects for future improvements. OSTST meeting, Boulder.
- Chelton D.B., 2001. Report of the High-Resolution Ocean Topography Science Working Group Meeting, Oregon State University.
- Chelton, D. B., M. G. Schlax, and R. M. Samelson, 2011. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91, 167-216, doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
- C. Desportes, E. Obligis, and L. Eymard, 2007. On the wet tropospheric correction for altimetry in coastal regions,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 7, pp. 2139–2149,
- Dhomps A.L. , 2010. Améliorations des méthodes de combinaison des données Argo et altimétrie pour le suivi des variations à long terme de l’océan. PhD Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Durand F., D. Shankar, F. Birol, S.S.C. Shenoi, 2008: An algorithm to estimate coastal currents from satellite altimetry: a case study for the East India Coastal Current. *Journal of Oceanography*, 64, pp 831-845.

- Durand F., D. Shankar, F. Birol, S.S.C. Shenoi, 2009. Spatio-temporal structure of the East India Coastal Current from satellite altimetry. *J. of Geophys Res.*, 114, C02013, doi:10.1029/2008JC004807.
- Dussurget R, F. Birol, R. Morrow, P. De Mey, 2011. Fine Resolution Altimetry Data for a Regional Application in the Bay of Biscay. *Marine Geodesy*, Vol 34. <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2011.584835>.
- Dussurget R., 2012. Apport de l'altimétrie à l'étude des tourbillons à méso et subméso-échelle : application régionale au Golfe de Gascogne. PhD Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Dussurget R., F. Birol and R. Morrow, 2014. Constructing fine-scale multi-mission altimeter maps for regional and coastal applications in the Bay of Biscay. A soumettre.
- Estournel C., Durrieu de Madron X., Marsaleix P., Auclair F., Julliard C. and R. Vehil, **2003**. Observation and modelisation of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lions under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment). *Journal of Geophysical Research* 108, C3, pages 7-1 to 7-18. doi:10.1029/2001JC000825.
- Fang, F., Morrow, R., 2003. Evolution and structure of Leeuwin Current eddies in 1995–2000. *Deep-Sea Research*, II, 50, 2245-2261.
- Faucher, P., M. Gavart et P. De Mey, 2002 : Isopycnal Empirical orthogonal Functions (EOFs) in the North and Tropical Atlantic and their use in estimation problems. *J. Geophys. Res.*, 107 (C7), 10.1029/2000JC000690.
- Feng, M., and S. Wijffels, 2002. Intraseasonal variability in the South Equatorial Current of the East Indian Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 32, (1), 265-277.
- Fieux M., R. Molcard and R. Morrow, 2004. Leeuwin Current and Eddies off Western Australia. *Deep Sea Res.I*, 52, 1617-1635.
- Förste C, S.L. Bruinsma, R. Shako, O. Abrikosov, F. Flechtner, J.-C. Marty, J.-M. Lemoine, C. Dahle, H. Neumeyer, F. Barthelmes, R. Biancale, G. Balmino and R. König, 2012. A new release of EIGEN-6: The latest combined global gravity field model including LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse, *Geophysical Research Abstracts* Vol. 14, EGU2012-2821-2, EGU General Assembly.
- Fu, L.-L. and D.B. Chelton, 2001. Large-scale ocean circulation. In, *Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications*, Academic Press ed. L.-L. Fu and A. Cazenave, Eds., Academic Press, pp. 133-169.
- Garcia-Soto, C., R.D. Pingree, et L. Valdés. 2002. Navidad development in the southern Bay of Biscay: Climate change and swoddy structure from remote sensing and in situ measurements. *Journal of Geophysical Research* 107 (C8): 10.1029/2001JC001012.
- Godfrey, J.S., 1996. The effect of the Indonesian throughflow on ocean circulation and heat exchange with the atmosphere: A review. *J. of Geophys. Research*, 101, pp. 12,217-12,237.
- Gommenginger, et al., 2011. Retracking altimeter waveforms near the coasts A review of retracking methods and some applications to coastal waveforms, p 61-101 of "Coastal Altimetry", Springer, ISBN 978-3-642-12796-3.
- Guihou K., 2009. Study of the Leeuwin Current variability, using high resolution altimetric data, master's degree report "Surveillance de l'Environnement", University of Sud Toulon Var, internship at CSIRO, Hobart, Tasmania.
- Hausman J. and V. Zlotnicki, 2010. Sea State Bias in Radar Altimetry Revisited. *Marine Geodesy*, 33(S1):336-347, 2010, DOI: 10.1080/01490419.2010.487804.
- Herbaut, C., Mortier, L. and Crépon, M., 1996. A sensitivity study of the general circulation of the western Mediterranean Sea: Part I. The response to density forcing through the straits. *J. Phys. Oceanogr.* 26 1, pp. 65–84.28.

- Herbaut, C., Mortier, L. and Crépon, M., 1997. A sensitivity study of the general circulation of the western Mediterranean. Part II: the response to atmospheric forcing. *Journal of physical Oceanography* 27, pp. 2126–2145.
- Herbert G., N. Ayoub, P. Marsaleix, F. Lyard, 2011. Signature of the coastal circulation variability in altimetric data in the southern Bay of Biscay during winter and fall 2004. *J. Mar. Sys.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.03.004>.
- Herrmann M., Estournel C., Déqué M. , Marsaleix P., Sevault F., Somot S., **2008**, Dense water formation in the Gulf of Lions shelf: Impact of atmospheric interannual variability and climate change, *Continental shelf research*, 28, 2092-2112 doi:10.1016/j.csr.2008.03.003.
- Isern-Fontanet, J., E. García-Ladona, et J. Font. 2003. « Identification of Marine Eddies from Altimetric Maps ». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, pp. 772-778.
- Killworth, P. D., D. B. Chelton, and R. A. De Szoek, 1997: The speed of observed and theoretical long extra-tropical planetary waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1946-1966.
- Lambin J., Morrow R., Fu L.-L., Willis J. K., Bonekamp H., Lillibridge J., Perbos J., Zaouche G., Vaze P., Bannoura W. et al, 2010. The OSTM/Jason-2 Mission. *Marine Geodesy* 33, Supplement 1, 4-25, DOI : 10.1080/01490419.2010.491030.
- Le Cann, B., M. Assenbaum, J.C. Gascard, et G. Reverdin. 2005. Observed mean and mesoscale upper ocean circulation in the midlatitude northeast Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 110.
- Le Grand, P., E. J. O. Schrama, and J. Tournadre, 2003. An inverse estimate of the dynamic topography of the ocean, *Geophys. Res. Lett.* 30, 1062.
- Le Hénaff, M., L. Roblou, et J. Bouffard. 2010. Characterizing the Navidad current interannual variability using coastal altimetry. *Ocean Dynamics* 61, pp. 425-437. doi:10.1007/s10236-010-0360-9.
- Le Traon, P.Y., F. Nadal, et N. Ducet. 1998. An Improved Mapping Method of Multisatellite Altimeter Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15, pp. 522-534.
- Le Traon P.Y., Faugere Y., Hernandez F., Dorandeu J, Mertz F, Ablain M, 2003. Can we merge GEOSAT Follow-On with TOPEX/Poseidon and ERS-2 for an improved description of the ocean circulation? *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 20(6), 889-895.
- Lombard A., 2005. Variations acutelles du niveau de la mer : observations et causes. PhD Thèse, Univ. Paul Sabatier, Toulouse.
- Lux, et al., 2010. COMAPI: new regional tide atlases and high frequency dynamical atmospheric correction. OSTST Lisbon. (<http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2010/Cancel.pdf>)
- Lyard F., F. Lefevre . T. Letellier and O. Francis, 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*. 56: 394–415 DOI 10.1007/s10236-006-0086.
- Marsaleix P., F. Auclair, J.W. Floor, M.J. Hermann, C. Estournel, I. Pairaud and C. Ulses, 2008. Energy conservation issues in sigma-coordinate free-surface ocean models. *Ocean Modelling* 20, pp. 61-89.
- Maximenko N., P. Niiler, M-H Rio, O. Melnichenko, L. Centurioni, D. Chambers, V. Zlotnicki and B. Galperin, 2009. Mean dynamic topography of the ocean derived from satellite and drifting buoy data using three different techniques. *J. Atmospheric and Oceanic Technology* 26, pp 1910-1919.
- Melet, A.; Gourdeau, L. & Verron, J., 2010. Variability of the Solomon Sea circulation from altimetry sea level data. *Ocean Dynamics*, 60(4), 883-900
- Millot C., 1991. Mesoscale and seasonal variabilities of the circulation in the western Mediterranean. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, vol. 15, issue 3-5, pp. 179-214.
- Millot, C., 1995. PRIMO-0 and related experiments. *Oceanol. Acta* 18 2, pp. 137–138

- Morrow, R.A., and F. Birol, 1998. Variability in the south-east Indian Ocean from altimetry : Forcing mechanisms for the Leeuwin Current, *J. Geophys. Res.*, 103, 18,529-18,544.
- Morrow, R.A., F. Fang, M. Fieux and R. Molcard, 2003. Anatomy of three warm-core Leeuwin Current eddies. *Deep Sea Res. II*, 50, 2229-2243.
- Morrow R.A., F. Birol, D. Griffin and J. Sudre, 2004: Divergent pathways of warm and cold-core ocean eddies. *Geophys. Res. Letters*, 31: L24311, doi:10.1029/2004GL020974.
- Morrow, R.A. and P.-Y. Le Traon, 2011. Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry. *J. Adv. Space Res.* (2011), doi:10.1016/j.asr.2011.09.033.
- Obligis E., C. Desportes, L. Eymard, M.J. Fernandes and C. Lazaro, 2011. Tropospheric corrections for coastal altimetry. Chapter 6 in S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste (eds.), *Coastal Altimetry*, Springer Berlin Heidelberg.
- Palastanga, V., P. J. van Leeuwen, M. W. Schouten, and W. P. M. de Ruijter, 2007. Flow structure and variability in the subtropical Indian Ocean: Instability of the South Indian Ocean Countercurrent. *J. Geophys. Res.*, **112**, C01001. doi:10.1029/2005JC003395.
- Pascual, A., Y. Faugère, G. Larnicol, et P.Y. Le Traon. 2006. Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters. *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:200610.1029/2005GL024633.
- Perigaud, C., and P. Delecluse, 1992. Annual sea level variations in the southern Indian Ocean from Geosat and shallow-water simulations. *J. Geophys. Res.*, 97, 20,169-20,178.
- Pinot J.M., J.L. López-Jurado, M. Riera, 2002. The Canales experiment (1996-1998). Interannual, seasonal and mesoscale variability of the circulation in the Balearic Channels. *Progress in Oceanography*, 55, pp. 335-370.
- Pham, D. T., J. Verron, and M. C. Roubaud, 1998. A Singular evolutive extended Kalman filter for data assimilation in oceanography, *J. Mar Syst.*, 16(3-4), 323-340.
- Pingree R.D. and B. Le Cann, 1992. Three anticyclonic slope water oceanic eDDIES(SWODDIES) in the Southern Bay of Biscay in 1990. *Deep-sea research. Part A*, 39 (7-8): pp. 1147–1175.
- Potemra, J.T., 2001. Contribution of equatorial Pacific winds to southern tropical Indian Ocean Rossby waves. *Journal of Geophysical Research* 106 (C2), 2407–2422.
- Pujol, M.-I., G. Dibarboure, P.-Y. Le Traon, P. Klein, 2012. Using High-Resolution Altimetry to Observe Mesoscale Signals. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29, 1409–1416. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00032.1>.
- Reason CJC, Allan RJ, Lindesay JA. 1996. Evidence for the influence of remote forcing on interdecadal variability in the southern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research* 101: 11 867–11 882
- Reynaud, T., P. Le Grand, H. Mercier, and B. Barnier, 1998. A new analysis of hydrographic data in the Atlantic and its application to an inverse modeling study. *International WOCE Newsletter*, 32, 29-31.
- Rio M.H., P.M. Poulain and al, 2007. A Mean Dynamic Topography of the Mediterranean Sea computed from altimetric data, in-situ measurements and a general circulation model. *Journal of Marine Systems* 65, pp. 484-508.
- Rio, M. H., S. Guinehut, and G. Larnicol, 2011. New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements, *J. Geophys. Res.*, 116, C07018, doi:10.1029/2010JC006505.
- Roblou L., J. Lamouroux, J. Bouffard, F. Lyard, M. Le Hénaff, A. Lombard, P. Marsalaix, P. De Mey and F. Birol, 2011. Post-processing altimeter data toward coastal applications and integration into coastal models. Chapter 9 in S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste (eds.), *Coastal Altimetry*, Springer Berlin Heidelberg.

- Sánchez, R., and J. Gil. 2004. 3D structure, mesoscale interactions and potential vorticity conservation in a swoddy in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, 46, pp. 47-68. doi:10.1016/j.jmarsys.2003.10.002.
- Schlax, M. G. and D. B. Chelton, 1994. Detecting aliased tidal errors in altimeter height measurements. *J. Geophys. Res.*, 99, 12,603-12,612.
- Strub, P. T., T. K. Chereskin, P. P. Niiler, C. James and M. D. Levine, 1997. Altimeter- derived variability of surface velocities in the California Current System: Part 1 -- Evaluation of altimeter velocity resolution. *J. Geophys. Res.* 102, 12,727-12,748.
- Testut L., F. Birol and C. Delebecque, 2012. Regional Tidal Modeling and Evaluation of Jason-2 Tidal Geophysical Correction. *Marine Geodesy*, 35(S1):299-313. DOI: 10.1080/01490419.2012.718642.
- Thibaut P and Poisson JC, 2008. Waveforms processing in Pistach project, Oral presentation during 2nd coastal altimetry workshop, Pisa, Italy, Nov 2008,, http://www.coastalt.eu/files/pisaworkshop08/pres/02-Pise_Nov2008_Coastal_Processing_PThibaut.pdf.
- Tokmakian RT and Challenor PG., 1993. Observations in the Canary Basin and the Azores frontal region using Geosat data, *Journal of Geophysical Research*, volume 98, no. 3, pages 4761-4773.
- Tranchant B., C.E. Testut, L. Renault, N. Ferry, F. Birol and P. Brasseur, 2008: Expected impact of the future SMOS and Aquarius Ocean surface salinity missions in the MERCATOR operational systems: New perspectives to monitor the ocean circulation. *Remote Sensing of Environment*, doi:10.1016/j.rse.2007.06.023.
- Vignudelli S, Cipollini P, Astraldi M, Gasparini GP, Manzella G, 2000. Integrated use of altimeter and in situ data for understanding the water exchanges between the Tyrrhenian and Ligurian seas. *J Geophys Res*, vol 105 (C8): 19649–19663.
- Vignudelli, S., P. Cipollini, L. Roblou, F. Lyard, G.P. Gasparini, G. Manzella and M. Astraldi, 2005. Improved satellite altimetry in coastal systems: case study of the Corsica Channel (Mediterranean Sea). *Geophysical Research Letters* 32, L07608. doi:10.1029/2005GL022602.

Chapitre 3 – Activités de service et d’enseignement

Recrutée en Janvier 2005 en tant que Physicien Adjoint (Conseil National des Astronomes et Physiciens) à l’Observatoire Midi Pyrénées, ma mission se répartit entre recherche scientifique (50% de mon temps), une tâche de service liée à un des Services d’Observations (S.O) de l’INSU et l’enseignement (50% du temps restant).

3.1 – Activités de service

Recrutée pour renforcer les activités scientifiques du S.O. « Centre de Topographie des Océans et de l’Hydrosphère : CTOH », labellisé par l’INSU en 1989, j’en ai été responsable adjoint (responsable scientifique: Rosemary Morrow) de Janvier 2005 à Septembre 2012. J’en suis responsable scientifique depuis cette date. Le CTOH est un centre national de traitement et d’archivage de données dédié à l’altimétrie spatiale (<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/>). Il est soutenu par l’INSU, le CNES, l’Observatoire Midi-Pyrénées et le CPER Pôle Océan-Altitude-Climat. Sa mission historique est de maintenir et mettre à jour des bases de données altimétriques homogènes et des produits dérivés pour observer et étudier la dynamique des océans, de la cryosphère et de l’hydrosphère, mais elle va aujourd’hui bien au-delà. Il doit définir les besoins spécifiques des thématiques émergentes en liaison avec les équipes de recherche nationale pour développer, valider et mettre en oeuvre les algorithmes et les outils nécessaires, retraiter les données en conséquence, assurer le suivi qualité et la distribution de produits à valeur ajoutée, assurer le transfert de compétence vers les centres opérationnels, valoriser les produits et former de nouveaux utilisateurs, ainsi que participer à la préparation de nouvelles missions. Le CTOH doit donc assurer un service complémentaire à celui des systèmes opérationnels existants (SALP-CNES, AVISO, DUACS).

Avant 2004, l’ensemble de ces activités était géré par un physicien adjoint, l’équivalent d’un ingénieur d’étude à plein temps et un ingénieur en CDD (sur des crédits CNES). A l’heure actuelle, l’équipe regroupe 9 personnes : un physicien, 2 physiciens adjoints (dont un qui nous a rejoint en Septembre 2013), 2 ingénieurs de recherche (CNRS et IRD), 3 ingénieurs d’études et un ingénieur CNES. Elle travaille également en étroite collaboration avec plusieurs chercheurs du LEGOS et, de manière plus ponctuelle, avec des doctorants, post-doctorants ou stagiaires. Le fonctionnement du CTOH est organisé autour des problématiques techniques et scientifiques traitées, cf. organigramme de la Figure 3.1 (correspondant à la situation de début 2013).

Nous gérons à présent plus de 20 ans de données altimétriques (en non cumulé) issues de 8 missions spatiales (Topex/Poseidon, GFO, Envisat, Jason-1&2, SARAL/AltiKa, Cryosat-2, ERS-2) et différents produits dérivés et algorithmes. Cela représente plusieurs téraoctets de données et des outils de gestion de données et de codes sophistiqués. Nos bases de données subissent une croissance continue, tout comme les demandes auxquelles nous devons faire face. Nous avons donc décidé de nous rapprocher du service opérationnel AVISO (ouverture du nouveau service AVISO+ en février 2014, partenariat CNES/CTOH) pour mieux répondre au besoin et favoriser les transferts d’outils, de produits et d’expertise du niveau R&D vers le niveau produit de recherche et finalement produit opérationnel.

Parallèlement à des activités de gestion scientifique, humaine et administrative, ces dernières années, j’ai été plus spécifiquement en charge du développement et de la diffusion des produits altimétriques régionaux/côtiers. Lors de ma prise de fonction en 2005, une première version d’une chaîne de traitement des données altimétriques côtières existait au

LEGOS. Elle avait été développée dans le cadre du projet de recherche ALBICOCCA (TOSCA/CNES) pour la mission TOPEX/Poseidon en Méditerranée afin de palier la dégradation de la qualité et l'indisponibilité des données des produits altimétriques standards près des côtes. La tâche à laquelle je me suis attelée a été de rendre ces traitements transposables aux autres missions altimétriques, ainsi qu'à d'autres zones d'étude, de travailler sur la flexibilité des outils pour pouvoir s'adapter à des besoins spécifiques, d'y adjoindre de nombreux outils de post-traitement et de contrôle qualité, et de travailler à la définition de produits altimétriques régionaux distribuables par le S.O. CTOH. De nombreuses études (dans des régions différentes) et adaptations se sont révélées nécessaires pour calculer des produits permettant d'observer au mieux la physique côtière (voir chapitre 2). A présent, cette chaîne de traitement altimétrique (appelée X-TRACK) sert en routine pour calculer des produits régionaux de SLA (Figure 3.2) accessibles librement sur le portail CTOH. Des évolutions et nouveaux produits ont également vu le jour : des produits de SLA haute résolution le long de la trace (10/20-Hz au lieu de 1-Hz pour les produits standards) et des produits régionaux de constantes de marée dérivées de l'altimétrie. Ils ont été distribués à plus de 250 utilisateurs ou groupes de recherche.

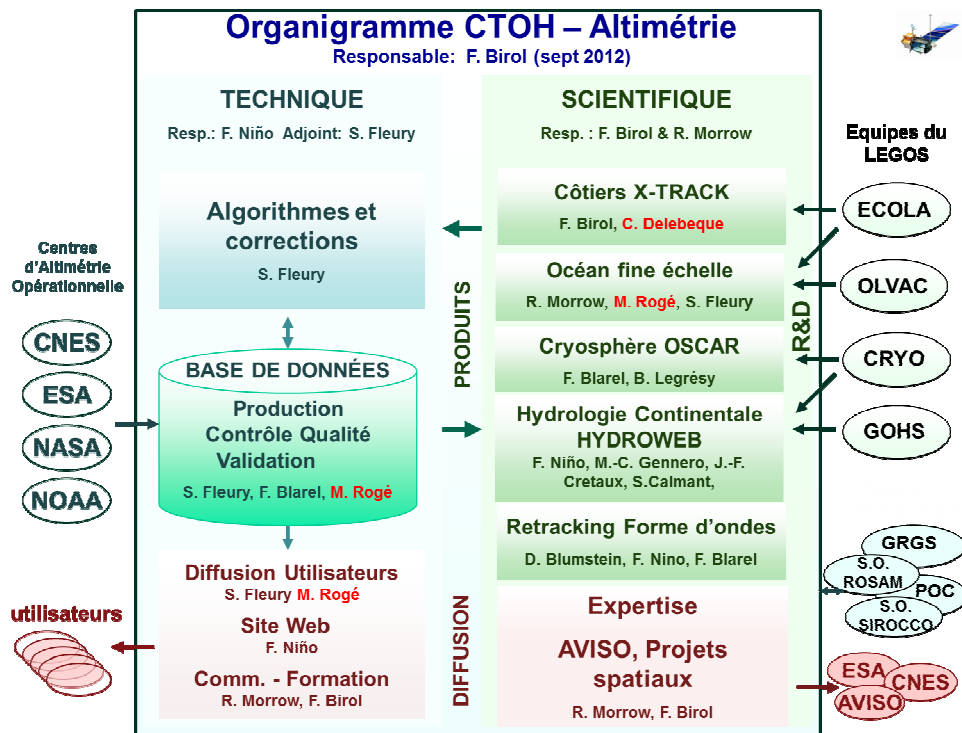


Figure 3.1 : Organigramme du S.O. CTOH en 2013.

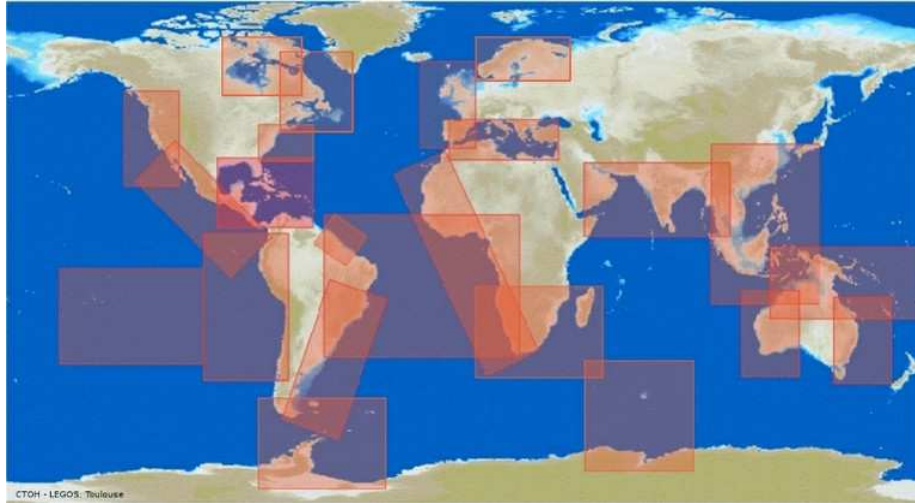


Figure 3.2: Carte indiquant en orange les zones où des produits altimétriques régionaux X-TRACK sont disponibles.

3.2 - Activités d'enseignement

Un premier volet de mon activité d'enseignement depuis mon recrutement dans le corps des physiciens adjoints en 2005 est lié à mon service académique réalisé essentiellement à l'Université Paul Sabatier (j'ai effectué ponctuellement quelques heures d'enseignement spécialisé à Météo France ou à l'ENSTA). Il se répartit essentiellement entre les formations de Master 1 « Atmosphère Océan Continent » (23h de cours et TD et 18h de stage de terrain par an, le tout sur la physique de l'océan) et de Master 2 Professionnel « Physique et Chimie de l'Air et des Océans » (10h de cours et 15h de stage de terrain par an, dédiés aux méthodes et instruments de mesure en océanographie physique). Les stages de terrain ont été mis en place respectivement en 2008 et 2013 pour les Masters 1&2. Ils ne concernent officiellement qu'un nombre modeste d'heures d'enseignement mais nécessitent bien entendu un temps conséquent de préparation à l'équipe pédagogique dont je fais partie. D'autre part, au niveau du Master 2 Professionnel, un mini projet est proposé chaque année aux étudiants (sur la catastrophe de Fukushima en 2012-2013), comportant des volets développés dans quatre des modules (océanographie, radioactivité, chimie atmosphérique et développement durable). Cela demande également un investissement pédagogique, en plus des heures officielles, pour adapter les enseignements en conséquence d'une année sur l'autre.

Une des missions du S.O. CTOH est de former des scientifiques sur les techniques altimétriques, notamment pour des applications émergentes. Dans ce cadre, je suis régulièrement amenée à encadrer (accueil individualisé au LEGOS ou suivi de travaux à distance) des étudiants (généralement en Master 2 ou doctorant en début de thèse, en France ou à l'étranger) pour leur permettre d'utiliser au mieux les mesures altimétriques pour les applications (en océanographie côtière ou au large) sur lesquelles ils travaillent.

J'ai encadré ou co-encadré régulièrement des stagiaires depuis 2003 (3 étudiants de Master 1, 3 étudiants de Master 2 et 3 élèves d'écoles d'ingénieurs) sur des sujets très variés, avec des objectifs à dominante scientifique et/ou technique (voir chapitre 1 pour la liste détaillée des étudiants et sujets). Certains ont continué en thèse (4), d'autres ont complété leur formation ou sont rentrés dans la vie professionnelle, ce qui représente de mon point de vue un investissement valorisé.

Au niveau doctoral, j'ai assuré un co-encadrement effectif de Jérôme Bouffard (en support de son encadrant Yves Ménard) au cours de la dernière année de sa thèse (poursuivie par 10 mois de collaboration sur le projet PISTACH financé par le CNES). En 2007, j'ai

sollicité et obtenu une bourse de thèse financée par la DGA sur l' « *apport de l'altimétrie à l'étude des tourbillons à méso et subméso-échelle dans le Golfe de Gascogne* » (voir chapitre précédent). J'ai ensuite obtenu une dérogation auprès de l'école doctorale « Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E) » pour pouvoir encadrer officiellement Renaud Dussurget qui a effectivement démarré sa thèse en Décembre 2008 (soutenue le 27 Mars 2012). Renaud a poursuivi sa thèse par 12 mois de contrat postdoctoral (financement IFREMER/CLS), avant d'être recruté en CDI en tant qu'ingénieur de recherche travaillant pour le compte de l'entreprise « Collecte Localisation Satellites (CLS) ». Il y valorise une partie des travaux effectués au cours de sa thèse. Forte de ces expériences, ma motivation principale pour obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches tient dans mon souhait de continuer à encadrer officiellement des étudiants en formation doctorale. Pour cela, je compte déposer des demandes de financement dès les toutes prochaines années.

Parallèlement, j'ai également encadré dans le passé, et encadre actuellement, des ingénieurs et personnels de recherche au niveau post-doctoral (via divers contrats, voir chapitre 1). Cette activité est amenée à se poursuivre dans les années à venir (que ce soit via mes activités de service CTOH ou de recherche).

Chapitre 4 – Bilan et perspectives de recherche

4.1 – Bilan

Dans un contexte de changements globaux, les problèmes posés par l'impact des variations de l'océan sur les sociétés humaines nécessitent de développer les outils pour y faire face. Les efforts effectués en modélisation numérique, la mise en place des moyens d'observations adéquats et le développement de techniques d'assimilation et/ou d'analyse de données doivent être menés de concert. La validation et l'amélioration des modèles, ainsi que le développement de l'assimilation de données nécessitent des observations spatiales et in situ. Inversement, les modèles numériques aident à définir les systèmes d'observations optimaux et à interpréter les données.

Dans le chapitre 2, nous avons pu voir, à travers différents exemples, l'intérêt de l'altimétrie spatiale pour l'océanographie en général, que ce soit en terme de compréhension de la physique de l'océan, de validation de modèle et/ou d'assimilation de données. Même en considérant les limites inhérentes à ce type de mesure (résolution, vision intégrée de la dynamique océanique, information sur une partie des courants de surface uniquement, composante absolue accessible de manière partielle), celle-ci constitue un complément solide au faible nombre relatif de données in-situ pour un grand nombre d'applications. Nous avons également vu son fort potentiel pour le cas particulier de l'océanographie côtière, malgré les difficultés d'exploitation actuelles de cette mesure pour ce type d'environnement.

Analyser l'apport des mesures altimétriques pour observer et comprendre les variations de l'océan côtier a été l'objectif principal de mon activité scientifique au cours des dernières années. Pour cela il a fallu d'abord générer et valider des séries de données exploitables, ce qui a nécessité un investissement important dans la compréhension du contenu physique des observations et des sources d'erreur, et dans le traitement de la donnée. Ensuite, j'ai cherché à analyser comment elles pouvaient servir l'étude de questions scientifiques précises sur plusieurs régions cibles (Méditerranée Nord Occidentale, côtes de l'Inde, Golfe de Gascogne, côte Ouest d'Australie, ...). Dans cet objectif, j'ai étudié les processus physiques observables par des mesures de variations de hauteur de la mer entachées d'erreurs significatives (et très variables spatialement et temporellement en fonction des conditions topographiques, d'état de mer ou atmosphériques), de résolution spatio-temporelle limitée et caractérisées par de nombreuses pertes de données, notamment dans la bande de 10-15 km la plus proche du trait de côte. Malgré les difficultés, nous avons pu voir que l'altimétrie côtière reste un outil judicieux pour étudier la structuration spatio-temporelle de systèmes de courant côtier, pour analyser la dynamique de méso-échelle le long des courants de pente ou pour détecter la présence d'ondes côtières ou d'upwelling. Bien entendu, tout le spectre de variabilité de ces processus dynamiques n'est pas observable par altimétrie spatiale et la conclusion la plus évidente que je tire de ces expériences successives est qu'il apparaît nécessaire de disposer localement de moyens d'étude complémentaires, observations in-situ (séries de mesures longues en certains points et mesures synoptiques de certains paramètres physiques) et/ou modèles régionaux à haute résolution, les plus réalistes possibles. Cela permettrait de quantifier précisément les limites d'observation des systèmes actuels, en termes d'échelles et de dynamique océanique. Cette tâche, cruciale pour optimiser l'utilisation des mesures altimétriques actuelles, aussi bien que pour définir au mieux les systèmes

d'observation de demain, semble demeurer complexe sur la base des moyens disponibles aujourd'hui. Nous reviendrons sur cette question dans les perspectives.

Depuis mon recrutement en tant que physicien adjoint, une partie très significative de mes activités de service s'est nourrie de mes activités de recherche. Cela a consisté à implémenter de manière plus opérationnelle des outils développés et testés dans différents projets scientifiques et à coordonner l'évolution de l'altimétrie côtière vers une phase plus accessible pour la communauté. Il a donc également s'agit en pratique de gérer, valoriser et diffuser des bases de données et produits.

Depuis ma thèse, j'ai développé un réseau de collaborations avec différentes équipes expertes dans l'analyse de données altimétriques et in-situ, la modélisation de l'océan et l'assimilation de données. Ces collaborations, riches en échanges scientifiques et humains, ont été très déterminantes dans la structuration de mon parcours scientifique. Elles restent importantes aujourd'hui pour mes perspectives de travail.

Mes activités de recherche m'ont donné également l'opportunité d'encadrer des étudiants de Master et de doctorat, au travers desquels j'ai aussi beaucoup appris. D'autre part, mes activités de recherche et de service m'ont permis d'être à l'initiative de divers projets de recherche et de participer à un certain nombre d'autres (cf. chapitre 1). Ces projets ont été riches en résultats et connaissances nouvelles qui ont été, pour la plupart, valorisées à travers des publications scientifiques et des communications en conférences internationales.

4.2 - Perspectives

Mes perspectives de recherche pour les années à venir s'appuient largement sur l'expérience et les collaborations acquises au cours des dernières années. Elles s'articulent selon deux axes thématiques :

- Le premier est dédié à la re-visite et à la continuité de mes travaux passés sur la caractérisation des signaux physiques observables à partir de l'altimétrie spatiale, dans un contexte programmatique riche.
- L'autre concerne l'étude du système de circulation océanique de la Méditerranée Nord Occidentale et s'insère dans une thématique plus large d'étude de la réponse de l'environnement marin côtier au changement climatique et à la pression anthropique (programmes HyMeX/MerMeX).

D'un point de vue méthodologique, les projets mentionnés ci-dessous participent au développement de nouveaux outils, basés sur l'altimétrie spatiale, pour les études de l'océan côtier (notamment pour les zones où les mesures in situ sont inexistantes ou difficiles d'accès). D'un point de vue scientifique, ils contribuent à l'effort de recherche dans les régions océaniques littorales. Comme par le passé, un certain nombre d'outils développés dans le cadre de mes activités de recherche seront valorisés ensuite dans le cadre de ma tâche de service.

4.2.a – Le problème de l'observabilité

Les questions posées au début de la section 2.3.b restent largement d'actualité malgré les travaux déjà entrepris. Comme déjà écrit dans le chapitre 2, la stratégie que j'ai choisie dans les années passées est de travailler sur des chantiers géographiques cibles en collaboration avec différentes équipes de recherche pour analyser si (et comment) les séries de mesures spatiales de hauteur de la mer existantes pouvaient permettre d'apporter des éléments de réponse à des questions scientifiques particulières. Cette stratégie était intéressante car elle a contribué à montrer, par une certaine diversité de résultats scientifiques, que l'altimétrie avait

tout à fait sa place dans le panel des outils à disposition de l'océanographe côtier. Mais elle a également mis en évidence la complexité du problème à traiter. Nous avons vu qu'un certain nombre de processus physiques était observable, à certaines échelles et via différentes techniques d'analyse, avec l'altimétrie spatiale mais n'avons pas étudié la part de la dynamique qui ne l'était pas. Concernant les verrous limitant l'utilisation de ce type de mesure en région côtière, la situation a énormément progressé en 10 ans. Beaucoup de scientifiques travaillent aujourd'hui sur cette problématique (agences spatiales et groupes de recherche) et les techniques de traitement, aussi bien que les corrections de la mesure qui sont disponibles aujourd'hui n'ont vraiment rien à voir avec ce qui existait il y a quelques années. Des observations altimétriques côtières sont d'ores et déjà disponibles pour les utilisateurs, ce qui est un énorme progrès. Malgré tout, leur utilisation reste complexe et nécessite une certaine expertise, ce qui rend leur intégration dans les systèmes opérationnels prématurée. Le niveau d'incertitude sur la mesure reste élevé et, encore plus ennuyeux, non quantifié. Les erreurs de correction les plus importantes sont identifiées de manière globale mais pas leur variabilité spatio-temporelle. Les conséquences de ces erreurs sur l'interprétation physique des observations ne sont pas très claires. Les produits altimétriques ne sont pas forcément adaptés au besoin du côtier, d'autant que les produits régionaux actuellement disponibles le sont en général à titre de recherche et développement, avec un contenu plus complexe que celui des produits standard distribués. La question de la continuité entre informations sur la dynamique océanique pouvant être obtenue à partir des observations altimétriques et à partir des réseaux d'observations in situ côtiers reste posée (ce qui a de fortes implications sur la définition des observatoires côtiers à mettre en place ou à renforcer).

Je compte continuer à travailler sur ces questions dans les années à venir, avec une implication nettement moins forte sur les aspects développements méthodologiques, qui avaient surtout vocation à obtenir des séries de données à analyser dans un premier temps, définir les améliorations possibles sur les traitements dans un deuxième temps, puis générer des produits altimétriques régionaux de démonstration (valorisés ensuite par le S.O. CTOH). La continuité de mes études sur l'observabilité des signaux océaniques dans la mesure altimétrique se fera dans un contexte très particulier puisque nous sommes en train de passer de l'ère de l'altimétrie à visée nadir qui a vu le jour dans les années 1980, à celle de nouvelles technologies altimétriques (altimétrie en bande Ka, altimétrie fauchée interférométrique, altimétrie Doppler). La série de missions altimétriques passées, actuelles et futures est représentée sur la Figure 4.1. Les premières analyses faites à partir des mesures de la mission SARAL/AltiKa (coopération entre l'ISRO et le CNES, lancée le 25/02/2013) indiquent déjà que l'altimètre en bande Ka a un niveau de bruit de mesure plus faible et une meilleure résolution spatiale le long de la trace (*AVISO special SARAL/AltiKa issue, n°10, Déc. 2013 ; Verron et al., 2013*). La mission CRYOSAT-2 (mission ESA, lancée le 8 Avril 2010), offrant un mode altimètre SAR ou SAR interférométrique dans quelques régions, montre un potentiel énorme, avec une mesure de bonne qualité jusque très près du trait de côte et une résolution encore meilleure que celle de SARAL/AltiKa (*Boy et al., 2013 ; Andersen et al., 2013*). Ces nouvelles caractéristiques de la mesure altimétrique s'avèrent largement plus favorables à l'observation de la dynamique côtière que celles des missions précédentes.

corrections de la mesure devient particulièrement critique (et pas seulement près des terres) pour une mission comme SWOT (collaboration NASA/CNES, lancement prévu pour 2020), dont l'objectif scientifique, avec un altimètre interférométrique à large fauchée, est d'accéder aux variations des hauteurs de la mer avec une résolution de 2 km² sur 120 km de large (contre plusieurs kilomètres de manière unidirectionnelle pour l'altimétrie conventionnelle).

Dans le projet OSTST MICCS-2 (PI : Pierre De Mey et Florence Birol), nous proposons d'étudier, dans le contexte de l'océan côtier :

(1) la signature de plusieurs processus dynamiques (avec un focus particulier sur la variabilité du courant de pente et les ondes/marées internes), mais également des erreurs de mesure, dans le niveau de la mer observé par altimétrie (le projet s'intéresse également à d'autres variables observables, comme la température de surface de la mer),

(2) l'impact de ces observations et erreurs sur les estimations et prévisions de ces processus.

L'objectif (1) repose sur la confrontation des observations de plusieurs provenances (altimétrie, SST, in situ selon disponibilité) et des modèles numériques réalistes (Symphonie essentiellement). L'objectif (2) se base sur des modèles numériques et des méthodes d'assimilation de données avancées, tirées d'approches ensemblistes. Ce projet rassemble (en plus des PI) plusieurs collaborateurs d'expertise complémentaire : Nadia Ayoub (LEGOS), Claude Estournel (Laboratoire d'Aérodynamique), Ariane Koch-Larrouy (LEGOS), Julien Lamouroux (Noveltis), Florent Lyard (LEGOS) et Patrick Marsaleix (Laboratoire d'Aérodynamique). Il se concentre sur 3 régions océaniques contrastées : le Golfe de Gascogne, la Méditerranée Nord Occidentale et les mers indonésiennes. Il prévoit de recruter 2 ingénieurs sous contrat (une partie du financement est acquis à ce jour) et nous occupera plusieurs années. Il est prévu de définir et mettre en place quelques cas d'études particuliers (en fonction des mesures in situ disponibles) pour pouvoir tester au fil de l'eau (y compris au-delà de la durée du projet) l'impact de nouvelles corrections altimétriques sur les observations de hauteur de la mer. Nous envisageons également de déposer très rapidement un sujet de thèse (bourse CIFRE) sur ce projet.

La partie de la dynamique océanique observable par altimétrie spatiale n'a fait que croître depuis les années 1980 (meilleure qualité de la mesure donc accès à des processus de signature plus faible sur la hauteur de la mer, plus haute résolution spatio-temporelle donc accès à des processus de plus petite échelle). Celle-ci devrait encore être largement repoussée dans un futur proche, favorisant ainsi l'observation de la dynamique océanique côtière depuis l'espace. Cet objectif rassemblera forcément les efforts et l'expertise de nombreuses personnes et passera par la résolution de problèmes scientifiques et technologiques très complexes. Mes travaux, en collaboration avec plusieurs collègues, s'inscrivent dans ce contexte.

Au-delà des avancées constantes de l'altimétrie spatiale, les progrès réalisés par les modèles numériques, de plus en plus réalistes, et par les réseaux d'observations côtiers, de plus en plus nombreux, variés et organisés, constituent un facteur très positif pour la résolution de problème scientifique tel que celui abordé ci-dessous.

4.2.b – La circulation régionale en Méditerranée Nord Occidentale

L'objectif général de cette étude est d'observer, documenter et comprendre la variabilité de la circulation régionale en Méditerranée Nord Occidentale. Nous avons vu que l'altimétrie spatiale permet d'accéder aux variations saisonnières du LPC, au moins à certains endroits correspondants à l'intersection entre le courant et des traces au sol des missions T/P-Jason-1&2. De nombreuses questions demeurent toutefois concernant certaines composantes du

système de courant, étant donné le large espacement entre les points d'observation altimétrique. Les courants Ouest et Est Corse, par exemple, ne sont pas observés. Les caractéristiques des variations observées en été et en hiver apparaissent différentes. Elles sont rapides et cohérentes spatialement pendant la transition automne/hiver et plus lentes et faisant apparaître quelques discontinuités spatiales lors des saisons printemps/été. Est-ce dû à une plus grande dispersion des situations de printemps/été que d'automne/hiver d'une année sur l'autre (l'étude ayant été faite à partir d'une climatologie moyenne calculée sur 14 ans) ou à des caractéristiques hydrodynamiques (branches de re-circulation du courant de pente notamment)? Nous avons vu également qu'il existait une forte modulation interannuelle du cycle saisonnier moyen. Est-elle cohérente d'un sous bassin à un autre? Et quelle en est l'origine (ou les origines)? D'autre part, l'altimétrie spatiale ne donne accès qu'à des anomalies de courant. Comment les interpréter en termes de circulation absolue? Et comment savoir si la composante du courant géostrophique (de surface) détectée par l'altimétrie est représentative du flux océanique total (ce qui revient finalement à comprendre comment utiliser l'information fournie par la mesure spatiale de hauteur de la mer)?

Nous avons vu au chapitre 2 que nous disposons à présent d'une simulation numérique régionale à haute résolution nous paraissant tout à fait satisfaisante. La configuration du modèle Symphonie utilisée a subi plusieurs améliorations au cours du temps et semble bien représenter le système de courant de pente (Figure 4.2). Les premières comparaisons effectuées entre les courants dérivés de l'altimétrie et du modèle semblent plutôt prometteuses. Notre objectif est donc d'étudier les questions citées ci-dessus à partir de l'analyse combinée de 20 ans (1993-2013) de séries d'observations et de sorties du modèle. D'un point de vue méthodologique, cela passe :

- par une distinction entre signature du courant de pente / erreurs dans les mesures altimétriques en fonction des échelles spatio-temporelles considérées,
- par la définition d'une méthode pour extraire un signal physique cohérent entre vitesses de courant dérivées de mesures altimétriques et simulées par les modèles.

Au-delà du cadre strict des questions scientifiques qui nous intéressent ici, la démarche mise en place dans cette étude permettra d'optimiser l'information apportée par l'altimétrie spatiale pour l'étude des courants de pente dans d'autres régions océaniques, aussi bien que les méthodes de comparaison altimétrie/modèle. La nécessité de comprendre et de représenter de manière réaliste dans les modèles numériques la dynamique et la thermodynamique des zones côtières est à l'origine de nombreux projets à l'échelle de chantiers géographiques (MISTRALS, SPICE, AMOP, ...). La demande est donc grande et cette étude rentre également dans le cadre de ma tâche de service. Un de nos objectifs est de mettre en place une méthode pour calculer les séries temporelles de caractéristiques de courant de pente à partir de l'altimétrie spatiale (diverses méthodes existent dans la littérature mais elles sont généralement adaptées pour des courants intenses : elles seront testées et éventuellement améliorées) et évaluer leur représentativité par rapport à la variabilité du courant total réel. Ces résultats seront valorisés à travers des produits dérivés qui seront distribués par le S.O CTOH.

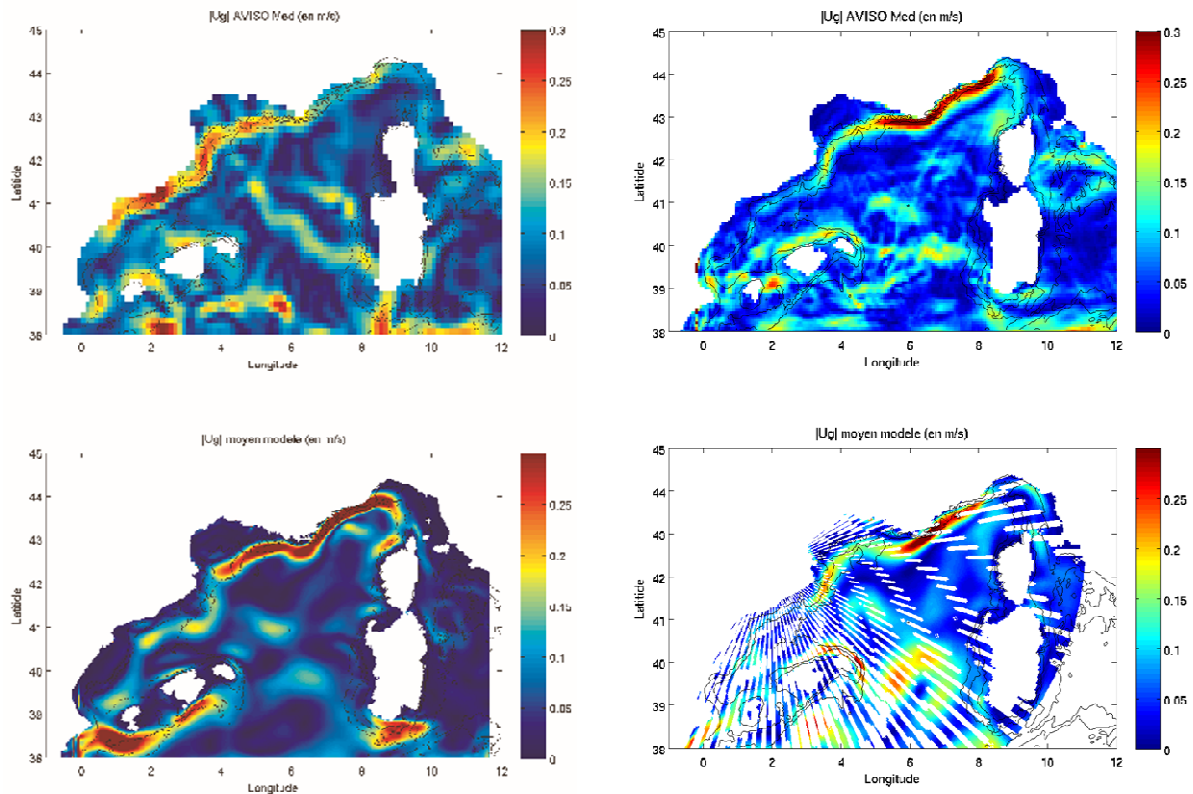


Figure 4.2 : *En haut) amplitude des courants géostrophiques moyens calculés à partir des produits régionaux des topographies dynamiques moyennes, Rio et al. (2007) à gauche et Rio et al. (2013). En bas) amplitude des courants de surface géostrophiques moyens calculés à partir de configurations régionales du modèle Symphonie réalisées en 2010 et en 2013.*

Pour atteindre ces objectifs, l'altimétrie spatiale et le modèle régional ne suffiront probablement pas. La Figure 4.2 illustre le progrès fait au cours des dernières années sur un produit annexe tel que la topographie dynamique moyenne grâce à une plus grande quantité d'observations in situ disponibles. Nos études devraient fortement bénéficier de l'opportunité du programme d'observation à long terme MOOSE (Mediterranean Ocean Observing System on Environment) qui se concentre sur le bassin nord méditerranéen. L'objectif de MOOSE est de maintenir un système d'observations, multi sites et intégré, destiné à suivre le changement des écosystèmes sur la Méditerranée Nord- Occidentale sur le long terme. Il s'appuie sur les questions scientifiques du programme MISTRALS Chantier Méditerranée (en particulier ceux des projets HYMEX, MERMEX, CHARMEX). MOOSE a été mis en place en 2010, une vue d'ensemble de son plan d'implémentation est représentée sur la Figure 4.3.

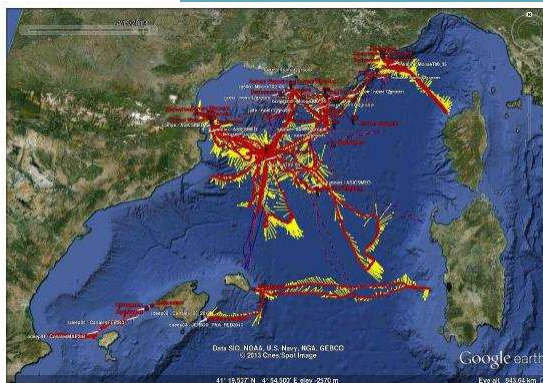
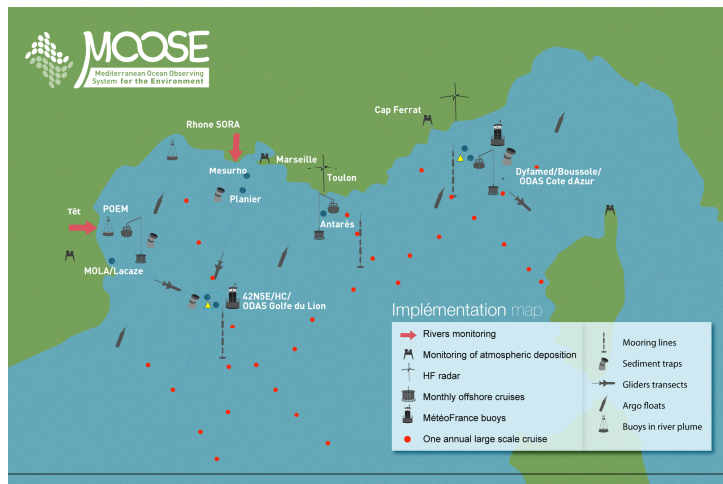


Figure 4.3 : En haut) Plan d'implémentation du réseau MOOSE. A gauche) Trajectoires (en rouge) et courants de surface (flèches jaunes) mesurés par des gliders entre les mois de Janvier et Avril 2013 (<http://www.moose-network.fr>).

Références :

- Andersen O., A. Ablat and L. Stenseng, 2013. Cryosat-2 SAR-In Altimetry for Coastal Sea Level Recovery - Results from the Fjords of Eastern Greenland. OSTST meeting, 8-11 October 2013, Boulder, USA.
- Boy F. N, Picot, T. Moreau and S. Labroue, 2013. CryoSat-2 SAR mode over ocean: one year of data quality assessment. OSTST meeting, 8-11 October 2013, Boulder.
- Rio M.H., P.M. Poulain and al. "A Mean Dynamic Topography of the Mediterranean Sea computed from altimetric data, in-situ measurements and a general circulation model." Journal of Marine Systems 65: 484-508 2007.
- Rio M.H., A. Pascual, P.M. Poulain, M. Menna, M. Adani, R. Balbin, A. Aparicio, J. Lopez, L. José, B. Barcelo and J. Tintoré, 2013. A new Mean Dynamic Topography of the Mediterranean Sea based on model outputs, drifter data, hydrological profiles and altimeter measurements, EGU meeting, 7-12 April 2013, Vienna.
- Verron J., P. Sengenés et al., 2013. SARAL/Atika. OSTST meeting, 8-11 October 2013, Boulder.

