



Habilitation à Diriger des Recherches
Spécialité : Océanographie et Environnement Marin

Un nouveau paradigme pour l'observation des interactions physico-chimico-biologiques dans l'océan ouvert.

Soutenue le 4 juillet 2016, par Fabrizio D'Ortenzio

Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer
Université Pierre et Marie Curie

Laboratoire d'Océanographie de Villefranche UMR 7093 UPMC-CNRS



Composition du Jury

Pr. Belanger Simon. Université du Québec à Rimouski. Département de Biologie, Chimie et Géographie (Rapporteur).

Dr. Poulain Pierre-Marie. Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste, Italie. Department of Oceanography (Rapporteur).

Pr. Zakardjan Bruno. Université Aix-Marseille. Mediterranean Institute of Oceanography. Responsable de l'équipe « Océanographie Physique, Littorale et Côtière » (Rapporteur).

Dr. Brasseur Pierre. Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Grenoble (Examineur).

Dr. Durrieu de Madron Xavier. Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéennes, Université de Perpignan (Examineur).

Pr. Nival Paul. Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer, Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (Examineur).

*A mon père,
qui m'a appris que l'intelligence n'est pas une option*

« Nous avons trois moyens principaux : l'observation de la nature, la réflexion et l'expérience. L'observation recueille les faits ; la réflexion les combine ; l'expérience vérifie le résultat de la combinaison. Il faut que l'observation de la nature soit assidue, que la réflexion soit profonde, et que l'expérience soit exacte. On voit rarement ces moyens réunis. »

Denis Diderot, Pensées sur l'interprétation de la nature

Préambule

Mon activité de recherche vise à améliorer nos connaissances sur l'interaction physique - biologie dans l'océan et en particulier sur le **rôle du forçage physique dans la distribution spatio-temporelle du phytoplancton océanique**. Dans ce contexte, j'utilise plusieurs outils scientifiques : les observations satellitaires (notamment de la couleur de l'océan), les données des campagnes et les observations provenant de la nouvelle génération d'engins que sont les plateformes autonomes in situ (flotteurs-profondeur et planeurs sous-marins, que les Anglo-saxons appellent respectivement profiling floats et gliders).

Mes terrains de jeu

Mon activité de recherche s'est concentrée sur le bassin méditerranéen. Cela vient de raisons à la fois personnelles, historiques et scientifiques. C'est une mer que j'aime et qui représente le cadre dans lequel une grande partie de ma vie s'est déroulée. Il s'agit aussi d'une région océanique très particulière du point de vue scientifique. Souvent considérée comme un « bassin test » ou comme un « océan en miniature » (Bethoux *et al.*, 1999), la Méditerranée est à la fois un cas d'école (car une part significative des phénomènes qui ont lieu dans les grands océans s'y produisent) mais, cependant, il s'agit aussi d'un « objet d'étude très spécial et unique » (Morel, 2006, communication personnelle). La Méditerranée représente un endroit où les enjeux sociétaux, pour la France et pour l'Europe, sont importants (i.e. tourisme, pêche, aires protégées), ce qui demande une attention toute particulière de la part de la communauté océanographique. Finalement, la Méditerranée a représenté, et représente encore, le lieu où différentes cultures, sociétés, religions, civilisations se sont croisées et mélangées, parfois dans la douleur, mais souvent dans le partage et dans le respect (Braudel, 1949). Son identité spécifique, c'est un peu aussi la mienne. Après avoir parcouru plusieurs pays, je me suis définitivement installé en France, à Villefranche sur Mer, justement sur le bord de la Méditerranée.

Scientifiquement, toutefois, mon activité de recherche ne s'est pas limitée à la Méditerranée. Les processus océanographiques qui m'intéressent sont très étudiés aussi dans d'autres régions océaniques. Ainsi, l'appartenance à des communautés scientifiques ouvertes sur l'océan mondial, comme les communautés française et villefranchoise, m'a permis de participer et de contribuer à des études qui ne se limitaient pas à la Méditerranée.

A part l'incontestable contribution à la formation personnelle que ces recherches m'ont apporté (en termes de connaissances scientifiques, d'échanges avec d'autres communautés de recherche, d'opportunités de financement et de collaboration), cela m'a permis aussi de mieux positionner mes activités scientifiques sur la Méditerranée. Voir loin et prendre de la hauteur est, sans doute, un passage obligé dans la recherche scientifique.

L'observation : ma priorité scientifique

Le fil logique de mon activité de recherche part de l'observation satellitale de la couleur de l'océan. C'est un outil remarquable pour comprendre les cycles biogéochimiques dans l'océan hauturier. L'observation satellitale est récurrente, globale et s'est exercée sur une durée

relativement longue (données disponibles à partir de 1979). Pour être interprétées, toutefois, ces données nécessitent de l'information additionnelle, notamment sur les couches profondes, non observables par satellite.

En visant la compréhension des structures spatio-temporelles de la distribution du phytoplancton, je me suis donc fortement intéressé à l'exploitation scientifique de nouvelles plates-formes autonomes de mesure (planeurs sous-marins et, principalement, flotteurs-profileurs). Ces nouveaux outils de recherche ouvrent, en combinaison avec les satellites, de véritables pistes nouvelles dans le domaine de la biogéochimie marine. Tout cela sans négliger les campagnes océanographiques, c'est-à-dire le travail de terrain « classique », qui reste néanmoins la clé de toute activité océanographique hauturière.

Structure du document

Ce document, qui représente une synthèse de mon activité de recherche passée et une prospective, est organisé en quatre parties.

Dans une première partie, je présenterai mon Curriculum Vitae détaillé, les encadrements, mes responsabilités administratives et d'enseignement et la liste complète de mes travaux.

Ensuite, je décrirai succinctement les thématiques océanographiques que j'ai abordé, avec une attention particulière pour le bassin méditerranéen et ses problématiques actuelles. Dans cette partie, je déclinerais ma contribution à l'état de l'art, et, sous forme d'encadrés, je décrirai les résultats principaux de mes articles les plus importants.

Après, dans une troisième section, mes perspectives futures seront détaillées. Cette partie décrira les lignes de recherche que j'entends poursuivre dans les prochaines années, mais, aussi, une présentation du cadre programmatique (i.e. projets de recherche, contexte français et européen, collaborations) dans lequel mes activités s'inscriront.

Enfin, dans la quatrième et dernière partie du document, je discuterai brièvement ma vision future de la recherche océanographique. Cette partie, à la limite de la science-fiction, provient de mes réflexions personnelles, mais aussi des longues et incessantes conversations et discussions avec mes collègues océanographes.

Plan

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Préambule | iii |
| Plan | 1 |
| CURRICULUM VITAE | 3 |
| 1 Informations générales | 3 |
| 2 Cursus d'études et de recherche | 3 |
| 3 Synthèse de la bibliographie | 3 |
| 4 Synthèse des activités de terrain | 3 |
| 5 Engagements dans des programmes nationaux et internationaux | 4 |
| 5.1 Comme Responsable | 4 |
| 5.2 Comme Participant | 5 |
| 5.3 Animation de la recherche | 6 |
| 6 Encadrements | 6 |
| 6.1 Thèses | 6 |
| 6.2 Post-docs | 7 |
| 6.3 Stages | 8 |
| 7 Enseignement | 9 |
| 7.1 Enseignement Universitaire | 9 |
| 7.2 Autres activités d'enseignement | 9 |
| 7.3 Vulgarisation scientifique | 9 |
| 8 Responsabilités Administratives | 10 |
| 8.1 Responsabilités et activités de direction d'équipe ou de laboratoire | 10 |
| 8.2 Responsabilités ou activités collectives | 10 |
| Nationales | 10 |
| A l'étranger ou internationales | 10 |
| 9 Liste des publications | 10 |
| 9.1 Revues à comité de lecture | 10 |
| Articles Publiés | 10 |
| 9.2 Actes de colloques à comité de lecture | 13 |
| 9.3 Publications dans des revues sans comité | 14 |
| 9.4 Chapitres d'ouvrages | 14 |
| Les interactions physique-chimie-biologie dans l'océan et en Méditerranée | 15 |
| 1 Préambule | 15 |
| 2 Les différentes échelles | 16 |
| 2.1 La large échelle | 16 |
| 2.2 La variabilité saisonnière | 16 |
| 2.3 Les petites échelles spatio-temporelles | 23 |
| 3 La Méditerranée | 24 |
| 3.1 Le large échelle | 24 |
| 3.2 La variabilité saisonnière | 26 |
| 3.3 Les petites échelles spatio-temporelles | 35 |
| 4 Et le forçage biotique ? | 37 |
| 5 Conclusion, leçons apprises, messages à retenir | 38 |
| Projet de recherche | 41 |
| 1 Introduction | 41 |
| 2 Les projets NAOS et MERMEX | 41 |
| 2.1 NAOS | 41 |
| 2.2 Le Chantier méditerranéen et son volet biogéochimique MERMEX | 42 |
| 3 Un nouveau paradigme pour l'observation des interactions physico-chimico-biologiques dans l'océan ouvert. | 45 |

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4 | <i>La dynamique phytoplanctonique en Méditerranée et ses forçages: anciennes questions, nouveaux outils</i> | 46 |
| 4.1 | Axe « Biorégions » | 46 |
| 4.2 | Axe « Perturbations» | 49 |
| 4.3 | La Méditerranée Orientale | 52 |
| 5 | <i>Conclusion</i> | 54 |
| | Et après ?? | 55 |
| 1 | <i>Un réseau global de flotteurs profileurs biogéochimiques</i> | 55 |
| 2 | <i>La Méditerranée et au-delà</i> | 56 |
| 2.1 | La Méditerranée comme « sentinelle » | 56 |
| 2.2 | L'Atlantique | 57 |
| | Considérations finales | 59 |
| 1 | <i>Quelques réflexions « philosophiques »</i> | 59 |
| 2 | <i>Un nouveau paradigme observationnel</i> | 59 |
| | Remerciements | 61 |
| | Bibliographie | 63 |
| | Annexe | 72 |

« Daß alle unsere Erkenntnis mit der Erfahrung anfangt, daran ist gar kein Zweifel »¹

Immanuele Kant, Critique de la raison pure

CURRICULUM VITAE

1 Informations générales

Fabrizio D'ORTENZIO

Né le 26 novembre 1970 à Rome, marié, deux enfants

Nationalité italienne

Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, UMR 7093

CNRS/INSU et Université Pierre et Marie Curie, PARIS 6.

06238 VILLEFRANCHE sur MER cedex

Tel. : 04 93 76 37 15

E-mail : dortenzio@obs-vlfr.fr

2 Coursus d'études et de recherche

- 1997** Master de recherche à l'Université " La Sapienza " de Rome, Italie. Diplôme obtenu : " Laurea " en Océanographie Physique.
- 1998 - 2000** Boursier chargé de recherche à l'Istituto di Fisica dell'Atmosfera di Roma du Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italie.
- 2000 - 2003** Thèse de Doctorat de l'Open University of London, effectuée à la Stazione Zoologica di Napoli " A.Dohrn ".
- 2003 - 2006** Post-doctorant dans l'équipe d'optique marine et télédétection du Laboratoire d'Océanographie de Villefranche.
- Depuis Oct. 2006** Chercheur CNRS, Chargé de recherche de première classe, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche.

3 Synthèse de la bibliographie

- 49 publications de rang A, 8 en 1er auteur, 6 en 2ème auteur dont 20 avec mes étudiants en thèse ou post-doctorants. 2 chapitres de livre.
- 943 citations, h_index 17 (ISI web of science, février 2016)

La totalité de mes publications est disponible en format pdf à l'adresse :

http://www.obs-vlfr.fr/LOV/OMT/personnes/z_orte_fa/ortensio.php

4 Synthèse des activités de terrain

- 18 campagnes océanographiques « longues » (plus d'une semaine).
- 21 sorties « courtes » (moins d'une semaine, notamment sur les sites d'observations long terme de Naples et Villefranche).

¹ « Que toute notre connaissance commence avec l'expérience, il ne fait aucun doute »

5 Engagements dans des programmes nationaux et internationaux

5.1 Comme Responsable

- NAOS** (« Novel Argo Ocean observing System »), EQUIPEX Investissement d'avenir (2010-2019). Co-coordonateur par l'UPMC et responsable du WP méditerranéen. Le projet NAOS vise à renforcer la contribution française à la mission de base Argo, à proposer des développements technologiques innovants pour améliorer la fiabilité, la durée de vie, les économies d'énergie et les coûts des flotteurs profileurs, à développer et à valider la prochaine génération de flotteurs profileurs Argo (pour l'océan profond et la biogéochimie), dans trois zones pilotes : la Méditerranée, l'Arctique et l'Atlantique Nord. Chercheurs impliqués : D'Ortenzio F., Claustre H., Taillandier V. LOV-CNRS ; P-Y Le Traon, S. Pouliquen, S. Le Reste, V. Thierry, IFREMER ; M. Babin, UMI Takuvik.
- **BioArgo-CNES**, TOSCA CNES (2011-2015). Co-coordonateur avec H. Claustre. Au travers de la réponse à l'appel d'offre LEFE-GMMC, le projet TOSCA Bio-Argo met des flotteurs de type BioArgo à disposition de la communauté nationale. L'idée est ici que les individus ou laboratoires intéressés (hors notre laboratoire) puissent avoir accès à des données de flotteurs BioArgo, avec un contrôle de qualité dédié, dans des zones d'intérêt sans requérir une expertise *a priori* en technologie de flotteurs ou en recueil / décodage du flux de données temps réel. Chercheurs impliqués : D'Ortenzio F., Claustre H. (LOV CNRS) ; laboratoires ayant obtenu des BioArgo dans le cadre de ce projet : LPO (V. Thierry, S. Speich), LOCEAN (G. Reverdin, JB Sallé), LOMIC (P. Conan), MIO (T. Moutin), LOG (H. Loisel), IRD-Tahiti (E. Martinez), SO-MOOSE (P. Raimbault/L. Mortier).
 - **MESOLAB**, LEFE-GMMC (2012-2014). Co-coordonateur avec V. Taillandier. Le projet MESOLAB a été entamé pour fournir à Mercator des premiers éléments pour évaluer les performances des produits opérationnels en biogéochimie. Le projet, qui s'est conclu en 2014, a permis d'identifier un certain nombre des méthodes qui sont en train d'être mises en application dans les systèmes opérationnels Mercator. Chercheurs impliqués : D'Ortenzio F., Taillandier V., C. Fontana, L. Prieur, LOV-CNRS ; C. Estournel, LA-CNRS ; C. Pinazo, MIO.
 - **PABIM 1-2** (« Plates-formes Autonomes en Biogéochimie : Instrumentation et Mesure »), Projet à Partenariat Renforcé GMMC (2008-2009 et 2010-2012). Les objectifs de PABIM étaient de : mener une réflexion sur l'utilisation biogéochimique des plates-formes autonomes de mesures (flotteurs profileurs, gliders, animaux) et définir des protocoles de Contrôle de Qualité (QC) pour les paramètres biogéochimiques et les procédures automatiques nécessaires pour pouvoir, à terme, intégrer ces paramètres dans le centre des données CORIOLIS. Chercheurs impliqués : Claustre H, Prieur L., Antoine D, LOV ; Eldin G, LEGOS ; Testor P., Mortier L., LOCEAN, Guinet C., CEBC ; Thierry V., Lherminier P., LPO ; P. Brasseur, LEGI.
- BIOPATTERNS**, LEFE-CYBER (2010-2011). L'objectif de BIOPATTERNS est de développer de nouvelles stratégies d'observation basées sur les données satellitaires de couleur de l'océan et d'un réseau de flotteurs profileurs biogéochimiques. Chercheurs impliqués : D'Ortenzio F., Claustre H., Prieur L., LOV-CNRS ; Morin P. CNR Obs-Roscoff ; Doglioli A., Carlotti F., Quéguiner B., MIO Marseille ; Blain S. Obs Banyuls, CNRS UMR 7621
- **PRONUTS**, Projet Action Ciblée GMMC, co-financé par la région PACA (2009-2011). L'objectif du projet PRONUTS est de développer deux flotteurs profileurs prototypes équipés d'un capteur de nitrates et d'une antenne IRIDIUM et d'évaluer leurs potentialités pour répondre à des problématiques biogéochimiques majeures. Chercheurs impliqués : F. D'Ortenzio, C. Migon, LOV ; S. Le Reste, IFREMER ; P. Raimbault,

5.2 Comme Participant

- **MERMEX** (« Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment »), PI C. Guieu, X. de Madron, R. Sempéré, (2010-2019). L'action MERMEX représente le volet biogéochimique océanique du Chantier Méditerranée proposé par l'INSU et structuré dans le programme MISTRALS. Dans cette action, j'ai la co-coordination (avec C. Estournel, P. Testor et P. Conan) du WP 1 « Impact des changements hydrodynamiques sur les écosystèmes méditerranéens » et je me suis fortement impliqué dans la préparation et la construction de l'action expérimentale DEWEX, qui a eu lieu en 2012-2013 en Méditerranée nord occidentale. Cette action représente la première expérience pilote d'utilisation du réseau de flotteurs profileurs biogéochimiques du projet NAOS.
- **BIOCAREX**, ANR (2011-2014), PI D. Antoine. Dans le projet BIOCAREX est proposé d'exploiter les observations optiques et biogéochimiques réalisées depuis plus de 6 ans à haute fréquence (horaire) au site BOUSSOLE en Méditerranée nord-occidentale (mer Ligure). Mon implication dans le projet vise à étudier la possibilité d'assimiler les données bio-optiques à haute fréquence de BOUSSOLE dans des modèles écosystémiques (coll. P. Brasseur, LGGE).
- **GROOM** (« Gliders for Research, Ocean Observation and Management ») FP7, PI P. Testor et Laurent Mortier, (2011-2015). Le projet GROOM visait à définir les contours d'une future infrastructure européenne censée gérer et exploiter les observations issues de la flotte européenne gliders. Mon rôle dans GROOM était de coordonner les activités liées à l'établissement des protocoles de contrôle de qualité et validation des données biogéochimiques issues de gliders. J'ai participé aussi aux travaux visant à mieux coordonner les activités gliders avec celles des autres plates-formes autonomes de mesure (satellites, mouillages, flotteurs profileurs).
- **OSS2015** (« Ocean Strategic Services beyond 2015 »), FP7, PI O. Hembise Fanton d'Andon (2011-2014). Le projet OSS2015 visait le développement de nouveaux produits de biogéochimie marine à partir des observations couleur de l'océan, et de nouveaux services non disponibles actuellement à travers MyOcean, le service précurseur de la prévision opérationnelle du Marine Core Service Européen. Dans OSS2015, mon implication était d'identifier les meilleures stratégies d'intégration des nouveaux produits satellitaires avec les observations des plates-formes autonomes et de faciliter leur utilisation par les modèles écosystémiques opérationnels (assimilation).
- **SIDERI**, FP-7 European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI), PI PY LeTraon, (2010-2012). Le programme Euro-Argo visait à structurer la contribution européenne au network global de flotteurs profileurs ARGO. Dans ce programme, j'ai eu la responsabilité de proposer des systèmes de contrôle de qualité des données biogéochimiques et de proposer l'utilisation combinée de données ARGO et des observations satellitaires de la couleur de l'océan.
- **remOcean**, European Research Council (ERC) Advanced Grant, PI H. Claustre, (2010-2015). L'objectif du remOcean était de déployer et exploiter scientifiquement plus de 40 flotteurs profileurs biogéochimiques dans des régions clés de l'océan global : l'Atlantique Nord et les gyres oligotrophes du Pacifique. Dans remOcean, mon implication est très conséquente et concerne la mise en place des systèmes de contrôle de qualité des données, ainsi que l'analyse des données pour améliorer notre caractérisation de la biogéographie et de la phénologie du phytoplancton en Atlantique Nord.
- **AtlantOS** (« Optimizing and Enhancing the Integrated Atlantic Ocean Observing System »), programme H2020, PI Martin Visbeck, GEOMAR, DE (2014-2020). Le projet

AtlantOS a été financé pour développer, maintenir et exploiter scientifiquement un système d'observation intégré de l'océan Atlantique. Dans le projet AtlantOS, je participe aux travaux concernant le contrôle de qualité de données (notamment ceux biogéochimiques) et de la mise en place de protocoles pour assurer l'interopérabilité entre les différentes plates-formes d'observation.

5.3 Animation de la recherche

- Membre du comité d'organisation du « MyOcean Science Days », Toulouse (2014).
- Membre du comité d'organisation du colloque LEFE, Toulouse (2014).
- Membre du comité d'organisation des journées annuelles GMMC, (2011-2012-2013).
- Organisation du meeting Argo-France « Vers la biogéochimie », Villefranche sur Mer, 21 mai, 2010.
- Co-organisation de la session « Element cycling, primary productivity, carbon export and sequestration, and ecosystem functioning in the Mediterranean Sea: Current syntheses and re-evaluation », ASLO Aquatic Sciences Annual Meeting 2009, Nice, 25-30 janvier 2009.
- Rapporteur pour les journaux de rang A : Deep-Sea Research I, Deep-Sea Research II, Biogeosciences, Chemistry and Ecology, Continental Shelf Research, Ecological Modeling, International Journal of Remote Sensing, Global Change Biology, Geophysical Research Letters, Journal Geophysical Research-Oceans, Limnology and Oceanography, Marine Ecology, Ocean Sciences, Optic Express, Remote Sensing of Environment.
- Editeur associé du numéro spéciale pour Journal Geophysical Research-Oceans, “Dense water formations in the North Western Mediterranean: from the physical forcings to the biogeochemical consequences”.
- Rapporteur pour l'Agence Nationale de la Recherche, le CNES-TOSCA, les commissions flotte côtière et hauturière, les Agences italienne et belge d'évaluation de la recherche, l'European Space Agency.

6 Encadrements

6.1 Thèses

Héloïse Lavigne. Doctorante UPMC, 2011-2013. Thèse soutenue en novembre 2013, co-encadrée avec C. Migon (MC UPMC, LOV). Titre de la thèse « Caractérisation de la variabilité de la biomasse océanique en Méditerranée et du rôle des forçages physique (couche de mélange) et chimique (concentration en sels nutritifs) dans sa répartition spatio-temporelle. »

Lavigne H., D'Ortenzio F., Claustre H. & Poteau A.. 2012, “Towards a merged satellite and in situ fluorescence ocean chlorophyll product”, *Biogeosciences*, 9, 9, 2111-2125

Heimbuerger L-E, Lavigne H., Migon C., D'Ortenzio F., Estournel C., Coppola L. & Miquel J.-C., 2013, “Temporal variability of vertical export flux at the DYFAMED time-series station (Northwestern Mediterranean Sea)”. *Progress in Oceanography*, 119: 59-67 | doi: 10.1016/j.pocean.2013.08.005.

Lavigne H., D'Ortenzio F., Migon C., Claustre H., Testor P., Ribera d'Alcalà M., Lavezza R., Houpert L., & Prieur L., 2013, “Enhancing the comprehension of mixed layer depth control on the Mediterranean phytoplankton phenology”. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 118: 3416-3430 | doi: 10.1002/jgrc.20251.

Houpert L., Testor, P., Durrieu de Madron X., Somot S., D'Ortenzio F., Estournel C. & Lavigne H., 2014, “Seasonal cycle of the mixed layer, the seasonal thermocline and the upper-ocean heat storage rate in the Mediterranean Sea derived from observations”, *Progress in Oceanography*, 79, 6611.

D'Ortenzio F., Lavigne H., Besson F., Claustre H., Coppola L., Garcia N., Laës-Huon A., Le Reste S., Malardé D., Migon C., Morin P., Mortier L., Poteau A., Prieur L., Raimbault V & Testor P., 2014,

“Observing mixed layer depth, nitrate and chlorophyll concentrations in the northwestern Mediterranean: A combined satellite and NO₃ profiling floats experiment”. *Geophysical Research Letters*, 41: 6443-6451 | doi: 10.1002/2014gl061020.

Sauzède, R., Lavigne, H., Claustre, H., Uitz, J., Schmechtig, C., D’Ortenzio F., Guinet, C. & S. Pesant, 2015, “Vertical distribution of chlorophyll a concentration and phytoplankton community composition from in situ fluorescence profiles: a first database for the global ocean”. *Earth System Science Data*, 8, 365-399.

Lavigne, H., D’Ortenzio, F., Ribera D’Alcalà, M., Claustre, H., Sauzède, R. & Gacic, M., 2015. On the vertical distribution of the chlorophyll a concentration in the Mediterranean Sea: a basin scale and seasonal approach. *Biogeosciences*, 12(5), 4139-4181.

Orens Pasqueron de Fommervault. Doctorant UPMC (bourse CIFRE), 2012-2015. Thèse soutenue en décembre 2015, co-encadrée avec C. Migon (MC UPMC, LOV). Titre de la thèse « Dynamique des nutriments en Méditerranée : des campagnes océanographiques aux flotteurs Bio-Argo »

Pasqueron de Fommervault O., Migon C, D’Ortenzio F., d’Alcala MR & Coppola L., 2015, “Temporal variability of nutrient concentrations in the northwestern Mediterranean sea (DYFAMED time-series station)”. *Deep-Sea Research I* 100: 1-12 | doi: 10.1016/j.dsr.2015.02.006.

Pasqueron de Fommervault O., Migon C, Dufour A., D’Ortenzio F., Kessouri F., Raimbault P., Garcia N. & Lagadec, V., 2015, « Atmospheric input of inorganic nitrogen and phosphorus to the Ligurian Sea: Data from the Cap Ferrat coastal time-series station », *Deep-Sea Research I*. *Deep-Sea Research I*, 106, pp.116-125.

Pasqueron de Fommervault O., D’Ortenzio F., Mangin A, Serra R, Migon C, Claustre H, Ribera d’Alcalà M, Prieur L, Taillandier V, Schmechtig C, Poteau A, Leymarie E, Dufour A, Besson F, Obolensky G., 2015. “Seasonal variability of nutrient concentrations in the Mediterranean Sea: Contribution of Bio-Argo floats.” *J Geophys Res-Oceans* 120 | doi: 10.1002/2015JC011103.

Nicolas Mayot. Doctorant UPMC, 2013-en cours, co-encadrée avec H. Claustre (LOV). Titre de la thèse « Dynamique multi-échelle de l’interaction physique-biologie en Méditerranée ».

Mayot, N., D’Ortenzio F., Ribera d’Alcalà, M., Lavigne, H., & H. Claustre. Interannual variability of the Mediterranean trophic regimes from ocean color satellites. *Biogeosciences*, sous presse.

6.2 Post-docs

Marcelo Dottori. Post-doc CNES, janvier-octobre 2009. M. Dottori est resté à Villefranche pour une période trop courte pour finaliser le travail de son post-doc. Il est actuellement professeur d’océanographie physique à l’université de Sao Paolo, Brésil. De surcroît, il est aussi membre du Comité de Direction de l’Université de Sao Paolo, en charge de relations avec l’Europe. Dans cette fonction, j’ai repris contact avec lui, notamment pour aider son université à se doter d’une flotte Gliders et à contribuer au réseau Bio-Argo.

Vincent Taillandier, Post-doc projet européen SESAME, septembre 2008-août 2009. V. Taillandier est actuellement IR-CNRS au LOV et je suis son responsable scientifique.

Taillandier V., D’Ortenzio, F & Antoine, D., 2012, “Carbon fluxes in the upper mixed layer of the Mediterranean Sea in the 1980s and the 2000s”, *Deep-Sea Research I*, 65, 73–84, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2012.03.004>.

Durrieu de Madron X, Guieu C, Sempéré R, Conan P, Cossa D, D’Ortenzio F., Estournel C, Gazeau F, Rabouille S, Stemann L, Bonnet S, Diaz V, Koubbi P, Radakovitch O, Babin M, Baklouti M, Bancon-montigny C, Belviso S, Bensoussan N, Bonsang B, Bouloubassi I, Brunet C, Cadiou JF, Carlotti F, Chami M, Charmasson S, Charriere B, Dachs J, Doxaran D, Dutay JC, Elbaz-pouliche F, Eléaume M, Eyrolles F, Fernandez C, Fowler SW, Francour P, Gaertner JC, Galzin R, Gasparini S, Ghiglione JF, Gonzalez JL, Goyet C, Guidi-Guilvard L, Guizien C, Heimbuerger L-E, Jacquet SHM, Jeffrey WH, Joux F, Le hir P, Leblanc K, Lefèvre D, Lejeune K, Lemée R, Loÿe-Pilot MD, Mallet M, Mejanelle L, Mélin F, Mellon C, Merigot B, Merle PL, Migon C, Miller WL, Mortier L, Mostajir B, Mousseau L, Moutin T, Para J, Perez T, Petrenko A, Poggiale JC, Prieur L, Pujon-Pay M, Pulido V, Raimbault P, Rees AP, Ridame C, Rontani J-F, Pino DR, Sicre M-A, Taillandier V., Tamburini C, Tanaka T, Taupier-Letage I, Tedetti M, Testor P, Thébaud H, Thouvenin B, Touratier F, Tronczynski J, Ulses C, Van Wambeke F, Vantrepotte V, Vaz S, Verney R, 2011, « Marine

ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean ». *Progress in Oceanography*, 91: 97-166 | doi: 10.1016/j.pocean.2011.02.003.

Bosse A., Testor P., Mortier L., Prieur L., Taillandier V., D'Ortenzio F. & Coppola L., 2015, « Spreading of Levantine Intermediate Waters by submesoscale coherent vortices in the northwestern Mediterranean Sea as observed with gliders ». *Journal of Geophysical Research-Oceans* | doi: 10.1002/2014JC010263.

Xiaogang Xing. Post-doc ANR « IPSOS-Seal », janvier 2009-décembre 2011, co-encadré avec H. Claustre. X. Xing est actuellement professeur associé à l'Ocean University of China, Qingdao.

Xing X., Morel, A., Claustre, H., Antoine, D., D'Ortenzio F., Poteau, A. & Mignot, A., 2011. "Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling Bio-Argo Floats. The retrieval of Chlorophyll a", *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 116, C06020, doi:10.1029/2010JC006899.

Xing X., Claustre, H., Blain, S., D'Ortenzio F., Antoine, D., Ras, J. & Guinet, C., 2012, "Quenching correction for in vivo chlorophyll fluorescence measured by instrumented elephant seals in the Kerguelen region". *Limnology and Oceanography Methods*, 10, 483-495

Xing X., Morel, A., Claustre, H., D'Ortenzio F. & A. Poteau., 2012, "Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling Bio-Argo Floats. II The retrieval of CDOM absorption", *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 117 (C4), C04022

Xing X., Claustre H, Wang H, Poteau A & D'Ortenzio F., 2014, "Seasonal dynamics in colored dissolved organic matter in the Mediterranean Sea: Patterns and drivers". *Deep-sea Res Pt I* 83: 93-101 | doi: 10.1016/j.dsr.2013.09.008.

Guinet C, Xing X., Walker E., Monestiez P., Marchand S., Picard B., Jaud T., Authier M, Cotté C, Dragon A-C., Diamond E., Antoine D., Lovell P., Blain S., D'Ortenzio F. & Claustre H., 2013, "Calibration procedures and first dataset of Southern Ocean chlorophyll a profiles collected by elephant seals equipped with a newly developed CTD-fluorescence tags". *Earth System Science Data* 5: 15-29 | doi: 10.5194/essd-5-15-2013.

6.3 Stages

Co-encadrement de 4 thèses de "Laurea" en Science de l'Environnement à l'Université de Naples "Parthenope". Sujets envisagés : interactions Biologie – Physique (Tiziana Caporale – 2001 ; Simone Colella – 2001), bio – optique marine (Vincenzo Vellucci – 2003), applications de la télédétection (Gianluca Volpe – 2001).

Sophie Lecacheux, (co-encadrement), UPMC, Master 2, Mention « Océan Atmosphère Climat Télédétection », parcours « Dynamique », Année Universitaire 2007-2008, « Séparation des processus atmosphériques et océaniques responsables de l'évolution de la couche de mélange en Méditerranée ».

Héloïse Lavigne, (encadrement), UPMC, Master 2, Mention « Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie », Spécialité « Océanographie et Environnement Marin », Année universitaire 2009-2010, « Vers une climatologie de la chlorophylle basée sur des profils de fluorescence et les mesures satellitaires ».

Perrine Rayet (co-encadrement), Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, Mars-Août 2012, « Observabilité des flotteurs profileurs biogéochimiques en vue de leur déploiement en Méditerranée ».

Fatma Jebri, (encadrement), UPMC, Master Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie (SDUEE), novembre 2012-avril 2013, « Harmonisation des données biogéochimiques issues de gliders, satellites et flotteurs profileurs obtenues pendant l'expérience DEWEX en Méditerranée Nord-Occidentale, avec l'objectif d'améliorer la représentation biogéographique de la région. ».

7 Enseignement

7.1 Enseignement Universitaire

- Intervention dans le module d'Océanographie Spatiale du Master en Science de l'Univers, Environnement et Ecologie, de l'Université Pierre et Marie Curie, tenu à l'Observatoire Océanologique de Villefranche. Année universitaire 2005-2006. 5 heures. Responsable M. Chami.
- Intervention dans le module "Activités Anthropiques et Contaminants Chimiques" (NU 218), master de Sciences et Technologies de l'UPMC, mention "Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie", parcours "Océanographie et Environnements Marins", au niveau Master 2, Année universitaire 2008-2009, 6 heures. Responsable C. Migon.
- Intervention dans le module "Response of pelagic ecosystems to climatic and environmental changes" (NU 193), master de Sciences et Technologies de l'UPMC, mention "Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie", parcours "Océanographie et Environnements Marins", au niveau Master 2, 5 heures/an. Années universitaires 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013. Responsable C. Migon.
- Intervention dans le module 5UM31 « Instrumentation et Acquisition de Données en Océanographie » (IADO) de la seconde année de master de Sciences de l'Univers, Environnement, Écologie (SDUEE) spécialité Océanographie et Environnement Marin (OEM). 2 heures/an. Années universitaires 2014-2015, 2015-2016. Responsable J.O. Irisson.

7.2 Autres activités d'enseignement

- Invited speaker au cours "Remote Sensing and Marine Ecology: from the problem to the application" à l'ESA-ESRIN de Frascati, juin 1998, 12 heures.
- Enseignement pour le module de formation de la région Campania – Italie pour "Tecnico di Gestione delle aree marine protette" (Technicien de gestion de régions marines protégées), septembre 2000, 10 heures.
- Examineur pour la thèse de B. Barone (SZN Naples, Italie, 2010), membre du jury de Thèse de L. Houpert (Univ. Perpignan, 2014), et du comité de thèse de S. Tavernel (LSCE, en cours).

7.3 Vulgarisation scientifique

- Participation active au projet « Adopt a float », qui met à disposition des professeurs, au travers d'un site Web éducatif dédié, des ressources éducatives (fiches thématiques, banque d'images, de vidéo, interview de chercheurs, fichier Excel de travail) liées aux recherches menées au LOV autour de la biogéochimie océanique dans un contexte de changement global. L'idée est que certaines classes s'approprient des flotteurs des projets remOcean et / ou NAOS et les suivent, tout au long de leur « voyage scientifique » avec leurs professeurs à partir du site Web éducatif dédié (<http://www.monoceanetmoi.com/web/index.php/fr/adopt-a-float>).
- Participation régulière et organisation des « Journée portes ouvertes » du laboratoire et à la « Fête de la science », depuis les éditions 2012.
- Interviews au journal Le Monde : "Une flottille de robots pour sonder le couple océan climat", juin 2011.
- Interview à RFI : « Projet Naos : des sondes intelligentes pour comprendre les océans », juin 2011.
- Interview donnée au journal METRO Paris, "Tara : L'expédition marine boucle neuf mois en mer, 8 juin 2010.
- Interview donnée au journal Le Monde, "Tara, voilier de la biodiversité", 6 mai 2010.

- Interview donnée à Thalassa, “Tara, au large de Chypre”, 10 décembre 2009.
-

8 Responsabilités Administratives

8.1 Responsabilités et activités de direction d'équipe ou de laboratoire

Depuis 2013, je suis responsable de l'équipe du LOV « Optique Marine, Télédétection et Applications Biogéochimiques (OMTAB), composée de 13 statutaires (8 chercheurs, 5 ITA) et de 16 non permanents. Comme responsable d'équipe, j'ai participé à l'évaluation AERES du LOV, notamment en coordonnant la contribution de l'équipe OMTAB. Avec les autres responsables d'équipe, je suis membre du Comité de Direction du laboratoire, qui se réunit tous les mois et qui participe à la gestion et à l'animation scientifique du LOV, et je suis aussi le responsable hiérarchique de 3 ITAs du laboratoire (E. Leymarie, B. Gentili, V. Taillandier).

Depuis 2012, je suis membre élu du conseil d'administration de l'Observatoire d'Océanologie de Villefranche (OOV) pour le collège B. Je participe donc à l'activité de gestion de l'OOV, notamment sur les aspects liés à l'observation (organisation des campagnes récurrentes sur les sites DYFAMED/BOUSSOLE/point B, gestion des données, activités Gliders et Flotteurs, etc.).

8.2 Responsabilités ou activités collectives

Nationales

- Secrétaire du comité scientifique du programme LEFE-CYBER (2011-2014).
- Secrétaire du comité scientifique du programme LEFE-GMMC (2011-en cours).
- Co-coordonateur du Service d'Observation labellisé « Argo-France » (2013 – en cours).
- Membre du comité de pilotage de la structure inter-organismes Coriolis (2013 – en cours).
- Membre du comité de pilotage du SOERE MOOSE (2014 - en cours).
- Membre du comité de pilotage du SOERE CTD02 (2014 - en cours).
- Membre du comité de pilotage de la prospective Océanographie Opérationnelle (2013).
- Membre du comité d'experts de l'ARP MERMED (2014).

A l'étranger ou internationales

- Membre du « Marine Ecosystem and Prediction Task Team » du group scientifique IMBER GODAE, (2010 – en cours).
- Membre du Working group IOCCG (International Ocean Color Coordinating Group) « Bio-optical sensors on Argo floats », (2007-2011).
- Membre du groupe Bio-Argo au sein du Argo Data Management Team (ADMT), (2012-en cours).

9 Liste des publications

9.1 Revues à comité de lecture

Articles Publiés

1. Organelli E., Claustre H., Bricaud A., Schmechtig C., Poteau A., Xing W., Prieur L., **D'ORTENZIO F.**, G. Dall'Olmo, Velluci, V. , 2016, “A novel near real-time quality-control procedure for radiometric profiles measured by Bio-Argo floats: protocols and performances”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, in press.
2. Mayot N., **D'ORTENZIO F.**, Ribera d'Alcalà M., Lavigne H., Claustre H., « The Mediterranean trophic regimes from ocean color satellites: a reappraisal ». *Biogeoscience*, in press.

3. Sauzède, R., Claustre H., Uitz J., Jamet C., Dall'Olmo G., **D'ORTENZIO, F.**, Gentili B., Poteau A., Schmechtig C., « A neural network-based method for merging ocean color and Argo data to extend surface bio-optical properties to depth: Retrieval of the particulate backscattering coefficient ». *Journal of Geophysical Research -Oceans*, in press.
4. Bosse A., Testor P., Mortier L., Prieur L., Taillandier V., **D'ORTENZIO F.**, & Coppola, L. , 2015, “Spreading of Levantine Intermediate Waters by submesoscale coherent vortices in the northwestern Mediterranean Sea as observed with gliders”. *Journal of Geophysical Research -Oceans*, 120(3), 1599-1622.
5. Pasqueron de Fommervault O., **D'ORTENZIO F.**, Mangin A., Serra R., Migon C., Claustre H., Ribera d'Alcalà M., Prieur L., Taillandier V., Schmechtig C., Poteau A., Leymarie E., Dufour A., Besson F., Obolensky G., 2015, “Seasonal variability of nutrient concentrations in the Mediterranean Sea: Contribution of Bio-Argo floats.” *Journal of Geophysical Research -Oceans* 120 | doi: 10.1002/2015JC011103.
6. Pasqueron de Fommervault O., Migon C., Dufour A., **D'ORTENZIO F.**, Kessouri F., Raimbault P., Garcia N., Lagadec, V., 2015, “Atmospheric input of inorganic nitrogen and phosphorus to the Ligurian Sea: Data from the Cap Ferrat coastal time-series station”, *Deep-Sea Research I*, 106, pp.116-125.
7. Lavigne H., **D'ORTENZIO F.**, Ribera D'Alcalà M., Claustre H., Sauzède R., Gacic M., 2015, “On the vertical distribution of the chlorophyll a concentration in the Mediterranean Sea: a basin scale and seasonal approach”. *Biogeosciences*, 12(5), 4139-4181.
8. Lacour L., Claustre H., Prieur L., **D'ORTENZIO F.**, 2015, “Phytoplankton biomass cycles in the North Atlantic subpolar gyre: A similar mechanism for two different blooms in the Labrador Sea”, *Geophysical Research Letters*, 42, 5403–5410, doi:10.1002/2015GL064540.
9. Sauzède R., Claustre H., Jamet C., Uitz J., Ras J., Mignot A., **D'ORTENZIO F.**, 2015, “Retrieving the vertical distribution of chlorophyll a concentration and phytoplankton community composition from in situ fluorescence profiles: A method based on a neural network with potential for global-scale applications”, *Journal of Geophysical Research -Oceans*, 119, doi:10.1002/2014JC010355
10. Villar E., Farrant G., Follows M., Garczarek L., Speich S., Audic S., Bittner L., Blanke B., Brum J., Brunet M., Casotti R., Chase A., Dolan JR., **D'ORTENZIO F.**, Gattuso J.-P., Grima N., Guidi L., Hill C., Jahn O., Jamet J.-L., Le Goff H., Lepoivre C., Malviya S., Pelletier E., Romagnan J.-B., Roux S., Santini S., Scalco E., Schwenck S., Tanaka A., Testor P., Vannier T., Vincent F., Zingone A., Dimier C., Picheral M., Searson S., Kandels-Lewis S., Acinas S.G., Bork P., Boss E., De Vargas C., Gorsky G., Ogata H, Pesant S, Sullivan M, Sunagawa S, Wincker P, Karsenti E, Bowler C, Not F, Hingamp P., Iudicone D., 2015, “Environmental characteristics of Agulhas rings affect interocean plankton transport”. *Science* 348 | doi: 10.1126/science.1261447.
11. Sauzède R., Lavigne H., Claustre H., Uitz J., Schmechtig C., **D'ORTENZIO F.**, Guinet C., S. Pesant, 2015, “Vertical distribution of chlorophyll a concentration and phytoplankton community composition from in situ fluorescence profiles: a first database for the global ocean”. *Earth System Science Data*, 8, 365-399.
12. Pasqueron de Fommervault O., Migon C., **D'ORTENZIO F.**, Ribera d'Alcalà M., Coppola L., 2015, “Temporal variability of nutrient concentrations in the northwestern Mediterranean sea (DYFAMED time-series station)”. *Deep-Sea Research I* 100: 1-12 | doi: 10.1016/j.dsr.2015.02.006.
13. Houpert L., Testor P., Durrieu de Madron X., Somot, S., **D'ORTENZIO F.**, Estournel C., Lavigne H., 2014, “Seasonal cycle of the mixed layer, the seasonal thermocline and the upper-ocean heat storage rate in the Mediterranean Sea derived from observations”, *Progress in Oceanography*, 79, 6611.
14. **D'ORTENZIO F.**, Lavigne H., Besson F., Claustre H., Coppola L., Garcia N., Laës-Huon A., Le Reste S., Malardé D., Migon C., Morin P., Mortier L., Poteau A., Prieur L., Raimbault V., Testor P., 2014, “Observing mixed layer depth, nitrate and chlorophyll concentrations in the northwestern Mediterranean: A combined satellite and NO3 profiling floats experiment”. *Geophysical Research Letters* 41: 6443-6451 | doi: 10.1002/2014gl061020.
15. Malanotte-Rizzoli P., Artale V., Borzelli-Eusebi G.L., Brenner S., Crise A., Gacic M., Kress N., Marullo S., d'Alcala M.R., Sofianos S., Tanhua T., Theocharis A., Alvarez M., Ashkenazy Y., Bergamasco A., Cardin V., Carniel S., Civitarese G., **D'ORTENZIO F.**, Font J., Garcia-Ladona E., Garcia-Lafuente JM, Gogou A, Gregoire M, Hainbucher D, Kontoyannis H, Kovacevic V, Kraskapoulou E., Kroskos G., Incarbona A., Mazzocchi M.G., Orlic M., Ozsoy E., Pascual A., Poulain P.-M., Roether W., Rubino A., Schroeder K., Siokou-Frangou J., Souvermezoglou E., Sprovieri M., Tintore J., Triantafyllou G., 2014, “Physical forcing and physical/biochemical variability of the Mediterranean Sea: a review of unresolved issues and directions for future research”. *Ocean Science* 10: 281-322 | doi: 10.5194/os-10-281-2014.

16. Mignot A., Claustre H., Uitz J., Poteau A., **D'ORTENZIO F.**, Xing X., 2014, “Understanding the seasonal dynamics of phytoplankton biomass and the deep chlorophyll maximum in oligotrophic environments: A Bio-Argo float investigation”. *Global Biogeochemical Cycles* 28: 856-876 | doi: 10.1002/2013gb004781.
17. Xing X., Claustre H., Wang H., Poteau A., **D'ORTENZIO F.**, 2014, “Seasonal dynamics in colored dissolved organic matter in the Mediterranean Sea: Patterns and drivers”. *Deep-Sea Research I* 83: 93-101 | doi: 10.1016/j.dsr.2013.09.008.
18. Guinet C., Xing X., Walker E., Monestiez P., Marchand S., Picard B., Jaud T., Authier M., Cotté C., Dragon A.-C., Diamond E., Antoine D., Lovell P., Blain S., **D'ORTENZIO F.**, Claustre H., 2013, “Calibration procedures and first dataset of Southern Ocean chlorophyll a profiles collected by elephant seals equipped with a newly developed CTD-fluorescence tags”. *Earth System Science Data* 5: 15-29 | doi: 10.5194/essd-5-15-2013.
19. Heimbuerger L.-E., Lavigne H., Migon C., **D'ORTENZIO F.**, Estournel C., Coppola L., Miquel J.-C., 2013, “Temporal variability of vertical export flux at the DYFAMED time-series station (Northwestern Mediterranean Sea)”, *Progress in Oceanography* 119: 59-67 | doi: 10.1016/j.pocean.2013.08.005.
20. Lavigne H., **D'ORTENZIO F.**, Migon C., Claustre H., Testor P., d'Alcala M.R., Lavezza R., Houpert L., Prieur L., 2013, “Enhancing the comprehension of mixed layer depth control on the Mediterranean phytoplankton phenology”, *Journal of Geophysical Research-Oceans* 118: 3416-3430 | doi: 10.1002/jgrc.20251.
21. Tamburini C., Canals M., Durrieu de Madron X., Houpert L., Lefèvre D., Martini S., **D'ORTENZIO F.**, Robert A., Testor P., et al., 2013, “Deep-Sea Bioluminescence Blooms after Dense Water Formation at the Ocean Surface”. *Plos One* 8: 1-10 | doi: 10.1371/journal.pone.0067523.
22. Durrieu de Madron X., Houpert L., Puig P., Sanchez-Vidal A., Testor P., Bosse A., Estournel C., Somot S., Bourrin F., Bouin M.N., Beauverger M., Beguery L., Calafat A., Canals M., Cassou C., Coppola L., Dausse D., **D'ORTENZIO F.**, Font J., Heussner S., Kunesch S., Lefevre J.M., Le Goff H., Martin V., Mortier L., Palanques A., Raimbault V., 2013, “Interaction of dense shelf water cascading and open-sea convection in the northwestern Mediterranean during winter 2012”. *Geophysical Research Letters* 40 | doi: 10.1002/grl.50331.
23. Xing X., Claustre H., Blain S., **D'ORTENZIO F.**, Antoine D., Ras, J., Guinet, C., 2012, “Quenching correction for in vivo chlorophyll fluorescence measured by instrumented elephant seals in the Kerguelen region”. *Limnology and Oceanography Methods*, 10, 483-495
24. Xing X., Morel A., Claustre H., **D'ORTENZIO F.**, Poteau A., 2012, “Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling Bio-Argo Floats. II The retrieval of CDOM absorption”, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 117 (C4), C04022
25. Uitz J., Stramski D., **D'ORTENZIO F.**, Gentili B., Claustre, H., 2012, “Estimates of phytoplankton class-specific and total primary production in the Mediterranean Sea from satellite ocean color observations”, *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB2024, doi:10.1029/2011GB004055.
26. Lavigne H., **D'ORTENZIO F.**, Claustre H., Poteau A. 2012, “Towards a merged satellite and in situ fluorescence ocean chlorophyll product”, *Biogeosciences*, 9, 9, 2111-2125
27. **D'ORTENZIO F.**, Antoine D., Martinez E., Ribera d'Alcalà M., 2012, “Phenological changes of oceanic phytoplankton in the 1980s and 2000s as revealed by ocean-color remote-sensing observations”. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB4003, doi:10.1029/2011GB004269.
28. Taillandier V., **D'ORTENZIO F.**, Antoine, D., 2012, “Carbon fluxes in the upper mixed layer of the Mediterranean Sea in the 1980s and the 2000s”, *Deep Sea Research I*, 65, 73-84, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2012.03.004>
29. Mermex group, 2011. “Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcing in the Mediterranean. *Progress in Oceanography*, 91, 97-166.
30. Mignot A., Claustre H., **D'ORTENZIO F.**, Xing X., Poteau A., Ras J., 2011. “From the shape of the vertical profile of in vivo fluorescence to Chlorophyll-a concentration”. *Biogeosciences*, 8, 2391–2406, doi:10.5194/bg-8-2391-2011.
31. Martinez E., Antoine D., **D'ORTENZIO F.**, de Boyer Montégut, C., 2011, “Phytoplankton spring and fall blooms in the North Atlantic in the 1980s and 2000s”, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 116, C11029, doi:10.1029/2010JC006836.
32. Karsenti E, and the TARA consortium, 2011, “A Holistic Approach to Marine Eco-Systems Biology”, *PLoS Biol*, 9(10): e1001177. doi:10.1371/journal.pbio.1001177
33. Xing X., Morel A., Claustre H., Antoine D., **D'ORTENZIO F.**, Poteau A., Mignot A., 2011. “Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling Bio-Argo

Floats. The retrieval of Chlorophyll a”, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 116, C06020, doi:10.1029/2010JC006899.

34. Martinez E., Antoine D., **D'ORTENZIO F.**, Gentili B., 2009, “Climate-Driven Basin-Scale Decadal Oscillations of Oceanic Phytoplankton”, *Science* 326 (5957), 1253-1256.
35. **D'ORTENZIO F.**, d'Alcalà M.R., 2009, “On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis.”, *Biogeosciences* 6 (2), 139-148.
36. Niewiadomska K., Claustre H., Prieur L., **D'ORTENZIO F.**, 2008, “Submesoscale physical-biogeochemical coupling across the Ligurian Current (northwestern Mediterranean) using a bio-optical glider”, *Limnology and Oceanography* 53 (5), 2210-2225.
37. Antoine, D., **D'ORTENZIO F.**, Hooker, S.B., Becu, G., Gentili, B., Taillez, D., & Scott, A.J., 2008. “Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project)”. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 113 (7), doi 10.1029/2007JC004472.
38. Ruti, P., Marullo, S., **D'ORTENZIO F.**, & Tremant, M., 2008. “Comparison of analyzed and measured wind speeds in the perspective of oceanic simulations over the Mediterranean basin: Analyses, QuikSCAT and buoy data.” *Journal of Marine Systems* 70 (1-2), 33-48.
39. **D'ORTENZIO F.**, Antoine, D., & Marullo, S., 2008. “Satellite-driven modeling of the upper ocean mixed layer and air-sea CO₂ flux in the Mediterranean Sea”. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 55 (4), 405-43.
40. Volpe, G., Santoleri, R., Vellucci, V., Ribera d'Alcalà, M., Marullo, S., & **D'ORTENZIO F.**, 2007. “The colour of the Mediterranean Sea: global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates”. *Remote Sensing of Environment* 107, 625-638.
41. **D'ORTENZIO F.**, Iudicone, D., Montegut, C.D., Testor, P., Antoine, D., Marullo, S., Santoleri, R., & Madec, G., 2005. “Seasonal variability of the mixed layer depth in the Mediterranean Sea as derived from in situ profiles”. *Geophysical Research Letters* 32 (12).
42. **D'ORTENZIO F.**, M. Ragni, S. Marullo, & M. Ribera d'Alcalà, 2003. ”Did biological activity change in the Ionian Sea after the Eastern Mediterranean Transient? Results from the analysis of remote sensing observations”. *Journal Geophysical Research*, 108(C9), 8113, doi:10.1029/2002JC001556.
43. Santoleri, R., V. Banzon, S. Marullo, E. Napolitano, **F. D'ORTENZIO**, & R. Evans, 2003. “Year-to-year variability of the phytoplankton bloom in the southern Adriatic Sea (1998–2000): Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor observations and modeling study”, *Journal Geophysical Research*, 108(C9), 8122, doi:10.1029/2002JC001636, 2003.
44. Casotti R., A. Landolfi, C. Brunet, **F. D'ORTENZIO**, O. Mangoni, M. Ribera d'Alcalà , & M. Denis. 2003. “Composition and dynamics of the phytoplankton of the Ionian Sea (Eastern Mediterranean)”. *Journal Geophysical Research*. 108(C9), 8116, doi:10.1029/2002JC001541, 2003.
45. Böhm E., P.V. Banzon, E. D'Acunzo, **F. D'ORTENZIO**, & R. Santoleri, 2003. ”Adriatic Sea surface temperature and ocean color variability during the MFSP”. *Annales Geophysicae*. 21: 137–149
46. Ananasso C., R. Santoleri, S. Marullo, & **F. D'ORTENZIO**, 2003. “Remote sensing of cloud cover in the Arctic region from AVHRR data during ARTIST experiment” *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 437–456.
47. **D'ORTENZIO F.**, S. Marullo, M. Ragni, M. Ribera D'Alcalà , & R. Santoleri, 2002. “Validation of empirical SeaWiFS algorithms for chlorophyll-a retrieval in the Mediterranean Sea: a case study for oligotrophic seas”, *Remote sensing of the Environment*, Vol. 82/1, 79-94.
48. Artale V., D. Iudicone, R. Santoleri, V. Rupolo, S. Marullo, & **F. D'ORTENZIO**, 2002. “The role of surface fluxes in OGCM using satellite SST. Validation and sensitivity to forcing frequency of the Mediterranean thermohaline circulation”, *Journal Geophysical Research*, Vol. 107, C8, 1-24.
49. **D'ORTENZIO F.**, S. Marullo, R. Santoleri, 2000. “Validation of the Pathfinder SST data over the Mediterranean Sea”. *Geophysical Research Letters*, Vol. 27 No. 2, 241-244.

9.2 Actes de colloques à comité de lecture

1. Claustre, H., Antoine, D., Boehme, L., Boss, E., **D'ORTENZIO F.**, Fanton D'Andon, O., Guinet, C., Gruber, N., Handegard, N. O., Hood, M., Johnson, K., Lampitt, R., LeTraon, P.-Y., Lequére, C., Lewis, M., Perry, M.-J., Platt, T., Roemmich, D., Testor, P., Sathyendranath, S., Send, U., & Yoder, J., 2010, "Guidelines

Towards an Integrated Ocean Observation System for Ecosystems and Biogeochemical Cycles" in Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 1), Venice, Italy, 21-25 September 2009, Hall, J., Harrison, D.E. & Stammer, D., Eds., ESA Publication WPP-306, doi:10.5270/OceanObs09.pp.14 (Get PDF reprint)

2. Claustre, H., Bishop, J., Boss, E., Stewart, B., Berthon, J.-F., Coatanoan, C., Johnson, K., Lotiker, A., Ulloa, O., Perry, M.-J., **D'ORTENZIO, F.**, Hembise Fanton D'Andon, O. & J. Uitz, 2010, "Bio-Optical Profiling Floats as New Observational Tools for Biogeochemical and Ecosystem Studies: Potential Synergies with Ocean Color Remote Sensing." in Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2), Venice, Italy, 21-25 September 2009, Hall, J., Harrison, D.E. & Stammer, D., Eds., ESA Publication WPP-306, doi:10.5270/OceanObs09.cwp.17.

9.3 Publications dans des revues sans comité

1. Le Reste S., André X., Claustre H., **D'ORTENZIO F.**, Poteau A., 2009, « First success of PROVIBIO floats », CORIOLIS Newsletters number 5, January 2009, pp 6-8.
2. **D'ORTENZIO F** and the PABIM Group, 2009: Biogeochemical Autonomous Platforms: Instrumentation and Measures (PABIM Project), Mercator Ocean Quarterly Newsletter, October 2009, available online: http://www.mercator-ocean.fr/content/download/687/5888/version/1/file/lettre_35_en.pdf
3. **D'ORTENZIO, F.**, Le Reste S., Lavigne H., Besson F., Claustre H., Coppola L., Dufour A., Dutreuil V., Laës-Huon A., Leymarie E., Malardé D., Mangin A., Migon C., Morin P., Poteau A., Prieur L., Raimbault P., Testor P., 2012, « Autonomously profiling the nitrate concentrations in the ocean: the Pronuts project », MERCATOR Newsletters number 45, Avril 2011, pag 8-12.

9.4 Chapitres d'ouvrages

1. **D'ORTENZIO, F.** and Prieur, L. 2010, "The upper mixed layer", in "Life in the Mediterranean Sea: A look at habitat changes", Noga Stambler ed., Nova Science Publisher, pp 127-156.
2. Stemmann, L., Claustre, H. and **F. D'ORTENZIO**, 2012, "Integrated observation system for pelagic ecosystems and biogeochemical cycles in the oceans", in "Sensors for ecology: Towards integrated knowledge of ecosystems," J.-F. Le Galliard, J.-M. Guarini, and F. Gaill [Eds], CNRS, Institut Ecologie et Environnement, France, pp. 261-278.

« There is no more difficult art to acquire than the art of observation »²

William Osler, On the Educational Value of the Medical Society

Les interactions physique-chimie-biologie dans l’océan et en Méditerranée

1 Préambule

Pour comprendre la réponse de la planète aux changements climatiques, il est nécessaire de décrire et de caractériser les processus clés régulant les flux de matière et d’énergie entre les différents compartiments du système Terre. Le phytoplancton océanique joue un rôle majeur dans ce système, car il agit à l’interface du vivant et de l’inorganique. Il participe au contrôle de la répartition du carbone entre l’atmosphère, l’océan et les fonds marins, agissant comme inhibiteur de l’augmentation artificielle du CO₂ atmosphérique induite par l’activité humaine.

Pour ces raisons, le phytoplancton océanique fait logiquement partie des éléments considérés dans les simulations de la planète qui, si souvent, nous alertent sur les dangers des changements climatiques dans un futur pas si lointain (IPCC, 2014). Tous ces exercices de prédiction, toutefois, surtout les plus complexes comme ceux qui ambitionnent de prévoir le climat futur de la planète, nécessitent un effort observationnel conséquent. La mise en place d’outils numériques prédictifs du climat de la planète est donc subordonnée au développement de systèmes couplant observations et modèles, physique et biologie. L’observation de la Terre, des océans et de leur biosphère est donc dramatiquement urgente, car elle seule nous permettra d’améliorer nos connaissances.

Dans ce contexte, le flux de mesures effectuées par les nouveaux instruments d’échantillonnage in situ et le nombre croissant d’observations satellitaires offrent une vision sans précédent du système couplé biosphère-environnement physique dans l’océan. La définition et la description de ce système requièrent la caractérisation simultanée de la variabilité de la biomasse et du forçage physico-chimique, à une résolution spatio-temporelle en accord avec les échelles typiques des processus à étudier.

La distribution spatiale des principaux traceurs biogéochimiques ainsi que l’évolution résultante de la biomasse sont gouvernées par une combinaison de processus physiques et biochimiques. La physique, en particulier, contrôle l’évolution du milieu océanique dans lequel le phytoplancton marin vit et croît, et donc agit sur sa répartition spatio-temporelle. C’est l’étude de ce contrôle « bottom-up » sur le système phytoplanctonique hauturier qui m’a toujours intéressé et qui représente, à la fois, mon cœur de métier et mon ambition scientifique.

Pour décrire l’état de l’art de cette thématique, j’ai choisi ici une approche « classique », par échelles. Il s’agit, reconnaissons-le, d’une approche artificielle, car il est bien connu que les échelles des processus océaniques sont très imbriquées. Disons aussi que la distinction entre échelles temporelles et spatiales est également fictive, car toute évolution d’un processus océanique se déroule et dans le temps et dans l’espace. S’il existe d’autres possibilités pour aborder le sujet, comme par exemple une description par processus, la description par échelles reste quand même assez logique et elle s’adapte très bien à l’introduction de mes thématiques de recherche ainsi qu’à mes travaux antérieurs. Je la maintiendrai donc par la suite.

² « Il n’y a pas un art plus difficile à acquérir que l’art de l’observation »

2 Les différentes échelles

2.1 La large échelle

La circulation thermohaline planétaire est responsable du transport des masses d'eau dans les différents bassins océaniques et, à travers l'océan Austral, dans le reste de l'océan mondial (Schmitz, 1995, Macdonald and Wunsch, 1996, Zenk, 2001). La distribution et le transport à grande échelle de sels nutritifs semblent cohérents avec cette description de la circulation planétaire (Ganachaud and Wunsch, 2002, Sarmiento *et al.*, 2004). La variabilité des apports en sels nutritifs crée dans l'océan des régions plus ou moins productives, comme les observations satellitaires de la couleur de l'océan l'ont clairement montré (McClain *et al.*, 2004, voir encadré 1). Les zones les plus productives se trouvent là où la circulation à grande échelle fait resurgir les eaux profondes, très riches en sels nutritifs: (1) les grands tourbillons sub-arctiques du Pacifique et de l'Atlantique septentrionaux (au nord du 40° N) ; (2) l'océan Austral (au sud du 40° S) ; (3) les régions équatoriales du Pacifique et, dans une moindre mesure, de l'Atlantique et de l'Indien ; (4) les marges continentales, spécialement les zones d'upwelling et la région des moussons africaines. Le reste de l'océan est essentiellement oligotrophe, et, dans certains cas, ultra-oligotrophe (i.e. la Méditerranée Orientale ou le Pacifique Sud, Longhurst, 1995a).

Ainsi, à l'échelle planétaire, la répartition moyenne de la biomasse autotrophe est liée à cette circulation thermohaline et à la re-distribution des sels nutritifs qui en résulte. Dans ce contexte, un important débat scientifique existe actuellement sur l'évolution passée et future de cette circulation, ainsi que sur les effets que les perturbations du système océan-atmosphère peuvent induire sur les écosystèmes marins (Hughes *et al.*, 2012, Allen *et al.*, 2006, Sarmiento *et al.*, 2010). La modélisation biogéochimique couplée est actuellement capable de dessiner des scénarios plausibles, sur la base des projections climatiques existantes et des rares séries d'observations suffisamment longues (Bopp *et al.*, 2001, Schneider *et al.*, 2008). J'ai contribué à ce débat, en étudiant les effets des grandes oscillations planétaires (comme El Niño ou le NAO) sur la variabilité de la biomasse océanique à des échelles décennales (Martinez *et al.*, 2009, D'Ortenzio *et al.*, 2012, voir encadrés 2 et 3). Ces études, qui se basent sur une série longue d'observations satellitaires, sont, toutefois, rares, car très peu d'observations existent sur des échelles temporelles qui dépassent les dix ans (Boyce *et al.*, 2010, Beaugrand, 2004, Boyce *et al.*, 2012). On retrouve ici un premier verrou scientifique lié au manque d'observations pertinentes.

Il y a un autre point. Superposées et imbriquées à cette variabilité à large échelle et multi-décennale, des échelles spatio-temporelles plus petites peuvent modifier substantiellement les interactions physique-chimie-biologie dans l'océan (Mann and Lazier, 1996). En particulier, la variabilité saisonnière est certainement la plus lourde de conséquences pour les écosystèmes marins, ce que détaille la suite de cette introduction.

2.2 La variabilité saisonnière

Au-dessous de la variabilité large échelle et décennale, on retrouve les processus liés aux saisons et à leur dynamique d'un année sur l'autre.

Pilotées par le régime solaire et les positions relatives de la Terre et du Soleil, les saisons règlent les rythmes de la vie sur la planète. Dans le milieu terrestre, la phénologie (i.e. la branche de la biologie que s'adresse à l'étude du cycle saisonnier des organismes) a permis de définir une zonation très précise des écosystèmes, sur la base du climat régional et de la géomorphologie du territoire (i.e. Prentice *et al.*, 1992). Dans le milieu marin, la phénologie est un concept d'application plus difficile, à cause, notamment, de la nature du milieu et de sa tridimensionnalité, ainsi que de la difficulté intrinsèque d'obtenir des observations à haute fréquence sur un cycle annuel complet.

Encadré 1. La couleur de l'océan

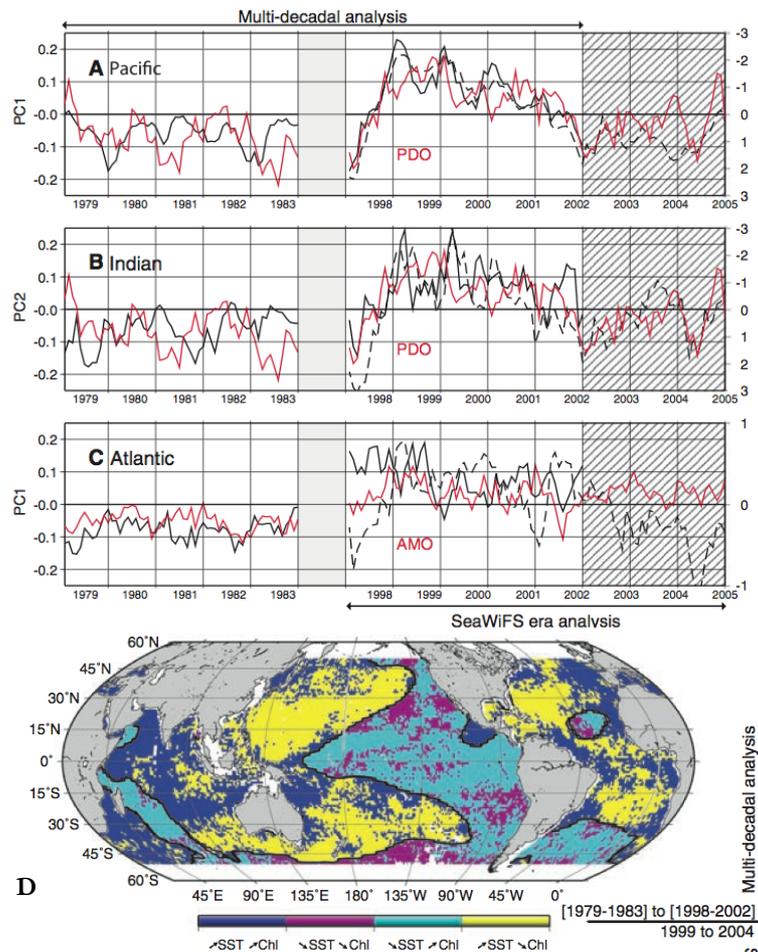
Depuis les années 80, des capteurs radiométriques dans le visible (i.e. mesurant la quantité du rayonnement aux longueurs d'onde entre 300 et 700nm) ont été installés sur des satellites en orbite polaire autour de la planète, dans le contexte des missions spatiales spécifiquement dédiées à l'observation des océans (McClain, 2009). Du jour au lendemain, les océanographes ont eu donc accès à des observations sur la concentration en chlorophylle-a des couches de surface de l'océan, avec une résolution spatiale au sol de l'ordre du kilomètre et avec une fréquence de passage approximativement journalière. Basée sur des algorithmes dits « bio-optiques », la qualité des observations satellitaires de la chlorophylle-a (dites aussi de la couleur de l'océan) n'a pas cessé de s'améliorer (Bailey and Werdell, 2006). Elle repose sur un incessant exercice de calibration, inter-calibration et validation des observations spatiales, notamment avec l'utilisation des données in situ (la CAL/VAL). Dans ce contexte, au début de ma carrière (qui a coïncidé avec le lancement en orbite d'un des capteurs de la couleur de l'océan qui a le plus duré, le SeaWiFS), j'ai participé à cet effort de CAL/VAL, en comparant une base des données bio-optiques in situ et de chlorophylle-a avec des estimations satellitaires en Méditerranée (à noter que, pendant cette période, je me suis intéressé aussi aux données de température de surface de l'océan ainsi qu'à ceux d'intensité du vent (D'Ortenzio *et al.*, 2000, Ruti *et al.*, 2008). Dans cette étude, une erreur sur l'estimation de la chlorophylle-a satellitaire du capteur SeaWiFS en Méditerranée, qui avait été déjà identifiée (Bricaud *et al.*, 2002, Claustre *et al.*, 2002), a été corrigée par l'introduction d'un algorithme spécifique pour le bassin, développé à partir du jeu de données bio-optiques in situ (D'Ortenzio *et al.*, 2002). Quelques années plus tard, déjà à Villefranche, j'ai contribué à une étude (Volpe *et al.*, 2007) qui a réévalué cet algorithme et qui en a proposé une version adaptée à la nouvelle génération de capteurs qui avaient remplacé le SeaWiFS (MODIS, MERIS). Les lancements de cette nouvelle génération des capteurs, pendant les années 2000, ont posé aussi la question de leur inter-calibration et homogénéisation, entre eux et avec l'ancien capteur SeaWiFS, afin de générer des séries temporelles homogènes et donc scientifiquement exploitables dans leur ensemble. Le LOV est un site privilégié pour la CAL/VAL des capteurs de la couleur de l'océan, notamment grâce au projet BOUSSOLE (Antoine *et al.*, 2008b), qui prévoit, depuis 1997, l'acquisition automatique (avec une bouée sur le site DYFAMED) et par bateau, des données bio-optiques nécessaires à l'exercice de CAL/VAL (un des objectifs, parmi d'autres, de BOUSSOLE). J'ai donc contribué à une étude visant à vérifier les performances des capteurs satellitaires de la couleur de l'océan opérationnels à l'époque (SeaWiFS, MERIS, MODIS), et à déterminer les corrections nécessaires pour homogénéiser leurs données (Antoine *et al.*, 2008a). Depuis, même si les observations depuis l'espace restent centrales dans mes recherches, mon activité plus proprement liée à ces problématiques s'est arrêtée, car d'autres thématiques ont pris plus d'importance. Cependant, plus récemment, mes activités autour de BOUSSOLE ont recommencé, notamment parce que les observations issues de ce programme représentent un magnifique jeu des données pour tester des méthodes d'homogénéisation entre les satellites et les plates-formes autonomes.

D'ORTENZIO F., S. Marullo, M. Ragni, M. Ribera D'Alcalà, R. Santoleri, 2002. "Validation of empirical SeaWiFS algorithms for chlorophyll-a retrieval in the Mediterranean Sea: a case study for oligotrophic seas", *Remote sensing of the Environment*, Vol. 82/1, 79-94.

Volpe, G., Santoleri, R., Vellucci, V., Ribera d'Alcalà, M., Marullo, S., D'ORTENZIO, F., 2007. "The colour of the Mediterranean Sea: global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates". *Remote Sensing of Environment* 107, 625-638.

Antoine, D., D'ORTENZIO, F., Hooker, S.B., Becu, G., Gentii, B., Taillez, D., Scott, A.J., 2008. "Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project)". *Journal of Geophysical Research. C. Oceans* [J. Geophys. Res. (C Oceans)] 113 (7), doi 10.1029/2007JC004472.

Encadré 2. Martinez et al., 2009



Une base des données d'observations satellitaires de chlorophylle de surface et de SST a été constituée sur deux périodes de 5 ans (1979-1983 et 1998-2002). Pour les données de chlorophylle, elle est basée sur les observations des deux capteurs CZCS et SeaWiFS, re-calibrées et rendues homogènes avec un traitement spécifique (Antoine *et al.*, 2005). Une analyse à composantes principales multi-variées (MEOF) a permis aussi de déterminer les modes de variabilité communs entre les deux paramètres ainsi que leur répartition spatiale. Dans la figure (panneaux A, B et C), la variabilité temporelle des structures MEOF est indiquée pour les trois océans : Pacifique, Indien, et Atlantique (courbes noires). Les index climatiques PDO (Pacific Decadal Oscillation) et AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) sont aussi indiqués (courbes rouges). Les correspondances entre les index et les modes de variabilité communs de la chlorophylle et de la SST démontrent que des rétroactions significatives existent entre les oscillations climatiques et la réponse océanique (physique et biologique). L'analyse de la répartition spatiale des changements (concomitants ou en opposition) de la chlorophylle et de la SST entre les deux périodes (panneau D) est pourtant révélatrice d'une réponse océanique complexe. Dans certaines régions océaniques, la SST (considérée comme un proxy pour la stratification océanique) et la chlorophylle ont des dynamiques opposées, selon un schéma déjà proposé (Behrenfeld *et al.*, 2006) : augmentation/diminution de la SST = plus/moins de stratification = moins/plus de nitrates = diminution/augmentation de biomasse (zones en jaune et bleu ciel dans la carte). Dans d'autres régions, au contraire, les deux paramètres suivent une dynamique simultanée, qui n'est donc pas directement explicable par une correspondance directe entre la stratification superficielle et la réponse biologique.

Martinez, E., Antoine, D., D'ORTENZIO, F., Gentili, B., 2009. "Climate-Driven Basin-Scale Decadal Oscillations of Oceanic Phytoplankton". *Science* 326 (5957), 1253-1256.

Plus spécifiquement pour le phytoplancton, même si très peu d'études existent (voir l'excellent review sur l'argument de [Ji et al., 2010](#)), on observe une variété relativement réduite des cycles saisonniers « type » (appelés "états tropiques" par [Longhurst, 1995b](#)). Comme dans le milieu terrestre, la répartition spatiale de ces cycles permet de définir ce qu'on appelle « biogéographie³ », et, en 1998, [Longhurst \(1998\)](#) utilisait ces états tropiques pour déterminer un certain nombre de biorégions océaniques. L'analyse de [Longhurst](#) montrait aussi clairement que la phénologie phytoplanctonique est influencée par les saisons, mais que cette influence est modulée par les interactions entre l'atmosphère et l'océan, et, en particulier, par la dynamique de la couche océanique en contact direct avec l'atmosphère, dite couche de mélange.

La dénomination « couche de mélange » dérive du fait que, à cause de l'interaction avec l'atmosphère, il existe une couche superficielle de l'océan qui est en permanence mélangée ([Pickard and Emery, 1990](#)). Son épaisseur, déterminée par la combinaison du forçage atmosphérique et du champ de densité de la colonne d'eau intéressée ([Large et al., 1994](#)), indique la limite au-delà de laquelle l'influence de l'atmosphère devient négligeable. Au-dessous de la couche de mélange, l'océan est généralement stratifié, ce qui limite l'utilisation des ressources par le phytoplancton. Au contraire, à cause du mélange persistant, les caractéristiques physiques de la couche de mélange (comme la température et la salinité), ainsi que les caractéristiques biologiques ou chimiques sont considérées homogènes. Même si cela n'est pas toujours confirmé (voir discussion de la différence entre couche « mixed » et « mixing » in [Brainerd and Gregg, 1995](#), [Huisman et al., 1999](#), [Franks, 2014](#)) cette caractéristique de la couche de mélange est généralement acceptée et la plupart des méthodes pour en calculer la profondeur/épaisseur se basent sur cette propriété ([de Boyer Montégut et al., 2004](#)). L'effet de la couche de mélange sur la saisonnalité de la biomasse a été observé et étudié dans plusieurs régions de l'océan ([Dutkiewicz et al., 2001](#), [Waniek, 2003](#), [Levy et al., 1999](#), [Stramska, 2005](#), [Llort et al., 2015](#), [Sallée et al., 2015a](#)), et à l'échelle globale ([Obata et al., 1996](#), [Wilson and Adamec, 2002](#), [Gildor and Naik, 2005](#), [Wilson and Coles, 2005](#)). Son évolution décennale a été aussi analysée, à la fois par satellite ([Racault et al., 2012](#), [Vargas et al., 2009](#)) et par modélisation ([Henson et al., 2013](#)).

Ma contribution s'est réalisée encore dans l'exploitation de la base de données décennale d'observation satellitaire de la couleur de l'océan (décrite dans l'encadré 3). L'étude a mis en évidence un décalage temporel, principalement dans les régions subtropicales et équatoriales, des cycles phénologiques phytoplanctoniques, induit par des modifications (i.e. une diminution générale des profondeurs moyennes) de la dynamique de la couche de mélange ([D'Ortenzio et al., 2012](#), voir encadré 3). J'ai aussi contribué, toujours en utilisant cette base de données décennale, à une étude plus ciblée sur les variations d'intensité des deux floraisons algales (printemps et été) en Atlantique Nord entre les années 1980 et 2000 ([Martinez et al., 2011](#)). Encore, la diminution de la couche de mélange (évaluée à partir d'une base de données in situ) semblerait expliquer une grande partie de la variabilité observée. Plus récemment, j'ai aussi contribué à une étude dédiée à l'analyse de la floraison phytoplanctonique en Mer de Labrador ([Lacour et al., 2015](#)). Dans cette zone, les biorégions phénologiques observées (et établies à partir des données satellitaires, selon la méthode de [D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà, 2009](#), voir plus loin) ont permis d'identifier un décalage des dates d'initiation de la croissance phytoplanctonique entre la zone plus proche du talus et celle plus au large (la première anticipant la floraison d'environ un mois). L'analyse des données du réseau Argo a ainsi permis de vérifier que les processus responsables de l'augmentation la profondeur de la couche de mélange diffèrent dans les deux zones (cycle saisonnier du forçage atmosphérique dans un cas, diminution de la flottabilité par effet du dégel des glaces polaires dans la deuxième). Dans la zone intéressée par le changement de flottabilité

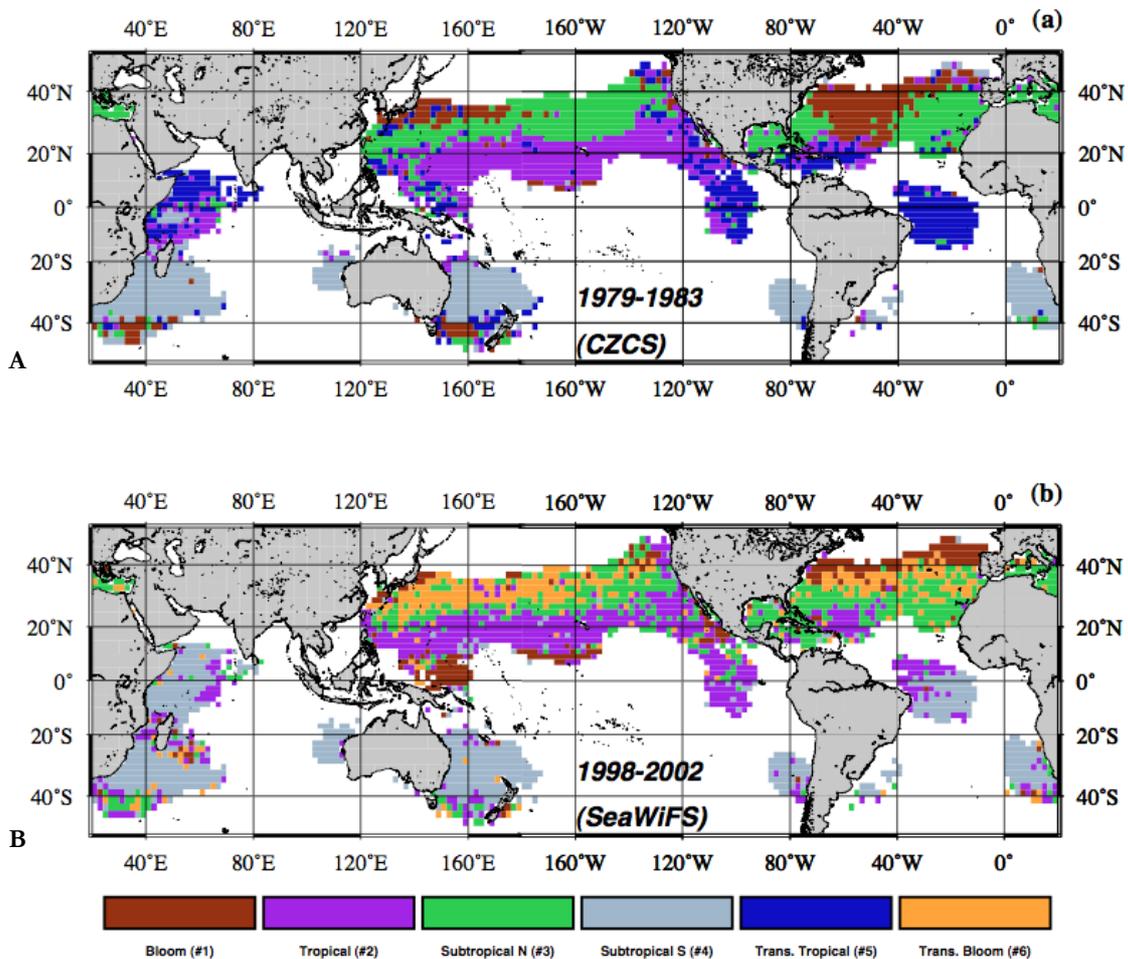
³ Le concept fondateur de la biogéographie est que l'on peut déterminer, sur la base de certaines caractéristiques du milieu, des régions ou des zones ayant un comportement biologique très similaire (i.e. écotone).

induit par le dégel, la stratification de la colonne d'eau intervient plus tôt, ce qui génère donc un démarrage précoce de la floraison phytoplanctonique.

Du point de vue théorique, les travaux historiques de Riley (1946) et de Sverdrup (1953) avaient déjà identifié le rôle crucial de la couche de mélange sur l'évolution temporelle de la biomasse marine. La théorie de Sverdrup, en particulier, proposait une explication pour caractériser l'effet des certaines conditions environnementales (i.e. forçages physiques) sur l'initiation d'une floraison phytoplanctonique, évènement clé dans la dynamique des écosystèmes océaniques, pendant le printemps en Atlantique Nord. Bien que souvent surexploité, le concept de Sverdrup a fourni un cadre théorique pour expliquer et prédire l'évolution temporelle (et donc la distribution spatiale) de la biomasse phytoplanctonique dans différentes conditions environnementales (Obata *et al.*, 1996, Siegel *et al.*, 2002, Dutkiewicz *et al.*, 2001, Follows and Dutkiewicz, 2002, Henson *et al.*, 2006). Toutefois, plusieurs travaux ont remis en question la théorie sverdruppienne (Huisman *et al.*, 1999, Boss and Behrenfeld, 2010, Chiswell, 2011, Taylor and Ferrari, 2011, Behrenfeld, 2010, Smetacek and Passow, 1990, Behrenfeld and Boss, 2014). Des données de biomasse phytoplanctonique en Atlantique Nord ont en effet montré que leur taux de croissance communautaire peut être positif en plein hiver (Boss and Behrenfeld, 2010) lorsque, le mélange devenant profond, les populations sont diluées et les rencontres avec leurs prédateurs réduites. D'autres études (Chiswell, 2011, Taylor and Ferrari, 2011) remettent en cause le contrôle du bloom par l'épaisseur de la couche de mélange, soutenant que c'est plutôt l'intensité du mélange turbulent qui réorganise la stratification du phytoplancton au sein de la couche de mélange (comme déjà proposé par Huisman *et al.*, 1999). Dans cette direction, d'autres analyses ont suggéré une différence entre le mélange induit par changement de flottabilité et celui induit par le vent (Brody and Lozier, 2014, Brody and Lozier, 2015) et que la chronologie de la transition entre la dominance de ces deux processus pourrai indiquer le moment le plus favorable pour l'initiation de la floraison algale. Le débat il est donc loin d'être conclu.

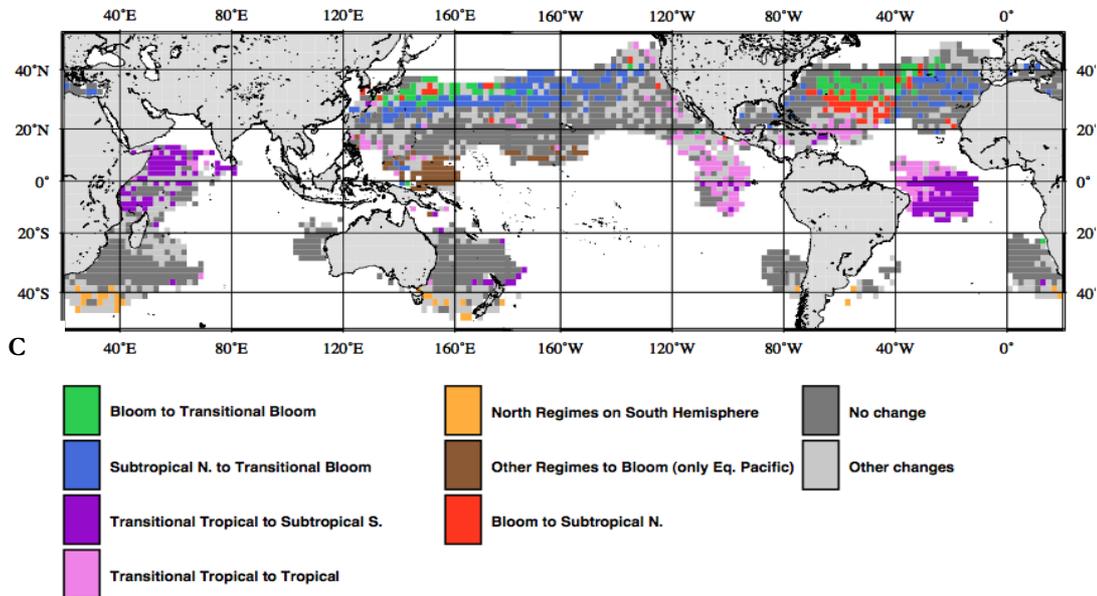
Mon opinion personnelle est que, plus que la théorie en elle-même, c'est son domaine d'applicabilité qui est remis en question. La plupart de travaux critiquant Sverdrup, bien que formellement corrects, se basent souvent sur des jeux de données limités. Les lacunes observationnelles se révèlent ici dans leur conséquence, à mon avis, la plus importante : l'impossibilité actuelle d'établir des théories consensuelles pour expliquer l'évènement le plus important de la phénologie phytoplanctonique. Je reviendrai sur cet aspect par la suite.

Encadré 3. D'Ortenzio et al., 2012



La base de données satellitaires de chlorophylle de surface, obtenue par les capteurs CZCS (années 1979-1983) et SeaWiFS (1998-2002) et rendue homogène avec un traitement unique (Martinez *et al.*, 2009), a été utilisée pour détecter de possibles changements de la phénologie phytoplanctonique entre les deux périodes considérées. Une méthode de biorégionalisation, via analyse en cluster (D'Ortenzio and Ribera d'Alcala, 2009, voir encadré 4), a été appliquée aux deux périodes, et six états phénologiques ont été identifiés (4 sont communs aux deux périodes : « Bloom », « Tropical », « Sub-tropical North », « Sub-tropical South » ; 2 sont spécifiques à leur période : « Transitional Tropical » pour les années CZCS, « Transitional Bloom » pour les années SeaWiFS). La répartition géographique des états trophiques est montrée dans les panneaux A (CZCS) et B (SeaWiFS). A noter que dans les régions en blanc, la faible résolution temporelle du capteur CZCS a empêché l'application de l'analyse en cluster. Pour cette raison, ces régions ont été masquées aussi pour la période SeaWiFS. Des changements phénologiques importants ont été identifiés sur à peu près 60% des régions analysées (panneau C). En général, on observe une diminution de l'intensité des événements saisonniers : 1) une partie de l'Atlantique Nord passe de « Bloom » à « Transitional Bloom » ou à « Sub-tropical » (pixels verts et rouges, diminution ou disparition du bloom printanier) ; 2) le Pacifique tropical Nord passe en « Sub-tropical Nord » (pixels verts et bleu ciel, diminution et anticipation du maximum printanier) ; la zone équatoriale du Pacifique, de l'Atlantique et de l'Indien passent en régime « Tropical » (pixels violets, diminution importante de la saisonnalité). Les zones subtropicales de l'hémisphère nord et les quelques régions analysées de l'hémisphère sud ne montrent pas d'altérations phénologiques majeures.

La plupart des changements observés sont imputables à des changements de la dynamique de la couche de mélange, qui tendent à diminuer sur l'ensemble des régions analysées. Une tentative de relier les changements phénologiques observés aux cycles climatiques (par l'intermédiaire des index climatiques, comme le PDO, le NAO ou l'ENSO) a montré que des rétroactions existent, mais aussi qu'elles ne sont pas si immédiates (faible index de confiance statistique). Des analyses supplémentaires sont donc à prévoir.



D'ORTENZIO, F., D. Antoine, E. Martinez, M. Ribera d'Alcalà, "Phenological changes of oceanic phytoplankton in the 1980s and 2000s as revealed by ocean-color remote-sensing observations". 2012, *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB4003, doi:10.1029/2011GB004269.

2.3 Les petites échelles spatio-temporelles

L'océan présente une forte variabilité à des échelles horizontales de l'ordre de 5 à 100 km. Cette échelle particulière (dite « mésoéchelle ») est liée à la rotation de la Terre, à l'échelle verticale de l'océan et à sa stratification en densité. Les structures à mésoéchelle, qui ont une échelle horizontale de l'ordre du rayon de déformation, proviennent principalement des instabilités baroclines des courants ou des fronts en densité (Gill *et al.*, 1974, Rhines, 2001). Les vitesses horizontales et verticales associées à ces structures ont une influence considérable sur le champ local de nutriments (McGillicuddy and Robinson, 1997, Levy *et al.*, 1999) et les transports qui en découlent peuvent être du même ordre de grandeur que ceux induits par les processus convectifs et à large échelle (Falkowski *et al.*, 1991, Oschlies, 2002, McGillicuddy *et al.*, 2007). La variabilité biologique aux grandes échelles spatio-temporelles pourrait donc être très affectée par la variabilité des facteurs abiotiques forçants aux plus petites échelles. Ce mécanisme de « transfert d'échelle » aurait lieu dans toutes les régions de l'océan, des plus pauvres aux plus productives et apparaît fortement lié aux échelles de variabilité du forçage physique (Mann and Lazier, 1996). Des estimations des effets de la mésoéchelle sur le phytoplancton ont été déduites de l'analyse statistique des observations satellitaires multi-capteurs (Chelton *et al.*, 2011, Yoder and Kennelly, 2006). A petite échelle, la chlorophylle superficielle semble covarier avec le champ local du vent et de la température superficielle (SST), mais le signe de cette covariance n'est pas constant, ni uniformément distribué (Uz and Yoder, 2004). Cependant, la variabilité à mésoéchelle apparaît dominante dans les régions oligotrophes (un tiers de la variance totale), avec des périodes typiques de l'ordre de la semaine (Doney *et al.*, 2003). Finalement, les caractéristiques intrinsèques des structures à mésoéchelle semblent aussi influencer la dynamique des communautés phytoplanctoniques qui y résident (McGillicuddy *et al.*, 2007).

Imbriquée dans la variabilité à mésoéchelle, une autre échelle de variabilité existe, cette fois plus caractéristique de la dimension temporelle. Dans les tourbillons subtropicaux oligotrophes, par exemple, la production phytoplanctonique présente une variabilité significative aux petites échelles temporelles (diurne et événementielle, Karl *et al.*, 2003), vraisemblablement contrôlées par des enrichissements épisodiques en nutriments des couches superficielles. Dans les régions productives, telles que le bassin subpolaire Atlantique Nord, les floraisons printanières présentent des caractéristiques (i.e. moment d'initiation, amplitude, durée) variables d'une année à l'autre (Henson *et al.*, 2009). Une partie de cette variabilité résulterait de la dynamique de la couche de mélange aux petites échelles, elle-même générée par des événements de mélange intermittents liés aux forçages atmosphériques (Williams and Follows, 2003, Smayda, 1998). Ces phénomènes de mélange vertical, qui ont une importance fondamentale pour la redistribution des sels nutritifs et le régime lumineux auquel la population de plancton est exposée, ont une durée très limitée (heures/jours) et sont très peu connus. Encore une fois, c'est le manque d'observations adaptées qui limite notre compréhension du processus.

Dans la thématique des petites échelles, mon activité de recherche s'est réalisée surtout en Méditerranée. C'est pour cela que j'en parlerai dans la prochaine section, qui détaillera l'état de l'art, ainsi que ma contribution, des études sur les interactions physique biologie dans ce bassin.

3 La Méditerranée

Le cadre général que je viens de décrire dans la section précédente (et qui n'est certainement pas exhaustif), avec sa répartition par échelles des processus abiotiques déterminant la répartition spatio-temporelle du phytoplancton, pourrait naturellement se décliner pour le bassin méditerranéen. En effet, les trois échelles des processus abiotiques qui influencent la biomasse (i.e. la large échelle, le cycle saisonnier, les petites échelles) se reproduisent aussi en Méditerranée. Bien évidemment, les amplitudes caractéristiques de ces échelles sont généralement plus petites en Méditerranée que dans les océans plus vastes. La hiérarchie entre échelles reste pourtant maintenue.

3.1 Le large échelle

La Méditerranée est un bassin, qui, en moyenne, est considéré très oligotrophe (Antoine *et al.*, 1995, Uitz *et al.*, 2011). L'oligotrophie Méditerranéenne a été souvent expliquée par la circulation thermohaline inverse qui caractérise le bassin (Crise *et al.*, 1999). Cette circulation à large échelle est composée de trois cellules thermohalines imbriquées (Robinson *et al.*, 2001 voir aussi figure 1 reprise par cet article) : deux qui se développent indépendamment dans les deux bassins Est et Ouest et qui se trouvent séparées à cause de l'impossibilité des eaux profondes de traverser le canal de Sicile, profond de seulement 400 mètres ; une troisième cellule qui intéresse l'ensemble du bassin et qui relie les deux précédentes cellules, entre elles et avec l'océan Atlantique (via le détroit de Gibraltar). Les deux premières sont forcées par la formation d'eaux profondes qui a lieu dans le Golfe du Lion (pour le bassin Ouest, de Madron *et al.*, 2013) et dans l'Adriatique et dans la Mer Egée (pour le bassin Est, Manca *et al.*, 2002). La troisième cellule décrit l'intrusion de l'eau atlantique (peu salée et froide) dans la Méditerranée, sa progression vers l'est (avec modification de ses caractéristiques hydrologiques), jusqu'à sa transformation en eau intermédiaire (nommée LIW, « Levantine Intermediate Water » en anglais) dans l'extrême limite Est du bassin (Lascaratos *et al.*, 1999). La LIW (située à 400 m de profondeur environ) coule vers l'ouest, traverse le canal de Sicile et occupe les couches intermédiaires d'une grosse partie du bassin occidental (Send *et al.*, 1999). Finalement, c'est encore la LIW qui contribue aux masses d'eaux qui traversent le détroit de Gibraltar, en bouclant la boucle de la cellule thermohaline intermédiaire (Hopkins, 1999).

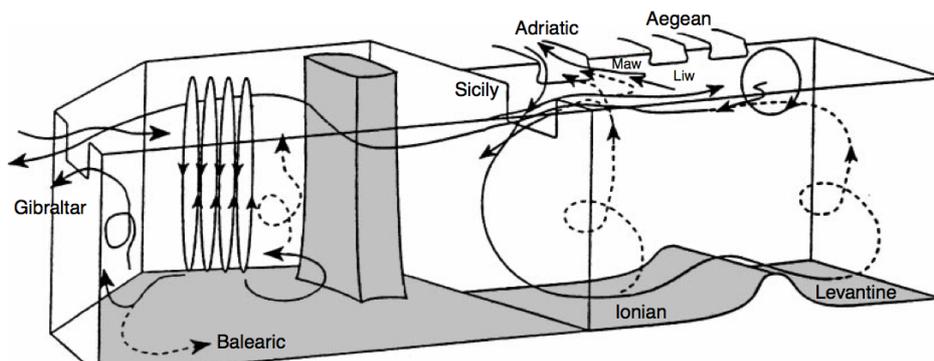


Figure 1. Diagramme schématique de la circulation thermohaline Méditerranéenne. Depuis Robinson *et al.*, 2001.

Ce complexe système de circulation provoque une répartition conséquente des sels nutritifs en Méditerranée, comme J.P. Bethoux et ses collaborateurs l'avaient décrite dans les années 90 (Bethoux *et al.*, 1998, Bethoux *et al.*, 1999) et comme cela a été confirmé plus récemment (Ribera d'Alcalà *et al.*, 2003). En général, à cause de la cellule thermohaline intermédiaire, on observe une perte de nutriments vers l'Atlantique, le bilan étant compensé par les apports atmosphériques et continentaux (Bethoux *et al.*, 1998). L'effet des deux cellules thermohalines génère aussi une forte différence dans les stocks profonds, dans la stœchiométrie et dans les concentrations des deux sous-bassins (Figure 2, extraite depuis Pujo-Pay *et al.*, 2011).

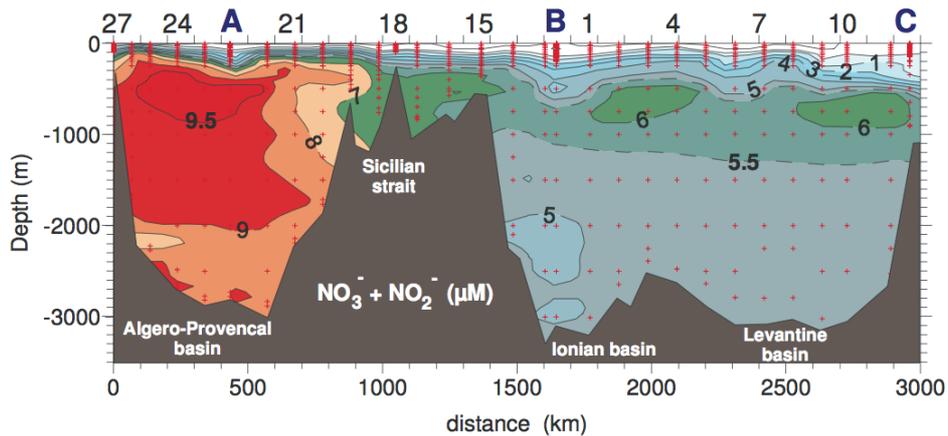


Figure 2. Transect Ouest-Est des concentrations en nitrates et nitrites au cours de la campagne BOUM. Figure extraite de Puyo-Pay et al. 2011.

Dans ce contexte, mon activité de recherche s'est focalisée sur le bassin nord-occidental, où les événements de convection profonde qui forcent la cellule thermohaline influencent (voire pilotent) la redistribution des sels nutritifs, et, plus généralement, de la matière organique et inorganique. Cette région est donc généralement considérée critique pour toute compréhension du fonctionnement biogéochimique du bassin. Ce n'est pas par hasard, donc, que c'est ici que l'effort de la communauté océanographique française en matière d'observation s'est concentré: d'abord avec l'implantation des deux stations marines de Banyuls et de Villefranche ; ensuite avec la mise en place du site d'échantillonnage DYFAMED/BOUSSOLE (au large de Nice, active depuis plus de 20 ans, initié dans le cadre de JGOFS) et, récemment, avec la mise en place du réseau MOOSE (depuis 2007), qui fédère toute l'activité française d'observation de la façade. Les données de ces systèmes d'observation, bien que déjà bien exploitées, sont encore source des découvertes, surtout maintenant que les séries commencent à dépasser les 20 ans de suivi. J'ai contribué à cette démarche, notamment en collaborant avec mes collègues intéressés à ces thématiques. Dans un premier papier (Heimbürger *et al.*, 2013), les données des pièges à particules (disponibles, avec des trous, de 1998 à 2008) ont été interprétées pour estimer le flux de carbone vers les couches profondes et donc examiner l'efficacité de la pompe biologique du bassin. Des données satellitaires de la couleur de l'océan, ainsi que des sorties des modèles, ont permis d'évaluer le rôle de la production primaire et du mélange physique sur l'export de carbone. Dans un deuxième papier (de Fommervault *et al.*, 2015a), l'analyse des données DYFAMED/BOUSSOLE/MOOSE a plutôt porté sur la variabilité temporelle des sels nutritifs, ce qui a permis de revisiter certaines hypothèses sur la limitation stoechiométrique de la production phytoplanctonique et aussi sur l'anomalie redfieldienne observée en Méditerranée et encore mal expliquée.

Toujours dans la Méditerranée Nord-Occidentale, j'ai participé à des études plus ciblées sur la caractérisation de la dynamique physique, et, en particulier, les processus intervenant dans la convection profonde observée dans la région. Le rôle du processus de cascading sur la formation d'eau profonde a été analysé à partir des données in situ disponibles et avec un focus spécifique sur l'année 2012 (de Madron *et al.*, 2013), année qui a vu une des convections profondes les plus importantes de la décennie. Dans un autre papier (Bosse *et al.*, 2015), l'apport en sel de l'Eau Levantine Intermédiaire, considéré comme un des processus clé pour la convection profonde de la Méditerranée Nord-Occidentale, a été revisité, grâce notamment à la récente disponibilité des données des planeurs sous-marins, intensivement déployés dans la région dans le cadre du système d'observation MOOSE (voir aussi encadré 9). L'écoulement de la LIW vers l'ouest semble, en effet, beaucoup plus complexe que prévu. Il est fortement influencé par des structures à sub-mésoéchelle (de l'ordre de 10-20 km et donc identifiées seulement grâce à la haute fréquence d'échantillonnage des gliders) capables de transporter la LIW d'une façon plus efficace,

mais bien plus aléatoire, dans la zone de convection. Enfin, la dynamique de la couche de mélange, ses conditions extrêmes (qui conduisent à la convection profonde, avec formation d'eaux denses) ainsi que ses forçages atmosphériques, ont été très largement analysés à partir des données in situ (Houpert *et al.*, 2015).

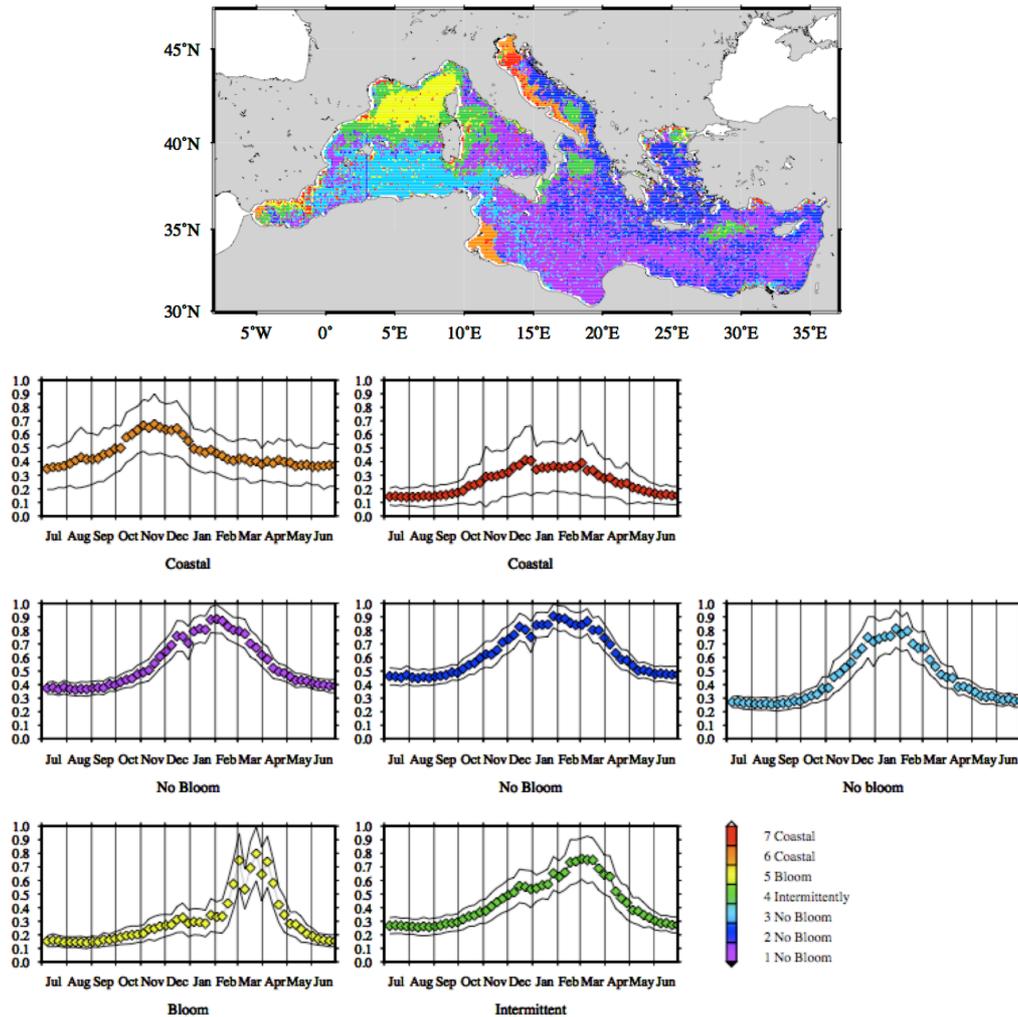
Enfin, une étude spécifique sur la dynamique du CO₂ océanique dans la totalité de la Méditerranée (D'Ortenzio *et al.*, 2008) a permis d'identifier la zone nord-occidentale du bassin comme la plus efficace pour la séquestration du carbone atmosphérique. Le flux total de CO₂ du bassin, déterminé sur la période 1998-2004 à l'issue d'un modèle 1D forcé principalement par des observations satellitaires, est pratiquement à l'équilibre, mais sans l'apport de la région nord-occidentale (notamment avec sa pompe biologique), le flux sera positif vers l'atmosphère. Ce travail (qui a été un des premiers à produire une estimation à l'échelle du bassin de la dynamique du CO₂ océanique et de ses principaux facteurs forçants) a été ensuite étendu à la période 1979-1983 (Taillandier *et al.*, 2012). Les tendances décennales ainsi évaluées indiquent que la floraison phytoplanctonique en Méditerranée Nord-Occidentale devient de moins en moins efficace dans la séquestration du carbone atmosphérique.

La compréhension du fonctionnement biogéochimique du bassin à large échelle reste toutefois encore entachée de points obscurs. Certains termes du bilan en sels nutritifs à l'échelle du bassin sont évalués de manière encore très approximative (comme les termes liés à la production primaire ou aux dépôts atmosphériques, Siokou-Frangou *et al.*, 2010) et le débat sur l'anomalie redfieldienne du bassin est encore très ouvert (Thingstad *et al.*, 2005). Beaucoup reste à faire, surtout dans les régions orientales, comme certaines études de synthèse (auxquelles j'ai contribué) ont souligné (Malanotte-Rizzoli *et al.*, 2013, de Madron *et al.*, 2011). Cela devient particulièrement évident quand on s'adresse au cycle saisonnier du phytoplancton.

3.2 La variabilité saisonnière

L'oligotrophie moyenne du bassin méditerranéen, expliquée dans ses grandes lignes par l'indisponibilité chronique de sels nutritifs provoquée par la circulation grande échelle, s'assouplit quand la variabilité saisonnière est considérée. Déjà dans les années 70, à partir des données in situ, des augmentations des concentrations phytoplanctoniques étaient observées, dans certaines périodes et zones spécifiques (Fiala *et al.*, 1976, Kimor and Wood, 1975, Sournia, 1973, Jacques *et al.*, 1974). Plus tard, cela s'est confirmé grâce aux données satellitaires de la couleur de l'océan : d'abord celles utilisant les observations du capteur CZCS (Antoine *et al.*, 1995, Morel and André, 1991) ; ensuite celles générées par des capteurs plus modernes, comme le SeaWiFS (Bosc *et al.*, 2004). Effectivement, les observations satellitaires montraient des floraisons algales récurrentes, notamment au printemps, à des endroits bien précis, comme la Méditerranée Nord-Occidentale, l'Adriatique méridionale, les régions côtières de l'Adriatique et de l'Égée, la Mer d'Alboran. Le reste du bassin, au contraire, montrait une variabilité saisonnière très faible, voire nulle. Quelques années plus tard, dans une étude qui est parmi les plus citées de ma production scientifique (D'Ortenzio and Ribera d'Alcala, 2009), mon directeur de thèse M. Ribera d'Alcalà et moi-même tentions de réanalyser les observations satellitaires de concentration de surface de chlorophylle avec un approche différente, inspirée par les travaux sur la biogéographie et la phénologie de Longhurst. Plus que considérer les valeurs absolues des concentrations observées, notre approche visait à classer les zones méditerranéennes selon la forme du cycle saisonnier moyen (voir encadré 4). Les biorégions ainsi obtenues confirmaient l'existence de zones à forte variabilité phénologique (qu'on a donc appelées « Bloom »). Toutefois, elles indiquaient aussi une phénologie différente des zones oligotrophes (nommées « No Bloom »). Plus intéressante encore, la variabilité phénologique de ces zones n'était pas totalement nulle. Elle montrait des altérations non négligeables au cours de l'année, avec des maxima annuels observés en début d'hiver et persévérant jusqu'à l'automne.

Encadré 4. D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà, 2009



A partir de la base de données de chlorophylle de surface (données satellitaires du capteur SeaWiFS, 11 ans de données) une carte des biorégions de la Méditerranée (figure en haut) et des cycles moyens de chlorophylle de surface qui y sont associés (figure en bas) a été calculée. A chaque couleur correspond une région avec caractéristiques similaires du cycle saisonnier de la chlorophylle de surface (i.e. sa phénologie). Les biorégions ont été déterminées en calculant, pour chaque pixel, les cycles saisonniers moyens climatologiques. Après normalisation, les cycles ont été regroupés par une analyse en cluster, en suivant un critère basé sur la « forme » du cycle saisonnier, qui a identifié quatre types d'états phénologiques principaux (« bloom », « no bloom », « intermittently », « coastal »). Les quatre types principaux se distribuent ensuite spatialement en sept biorégions. La distribution spatiale des biorégions confirme l'existence des deux régimes phénologiques contrastés, qui se concentrent principalement, mais pas exclusivement, dans les deux parties du bassin : le « bloom » à l'ouest et le « no bloom » à l'est. Le régime « intermittently » a été interprété comme un état trophique qui peut passer alternativement entre le « bloom » et le « no-bloom ». Il peut représenter un état phénologique à part entière, mais il peut être aussi un effet de la variabilité interannuelle. A noter que la méthode statistique appliquée (analyse en cluster) ne prévoit aucune hypothèse a priori sur la distribution des biorégions. La répartition géographique qui en dérive, donc, reproduit des structures de chlorophylle de surface déjà connues, et elle confirme, a posteriori, l'efficacité de l'approche.

D'ORTENZIO, F., d'Alcalà, M.R., 2009. "On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis." *Biogeosciences* 6 (2), 139-148.

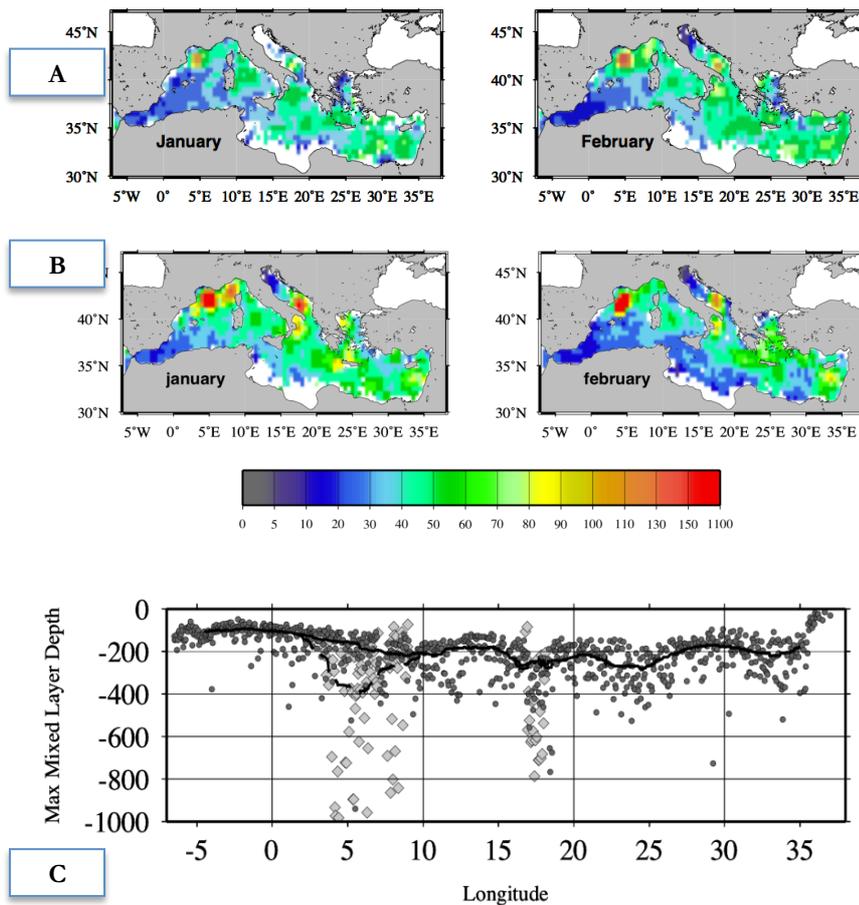
Ce papier a marqué un tournant dans mon parcours scientifique. Il est très cité, surtout pour la carte des biorégions. Je considère toutefois que la description des cycles saisonniers est beaucoup plus informative. De surcroît, elle a ouvert plus de questions qu'elle n'a fourni de réponses, notamment pour essayer d'expliquer ces cycles.

Un premier pas vers ces réponses a été d'analyser simultanément la distribution des biorégions et la variabilité de la couche de mélange. En fait, exactement comme dans toutes les autres régions océaniques (voir paragraphe 2.2), la dynamique du phytoplancton en Méditerranée doit dépendre (au moins en première approche) de la variabilité saisonnière de la profondeur de la couche de mélange. La correspondance géographique entre les zones connues pour l'existence d'événements de convection profonde (i.e. avec fortes couches de mélange) et celles caractérisées par de régimes productifs (« Bloom », voir encadré 4) semblait effectivement confirmer l'hypothèse, généralement acceptée, que les deuxièmes forcent les premières. C'est logiquement dans cette direction que mes recherches se sont donc poursuivies. En étudiant la Méditerranée, à l'époque de ma thèse, j'ai été très surpris du manque dans la littérature d'une description climatologique de la couche de mélange du bassin. J'ai comblé ce trou pendant mon post-doc⁴, en compilant les observations disponibles dans une climatologie mensuelle (D'Ortenzio *et al.*, 2005, D'Ortenzio and Prieur, 2012, voir encadré 5). La climatologie ainsi produite confirmait la vision d'ensemble d'un bassin océanique caractérisé par une variabilité saisonnière typique de zones tempérées, avec donc une dé-stratification progressive de la colonne d'eau pendant l'automne et l'hiver et une forte stratification en été (comme déjà indiqué par Robinson and Golnaraghi, 1995). Certaines spécificités du bassin apparaissent aussi dans la climatologie, comme l'influence de l'eau atlantique entrant à Gibraltar et l'impact sur la circulation de surface des grandes structures quasi-permanentes.

Comme je le disais, la continuation naturelle de ces études m'a amené à croiser la climatologie de la couche de mélange (D'Ortenzio *et al.*, 2005) avec les biorégions et les cycles phénologiques du phytoplancton observés par satellite (D'Ortenzio and d'Alcala, 2009). Cette analyse, qui a été menée dans le cadre de la thèse d'Héloïse Lavigne (que j'ai co-encadrée en 2011-2013), cherchait à donner les premiers éléments d'explication sur l'existence des biorégions. Les résultats obtenus (Lavigne *et al.*, 2013 voir encadré 6) ont montré que la variabilité de la couche de mélange expliquait la partie climatologique (i.e. moyenne) de la variabilité phénologique observée ainsi que sa répartition biogéographique. Ce résultat était, en fait, assez logique et attendu, notamment sur la base des travaux précédents (voir les travaux de synthèse de de Madron *et al.*, 2011 et de Siokou-Frangou *et al.*, 2010). Moins prévisible a été, au contraire, l'identification d'une faible covariance entre la valeur absolue du maximum annuel de chlorophylle et celui de la profondeur de la couche de mélange. La représentation simplifiée selon laquelle à un plus grand mélange correspond une floraison plus intense a été donc remise en question, au moins en Méditerranée.

⁴ Le papier sorti en 2005, qui a été mon premier à être publié avec mon affiliation française, a été une véritable expérience humaine et scientifique, qui a produit des fortes liaisons personnelles avec la plupart de personnes impliquées. Ça a été une magnifique expérience et je tenais à le souligner ici.

Encadré 5. La couche de mélange en Méditerranée

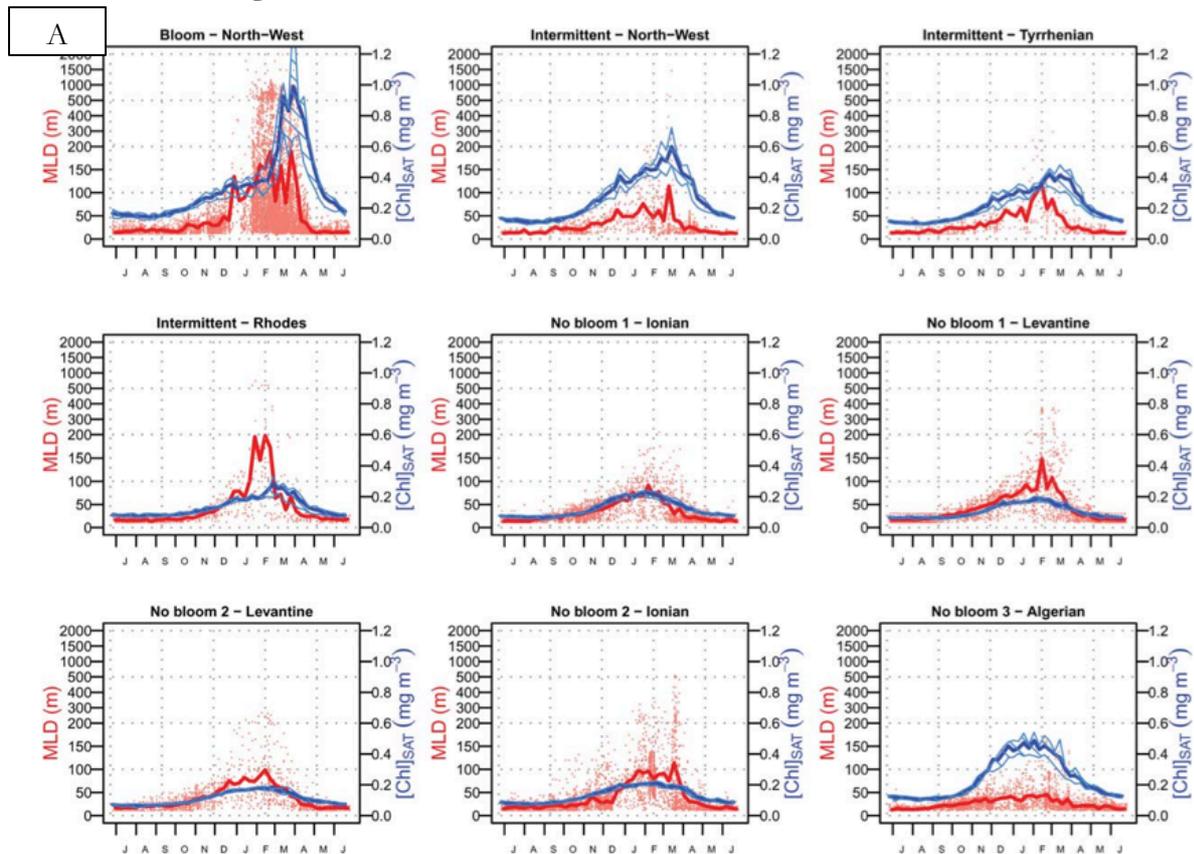


Une base de données de plus de 300000 profils de température de la Mer Méditerranée a été assemblée pour calculer la dynamique climatologique de la couche de mélange du bassin (D'Ortenzio *et al.*, 2005). La même base a été ensuite utilisée pour analyser la dynamique de cette couche, avec un intérêt particulier accordé à son impact sur la variabilité spatiale de la biomasse superficielle (D'Ortenzio and Prieur, 2010). Des moyennes climatologiques ont été calculées (résolution mensuelle et à 0.5°, panneaux A, mois de janvier et février), ainsi que l'écart-type pour chaque maille de la grille (panneaux B, mois de janvier et février). Cette analyse a montré : 1) l'existence de zones à intense mélange hivernal (Mer Ligure, Adriatique méridionale) ; 2) l'impact de l'eau de provenance atlantique, dans le bassin algérien, qui provoque des couches de mélange très faibles ; 3) une activité à méso- et sub-mésoéchelle plus intense dans le bassin est que dans le bassin ouest (écart-type plus élevé). Ce dernier point a été analysé en détail, en traçant les moyennes longitudinales des maximums annuels de la couche de mélange (panneau C). Si les estimations correspondant à la Mer Ligure et à l'Adriatique méridionale sont séparées des autres valeurs (points gris clair), les maximums de couche de mélange du bassin oriental sont en moyenne 2 fois plus profonds que dans le bassin occidental, avec toutefois une dispersion plus élevée. Nous avons interprété cette différence comme le résultat d'une activité à mésoéchelle plus importante dans le bassin est, combinée à l'effet « bouchon » de l'eau atlantique (plus froide et moins salée) sur les caractéristiques de la colonne d'eau du bassin occidental.

D'ORTENZIO, F. and Prieur, L. 2010, "The upper mixed layer", in "Life in the Mediterranean Sea: A look at habitat changes", Noga Stambler ed., Nova Science Publisher. pp 127-156.

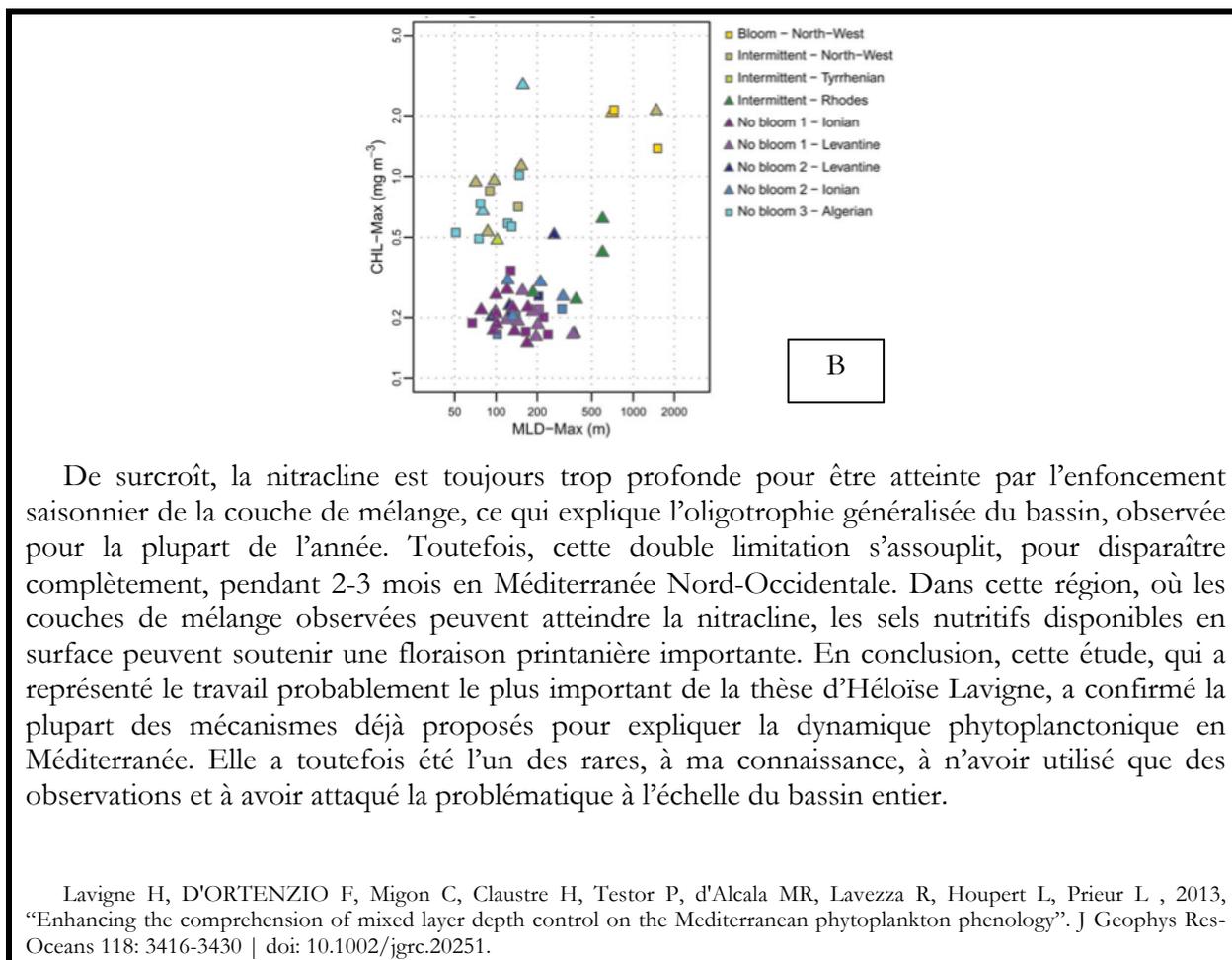
D'ORTENZIO, F., Iudicone, D., Montegut, C.D., Testor, P., Antoine, D., Marullo, S., Santoleri, R. & Madec, G., 2005. Seasonal variability of the mixed layer depth in the Mediterranean Sea as derived from in situ profiles, Geophysical Research Letters, 32.

Encadré 6. Lavigne et al., 2013



Plus de 70000 profils T/S méditerranéens ont été utilisés pour générer des séries temporelles climatologiques de profondeur de la couche de mélange pour chaque biorégion du bassin (telles qu'établies par [D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà, 2009](#)). Ces séries (panneau A, courbes rouges) ont été aussi comparées à des séries équivalentes de chlorophylle-a de surface, obtenues par satellite (panneau A, courbes bleues). Plusieurs métriques phénologiques ont été aussi développées et analysées. L'étude a montré que la chronologie de la variabilité saisonnière de la couche de mélange semble être critique pour déterminer les états trophiques observés en Méditerranée (i.e. « Bloom » ou « No Bloom », selon les définitions de [D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà, 2009](#)). Parmi les métriques calculées, l'analyse a montré que la métrique Delta_Max (i.e. la distance en jours entre la date de maximum annuel de la couche de mélange et celle du maximum annuel de Chlorophylle-a) est la plus pertinente statistiquement pour expliquer les biorégions méditerranéennes.

La covariance entre les valeurs absolues de maximums annuels de Chlorophylle et de la couche de mélange semble, au contraire, moyennement pertinente en Méditerranée (Panneau B, les couleurs indiquent les différents bioregions). Plus que la valeur absolue de la profondeur de la couche de mélange, donc, semblera que la chronologie des événements soit le plus critique pour déterminer la réponse, en terme d'état trophique, de la Chlorophylle. En utilisant aussi une base de données historique des profils de concentration de nitrates (pour évaluer la profondeur de la nutricline) et de radiances incidentes (par satellite), le rôle relatif des sels nutritifs et de la lumière sur l'évolution temporelle de la Chlorophylle a été examiné. L'étude, qui s'est concentrée sur deux des biorégions les mieux échantillonnées et aux régimes trophiques contrastés (le nord-ouest de la Méditerranée pour les régimes « Bloom » et la Mer Ionienne pour les régimes « No Bloom ») a montré que la lumière n'est généralement jamais limitante en Méditerranée.



Ces résultats ont donc montré que plusieurs questions restent encore ouvertes.

D'abord, le compartiment chimique. Généralement, on présume que l'augmentation (diminution) de la profondeur de la couche de mélange génère une augmentation (diminution) de la quantité de sels nutritifs disponibles pour la croissance algale. Autrement dit, « plus de mélange, donc plus de sels nutritifs, donc plus de biomasse ». Toutefois, les faibles covariances observées entre les valeurs absolues de profondeur de couche de mélange et l'intensité de la réponse phytoplanctonique (Lavigne *et al.*, 2013) montrent que ce modèle n'est pas toujours vérifié en Méditerranée. En effet, la profondeur de la nitracine (c'est à dire la profondeur à laquelle les concentrations de sels nutritifs ne sont plus limitantes pour la croissance algale) est caractérisée par de forts gradients est-ouest et nord-sud dans le bassin méditerranéen (figure 2). La même profondeur de couche de mélange aura donc un impact totalement différent sur les concentrations de sels nutritifs selon qu'elle se produit dans le bassin est ou dans le bassin ouest. Les observations sur la distribution de sels nutritifs, seul moyen de résoudre l'impasse, restent encore très peu nombreuses, surtout si on s'intéresse aux cycles saisonniers. Le développement des plates-formes autonomes équipées de capteurs de sel nutritifs (i.e. nitrates) par des équipes nord-américaines a donc représenté une grosse opportunité pour augmenter la disponibilité de ce type de données (Johnson *et al.*, 2010). Par conséquent, j'ai été l'initiateur d'un projet dédié au développement et à l'exploitation scientifique de la version française d'un flotteur nitrates (projets PRONUTS, LEFE-GMMC et Région PACA). A partir des données des deux flotteurs développés, une étude spécifique sur l'interaction entre couche de mélange, chlorophylle, et disponibilité en sels nutritifs a été réalisée en Méditerranée Nord-Occidentale (D'Ortenzio *et al.*, 2014, encadré 7). Les flotteurs ont répertorié une augmentation de concentrations de nitrate en

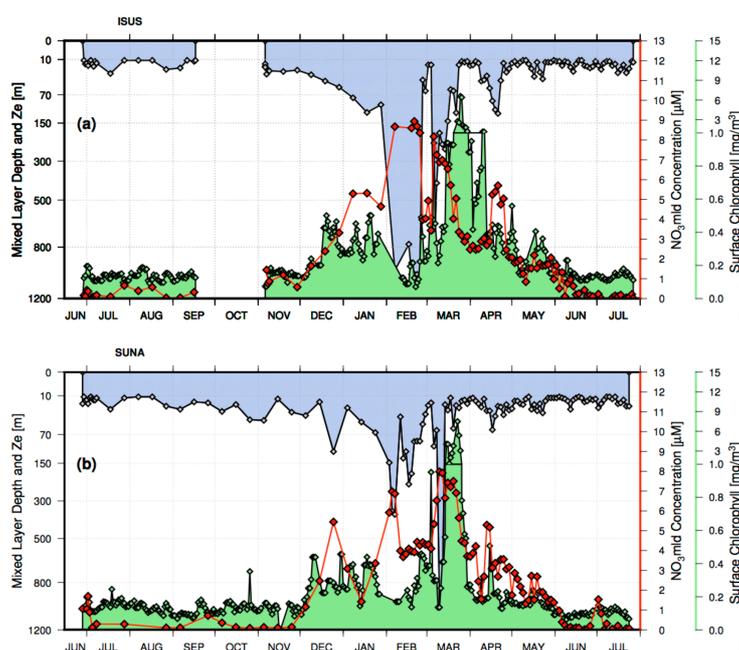
surface dès le mois de décembre, donc bien plus tôt que la période de maximum annuel de la couche de mélange. Plus que le mélange intense (qui génère la convection profonde et qui a lieu généralement en fin décembre/janvier), la circulation générale de la zone semble être plus importante pour favoriser une remontée de la nutricline vers la surface. Cette remontée permet à des couches de mélange relativement peu profondes (comme celles observées en décembre) d'injecter des sels nutritifs en surface et, donc, de soutenir la croissance algale. Les données de PRONUTS n'étaient disponibles qu'en Méditerranée Nord-Occidentale et les résultats obtenus se sont limités, par conséquent, à cette zone. Ils ont toutefois ouvert une voie que je ne manquerai pas d'exploiter dans le futur.

L'autre forçage abiotique du phytoplancton, la lumière, demande aussi une analyse plus approfondie. En Méditerranée, la distribution spatiale de la profondeur du Maximum Profond de Chlorophylle (« DCM », depuis l'anglais Deep Chlorophyll Maximum), par exemple, suit grossièrement les gradients de chlorophylle observés en surface (Crispi *et al.*, 2001) et sa mise en place a été clairement associée à la disponibilité de lumière en profondeur (Cullen and Eppley, 1981). Cette liaison entre la structure verticale de la biomasse et la lumière a été intensivement étudiée par la passé dans l'océan global (par exemple, Fennel and Boss, 2001, Letelier *et al.*, 1993) et dans la Méditerranée (Estrada *et al.*, 1993). Toutefois, et jusqu'à très récemment, une seule étude (Letelier *et al.*, 1993) avait analysé la saisonnalité (et donc la phénologie) du rapport entre DCM et disponibilité lumineuse. Par la suite, une étude à laquelle j'ai contribué (Mignot *et al.*, 2014) a utilisé les premiers prototypes BioArgo développés au LOV (voir encadré 8) pour confirmer les résultats de Letelier *et al.* (1993). Cette étude a également mise en évidence les interactions complexes entre disponibilité des nutriments et disponibilité de lumière, ainsi que la spécificité de la structure verticale de la biomasse méditerranéenne. Dans ce bassin, comme probablement dans toutes les autres régions à l'« interface » entre régimes tropicaux et tempérés, cette structure résulte d'un subtil équilibre entre les disponibilités en lumière et en sels nutritifs (comme, par ailleurs, déjà affirmé par Cullen and Eppley, 1981).

Ensuite, la variabilité interannuelle. Comme très bien identifié grâce aux observations in situ sur le site DYFAMED (Marty and Chiaverini, 2002; Zakardjian and Prieur, 1994) ou par les observations satellitaires (Bosc *et al.*, 2004, Barale *et al.*, 2008), les cycles saisonniers de la biomasse phytoplanctonique montrent une forte variabilité d'une année sur l'autre (au moins en surface). Cette variabilité observée n'a pourtant pas été encore entièrement expliquée en termes de forçages et d'importance relative des processus en jeu, comme le démontrent les difficultés des études numériques à la reproduire (Mattia *et al.*, 2013, Lazzari *et al.*, 2012).

Enfin, les petites échelles. Comme suggéré par Smayda (1998), le cycle saisonnier du phytoplancton peut être considéré comme une séquence de petits événements de croissance/décroissance à haute fréquence temporelle. Des événements locaux de mélange, liés à une intensification locale du forçage atmosphérique (Andersen and Prieur, 2000) ou au passage/création d'une structure à mésoéchelle (Moutin and Prieur, 2012), peuvent induire des perturbations des couches de surface, générant ainsi des modifications du cycle phénologique du phytoplancton. On considère que cela est particulièrement pertinent en Méditerranée, comme on le verra dans la prochaine (et dernière !!) section de cette introduction.

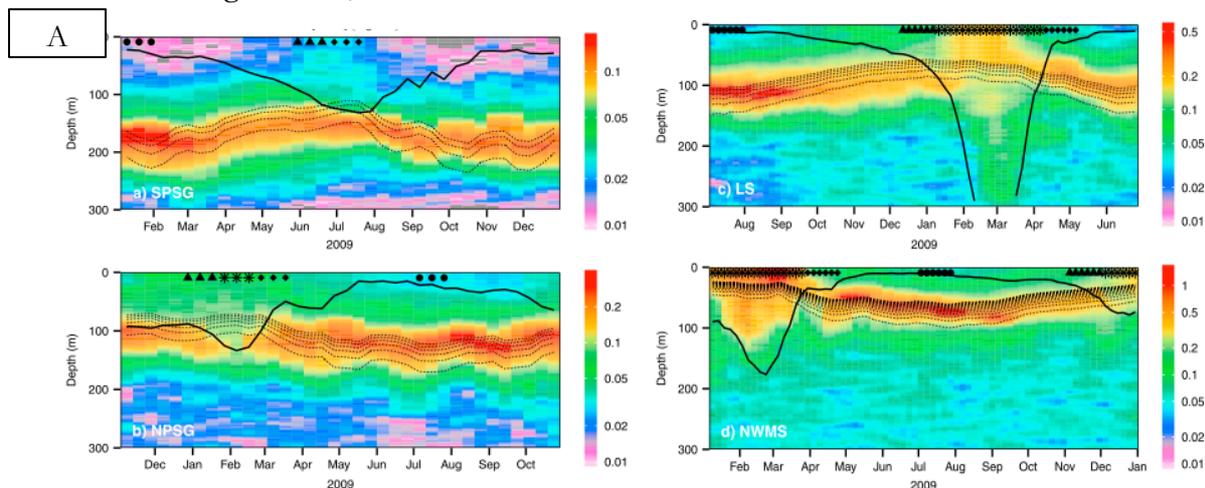
Encadré 7. D'Ortenzio et al., 2014



En 2009, deux flotteurs profileurs prototypes (PRONUTS, version ISUS et SUNA, selon le capteur embarqué), équipés des capteurs de concentration de nitrates (plus capteurs T/S, mais sans fluorimètre), ont été déployés dans la Méditerranée Nord-Occidentale (encore !!). Ils ont acquis plus de 150 profils de concentration de nitrates (entre 0 et 1000m) tout au long de la période 2009-2011. En 2009-2010, ils ont échantillonné un important épisode de convection profonde (couche de mélange > 800m) ainsi que le développement et le déclin d'une large floraison phytoplanctonique. Les données des flotteurs sur cette période (figure de haut : flotteur ISUS ; figure du bas : flotteur SUNA ; concentration en nitrates dans la couche de mélange en rouge, profondeur de la couche de mélange en gris) ont été aussi mises en relation avec des estimations satellitaires de chlorophylle de surface (en vert, dans la figure). L'étude a démontré qu'en Méditerranée Nord-Occidentale (comme déjà suggéré par Lavigne et al. 2013, voir encadré 6), les sels nutritifs commencent à être disponibles dès le mois de décembre. Cela contredit le modèle général, généralement accepté, qui considèrerait le processus de convection profonde comme le principal responsable de l'injection de sels nutritifs en surface. Or, cela se produit plutôt en février (voir figure, courbes grises), donc bien plus tard que la première augmentation de concentration de nitrate en surface. Les données de chlorophylle ont aussi montré que le phytoplancton réagit très rapidement à cette disponibilité anticipée de nitrates, avec une première augmentation de concentration observée en décembre. L'approfondissement de la couche de mélange, toutefois, avec les processus de mélange intense qui y sont associés, empêche le développement d'une véritable floraison, laquelle n'est observée que au moment de la stratification (i.e. en mars). L'augmentation des concentrations de nitrate dès le mois de décembre a été expliquée par la circulation générale de la région, caractérisée par une structure cyclonique à large échelle. Soutenue par cette structure, une remontée généralisée des isopycnes pourrait induire un rapprochement à la surface des couches profondes, très chargées en sels nutritifs. Dans ces conditions, même un approfondissement de la couche de mélange d'une centaine de mètres (donc très inférieur aux valeurs atteintes lorsque la convection profonde se produit), peut induire des concentrations élevées (pour la zone) de sel nutritifs.

D'ORTENZIO F, Lavigne H, Besson F, Claustre H, Coppola L, Garcia N, Laës-Huon A, Le Reste S, Malardé D, Migon C, Morin P, Mortier L, Poteau A, Prieur L, Raimbault V, Testor P., 2014, "Observing mixed layer depth, nitrate and chlorophyll concentrations in the northwestern Mediterranean: A combined satellite and NO₃ profiling floats experiment". *Geophys Res Lett* 41: 6443-6451 | doi: 10.1002/2014gl061020.

Encadré 8. Mignot et al., 2014



En utilisant les données des premiers flotteurs biogéochimiques développés par le LOV (voir aussi encadré 10), l'évolution temporelle du maximum subsuperficiel de chlorophylle (DCM, depuis l'anglais « Deep Chlorophyll Maximum ») sur un cycle annuel complet (panneau A, les couleurs indiquent les concentrations en chlorophylle-a) a été analysé dans quatre environnements (les grands tourbillons équatoriaux du Pacifique Nord, NPSG, et Sud, SPSG ; le bassin Levantine de la Méditerranée, LS ; la Méditerranée Nord-Occidentale, NWMS). Grâce aux flotteurs, la profondeur de la couche de mélange océanique (courbes noires dans le panneau A) ainsi que la PAR (radiation disponible pour la photosynthèse, depuis l'anglais « Photosynthetically Available Radiation », lignes pointillées dans le panneau A) sur la verticale (calculée à partir des radiomètres embarqués sur les flotteurs) ont été évaluées. Dans les quatre zones considérées, le DCM a été observé, bien que sa permanence varie selon les régions (il est observé toute l'année uniquement dans le Pacifique Nord). Quand il est présent, sa profondeur est systématiquement observée en correspondance de la profondeur de la même isolume, qui, toutefois, est différente d'une zone à l'autre (SPSG: 0.1–0.4 mol quanta $m^{-2} d^{-1}$, NPSG: 0.1–0.6 mol quanta $m^{-2} d^{-1}$, LS: 0.1–0.6 mol quanta $m^{-2} d^{-1}$, and NWMS: 0.1–1.2 mol quanta $m^{-2} d^{-1}$). Plutôt que en termes d'isolume absolue, une relation beaucoup plus robuste (et universelle dans les 4 régions) est trouvée si on considère un pourcentage (0.73%) de la PAR incidente de surface (PAR(0)). L'étude a ensuite analysé les différences entre les régions, notamment pour formuler des hypothèses concernant la disparition, à certaines périodes de l'année, du DCM. Le DCM semble en effet influencé par les processus de photo-acclimation (i.e. les mécanismes cellulaires qui permettent aux cellules de phytoplancton de mieux s'adapter au régime lumineux) qui induisent des augmentations de chlorophylle sans pour autant augmenter la biomasse cellulaire. Quand, toutefois, l'injection de sels nutritifs dans les couches éclairées est suffisante pour supporter la croissance (comme, probablement, observé pendant l'hiver à travers les données du flotteur en NWMS), on assiste à une véritable augmentation de la biomasse en surface et à une disparition (à cause de l'ombrage) du DCM. Ce papier, qui représente le noyau dur de la thèse d'Alexandre Mignot (encadrant : H. Claustre) a été un des premiers de notre équipe (et, plus généralement, au monde) à utiliser les données des flotteurs profileurs biogéochimiques (il s'agissait des anciens versions des flotteurs, sans capteurs de nitrates, déployés entre 2008 et 2010).

Mignot A, Claustre H, Uitz J, Poteau A, D'ORTENZIO F, Xing X, 2014, "Understanding the seasonal dynamics of phytoplankton biomass and the deep chlorophyll maximum in oligotrophic environments: A Bio-Argo float investigation". *Global Biogeochem Cy* 28: 856-876 | doi: 10.1002/2013gb004781.

3.3 Les petites échelles spatio-temporelles

La dynamique physique méditerranéenne à mésoéchelle et à sub-mésoéchelle a fait l'objet de plusieurs études basées sur l'altimétrie (Amitai *et al.*, 2010, Pascual *et al.*, 2007, Birol *et al.*, 2010, Isern-Fontanet *et al.*, 2006) et sur des données in situ (Moran *et al.*, 2001, Buongiorno Nardelli *et al.*, 1999, Moutin and Prieur, 2012, Testor and Gascard, 2005). En fait, les structures quasi-permanentes du bassin, la topographie des fonds, ainsi que l'orographie complexe des côtes, favorisent la génération des instabilités du champ de densité qui sont à la base de la formation de tourbillons, filaments, fronts, champignons, etc. (Robinson *et al.*, 2001). L'impact de ces structures sur la distribution spatio-temporelle de la biomasse méditerranéenne est similaire à ce qu'on observe dans l'océan global. Dans les conditions typiques de la Méditerranée, toutefois, ils peuvent déterminer des rétroactions spécifiques sur la biomasse phytoplanctonique, qui nous intéressent particulièrement.

D'abord, la proximité géographique entre le talus (zone de formation préférentielle des structures à mésoéchelle) et l'océan ouvert. Cette proximité augmente les effets perturbateurs que les structures à mésoéchelle peuvent induire sur la redistribution des sels nutritifs et, par conséquent, sur la variabilité de la biomasse algale. Par exemple, les instabilités du front ligure en Méditerranée Nord-Occidentale génèrent souvent des petits tourbillons qui peuvent se détacher de la zone côtière, pour se déplacer vers le centre du bassin. Dans un contexte de forte productivité ou d'oligotrophie de la zone hauturière, ces structures peuvent augmenter/diminuer localement la disponibilité des sels nutritifs en surface, et donc générer des régions productives ou oligotrophes, totalement découplées de la dynamique à plus large échelle de la région intéressée (Andersen and Prieur, 2000, Taupier-Letage *et al.*, 2003).

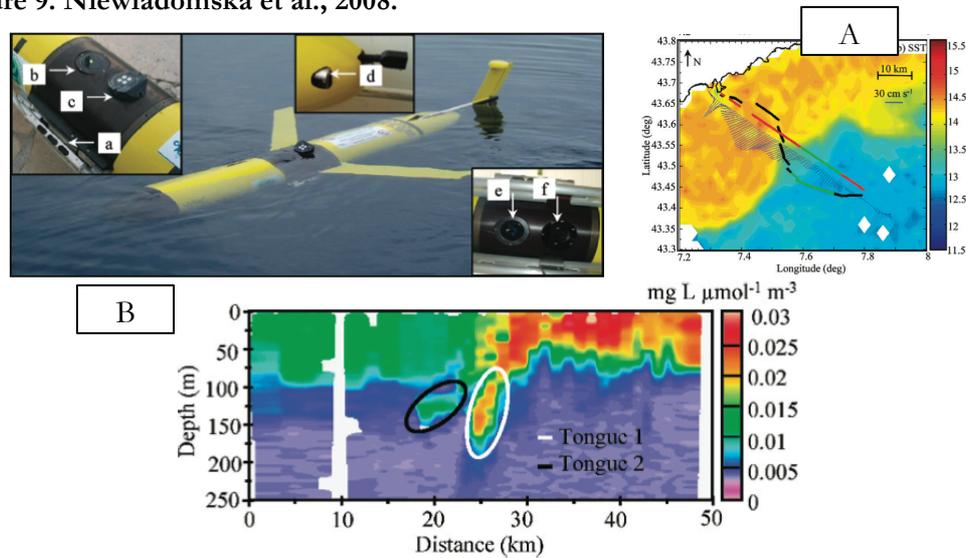
Deuxièmement, dans un bassin où la stratification des couches de surface provoque une véritable barrière à l'injection de sels nutritifs dans les couches éclairées, tout phénomène qui modifie la distance relative entre la pycnocline et la nutricline a potentiellement un impact sur la dynamique phytoplanctonique. Les structures anticycloniques, généralement plus abondantes dans le bassin oriental (Isern-Fontanet *et al.*, 2006), ont certainement un rôle dans l'ultra-oligotrophie de la région (Moutin and Prieur, 2012). Moins fréquents en Méditerranée, les structures cycloniques peuvent générer des vitesses verticales positives et induire une augmentation de la biomasse (Levy *et al.*, 2000).

Plus généralement, l'impact de la méso- et sub-mésoéchelle sur la dynamique du phytoplancton méditerranéen peut s'assimiler à des « pulses », positives ou négatives, qui perturbent le cycle saisonnier, principalement contrôlé par la couche de mélange saisonnière (voir paragraphe 3.2). Cet impact, généralement étudié par la mise en place d'outils de modélisation robustes et dédiés (Levy *et al.*, 1999), est beaucoup moins analysé du point de vue expérimental. Mais ce n'est pas un hasard. Très difficiles à échantillonner, à cause de leur dimension réduite et de leur durée de vie, les structures à mésoéchelle représentent un véritable défi pour un observateur.

Pourtant, l'utilisation de gliders pourrait représenter un tournant pour résoudre cette impasse. Grâce à la forte implication du LOV ainsi que de la DT-INSU et des mes collègues du LOCEAN (P. Testor et L. Mortier), j'ai pu exploiter ces merveilles technologiques pour aborder mes questions scientifiques. J'ai déjà parlé plus haut de l'analyse de tourbillons à mésoéchelle transportant la LIW (Bosse *et al.*, 2015) en Méditerranée Nord-Occidentale. Dans un contexte plus biogéochimique, j'ai aussi contribué à une étude qui a, pour la première fois, utilisé un glider équipé de capteurs biogéochimiques sur une radiale entre Villefranche et la station DYFAMED/BOUSSOLE (Niewiadomska *et al.*, 2008, voir encadré 9). Grâce à l'incroyable résolution d'échantillonnage de ce type d'engins, les effets à mésoéchelle des instabilités du courant ligure (qui longe les côtes françaises) ont été analysés dans leur impact sur les paramètres biogéochimiques. L'existence de vitesses verticales importantes au bord du courant a été ainsi

mise en évidence, avec aussi l'identification de patches de biomasse en profondeur transportés par subduction.

Encadré 9. Niewiadomska et al., 2008.



Un glider (ou planeur sous-marin) est une plateforme de mesure océanographique qui permet un échantillonnage automatique de la colonne d'eau (généralement entre 0 et 1000 m) à très haute résolution spatiale (environ 4-10 km). Un glider se déplace dans l'eau en transformant son mouvement vertical (généralisé par changement de flottabilité) en mouvement diagonal (avec des ailes), ce qui lui permet d'avancer. Avec un système de communication très performant, un glider est piloté par un opérateur depuis la terre, ce qui en fait un instrument exceptionnel pour l'échantillonnage océanographique des petites échelles (Ruiz *et al.*, 2012), ainsi que pour la surveillance permanente des régions océaniques (Davis *et al.*, 2008). L'utilisation scientifique de gliders a porté initialement sur l'analyse des données T/S (Pelland *et al.*, 2013, Heslop *et al.*, 2012, Timmermans and Winsor, 2013), pour ensuite (quand la technologie s'est stabilisée et que de nouveaux capteurs sont apparus) concerner aussi des analyses biogéochimiques (Perry *et al.*, 2008). Dans ce cadre, j'ai contribué à une étude qui présentait des observations glider dans la Méditerranée Nord-Occidentale et qui a permis d'évaluer l'impact des instabilités dynamiques à petite échelle spatiale du front ligurien sur la dynamique biogéochimique de la région. En mission sur une radiale Nice-DYFAMED/BUOSSOLE pendant le mois de janvier 2007, le glider *Tournesol* du LOV était équipé d'une suite complète de capteurs biogéochimiques (voir photo : a) CTD; b) rétrodiffusiomètre à 880 nm et fluorimètre CDOM; c) radiomètre pour l'irradiance; d) optode pour l'oxygène dissous; e) rétrodiffusiomètre à 470 et 532 nm et fluorimètre chlorophylle-a; f) radiomètre pour la luminance). Les données du glider, qui a traversé le front ligurien (voir Panneau A, image satellitaire de SST pendant la mission, en noir le trajet du glider), ont montré très clairement l'existence de langues de subduction déterminées par l'instabilité du front. En utilisant le rapport chlorophylle/oxygène dissous (qui permet de « dater » les masses d'eau, à condition de considérer des intervalles temporels réduits), deux événements de subduction ont pu être identifiés (Panneau B, transect du rapport Oxygène Dissous sur Chlorophylle, les deux langues sont marquées avec des ovales blanc et noir). Depuis, 2009, la totalité du parc gliders français (y compris le glider du LOV, *Tournesol*) est gérée par la Division Technique de l'INSU, qui s'occupe aussi de maintenir les radiales mensuelles effectuées dans le cadre du Service d'Observation de la façade MOOSE. Mon activité avec les gliders se poursuit donc dans ce cadre, mais je participe aussi à la définition des méthodes de calibration et au contrôle de qualité des capteurs biogéochimiques embarqués sur les gliders, dans le cadre du SOERE CTD-O2.

Niewiadomska, K., Claustre, H., Prieur, L. & D'Ortenzio, F., 2008. Submesoscale physical-biogeochemical coupling across the Ligurian Current (northwestern Mediterranean) using a bio-optical glider, *Limnology and Oceanography*, 53, 2210-2225.

4 Et le forçage biotique ?

Et le contrôle « top-down » (i.e. [Lampert et al., 1986](#)) ? Et les processus biologiques de dégradation et de reminéralisation (i.e. [Karl et al., 2003](#)) ? Et la boucle microbienne ([Follows et al., 2007](#), [Thingstad and Rassoulzadegan, 1999](#)) ? Et la succession saisonnière des espèces (i.e. [Edwards et al., 2013](#)) ? Et l'effet du broutage du zooplancton sur le phytoplancton (i.e. [Mariani et al., 2013](#), [Kjørboe, 2011](#), [Behrenfeld, 2010](#)) ? Bref, tous ces processus (et il en manque dans ma liste !!) qui sont déterminés par les caractéristiques biotiques du milieu marin ?? Ils ont un impact sur la distribution géographique et sur la phénologie du phytoplancton, au même titre que les processus abiotiques que je viens de décrire. Malheureusement, dans ce vaste et intéressant domaine, la quantité d'observations reste dramatiquement faible, d'autant que les études essayant de donner une vision globale sont affectées par des grandes incertitudes (voir, juste comme exemple, l'estimation de la respiration planctonique présentée par [del Giorgio and Duarte, 2002](#)). Il est donc, au moins actuellement, très difficile concilier mon approche « bottom-up », avec une vision plus centrée sur la biologie.

L'observation satellitaire offre toutefois encore des possibilités, limitées, certes, mais avec du potentiel. L'utilisation d'algorithmes spécifiquement développés ([Maritorea et al., 2002](#)) a rendu possible, par exemple, l'estimation depuis l'espace de la concentration superficielle de la substance organique colorée dissoute (CDOM, depuis l'anglais « Colored Dissolved Organic Matter »). Généralement considéré comme proportionnel à la concentration de chlorophylle-a, le CDOM a été récemment soupçonné d'avoir une dynamique plus indépendante ([Morel et al., 2010](#)). Proxy des processus de reminéralisation, le CDOM peut donc informer sur l'efficacité bactérienne, surtout en zones oligotrophes. J'ai donc contribué à une étude sur la variabilité du CDOM en Méditerranée ([Xing et al., 2014](#)), à partir des données satellitaires, mais aussi utilisant les données du premier lot de flotteurs profileurs biogéochimiques du LOV (équipés d'un fluorimètre CDOM, il s'agit du même type de flotteurs utilisés dans [Mignot et al., 2014](#), voir encadrés 8 et 10). De la même manière, il existe des algorithmes pour évaluer, à partir des observations satellitaires de la couleur de l'océan, les concentrations des 3 principales classes de taille du phytoplancton ([Uitz et al., 2006](#)). Dans une étude à laquelle j'ai participé ([Uitz et al., 2011](#)), les contributions relatives de ces classes (nano-, micro- et pico-phytoplancton) à la production totale de la Méditerranée ont été évaluées, dans les biorégions établies par D'Ortenzio et Ribera d'Alcalá (2009). Le plus important contributeur s'est révélé le nanophytoplancton (43-50% de la production totale), sur l'ensemble de biorégions et pour toute l'année, sans toutefois montrer un cycle saisonnier marqué. Les productions relatives au micro- et au picophytoplancton, au contraire, montrent une différence selon le type des biorégions, avec dominance du micro- dans les régions « Bloom » et du pico- dans celles « No bloom ».

Au finale, je considère, en conclusion de ce petit paragraphe, que les aspects liés aux forçages biotiques doivent être toujours considérés quand on vise l'explication de la dynamique algale (comme j'ai la prétention de faire). En ce qui me concerne, c'est un des grands enseignements de mon directeur de thèse, Maurizio Ribera d'Alcalá, que je m'efforce en permanence de suivre. L'environnement villefranchois fournit, aussi, un magnifique humus.

5 Conclusion, leçons apprises, messages à retenir

En conclusion de cette première partie, qui avait pour objectif de survoler l'état de l'art de la thématique principale de mes recherches, et ainsi d'y montrer mes contributions, un certain nombre des conclusions peuvent être tirées. Ces conclusions, parfois tellement évidentes que les énoncer est une banalité, vont me permettre d'introduire mon projet de recherche, que j'ai l'ambition de projeter sur le long terme (i.e. 5 ans). Ce serait un plaisir d'en discuter avec le jury.

L'environnement océanique est très complexe, la dynamique du phytoplancton aussi

Constat tout à fait évident, mais qu'illustre bien la difficulté de travailler à l'interface entre ces deux domaines. N'empêche qu'étudier les effets de la physique sur le phytoplancton marin est une thématique extrêmement enrichissante du point de vue intellectuel. Elle est de plus en plus d'actualité dans la communauté océanographique, mais aussi dans la société, à cause des effets de rétroactions biogéochimiques sur le climat. C'est aussi un domaine qui intéresse les meilleurs océanographes du monde et qui donc stimule une saine compétition intellectuelle. Finalement, c'est aussi la thématique dans laquelle se positionne mon savoir-faire. Pour toutes ces raisons, mon projet de recherche pour le futur ne s'éloignera pas des thématiques qui ont caractérisé mon parcours antérieur.

L'océan est sous-échantillonné, les compartiments biogéochimiques le sont encore plus

« On connaît moins bien les profondeurs océaniques qu'on ne connaît la surface de la lune » (Merle, 2006) ; il s'agit d'une phrase certainement provocatrice, mais il y a beaucoup de vérité. Au cours des précédents paragraphes, j'ai, à plusieurs reprises, mis l'accent sur cette évidence. Elle est encore plus vraie lorsque les observations biogéochimiques sont prises en compte. Ce manque de données est lourd de conséquences. Il explique comment, en quelque sorte, la science océanographique et, en particulier, la branche qui s'intéresse aux interactions physico-biogéochimiques, est si en retard par rapport à d'autres sciences d'étude de la Terre (voir, par exemple, les sciences atmosphériques). Pourtant, nous sommes en train de vivre une révolution, essentiellement liée à la robotisation de l'observation océanique. Mon projet de recherche visera à exploiter scientifiquement les observations issues des plates-formes autonomes de mesure, en particulier celles qui permettent une observation simultanée des compartiments physiques, chimiques et biologiques.

Satellites, plates-formes autonomes, modèles, campagnes océanographiques : plusieurs outils, un seul objectif

Comme lorsque le premier capteur satellitaire de la couleur de l'océan, le CZCS, a commencé à envoyer ses premières images, l'arrivée des plates-formes autonomes de mesure pour la biogéochimie, comme les gliders ou les flotteurs profileurs, est en train de marquer une étape historique dans l'observation des océans. Cependant, comme pour toute révolution, un changement de paradigme est nécessaire pour vraiment tirer profit de ces nouvelles observations. C'est l'ensemble des outils d'observation qui permettra le véritable saut quantique dans notre compréhension des écosystèmes océaniques. Bien, sûr, en ce moment, les plates-formes autonomes vont fortement améliorer notre capacité d'observation. Mais c'est l'utilisation synergique et intégrée de TOUS les outils à disposition, y compris ceux numériques, qui fera la différence dans les prochaines années. Dans ce contexte, je me retrouve, sans l'avoir véritablement programmé, dans une position privilégiée. Mon parcours de recherche m'a permis de m'intéresser à la plupart de ces techniques observationnelles (et de me les approprier), notamment celles liées aux flotteurs profileurs (encadré 10). Et, pour la même raison, j'ai entamé de fortes relations avec la communauté des modélisateurs, français ou pas.

Dans la prochaine section, mon plan de recherche sera, enfin, décliné.

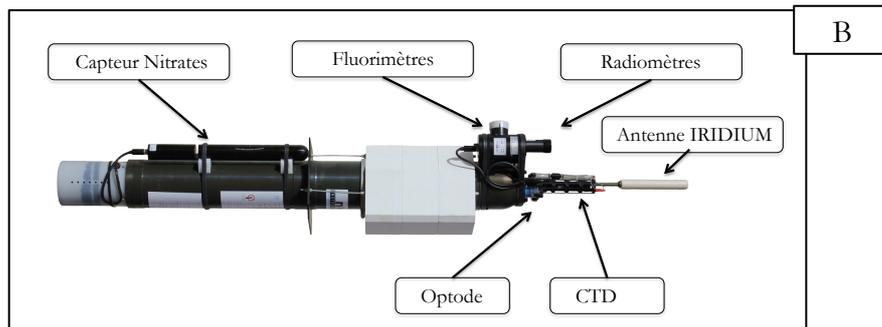
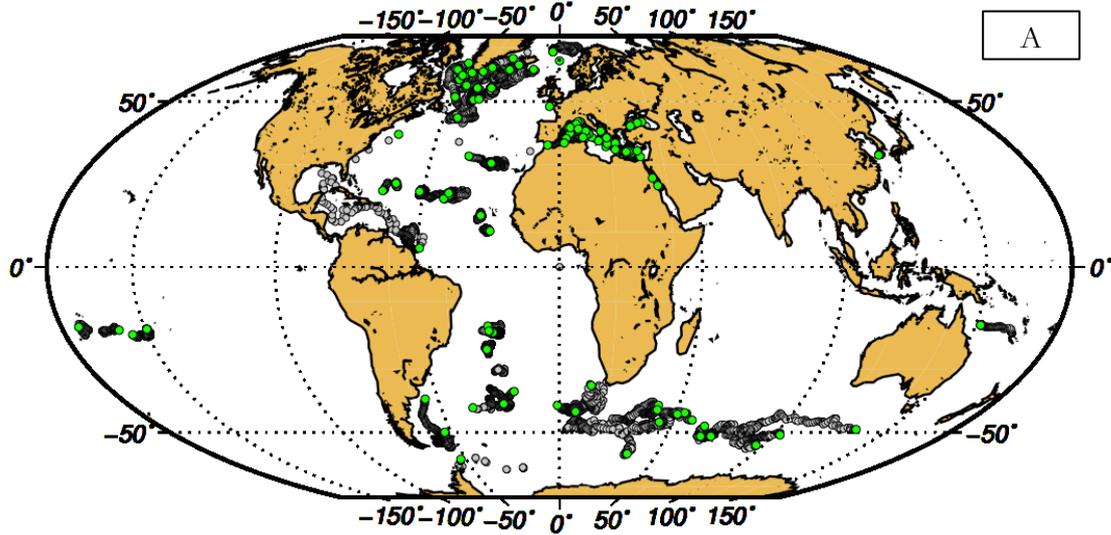
Encadré 10. Historique des flotteurs profileurs biogéochimiques au LOV

Un flotteur profileur BioArgo est le correspondant biogéochimique d'un flotteur profileur du réseau Argo (Roemmich *et al.*, 2009). Ce réseau, composé maintenant de plus de 4000 instruments actifs, est dédié à l'observation des caractéristiques physiques de l'océan, et il ne concerne donc que l'échantillonnage de la température et de la salinité, sur une couche 0-2000m et avec une fréquence d'échantillonnage fixe de 5 ou 10 jours. Une fois déployé, un flotteur Argo effectue toutes ses opérations d'une façon automatique : échantillonnage, navigation, transmission des données à terre. Le trajet de l'engin n'est pas piloté, mais il subit les vitesses océaniques présentes à sa profondeur de parking. Le déplacement vertical, au contraire, est induit par un changement de flottabilité du flotteur au moment de l'échantillonnage, moment déclenché par les logiciels embarqués. Le traitement de la donnée est aussi fortement automatisé : les données brutes subissent un premier contrôle automatique (vérification de leur qualité dans le 24h à partir de leur acquisition) et, toujours dans ce même délai, elles deviennent disponibles dans les deux centres de données dédiés qui rassemblent les observations du réseau planétaire (un de ces centres est localisé en France, le centre Coriolis). Un deuxième traitement, plus différé, implique, enfin, l'intervention humaine.

L'histoire veut que ce fût Marlon Lewis (un océanographe nord-américain hors norme) qui suggéré à Hervé Claustre, pendant la campagne Biosope, en 2004, d'installer des capteurs biogéochimiques sur un flotteur profileur. Illuminé par cette suggestion, H. Claustre a ensuite mis toute son énergie et ses capacités intellectuelles pour réaliser cette idée. Une ANR blanche (projet PABO, 2007-2009, PI H. Claustre) et des financements CNES (projet PROGLO-TOSCA, 2009-2010, PI H. Claustre) permirent donc de réaliser les premiers 8 prototypes de flotteurs profileurs biogéochimiques (équipés à l'époque seulement de fluorimètres chlorophylle-a et CDOM et des capteurs d'irradiance). C'est à cette époque que mes recherches me portèrent naturellement à m'intéresser de cette nouvelle technologie. Je participai ainsi au projet que H. Claustre obtint quelques années plus tard (ERC, remOcean, 2009-2013), censé développer la deuxième génération des flotteurs profileurs biogéochimiques (qu'on commence à appeler BioArgo), dotés de sondes additionnelles pour l'oxygène, les nitrates et le coefficient de rétrodiffusion). Je participai de mon côté avec un projet GMMC-région PACA (pour le développement technologique lié aux capteurs nitrates, voir encadré 7) et aux premières tentatives d'organiser des systèmes de contrôle qualité pour les BioArgo (D'Ortenzio *et al.*, 2010). Cette deuxième activité a pris de plus en plus d'importance, et m'amène aujourd'hui à devenir membre du comité de pilotage Coriolis pour les aspects liées aux données biogéochimiques et co-coordonateur du SO Argo-France (avec V. Thierry d'abord et G. Maze ensuite, les deux du LPO, Brest). L'obtention du programme NAOS, en 2009 (voir paragraphe 2.1 de la section « Projet de Recherche »), m'a fait entrer dans une deuxième phase, plus dédiée à l'exploitation scientifique du réseau, mais aussi à l'exploration des nouvelles possibilités pour le développement de la troisième génération de BioArgo.

Actuellement, les BioArgo développés dans le cadre de l'ERC remOcean et utilisés dans NAOS (les PROVBIO-V2) ne sont plus des prototypes. Ils suivent les standards internationaux pour ce type de plate-forme (Claustre *et al.*, 2010b, Claustre *et al.*, 2010a) et à l'heure actuelle ils ont collectés plus de 15000 profils, avec environ une centaine d'engins déployés (voir panneau A qui montre les profils échantillonnés, points gris, et les déploiements, points verts). Un BioArgo du LOV (Leymarie *et al.*, 2013) est équipé de sondes capables de mesurer plusieurs paramètres physico-biogéochimiques sur la colonne d'eau (température, salinité, fluorescence chlorophylle et CDOM, rétrodiffusion, irradiance, PAR, oxygène dissous et concentration en nitrates, voir panneau B). Il a une durée de vie attendue d'au moins 3 ans et il communique avec la terre par un système différent de celui d'Argo, l'IRIDIUM, système qui permet de changer les paramètres de navigation et d'échantillonnage en cours de mission.

Le traitement des données BioArgo suit la même philosophie d'Argo, avec une centralisation dans le centre des données Coriolis et un accès libre et gratuit. Les protocoles de traitement ont été récemment définis au niveau international par l'ADMT (Argo Data Management Team), l'instance internationale qui s'occupe de cette activité (<http://www.argodatamgt.org/Documentation>). Une grosse partie des méthodes qui y sont décrits dérivent des idées développées au LOV (Xing *et al.*, 2011, Mignot *et al.*, 2014, Xing *et al.*, 2012, Lavigne *et al.*, 2012, Lavigne *et al.*, 2013) auxquelles j'ai contribué ces dernières années.



*“Non possiamo creare osservatori dicendo ai bambini:
”Osservate !”, ma dando loro il potere e i mezzi per tale
osservazione”⁵*

Maria Montessori, Metodi d'educazione

Projet de recherche

1 Introduction

Comme présenté dans la section précédente, mes intérêts scientifiques se concentrent autour de la caractérisation des structures spatio-temporelles de la biomasse phytoplanctonique, et des forçages abiotiques qui les déterminent (notamment la couche de mélange, la disponibilité en lumière et en sels nutritifs). Mon approche est principalement expérimentale, dans le sens que l'acquisition, la validation et l'analyse de la donnée restent centrales dans mon activité.

Dans ce contexte, mes objectifs scientifiques n'ont pas changé au cours des années et je compte les poursuivre dans le futur : la biogéographie et la phénologie du phytoplancton, leur caractérisation/explication en termes de forçages abiotiques, leur variabilité dans les grands cycles biogéochimiques.

En même temps, je suis convaincu que les plates-formes autonomes de mesure in situ vont jouer un rôle crucial dans l'océanographie des prochaines années. Pour cela, j'ambitionne de m'investir de plus en plus dans ces thématiques, notamment dans la réalisation et l'exploitation scientifique de cas d'études ou d'expériences pilotes. Ces expériences pilotes pourront, d'un part, démontrer les potentialités de ces nouveaux outils de recherche et, d'autre part, accroître notre compréhension de la dynamique du phytoplancton et de ses interactions avec le milieu.

2 Les projets NAOS et MERMEX

Une mention à part mérite le cadre programmatique dans lequel mon projet de recherche se déroulera dans les prochaines années, car les deux (mon projet de recherche et le cadre programmatique) sont intimement liés.

2.1 NAOS

Depuis 2009, j'ai la chance de co-coordonner le projet NAOS (« Novel Argo Ocean observing System »), un des premiers lauréats de l'action Investissement d'Avenir (EQUIPEX, Equipement d'Avenir), et un des deux qui sont entièrement dédiés à l'océanographie. Le projet NAOS vise à renforcer la contribution française au réseau global de flotteurs profileurs Argo, en incluant aussi la préparation du réseau Argo du futur et son extension à la biogéochimie. Dans NAOS, je coordonne spécifiquement les activités dédiées à la mise en place d'une expérience pilote visant à réaliser le premier réseau de flotteurs profileurs biogéochimiques à l'échelle d'un bassin océanique.

Un certain nombre de considérations, pour la plupart expliquées dans la première partie de ce document, ainsi que mes intérêts scientifiques principaux, ont fait que la Mer Méditerranée ait été considérée comme un très bon candidat pour développer ce réseau de flotteurs profileurs biogéochimiques. Dans le contexte de NAOS, donc, 15 flotteurs profileurs BioArgo ont été déjà déployés en Mer Méditerranée en 2013 et 13 encore en 2015 (avec la campagne BioArgoMed

⁵ « Nous ne pouvons pas créer des observateurs en disant aux enfants: «Observez!», mais en leur donnant le pouvoir et les moyens d'observer».

dans laquelle j'étais chef de mission, voir encadré 11). En parallèle, la communauté nationale participe à cet effort, notamment dans le cadre du système d'observation MOOSE, qui a déjà déployé 1 flotteur BioArgo en Méditerranée Nord-Occidentale et 2 dans le cadre d'un projet GMMC (DEWEXTEND, PI P. Conan). NAOS a aussi permis d'initier des collaborations internationales qui ont mené à des déploiements BioArgo méditerranéens de la part d'équipes italiennes et bulgares. A l'heure actuelle (avril 2016), 39 flotteurs ont été déployés en Méditerranée, dont 19 encore actifs, ce qui fait de la Méditerranée la zone océanique où on trouve la densité de BioArgo la plus élevée au monde. A cela il faut ajouter que, dans le contexte Argo T/S, le bassin méditerranéen profite d'une coordination spécifique grâce aux efforts d'une communauté dédiée, structurée autour du programme MedArgo (Poulain *et al.*, 2007). MedArgo, piloté par l'OGS (Trieste, Italie), mais avec une participation importante des pays riverains, commence à s'impliquer fortement dans l'activité BioArgo à la fois dans le maintien du réseau (8 flotteurs BioArgo ont été déployés par Argo-Italie) et dans son exploitation scientifique.

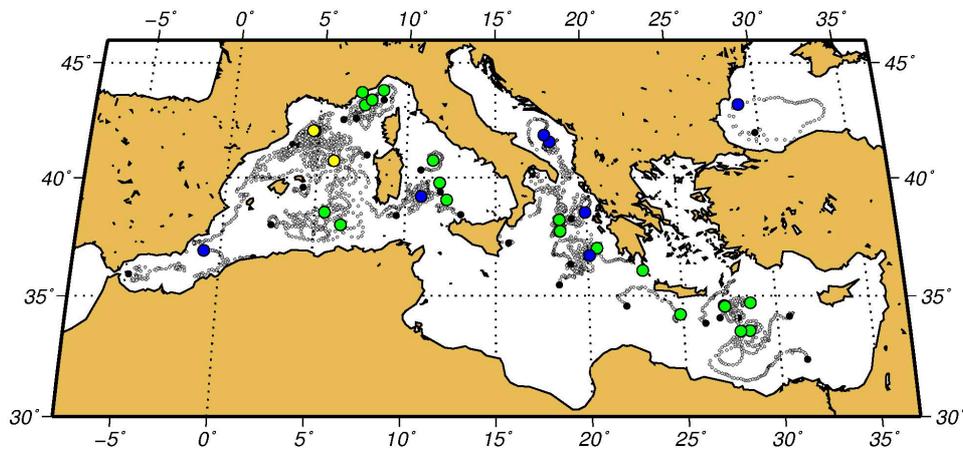


Figure 3. Distribution des profils PROVBIOS BioArgo en Méditerranée (points gris). Les déploiements sont indiqués en vert (flotteurs NAOS), en bleu (Argo-Italie) et en jaune (GMMC). Les points noir indiquent le dernier profil de chaque flotteur (avril 2016).

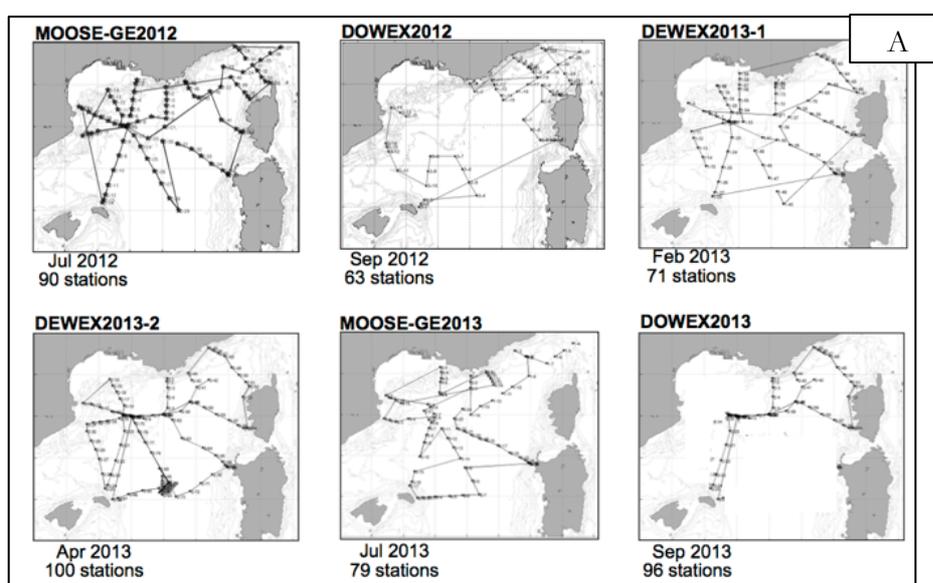
2.2 Le Chantier méditerranéen et son volet biogéochimique MERMEX

L'action MERMEX (« Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment »), PIs C. Guieu, X. de Madron, R. Sempéré) représente le volet biogéochimique océanique du Chantier Méditerranéen proposé par l'INSU en 2009 et structuré dans le programme MISTRALS. Dans cette action, j'ai coordonné (avec P. Testor, C. Estournel et P. Conan) le WP 1 « Impact des changements hydrodynamiques sur les écosystèmes méditerranéens », qui a eu ses objectifs (ainsi que l'ensemble de la structure du projet) définis en 2010 dans un meeting à Cadarache (avec la participation de plus d'une centaine des chercheurs). Les réflexions de Cadarache ont été publiées dans un papier (de Madron *et al.*, 2011), où j'ai piloté la rédaction de la section 2 (« Influence of Hydrodynamics ») et où j'ai aussi contribué à la section 10 (« The future of the Mediterranean Sea: A need for international multi-disciplinary research coupling experiments, long-term observations, ecoregionalisation and modeling »), dans laquelle une nouvelle stratégie d'observation de la Méditerranée a été proposée. A l'époque, une grande part de ce qui a été proposé n'était que dans une phase embryonnaire. Cinq ans plus tard, un premier, et important accomplissement de cette stratégie a été réalisé, notamment avec les actions DEWEX/DOWEX réalisées en 2012/2013 et BioArgoMed en 2015 (voir encadré 11). Il s'agit, dans le premier cas, d'une extraordinaire action expérimentale d'une durée d'un an, qui a mobilisé une centaine de scientifiques, avec environ 100 jours de bateau réalisés, 500 stations, des dizaines des plates-formes autonomes déployées, plusieurs modèles biogéochimiques opérant à différentes échelles. Dans le deuxième cas, il s'agit d'une campagne d'un mois, réalisée avec un petit bateau (Téthys

II), qui a pourtant traversé la Méditerranée. Les deux actions, bien que très différentes, ont été toutefois réalisées dans le même esprit, c'est-à-dire dans l'idée de mener des expériences scientifiques ou les systèmes d'observation nouveaux (comme les gliders et les BioArgo) sont totalement intégrés aux méthodes d'observations classiques (comme les bateaux).

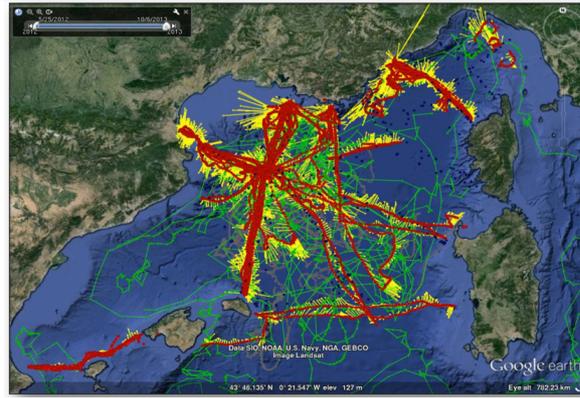
A la fin 2015, le Chantier Méditerranée est entré dans une nouvelle phase : un exercice de bilan a été présenté, et une prospective à 5 ans a aussi été entamée. Cela tombait au bon moment, car dans le cadre du programme H2020, un appel d'offre pour un projet d'observation long terme de la Méditerranée a été lancé. Il s'agit de capitaliser les différentes expériences sur les systèmes d'observation nationaux et de construire un système d'observation à l'échelle d'un bassin à disposition de l'ensemble de la communauté intéressée. Les scientifiques MERMEX ont contribué à répondre à cet appel d'offre et, en collaboration des partenaires européens, le projet MedOS (« Mediterranean Observing System », piloté par l'OGS, Italie) a été déposé. Même si à l'heure actuelle (avril 2016) les destins du Chantier Méditerranée et de la proposition MedOS ne sont pas encore connus, les discussions au sein de la communauté française et internationale ont permis de définir des priorités scientifiques pour les prochaines années. J'ai participé à l'ensemble de réflexions et je compte (et j'espère) inscrire mon activité dans ce contexte très prometteur.

Encadré 11. Les campagnes DOWEX/DEWEX/BioArgoMed



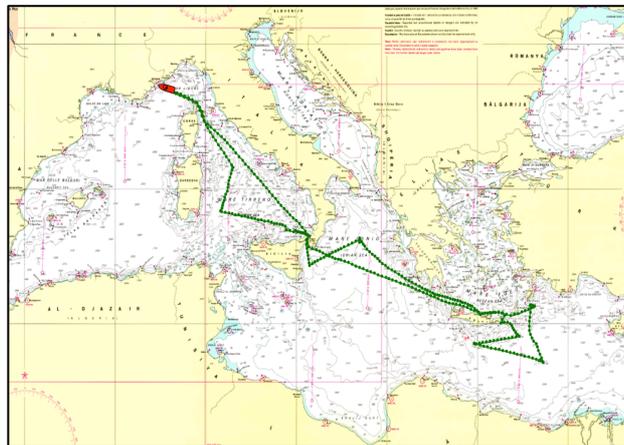
Dans le cadre de MERMEX, la série des campagnes DEWEX-DOWEX complétées par les campagnes MOOSE-GE 2012-2013, a consisté dans le suivi hydrologique et biogéochimique de la région nord-occidentale de la Méditerranée pendant un cycle annuel complet. Six campagnes ont été réalisées (Panneau A) à différents moments clés de la période 2012-2013, en suivant (approximativement, à cause des aléas de la météo) la même grille d'échantillonnage et avec les mêmes protocoles et paramètres observés. Au total, 499 stations CTD ont été réalisées, dont 212 avec, en outre, échantillonnage de paramètres biogéochimiques primaires (i.e. sels nutritifs, pigments, chlorophylle, oxygène). Le dispositif expérimental a été complété par l'utilisation massive des plates-formes autonomes (gliders et flotteurs profileurs), notamment pendant les périodes de transition automne/hiver et hiver/printemps (Panneau B, qui montre la position des profils issues des flotteurs profileurs en vert et des gliders en rouge. En jaune, les vitesses de surface évaluées à partir des gliders sont aussi indiquées). 30 campagnes gliders ont donc été réalisées et 8 flotteurs profileurs biogéochimiques (dont 3 du projet NAOS) ont été déployés sur la zone, avec acquisition d'environ 10000 profils (dont 1/3 environ biogéochimiques).

B



Je me suis fortement investi dans cette action expérimentale: à part les jours d'embarquement et la participation aux opérations de terrain (y compris la préparation et le déploiement des flotteurs), j'ai fortement contribué à la définition du plan d'échantillonnage des campagnes ainsi qu'au suivi satellitaire de l'opération. Récemment, un numéro spécial sur l'expérience a été approuvé par le journal JGR-Oceans et, grâce à mon engagement, j'ai été proposé comme éditeur-adjoint.

C



Toujours dans le cadre de MERMEX, mais avec des objectifs plus opérationnels, j'ai été chef de mission de la campagne BioArgoMed, en mai 2015. En fait, hormis les BioArgo déployés pendant l'action DEWEX/DOWEX, la première vague des engins NAOS a été déployée en Méditerranée lors de plusieurs campagnes d'opportunité. La mise en place du réseau s'est donc échelonnée sur une année entière, supportée par une importante logistique de préparation et par un coût financier et humain non négligeable. De surcroît, les données biogéochimiques de référence, utiles au protocole QC et acquises lors des stations de mise à l'eau de flotteurs, ont souvent été incomplètes, mesurées avec des méthodes différentes, ou encore obtenues suivant des protocoles d'échantillonnage variés. La campagne océanographique BioArgoMed (à bord du N/O de l'INSU Téthys II) avait donc pour objectif de déployer la seconde vague des flotteurs BioArgo NAOS dans des conditions méthodologiques plus homogènes. Pendant la campagne (qui a traversé la Méditerranée de Nice à l'île de Rhodes, voir le parcours du bateau sur le Panneau C), 12 flotteurs BioArgo ont été déployés et 4 ont été récupérés, 3 flotteurs Argo T/S ont également été déployés et 8 stations CTD qui serviront à l'étalonnage des capteurs ont été effectuées. La campagne, qui a été la première opération spécifiquement dédiée à la mise en place d'un réseau des BioArgo à l'échelle d'un bassin océanique, a aussi contribué à la progressive extension vers l'Est du bassin du programme MERMEX (comme préconisé dans l'article fondateur du programme, [deMadron et al, 2011](#) et comme proposé pour la seconde phase du Chantier, voir plus loin).

3 Un nouveau paradigme pour l'observation des interactions physico-chimico-biologiques dans l'océan ouvert.

A l'heure à laquelle j'écris ce mémoire (avril 2016), les projets NAOS et MERMEX-DEWEX sont sortis de la phase la plus intense, celle des opérations de terrain, des tests technologiques, des déploiements. On est donc à mi-chemin et la partie la plus excitante (celle de l'analyse des données) vient à peine de commencer. Pour ma part, les questions scientifiques que j'aborderai en utilisant cette masse inégalée d'observations seront déclinées dans les prochaines pages. Avant cela, j'estime que c'est le moment de préciser mes considérations sur ces activités, dans le cadre desquelles, personnellement, je considère avoir défini un nouveau paradigme pour observer les interactions physico-chimico-biologiques dans l'océan ouvert.

Dans leur livre de référence sur l'océanographie expérimentale, Pickard and Emery (1990) s'amuse à comparer le travail d'un océanographe à celui d'un investigateur qui, pour élucider un crime, doit s'appuyer sur un certain nombre d'évidences, souvent partielles ou incomplètes. Le travail d'un enquêteur consiste en effet à reconstruire, à partir de ce cadre incomplet, une histoire crédible et logique, qui puisse ensuite conduire à la vérité. Egalement, l'océanographe doit questionner la « vérité » océanique à partir d'informations approximatives et imparfaites et, dès lors, en déterminer des principes les plus universels possibles. Sur le fond, donc, le travail d'un océanographe n'a pas changé. C'est la phase de reconstruction et de « collecte d'évidences » qui est en train d'être bouleversée.

En fait, les plates-formes autonomes nous donnent la possibilité d'observer simultanément l'hydrologie et la biogéochimie marine à des échelles qui vont de l'évènement à l'interannuelle. Les trous spatio-temporels dans les observations, qui ont toujours compliqué la vie de l'océanographe, vont, par conséquent, énormément diminuer. Même si cela peut sembler contradictoire, les campagnes par bateau vont avoir une place encore plus centrale dans l'océanographie future. Libérés, grâce à l'utilisation des plates-formes autonomes, de contraintes liées à l'action de monitoring et de caractérisation du milieu, les bateaux pourront se concentrer sur l'échantillonnage des paramètres plus compliqués, sur des études de processus ou sur le suivi en temps réel de signaux identifiés par les plates-formes autonomes. Par ailleurs, l'utilisation des bateaux pourrait devenir encore plus efficace, car ces systèmes d'observation autonomes indiqueront, d'une façon beaucoup plus précise et en temps réel, quand et où programmer et réaliser les campagnes. Les modèles auront aussi un rôle clé dans ce contexte. Leur application ne se doit pas se limiter à la réalisation d'analyse des comparaisons avec les observations pour en améliorer les performances ou l'assimilation (activités certainement d'intérêt mais déjà envisageables). Les modèles feront partie de l'action expérimentale dès le départ, notamment pour déterminer, sur la base de simulations, la pertinence du dispositif expérimental envisagé. Agissant comme « interpolateurs » intelligents, adaptés aux différents outils d'observation et constamment nourris de données, ils pourront ajouter énormément d'éléments pour combler les trous observationnels et gagner en réalisme et prédictibilité.

Reconstruire la dynamique physico-chimico-biologique des océans en 4D (« tomographier les océans », Legendre, <http://www.institut-ocean.org/images/articles/documents/1330096401.pdf>) est maintenant à notre portée. Certaines aspects, comme le contrôle qualité de données ou leur interopérabilité, restent encore à résoudre (voir plus loin), mais je suis intimement persuadé que ce nouveau paradigme changera notre vision de l'océan, notamment sur la biogéochimie marine.

Pour toutes ces raisons, mes efforts scientifiques des prochaines années seront dédiés principalement (mais pas exclusivement) à l'exploitation scientifique des données obtenues dans le cadre des projets NAOS et MERMEX, en poursuivant mes objectifs de recherche comme je les ai exposés précédemment et comme je le déclinerai par la suite.

4 La dynamique phytoplanctonique en Méditerranée et ses forçages: anciennes questions, nouveaux outils

Le bassin méditerranéen serait donc l'objet d'étude principal de mon projet de recherche (mais voir chapitre final), à la fois pour la possibilité unique d'exploiter les données MERMEX et le réseau NAOS, mais aussi parce que dans ce bassin les thématiques de recherche et les questions ouvertes sont encore de forte actualité.

Comme anticipé plus haut, on sait que la Méditerranée est caractérisée par un gradient en biomasse Nord-Ouest/Sud-Est assez marqué. Cependant, davantage qu'un gradient, on observe des régions à variabilité/phénologie différentes, avec une distribution spatiale plus asymétrique qu'un simple gradient. Cette distribution spatio-temporelle complexe a été synthétisée par les biorégions phénologiques de D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009). Comprendre pourquoi ces biorégions existent, et pourquoi elles ont les caractéristiques qu'on y observe, permettrait de fortement avancer sur la compréhension du fonctionnement général du bassin. A noter, toutefois, que les biorégions ont été établies avec un certain nombre d'hypothèses et de limitations. Un premier axe de recherche de mon projet est donc d'utiliser les nouveaux jeux des données in situ pour confirmer (ou pas) les caractéristiques des biorégions telles qu'observées par satellite (axe « Biorégions »).

Si les grandes structures biorégionales de la Méditerranée et les cycles phénologiques associés pourront ainsi être expliqués, l'impact de la mésoéchelle, ainsi que celui des événements épisodiques temporels, pourra enfin être pris en compte. Cette modulation de la petite sur la grande échelle est probablement très importante pour la biogéochimie méditerranéenne, à cause des dimensions réduites du bassin. Il s'agira donc d'exploiter les outils observationnels anciens (i.e. satellite et campagnes) et nouveaux (i.e. flotteur profileurs et gliders) pour commencer une analyse plus fine des processus en jeu. L'aspect novateur de cette démarche réside dans le fait qu'on pourra disposer de jeux des données couvrant une vaste gamme des conditions hydrodynamiques et biogéochimiques, ce qui était impossible jusque-là. Avec les plates-formes robotisées (et avec une modélisation adaptée) je compte établir des statistiques plus robustes (dans le sens où on pourrait les établir sur une gamme de situations très larges et variées) sur l'impact de la petite échelle spatio-temporelle sur les grandes structures biorégionales (axe « perturbations »).

Dans les prochains paragraphes ces deux axes seront détaillés.

4.1 Axe « Biorégions »

Structure verticale

Certainement la plus importante limitation des biorégions satellitaires est que les données utilisées ne concernent que la surface. Or, l'observation récurrente dans le bassin des pics de concentration de chlorophylle en sub-surface (Lavigne *et al.*, 2015, Crispi *et al.*, 1999), dans les zones oligotrophes et en été, laisse planer un doute sur la pertinence des biorégions comme indicateurs des zones biogéochimiquement homogènes. La question sur la relation entre chlorophylle de surface et distribution verticale a été souvent abordée (Morel and Berthon, 1989, Uitz *et al.*, 2006, Sathyendranath *et al.*, 1995), mais les méthodes existantes ne sont pas transposables facilement, car leur application, finalisée au calcul de la production primaire, n'informe que sur le stock total de biomasse plutôt que sur sa distribution verticale. En outre, elles ont été aussi développées dans un cadre statistique très large (i.e. tout l'océan global) et leur application à plus petite échelle n'est certainement pas pertinente. Avec l'outil BioArgo, toutefois, l'analyse de la relation entre la chlorophylle de surface (telle que vue par satellite), la chlorophylle intégrée sur la verticale (telle que dérivable par les profils in situ) et, plus généralement, la forme du profil vertical de biomasse, devient généralisable à l'échelle de vastes zones océaniques. Plus

important, on pourra l'analyser sur des périodes temporelles longues, qui intègrent l'échelle saisonnière, souvent très mal échantillonnée (i.e. l'hiver). Regroupés par biorégions (voir plus loin « interannualité »), les observations des flotteurs BioArgo permettront donc d'étendre aux couches profondes l'analyse phénologique qui est à la base de biorégions satellitaires de D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009). L'établissement des pics profonds de biomasse, bien connu en Méditerranée, pourra être analysé en détail, pour en dériver les processus mécanistiques sous-jacents à leur formation. Par ailleurs, l'outil BioArgo a déjà montré son efficacité dans ce type de recherche (Mignot *et al.*, 2014, Boss and Behrenfeld, 2010), bien qu'encore au niveau de étude pilote (i.e. dans l'article de Mignot *et al.* 2014, seules les données de 4 flotteurs ont été analysées voir encadré 8).

Variabilité interannuelle

Un autre point délicat de la répartition biorégionale par satellite de D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009) concerne sa dérivation à partir d'une climatologie. Or, la variabilité interannuelle est certainement importante dans la modulation du cycle phénologique du phytoplancton, qui, *in fine*, détermine les biorégions. Il s'agira donc de modifier l'approche de D'Ortenzio et Ribera d'Alcalà (2009) pour la généraliser et, donc, générer des répartitions biorégionales à chaque année d'observation disponible (si on ne compte que la séries des capteurs de la couler de l'océan SeaWiFS-MERIS-MODIS, on va de fin 1997 à aujourd'hui, i.e. 18 années des données). Techniquement plusieurs problèmes seront à prendre en compte (i.e. normalisation, manque des données, définition du nombre des clusters etc.) mais, une fois qu'ils seront résolus, trois études spécifiques pourront être entamées :

1. les anomalies par rapport à la climatologie (en termes de forme du cycle phénologique, des surfaces des biorégions ou d'apparition de nouveaux cycles/biorégions non détectés à l'échelle climatologique) de biorégions interannuelles et des cycles phénologiques associés fourniront des indicateurs, synthétiques et statistiquement robustes, de la dynamique algale en Méditerranée. Ces indicateurs, établis sur des séries de presque 20 ans, pourront être mis en relation avec des index climatiques ou des proxies environnementaux pour déterminer des premières corrélations.
2. La répartition pluri-annuelle des biorégions permettra de vérifier si les cycles climatologiques (i.e. de D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà, 2009) de la variabilité saisonnière représentent véritablement des structures de la dynamique algale ou si ils ne sont que l'effet artificiel de l'opération de moyennage sur les données. C'est le cas, par exemple, du cycle « Intermittently » (voir encadré 4), interprété par D'Ortenzio et Ribera d'Alcalà (2009) comme un cycle/biorégion qui pourrait alternativement (i.e. d'une année sur l'autre) prendre une dynamique oligotrophe ou productive, mais qui pourrait aussi représenter un cycle phénologique à part entière.
3. L'établissement de biorégions spécifiques à chaque année disponible permettra de mieux utiliser les données in situ, notamment celles des flotteurs profileurs. Face à l'énorme quantité de données que les flotteurs BioArgo vont générer, sans compter ceux provenant d'autres sources (gliders, campagnes, mouillage, voir encadré 11), les biorégions offrent un cadre pour regrouper les observations selon des critères pas exclusivement géographiques, mais davantage liés au questionnement scientifique. Tout cela à condition qu'on puisse associer à chaque observation in situ la biorégion la plus pertinente. Et pour cela, l'analyse des observations ne peut se faire qu'en associant aux profils in situ des biorégions adaptées à la variabilité interannuelle.

L'aspect interannuel des biorégions est un point central de la thèse de N. Mayot (que j'encadre depuis 2014). Une publication sur la méthode de re-calcul des bioregions dans un cadre interannuel a été publiée récemment (avril 2016).

Nutriments vs lumière

Les séries temporelles qu'on pourra reconstruire, à l'intérieur des biorégions et à partir des données de flotteurs profileurs (voir les deux précédents paragraphes), vont permettre d'aborder la question centrale de mon projet de recherche, soit l'influence relative des 2 forçages abiotiques principaux dans la structuration spatio-temporelle du phytoplancton.

Par rapport aux données existantes, ces séries temporelles vont permettre de s'affranchir de la plupart (mais pas de la totalité) des verrous scientifiques qui ont empêché, jusqu'au présent, d'obtenir de réponses consensuelles. Dans l'hypothèse d'homogénéité des biorégions, les séries temporelles que le réseau de flotteurs peut générer concernent les mesures concomitantes et sur la verticale (de la surface jusqu'à 1000m) de la concentration de nitrates, de PAR et de la chlorophylle par fluorescence. Et cela, avec des mesures de température et salinité pour déterminer la profondeur de la couche de mélange. En d'autres termes, tous les forçages abiotiques déterminants pour la dynamique phytoplanctonique en mode bottom-up seront observés simultanément.

Le débat actuellement en cours sur la théorie du bloom (Behrenfeld and Boss, 2014) pourra donc être réactualisé sur la base des données *in situ*, et pas seulement sur la base des proxies dérivés quasi-exclusivement des observations satellitaires (Sallée *et al.*, 2015b). Sur deux points spécifiques je concentrerai mon attention :

1. Dans le débat sur le « bloom onset », la biomasse phytoplanctonique (utilisée pour calculer les dates clés de la phénologie phytoplanctonique) est évaluée à partir de plusieurs méthodes/données/approches : par satellite, avec comme proxies la chlorophylle de surface (Siegel *et al.*, 2002), le carbone (Behrenfeld *et al.*, 2005), ou la chlorophylle intégrée (Behrenfeld, 2010) ; ou *in situ*, par méthodes radiométriques (Xing *et al.*, 2011) ou avec des proxies basés sur la rétrodiffusion (Loisel *et al.*, 2001), sur la transmittance (Behrenfeld and Boss, 2003) ou sur la fluorescence calibrée (Lavigne *et al.*, 2012). Sans entrer dans le débat méthodologique, on est intéressé ici au fait que les métriques pour discuter des théories sur le « bloom onset » dépendent du proxy utilisé pour évaluer la biomasse phytoplanctonique, ce qui provoque une discordance, souvent assez évidente, sur la définition des dates clés de la phénologie phytoplanctonique. La charge instrumentale d'un flotteur BioArgo permet d'évaluer tous les proxies listés ci-dessous. Je compte poursuivre ce type de recherches (qui, de facto, ont déjà commencé ; Lavigne *et al.*, 2012, Xing *et al.*, 2011), notamment en essayant de comparer le maximum de conditions océaniques possibles, conditions auxquelles je devrais pouvoir avoir accès grâce à l'ensemble des flotteurs BioArgo méditerranéens.
2. Bien que centrale dans la dynamique algale, la disponibilité en sels nutritifs a été souvent négligée dans les théories existantes, à cause de la difficulté intrinsèque de la mesurer aux résolutions spatio-temporelles pertinentes. Pour cela, le débat a été souvent concentré sur la lumière (Sverdrup, 1953, Siegel *et al.*, 2002, Chiswell, 2011) ou sur la dynamique de la couche de mélange, à la fois comme modulateur des taux de croissance et perte du phytoplancton (Behrenfeld, 2010), comme indicateur de la stabilité de la colonne d'eau (Taylor and Ferrari, 2011) ou comme proxy pour la disponibilité des sels nutritifs (Williams and Follows, 2003). Les flotteurs équipés de sondes de nitrates pourront donc établir si les théories précédentes s'appliquent ou pas, et, aussi, vérifier si les conditions de leur applicabilité sont réunies par rapport aux concentrations et à la disponibilité des nitrates directement mesurés. Les variations de concentration en nitrates calculées, par exemple, comme le delta des concentrations entre un profil et un autre, pourront informer sur l'efficacité des injections de sels nutritifs (i.e. dans le cas d'approfondissement de la couche de mélange) ou sur leur appauvrissement (i.e. suite à la consommation phytoplanctonique, dans le cas d'une

couche de mélange uniforme). Mises en relation avec les diminutions/augmentations de stock de biomasse observées, ces variations dynamiques de nitrates fourniront un cadre pour vérifier la pertinence des théories sur le « bloom onset » du point de vue de la disponibilité en sels nutritifs. A nouveau, cette activité a déjà démarré, notamment dans le cadre des deux thèses que j'ai co-encadré (H. Lavigne et O. Pasqueron de Fommervault), et qui ont donné lieu à des premières publications (D'Ortenzio *et al.*, 2014, Lavigne *et al.*, 2013, de Fommervault *et al.*, 2015b). Les résultats obtenus restent, toutefois, encore très préliminaires, car dérivés d'un réseau de flotteurs BioArgo encore très limité en termes de nombre d'engins et de zones échantillonnées.

4.2 Axe « Perturbations »

La plupart des analyses décrites dans les précédents paragraphes sont implicitement soumise à la condition que la dynamique physique observée soit unidimensionnelle, c'est-à-dire qu'une série temporelle observée résulte des processus qui ont lieu dans une colonne d'eau « insensible » aux forçages latéraux. Dans le calcul des biorégions, par exemple, les séries phénologiques, dérivées pixel par pixel des images satellitaires, sont considérées indépendantes les unes des autres. Egalement, le calcul des métriques pour calculer la date du départ du bloom à partir d'une série temporelle de chlorophylle intégrée (Lavigne *et al.*, 2013) ne tient compte que de la dynamique de cette série, sans considérer son environnement proche. On parle ici, donc, d'une approche plutôt eulérienne, qui permet, par exemple, de dériver les caractéristiques les plus importantes d'une série, comme le cycle saisonnier ou la variabilité interannuelle. Or, cette approche montre ses limites quand des anomalies sont observées dans les séries, comme des pics inattendus ou des changements rapides de tendance. La cause de ces anomalies peut être liée à la fois à des variations rapides des forçages unidimensionnels de la colonne d'eau, à l'existence d'une structure océanique dynamique qui altère les caractéristiques de la colonne d'eau observée ou de la coexistence simultanée de ces deux processus. Dans le premier cas, l'approche eulérienne reste possible, à conditions de caractériser la haute fréquence des forçages et de la relier avec les perturbations observées dans les séries temporelles. Dans le deuxième cas, la prise en compte de la dynamique 3D s'avère nécessaire et une approche lagrangienne est certainement plus adaptée.

J'essaierai de considérer ces deux approches dans mon deuxième axe de recherche, qui vise à identifier, et possiblement expliquer, les perturbations observées dans les cycles phénologiques de la chlorophylle méditerranéenne.

Haute fréquence

Comme déjà souvent postulé par le passé (Smayda, 1998, Fauchereau *et al.*, 2011), les perturbations à haute fréquence (i.e. journalière, horaire) du forçage physique peuvent provoquer l'occurrence transitoire de conditions favorables/défavorables pour la croissance phytoplanctonique. La réponse du phytoplancton à ces conditions est généralement rapide, ce qui provoque des anomalies par rapport au cycle phénologique moyen (déterminé en première approximation par la succession des saisons). L'effet totale (i.e. intégré, par exemple, sur un cycle annuel ou sur l'ensemble d'un bassin océanique) de ces anomalies peut modifier les bilans biogéochimiques d'une région océanique à grande échelle (Karl *et al.*, 2003). L'atmosphère est certainement la cause principale de ces perturbations haute fréquence du forçage : le passage d'une perturbation atmosphérique (i.e. Lomas *et al.*, 2009) ou d'un ouragan (i.e. Babin *et al.*, 2004), des épisodes de vents intenses (i.e. Resplandy *et al.*, 2009) ou la variabilité haute fréquence de la couverture nuageuse (i.e. Stramska and Dickey, 1992). En Méditerranée, la variabilité et la fréquence de la cyclogenèse des perturbations atmosphériques (Trigo *et al.*, 2002) ainsi que celles des épisodes de forts vents (Chronis *et al.*, 2011) sont particulièrement intenses, et quelques études (comme l'excellent Andersen and Prieur, 2000) ont montré leur impact sur la dynamique du phytoplancton. Les analyses existantes, toutefois, se sont généralement limitées à des périodes

courtes (souvent l'espace d'une campagne océanographique), et, si on exclue les approches numériques (i.e. [Levy et al., 2000](#), [Liccardo et al., 2013](#)), les effets de perturbations haute fréquence sur les cycles phénologiques phytoplanctoniques saisonniers restent assez méconnus. Dans cette partie de mon projet, je vise à systématiser l'analyse du forçage à haute fréquence sur la phénologie phytoplanctonique en Méditerranée. Les séries multiparamétriques (réalisées dans l'axe « Biorégions »), ainsi que les index phénologiques qu'on pourra en dériver (voir paragraphes précédents), seront associés aux observations ou aux estimations existantes des paramètres atmosphériques comme l'intensité du vent et la couverture nuageuse (disponibles, souvent à haute résolution temporelle, à partir des observations, satellitaires et in situ, ou des sorties de modèles atmosphériques, comme l'ECMWF). Cela devrait permettre de vérifier quel est le rôle joué par cette haute fréquence atmosphérique dans les épisodes anormaux des cycles phénologiques. La fréquence et l'intensité des perturbations haute fréquence pourra donc être reliée aux anomalies phénologiques observées, et cela sur des périodes de temps assez longues pour déterminer des structures interannuelles robustes.

La mésoéchelle et l'approche lagrangienne

L'autre perturbation du cycle phénologique du phytoplancton que je compte analyser dans mon projet de recherche est celle induite par les processus à méso- et à sub-mésoéchelle océanique. Une vaste bibliographie existe sur le sujet (i.e. [McGillicuddy et al., 2001](#), [Letelier et al., 2000](#), [Chelton et al., 2011](#), [Garçon et al., 2001](#), [Oschlies, 2002](#)) car les effets de la mésoéchelle semblent induire une modification substantielle de la dynamique phytoplanctonique. Comme annoncé plus haut, toutefois, le caractère aléatoire des structures à mésoéchelle a toujours posé un défi observationnel. La caractérisation de leur impact globale n'as pu se réaliser qu'à partir des satellites (i.e. [Uz and Yoder, 2004](#)) ou par modélisation (i.e. [Lévy, 2008](#)). Dans mon projet de recherche, je tenterai d'examiner la question du point de vue observationnel, en exploitant, encore, les séries temporelles dérivées des flotteurs BioArgo, mais, cette fois, avec un approche plus lagrangienne. J'aborderai la thématique sous trois angles d'attaque :

1. D'abord, j'essayerai d'identifier, sur la base des trajectoires réelles et simulées des flotteurs profileurs (voir plus loin), les zones où la dynamique moyenne est influencée par des structures à mésoéchelle. Pour cela, je m'appuierai sur les flotteurs BioArgo méditerranéens, mais aussi sur la totalité de la flotte Argo disponible dans le bassin (programme MedArgo, [Poulain et al., 2007](#)). Bien que les stratégies d'échantillonnage puissent être différentes (par exemple : 1000 m de profondeur de parking pour les flotteurs NAOS, 350m pour le flotteurs MedArgo), on peut raisonnablement supposer que les zones de forte densification ou de raréfaction des trajectoires sont uniques. Des trajectoires simulées seront aussi dérivées en couplant un modèle de dispersion d'un flotteur profileur ([Taillandier et al., 2006](#)) avec les courants dérivés par des modèles réalistes de la Méditerranée (par exemple, [Lebeaupin Brossier et al., 2012](#), mais aussi ceux des produits opérationnels MERCATOR). L'idée est de déterminer, pour chaque trajectoire, des métriques d'identification du régime hydrodynamique (i.e. 1D ou tourbillonnaire), calculant, par exemple, la distance entre le centre d'une structure dynamique et la position du profil. Dans le cas de trajectoires réelles, cela permettra d'associer à chaque point des séries multiparamétriques BioArgo une estimation du degré d'influence des structures à mésoéchelle proches, ce qui devrait permettre d'évaluer les perturbations que cette structure induit (ou pas) sur le cycle phénologique annuel. Dans le cas des trajectoires simulées, on exploitera la statistique des grands nombres (le nombre des trajectoires qu'on peut générer est pratiquement infini) pour dériver des tendances générales à l'échelle du bassin (par exemple des cartes de densité des trajectoires) qu'on pourra ensuite comparer avec les biorégions interannuelles dérivées par satellite pour identifier d'éventuelles correspondances. Des travaux que j'ai entamés dans le cadre d'un Master 2 (P. Rayet, co-encadrée avec Vincent Taillandier)

ont déjà permis de mettre en place le cadre technique pour développer cette méthodologie. J'essaierai donc d'expliquer quelle part de la dynamique biogéochimique observée par les flotteurs BioArgo est générée par des processus à mésoéchelle (par exemple, en calculant le rapport entre le flux de nitrates dans la couche de mélange tel quel calculé sur l'ensemble de la série, et celui calculé sans les profils considérés sous influence du régime tourbillonnaire).

2. Une fois que l'analyse lagrangienne des séries BioArgo sera accomplie, je tenterai d'en exporter les résultats à l'ensemble du bassin. Pour cela, les cartes de densité des trajectoires numériques, croisées avec les biorégions (comme expliqué dans le point précédent), seront analysées pour essayer de tirer des statistiques à une échelle spatiale plus large. L'utilisation de l'altimétrie fournira aussi une autre condition pour évaluer l'occurrence des processus à mésoéchelle (Isern-Fontanet *et al.*, 2006).
3. Dans la région (ou biorégion) océanique de la Méditerranée Nord-Occidentale, une étude plus détaillée sera aussi entamée. Ces recherches, qui se baseront sur les données récoltées pendant l'action expérimentale DOWEX/DEWEX (réalisée en 2012-2013, voir encadré 11) vont permettre d'inscrire les résultats des deux précédents points dans un contexte observationnel exceptionnel. Les données disponibles permettront ainsi de vérifier, corriger et améliorer les estimations de l'impact de la mésoéchelle sur la phénologie du grand bloom de la Méditerranée Nord-Occidentale. A cela s'ajouteront les résultats d'une modélisation biogéochimique adaptée et pilotée par les opérations de terrain (développée par F. Kessouri et C. Estournel au Centre d'Aérodologie de Toulouse). Cette partie de mon projet de recherche constitue aussi le noyau principal du projet de thèse de N. Mayot, que je co-encadre et qui devrait soutenir sa thèse fin 2016. L'analyse des observations de l'année 2012-2013, toutefois, se poursuivra probablement pour longtemps dans les années suivantes, étant donné l'exceptionnelle quantité des mesures collectées.
4. Toujours en Méditerranée Nord-Occidentale, une des actions proposées dans le contexte de l'évolution du programme MERMEX vise à analyser en détail, avec des actions de terrain dédiées, la frontière sud du grand gyre du Golfe du Lion (proposition CLOSCHMED, PI. B. Zakardjan, MIO). Cette frontière coïncide avec le front océanique des Baléares qui s'étend de Minorque jusqu'à la Corse, et qui représente la limite entre les eaux impactées par la dynamique caractéristique de la Méditerranée Nord-Occidentale au nord et celles plus influencées par l'entrée de l'eau atlantique au sud. L'existence du front, ainsi que son interaction avec les forçages atmosphériques, génèrent des instabilités dynamiques à mésoéchelle qui induisent des intrusions d'eaux des deux côtés du front. Sous forme de tourbillons ou de champignons d'une durée de quelques semaines, ces structures vont, d'un part, perturber la dynamique phytoplanctonique de la floraison algale dans la zone centrale, en introduisant des eaux dépourvues de matière inorganique et en formant des couches à faible densité qui empêchent le réapprovisionnement en sels nutritifs de la surface ; d'autre part, ces structures peuvent transporter des communautés phytoplanctoniques, issues de la zone centrale, vers la zone oligotrophe qui se localise au sud du front, provoquant ainsi une augmentation locale de la productivité de cette zone oligotrophe (voir un exemple de ces deux dynamiques dans la figure 4). Dans ce contexte, je compte participer à l'action CLOSCHMED, si elle a lieu, notamment en essayant de caractériser une ou plusieurs de ces structures à mésoéchelle avec des flotteurs BioArgo (à déployer à l'intérieur et à l'extérieur des structures et avec une stratégie d'échantillonnage adaptée à leur caractéristiques dynamiques) pour essayer de déterminer leur impact à la fois sur l'évolution de la floraison phytoplanctonique au nord et sur le régime oligotrophique au sud.

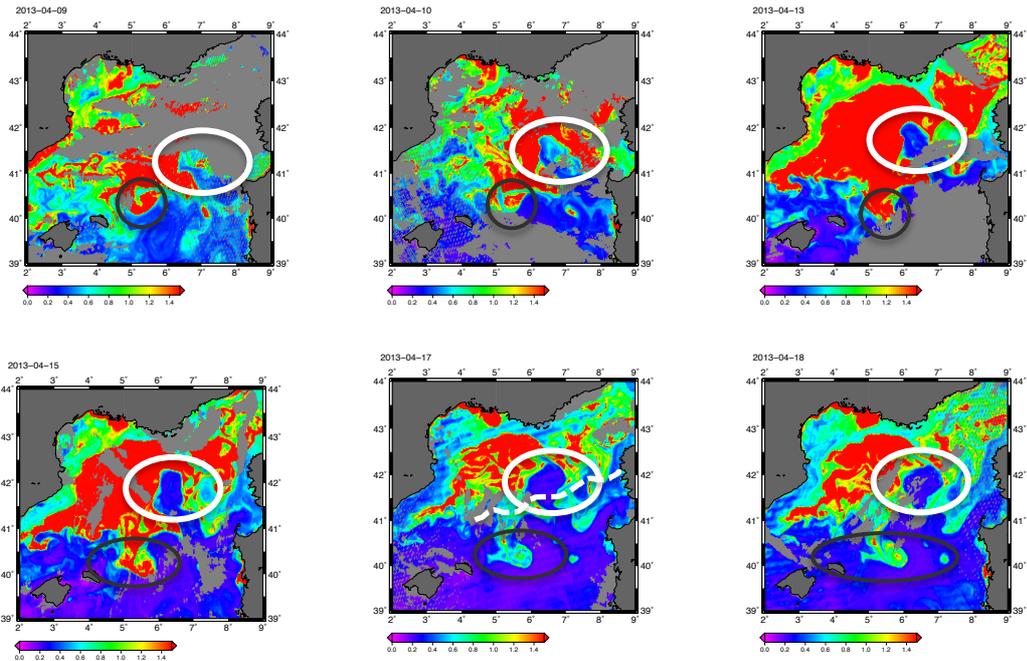


Figure 4. Série d'images satellitaires (capteur MODIS) de la concentration de chlorophylle de surface de la zone du Golfe du Lion. La gamme des couleurs représente des concentrations en chlorophylle qui vont de faible (bleu) à élevé (rouge). Les cercles blancs indiquent une intrusion dans la zone centrale (caractérisée par une intense floraison phytoplanctonique) d'une structure à faible contenu en chlorophylle, générée vraisemblablement par une instabilité du front des Baléares (indiquée par une ligne pointillée blanche). Les cercles noirs indiquent une structure à forte concentration de chlorophylle qui, au contraire, se détache de la zone centrale pour descendre vers le sud.

4.3 La Méditerranée Orientale

L'établissement de conditions favorables pour la croissance algale est certainement plus facile à étudier quand les processus en jeu sont particulièrement intenses et provoquent une réponse algale « explosive » comme la floraison phytoplanctonique. Cela arrive en général dans les régions tempérées et, pour la Méditerranée, dans les zones caractérisées par des régimes « Bloom » dans la classification de D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009). Dans les régions plus oligotrophes, au contraire, les conditions environnementales sont moins déterminantes, ou, mieux, leur effet sur le phytoplancton peut être plus difficile à déterminer.

C'est typiquement le cas du bassin oriental de la Méditerranée, qui est pour l'essentiel de son extension identifié comme « No Bloom » dans la classification de D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà (2009), en accord avec son régime trophique considéré ultra-oligotrophe dans la littérature. Toutefois, un certain nombre d'éléments laissent entendre que la dynamique du bassin peut être plus complexe que prévu. Les couches de mélange moyennes peuvent atteindre le 200-300 m en hiver (D'Ortenzio and Prieur, 2009), et sous certaines conditions favorables (i.e. structures à méso-échelle), la nutricline peut être localement atteinte, induisant des conditions favorable à la croissance algale (Pasqueron de Fommervault *et al.*, 2015b). Très récemment, le réseau NAOS a fourni la preuve de la possibilité d'avoir des floraisons phytoplanctoniques courtes et peu intenses (voir figure 5), qui, même si fugaces et peu productives, démontrent l'établissement de conditions favorables à la dynamique algale dans cette région ultra-oligotrophe.

L'étude du bassin Est offre l'occasion, en somme, de faire la synthèse des deux axes de recherche que j'ai cités plus haut. D'un part, cette étude permettra de mieux caractériser les biorégions orientales de la Méditerranée et de vérifier, dans ses régimes « No Bloom », la pertinence des théories existantes sur le démarrage du bloom et, plus généralement, sur les interactions lumière/nutriments (i.e. axe « Biorégions »). D'autre part, la nature éphémère des conditions favorables pour la croissance algale laisse pressentir que l'établissement de ces

conditions est plutôt une perturbation des conditions océaniques caractéristiques de la région. Ce qui donc rentre dans les thématiques du deuxième axe de recherche de mon projet (axe « Perturbations »).

Cette étude spécifique est un des objectifs, parmi d'autres, de la proposition PERLE (« Pelagic Ecosystem Response to dense water formation in the Levant Experiment, PIs P. Conan et moi-même) pour la deuxième phase du projet MERMEX, qui est censé se dérouler sur la période 2016-2019. Il s'agit d'une vaste opération de terrain, coordonnée avec les partenaires européens, pour établir un bilan biogéochimique du bassin levantin de la Méditerranée. Je n'en dirai pas plus, car, à l'heure actuelle (avril 2016), les évaluations ne sont pas connues. Toutefois, le réseau NAOS existant pourra déjà permettre de donner des éléments de réponse sur la dynamique biorégionale du bassin levantine, ce que je compte faire dans les prochaines années.

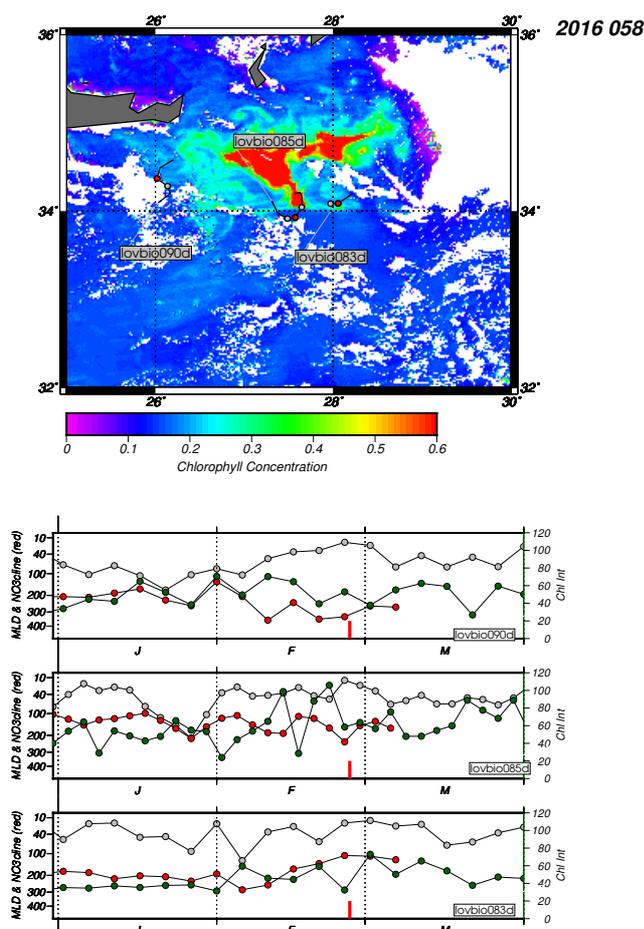


Figure 5. Panneau de haut: image satellitaire de concentrations de chlorophylle de surface pour la journée du 28 février 2016, sur la zone comprise entre la Crète et Rhodes. Les positions des trois flotteurs BioArgo NAOS lovbio083d, lovbio085d et lovbio090d à la date de l'image (points rouges) sont aussi indiquées. Panneau de bas: séries temporelles pour les premiers trois premiers mois de l'année 2016, obtenues par les flotteurs BioArgo : profondeur de la couche de mélange (points gris), de la nitracline (points rouges) et concentration en chlorophylle intégrée entre la surface et 300 m (points verts). La barre rouge indique la date de l'image représentée sur le panneau de haut. Le flotteur lovbio085d (figure de bas, panneau central) traverse la zone intéressée par la floraison phytoplanctonique en mi février et il observe une augmentation de la chlorophylle (qui double sa valeur intégrée, courbe verte). La croissance phytoplanctonique est favorisée par une injection locale de sels nutritifs dans la couche de mélange, que le flotteur observe au fin janvier (courbes de la profondeur de la couche de mélange et de la nitracline qui se croisent). À l'extérieur de la zone où la floraison est observée par satellite, la concentration en chlorophylle intégrée (échantillonnée par les autres flotteurs) reste faible, comme prévisible à cause de la distance relative entre profondeur de la couche de mélange et de la nitracline.

5 Conclusion

Je termine ici la description de mon projet de recherche, qui se focalise sur la Méditerranée et sur l'exploitation, à différents niveaux, du réseau des flotteurs profileurs BioArgo et des données des campagnes MERMEX. Arriver à expliquer les cycles phonologiques du bassin (Axe « Biorégions ») ainsi que toutes les perturbations des tels cycles provoquées par la haute fréquence du forçage physique (atmosphérique et dérivé des processus à mésoéchelle, Axe « Perturbations ») serait déjà un résultat très satisfaisant.

En même temps, il s'agit de l'accomplissement d'un travail de recherche qui a commencé déjà pendant ma thèse il y a 15 ans, et qui a nécessité, pour se réaliser, la mise en place d'un nouvel outil d'observation (les flotteurs BioArgo), le perfectionnement de l'analyse de l'observation satellitaire (les biorégions), ainsi que la prise en compte des toutes les techniques « classiques » d'observation et d'interprétation des données (i.e. modélisation lagrangienne, campagnes océanographiques, gliders). La plupart des méthodes pour l'exploitation des flotteurs BioArgo ont dû être inventées à partir de quasiment rien, et je suis énormément reconnaissant à l'environnement villefrancois qui a permis tout cela (H. Claustre, « inventeur » des Bio-Argo, A. Poteau « le super-heros des BioArgo », E. Leymarie « mon coéquipier dans NAOS », V. Taillandier « l'expert lagrangien », C. Migon « mon petit Béthoux » et, évidemment L. Prieur l'« homme de toutes les réponses » ; sans compter les étudiants et les post-docs que j'ai co-encadrés et qui ont fortement participé à tout cela : H. Lavigne, O. Pasqueron de Fommervault, N. Mayot, C. Fontana, R. Sauzade, A. Mignot, L. Lacour). C'est dans le contexte de cette équipe que les idées que j'ai décrites précédemment se sont formées.

Beaucoup reste encore à faire, évidemment (et heureusement !!), pour exploiter complètement les potentialités de tout cela. Toutefois, je suis convaincu que ce nouveau paradigme dans l'observation de la biogéochimie représente une véritable révolution de notre capacité à observer et comprendre les océans.

Dans mon projet de recherche pour le futur proche (5 ans), j'ai appliquerai ce paradigme à l'étude de la phénologie méditerranéenne, mais beaucoup d'autres thématiques et champs d'application sont en train de se développer au LOV et dans la communauté nationale. L'évolution de tout cela sera expliquée, dans la prochaine (et dernière) partie de ce document.

« Nous traçons ici un sillage qui donnera certainement une ligne de force aux générations futures »

Paul Nival, Communication Personnelle

Et après ??

1 Un réseau global de flotteurs profileurs biogéochimiques

A l'heure actuelle (avril 2015), environ une centaine de flotteurs biogéochimiques (i.e. ayant au moins un fluorimètre, et sans compter ceux équipés de capteur d'oxygène) sont opérationnels. Beaucoup sont issus de la communauté française, qui a été certainement pionnière, mais le contexte européen (organisé dans l'infrastructure européenne de l'ERIC Euro-Argo, à laquelle je participe) développe un réseau européen grâce à l'engagement de plusieurs pays (i.e. Italie, Royaume-Unis, Bulgarie, Espagne, Grèce). Le ferment autour de cette thématique ne cesse de s'accroître et l'objectif affiché maintenant est d'arriver à équiper 25% de la flotte Argo (c'est-à-dire au moins 750 flotteurs) de capteurs biogéochimiques. Rappelons ici que le réseau BioArgo est basé sur la philosophie Argo pour la mise à disposition libre et gratuite des observations. Un tel réseau global BioArgo permettra donc à tous les océanographes de disposer de données de qualité sur l'évolution biogéochimique de l'océan. L'expérience pilote en Méditerranée a déjà largement contribué à démontrer la faisabilité technologique et opérationnelle d'un réseau BioArgo. Le paradigme observationnel et les résultats scientifiques qui en dériveront (objectif principal de mon projet de recherche) fourniront aussi un premier socle pour en affirmer complètement les potentialités de recherche. Grâce à cela, j'ai donc la possibilité (et la chance) d'intervenir comme acteur dans cette dynamique de recherche extrêmement prometteuse, notamment en participant au groupe de recherche internationale BioArgo (pilote par H. Claustre et soutenue par Argo) qui s'est créé récemment et qui est devenu l'épicentre « officiel » pour la définition des contours du réseau BioArgo mondial. Dans ce groupe BioArgo, je compte m'investir sur trois thématiques principales :

1. La poursuite de la mise en place de systèmes de calibration, validation et contrôle de qualité des données. Il s'agit ici de continuer mon engagement qui date de longtemps (voir encadré 10). Le lieu où les choses se décident est l'Argo Data Management Team (ADMT), qui prévoit, depuis peu, un représentant BioArgo.
2. L'expérience méditerranéenne des BioArgo, ainsi que mon engagement dans les activités du LOV en Atlantique (voir plus loin) vont me permettre de contribuer au débat actuel sur la définition des caractéristiques du réseau global BioArgo. Certains aspects du nouveau paradigme observationnel décrit plus haut (comme l'approche par biorégions, ou l'approche lagrangienne) sont extrêmement informatifs pour obtenir des éléments capables de estimer les caractéristiques d'un futur réseau BioArgo : nombre des flotteurs, stratégies d'échantillonnage, zones de déploiement prioritaires. Certains de ces éléments ont été déjà traités (dans le cadre du projet européen OSS2015, et de l'activité du post-doc de C. Fontana que j'ai encadré, mais aussi pendant la campagne BioArgoMed ; voir encadré 11), mais je vise à continuer, notamment dans le contexte de l'ERIC Euro-Argo et en collaboration avec les partenaires européens et nord-américains.
3. La proposition H2020 MedOS, déposée en février 2016 et sans réponse à l'heure actuelle, donnera aussi la possibilité de continuer à construire les interactions entre le réseau BioArgo méditerranéen et les autres composantes du système d'observation qui sont prévues dans le projet. Dans cette proposition, je co-coordonne le WP5 (avec J. Ruiz, du CSIC, Espagne), qui est censé réfléchir aux évolutions des réseaux d'observation existants, notamment vers la biogéochimie et la biologie.

4. Bien que cela n'ait pas été trop abordé dans la description des mes travaux antérieurs et de mon projet de recherche, j'ai entamé depuis plusieurs années un dialogue étroit avec des équipes de recherche en modélisation biogéochimique. Cela s'est réalisé à la fois en travaillant avec des collègues spécialisés en modélisation « recherche » (comme les groupes de C. Estournel (LA, Toulouse), de P. Brasseur (LGGE, Grenoble), de J.C. Dutay (LSCE, Paris), de M. Lévy (LOCEAN, Paris) ou les collègues italiens de l'OGS, G. Cossarini et S. Salon, et aussi dans le cadre de l'Océanographie Opérationnelle (OO). Dans le premier cas, les interactions ont porté plutôt sur la comparaison BioArgo/modèles, dans des cadres théoriques (comme avec M. Lévy, avec un model 0D), dans le contexte de la Méditerranée Nord-Occidentale (comme avec C. Estournel, pour l'interprétation des données des actions DEWEX/DOWEX) ou dans l'analyse de la dynamique interannuelle de la Méditerranée (comme avec J.C. Dutay, pendant la thèse de J. Palmieri). Dans le contexte de l'OO, c'est le design du réseau d'observation optimal qui est ciblé, notamment avec Mercator Océan et ses équipes de recherche et développement. Il s'agira donc d'analyser, par l'intermédiaire d'études de trajectographie ou par OSSE, les caractéristiques (i.e. fréquence d'échantillonnage, nombre d'engins nécessaires, zones prioritaires, etc.) d'un réseau BioArgo, qui, si assimilé, soit capable de diminuer les erreurs répertoriées dans les champs des systèmes opérationnels. En parallèle, la disponibilité d'un réseau BioArgo de plus en plus opérationnel permettra de développer des méthodes d'assimilation adaptées, ce qui est prévu dans le cadre d'un projet « Copernicus Evolution » que je co-coordonne avec des collègues de l'OGS (Trieste, Italie).

2 La Méditerranée et au-delà

2.1 La Méditerranée comme « sentinelle »

Si les cycles phénologiques de la chlorophylle de surface des régions productives (« Bloom ») et oligotrophes (« No bloom ») de la Méditerranée (D'Ortenzio and Ribera d'Alcala, 2009) sont comparées avec ceux de l'océan planétaire (D'Ortenzio *et al.*, 2012), le résultat est décidément étonnant (figure 6).

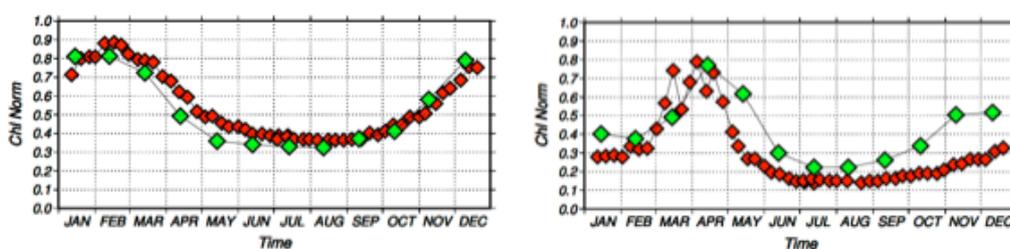


Figure 6. Cycles saisonniers moyens de la chlorophylle de surface dans des régions oligotrophes (gauche) et dans des régions productives (droite), pour l'océan planétaire (points verts) et pour la Méditerranée (points rouges). La concentration en chlorophylle est normalisée par son maximum annuel.

Mises à part quelques petites différences (plus évidentes pour les zones « Bloom »), les courbes globales et celles de la Méditerranée sont très proches, au moins en termes de chronologie et de forme du cycle saisonnier. Même si les concentrations absolues sont différentes (i.e. il s'agit des courbes normalisées par le maximum annuel), cette correspondance est quand même assez surprenante. Sans trop spéculer, elle indique que dans une bande longitudinale relativement restreinte, comme celle qui est occupée par la Méditerranée, on retrouve des cycles phénologiques du phytoplancton qui sont caractéristiques de l'océan global.

Ce n'est pas la seule coïncidence. Du point de vu climatique, la région méditerranéenne est historiquement classifiée par un régime climatique spécifique (Emberger, 1930, Rego and Rocha,

2014), caractérisé par des étés très chauds et par de faibles précipitations. Dans un contexte global, la région méditerranéenne occupe une zone qui se trouve à la limite des zones dites tempérées (au nord) et celles dites arides (au sud), comme récemment confirmé par une classification des régimes climatiques planétaires (Kottek *et al.*, 2006, figure 7). Si on considère que les régimes arides, dans l’océan, sont plutôt nommés oligotrophes, on retrouve ici une évidente correspondance entre les régimes climatiques et les régimes trophiques méditerranéens.

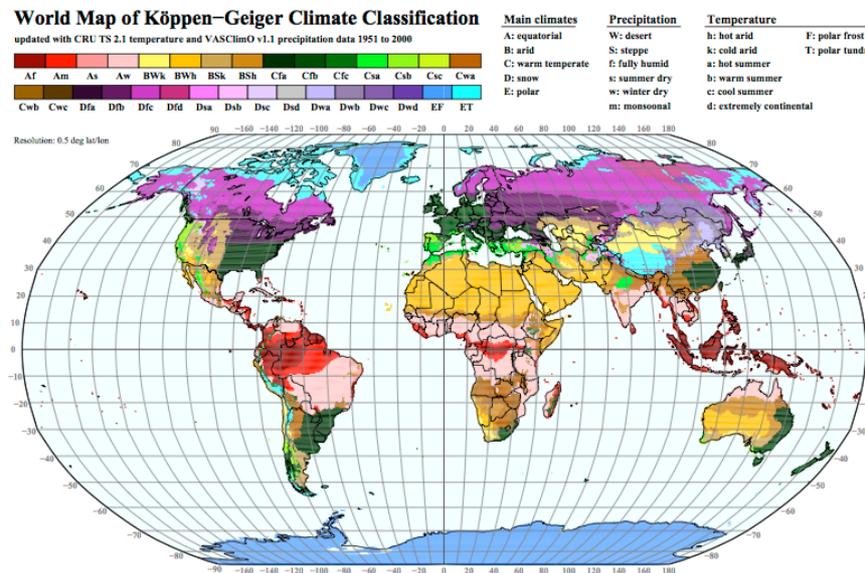


Figure 7. Carte planétaire des régimes climatiques, tirée de Kottek et al. (2006)

Ce n’est pas fini. Selon la plupart des projections (IPCC, 2014), les prochaines décennies risquent de bouleverser la distribution actuelle des régimes climatiques, ce qui devrait mener à un élargissement des zones arides et une réduction drastique de celles tempérées. D’une manière totalement spéculative, on peut donc conclure que les écosystèmes phytoplanctoniques méditerranéens (qui peuvent avoir une dynamique à la fois « Bloom » et « No Bloom », sans qu’on ait encore véritablement compris pourquoi) risquent d’être particulièrement affectés par ces bouleversements climatiques.

C’est dans une excellente revue scientifique du plancton méditerranéen que Siokou-Frangou *et al.* (2010) suggèrent que la Méditerranée peut devenir une sorte de « sentinelle » planétaire pour, je cite, « testing (new conceptual model) due to the scale and accessibility of the Mediterranean Sea, and inferences later extended to other less tractable marine systems. ». Si je peux contribuer à la mise en place de ces nouveaux modèles conceptuels à la fin à mon projet de recherche, c’est l’extension à d’autres « less tractable marine systems » qu’il faudra absolument viser.

2.2 L’Atlantique

Comment peut-on se passer de l’Atlantique dans un projet qui s’adresse à la compréhension des interactions physico-biologiques dans l’océan ? Convection profonde, cellule thermohaline, floraisons phytoplanctoniques, impact de la couche de mélange sur la phénologie phytoplanctonique, théorie de Sverdrup et ses critiques, biorégions, limitation de la lumière. Tous les mots-clés que j’ai utilisés dans ce mémoire ont été cités pour la première fois en étudiant l’Atlantique. Quels sont mes projets dans ce contexte ?

D’abord, le nouveau paradigme observationnel que j’ai décrit plus haut risque de s’appliquer à l’étude de l’Atlantique. Soutenu par les fonds européens H2020, le projet AtlantOS prévoit, sur la période 2015-2020, un colossal effort pour mettre en place un système d’observation de l’Atlantique. Ce système d’observation comportera une composante biogéochimique importante, dans laquelle, de surcroît, les plateformes autonomes (notamment BioArgo et gliders) seront

particulièrement soutenues. Ma participation au projet me permettra donc de contribuer activement à cette réalisation.

Ensuite, le programme NAOS développe, en parallèle de l'activité méditerranéenne que je pilote, des actions ciblées pour l'extension du réseau Argo vers les couches profondes et aux zones polaires et à l'Atlantique Nord. La première action (pilotee par V. Thierry, du LPO) prévoit la réalisation d'un certain nombre des flotteurs prototypes capables d'atteindre des profondeurs de 3000-3500 mètres. L'objectif est de réussir à mieux observer et comprendre la cellule thermohaline qui se génère dans l'Atlantique Nord et qui pilote la circulation planétaire. Ces flotteurs seront également équipés de capteurs d'oxygène dissous, ce qui m'intéresse particulièrement pour mes recherches biogéochimiques. L'autre action, pilotée par M. Babin, du laboratoire mixte CNRS Takuvik et ancien du LOV, prévoit la modification substantielle du PROV-BIO-II pour opérer en zone polaire. La possibilité de dériver en zones couvertes par la glace (et donc dans l'impossibilité de remonter en surface) oblige à doter les flotteurs d'une capacité de « décision » basée sur des algorithmes internes ou sur des nouveaux capteurs (comme des ping-pong acoustiques). Cela doit permettre aux flotteurs d'arrêter la remontée, d'emmagasiner les données acquises et de reprendre la mission tant que les conditions océaniques ne permettent pas de remonter à la surface et de communiquer. Bien que cette activité soit pilotée par Takuvik, le LOV a beaucoup contribué à la réalisation technique de flotteurs arctiques (qui seront déployés en Arctique/Atlantique Nord pendant l'été 2016). De mon point de vue, leur capacité à échantillonner des zones souvent inaccessibles à l'observation satellitaire est particulièrement intéressante. Je suivrai donc tout cela avec le plus grand intérêt.

Finalement, c'est toujours en Atlantique (et toujours dans le cadre du projet AtlantOS) que des études sur la combinaison des données biogéochimiques issues de BioArgo et les modèles couplés physico-biogéochimiques sont prévus. Jusqu'à présent, la plupart des recherches dans ce domaine visaient plutôt l'assimilation des données satellitaires. Le réseau BioArgo pourrait toutefois permettre d'initier et développer des tests d'assimilation des données biogéochimiques in situ. Déjà, des travaux ont été entamés en collaboration avec le LGGE de Grenoble (P. Brasseur) et avec le LSCE (M. Gehlen) à ce sujet (notamment pendant le post-doc de C. Fontana que j'ai encadré et pendant la thèse de S. Tavernel, que je suis en tant que membre du comité de thèse). J'espère de pouvoir continuer ces interactions dans le futur.

*« You can't always get what you want. But if you try sometimes
you just might find »*

Mick Jagger & Keith Richards

Considérations finales

1 Quelques réflexions « philosophiques »

On vit dans un monde où la technologie a pris une part très importante, et, pourtant, on s'interroge de moins en moins sur le rôle que la science occupe dans la société. Les « anciens » étaient beaucoup plus inquiets que nous, et même si ce rôle n'as pas toujours été lumineux (il suffit penser aux ingérences politiques des prêtres de l'ancienne Egypte, ou, plus récemment, aux crises morales des chercheurs impliqués dans le projet Manhattan), ils avaient une conscience beaucoup plus aiguë de l'importance que l'acquisition des connaissances peut avoir sur l'évolution générale de leurs sociétés.

J'ai eu la chance d'assister en direct à plusieurs « petites révolutions » dans l'océanographie : les satellites, l'informatisation, les « bigdata », les modèles couplés etc. Et pourtant, je trouve que la plus grosse révolution est celle qui est advenue dans la société (au moins celle qu'on appelle « occidentale »), où la prise de conscience du dérèglement climatique a mis notre discipline au centre de l'attention et des responsabilités. Il y a 10 ans, l'océanographe n'était qu'un scientifique parmi les autres, bien loin de l'importance qu'on accordait aux grands médecins ou aux « stars » de la physique nucléaire. Maintenant, l'océan est au cœur des négociations diplomatiques et environnementales des Nations-Unis et un des points plus débattus à la récente COP21. Nous avons été projetés sur le devant de la scène, sans y être véritablement préparés.

L'océanographie est, en effet, une science récente, au moins dans son approche moderne post-révolution scientifique de Copernic/Galilée/Newton. C'est une discipline qui est surtout portée (sans généraliser, bien évidemment) par des personnes encore passionnées par l'exploration et la découverte et qui rechigne à « passer le cap » d'une rationalisation au bénéfice de la société. Sans sortir du domaine des sciences de la terre, c'est ce qu'ont entamé les collègues de la météo ou de la sismologie dans les années 70 qui nous fait défaut. Pour notre défense, il faut dire que nous nous sommes attaqués à un problème colossal, mais le défi existe : M. et M.me « tout le monde » attendent de nous des réponses, mais aussi du rêve et de l'espoir.

Mais on s'organise. Au niveau européen, dans la suite du long processus d'intégration des états nationaux, on assiste à la mise en place du système COPERNICUS, qui ambitionne de centraliser, organiser et renforcer les sciences de compréhension de la Terre de notre vieux continent. Même si il n'est pas sans défauts (et on pourrait en parler pendant des heures), le système COPERNICUS a quand même un énorme atout : il a remis la science de l'observation de la Terre (et donc l'océanographie) au service de la société, nous obligeant à garder toujours dans la tête qu'on a un rôle et qu'il faut qu'on l'assume.

Participer à cette prise de conscience, et commencer à assumer le rôle que la société demande à notre (petite, il faut le reconnaître) communauté scientifique, c'est, au final, l'objectif ultime de ma vie intellectuelle et professionnelle. Forcément (et heureusement), je ne suis qu'un petit élément de cette communauté, et les thématiques exposées dans ce mémoire le démontrent.

2 Un nouveau paradigme observationnel

Mes thématiques scientifiques tournent toutes autour de ce nouveau système de récolte des données (que j'ai appelé fort prétentieusement « paradigme observationnel ») et de ses conséquences sur notre compréhension des interactions physique-biologie dans l'océan ouvert. Tout cela est le résultat de 30 ans d'évolution technologique, scientifique et intellectuelle. Sous différentes formes, il est en train de s'imposer (voir par exemple le grand projet NSF SOCCOM

ou celui de la NASA EXPORT), et il y a forte chances qu'il devienne la « routine » dans les prochaines décennies.

Ici, dans cet exercice d'HDR, j'ai expliqué comment j'occuperai les prochaines 5-10 années: rendre robuste, fiable et routinière l'acquisition des données BioArgo ; intégrer ces nouvelles plates-formes aux satellites, aux bateaux et aux modèles ; expliquer, grâce à ces nouvelles observations, les paramètres qui contrôlent la distribution de la biomasse, dans l'espace et dans le temps ; s'attaquer aux échelles peu documentées, comme l'interannuel, la haute fréquence, la mésoéchelle ; comprendre en quoi la Méditerranée est à la fois un océan en miniature et un objet original, en comparant sa dynamique à celle de l'Atlantique.

A plus long terme, et sans pouvoir en dire trop à ce stade, le nouveau paradigme observationnel bénéficiera de toute une panoplie d'améliorations que on ne peut, pour l'instant qu'entr'apercevoir : des satellites géostationnaires de la couleur de l'océan (comme OCAPI, projet phare du CNES, qui devrait fournir une carte de la couleur de l'océan toutes les heures), des capteurs embarqués sur flotteur ou glider qui frôlent la science-fiction (cameras « intelligentes » pour observer et quantifier le zooplancton ; sondeurs acoustiques pour « écouter » et estimer la hauteur de pluie, le vent, le type de glace et la présence des mammifères marins ; mini-spectromètres de masse pour quantifier l'ensemble de la matière inorganique ; séquenceurs miniaturisés pour obtenir en temps réel l'ADN présent dans un échantillon d'eau), des modèles couplés à des résolutions spatiales/temporelles/paramétriques très poussées (l'objectif numéro un de la prospective de l'océanographie opérationnelle française est se doter d'un modèle couplé physique-biologie à $1/36^\circ$ à l'horizon 2020, quelque chose d'inimaginable il y a seulement 10 ans !!).

Tout cela est vraiment à la limite de la science-fiction.

Mais ça risque de devenir la réalité.

Remerciements

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans les relances répétées, insistantes et effrayantes de mon directeur, Antoine Sciandra. Il a été souvent épaulé dans cette démarche par Hervé Claustre. Si vous avez lu ce mémoire, c'est d'abord avec eux qu'il faut s'en prendre.

Dans mon parcours scientifique, et en essayant de garder une logique chronologique, c'est certainement mon directeur de thèse (et ami) Maurizio Ribera d'Alcalà qu'il faut remercier. C'est à cause de lui, aussi, que mes dérives philosophiques se sont insinuées dans ce mémoire, mais ce sont aussi ses enseignements qui me poussent toujours à regarder un peu plus loin dans mon activité de recherche.

Parmi les autres inspirateurs de ce travail, il faut certainement citer David Antoine. Les Italiens, c'est connu, ont la réputation de scientifiques créatifs mais désorganisés. Si j'ai appris à être un peu plus structuré dans mon travail, c'est grâce à lui. Il ne faut pas oublier non plus que si je suis à Villefranche, c'est grâce à (à cause de ??) lui. Hervé Claustre, quand il ne me parlait pas de mon HDR, a été certainement la personne qui m'a le mieux appris le métier de chercheur. Une grande part de mon activité de recherche de ces cinq dernières années, je l'ai accomplie avec lui, avec son soutien, avec son aide. Parfois, ça chauffe entre nous. Mais nous sommes tous les deux anciens rugbymans et nous sommes Méditerranéens, c'est un peu normal. Un autre avec qui le ton est souvent monté, c'est Louis Prieur. Louis, c'est un Breton, grande gueule, rien à dire. Mais j'ai rarement connu des discussions scientifiques à la hauteur de celles que j'ai eues avec Louis dans son bureau, ou sur la route interminable pour Banyuls.

Route pour Banyuls souvent empruntée avec Vincent Taillandier, collègue scientifiquement très brillant, à qui je dois, encore, beaucoup de discussions scientifiques de haute qualité. Et qu'est-ce que j'aurais fait sans Antoine Poteau ? Avec lui, aussi, ce fut parfois tendu. Mais que ce type est bon quand il faut assurer un déploiement BioArgo !!! Avec Edouard Leymarie, par contre, le ton n'est jamais monté. Difficile avec lui, avec le caractère qu'il a. Mais c'est une autre valeur sûre au LOV, et c'est une chance de l'avoir comme collègue.

Discours à part pour les étudiants. J'ai eu la chance d'avoir toujours d'excellents étudiants, à la fois scientifiquement et personnellement. J'ai de très bons souvenirs de chacun, et je pense qu'ils ont beaucoup contribué à ma formation scientifique, autant que j'espère avoir contribué à la leur. Vincent, Marcelo, Xiaogang, Clément, Héloïse, Orens, Nicolas, Sophie, Perrine, Fatma, Enzo, Tiziana, Simone, Gianluca, tous m'ont apporté beaucoup, et je le remercie tous.

Sans tomber dans le pathos, j'avoue que j'apprécie énormément la communauté océanographique française. L'équipe OMTAB, d'abord, qui, même avec les vicissitudes récentes (qui n'ont rien à voir avec la science !!), m'a toujours montré une affection et une estime incroyables. Le LOV et l'OOV ensuite : lieux d'exception pour faire de la recherche, mais aussi communauté de personnes, où les échanges personnels ont la même importance que les échanges scientifiques. Je remercie en particulier le directeur du LOV, Antoine Sciandra, qui, quand il ne me parlait pas d'HDR, m'a beaucoup appris sur la façon d'interagir avec ce monde compliqué qui est celui des chercheurs. Enfin, les autres : les communautés des « Méditerranéennes » MERMEX et MOOSE, compliquées et bagarreuses, certes, mais aussi créatives et passionnées, et toujours prêtes à un coup de main en cas de besoin; les « Atlantiques » brestois, parfois déboussolés par mon agitation italienne, mais avec qui les liaisons (scientifiques et personnelles) se sont renforcées au fil des années ; toute la communauté de l'océanographie opérationnelle, dans laquelle je suis

entré sur la pointe des pieds, mais qui m'a énormément appris, et dans laquelle finalement je me trouve si bien (notamment avec la branche grenobloise des deux derniers présidents du CS GMMC et aussi avec Pierre Yves LeTraon, le co-coordonateur du projet NAOS).

Le jury reflète un peu tout ça, et je le remercie énormément. D'abord, pour avoir lu le présent mémoire, mais aussi, et surtout, car il est un sous-échantillon de cette communauté qui m'a si bien accueilli et dans laquelle, franchement, je me trouve si bien.

Et, pour finir, mention à part pour Christophe Migon. Même si je considère qu'il est un excellent scientifique, il se sentira sans doute insulté si je le remercie pour tout ce qu'il m'a appris sur la biogéochimie méditerranéenne et sur l'encadrement des étudiants. Je pense (et j'espère) qu'il sera plus satisfait si je le remercie pour les discussions artistiques, littéraires, cinématographiques ou historiques que nous avons eues ces derniers années (sans compter la relecture mode « école primaire » de ce mémoire). Mais ce n'est jamais dit avec lui. Il est fier et susceptible. Il est Corse.

Finalement, ma famille. On peut vite tomber dans la banalité, ou, pire, dans le pathétique, mais pour autant je n'aurais rien fait ces quinze dernières années sans le soutien infatigable et indéfectible de ma femme, Tiziana. Qu'est-ce que elle n'a pas dû supporter !! Se marier à un scientifique, en plus océanographe, il faut être d'acier. Disons qu'elle m'a rencontré sur une bateau de recherche en 1999 (à cause de Maurizio Ribera d'Alcalà, c'est donc sa faute !!), elle aurait dû s'attendre à tout ça. Je t'aime Tiziana. Merci. Autant pour mes filles, Julie et Anne-Sophie, qui n'ont pas encore compris grand-chose de mon travail (à part que j'étudie la mer, que je pars en bateau de temps en temps et que j'ai des robots⁶) mais qui ont quand même assimilé que parfois Papa est un peu fou. Merci d'être là.

⁶ Finalement, c'est un très bon résumé de mon activité scientifique.

Bibliographie

- Allen, J., Archer, S., Blackford, J., Gilbert, F. & Taylor, A., 2006. Changes in DMS production and flux in relation to decadal shifts in ocean circulation, *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 58, 242-254.
- Amitai, Y., Lehahn, Y., Lazar, A. & Heifetz, E., 2010. Surface circulation of the eastern Mediterranean Levantine basin: Insights from analyzing 14 years of satellite altimetry data, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 115.
- Andersen, V. & Prieur, L., 2000. One month study in the open NW Mediterranean Sea (DYNAPROC experiment, May 1995): overview of the hydrobiogeochemical structures and effects of wind events, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 47, 397-422.
- Antoine, D., D'Ortenzio, F., Hooker, S.B., Becu, G., Gentili, B., Taillez, D. & Scott, A.J., 2008a. Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project), *Journal of Geophysical Research. C. Oceans [J. Geophys. Res. (C Oceans)]*, 113, doi 10.1029/2007JC004472.
- Antoine, D., Guevel, P., Deste, J.F., Becu, G., Louis, F., Scott, A.J. & Bardey, P., 2008b. The "BOUSSOLE" buoy - A new transparent-to-swell taut mooring dedicated to marine optics: Design, tests, and performance at sea, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 968-989.
- Antoine, D., Morel, A. & André, J.M., 1995. Algal pigment distribution and primary production in the eastern Mediterranean as derived from CZCS observations, *Journal of Geophysical Research*, 100, 16193-16210.
- Antoine, D., Morel, A., Gordon, H.R., Banzon, V.F. & Evans, R.H., 2005. Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 110.
- Babin, S., Carton, J., Dickey, T. & Wiggert, J., 2004. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 109.
- Bailey, S.W. & Werdell, P.J., 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products, *Remote Sensing of Environment*, 102, 12-23.
- Barale, V., Jaquet, J.M. & Ndiaye, M., 2008. Algal blooming patterns and anomalies in the Mediterranean Sea as derived from the SeaWiFS data set (1998-2003), *Remote Sensing of Environment*, 112, 3300-3313.
- Beaugrand, G., 2004. The North Sea regime shift: evidence, causes, mechanisms and consequences, *Progress in Oceanography*, 60, 245-262.
- Behrenfeld, M.J., 2010. Abandoning Sverdrup's Critical Depth Hypothesis on phytoplankton blooms, *Ecology*, 91, 977-989.
- Behrenfeld, M.J. & Boss, E., 2003. The beam attenuation to chlorophyll ratio: an optical index of phytoplankton physiology in the surface ocean?, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50, 1537-1549.
- Behrenfeld, M.J., Boss, E., Siegel, D.A. & Shea, D.M., 2005. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space, *Global Biogeochemical Cycles*, 19, 1-14.
- Behrenfeld, M.J. & Boss, E.S., 2014. Resurrecting the Ecological Underpinnings of Ocean Plankton Blooms, *Annual Review of Marine Science*, 6, 167-194.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., McClain, C.R., Sarmiento, J.L., Feldman, G.C., Milligan, A.J., Falkowski, P.G., Letelier, R.M. & Boss, E.S., 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity, *Nature*, 444, 752-755.
- Bethoux, J., Gentili, B., Morin, P., Nicolas, E., Pierre, C. & Ruiz-Pino, D., 1999. The Mediterranean Sea: a miniature ocean for climatic and environmental studies and a key for the climatic functioning of the North Atlantic, *Progress in Oceanography*, 44, 131-146.
- Bethoux, J., Morin, P., Chaumery, C., Connan, O., Gentili, B. & Ruiz-Pino, D., 1998. Nutrients in the Mediterranean Sea, mass balance and statistical analysis of concentrations with respect to environmental change., *Marine Chemistry*, 63, 155-169.
- Biol, F., Cancet, M. & Estournel, C., 2010. Aspects of the seasonal variability of the Northern Current (NW Mediterranean Sea) observed by altimetry, *Journal of Marine Systems*, 81, 297-311.
- Bopp, L., Monfray, P., Aumont, O., Dufresne, J.L., Le Treut, H., Madec, G., Terray, L. & Orr, J.C., 2001. Potential impact of climate change on marine export production, *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 81-99.
- Bosc, E., Bricaud, A. & Antoine, D., 2004. Seasonal and interannual variability in algal biomass and primary production in the Mediterranean Sea, as derived from four years of SeaWiFS observations, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, doi:10.1029/2003GB002034.
- Boss, E. & Behrenfeld, M., 2010. In situ evaluation of the initiation of the North Atlantic phytoplankton bloom, *Geophysical Research Letters*, 37.

- Bosse, A., Testor, P., Mortier, L., Prieur, L., Taillandier, V., d'Ortenzio, F. & Coppola, L., 2015. Spreading of Levantine Intermediate Waters by submesoscale coherent vortices in the northwestern Mediterranean Sea as observed with gliders, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 1599-1622.
- Boyce, D.G., Lewis, M. & Worm, B., 2012. Integrating global chlorophyll data from 1890 to 2010, *Limnol. Oceanogr. Methods*, 10, 840-852.
- Boyce, D.G., Lewis, M.R. & Worm, B., 2010. Global phytoplankton decline over the past century, *Nature*, 466, 591-596.
- Brainerd, K. & Gregg, M., 1995. Surface Mixed and Mixing Layer Depths, *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 42, 1521-1543.
- Braudel, F., 1949. *La Méditerranée et le monde méditerranéen à l'époque de Philippe II*, edn, Vol., pp. Pages, Armand Colin.
- Bricaud, E., B. & D., A., 2002. Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean Basin. Intercomparison of data from various satellite sensors, and implications for primary production estimates., *Remote sensing of environment*, 81, 163-178.
- Brody, S.R. & Lozier, M.S., 2014. Changes in dominant mixing length scales as a driver of subpolar phytoplankton bloom initiation in the North Atlantic, *Geophysical Research Letters*, 41, 3197-3203.
- Brody, S.R. & Lozier, M.S., 2015. Characterizing upper-ocean mixing and its effect on the spring phytoplankton bloom with in situ data, *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, fsv006.
- Buongiorno Nardelli, B., Sparnocchia, S. & Santoleri, R., 1999. Small mesoscale features at a meandering upper ocean front in the western ionian sea (mediterranean sea): vertical motion and potential vorticity analysis.
- Chelton, D.B., Gaube, P., Schlax, M.G., Early, J.J. & Samelson, R.M., 2011. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll, *Science*, 334, 328-332.
- Chiswell, S.M., 2011. Annual cycles and spring blooms in phytoplankton: don't abandon Sverdrup completely, *Marine Ecology-Progress Series*, 443, 39-50.
- Chronis, T., Papadopoulos, V. & Nikolopoulos, E., 2011. QuickSCAT observations of extreme wind events over the Mediterranean and Black Seas during 2000–2008, *International Journal of Climatology*, 31, 2068-2077.
- Claustre, H., Antoine, D., Boehme, L., Boss, L., D'Ortenzio, F., D'Andon, O., Guinet, C., Gruber, N., Handegard, N. & Hood, M., 2010a. Guidelines Towards An Integrated Ocean Observation System For Ecosystems And Biogeochemical Cycles, *Proceedings of OceanObs' 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, Venice, Italy, 21-25 September 2009*, 1, 8.
- Claustre, H., Bishop, J., Boss, E., Stewart, B., Berthon, J., Coatanoan, C., Johnson, K., Lotiker, A., Ulloa, O., Perry, M., D'Ortenzio, F., Hembise Fanton, O. & Uitz, J., 2010b. Bio-optical profiling floats as new observational tools for biogeochemical and ecosystem studies, *Proceedings of the " OceanObs, 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Conference"*, 2.
- Claustre, H., Morel, A., Hooker, S.B., Babin, M., Antoine, D., Oubelkheir, K., Bricaud, A., Leblanc, K., Quéguiner, B. & Maritorena, S., 2002. Is desert dust making oligotrophic waters greener?, *Geophysical Research Letters*, 29, 107-111.
- Crise, A., Allen, J.I., Baretta, J., Crispi, G., Mosetti, R. & Solidoro, C., 1999. The Mediterranean pelagic ecosystem response to physical forcing, *Progress in Oceanography*, 44, 219-243.
- Crispi, G., Crise, A. & Mauri, E., 1999. A seasonal three-dimensional study of the nitrogen cycle in the Mediterranean Sea: Part II. Verification of the energy constrained trophic model, *Journal of Marine Systems*, 20, 357-379.
- Crispi, G., Mosetti, R., Solidoro, C. & Crise, A., 2001. Nutrients cycling in Mediterranean basins: the role of the biological pump in the trophic regime, *Ecological Modelling*, 138, 101-114.
- Cullen, J.J. & Eppley, R.W., 1981. Chlorophyll maximum layers of the Southern California Bight and possible mechanisms of their formation and maintenance, *Oceanol. Acta*, 4, 23-32.
- D'Ortenzio, F., Antoine, D., Martinez, E. & Ribera d'Alcalà, M., 2012. Phenological changes of oceanic phytoplankton in the 1980s and 2000s as revealed by remotely sensed ocean-color observations, *Global Biogeochemical Cycles*, 26.
- D'Ortenzio, F., Antoine, D. & Marullo, S., 2008. Satellite-driven modeling of the upper ocean mixed layer and air-sea CO₂ flux in the Mediterranean Sea, *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 55, 405-434.
- D'Ortenzio, F. & d'Alcala, M.R., 2009. On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis, *Biogeosciences*, 6, 139-148.
- D'Ortenzio, F., Iudicone, D., Montegut, C.D., Testor, P., Antoine, D., Marullo, S., Santoleri, R. & Madec, G., 2005. Seasonal variability of the mixed layer depth in the Mediterranean Sea as derived from in situ profiles, *Geophysical Research Letters*, 32.

- D'Ortenzio, F., Lavigne, H., Le Reste, S., Besson, F., Claustre, H., Coppola, L., Dufour, A., Dutreuil, V., Garcia, N., Laes, A., E., L., Malarde, D., Migon, C., Morin, P., Mortier, L., Poteau, A., Prieur, L., Raimbault, P. & Testor, P., 2014. Observing mixed layer depth, nitrates and chlorophyll concentrations in the North Western Mediterranean: a combined satellite and NO₃ profiling floats experiment., *Geophysical Research Letters*, accepted, with minor revision.
- D'Ortenzio, F., Marullo, S., Ragni, M., Ribera d'Alcalà, M. & Santoleri, R., 2002. Validation of empirical SeaWiFS chlorophyll-a algorithms retrieval in the Mediterranean Sea: a case study for oligotrophic seas, *Remote sensing of environment*, 82, 79-94.
- D'Ortenzio, F., Marullo, S. & Santoleri, R., 2000. Validation of AVHRR Pathfinder SST's over the Mediterranean Sea, *Geophysical Research Letters*, 27, 241.
- D'Ortenzio, F. & Prieur, L., 2012. The upper mixed layer. in *Life in the Mediterranean Sea: A look at habitat changes*, pp. 127-156, ed. Stambler, N. Nova Science Publisher.
- D'Ortenzio, F., Thierry, V., Eldin, G., Claustre, H., Testor, P., Coatanoan, C., Tedetti, M., Guinet, C., Poteau, A. & Prieur, L., 2010. *White Book on Oceanic Autonomous Platforms for Biogeochemical Studies: Instrumentation and Measure (PABIM)*, edn, Vol. 1, pp. Pages, Version.
- Davis, R.E., Ohman, M.D., Rudnick, D.L., Sherman, J.T. & Hodges, B., 2008. Glider surveillance of physics and biology in the southern California Current System, *Limnology and Oceanography*, 53, 2151-2168.
- de Boyer Montégut, C., Madec, G., Fischer, A.S., Lazar, A. & Iudicone, D., 2004. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, 109.
- de Fommervault, O.P., Migon, C., d'Alcalà, M.R. & Coppola, L., 2015a. Temporal variability of nutrient concentrations in the northwestern Mediterranean sea (DYFAMED time-series station), *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 100, 1-12.
- de Fommervault, P.O., D'Ortenzio, F., Mangin, A., Serra, R., Migon, C., Claustre, H., Lavigne, H., d'Alcalà, M.R., Prieur, L. & Taillandier, V., 2015b. Seasonal variability of nutrient concentrations in the Mediterranean Sea: Contribution of Bio-Argo floats, *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- de Madron, X., Guieu, C., Sempere, R., Conan, P., Cossa, D., D'Ortenzio, F., Estournel, C., Gazeau, F., Rabouille, C., Stemmann, L., Bonnet, S., Diaz, F., Koubbi, P., Radakovitch, O., Babin, M., Baklouti, M., Bancon-Montigny, C., Belviso, S., Bensoussan, N., Bonsang, B., Bouloubassi, I., Brunet, C., Cadiou, J., Carlotti, F., Chami, M., Charmasson, S., Charriere, B., Dachs, J., Doxaran, D., Dutay, J., Elbaz-Poulichet, F., Eleaume, M., Eyrolles, F., Fernandez, C., Fowler, S., Francour, P., Gaertner, J., Galzin, R., Gasparini, S., Ghiglione, J., Gonzalez, J., Goyet, C., Guidi, L., Guizien, K., Heimburger, L., Jacquet, S., Jeffrey, W., Joux, F., Le Hir, P., Leblanc, K., Lefevre, D., Lejeune, C., Leme, R., Loye-Pilot, M., Mallet, M., Mejanelle, L., Melin, F., Mellon, C., Merigot, B., Merle, P., Migon, C., Miller, W., Mortier, L., Mostajir, B., Mousseau, L., Moutin, T., Para, J., Perez, T., Petrenko, A., Poggiale, J., Prieur, L., Pujo-Pay, M., Pulido-Villena, Raimbault, P., Rees, A., Ridame, C., Rontani, J., Pino, D., Sicre, M., Taillandier, V., Tamburini, C., Tanaka, T., Taupier-Letage, I., Tedetti, M., Testor, P., Thebault, H., Thouvenin, B., Touratier, F., Tronczynski, J., Ulses, C., Van Wambeke, F., Vantrepotte, V., Vaz, S., Verney, R. & Grp, M., 2011. Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean, *Progress in Oceanography*, 91, 97-166.
- de Madron, X., Houpert, L., Puig, P., Sanchez-Vidal, A., Testor, P., Bosse, A., Estournel, C., Somot, S., Bourrin, F., Bouin, M., Beauverger, M., Beguery, L., Calafat, A., Canals, M., Cassou, C., Coppola, L., Dausse, D., D'Ortenzio, F., Font, J., Heussner, S., Kunesch, S., Lefevre, D., Le Goff, H., Martin, J., Mortier, L., Palanques, A. & Raimbault, P., 2013. Interaction of dense shelf water cascading and open-sea convection in the northwestern Mediterranean during winter 2012, *Geophysical Research Letters*, 40.
- del Giorgio, P.A. & Duarte, C.M., 2002. Respiration in the open ocean, *Nature*, 420, 379-384.
- Doney, S.C., Glover, D.M., McCue, S.J. & Fuentes, M., 2003. Mesoscale variability of Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) satellite ocean color: Global patterns and spatial scales, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans [J. Geophys. Res.]*, 108.
- Dutkiewicz, S., Follows, M., Marshall, J. & Gregg, W., 2001. Interannual variability of phytoplankton abundances in the North Atlantic, *Deep-Sea Research Part Ii-Topical Studies in Oceanography*, 48, 2323-2344.
- Edwards, K.F., Litchman, E. & Klausmeier, C.A., 2013. Functional traits explain phytoplankton community structure and seasonal dynamics in a marine ecosystem, *Ecology letters*, 16, 56-63.
- Emberger, L., 1930. *La végétation de la région méditerranéenne: essai d'une classification des groupements végétaux*, edn, Vol., pp. Pages, Librairie générale de l'enseignement.
- Emery, W.J. & Pickard, W.J., 1990. *Descriptive physical oceanography*, edn, Vol., pp. Pages, Pergamon Press, Oxford (UK).

- Estrada, M., Marrase, C., Latasa, M., Berdalet, E., Delgado, M. & Riera, T., 1993. Variability of deep chlorophyll maximum characteristics in the Northwestern Mediterranean, *Marine Ecology-Progress Series*, 92, 289-289.
- Falkowski, P., Ziemann, D., Kolber, Z. & Bienfang, P., 1991. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean, *Nature*, 352, 55-58.
- Fauchereau, N., Tagliabue, A., Bopp, L. & Monteiro, P., 2011. The response of phytoplankton biomass to transient mixing events in the Southern Ocean, *Geophysical Research Letters*, 38.
- Fennel, K. & Boss, E., 2001. Subsurface maxima of phytoplankton and chlorophyll: Steady-state solutions from a simple model, *Limnology and Oceanography [Limnol. Oceanogr.]*, 48, 1521-1534.
- Fiala, M., Cahet, G., Jacques, G., Neveux, J. & Panouse, M., 1976. Fertilisation de communautés phytoplanctoniques. I. cas d'un milieu oligotrophe: Méditerranée nord-occidentale, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 24, 151-163.
- Follows, M.J. & Dutkiewicz, S., 2002. Meteorological modulation of the North Atlantic Spring Bloom, *Deep Sea Research II*, 49, 321-344.
- Follows, M.J., Dutkiewicz, S., Grant, S. & Chisholm, S.W., 2007. Emergent biogeography of microbial communities in a model ocean, *Science*, 315, 1843-1846.
- Franks, P.J., 2014. Has Sverdrup's critical depth hypothesis been tested? Mixed layers vs. turbulent layers, *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, fsu175.
- Ganachaud, A. & Wunsch, C., 2002. Oceanic nutrient and oxygen transports and bounds on export production during the World Ocean Circulation Experiment., *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1057-.
- Garçon, V.C., Oschlies, A., Doney, S.C., McGillicuddy, D. & Waniek, J., 2001. The role of mesoscale variability on plankton dynamics in the North Atlantic, *Deep Sea Research II*, 48, 2199-2256.
- Gildor, H. & Naik, N.H., 2005. Evaluating the effect of interannual variations of surface chlorophyll on upper ocean temperature, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 110.
- Gill, A., Green, J. & Simmons, A., 1974. Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies, *Deep Sea Research*, 21, 499-528.
- Heimbürger, L.-E., Lavigne, H., Migon, C., D'Ortenzio, F., Estournel, C., Coppola, L. & Miquel, J.-C., 2013. Temporal variability of vertical export flux at the DYFAMED time-series station (Northwestern Mediterranean Sea), *Progress in Oceanography*, 119, 59-67.
- Henson, S.A., Cole, H., Beaulieu, C. & Yool, A., 2013. The impact of global warming on seasonality of ocean primary production, *Biogeosciences Discussions*, 10, 1421-1450.
- Henson, S.A., Dunne, J.P. & Sarmiento, J.L., 2009. Decadal variability in North Atlantic phytoplankton blooms, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 114.
- Henson, S.A., Robinson, I., Allen, J.T. & Waniek, J.J., 2006. Effect of meteorological conditions on interannual variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Irminger Basin, North Atlantic, *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 53, 1601-1615.
- Heslop, E.E., Ruiz, S., Allen, J., López-Jurado, J.L., Renault, L. & Tintoré, J., 2012. Autonomous underwater gliders monitoring variability at "choke points" in our ocean system: A case study in the Western Mediterranean Sea, *Geophysical Research Letters*, 39.
- Hopkins, T.S., 1999. The thermohaline forcing of the Gibraltar exchange, *Journal of Marine Systems*, 20, 1-31.
- Houpert, L., Testor, P., de Madron, X.D., Somot, S., D'Ortenzio, F., Estournel, C. & Lavigne, H., 2015. Seasonal cycle of the mixed layer, the seasonal thermocline and the upper-ocean heat storage rate in the Mediterranean Sea derived from observations, *Progress in Oceanography*, 132, 333-352.
- Hughes, C., Johnson, M., von Glasow, R., Chance, R., Atkinson, H., Souster, T., Lee, G., Clarke, A., Meredith, M., Venables, H., Turner, S., Malin, G. & Liss, P., 2012. Climate-induced change in biogenic bromine emissions from the Antarctic marine biosphere, *Global Biogeochemical Cycles*, 26.
- Huisman, J., Oostveen van, P. & Weissing, F.J., 1999. Critical depth and critical turbulence: Two different mechanisms for the development of phytoplankton blooms, *Limnology and Oceanography*, 44, 1781-1878.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edn, Vol., pp. Pages, Cambridge University Press.
- Isern-Fontanet, J., Garcia-Ladona, E. & Font, J., 2006. Vortices of the Mediterranean Sea: An altimetric perspective, *Journal of Physical Oceanography*, 36, 87-103.
- Jacques, Minas, Minas & Nival, 1974. Influence des conditions hivernales sur les productions phyto et zooplanctoniques en Méditerranée Nord Occidentale 2 Biomasse et production phytoplanctonique, *Marine Biology*, 22, 251.

- Ji, R., Edwards, M., Mackas, D.L., Runge, J.A. & Thomas, A.C., 2010. Marine plankton phenology and life history in a changing climate: current research and future directions, *Journal of plankton research*.
- Johnson, K.S., Riser, S.C. & Karl, D.M., 2010. Nitrate supply from deep to near-surface waters of the North Pacific subtropical gyre, *Nature*, 465, 1062-1065.
- Karl, D.M., Laws, E.A., Morris, P., Williams, P.J.L. & Emerson, S., 2003. Metabolic balance of the open sea, *Global carbon cycle*, 426, 32-38.
- Kimor, B. & Wood, E., 1975. A plankton study in the eastern Mediterranean Sea, *Marine biology*, 29, 321-333.
- Kiorboe, T., 2011. How zooplankton feed: mechanisms, traits and trade-offs, *Biological reviews*, 86, 311-339.
- Kottke, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263.
- Lacour, L., Claustre, H., Prieur, L. & D'Ortenzio, F., 2015. Phytoplankton biomass cycles in the North Atlantic subpolar gyre: A similar mechanism for two different blooms in the Labrador Sea, *Geophysical Research Letters*, 42, 5403-5410.
- Lampert, W., Fleckner, W., Rai, H. & Taylor, B.E., 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: a study on the spring clear-water phase, *Limnol. Oceanogr.*, 31, 478-490.
- Large, W.G., McWilliams, J.C. & Doney, S.C., 1994. Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parametrization, *Reviews of Geophysics*, 32, 363-403.
- Lascaratos, A., Roether, W., Nittis, K. & Klein, B., 1999. Recent changes in deep water formation and spreading in the eastern Mediterranean Sea: a review, *Progress in Oceanography*, 1, 5-36.
- Lavigne, H., D'Ortenzio, F., Claustre, H. & Poteau, A., 2012. Towards a merged satellite and in situ fluorescence ocean chlorophyll product, *Biogeosciences*, 9, 2111-2125.
- Lavigne, H., D'Ortenzio, F., Migon, C., Claustre, H., Testor, P., d'Alcalà, M.R., Lavezza, R., Houpert, L. & Prieur, L., 2013. Enhancing the comprehension of mixed layer depth control on the mediterranean phytoplankton phenology, *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- Lavigne, H., D'Ortenzio, F., Ribera D'Alcalà, M., Claustre, H., Sauzède, R. & Gacic, M., 2015. On the vertical distribution of the chlorophyll a concentration in the Mediterranean Sea: a basin-scale and seasonal approach, *Biogeosciences*, 12, 5021-5039.
- Lazzari, P., Solidoro, C., Ibello, V., Salon, S., Teruzzi, A., Beranger, K., Colella, S. & Crise, A., 2012. Seasonal and inter-annual variability of plankton chlorophyll and primary production in the Mediterranean Sea: a modelling approach, *Biogeosciences*, 9, 217-233.
- Lebeauupin Brossier, C., Béranger, K. & Drobinski, P., 2012. Sensitivity of the northwestern Mediterranean Sea coastal and thermohaline circulations simulated by the 1/12°-resolution ocean model NEMO-MED12 to the spatial and temporal resolution of atmospheric forcing, *Ocean Modelling*, 43, 94-107.
- Letelier, R.M., Bidigare, R.R., Hebel, D.V., Ondrusek, M., Winn, C. & Karl, D.M., 1993. Temporal variability of phytoplankton community structure based on pigment analysis.
- Letelier, R.M., Karl, D.M., Abbott, M.R., Flament, P., Freilich, M., Lukas, R. & Strub, T., 2000. Role of late winter mesoscale events in the biogeochemical variability of the upper water column of the North Pacific Subtropical Gyre, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 105, 28723-28739.
- Levy, M., Memery, L. & Madec, G., 1999. The onset of the spring bloom in the MEDOC area: mesoscale spatial variability, *Deep Sea Research*, 46, 1137.
- Levy, M., Memery, L. & Madec, G., 2000. Combined effects of mesoscale processes and atmospheric high-frequency variability on the spring bloom in the MEDOC area, *Deep Sea Research*, 47, 27.
- Leymarie, E., Poteau, A., André, X., Besson, F., Brault, P., Claustre, H., David, A., D'Ortenzio, F., Dufour, A., Lavigne, H., Le Reste, S., Le Traon, P.Y., Migon, C., Nogre, D., Obolensky, G., Penkerch, C., Sagot, J., Schaeffer, C., Schmechtig, C. & Taillandier, V., 2013. Development and validation of the new ProvBioII float. in *Mercator Ocean Quarterly Newsletter*.
- Liccardo, A., Fierro, A., Iudicone, D., Bouruet-Aubertot, P. & Dubroca, L., 2013. Response of the deep chlorophyll maximum to fluctuations in vertical mixing intensity, *Progress in Oceanography*, 109, 33-46.
- Llort, J., Lévy, M., Sallée, J.-B. & Tagliabue, A., 2015. Onset, intensification, and decline of phytoplankton blooms in the Southern Ocean, *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, fsv053.
- Loisel, H., Bosc, E., Stramski, D., Oubelkheir, K. & Deschamps, P.-Y., 2001. Seasonal variability of the backscattering coefficient in the Mediterranean Sea based on Satellite SeaWiFS imagery, *Geophysical Research Letters*, 28, 4203-4206.

- Lomas, M., Roberts, N., Lipschultz, F., Krause, J., Nelson, D. & Bates, N., 2009. Biogeochemical responses to late-winter storms in the Sargasso Sea. IV. Rapid succession of major phytoplankton groups, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56, 892-908.
- Longhurst, A., 1995a. Seasonal cycles of pelagic production and consumption, *Progress in oceanography*, 36, 77-167.
- Longhurst, A., 1995b. Seasonal cycles of pelagic production and consumption, *Progress in Oceanography*, 36, 77-167.
- Longhurst, A.R., 1998. *Ecological Geography of the Sea*, edn, Vol., pp. Pages, Elsevier Science, New York.
- Lévy, M., 2008. The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence. in *Transport and Mixing in Geophysical Flows*, pp. 219-261 Springer.
- Macdonald, A.M. & Wunsch, C., 1996. An estimate of global ocean circulation, *Nature*, 382, 436-439.
- Malanotte-Rizzoli, P., Artale, V., Borzelli-Eusebi, G.L., Brenner, S., Civitarese, G., Crise, A., Font, J., Gacic, M., Kress, N., Marullo, S., Ozsoy, E., Ribera d'Alcalà, M., Roether, W., Schroeder, K., Sofianos, S., Tanhua, T., Theocharis, A., Alvarez, M., Ashkenazy, Y., Bergamasco, A., Cardin, V., Carniel, S., D'Ortenzio, F., Garcia-Ladona, E., Garcia-Lafuente, J.M., Gogou, A., Gregoire, M., Hainbucher, D., Kontoyannis, H., Kovacevic, V., Krasakapoulou, E., Krokos, G., Incarbona, A., Mazzocchi, M.G., Orlic, M., Pascual, A., Poulain, P.M., Rubino, A., Siokou-Frangou, J., Souvermezoglou, E., Sprovieri, M., Taupier-Letage, I., Tintoré, J. & Triantafyllou, G., 2013. Physical forcing and physical/biochemical variability of the Mediterranean Sea: a review of unresolved issues and directions for future research, *Ocean Sci. Discuss.*, 10, 1205-1280.
- Manca, B.B., Kovačević, V., Gačić, M. & Viezzoli, D., 2002. Dense water formation in the Southern Adriatic Sea and spreading into the Ionian Sea in the period 1997–1999, *Journal of Marine Systems*, 33–34, 133-154.
- Mann, K.H. & Lazier, J.R.N., 1996. *Dynamics of Marine Ecosystems: biological- physical interactions in the oceans*, edn, Vol., pp. Pages, Blackwell Publishing, New York.
- Mariani, P., Andersen, K.H., Visser, A.W., Barton, A.D. & Kiørboe, T., 2013. Control of plankton seasonal succession by adaptive grazing, *Limnology and oceanography*, 58, 173-184.
- Maritorea, S., Siegel, D.A. & Peterson, A.R., 2002. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications, *Applied Optics*, 41, 2705-2714.
- Martinez, E., Antoine, D., D'Ortenzio, F. & de Boyer Montégut, C., 2011. Phytoplankton spring and fall blooms in the North Atlantic in the 1980s and 2000s, *J. Geophys. Res.*, 116, C11029.
- Martinez, E., Antoine, D., D'Ortenzio, F. & Gentili, B., 2009. Climate-Driven Basin-Scale Decadal Oscillations of Oceanic Phytoplankton, *Science*, 326, 1253-1256.
- Marty, J.C. & Chiaverini, J., 2002. Seasonal and interannual variations in phytoplankton production at DYFAMED time-series station, Northwestern Mediterranean Sea, *Deep Sea Research II*.
- Mattia, G., Zavatarelli, M., Vichi, M. & Oddo, P., 2013. The Eastern Mediterranean Sea biogeochemical dynamics in the 1990s: A numerical study, *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- McClain, C.R., 2009. A decade of satellite ocean color observations*, *Annual Review of Marine Science*, 1, 19-42.
- McClain, C.R., Feldman, G.C. & Hooker, S.B., 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, *Deep Sea Research Part II*, 51, 5-42.
- McGillicuddy, D.J., Anderson, L.A., Bates, N.R., Bibby, T., Buesseler, K.O., Carlson, C.A., Davis, C.S., Ewart, C., Falkowski, P.G. & Goldthwait, S.A., 2007. Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms, *Science*, 316, 1021-1026.
- McGillicuddy, D.J., Kosneyrev, A., Ryan, J.P. & Yoder, J.A., 2001. Covariation of mesoscale ocean color and sea-surface temperature patterns in the Sargasso Sea, *Deep Sea Research II*, 48, 1823-1836.
- McGillicuddy, D.J. & Robinson, A.R., 1997. Eddy-induced nutrient supply and new production in the Sargasso Sea, *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 44, 1427-1450.
- Merle, J., 2006. *Océan et climat*, edn, Vol., pp. Pages, IRD Editions.
- Mignot, A., Claustre, H., Uitz, J., Poteau, A., D'Ortenzio, F. & Xing, X., 2014. Understanding the seasonal dynamics of phytoplankton biomass and the deep chlorophyll maximum in oligotrophic environments: a Bio-Argo float investigation, *Global Biogeochemical Cycles*.
- Moran, X.A.G., Taupier-Letage, I., Vázquez-Domínguez, E.V., Ruiz, S., Arin, L., Raimbault, P. & Estrada, M., 2001. Physical-biological coupling in the Algerian Basin (SW Mediterranean): influence of mesoscale instabilities on the biomass and production of phytoplankton and bacterioplankton, *Deep Sea Research*, 48, 405-437.
- Morel, A. & André, J.M., 1991. Pigment distribution and primary production in the western Mediterranean as derived from CZCS observations, *Journal of Geophysical Research*, 96, 12685-12691.

- Morel, A. & Berthon, J.F., 1989. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: relationship reinvestigated in view of remote-sensing applications, *Limnology and oceanography*, 34, 1545-1562.
- Morel, A., Claustre, H. & Gentili, B., 2010. The most oligotrophic subtropical zones of the global ocean: similarities and differences in terms of chlorophyll and yellow substance, *Biogeosciences*, 7, 3139-3151.
- Moutin, T. & Prieur, L., 2012. Influence of anticyclonic eddies on the Biogeochemistry from the Oligotrophic to the Ultraoligotrophic Mediterranean (BOUM cruise), *Biogeosciences*, 9, 3827-3855.
- Niewiadomska, K., Claustre, H., Prieur, L. & D'Ortenzio, F., 2008. Submesoscale physical-biogeochemical coupling across the Ligurian Current (northwestern Mediterranean) using a bio-optical glider, *Limnology and Oceanography*, 53, 2210-2225.
- Obata, A., Ishizaka, J. & Endoh, M., 1996. Global verification of critical depth theory for phytoplankton bloom with climatological in situ temperature and satellite ocean color data, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 101, 20657-20667.
- Oschlies, A., 2002. Can eddies make ocean deserts bloom?, *Global Biogeochemical Cycles*, 16.
- Pascual, A., Pujol, M.-I., Larnicol, G., Le Traon, P.-Y. & Rio, M.-H., 2007. Mesoscale mapping capabilities of multisatellite altimeter missions: First results with real data in the Mediterranean Sea, *Journal of Marine Systems*, 65, 190-211.
- Pelland, N.A., Eriksen, C.C. & Lee, C.M., 2013. Subthermocline eddies over the Washington continental slope as observed by Seagliders, 2003–09, *Journal of Physical Oceanography*, 43, 2025-2053.
- Perry, M.J., Sackmann, B.S., Eriksen, C.C. & Lee, C.M., 2008. Seaglider observations of blooms and subsurface chlorophyll maxima off the Washington coast, USA, *Limnology and Oceanography*, 53, 169–179.
- Pickard, G.L. & Emery, W.J., 1990. *Descriptive physical oceanography* edn, Vol., pp. Pages, Pergamon Press, Oxford.
- Poulain, P.M., Barbanti, R., Font, J., Cruzado, A., Millot, C., Gertman, I., Griffa, A., Molcard, A., Rupolo, V., Le Bras, S. & de la Villeon, L.P., 2007. MedArgo: a drifting profiler program in the Mediterranean Sea, *Ocean Science*, 3, 379-395.
- Prentice, I., Cramer, W., Harrison, S., Leemans, P., Monserud, R. & Solomon, A., 1992. A global biome model based on physiology and dominance, soil properties and climate, *Journal of Biogeography*, 19, 117-134.
- Pujo-Pay, M., Conan, P., Oriol, L., Cornet-Barthaux, V., Falco, C., Ghiglione, J.-F., Goyet, C., Moutin, T. & Prieur, L., 2011. Integrated survey of elemental stoichiometry (C, N, P) from the western to eastern Mediterranean Sea, *Biogeosciences*, 8, 883-899.
- Racault, M.-F., Le Quéré, C., Buitenhuis, E., Sathyendranath, S. & Platt, T., 2012. Phytoplankton phenology in the global ocean, *Ecological Indicators*, 14, 152-163.
- Rego, F.C. & Rocha, M.S., 2014. Climatic Patterns in the Mediterranean region, *ecologia mediterranea*, 40, 50.
- Resplandy, L., Vialard, J., Lévy, M., Aumont, O. & Dandonneau, Y., 2009. Seasonal and intraseasonal biogeochemical variability in the thermocline ridge of the southern tropical Indian Ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 114.
- Rhines, P.B., 2001. Mesoscale Eddies. in *Encyclopedia of ocean sciences*, pp. 1717–1729, eds. Steele, J. H., Turekian, K. K. & Thorpe, S. A. Academic Press.
- Ribera d'Alcalà, M., Civitarese, G., Conversano, F. & Lavezza, R., 2003. Nutrient ratios and fluxes hint an overlooked processes in the Mediterranean Sea, *Journal of Geophysical Research*, 108, 8106.
- Riley, G.A., 1946. Factors controlling phytoplankton populations on Georges Bank, *Journal of Marine Research [J. Mar. Res.]*, 6, 54-73.
- Robinson, A.R. & Golnaraghi, M., 1995. The Physical and dynamical oceanography of the Mediterranean sea. in *Ocean Processes in Climate Dynamics: Global and Mediterranean Examples*, pp. 255-306, eds. Malanotte-Rizzoli, P. & Robinson, A. R. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Robinson, A.R., Leslie, W.G., Theocharis, A. & Lascaratos, A., 2001. *Mediterranean Sea circulation*, edn, Vol. Vol. 3 (I-M), pp. Pages, Academic Press, Harcourt Science & Technology, Harcourt Place, 32 Jamestown Road London NW1 7BY UK, [URL <http://www.academicpress.com>].
- Roemmich, D., Johnson, G., Riser, S., Davis, R., Gilson, J., Owens, W., Garzoli, S., Schmid, C. & Ignaszewski, M., 2009. The Argo Program Observing the Global Ocean with Profiling Floats, *Oceanography*, 22, 34-43.
- Ruiz, S., Renault, L., Garau, B. & Tintore, J., 2012. Underwater glider observations and modeling of an abrupt mixing event in the upper ocean, *Geophysical Research Letters*, 39.
- Ruti, P., Marullo, S., D'Ortenzio, F. & Tremant, M., 2008. Comparison of analyzed and measured wind speeds in the perspective of oceanic simulations over the Mediterranean basin: Analyses, QuikSCAT and buoy data, *Journal of Marine Systems*, 70, 33-48.

- Sallée, J.-B., Llorc, J., Tagliabue, A. & Lévy, M., 2015a. Characterization of distinct bloom phenology regimes in the Southern Ocean, *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, fsv069.
- Sallée, J.-B., Llorc, J., Tagliabue, A. & Lévy, M., 2015b. Characterization of distinct bloom phenology regimes in the Southern Ocean, *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 72, 1985-1998.
- Sarmiento, H., Montoya, J., Vazquez-Dominguez, E., Vaque, D. & Gasol, J., 2010. Warming effects on marine microbial food web processes: how far can we go when it comes to predictions?, *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 365, 2137-2149.
- Sarmiento, J., Gruber, N., Brzezinski, M. & Dunne, J., 2004. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity, *Nature*, 427, 56-60.
- Sathyendranath, S., Longhurst, A., Caverhill, C.M. & Platt, T., 1995. Regionally and seasonally differentiated primary production in the North Atlantic, *Deep-Sea Research (Part I, Oceanographic Research Papers)*, 42, 1773-1802.
- Schmitz, W.J., 1995. On the interbasin-scale thermohaline circulation, *Reviews of Geophysics*, 33, 151-173.
- Schneider, B., Bopp, L., Gehlen, M., Segschneider, J., Frolicher, T.L., Cadule, P., Friedlingstein, P., Doney, S.C., Behrenfeld, M.J. & Joos, F., 2008. Climate-induced interannual variability of marine primary and export production in three global coupled climate carbon cycle models, *Biogeosciences*, 5, 597-614.
- Send, U., Font, J., Krahnemann, G., Millot, C., Rhein, M. & Tintoré, J., 1999. Recent advances in observing the physical oceanography of the western Mediterranean Sea, *Progress in Oceanography*, 44, 37-64.
- Siegel, D.A., Doney, S.C. & Yoder, J.A., 2002. The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis, *Science*, 296, 730-733.
- Siokou-Frangou, I., Christaki, U., Mazzocchi, M., Montresor, M., Ribera d'Alcalà, M., Vaque, D. & Zingone, A., 2010. Plankton in the open Mediterranean Sea: a review, *Biogeosciences*, 7, 1543-1586.
- Smayda, T., 1998. Patterns of variability characterizing marine phytoplankton, with examples from Narragansett Bay, *ICES Journal of Marine Science*, 55, 562-573.
- Smetacek, V. & Passow, U., 1990. Spring bloom initiation and Sverdrup's critical-depth model, *Limnology and oceanography*, 35, 228-234.
- Sournia, A., 1973. La production primaire planctonique en Méditerranée: Essai de mise à jour, *Bull. Et. Comm. Médit. Special Issue*, 5, 1-128.
- Stramska & Dickey, 1992. Short term variations of the Bio-optical properties of the ocean in response to cloud induced irradiance fluctuations, *Journal of Geophysical Research*, 97, 5713.
- Stramska, M., 2005. Interannual variability of seasonal phytoplankton blooms in the north polar Atlantic in response to atmospheric forcing, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 110.
- Sverdrup, H.U., 1953. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton., *Journal du Conseil International de l'Exploration de la Mer*, 18, 287-295.
- Taillandier, V., D'Ortenzio, F. & Antoine, D., 2012. Carbon fluxes in the mixed layer of the Mediterranean Sea in the 1980s and the 2000s, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 65, 73-84.
- Taillandier, V., Griffa, A., Poulain, P.M. & Béranger, K., 2006. Assimilation of Argo float positions in the north western Mediterranean Sea and impact on ocean circulation simulations, *Geophysical research letters*, 33.
- Taupier-Letage, I., Puillat, I., Millot, C. & Raimbault, P., 2003. Biological response to mesoscale eddies in the Algerian Basin, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 108.
- Taylor, J.R. & Ferrari, R., 2011. Shutdown of turbulent convection as a new criterion for the onset of spring phytoplankton blooms.
- Testor, P. & Gascard, J.C., 2005. Large scale flow separation and mesoscale eddy formation in the Algerian Basin, *Progress in Oceanography*, 66, 211-230.
- Thingstad, T.F., Krom, M., Mantoura, R., Flaten, G., Groom, S., Herut, B., Kress, N., Law, C., Pasternak, A. & Pitta, P., 2005. Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic eastern Mediterranean, *Science*, 309, 1068-1071.
- Thingstad, T.F. & Rassoulzadegan, F., 1999. Conceptual models for the biogeochemical role of the photic zone microbial food web, with particular reference to the Mediterranean Sea, *Progress in Oceanography*, 44, 271-286.
- Timmermans, M.-L. & Winsor, P., 2013. Scales of horizontal density structure in the Chukchi Sea surface layer, *Continental Shelf Research*, 52, 39-45.
- Trigo, I.F., Bigg, G.R. & Davies, T.D., 2002. Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean, *Monthly Weather Review*, 130, 549-569.
- Uitz, J., Claustre, H., Morel, A. & Hooker, S.B., 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 111.

- Uitz, J., Stramski, D., D'Ortenzio, F., Gentili, B. & Claustre, H., 2011. Estimates of phytoplankton class-specific and total primary production in the Mediterranean Sea from satellite ocean color observations, *Geophysical Research Letters*, In revision.
- Uz, B.M. & Yoder, J.A., 2004. High frequency and mesoscale variability in SeaWiFS chlorophyll imagery and its relation to other remotely sensed oceanographic variables, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51, 1001-1017.
- Vargas, M., Brown, C.W. & Sapiano, M.R.P., 2009. Phenology of marine phytoplankton from satellite ocean color measurements, *Geophysical Research Letters*, 36.
- Volpe, G., Santoleri, R., Vellucci, V., Ribera d'Alcalà, M., Marullo, S. & D'Ortenzio, F., 2007. The colour of the Mediterranean Sea: global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates, *Remote Sensing of Environment*, 107, 625-638.
- Waniek, J.J., 2003. The role of physical forcing in initiation of spring blooms in the northeast Atlantic, *Journal of Marine Systems*, 39, 57-82.
- Williams, R.G. & Follows, M.J., 2003. Physical Transport of Nutrients and the Maintenance of Biological Production. in *Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change*, pp. 19-51, ed. Fasham, M. Springer.
- Wilson, C. & Adamec, D., 2002. A global view of bio-physical coupling from SeaWiFS and TOPEX satellite data, 1997–2001, *Geophysical Research Letters*, 29, 98-102.
- Wilson, C. & Coles, V.J., 2005. Global climatological relationships between satellite biological and physical observations and upper ocean properties, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 110.
- Xing, X., Claustre, H., Wang, H., Poteau, A. & Fabrizio, D.O., 2014. Seasonal dynamics in colored dissolved organic matter in the Mediterranean Sea: Patterns and drivers, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 83, 93-101.
- Xing, X., Morel, A., Claustre, H., Antoine, D., D'Ortenzio, F., Poteau, A., Mignot, A., Lee, Z., Shang, S. & Hu, C., 2011. Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling Bio-Argo floats: Chlorophyll a retrieval, *J. Geophys. Res.*, 116, C06020.
- Xing, X., Morel, A., Claustre, H., D'Ortenzio, F. & Poteau, A., 2012. Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorometry from autonomous profiling Bio-Argo floats: 2. Colored dissolved organic matter absorption retrieval, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 117.
- Yoder, J.A. & Kennelly, M.A., 2006. Ocean Variability, *Oceanography*, 19, 152.
- Zakardjian, B., & Prieur, L. 1994. A numerical study of primary production related to vertical turbulent diffusion with special reference to vertical motions of the phytoplankton cells in nutrient and light fields. *Journal of Marine Systems*, 5(3), 267-295.
- Zenk, W., 2001. Abyssal currents. in *Encyclopedia of ocean sciences*, pp. 12-27, eds. Steele, J. H., Turekian, K. K. & Thorpe, S. A. Academic Press.

Annexe

Sélection de 5 papiers:

1. D'ORTENZIO F., d'Alcalà M.R., 2009, "On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis.", *Biogeosciences* 6 (2), 139-148.
2. D'ORTENZIO, F., Iudicone, D., Montegut, C.D., Testor, P., Antoine, D., Marullo, S., Santoleri, R., & Madec, G., 2005. "Seasonal variability of the mixed layer depth in the Mediterranean Sea as derived from in situ profiles". *Geophysical Research Letters* 32 (12).
3. D'ORTENZIO F., Lavigne H., Besson F., Claustre H., Coppola L., Garcia N., Laës-Huon A., Le Reste S., Malardé D., Migon C., Morin P., Mortier L., Poteau A., Prieur L., Raimbault V., Testor P., 2014, "Observing mixed layer depth, nitrate and chlorophyll concentrations in the northwestern Mediterranean: A combined satellite and NO₃ profiling floats experiment". *Geophysical Research Letters* 41: 6443-6451 | doi: 10.1002/2014gl061020.
4. D'ORTENZIO, F., Antoine D., Martinez E., Ribera d'Alcalà M., 2012, "Phenological changes of oceanic phytoplankton in the 1980s and 2000s as revealed by ocean-color remote-sensing observations". *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB4003, doi:10.1029/2011GB004269.
5. Pasqueron de Fommervault O., D'ORTENZIO F., Mangin A., Serra R., Migon C., Claustre H., Ribera d'Alcalà M., Prieur L., Taillandier V., Schmechtig C., Poteau A., Leymarie E., Dufour A., Besson F., Obolensky G., 2015, "Seasonal variability of nutrient concentrations in the Mediterranean Sea: Contribution of Bio-Argo floats." *Journal of Geophysical Research -Oceans* 120 | doi: 10.1002/2015JC011103.

Un nouveau paradigme pour l'observation des interactions physico-chimico-biologiques dans l'océan ouvert.

Fabrizio D'Ortenzio

HDR 2016

Resumé

Mon activité de recherche vise à améliorer nos connaissances sur l'interaction physique - biologie dans l'océan et en particulier sur le rôle du forçage physique dans la distribution spatio-temporelle du phytoplancton océanique. Dans ce contexte, j'utilise plusieurs outils scientifiques : les observations satellitaires (notamment de la couleur de l'océan), les données des campagnes et les observations provenant de la nouvelle génération des plates-formes autonomes *in situ* (flotteurs profileurs et gliders).

Mon projet de recherche se focalise sur la continuation de mes thématiques de recherche (variabilité spatio-temporelle de la biomasse océanique et analyse des interactions physico-chimico-biologiques qui pilotent la dynamique phytoplanctonique), avec une attention spécifique à la Mer Méditerranée. Une nouvelle approche (paradigme), basée sur les plateformes autonomes de mesure intégrées à l'observation satellitaire est ici proposée.

Abstract

My research activity aims to improve our understanding of the physical-biological interaction in the ocean and, in particular, to enhance our comprehension on the role of physical forcing in the spatial and temporal distribution of oceanic phytoplankton. In this context, I use several scientific tools: satellite observations (especially the ocean color), cruises data and observations obtained with the new generation of *in situ* autonomous platforms (profiling floats and gliders) .

My research project focuses on the continuation of my research themes (spatial and temporal variability of ocean biomass and analysis of physical-chemical-biological interactions that drive the phytoplankton dynamics), with a specific attention to the Mediterranean Sea. A new approach (paradigm), based on the synergistic use of autonomous platforms and satellite observations, is proposed here.