



**HAL**  
open science

# Relation entre les forçages physiques et la dynamique de l'oxygène dissous en Méditerranée

Laurent Coppola

► **To cite this version:**

Laurent Coppola. Relation entre les forçages physiques et la dynamique de l'oxygène dissous en Méditerranée. Océan, Atmosphère. Sorbonne Université, 2018. tel-04023990

**HAL Id: tel-04023990**

**<https://hal.science/tel-04023990>**

Submitted on 10 Mar 2023

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

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

**Habilitation à Diriger des Recherches Spécialité :  
Océanographie et Environnement Marin**

# **Relation entre les forçages physiques et la dynamique de l'oxygène dissous en Méditerranée**

Par Laurent Coppola

Institut de la Mer de Villefranche  
Sorbonne Université  
Laboratoire d'Océanographie de Villefranche UMR 7093 SU-CNRS

Date de soutenance: 06 décembre 2018

## **Composition du jury**

**Dr. Géraldine Sarthou**, Laboratoire des sciences de l'Environnement MARin, Institut Universitaire Européen de la Mer, Plouzané (rapporteure)

**Dr. Sabine Schmidt**, Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux, Université de Bordeaux, Pessac (rapporteure)

**Pr. Pieter Van Beek**, Laboratoire d'Études en Géophysique Océanographie Spatiales, Université Paul Sabatier, Toulouse (rapporteur)

**Dr. Christophe Rabouille**, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Commissariat à l'Énergie Atomique, Gif-sur-Yvette (examineur)

**Pr. Paul Nival**, Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer, Sorbonne Université, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, Villefranche-sur-Mer (président du jury).

## PREAMBULE

Mon activité de recherche vise à améliorer notre compréhension de l'impact des forçages physiques sur la dynamique des éléments biogéochimiques en Méditerranée et, plus particulièrement, celui de l'oxygène dissous. En tant que physicien adjoint CNAP, cette activité représente 50% de mon temps de travail. Elle est très liée à mon activité d'observation et notamment au réseau d'observation MOOSE (« Mediterranean Ocean Observing System for the Environment ») implanté dans le bassin nord-occidental depuis 2010.

Dans ce contexte, j'ai mis en œuvre une approche intégrée multiplateformes comme celle implémentée dans le réseau MOOSE. En effet, le grand nombre de données et la diversité des variables enregistrées par les plateformes autonomes ces dernières années constituent une réelle avancée dans l'observation de l'océan et un réel défi. Grâce à ces nouvelles plateformes, et en particulier grâce aux données de planeurs sous-marins (gliders) et des flotteurs profileurs Argo, nous avons désormais accès à de nombreux processus clés qui échappaient aux techniques classiques d'observation par les navires océanographiques. Ces plateformes nous permettent ainsi d'avoir une description plus fine des processus physiques de l'océan et de leurs impacts sur les cycles biogéochimiques. Les données récoltées par les gliders et les flotteurs profileurs Argo en Méditerranée nord-occidentale sont particulièrement bien intégrées dans le réseau d'observation MOOSE. En outre, ce dispositif implique l'organisation de nombreuses campagnes océanographiques et la maintenance de lignes de mouillage hauturières, sans lesquelles les données collectées par les plateformes autonomes perdraient grandement de leur richesse.

Grâce à ce réseau d'observation dense, j'ai pu aborder les échelles spatiales et temporelles qui influencent les processus physiques, ainsi que leur relation avec la variabilité du contenu biogéochimique et en particulier celui de l'oxygène dissous. Pour cela, le bassin nord-occidental de la Méditerranée est le terrain de jeu idéal puisqu'il combine à la fois les observations à long terme (LOP) de type MOOSE et les observations spéciales (SOP) de type HYMEX/DEWEX dans une région fortement influencée par les forçages physiques (convection, mélange, ventilation) et dont les réponses aux changements sont visibles à l'échelle humaine.

# SOMMAIRE

<b>PREAMBULE .....</b>	<b>2</b>
<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>3</b>
<b>CURRICULUM VITAE .....</b>	<b>5</b>
1. SITUATION ACTUELLE	5
2. FORMATION	5
3. VALORISATION SCIENTIFIQUE	5
4. ACTIVITÉS DE TERRAIN (DEPUIS 2006)	5
5. ENGAGEMENT AU NIVEAU NATIONAL ET INTERNATIONAL	6
6. RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES	6
7. EXPERTISE	6
8. ENCADREMENTS	7
9. ENSEIGNEMENT (PÉRIODE 2012-2017)	8
10. LISTES DES PUBLICATIONS	9
<b>CADRE SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>14</b>
1. LA CIRCULATION GÉNÉRALE EN MÉDITERRANÉE	14
2. LA MER MÉDITERRANÉE, UN « HOT-SPOT » DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN PERPÉTUELLE ÉVOLUTION	16
3. LE PHÉNOMÈNE DE CONVECTION PROFONDE DANS LE BASSIN NORD-OCCIDENTAL	18
3.1. IMPACT SUR LES EAUX INTERMÉDIAIRES .....	19
3.2. IMPACT SUR LES EAUX PROFONDES.....	19
3.3. LE PROCESSUS DE VENTILATION .....	21
<b>PROJETS DE RECHERCHE .....</b>	<b>23</b>
1. LA VENTILATION DES EAUX DENSES EN MÉDITERRANÉE NORD-OCCIDENTALE (OPÉRATIONS DEWEX ET HYMEX SOP2)	23
2. LA VARIABILITÉ SAISONNIÈRE ET INTERANNUELLE DU CONTENU BIOGÉOCHIMIQUE EN MER LIGURE	26
2.1. QUELS IMPACTS SUR LES NUTRIMENTS ?.....	30
2.2. L'EXPORT DE PARTICULES ET DE CARBONE ORGANIQUE EN MER LIGURE.....	31
3. POUR ALLER PLUS LOIN DANS L'OBSERVATION DES PROCESSUS EN MER LIGURE	34
<b>QUELLES ORIENTATIONS POUR LES ANNÉES À VENIR ? .....</b>	<b>38</b>

1. LE RÔLE CLEF DE LA LIW ET DE L'OML EN MÉDITERRANÉE	38
2. RENFORCER LES CAPACITÉS D'OBSERVATION À LA SOURCE DE LA LIW	40
3. COMPRENDRE LA VARIABILITÉ SAISONNIÈRE ET INTERANNUELLE DE L'OML : APPROCHE OBSERVATIONS <i>IN SITU</i> ET MODÈLE COUPLÉ	42
4. AMÉLIORER NOTRE COMPRÉHENSION DE LA BIOGÉOCHIMIE EN MÉDITERRANÉE À L'AIDE D'UN RÉSEAU DE NEURONES (SUJET DE THÈSE DE M. FOURRIER)	43
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>48</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>52</b>

# CURRICULUM VITAE

## 1. Situation actuelle

Laurent COPPOLA

Né le 09/01/1972 à Toulouse, marié

Physicien Adjoint CNAP (échelon 6) à l'Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer (OOV)

Recherche au Laboratoire Océanographie de Villefranche (LOV-UMR7093)

Tâches de service dans le SNO MOOSE (« Mediterranean Ocean Observing System for the Environment »)

Enseignement à Sorbonne Université (station marine de Villefranche)

## 2. Formation

2002 Thèse en géochimie marine au LEGOS, OMP. Thème : Export de carbone à l'aide des isotopes U-Th dans l'océan Austral, Arctique et Méditerranée. Resp. : M. Roy-Barman/C. Jeandel

2002 - 2005 Post-doctorat au Laboratoire de Géochimie Isotopique au Museum National d'Histoire Naturelle de Stockholm (bourse « Marie Curie Fellowship »). Thème : hydrologie, océanographie, géochimie (région Pacifique/Arctique). Resp. : P. Andersson

2005 - 2006 Post-doctorat au GEOTOP de l'UQAM (Québec, Canada). Thème : application des isotopes Pa/Th en paléo-océanographie (région Arctique). Resp. : C. Hillaire-Marcel

Sept 2006 Physicien adjoint CNAP à l'OOV (section SCOA)

## 3. Valorisation scientifique

ORCID ID : 0000-0003-0473-1129

**33 papiers de rang A (période 2001-2018) dont 7 en premier auteur**

H-index 21 (Google Scholar)

## 4. Activités de terrain (depuis 2006)

28 campagnes en mer dont 15 campagnes mensuelles CNFC (MOOSE-DYFAMED), 7 campagnes annuelles de type observation CNFH (MOOSE-GE) et 7 campagnes de type recherche CNFC (OMER, ISOFLORE, ...). Parmi ces campagnes, j'ai opéré en tant que chef de mission sur 6 campagnes mensuelles et 3 campagnes MOOSE-GE (NO L'ATALANTE)

## 5. Engagement au niveau national et international

- EMSO-Link (2017-2020; H2020-731036): Implementation of the Strategy to Ensure the EMSO ERIC's Long-term Sustainability. Participation to the upcoming European Ocean Observing System (EOOS). [Team leader of the EMSO Ligure node](#)
- JERICO-NEXT (2015-2019; FP7-644410): Joint European Research Infrastructure network for Coastal Observatory – Novel European eXpertise for coastal observatories. Strengthening and enlarging the European coastal sites. [Member of the Users Panel](#)
- FIXO3(2013-2017; FP7 312463): Integrating multidisciplinary fixed point open ocean observatories. CNRS representative for French sites (Mediterranean and Atlantic). Leader of Best Practices Procedures report. [Task leader 3.1 WP3](#).
- JERICO (2011-2015; FP7-262584): Integrating a European coastal marine observatory network. Participation for harmonizing coastal fixed platforms (WP3 & 4)
- WINKLEX (LEFE-GMMC 2017-2018) : Intercomparaison des mesures Winkler en milieu hauturier. [Responsable projet](#)
- LOVable (LEFE-GMMC 2017-2018) : Etude de la zone de formation d'eau dense et du minimum d'oxygène dans le bassin Levantin à l'aide de flotteurs Argo-O<sub>2</sub>. [Responsable projet](#)
- MOOXY et MOOXY2 (LEFE-GMMC 2014-2016) : Implémentation de 20 flotteurs ARGO-O<sub>2</sub> en Méditerranée occidentale (volet recherche & opérationnel). [Responsable projet](#)
- ASICS-MED (ANR 2012-2016 ; ANR-12-BS06-0003) : Couplage Océan-Atmosphère en présence de structures sub-mésoéchelle. Fourniture des données in-situ pendant la campagne HYMEX SOP2 (flotteurs Argo, gliders, bateaux). [Partenaire pour les flotteurs Argo GMMC](#)

## 6. Responsabilités administratives

### Au niveau national :

- Membre de la section SCOA du CNAP (second mandat)
- Membre du Comité Scientifique et Technique de l'IR EMSO-France
- Responsable de la Cellule Piège (INSU)
- Membre du comité d'Observation à l'IMEV
- Leader de la HYMEX Task Team TTO4 (« Observing the ocean »)

### Au niveau international :

- Membre de l'ERIC-EMSO (resp. du nœud EMSO-LIGURE)
- Membre du Comité Scientifique OceanSites

## 7. Expertise

- Co-responsable (avec V. Thierry, LOPS, IFREMER) d'un groupe d'experts nationaux sur les mesures et les données oxygène en océanographie dans le but d'améliorer la chaîne

d'acquisition, le traitement et l'archivage des données en milieu hauturier (CORIOLIS, SOERE CTDO2).

- Rédaction d'un rapport européen sur les « Best Practices » pour la maintenance et le contrôle qualité des données obtenues à partir des plateformes fixes (FIXO3). Publication au JCOMM report (« Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology »)

## 8. Encadrements

### Thèses :

1- M. Fourrier (Sorbonne Université 2018-2021, resp. F. D'Ortenzio, LOV) : « Impact des forçages physiques sur la dynamique des éléments biogéochimiques en Méditerranée : utilisation combinée des observations *in situ* et d'un réseau de neurones ». Encadrement 80%

2- O. Pasqueron de Fommervault (UPMC 2012-2015, resp. C. Migon, LOV) : « Dynamique des nutriments en Méditerranée : des campagnes océanographiques aux flotteurs Bio-Argo ».

- Pasqueron de Fommervault, O., C. Migon, F. D'Ortenzio, M. Ribera d'Alcala, and L. Coppola (2015), 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, doi: 10.1016/j.dsr.2015.02.006

3- Bosse A. (UPMC 2012-2015, resp. P. Testor) : « Circulation générale et couplage physique-biogéochimie à (sous-)mésoséchelle en Méditerranée nord-occidentale à partir de données *in situ* ».

- Bosse, A., P. Testor, L. Mortier, L. Prieur, V. Taillandier, F. d'Ortenzio, and L. Coppola (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, doi:10.1002/2014jc010263.
- Bosse, A., P. Testor, L. Houpert, P. Damien, L. Prieur, D. Hayes, V. Taillandier, X. Durrieu de Madron, F. d'Ortenzio, L. Coppola, J. Karstensen, and L. Mortier (2016), Scales and dynamics of Submesoscale Coherent Vortices formed by deep convection in the northwestern Mediterranean Sea, Journal of Geophysical Research: Oceans, 121(10), 7716-7742, doi:10.1002/2016jc012144.
- Bosse, A., P. Testor, N. Mayot, L. Prieur, F. D'Ortenzio, L. Mortier, H. Le Goff, C. Gourcuff, L. Coppola, H. Lavigne, and P. Raimbault (2017), A submesoscale coherent vortex in the Ligurian Sea: From dynamical barriers to biological implications, Journal of Geophysical Research: Oceans, 122(8), 6196-6217, doi:10.1002/2016jc012634.

4- Houpert L. (Univ. Perpignan 2011-2013, resp. X. Durrieu de Madron) : « Circulation et variabilité des masses d'eau en Méditerranée nord-occidentale ».

- Houpert, L., X. Durrieu de Madron, P. Testor, A. Bosse, F. D'Ortenzio, M. N. Bouin, D. Dausse, H. Le Goff, S. Kunesch, M. Labaste, L. Coppola, L. Mortier, and P. Raimbault (2016), Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual

5- Heimbürger (Univ. Nice 2008-2010, resp. C. Migon): “Dynamics of chemical contaminants in the open ocean : the Mediterranean sea as an example”.

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

### Stages :

- Master M2 M. Fourier (SU 2017-2018 ; resp. L. Coppola, LOV) : Application d'un réseau de neurones pour améliorer l'observation des paramètres biogéochimiques en mer Méditerranée. Encadrement 80%
- Master M1 M. Fourier (UPMC 2016-2017 ; resp. C. Ulses, LA) : Variabilité de l'oxygène dissous en mer Méditerranée nord occidentale : approche couplée physique-biogéochimie. Encadrement 30%
- Master M2 J. Courboulès (UPMC 2016-2017 ; resp. J.O. Irisson, LOV) : Étude comparative des changements à long terme des écosystèmes côtiers et hauturiers en Méditerranée nord-occidentale. Encadrement 50%
- Master M2 C. Berrached (UPMC 2014-2015 ; resp. L. Coppola, LOV) : Variabilité de l'oxygène dissous en mer Méditerranée nord-occidentale. Encadrement 100%
- Master M2 M. Bretagnon (IUEM 2014-2015 ; resp. A.Paulmier, LEGOS) : La Zone de Minimum d'Oxygène (ZMO) préserve-t-elle ou recycle-t-elle la matière organique (MO) produite dans l'océan ? Encadrement 50%

## 9. Enseignement (période 2012-2017)

La majorité de mes enseignements sont réalisés dans le Master SDUEE OEM (Océanographie et Environnement Marin) de l'UPMC. Les cours sont dispensés de septembre à décembre à la station marine de Villefranche. Ils ont pour objectif de former, à travers une approche pluridisciplinaire, des étudiants hautement qualifiés dans les domaines de l'océanographie biologique, de l'écologie et de la biogéochimie marines, tant d'un point de vue conceptuel que méthodologique. Le Master OEM est adossé au master européen Erasmus-Mundus "Master of Science in Marine Biodiversity and Conservation" (EMBC+). Ce Master européen EMBC+ a aussi évolué vers un Master International dans le cadre du programme Erasmus-Mundus de Erasmus+, intitulé "International Master in Marine Sciences and Biological Resources of the Sea" (IMBRSea). De ce fait, je dispense l'ensemble de mes enseignements de Master 2 en langue anglaise.

Le Master se déroule selon 3 parcours : 1) environnement océanique, 2) environnement côtier, 3) expertise faune-flore mer. J'interviens actuellement dans le parcours 1, et plus précisément dans deux UE :

- IADO : Instrumentation et acquisition de données en océanographie (6 ECTS)
- ROC : Réponse des océans aux changements climatiques et aux perturbations anthropiques (6 ECTS)

Depuis 2 ans, je suis responsable du module ROC avec C. Migon (MCF, Villefranche/Mer). Ce module est orienté en océanographie physique générale et se focalise sur les cycles biogéochimiques. L'effet du changement climatique et l'impact des forçages physiques

sur la biogéochimie sont fortement développés dans cette UE, avec une insistance particulière sur la Méditerranée.

Pendant la période 2012 à 2014, le volume de mes enseignements était peu élevé car : 1) les cours de physique et de biogéochimie marine à la station de Villefranche sont peu demandés, au sens où la station s'inscrit plutôt dans une filière de biologie marine, 2) les cours proposés dans cette thématique sur le campus de Jussieu sont complets et il n'y a pas d'heures disponibles pour des enseignements à Villefranche (déjà le cas pour certains MCF affectés aux stations marines).

De ce fait, depuis 2014, je donne 3 h de cours (« introduction à l'océanographie ») dans le Master Écophysiologie marine de l'Université de Nice (convention entre Nice et Paris). En 2014 et 2015, j'ai enseigné aux Licences de l'UPMC sur le campus de Jussieu sur « l'Orientation et l'Insertion Professionnelle » (OIP) avec 15 et 20 heures de cours par an. Enfin, depuis 2016, j'enseigne aux élèves de l'ENS de Paris (niveau M1) pendant de leur stage de terrain en océanographie/géophysique à la station de Villefranche-sur-Mer (3h de cours par an). Actuellement mon volume horaire est proche du standard pour un Physicien Adjoint CNAP.

## 10. Listes des publications

### Articles publiés dans des revues à comité de lecture :

1. Bretagnon, M., Paulmier, A., Garçon, V., Dewitte, B., Illig, S., Leblond, N., **Coppola, L.**, Campos, F., Velasco, F., Panagiotopoulos, C., Oschlies, A., Hernandez-Ayon, J. M., Maske, H., Vergara, O., Montes, I., Martinez, P., Carrasco, E., Grelet, J., Desprez-De-Gesincourt, O., Maes, C., and Scouarnec, L.: Modulation of the vertical particle transfer efficiency in the oxygen minimum zone off Peru, *Biogeosciences*, 15, 5093-5111, <https://doi.org/10.5194/bg-15-5093-2018>, 2018.
2. Djaoudi K, Van Wambeke F, **Coppola L**, D'Ortenzio F, Helias-Nunige S, Raimbault P, Taillandier V, Testor P, Wagener T and Pulido-Villena E (2018) Sensitive Determination of the Dissolved Phosphate Pool for an Improved Resolution of Its Vertical Variability in the Surface Layer: New Views in the P-Depleted Mediterranean Sea. *Front. Mar. Sci.* 5:234. doi: 10.3389/fmars.2018.00234
3. Testor, P., A. Bosse, L. Houpert, F. Margirier, L. Mortier, H. Legoff, D. Dausse, M. Labaste, J. Karstensen, D. Hayes, A. Olita, A. Ribotti, K. Schroeder, J. Chiggiato, R. Onken, E. Heslop, B. Mourre, F. D'Ortenzio, N. Mayot, H. Lavigne, O. de Fommervault, L. **Coppola, L.** Prieur, V. Taillandier, X. Durrieu de Madron, F. Bourrin, G. Many, P. Damien, C. Estournel, P. Marsaleix, I. Taupier-Letage, P. Raimbault, R. Waldman, M.-N. Bouin, H. Giordani, G. Caniaux, S. Somot, V. Ducrocq, and P. Conan (2018), Multiscale Observations of Deep Convection in the Northwestern Mediterranean Sea during Winter 2012-2013 Using Multiple Platforms, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, doi:10.1002/2016jc012671.
4. **Coppola, L.**, L. Legendre, D. Lefevre, L. Prieur, V. Taillandier, and E. Diamond Riquier (2018), Seasonal and inter-annual variations of dissolved oxygen in the northwestern Mediterranean Sea (DYFAMED site), *Progress in Oceanography*, 162, 187-201, doi:10.1016/j.pocean.2018.03.001.
5. Taillandier, V., T. Wagener, F. D'Ortenzio, N. Mayot, H. Legoff, J. Ras, **L. Coppola**, O. Pasqueron de Fommervault, C. Schmechtig, E. Diamond, H. Bittig, D. Lefevre, E. Leymarie, A. Poteau, and L. Prieur (2017), Hydrography in the Mediterranean Sea during

- a cruise with RV in May 2015, *Earth System Science Data Discussions*, 1-30, doi:10.5194/essd-2017-119.
6. Dolan, J. R., M. Ciobanu, S. Marro, and **L. Coppola** (2017), An exploratory study of heterotrophic protists of the mesopelagic Mediterranean Sea, *ICES Journal of Marine Science*, doi:10.1093/icesjms/fsx218.
  7. **Coppola, L.**, L. Prieur, I. Taupier-Letage, C. Estournel, P. Testor, D. Lefevre, S. Belamari, S. LeReste, and V. Taillandier (2017), Observation of oxygen ventilation into deep waters through targeted deployment of multiple Argo-O<sub>2</sub> floats in the north-western Mediterranean Sea in 2013, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122
  8. Bosse, A., Testor, P., Mayot, N., Prieur, L., D'Ortenzio, F., Mortier, L., Le Goff, H., Gourcuff, C., **Coppola, L.**, Lavigne, H., Raimbault, P., 2017. A submesoscale coherent vortex in the Ligurian Sea: From dynamical barriers to biological implications. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122
  9. Waldman, R., Somot, S., Herrmann, M., Testor, P., Estournel, C., Sevault, F., Prieur, L., Mortier, L., **Coppola, L.**, Taillandier, V., Conan, P., Dausse, D., 2016. Estimating dense water volume and its evolution for the year 2012-2013 in the Northwestern Mediterranean Sea: An observing system simulation experiment approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 6696-6716.
  10. Ulses, C., Auger, P.A., Soetaert, K., Marsaleix, P., Diaz, F., **Coppola, L.**, Herrmann, M.J., Kessouri, F., Estournel, C., 2016. Budget of organic carbon in the North-Western Mediterranean open sea over the period 2004-2008 using 3-D coupled physical-biogeochemical modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 7026-7055.
  11. Houpert, L., Durrieu de Madron, X., Testor, P., Bosse, A., D'Ortenzio, F., Bouin, M.N., Dausse, D., Le Goff, H., Kunesch, S., Labaste, M., **Coppola, L.**, Mortier, L., Raimbault, P., 2016. Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual variability of mixing and deep water masses for the 2007-2013 Period. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 8139-8171.
  12. Estournel, C., Testor, P., Taupier-Letage, I., Bouin, M.-N., **Coppola, L.**, Durand, P., Conan, P., Bosse, A., Brilouet, P.-E., Beguery, L., Belamari, S., Béranger, K., Beuvier, J., Bourras, D., Canut, G., Doerenbecher, A., Durrieu de Madron, X., D'Ortenzio, F., Drobinski, P., Ducrocq, V., Fourrié, N., Giordani, H., Houpert, L., Labatut, L., Lebeaupin Brossier, C., Nuret, M., Prieur, L., Roussot, O., Seyfried, L., Somot, S., 2016. HyMeX-SOP2: The Field Campaign Dedicated to Dense Water Formation in the Northwestern Mediterranean. *Oceanography*, 29, 196-206.
  13. Estournel, C., Testor, P., Damien, P., D'Ortenzio, F., Marsaleix, P., Conan, P., Kessouri, F., Durrieu de Madron, X., **Coppola, L.**, Lellouche, J.-M., Belamari, S., Mortier, L., Ulses, C., Bouin, M.-N., Prieur, L., 2016. High resolution modeling of dense water formation in the north-western Mediterranean during winter 2012-2013: Processes and budget. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 5367-5392.
  14. Bosse, A., Testor, P., Houpert, L., Damien, P., Prieur, L., Hayes, D., Taillandier, V., Durrieu de Madron, X., d'Ortenzio, F., **Coppola, L.**, Karstensen, J., Mortier, L., 2016. Scales and dynamics of Submesoscale Coherent Vortices formed by deep convection in the northwestern Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 7716-7742.
  15. 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 Part I: Oceanographic Research Papers*, 100, 1-12.
16. Lima-Mendez, G., Faust, K., Henry, N., Decelle, J., Colin, S., Carcillo, F., Chaffron, S., Ignacio-Espinosa, J.C., Roux, S., Vincent, F., Bittner, L., Darzi, Y., Wang, J., Audic, S., Berline, L., Bontempi, G., Cabello, A.M., **Coppola, L.**, Cornejo-Castillo, F.M., d'Ovidio, F., De Meester, L., Ferrera, I., Garet-Delmas, M.J., Guidi, L., Lara, E., Pesant, S., Royo-Llonch, M., Salazar, G., Sanchez, P., Sebastian, M., Souffreau, C., Dimier, C., Picheral, M., Searson, S., Kandels-Lewis, S., Tara Oceans, c., Gorsky, G., Not, F., Ogata, H., Speich, S., Stemmann, L., Weissenbach, J., Wincker, P., Acinas, S.G., Sunagawa, S., Bork, P., Sullivan, M.B., Karsenti, E., Bowler, C., de Vargas, C., Raes, J., 2015. Determinants of community structure in the global plankton interactome. *Science*, 348, 1262073.
  17. 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.
  18. 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, P., Testor, P., 2014. Observing mixed layer depth, nitrate and chlorophyll concentrations in the northwestern Mediterranean: A combined satellite and NO<sub>3</sub> profiling floats experiment. *Geophysical Research Letters*, 41, 6443-6451.
  19. Schroeder, K., Millot, C., Bengara, L., Ben Ismail, S., Bensi, M., Borghini, M., Budillon, G., Cardin, V., **Coppola, L.**, Curtil, C., Drago, A., El Moumni, B., Font, J., Fuda, J.L., García-Lafuente, J., Gasparini, G.P., Kontoyiannis, H., Lefevre, D., Puig, P., Raimbault, P., Rougier, G., Salat, J., Sammari, C., Sánchez Garrido, J.C., Sanchez-Roman, A., Sparnocchia, S., Tamburini, C., Taupier-Letage, I., Theocharis, A., Vargas-Yáñez, M., Vetrano, A., 2013. Long-term monitoring programme of the hydrological variability in the Mediterranean Sea: a first overview of the HYDROCHANGES network. *Ocean Science*, 9, 301-324.
  20. 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
  21. 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, D., Le Goff, H., Martín, 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, 1379-1385.
  22. Zunino, P., Schroeder, K., Vargas-Yáñez, M., Gasparini, G.P., **Coppola, L.**, García-Martínez, M.C., Moya-Ruiz, F., 2012. Effects of the Western Mediterranean Transition on the resident water masses: Pure warming, pure freshening and pure heaving. *Journal of Marine Systems*, 96-97, 15-23.
  23. Povinec P., R. Breier, **L. Coppola**, M. Groening, C. Jeandel, A.J.T. Jull, W.E. Kieser, S.-H. Lee, L. Liong Wee Kwong, U. Morgenstern, Y.-H. Park, Z. Top. 2011. Tracing of water masses using a multi isotope approach in the southern Indian Ocean. *Earth and*

*Planetary Science Letters*, Volume 302, Issues 1–2, Pages 14-26, doi: 10.1016/j.epsl.2010.11.026

24. Lee S-H., Povinec P., Gastaud J., Oregioni B., Coppola L. and Jeandel C. 2009. Radionuclides as Tracers of Water Fronts in the South Indian Ocean-ANTARES IV Results. *Journal of Oceanography* 65 (3), 397-406, doi : 10.1007/s10872-009-0035-7
25. Heimbürger L-E, Chiffoleau JF, Dufour A, Migon C, **Coppola L**, Auger D, Cossa D (2008) Seasonal variations of trace elements in the water column of the Ligurian Sea, Western Mediterranean. *Geochim Cosmochim Acta* 72: 363-363.
26. **Coppola, L.**, Gustafsson, O., Andersson, P., Eglinton, T.I., Uchida, M. and Dickens, A.F. 2007. The importance of ultrafine particles as a control on the distribution of organic carbon in Washington Margin and Cascadia Basin sediments. *Chemical Geology* 243 (1-2), 142-156, doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.05.020
27. **Coppola L.**, M. Roy-Barman, S. Mulsow, P. Povinec and C. Jeandel 2006. Thorium isotopes as tracers of particles dynamics and deep water circulation in the Indian sector of the Southern Ocean (ANTARES IV). *Marine Chemistry*, Volume 100, Issues 3-4, Pages 299-313, doi: 10.1016/j.marchem.2005.10.019
28. Buesseler, K. O., C.R. Benitez-Nelson, S.B. Moran, A. Burd, M. Charette, J.K. Cochran, L. **Coppola**, N.S. Fisher, S.W. Fowler, W.D. Gardner et al. 2006. An assessment of particulate organic carbon to thorium-234 ratios in the ocean and their impact on the application of  $^{234}\text{Th}$  as a POC flux proxy. *Marine Chemistry*, Volume 100, Issues 3-4, Pages 213-233, doi: 10.1016/j.marchem.2005.10.013
29. **Coppola, L.**, Gustafsson, O., Andersson, P., Axelsson, P., 2005. Fractionation of surface sediment fines based on a coupled sieve-SPLITT (split flow thin cell) method. *Water Research* 39/10: 1935-1945, doi: 10.1016/j.watres.2005.04.005
30. **Coppola, L.**, Roy-Barman, M., Mulsow, S., Povinec, P. and Jeandel, C., 2005. Low particulate organic carbon export in the frontal zone of the Southern Ocean (Indian Sector) revealed by  $^{234}\text{Th}$ . *Deep Sea Research I*, 52: 51-68, doi: 10.1016/j.dsr.2004.07.020
31. **Coppola, L.**, Roy-Barman, M., Wassmann, P., Mulsow, S., Jeandel, C. 2002. Calibration of sediment traps and particulate organic carbon export using  $^{234}\text{Th}$  in the Barents Sea, *Marine Chemistry*, 80 (1): 11-26, doi: 10.1016/S0304-4203(02)00071-3
32. Roy-Barman, M., **Coppola, L.** and Souhaut, M., 2002. Thorium isotopes in the Western Mediterranean Sea : an insight in the marine particle dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 161-174, doi: 10.1016/S0012-821X(01)00606-9
33. Arraes-Mescoff, R., Roy-Barman, M., **Coppola, L.**, Tachikawa, K., Souhaut, M., Sempere, R., Yoro, S., Jeandel, C., 2001. The behavior of Al, Mn, Ba, Sr, REE and Th isotopes during in vitro degradation of large marine particles, *Marine Chemistry*, 73, 1-19, doi: 10.1016/S0304-4203(00)00065-7

#### **Autres publications:**

Thierry, V., Coppola, L., Lagadec, C., Reverdin, G., Bittig, H. A national working group on O2 data acquisition and processing. *Mercator Ocean Journal*, No 55, April 2017

Ducrocq, V. et al., 2014. HyMeX-SOP1: The Field Campaign Dedicated to Heavy Precipitation and Flash Flooding in the Northwestern Mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 1083-1100.

Ducrocq, V., et al., 2013. HyMeX, les campagnes de mesures : focus sur les événements extrêmes en Méditerranée. *La Météorologie*, 8, 37.

Drobinski, P., et al., 2013. HyMeX, le cycle de l'eau méditerranéen à la loupe. *La Météorologie*, 8, 23.

D'Ortenzio, et al., 2012. Autonomously profiling the nitrate concentrations in the ocean: the Pronuts project. *Mercator Ocean - CORIOLIS Quarterly Newsletter*, 45, 8-11.

### **Rapports :**

Coppola, L. et al., 2016. *Handbook of best practices for open ocean fixed observatories*. European Commission, FixO3 Project, 127 pp. (European Commission, FixO3 project, FP7 Programme 2007-2013 under grant agreement n° 312463). <http://hdl.handle.net/11329/302>

Coppola et al., 2014. White paper on dissolved oxygen measurements: scientific needs and sensors accuracy, JERICO Project (<http://www.jerico-ri.eu/>)

### **Bases de données (DOI SEANOE/SISMER) :**

Coppola Laurent, Diamond Riquier Emilie, Carval Thierry (2016). Dyfamed observatory data. SEANOE. <http://doi.org/10.17882/43749>

Testor Pierre, Coppola Laurent, Mortier Laurent (2010) MOOSE-GE, <http://dx.doi.org/10.18142/235>

Testor Pierre, Mortier Laurent, Coppola Laurent, Claustre Hervé, D'Ortenzio Fabrizio, Bourrin François, Durrieu De Madron Xavier, Raimbault Patrick (2017). Glider MOOSE sections. SEANOE. <http://doi.org/10.17882/52027>

# CADRE SCIENTIFIQUE

## 1. La circulation générale en Méditerranée

En Méditerranée on distingue principalement trois masses d'eau : les eaux Atlantiques (AW) qui se trouvent entre la surface et 300m, les eaux intermédiaires (principalement l'eau Levantine Intermédiaire, LIW) entre 300 et 1000m et les eaux profondes qui se trouvent en dessous de 1000m (Fig.1).

Les eaux Atlantiques occupent les couches superficielles et pénètrent en Méditerranée par le détroit de Gibraltar avec une salinité inférieure à 38. Au cours de son parcours vers l'est du bassin sa salinité augmente sous l'effet de l'évaporation et se transforme en eaux Atlantiques modifiées (MAW).

Les eaux intermédiaires sont formées par le mélange vertical dû aux forçages atmosphériques et la perte de chaleur. Dans le bassin Levantin, la formation d'eau dense a lieu au niveau du « gyre » de Rhodes est formée la LIW. Elle est la masse d'eau essentielle en Méditerranée : elle joue un rôle clef dans les convections profondes du Golfe du Lion et du sud de l'Adriatique, contribue aux échanges hydrodynamiques dans les détroits (Sicile et Gibraltar), et occupe la majeure partie de la couche intermédiaire dans le bassin oriental. Elle est caractérisée par un *maxima* de température et de salinité en sub-surface (39 à l'est et 38.6 à l'ouest), présent dans tout le bassin méditerranéen à des profondeurs différentes (entre 300 et 700 m). Ces différentes profondeurs sont le résultat de la transformation de la LIW subie au cours de son trajet. Elle contribue ainsi au transport de sel et de chaleur entre les deux bassins, participe à l'apport de nutriments vers la couche de surface pendant les épisodes de mélange hivernal, et subit une partie de l'export de matière organique après la saison de production phytoplanctonique. Dans le bassin nord-occidental, des eaux intermédiaires sont formées en périphérie de la zone de convection se situant entre le centre du Golfe du Lion et la mer Ligure. Ces eaux d'hiver intermédiaire (WIW, « Winter Intermediate Water ») sont légèrement plus froides et moins salées que la LIW qui se propage dans le bassin occidental. Elle est également plus oxygénée en raison de la ventilation locale dans le bassin nord-occidental.

Les eaux profondes sont aussi distinctes entre les deux bassins : la EMDW (« Eastern Mediterranean Deep Water ») formée essentiellement en mer Adriatique et parfois en mer Egée comme au début des années 90 pendant l'événement EMT (« Eastern Mediterranean Transient ») et la WMDW (« Western Mediterranean Deep Water ») formée au centre du Golfe du Lion lors de la convection profonde en hiver.

Comme nous le verrons plus en détail ultérieurement ces processus de convection et de formation d'eau dense sont des mécanismes essentiels dans la distribution du contenu en oxygène (O<sub>2</sub>) en Méditerranée et très sensibles aux changements climatiques.

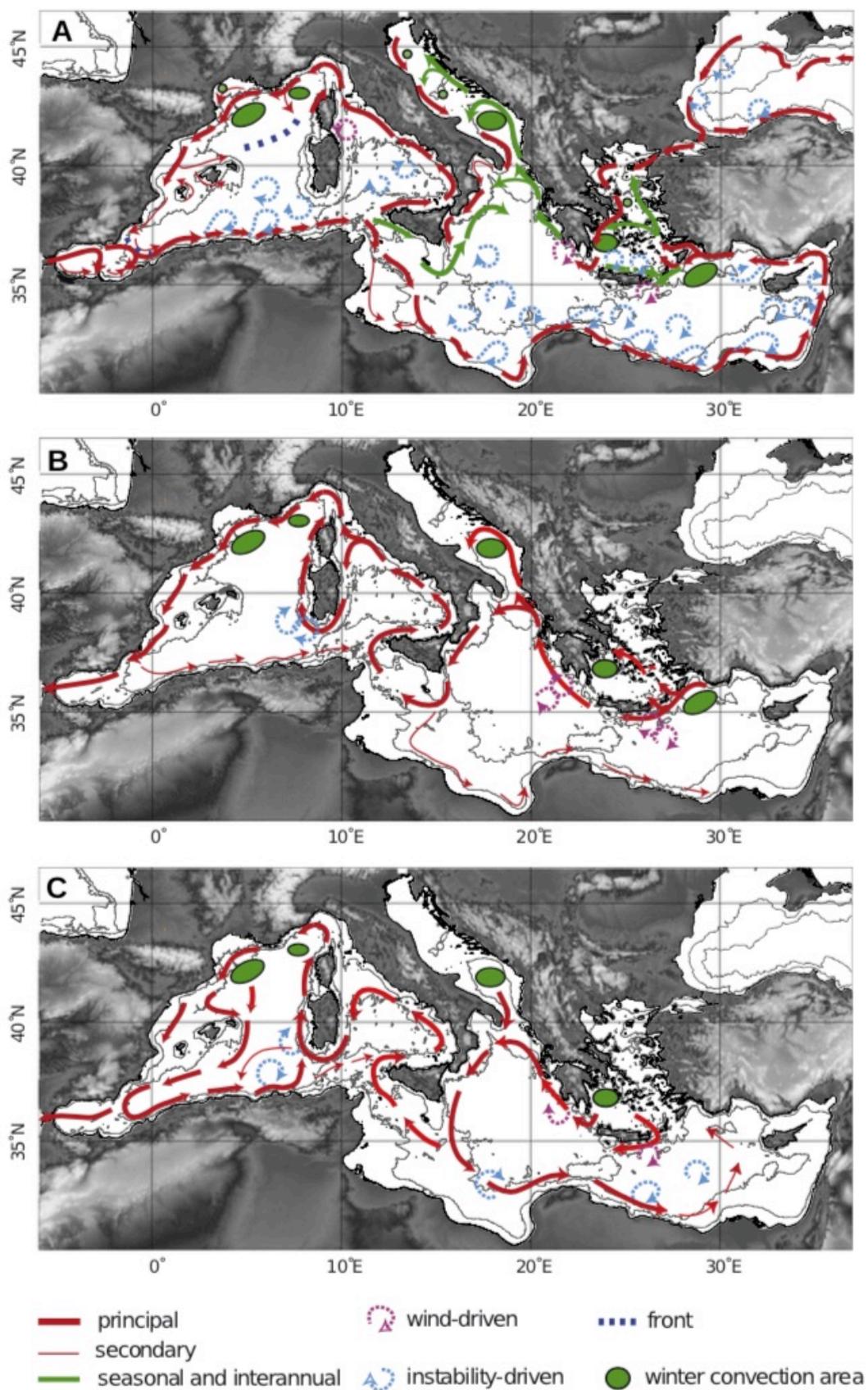


Fig.1 : Circulation des masses d'eau de surface (A), intermédiaires (B) et profondes (C) en Méditerranée (MerMex group, 2011)

## 2. La mer Méditerranée, un « hot-spot » du changement climatique en perpétuelle évolution

La mer Méditerranée est aujourd'hui reconnue comme un hot-spot du changement climatique (Giorgi, 2006; Diffenbaugh *et al.*, 2007). Elle peut être décrite comme un océan miniature avec des processus identiques à ceux de l'océan global (circulation thermohaline, apports atmosphériques, présence de bio-régions). De par sa taille réduite (0.8% de la surface de l'océan global et 0.3% de son volume) et le temps de résidence de ses masses d'eau (environ 100 ans), des changements sont déjà visibles tant au niveau hydrologique (réchauffement des eaux de surface et profonde), biogéochimique (acidification) que biologique (changement de taille des communautés phytoplanctoniques). La mer Méditerranée représente donc un laboratoire d'étude idéal pour observer et comprendre comment les forçages climatiques peuvent influencer les processus physiques et biogéochimiques, et quels impacts auront ces changements sur les propriétés des masses d'eau et sur le contenu des éléments biogéochimiques ayant un rôle clef sur la production biologique.

Dans ce contexte, plusieurs modifications rapides ont été observées ces dernières décennies au niveau des processus physiques et biogéochimiques, masquées partiellement par des événements épisodiques et une forte variabilité régionale.

Avec le réchauffement climatique, le fonctionnement physique de la Méditerranée, et en particulier le phénomène de formation des eaux profondes, risque d'être fortement impacté (Somot *et al.*, 2006), avec des conséquences directes pour les écosystèmes pélagiques et le cycle du carbone (Herrmann *et al.*, 2013). Une augmentation de température des eaux profondes de l'ordre de 0.3°C a déjà été observée depuis les années 1950 (Bethoux *et al.*, 1990; Krahnemann and Schott, 1998), et des projections à l'horizon 2100 prédisent une augmentation des températures de surface de 2 à 3°C (Adloff *et al.*, 2015). Dans le bassin occidental, ce phénomène s'est accentué en raison d'événements récents de formation intense d'eau profonde dans le bassin occidental (Schroeder *et al.*, 2008b ; Houpert *et al.*, 2016), conduisant ainsi à une augmentation de la salinité dans les eaux profondes de 0.015 depuis 40 ans (Borghini *et al.*, 2014) et à une stratification de la colonne d'eau profonde due à la superposition des masses d'eau récemment formées, toujours plus chaudes et plus salées (Schroeder *et al.*, 2017).

D'un point de vue biogéochimique, la mer Méditerranée est une zone particulièrement intéressante à étudier car elle concentre de nombreuses caractéristiques que l'on retrouve dans l'océan global. Une bonne compréhension de son fonctionnement est donc d'autant plus intéressante que cela permet de mieux appréhender des processus plus globaux. Comparée à l'océan global, la Méditerranée présente des concentrations en O<sub>2</sub> relativement élevées dans les eaux profondes, causées en grande partie par des mécanismes de ventilation intense résultant des épisodes de convection hivernale dans les zones de formation d'eau profonde (Schneider *et al.*, 2014). Dans l'eau intermédiaire principale, la LIW, un minimum d'O<sub>2</sub> est présent dans toute la Méditerranée (OML pour « Oxygen Minimum Layer »). Cette OML résulte d'une stratification des eaux de surface, limitant ainsi la diffusion de l'O<sub>2</sub> dans les couches sous-jacentes et d'un apport de la matière organique dans les zones de production, alimentant ainsi la respiration bactérienne et la consommation d'O<sub>2</sub>. La LIW étant formée dans le bassin oriental, les concentrations en O<sub>2</sub> ne cessent de diminuer tout le long de son parcours. Avec le réchauffement climatique, ces concentrations sont devenues très sensibles à une diminution globale de l'O<sub>2</sub> prédit par les modèles climatiques et biogéochimiques, notamment face à une augmentation de la stratification de la colonne d'eau (Oschlies *et al.*, 2008). Toutefois, le manque d'observations sur la

variabilité du contenu en O<sub>2</sub> en Méditerranée ne nous permet pas actuellement de déterminer si la désoxygénation sera déterminante et aura dans l'avenir des implications importantes sur le cycle du carbone et les écosystèmes marins.

Concernant les sels nutritifs, la mer Méditerranée fonctionne différemment de l'océan global. Les rapports N/P dans les eaux profondes de l'Océan global sont de l'ordre de 16:1 (rapport de Redfield), alors qu'en Méditerranée ce rapport est beaucoup plus fort et estimé en moyenne à 24:1 avec un gradient horizontal marqué d'ouest en est (Béthoux *et al.*, 2002). Ceci s'explique par une préférence de consommation du phosphate par rapport au nitrate par le phytoplancton indiquant une limitation en phosphate, notamment dans le bassin Est (Pujo-Pay *et al.*, 2011) et une moindre disponibilité de P par rapport à N. Entre autres, les apports atmosphériques sont d'un point de vue « redfielien » plus riches en N qu'en P dans le bassin ouest (Bartoli *et al.*, 2005). Plus récemment, des études ont souligné la contribution importante des apports anthropiques (N, P) par l'atmosphère et les fleuves dans les eaux de surface et intermédiaires en Méditerranée (Moon *et al.*, 2016), et une forte variabilité des nutriments en surface liée à la profondeur de la couche de mélange (MLD pour « Mixed Layer Depth »), notamment dans le bassin ouest (Pasqueron de Fommervault *et al.*, 2015). Malgré tout, le manque de données dans les deux bassins ne permet pas de contraindre correctement la saisonnalité des concentrations en nutriments et leur distribution spatiale, notamment face aux sources externes dépendantes des activités humaines.

La mer Méditerranée a aussi été identifiée comme un important stock du carbone anthropique où l'inventaire de la colonne est beaucoup plus élevé que dans les océans Atlantique ou Pacifique (Schneider *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011; Álvarez *et al.*, 2014). Les raisons en sont les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques de la mer Méditerranée où les eaux chaudes et à forte alcalinité (donc avec un faible facteur de Revelle) sont susceptibles d'absorber le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et d'être transportées vers l'intérieur via les cellules de convection et la circulation thermohaline. Cependant, la variabilité du carbone inorganique reste méconnue, compte tenu de la faible densité des observations du système des carbonates à l'heure actuelle.

Ainsi la dynamique de ces éléments biogéochimiques clefs, fortement impactée par les processus océaniques physiques qui prédominent en Méditerranée, reste mal connue compte tenu du manque de données biogéochimiques *in situ* et de qualité. Cette dynamique reste cependant très sensible au réchauffement climatique et à la pression anthropique que subit la mer Méditerranée. Face au manque crucial d'observations *in situ* en Méditerranée, des programmes et des systèmes d'observation intégrés se sont mis en place, principalement dans le bassin ouest depuis 2010 (HYMEX, MERMEX, MOOSE, MED-SHIP, NAOS), contribuant ainsi à augmenter la densité des mesures physiques et biogéochimiques. Dans ce contexte, le développement et la mise en œuvre de plateformes autonomes instrumentées (planeurs sous-marin, flotteurs profileurs, mouillages) laissent espérer, à moyen terme, une densification des mesures de certaines variables biogéochimiques. Ceci constitue un préalable qui permettra de mieux observer pour mieux comprendre les processus clefs et de réduire les incertitudes qui leur sont associées.

Dans ce contexte, ma contribution a été de renforcer l'acquisition de variables biogéochimiques essentielles en Méditerranée occidentale et de mettre en place les procédures s'assurant de leur qualité et de leur interopérabilité (tâches de service dans le cadre du SNO MOOSE) et l'exploitation de celles-ci dans le but de mieux comprendre leur variabilité saisonnière et interannuelle face à la modification des forçages physiques (mélange, convection).

Plus particulièrement, je me suis intéressé aux modifications des propriétés des masses d'eau intermédiaire et profonde en utilisant l'O<sub>2</sub> comme traceur de la ventilation. Pour ce faire, je me suis focalisé sur le bassin nord-occidental de la Méditerranée, région très dynamique qui connaît un processus de ventilation très intense en hiver. Afin de bien comprendre l'impact la ventilation dans cette région de la Méditerranée, je me suis également intéressé aux tendances sur le long terme qui caractérisent les changements hydrologiques et biogéochimiques. Cette approche, essentiellement basée sur les séries temporelles en mer Ligure, qui a permis d'estimer quand et comment les masses d'eau ont évolué dans le passé sous la contrainte du changement climatique.

### 3. Le phénomène de convection profonde dans le bassin nord-occidental

En Méditerranée, la formation d'eau dense est due à l'évaporation et à la différence de température entre l'air et les eaux de surface relativement chaudes (13°C). Dans le bassin nord-occidental, cette évaporation et la perte de chaleur engendrée sont accentuées par les forts vents froids et secs prédominants (mistral, tramontane). En hiver, lorsque ces conditions sont réunies, ce mécanisme conduit à la convection profonde au large centrée sur le Golfe du Lion et qui s'étend parfois en mer Ligure lorsque les hivers sont particulièrement rigoureux (Houpert *et al.*, 2016). Dans le Golfe du Lion, il existe aussi une formation d'eau dense sur le plateau qui conduit au phénomène de « cascading » qui a lieu occasionnellement lors des conditions climatiques particulières (Fig.2) (Durrieu De Madron *et al.*, 2013 ; Puig *et al.*, 2013).

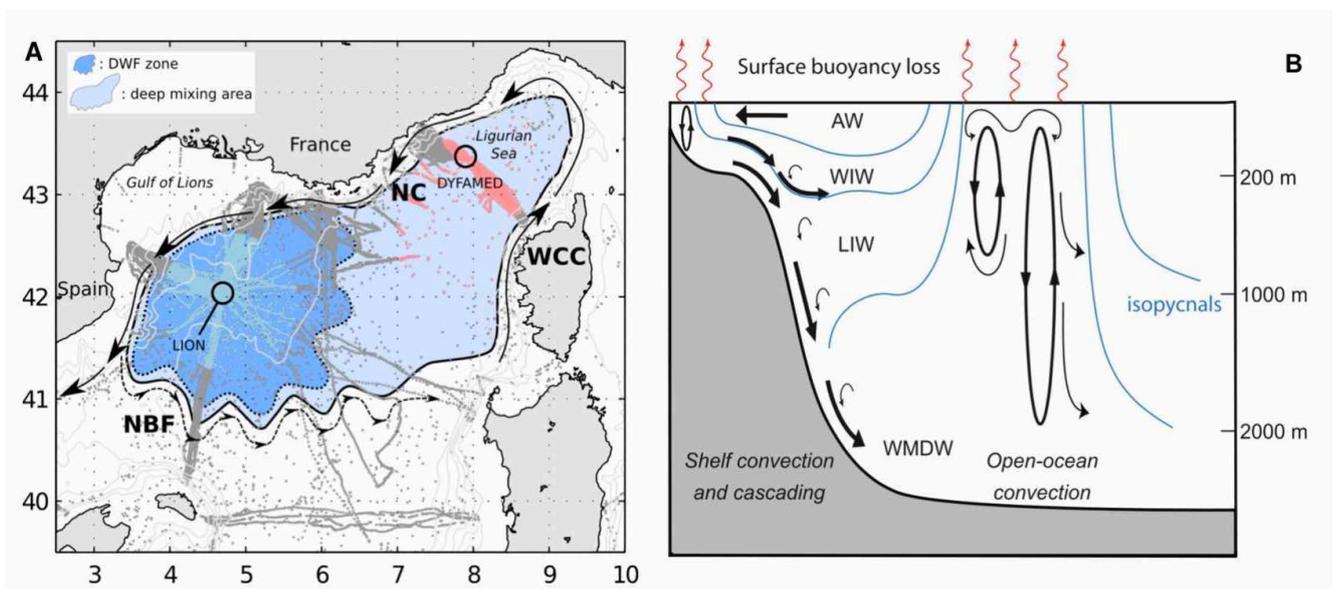


Fig 2 : (A) Carte de la zone de convection profonde (bleu foncé) et du mélange profond (bleu clair) dans le bassin nord-occidental. Les flèches noires représentent la circulation du courant Nord (NC) et du Front Nord des Baléares (NBF) (Bosse, 2015) ; (B) Coupe verticale schématique de la convection profonde et du « cascading » d'eau dense (Puig *et al.*, 2013)

Lorsque la densité des eaux en surface devient importante, le mécanisme de convection se met en place en milieu hauturier et de l'eau profonde se forme, on parle donc de convection

profonde. Ce processus, crucial pour la ventilation et le renouvellement des eaux intermédiaires et profondes, se réalise en trois phases :

- Le préconditionnement de la zone centrale du Golfe du Lion, caractérisée par une circulation cyclonique produisant un dôme d'isopycnal vers la surface, exposant ainsi une grande masse d'eau faiblement stratifiée au refroidissement et à l'évaporation des vents froids et secs soufflant dans cette zone (mistral et tramontane)
- La phase de mélange vertical conduisant à des masses d'eau homogènes verticalement mais hétérogènes spatialement avec la présence de plumes convectives (petits tourbillons cohérents de 1 km de diamètre) où les vitesses verticales sont élevées (de l'ordre de 10-15 cm/s)
- La phase de re-stratification et la dispersion des masses d'eau denses récemment formées

Dans ce contexte, deux thèses, auxquelles j'ai collaboré au niveau du traitement et l'interprétation des données, se sont focalisées sur ce processus de convection et de changements des masses d'eau (thèses de L. Houpert 2013 et A. Bosse 2015).

### **3.1. Impact sur les eaux intermédiaires**

Dans le bassin nord-occidental, les eaux intermédiaires sont caractérisées essentiellement par la LIW dont le cœur se situe à 300-350m dans la partie nord-occidentale. Elle est définie par un maximum de T et S en sub-surface (38.6) et un minimum d'O<sub>2</sub> (160-170 μmol/kg). Lors des épisodes de convection profonde, la LIW joue un rôle particulièrement important car elle permet d'injecter une grande quantité de sel et de chaleur dans la colonne d'eau lors des épisodes de convection hivernal, favorisant ainsi le mélange vertical, ce qui rend la colonne d'eau plus dense (Grignon *et al.*, 2010).

En hiver, ce mélange peut atteindre une très grande profondeur dans la région du Golfe du Lion (MEDOC-Group, 1970; Schott *et al.*, 1996; Houpert, 2013). En revanche, dans une zone périphérique allant généralement de la mer Ligure (à l'est) à la mer des Baléares (à l'ouest), le mélange s'arrête à profondeur intermédiaire (entre 200 et 500 m). Il incorpore peu ou partiellement les LIW chaudes et salées que l'on trouve dans une couche entre 300 et 800 m de profondeur. La masse d'eau ainsi formée est alors relativement froide et peu salée ( $\theta < 13^{\circ}\text{C}$  et  $S < 38.5$ ). Si les vents ne sont pas assez intenses ou que la stratification des eaux de surface est trop importante, la convection n'atteint pas les eaux intermédiaires et il se forme la WIW.

### **3.2. Impact sur les eaux profondes**

Les eaux profondes de la Méditerranée occidentale (WMDW) sont formées en Méditerranée nord-occidentale par convection profonde hivernale. Ce phénomène n'a pas lieu tous les ans, mais subit une forte variabilité interannuelle (Mertens and Schott, 1998; Schroeder *et al.*, 2008a). Les mesures faites dans les années 1960 montraient une grande stabilité dans les propriétés hydrographiques de la WMDW avec une température potentielle d'environ 12.65 °C et une salinité de 38.40 (Lacombe *et al.*, 1985) puis de 12.80°C dans les années 1990 (Bethoux *et al.*, 1990). Les hivers 2005 et 2006 ont été marqués par de forts épisodes convectifs ayant provoqué

une augmentation brutale et spectaculaire de la température (+0.04°C) et de la salinité (+0.02) des WMDW (Schroeder *et al.*, 2010). Plus récemment, la convection profonde a également été particulièrement active avec 5 épisodes consécutifs de convection profonde atteignant le fond à environ 2300 m entre 2009 et 2013 (Fig. 3) (Houpert *et al.*, 2016). En hiver 2006 cette convection a également atteint la mer Ligure en mélangeant toute la colonne d'eau (Smith *et al.*, 2008; Marty and Chiavérini, 2010). Mais ce phénomène reste toutefois principalement localisé dans la zone du Golfe du Lion où les conditions atmosphériques et océaniques sont les plus favorables au mélange profond. Actuellement, une température potentielle d'environ 12.9 °C et une salinité de 38.50 caractérisent les eaux profondes.

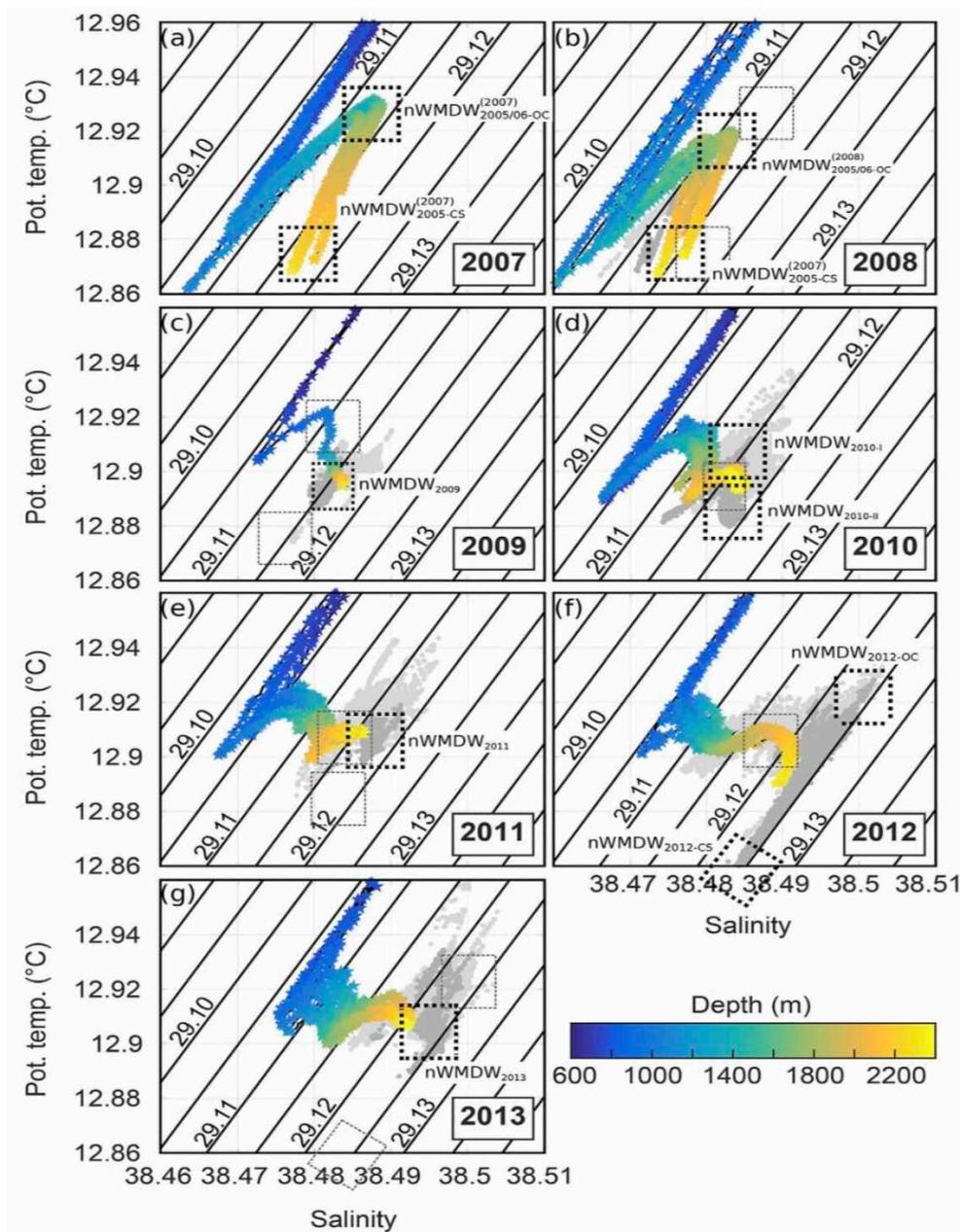


Fig 3 : Diagrammes de température potentielle et de la salinité en fonction de la profondeur au centre du Golfe du Lion dans les eaux profondes de 2007 à 2013 (Houpert *et al.*, 2016)

### 3.3. Le processus de ventilation

L'intensité de la convection profonde, ainsi que le volume d'eaux profondes formé, varie également, mais il est un indicateur difficile à estimer. En hiver 2012, ce volume est équivalent à 1.1 Sv (Durrieu De Madron *et al.*, 2013). Ce chiffre est inférieur à l'estimation de 2.4 Sv réalisée lors des convections anormalement intenses en 2005 et 2006 réunis (Schroeder *et al.*, 2008a), mais il reste supérieur aux valeurs usuellement admises de 0.5 Sv (Rhein, 1995). Ceci suggère donc que le Méditerranée occidentale a subi un intense renouvellement des eaux profondes lors de la dernière décennie.

La ventilation de la mer Méditerranée nord-occidentale est connue pour être intermittente et associée aux taux de formation d'eau dense (DWF pour « Dense Water Formation »). Des événements récents de formation intense d'eau profonde dans la Méditerranée occidentale en 2005 ont produit une grande quantité de nouvelle WMDW, ventilant ainsi une bonne partie de la couche profonde dans le bassin occidental. Celle-ci a commencé à modifier la stratification profonde de l'ensemble du bassin causant des augmentations abruptes de la température et de la salinité des eaux profondes (Schroeder *et al.*, 2008b). Cet événement appelé WMT (« Western Mediterranean Transient »; CIESM, 2009) a induit une ventilation considérable d'O<sub>2</sub> dans le bassin ouest (Schneider *et al.*, 2014). Dans les études antérieures, pour estimer le volume d'eau dense et le taux de ventilation, des critères de changements de densité dans les eaux profondes et des modèles numériques ont utilisés à partir de données T et S (Béranger *et al.*, 2010; Herrmann *et al.*, 2010; Schroeder *et al.*, 2010; Durrieu De Madron *et al.*, 2013). Plus récemment, des changements de ventilation ont été détectés en Méditerranée lors de campagnes régulières (programme Med-SHIP) à partir de mesures de traceurs transitoires CFC/SF<sub>6</sub> (Stöven and Tanhua, 2014; Schroeder *et al.*, 2015). Toutefois, ces approches sont soit trop incertaines et ne contraignent pas spécifiquement le processus de ventilation qui implique l'oxygénation des eaux intermédiaires et profondes (celles utilisant le critère de densité potentielle), soit elles sont complexes à mettre en place (utilisation de modèles impliquant le temps de résidence des masses d'eau) et ne bénéficient que de rares données (critère CFC/SF<sub>6</sub>). De fait, avec la densité de données T-S-O<sub>2</sub> obtenue dans le bassin nord-occidental (grâce aux déploiements intensifs de flotteurs Argo et de gliders) et la qualité de ces données devenue plus performante (ex. précision des données O<sub>2</sub> proche de 1-2 µmol/kg), il est devenu possible d'utiliser l'O<sub>2</sub> comme critère du volume d'eau dense ventilée en plus du critère physique de densité potentielle.

L'un des principaux défis des études sur la convection et la ventilation est de paramétrer en 3D les processus complexes impliqués, et d'estimer la quantité d'eau dense nouvellement ventilée qui affectera le contenu biogéochimique et la floraison printanière subséquente. Les quantités d'eau dense nouvellement ventilée produites lors d'événements de convection profonde indiquées dans des études antérieures étaient incertaines en raison de limites dans l'observation. De plus, les campagnes de recherche classiques ne permettent pas suffisamment d'améliorer notre vision de l'environnement océanique lors d'un événement de convection profonde en raison de sa variabilité multi-échelle et des conditions météorologiques sévères qui empêchent généralement l'utilisation des navires. Grâce à la technologie des plateformes mobiles autonomes (flotteurs Argo, planeurs sous-marins) et à la précision des données produites, une meilleure description du mécanisme de convection est maintenant possible. Cette problématique a motivé mon approche multiplateforme (mise en place dans le réseau MOOSE) basée sur une observation continue en incluant différentes échelles de temps et d'espace.

Dans ce contexte de convection profonde et de changement des propriétés des masses d'eau, cette approche a été densifiée sur une année complète afin de mieux estimer le volume d'eau dense ventilée et son impact sur les masses d'eau à partir des observations *in situ*. De ce fait, je me suis impliqué dans le programme HYMEX SOP2 et DEWEX en lien avec le réseau d'observation MOOSE pour intensifier les mesures en  $O_2$  comme traceur de l'impact de la convection profonde sur la ventilation des eaux intermédiaires et profondes affectant le bassin nord-occidental sur la période 2012-2013 (Estournel *et al.*, 2016; Testor *et al.*, 2018). J'ai ainsi pu mettre en application une nouvelle approche que j'ai développée pour estimer le volume d'eau dense ventilée basée sur les critères de densité potentielle et d' $O_2$ .

## PROJETS DE RECHERCHE

### 1. La ventilation des eaux denses en Méditerranée nord-occidentale (opérations DEWEX et HYMEX SOP2)

Au cours de la période 2012-2013, un échantillonnage physique et biogéochimique à haute résolution couvrant l'ensemble du bassin nord-ouest de la Méditerranée a été effectué lors des opérations DEWEX, de la SOP2 HYMEX et du réseau MOOSE, servant de cadre de référence pour ces observations intensives. Ces opérations ont permis d'échantillonner finement la zone grâce aux campagnes en mer (été 2012, février et avril 2013, été 2013), aux déploiements réguliers de flotteurs Argo, de planeurs sous-marins et de bouées dérivantes en plus des stations fixes opérées par le réseau MOOSE (Estournel *et al.*, 2016; Testor *et al.*, 2018) (Fig. 4). L'objectif était d'améliorer notre connaissance des processus verticaux et horizontaux impliqués lors de la convection profonde, de la dispersion de l'eau profonde formée, et leurs impacts sur le contenu biogéochimique. Nous avons pour cela utilisé des observations combinées issues des observations *in situ* (fixes et mobiles) et des simulations numériques.

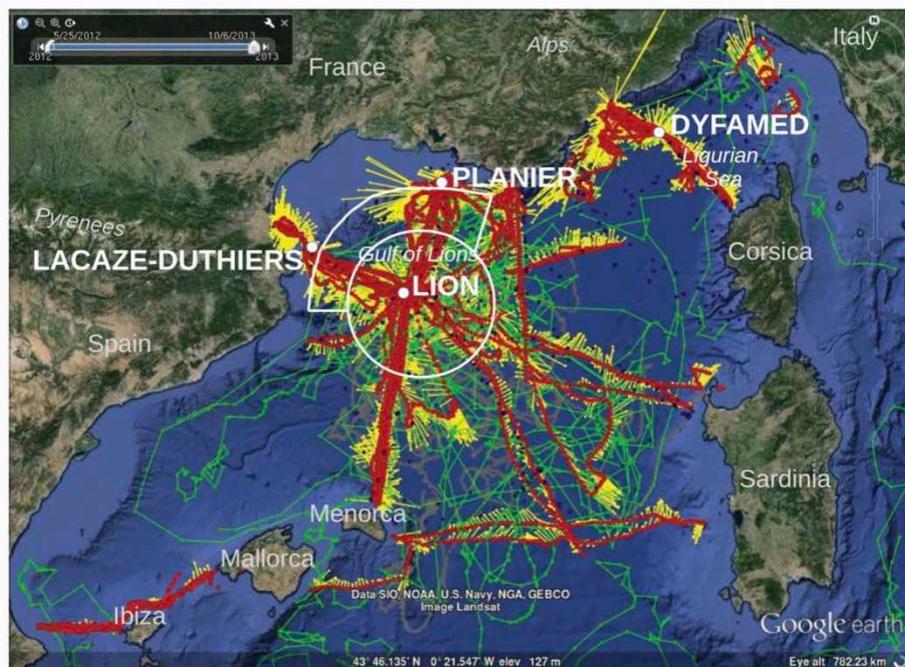


Fig 4 : Carte illustrant toutes les observations effectuées entre le 1er juillet 2012 et le 1er octobre 2013. Les positions des planeurs en surface sont indiquées par les points rouges. Les trajectoires des flotteurs Argo sont illustrées en vert. Les profils CTD des campagnes de recherche sont figurés en bleu et les trajectoires des bouées dérivantes en surface en gris. Enfin les positions des mouillages fixes LION, LACAZE-DUTHIERS, PLANIER et DYFAMED sont représentés par les points blancs (Testor *et al.*, 2018)

Dans ce projet, je me suis plus particulièrement investi dans les mesures intenses effectuées par les flotteurs Argo-O<sub>2</sub> dans la zone de formation d'eau de dense au centre du Golfe du Lion et en mer Ligure (DWF) avec le projet GMMC MOOXY. L'objectif était d'observer en continu l'impact de la convection profonde sur la ventilation profonde en O<sub>2</sub>, qui a lieu chaque hiver dans la DWF (avec une intensité plus ou moins forte). Pour cela, 4 flotteurs Argo équipés de capteurs optiques pour la mesure en O<sub>2</sub> (optode) ont été déployés avant et pendant la phase de

convection (Coppola *et al.*, 2017). Ces mesures optiques ont été corrigées par des profils CTDO<sub>2</sub> obtenus lors des 4 campagnes en mer (DEWEX 1 & 2, MOOSE\_GE 2012 & 2013), eux-mêmes ajustés par les mesures *in situ* Winkler. Ainsi, grâce à la technologie des flotteurs Argo, nous avons pu acquérir 380 profils de 0 à 2000m sur 4 mois, capables d'échantillonner la colonne d'eau tous les jours pendant la phase de mélange vertical tout en restant présents dans la zone mélangée. Associées aux mesures T-S, les mesures intensives en O<sub>2</sub> ont permis de quantifier l'augmentation rapide du contenu en O<sub>2</sub> pendant l'approfondissement de la MLD (à l'échelle d'un mois). Nous avons pu de cette manière observer que la convection lors de l'hiver début 2013 fut particulièrement intense avec une ventilation des eaux profondes de mi-février à fin mars 2013 (Fig. 5).

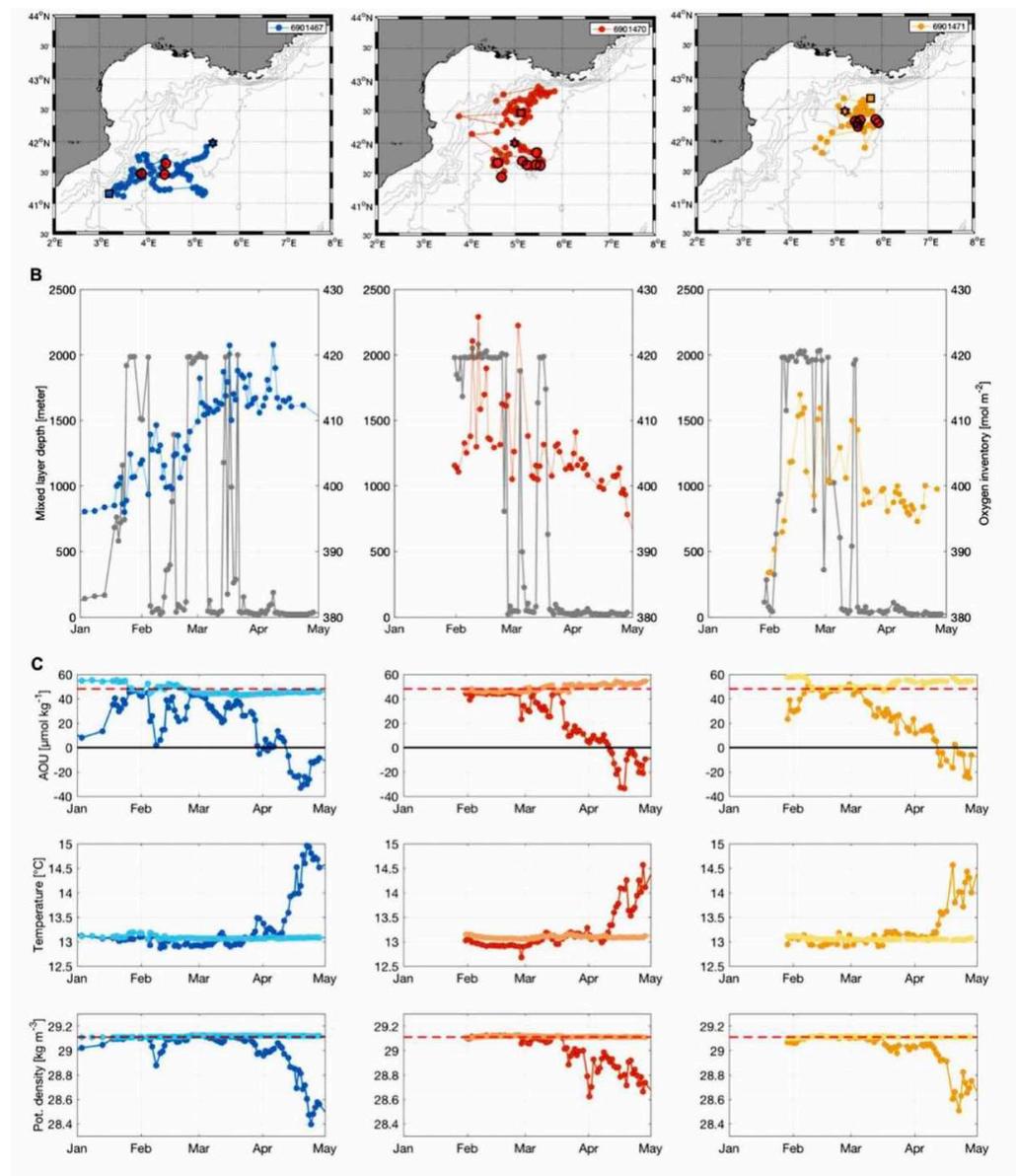


Fig. 5 : (A) Trajectoires des 3 flotteurs Argo-O<sub>2</sub> déployés dans le centre du Golfe du Lion et actifs pendant l'hiver 2013. (B) Évolution du contenu en O<sub>2</sub> sur toute la colonne d'eau en fonction de l'approfondissement de la couche de mélange (MLD). (C) Variabilité de l'AOU, de la SST et de la densité des eaux à 10 et 1000 m (couleurs foncée et claire, respectivement) enregistrée par ces 3 flotteurs. Les courbes en pointillé représentent les limites au-delà desquelles l'eau dense formée se ventile et plonge (48 μmol/kg et 29.11 kg/m<sup>3</sup>, respectivement).

Le volume de la nouvelle masse d'eau dense ainsi produite a été estimé à partir des critères d'AOU (« Apparent Oxygen Utilization ») et de la densité potentielle, qui sont caractéristiques de cette dernière ( $48 \mu\text{mol}/\text{kg}$  et  $29.11 \text{ kg}/\text{m}^3$ , respectivement). En effet, l'AOU permet d'estimer la part d' $\text{O}_2$  utilisée par les processus biologiques par rapport à sa valeur de solubilité et devient ainsi plus instructif en ce qui concerne l'âge de la masse d'eau. De ce fait, l' $\text{O}_2$  devient un traceur plus sensible que T et S au changement apporté par les eaux jeunes denses formées en surface et coulant rapidement vers les eaux intermédiaires et profondes. Ainsi au cours de l'hiver 2012/2013, le volume d'eau dense ventilée fut estimé autour de  $1.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$  pendant la phase majeure de la convection (Fig. 6). Le taux de formation obtenu (volume ventilé divisé par la période de mélange) fut de 1.45 Sv, ce qui est proche des estimations obtenues à partir des modèles régionaux (Estournel *et al.*, 2016; Waldman *et al.*, 2016). Ces chiffres permettent ainsi de classer l'hiver 2013 comme une année de convection intense avec une ventilation ayant induit une augmentation très nette des concentrations en  $\text{O}_2$  dans les eaux profondes de 196 à  $205 \mu\text{mol}/\text{kg}$  et se dispersant sur tout le sous-bassin nord-ouest de la Méditerranée.

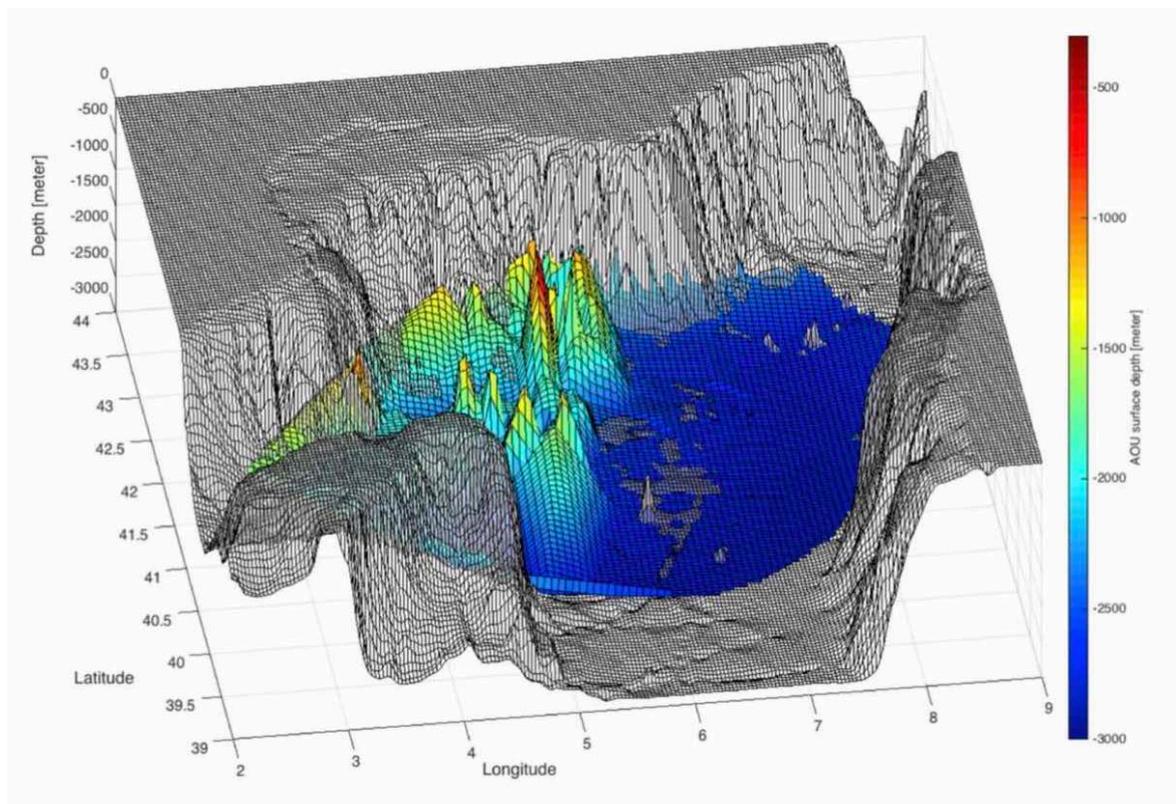


Fig. 6 : Vue en 3-D du volume d'eau dense ventilée situé entre la profondeur du fond et la profondeur minimale de la masse d'eau dense à l'intérieur de l'AOI et des seuils de densité potentielle ( $<48 \mu\text{mol}/\text{kg}$  et  $>29.11 \text{ kg}/\text{m}^3$ , respectivement) de janvier à avril 2013. Cette estimation a été faite en fusionnant les données des flotteurs Argo et des profils de CTD (au total 287 profils) et en utilisant la méthode d'interpolation de Delaunay.

Valorisation : 1 article en premier auteur et 6 papiers comme co-auteur parus dans l'édition spéciale de JGR-Oceans (DEWEX) avec une participation à l'encadrement de 2 étudiants en thèse dans le traitement et l'exploitation de données  $\text{TSO}_2$  (L. Houpert et A. Bosse)

Après avoir montré l'intérêt des mesures d'O<sub>2</sub> comme traceur plus sensible que T et S lors de la formation d'eau profonde pendant les épisodes de convection, je me suis intéressé à l'évolution sur le long terme des propriétés biogéochimiques dans les eaux intermédiaires et profondes. Pour cela, je me suis appuyé sur la série temporelle DYFAMED, série la plus longue en Méditerranée. L'objectif était de comprendre comment les contenus en O<sub>2</sub> et en nutriments ont évolué au cours du temps face à la variabilité des épisodes de convection, de mélange, de stratification et des apports externes.

## 2. La variabilité saisonnière et interannuelle du contenu biogéochimique en mer Ligure

Cette thématique de recherche a pour objectif de caractériser la variabilité saisonnière et l'éventuelle évolution décennale des concentrations en O<sub>2</sub> et en nutriments dans une zone clef de la Méditerranée : la mer Ligure. Cette dernière se situe dans le passage de la LIW, qui se forme dans le bassin oriental puis se propage dans le bassin occidental à travers le détroit de Sicile, le sud de la Sardaigne puis le bord ouest de la Corse et le canal de Corse. Cette circulation de la LIW suit ainsi le courant ouest Corse (WCC) qui s'écoule du sud vers le nord et le courant Nord (NC) qui se circule d'est en ouest et forme un front entre les eaux côtières et les eaux plus au large au centre la mer Ligure (Fig. 7). Comme nous l'avons vu précédemment, ce sous-bassin subit lui aussi des convections hivernales secondaires fortement impactées par la région du Golfe du Lion, zone de formation d'eau dense très dynamique en Méditerranée occidentale. Enfin, la mer Ligure est également caractérisée par des apports atmosphériques, riches en éléments nutritifs, influençant ainsi la production phytoplanctonique et l'export de matière organique vers la zone mésopélagique.

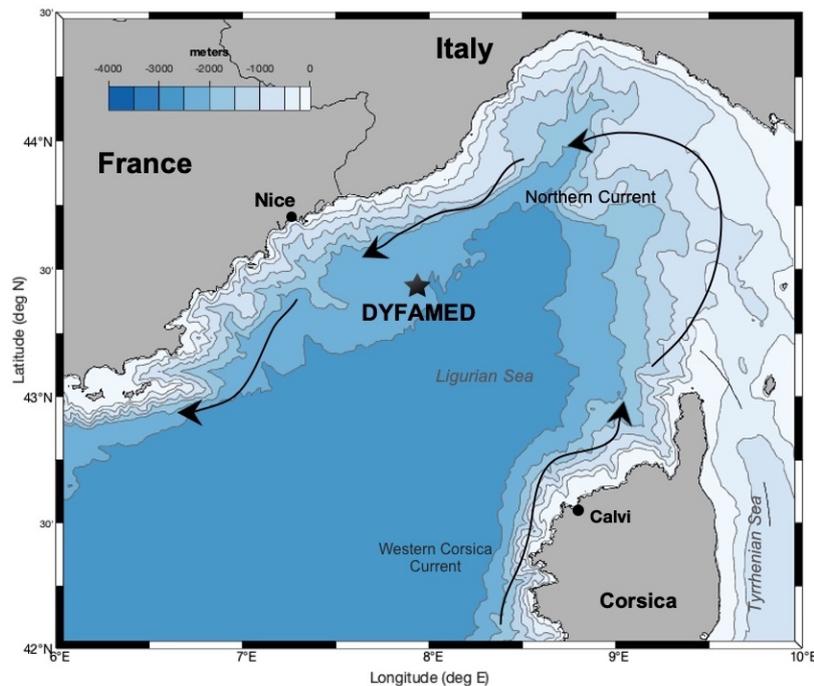


Fig.7 : Localisation du site DYFAMED avec la représentation schématique des courants de bord (courant Nord, NC ; courant ouest Corse, WCC)

Dans cette région, j'ai analysé les données issues de la série DYFAMED (initiée par JGOFS-France en 1988), considérée comme la plus longue série temporelle océanographique en Méditerranée. Le site hauturier DYFAMED proche des côtes (50 km de Nice) permet un suivi mensuel régulier pour l'acquisition de variables hydrologiques, biogéochimiques et biologiques, afin d'observer l'impact des forçages physiques (mélange, stratification) sur les cycles biogéochimiques des éléments majeurs (carbone, oxygène) et des nutriments (nitrate, phosphate, silicate). Actuellement, les données DYFAMED sont acquises mensuellement lors des sorties bateau (TETHYS II) et de manière continue sur le mouillage fixe et lors des déploiements de planeurs sous-marins (gliders). Ce dispositif fait partie du SNO MOOSE depuis 2010, et est une composante du nœud EMSO-LIGURE (ERIC EMSO) depuis 2017. Cette série maintenue depuis 30 ans a permis de faire un bilan des tendances hydrologiques et biogéochimiques qui prévaut dans cette région. En outre, ces observations ont donné l'opportunité de mettre en lumière les anomalies que subit la mer Ligurie qui est sujette, comme le reste de la Méditerranée, à des événements extrêmes croissants dus en grande partie au réchauffement climatique (MERMEX-group, 2011).

En mer Ligurie, les mesures en  $O_2$  ont permis de tracer à la fois les changements des propriétés des masses d'eau et de la production biologique en surface observés de 1994 à 2014 au site DYFAMED (Fig. 8 ; Coppola et al., 2018). Depuis le début des années 1990 jusqu'à 2005, l'OML a été observée entre 200 et 1300 m, en raison des épisodes convectifs peu fréquents et peu intenses en mer Ligurie (limitant l'apport d' $O_2$  depuis les couches de surface) et la reminéralisation bactérienne active dans les eaux intermédiaires (responsable de la consommation en  $O_2$  et de la régénération des nutriments). Ainsi, au niveau du site DYFAMED, il a été observé une diminution en  $O_2$  de  $5 \mu\text{mol/kg/an}$  au niveau de l'OML en moyenne de 1994 à 2005 (Fig. 9) (Coppola *et al.*, 2018). Ceci laisserait supposer l'apparition future en mer Ligurie d'une zone d'hypoxie (seuil de  $60 \mu\text{mol/kg}$ ) si aucun épisode de convection intense capable de ventiler entièrement la LIW n'avait lieu au cours des 25 ans à venir.

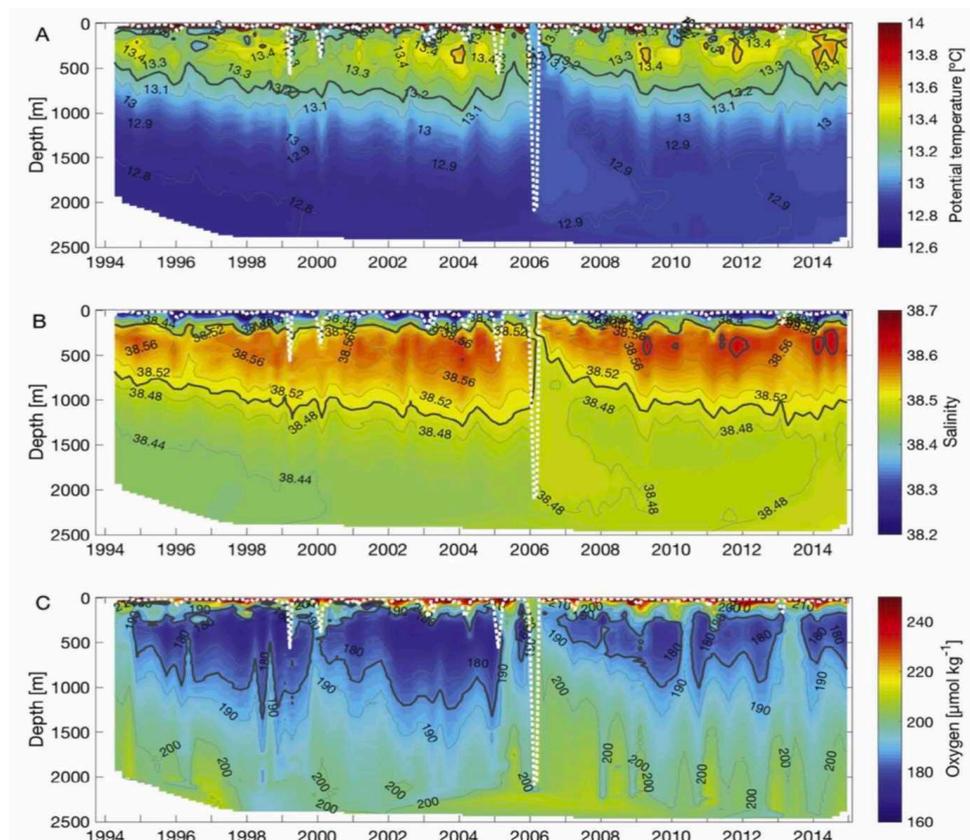


Fig 8 : Série temporelle des données  $T$ ,  $S$  et  $O_2$  acquises tous les mois depuis 1994 au site DYFAMED. Ces données ont été révisitées par rapport aux études précédentes en les corrigeant des dérives des capteurs (procédure de post-calibration) et des incertitudes liées à la précision des capteurs (notamment pour l' $O_2$  corrigé à l'aide des mesures Winkler).

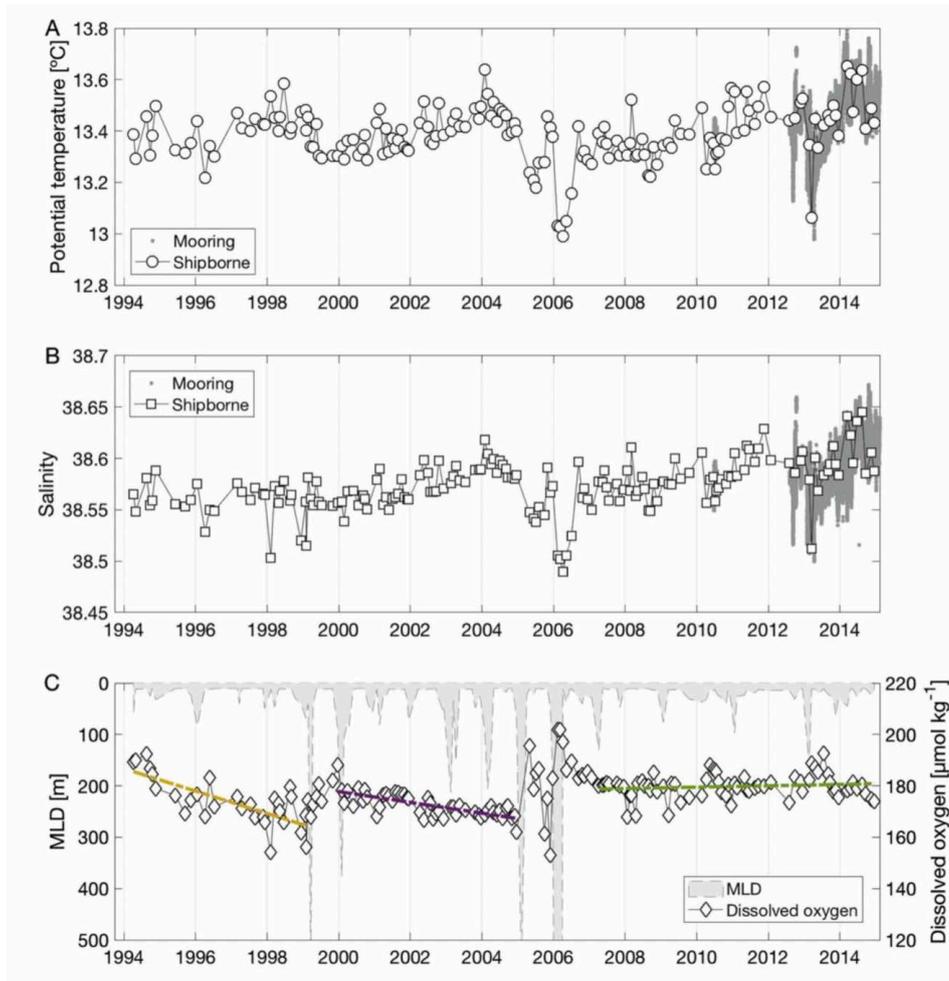


Fig. 9 : (A) Variabilité de la température potentielle, (B) de la salinité et (C) de la MLD (zone grisée) avec celle de l'O<sub>2</sub> dans les eaux intermédiaires (environ 350 m) au site DYFAMED de 1994 à 2014 (Coppola *et al.*, 2018). Les triangles, carrés et losanges blancs représentent les données mensuelles (bateau). Les points gris

Lors de l'hiver 2005-2006, le processus de convection fut particulièrement intense et rapide dans tout le bassin nord-occidental, y compris en mer Ligure (Zunino *et al.*, 2012). Les vents froids et secs ainsi que l'accumulation des eaux denses en surface depuis les hivers précédents sont la principale cause de cet événement convectif qui a mélangé toute la colonne d'eau dans le Golfe du Lion et en mer Ligure. Ce processus intense a ainsi permis d'injecter 24 mol O<sub>2</sub> /m<sup>2</sup> entre 350 et 2000 m de profondeur de décembre 2005 à mars 2006, ventilant ainsi l'OML de manière conséquente. Cette anomalie a induit un réchauffement, une stratification et une ventilation des eaux profondes dans le bassin occidental (Schroeder *et al.*, 2013). Ce changement, appelé WMT, s'est par la suite répandu dans tout le bassin de la Méditerranée occidentale conduisant à une modification progressive des eaux profondes dans le bassin occidental (Durrieu De Madron *et al.*, 2013). Depuis cette anomalie, les eaux profondes en mer Ligure sont principalement ventilées par la propagation des eaux denses formées dans le Golfe du Lion. En effet, même si la mer Ligure n'est pas une zone purement propice à la convection au large comme c'est le cas dans le Golfe du Lion, les épisodes de convection les plus intenses engendrent des changements aisément observables en raison notamment de la dispersion des masses d'eau profonde nouvellement formées et donc plus oxygénées qui s'écoulent en direction

de l'est vers la mer Ligurie (Fig. 10). C'est notamment grâce aux mesures continues issues du mouillage DYFAMED et aux mesures qualifiées en O<sub>2</sub> que nous avons pu mettre ce phénomène en évidence (Coppola *et al.*, 2018).

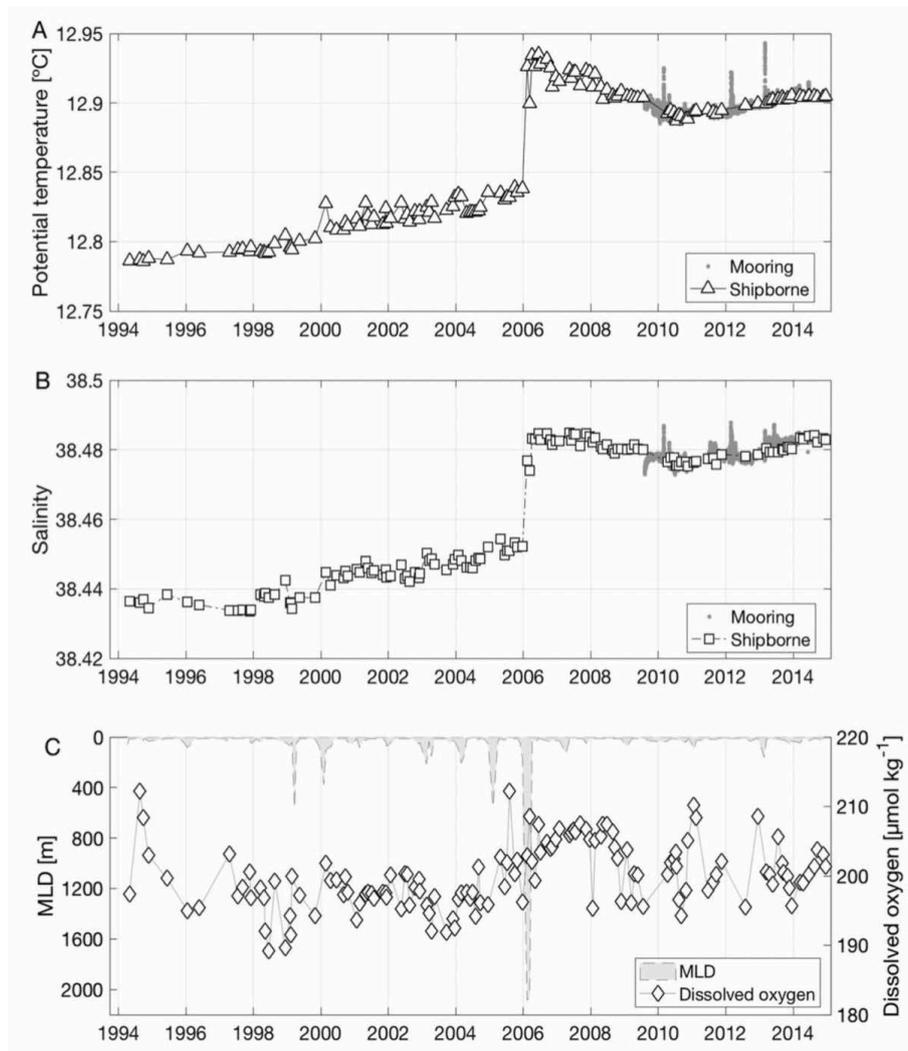


Fig. 10 : (A) Variabilité de la température potentielle, (B) de la salinité et (C) de la MLD (zone grisée) avec celle de l'O<sub>2</sub> dans les eaux profondes (environ 2000 m) au site DYFAMED de 1994 à 2014 (Coppola *et al.*, 2018). Les triangles, carrés et losanges blancs représentent les données mensuelles (bateau). Les points gris celles issues du mouillage DYFAMED

En mer Ligurie, comme nous l'avons évoqué précédemment, le mélange des eaux de surface en hiver est, en général, peu intense (200-500 m), en raison des vents moins violents, ce qui réduit la perte de chaleur et de flottabilité des eaux de surface. Dans ces eaux de surface, la variabilité saisonnière de l'O<sub>2</sub> reflète l'équilibre entre les échanges air-mer, les changements de la MLD et la production phytoplanctonique (photosynthèse). Les données acquises au site DYFAMED ont ainsi permis d'estimer une production annuelle nette (NCP) de 5.5 mol C/m<sup>2</sup>/an, en utilisant la quantité moyenne d'O<sub>2</sub> produite sur une année soustraite du flux d'échange air-mer dans la couche de surface (estimé à partir de la saturation et des concentrations en O<sub>2</sub> mesurées). Cet NCP est une estimation assez grossière mais il a l'avantage d'être calculé à partir de 20 ans de données mensuelles et intègre ainsi mieux la variabilité du mélange et de l'oxygénation des couches en surface qui ont lieu en hiver et qui jouent un rôle essentiel dans

l'apport en sels nutritifs, éléments clés pour la production de biomasse chlorophyllienne. Cette valeur moyenne de la NCP estimée reste toutefois cohérente avec les observations historiques faites sur la production primaire à partir de carbone-14 (Marty and Chiavérini, 2002) et l'export mesuré directement dans les pièges à particules (Miquel *et al.*, 2011).

## 2.1. Quels impacts sur les nutriments ?

Au site DYFAMED, les résultats sur le contenu en sels nutritifs ont permis de décrire, avec une bonne précision, le cycle saisonnier caractéristique de la zone Ligurie (thèse d'O. Pasqueron de Fommervault, 2015). Ces concentrations en nutriments sont généralement faibles en surface, sauf en hiver et au début du printemps, quand les processus de mélange sont importants (Fig. 11). Les variations saisonnières de la MLD contrôlent en grande partie ce cycle, même si une relation quantitative apparaît impossible à établir avec la résolution temporelle disponible (i.e., mensuelle). Les résultats ont montré qu'un changement important dans les concentrations en nutriments des eaux profondes à DYFAMED était survenu en 2005-2006 en lien, probablement, avec un soulèvement des eaux profondes, induit par l'apport d'une nouvelle eau dense. L'étude des rapports molaires d'abondance nous permet aussi d'établir que le phosphore et l'azote semblent jouer un rôle équivalent en période productive. Sur la période 1991-2011, et pour la première fois en Méditerranée, des résultats mettent en évidence des tendances décennales dans les eaux profondes (Pasqueron de Fommervault *et al.*, 2015). On a pu ainsi observer que dans les eaux intermédiaires et profondes à DYFAMED, le rapport de Redfield était de 20:1 entre 1991 et 2011 mais ce rapport augmente d'environ 1.1% par an (Pasqueron de Fommervault *et al.*, 2015). Cependant ces rapports de Redfield ont moins de signification dans les mers semi-fermées, à cause notamment de la forte influence des apports externes, i.e. essentiellement le dépôt atmosphérique.

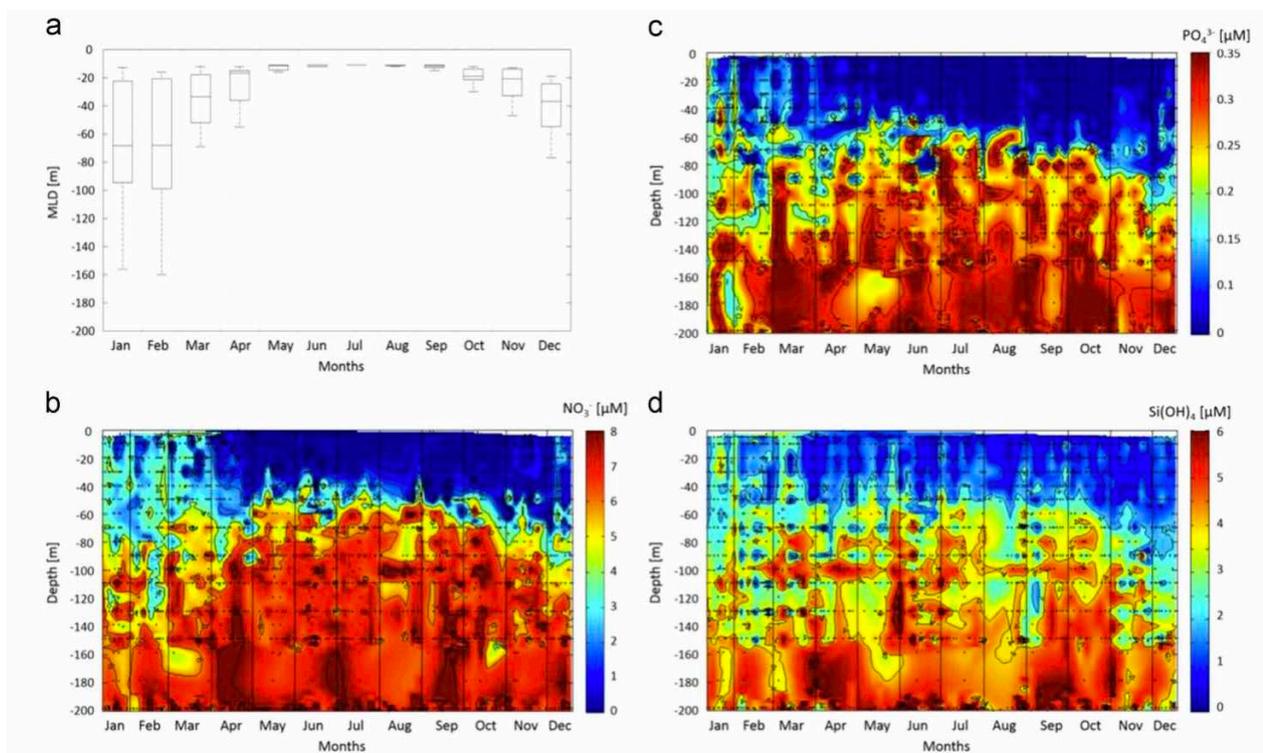


Fig. 11 : Climatologie saisonnière de la MLD : (a) et des concentrations en nutriments ((b) nitrate ; (c) phosphate, et ; (d) silicate) dans la couche 0-200 m à DYFAMED de 1991 à 2011 (Pasqueron de Fommervault *et al.*, 2015).

## 2.2. L'export de particules et de carbone organique en mer Ligure

Ces variations en nutriments, fortement influencées par celles de la MLD (principal forçage en mer Ligure), ont également impacté la production et l'export de particules vers la zone mésopélagique qui est mesuré régulièrement depuis 1988 au site DYFAMED à l'aide de pièges à particules (Miquel *et al.*, 2011).

L'export de matière particulaire est un processus essentiel dans le cycle du carbone qu'il convient de bien estimer. Les mécanismes de production et d'export de matière dans l'océan sont en effet l'un des processus qui déterminent la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Dans l'océan ouvert, cette matière est soit produite en surface par les activités photosynthétiques du plancton (matière biogène), soit apportée par les poussières atmosphériques (matière lithogène). La plus grande partie de la matière organique ainsi synthétisée est soit respirée, soit reminéralisée dans la couche euphotique, tandis qu'une faible fraction est exportée vers les couches profondes de la zone aphotique dans l'océan intérieur. Au cours de son transit vers les profondeurs, cette matière subit différents processus qui altèrent sa composition et sa vitesse de chute. Parmi ces processus, les courants, la dynamique du zooplancton et la reminéralisation de la matière organique jouent un rôle essentiel.

En océanographie, les moyens développés pour estimer la quantité de matière exportée en profondeur sont les pièges à particules. Ils représentent l'outil le plus utilisé pour déterminer la variabilité temporelle des flux de particules et pour comprendre les mécanismes qui régulent les flux biogéochimiques dans les océans. Ces pièges permettent de mesurer précisément le flux de matière particulaire à un endroit donné, mais également de collecter cette matière qui servira d'archive multiparamétrique ultérieurement. La composition des particules collectées dans les pièges permet d'estimer une grande variété de flux dans la colonne d'eau (carbone organique, silice biogène, carbonate) et leur variabilité saisonnière et interannuelle. Parmi les flux mesurés, l'export de Carbone Organique Particulaire (POC), produit par le phytoplancton dans la couche euphotique, est essentiel car il nous renseigne sur l'efficacité de la pompe biologique (production exportée vs. production nouvelle), thème majeur en biogéochimie marine (Ducklow *et al.*, 2001).

Les flux de particules exportés sont étudiés au site DYFAMED depuis l'origine de la série temporelle (Fowler *et al.*, 1987; Buat-Ménard *et al.*, 1989). Leur observation a révélé une forte variabilité interannuelle fortement contrainte par le mélange vertical, les apports atmosphériques et la production de biomasse chlorophyllienne. Dans ce contexte, les travaux de L. Heimbürger (Heimbürger *et al.*, 2013), dans lesquels je me suis investi, ont permis de démontrer que la convection hivernale, bien qu'épisodique en mer Ligure, permet d'intensifier l'export de particules vers les eaux profondes. L'efficacité de ce processus détermine également la concentration des nutriments apportés dans les eaux de surface et, par conséquent, l'intensité de la prolifération de phytoplancton qui suivra. Ces travaux ont aussi démontré que malgré leur rôle dans la composition et le lestage des particules marines, les apports atmosphériques ne déclenchent pas d'épisodes d'export intense sans mélange vertical ou sans l'activité biologique qui s'ensuit (Migon *et al.*, 2002; Heimbürger *et al.*, 2014). Ainsi, la séquence "convection-bloom" est la principale force motrice du flux vertical d'export dans cette région.

Depuis le travail de thèse de Heimbürger *et al.* (2010), qui a porté sur les données de pièges de 1988 à 2007, les dernières mesures dans les pièges au site DYFAMED indiquent la même tendance : une forte saisonnalité des flux de masse et une relation forte entre la MLD et les flux de particules exportées sur la période 2010-2015 (Fig. 12A). Cependant, la MLD était auparavant estimée à partir des simulations numériques (modèle SYMPHONIE), ce qui permettait de mieux

contraindre le mélange vertical, qui peut varier de quelques heures à quelques jours, mais induisait des incertitudes propres au modèle. Aujourd'hui, cette limite est compensée par les observations *in situ* recueillies au niveau des capteurs T et S installées sur le mouillage DYFAMED qui permettent une estimation plus haute fréquence de la MLD (en utilisant le critère de température). Ainsi on observe, par exemple, de forts flux de particules aux débuts 2010, 2012 et 2013 qui sont cohérents avec l'intensité du mélange vertical observé dans la zone de convection allant du Golfe du Lion à la mer Ligure (Houpert et al., 2016). Les flux de particules à 1000 m sont également toujours plus élevés que ceux à 200 m, et ceci en raison des processus de broutage du zooplancton et d'agrégation de particules plus fines en suspension qui auraient tendance à augmenter le flux de particules exportées en dessous de 200 m (Miquel *et al.*, 2011). Également, la surface de collecte diffère entre 200 m et 1000 m dans le sens où plus le piège est profond, plus la zone de collecte intégrée par un piège à sédiments est grande (si on suppose que les courants horizontaux sont négligeables comme c'est le cas ici au centre la mer Ligure). Il est aussi important de souligner que les données enregistrées au début 2012 (année de convection forte avec une MLD inférieure à 900 m enregistrée sur le mouillage) montrent le phénomène inverse : un plus fort de particules à 200 m qu'à 1000 m. Il serait lié à la durée et l'intensité du mélange vertical, lequel devient alors important dans la couche 0-200m. Ce mélange n'atteindrait la zone profonde que pendant quelques jours et injecterait ainsi moins de particules dans les pièges (effet de « chasse d'eau » limité). Enfin, vu la relation étroite existante entre flux de particules exportées et mélange vertical, les récentes observations fines sur la présence des tourbillons cohérents de submésos-échelle (stable dans le temps et d'un rayon < 5km) dans le bassin nord-occidental et leur impact sur la biogéochimie (voir section suivante) sont aussi à prendre en considération dans l'interprétation des résultats de pièges de 2012 (Bosse *et al.*, 2017).

Concernant le contenu en carbone organique (OC), on retrouve les mêmes tendances que dans la série historique (Miquel et al., 2011) : un contenu plus faible à 1000 m qu'à 200 m dû à la dégradation de la matière organique par les bactéries au cours de la chute des particules et un enrichissement en matière réfractaire en profondeur induit notamment lors de l'agrégation des particules en suspension (Fig.12B). La saisonnalité du contenu en OC est aussi cohérente notamment à 200 m où l'on retrouve un maximum du contenu vers la fin de la période du bloom phytoplanctonique (début de l'été) avec une variabilité interannuelle dépendante de l'intensité du bloom, de la quantité en nutriments apportée par le mélange hivernal et de la composition des particules exportées à 200 m. Cette exploitation des données est toujours en cours et fera certainement l'objet d'une publication qui traitera également les données des pièges présents dans le reste du bassin (pièges BILLION ; Stabholz *et al.*, 2013).

Ainsi les perturbations contrôlant la variabilité de la MLD (intensité des vents, température de l'air, stratification, préconditionnement) et/ou la productivité biologique (apports en nutriments, taille et composition des espèces, broutage) sont susceptibles d'avoir un impact sur l'export vertical et la séquestration du carbone, ce qui, en retour, est susceptible d'avoir un impact sur le climat. À ce jour, les données disponibles indiquent que la position, l'extension et le moment de la convection profonde sont l'un des principaux moteurs de la floraison printanière et de son intensité dans le nord-ouest de la Méditerranée (Bosse *et al.*, 2017). Néanmoins, les scénarios futurs laissent entrevoir que l'importance des nutriments profonds dans la fertilisation de la couche euphotique de la Méditerranée nord-occidentale pourrait diminuer en raison d'épisodes convectifs qui démarreraient plus tôt et avec une zone de mélange plus petite (Macias *et al.*, 2018). Ce type de scénario serait plus marqué en mer Ligure où le forçage convectif est

moins important. On peut donc s'attendre à ce que les flux de particules exportés et donc la séquestration de carbone soit réduite dans cette partie de la Méditerranée.

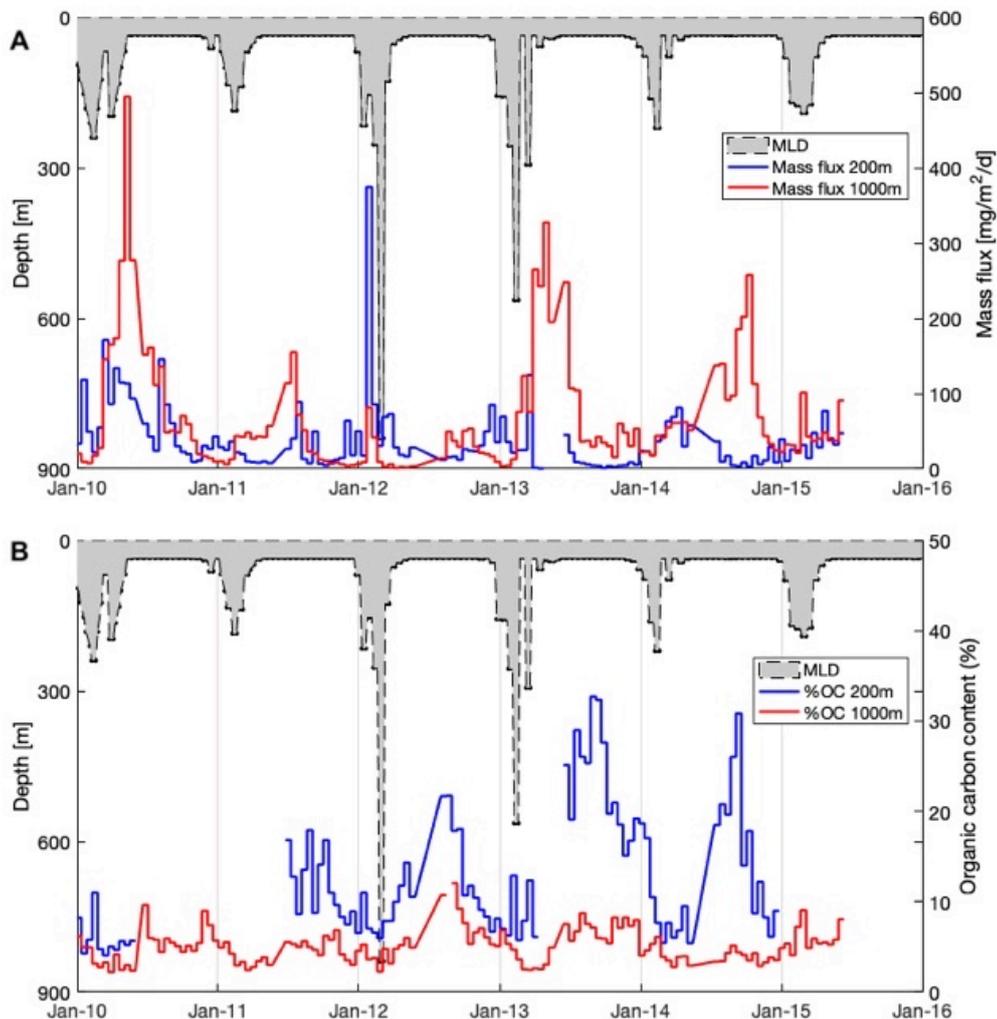


Fig. 12 : Série de flux de masse et du contenu en carbone organique mesurés dans les pièges à particules à 200 m et 1000 m à DYFAMED de 2010 à 2015. La zone grisée représente la MLD estimée à partir des données du mouillage (gradient de T, résolution 5 à 10 jours). Le pas de temps pour la collecte des pièges est de 15 jours

Valorisation : 1 papier en premier auteur et 5 papiers de rang A comme co-auteur. Participation à l'encadrement des étudiants en thèse pour l'interprétation de la série DYFAMED (L. Heimburger et O. Pasqueron de Fommervault)

### 3. Pour aller plus loin dans l'observation des processus en mer Ligure

Les études en un point fixe permettent d'observer les changements hydrologiques et biogéochimiques avec une fréquence temporelle très variable allant de la variabilité diurne à la variabilité décennale tout en couvrant l'ensemble de la colonne et ceci grâce aux plateformes fixes (bouée, mouillage). Par exemple, l'intensité du mélange hivernal peut-être contraint par la profondeur maximale de la couche de mélange, et les données issues des mouillages permettent de bien documenter sa variabilité. Cependant ces données ne contraignent pas la variabilité spatiale de l'étendue de la zone de mélange (« mixed patch ») et l'estimation de l'intensité de renouvellement des eaux profondes formées est impossible. Les images satellitaires de couleur de l'eau peuvent fournir des informations importantes sur l'étendue de la zone de convection. Mais en hiver, la présence de nuages altère considérablement ce type d'observation. Enfin, les campagnes océanographiques en hiver sont extrêmement difficiles à effectuer et ne permettent pas d'observer de nombreux processus clés qui échappent aux techniques classiques. Grâce à l'utilisation de plateformes mobiles autonomes (flotteurs, gliders) dans le bassin nord-occidental de la Méditerranée, nous pouvons désormais proposer une description plus fine des processus physiques de l'océan et de leurs impacts sur les cycles biogéochimiques comme nous l'avons vu pendant l'expérience DEWEX. Plus particulièrement, les mesures gliders permettent un échantillonnage sur de petites échelles (Ruiz *et al.*, 2012), mais aussi sur de plus grandes régions océaniques (Davis *et al.*, 2008). L'utilisation scientifique de gliders a porté initialement sur l'analyse des données T/S (Heslop *et al.*, 2012; Pelland *et al.*, 2013; Timmermans and Winsor, 2013), pour ensuite, grâce aux progrès technologiques, concerner aussi des analyses biogéochimiques (Perry *et al.*, 2008; Niewiadomska *et al.*, 2008).

Dans ce cadre, des premières études ont été initiées au LOV afin d'observer et d'évaluer l'impact des instabilités dynamiques à petite échelle spatiale du NC sur la dynamique biogéochimique de la région. Depuis, 2009, la totalité du parc des gliders français (y compris ceux du LOV, Tintin et Milou) est gérée par la Division Technique de l'INSU. Depuis 2010, elle s'occupe aussi de maintenir les radiales mensuelles effectuées dans le cadre du SNO MOOSE pour lequel nous avons décidé de maintenir deux radiales essentielles dans le bassin nord-occidental de la Méditerranée. Ces radiales sont effectivement représentatives des masses d'eaux et des bio-régions de ce sous-bassin : la radiale T00 Nice-Calvi et la T02 Marseille-Lion-Minorque. Mon activité d'observation et de recherche à partir de données fournies par des gliders s'est principalement focalisée sur la radiale T00 Nice-Calvi (40 radiales depuis 2010) et sur le contrôle qualité des données O<sub>2</sub>.

La radiale Nice-Calvi est une section clef car elle coupe perpendiculairement le NC et le WCC (section 2, p.26). Ces courants sont importants pour le transport de chaleur et de sel et leurs échanges avec la LIW située légèrement en dessous (Bosse *et al.*, 2015). Au centre de la mer Ligure, on observe une remontée des isopycnes séparant la veine de la LIW des eaux Atlantiques situées au-dessus. Ce dôme au centre devient sensible à la perte de chaleur en hiver et donc propice au mélange vertical. On observe ainsi des processus de mélange bien plus dynamiques à environ 80-100 km de Nice qu'au site DYFAMED (Bosse *et al.*, 2017).

Les premières études à partir de données fournies par des gliders le long de cette radiale ont montré l'importance de la structure frontale du NC, avec l'existence de langues de subduction déterminées par l'instabilité du front (Niewiadomska *et al.*, 2008). Plus récemment, les observations par les gliders ont permis de révéler la présence de tourbillons cohérents SCV d'un rayon de 5 km (« Submesoscale Coherent Vortices ») le long de cette radiale avec de fortes

anomalies de température (+0.4°C) et de salinité (+0.1) (Bosse *et al.*, 2016). En 2013, une étude utilisant à la fois des données bateau et glider du réseau MOOSE a montré qu'à l'intérieur de ces SCV les paramètres biogéochimiques sont également fortement affectés, avec des concentrations de nutriments de 20 à 30% inférieures aux valeurs observées dans l'environnement extérieur, et des concentrations en O<sub>2</sub> plus élevées (+ 15 µmol/kg) (Fig. 13) (Bosse *et al.*, 2017). Ces fortes valeurs seraient liées à un épisode de convection hivernale. En effet, en février 2013, les radiales gliders opérant en continu dans cette zone ont montré un mélange vertical important (MLD de 1000 m) avec des caractéristiques T/S similaires à celles du SCV. Ainsi, grâce à la technologie des gliders, la détection de ces SCV avec une structure bien définie (1000 m d'épaisseur et un cœur bien oxygéné à 500 m de profondeur) nous a aidé à mieux comprendre certaines anomalies en O<sub>2</sub> observées au site DYFAMED. La présence de ces tourbillons pouvant durer plusieurs mois en mer Ligure, leur impact n'est en effet pas négligeable.

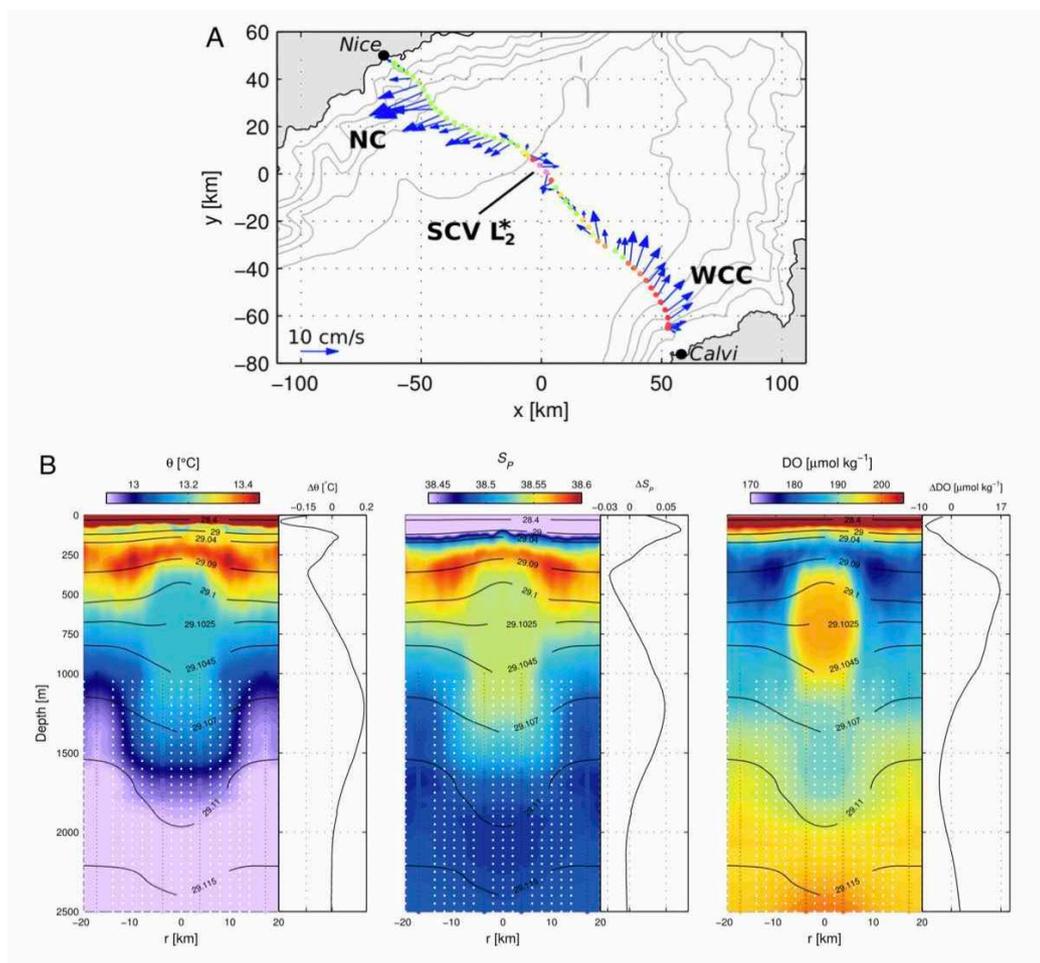


Fig. 13 : (A) Exemple d'une section glider entre Nice et Calvi avec détection d'un SCV en novembre 2010 (Bosse *et al.*, 2015). (B) Coupe verticale dans un SCV avec profils de température potentielle, de salinité et d'O<sub>2</sub> observés entre Nice et Calvi en juin 2013 (Bosse *et al.*, 2017)

Depuis 2010, l'expérience avec MOOSE nous a montré qu'il restait néanmoins difficile de faire une étude complète de processus sur deux saisons consécutives allant du début du

mélange à la stratification pour des raisons logistiques (nombres de gliders opérationnels, moyens humains, ...). En conséquence, j'ai décidé en 2018 de compléter les radiales MOOSE T00 avec les données d'un second glider, données recueillies de début janvier à fin mai (8 radiales avec SeaExplorer piloté par le LOV et ALSEAMAR). L'objectif était de mettre en place une observation continue afin de garantir une couverture complète et optimale des variables physiques et biogéochimiques le long de la radiale Nice-Calvi en échantillonnant tous les scénarios : mélange, ventilation, bloom et stratification. Au total, 1135 profils en T, S, O<sub>2</sub>, fluorescence, CDOM et rétrodiffusion ont été acquis (un profil tous les 2-3 km).

Les premières observations montrent qu'en février-mars 2018, des vents intenses et une faible température de l'air ont provoqué une forte évaporation et une perte de chaleur, augmentant la densité de la couche de surface jusqu'à ce qu'elle s'enfonce par convection jusqu'à une profondeur intermédiaire. Ce mélange intense, révélé par une SST plus froide, s'est produit dans le centre de la mer Ligurienne (Fig. 14).

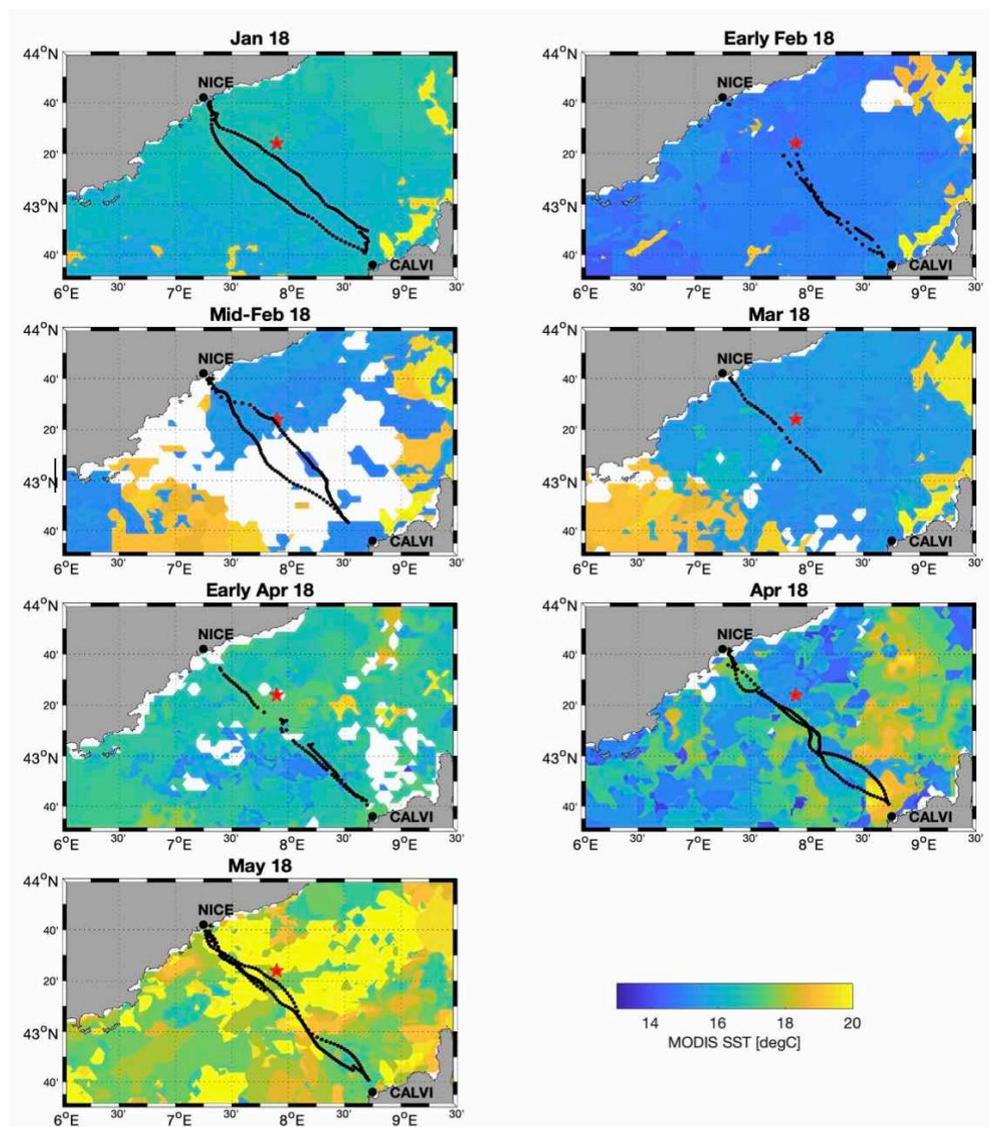


Fig 14 : Climatologie de la SST observée par MODIS de janvier à mai 2018 en mer Ligurienne (données type L3, résolution 4 km). Les trajectoires du SeaExplorer sont représentées par les points noirs. L'étoile rouge représente la position du site DYFAMED

En raison de cette perte de chaleur, un mélange profond s'est produit conduisant à une dilution très importante. Ainsi, la LIW, habituellement caractérisée par un maximum de T et S et un minimum d'O<sub>2</sub> de 300 à 700m a perdu ses caractéristiques. Elle est devenue moins chaude, moins salée et plus oxygénée (Fig. 15). Les données du mouillage DYFAMED 2017-2018, nous ont permis d'établir que cet hiver froid a induit un mélange jusqu'à 1500 m, provoquant un apport de salinité dans les eaux profondes (38.50 à 1000 m de profondeur pendant plusieurs semaines), avec une oxygénation de 10 à 15  $\mu\text{mol/kg}$ . En plus de cet apport d'O<sub>2</sub>, la couche mélangée profonde induit généralement un réapprovisionnement des eaux de surface en nutriments, ce qui détermine le début de la floraison printanière subséquente ainsi que sa magnitude. En effet, les sections suivantes du SeaExplorer ont montré une augmentation très rapide de la Chl-a à partir d'avril. Cette exploitation de données fait l'objet d'une publication en cours.

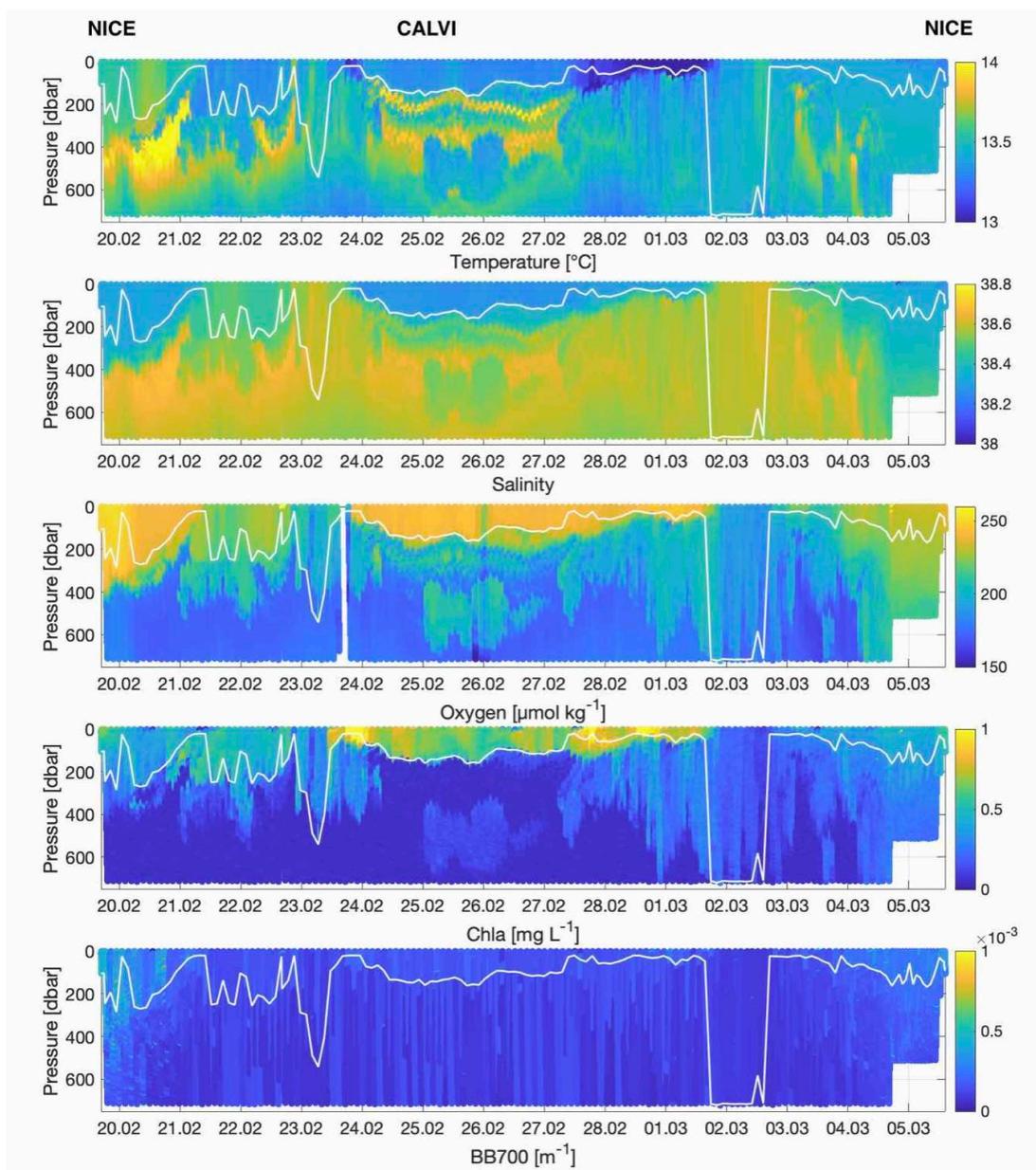


Fig 15 : Exemple d'un ensemble de données SeaExplorer (SEA006 M109) le long de la section Nice-Calvi de fin février 2018 à début mars 2018. La ligne blanche représente la profondeur de la couche mélangée estimée à partir du seuil de densité potentielle de  $0.01 \text{ kg/m}^3$

## Quelles orientations pour les années à venir ?

### 1. Le rôle clef de la LIW et de l'OML en Méditerranée

La LIW, jouant un rôle important dans le processus de convection profonde, ses transformations dans le passé ont bouleversées les propriétés des masses d'eau profonde. Par exemple, dans le bassin Est, l'événement climatique qui s'est déroulé à la fin des années 1980 (EMT) a conduit à une augmentation du réchauffement et à une évaporation du bassin, ce qui a affecté les couches intermédiaires et profondes dans cette région. L'advection de la LIW (devenue anormalement plus chaude et plus salée) vers le bassin ouest, accompagné d'un forçage atmosphérique plus intense lors des hivers 2004/2005, ont entraîné le déclenchement du WMT (voir sections 1 et 2) qui a affecté les propriétés des masses d'eau dans le Golfe du Lion et la mer Ligure (Smith et al., 2008 ; Marty and Chiaverini, 2010). La faible intensité de la convection profonde dans le Golfe du Lion pendant les années 90, conduisant à des eaux intermédiaires plus chaudes et plus salées, serait aussi une des raisons pouvant expliquer l'événement exceptionnel de 2005 (Herrmann *et al.*, 2010). Ainsi, il est maintenant reconnu que le rôle de la LIW est déterminant sur la quantité et les caractéristiques des eaux profondes qui sont formées et ventilées à la fois dans le bassin Est et Ouest (Kress et al., 2014 ; Schroeder et al., 2017), avec un effet notable sur le contenu biogéochimique et notamment sur le contenu en O<sub>2</sub> (Schroeder et al., 2010 ; Tanhua et al., 2013 ; Coppola et al., 2018).

L'apport de la matière organique dans la LIW conditionne un accroissement très important de l'activité bactérienne. Ceci explique en partie l'apparition de l'OML située au niveau de la LIW dans le bassin occidental (300-400m) ou en dessous dans le bassin oriental (500-700m) (Pujo-Pay *et al.*, 2011, Tanhua *et al.* 2013). Cette OML est aussi entretenue par l'absence d'échanges avec les couches de surface, sursaturées en oxygène en raison de la forte stratification présente au-dessus de la LIW, ce qui empêche toute ventilation des couches intermédiaires. Ce n'est que dans les zones de convection que la couche de mélange devient suffisamment profonde pour atteindre les couches intermédiaires et ventiler ainsi l'OML. Sans mélange suffisamment profond (et donc sans une ventilation efficace), on peut s'attendre à ce que les concentrations en O<sub>2</sub> dans cette couche diminuent drastiquement, comme nous l'avons vu sur la série temporelle DYFAMED (Coppola et al., 2018). En outre, depuis 2014, toutes les eaux intermédiaires du bassin se sont réchauffées et salinisées. Elles ont continué à s'appauvrir en O<sub>2</sub> en raison de la faible intensité, voire d'une absence, de convection profonde dans le bassin nord-occidental et ceci jusqu'à la fin 2017 (Fig. 16 ; Margirier et al., in prep). La répartition du volume d'eau entre les eaux profondes et intermédiaires est également modifiée car la LIW a envahi une plus grande partie de la colonne d'eau. L'OML s'est donc renforcée et épaissie, aussi bien en mer Ligure que dans le Golfe du Lion. Ce phénomène pourrait avoir un impact sur les processus biogéochimiques et biologiques, comme notamment une altération de la dynamique du phytoplancton en raison d'une absence de ventilation et de remontée en nutriments (Kessouri *et al.*, 2018) si les processus de convection venaient à s'estomper dans le futur (Somot et al., 2006).

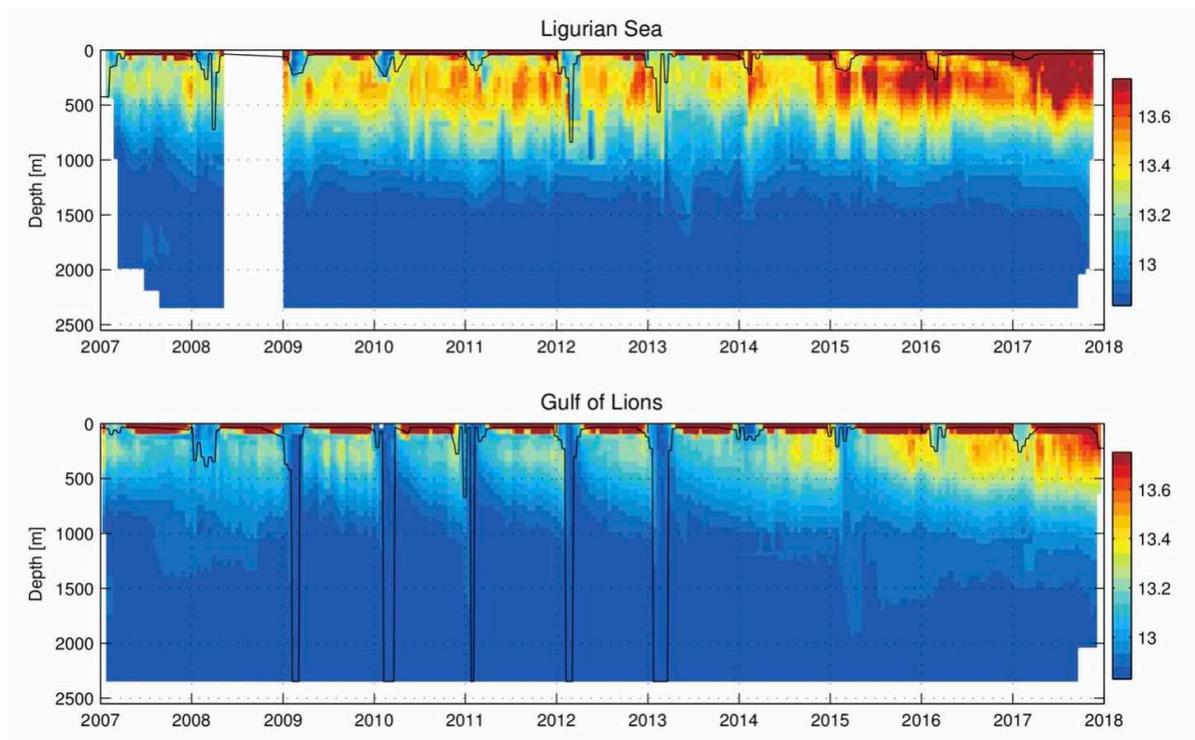


Fig. 16 : Données interpolées T et S des mouillages DYFAMED et LION de 2007 à 2018. La ligne noire représente la MLD. L'absence de convection dans la zone depuis 2014 a induit une présence de la LIW plus importante dans la colonne d'eau (Margirier et al., in prep.)

Par ailleurs, ce réchauffement des eaux intermédiaires peut jouer le rôle de préconditionnement pouvant faciliter un prochain mélange intensif. Cet effet déclencheur d'une LIW anormalement plus chaude et plus salée a, en effet, était observé très récemment. Lors de l'hiver 2018, un très net refroidissement a été enregistré (voir section 3) et un mélange vertical intense a provoqué une ventilation importante de la LIW avec un apport en  $O_2$  de  $40 \mu\text{mol/kg}$  en quelques jours et une baisse en salinité en mer Ligure (Fig. 17). Ce mélange en 2018 reste toutefois inférieur en termes d'intensité comparé à celui de 2005/2006 car il n'a pas atteint le fond dans le Golfe du Lion, ni en mer Ligure (observé à 2000 et 1000-1500 m aux sites LION et DYFAMED, respectivement). Ainsi, l'absence de mélange vertical important en mer Ligure a considérablement bouleversé le signal de la LIW et les eaux profondes qui, comme on pouvait s'y attendre, ont subi une augmentation en T et S. Ce travail de recherche est toujours en cours et montre l'importance du suivi des caractéristiques de la LIW et de l'OML qui jouent un rôle déterminant dans la ventilation des eaux profondes et les caractéristiques biogéochimiques de la Méditerranée. C'est sur cette thématique que je continuerai à accéder mes recherches en couplant observations *in situ* et jeux de données issus des simulations numériques.

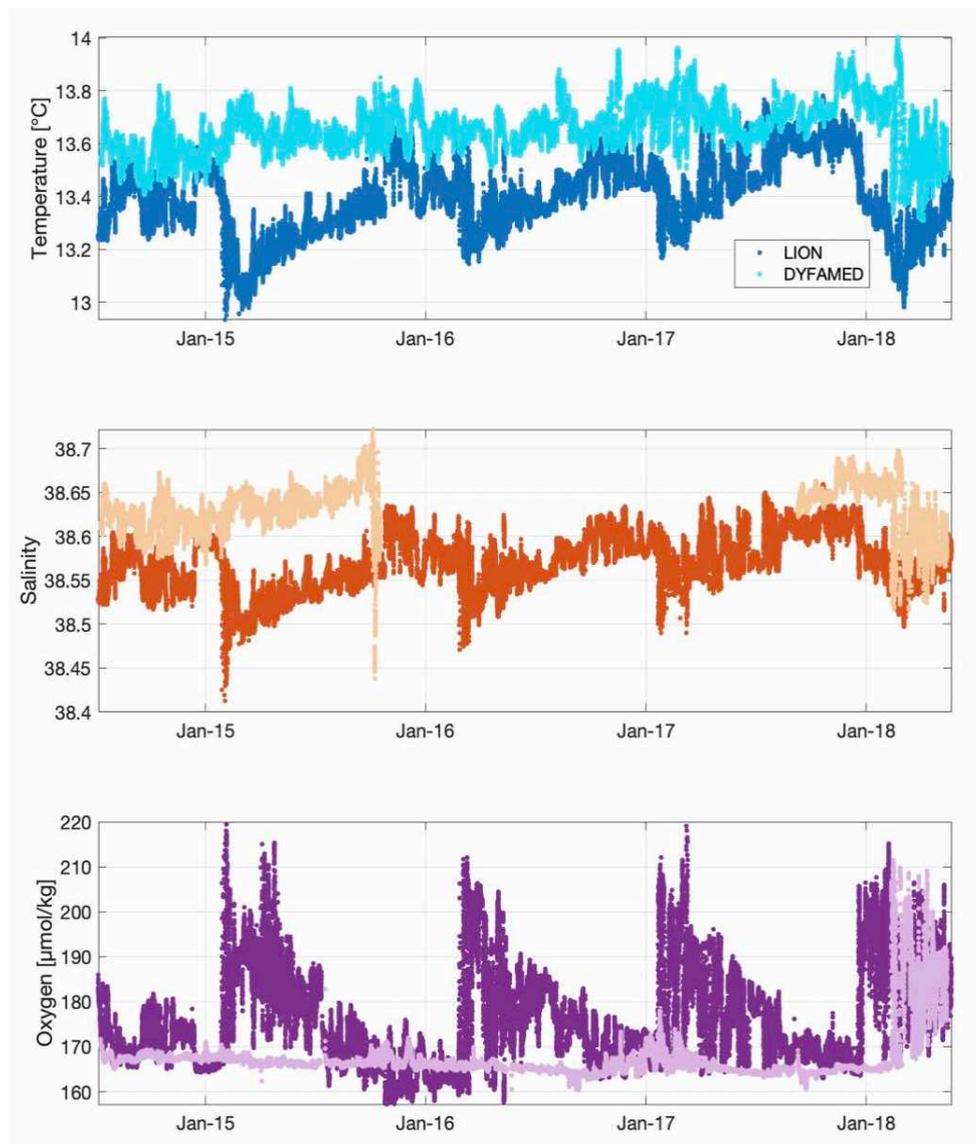


Fig. 17 : Comparaison des données T, S et O<sub>2</sub> entre les mouillages LION et DYFAMED de 2015 à 2018 dans le cœur de la LIW (300-350m).

## 2. Renforcer les capacités d'observation à la source de la LIW

Nos connaissances actuelles sur les mécanismes de formation de la LIW, sa variabilité et son rôle dans les cycles biogéochimiques, sont limitées en raison du manque de données *in situ* dans le bassin Levantin et de modèles hydrodynamiques peu développés (hormis lors des projets POEM et GOIN dans les années 1980-1990). Dans ce contexte, il est devenu primordial de mieux comprendre la formation de la LIW à sa source et son mécanisme de dispersion dans le bassin Levantin, ainsi que son impact sur la présence et la distribution de l'OML. Pour cela, je me suis engagé dans le projet PERLE (« Pelagic Ecosystem Response in the Levant Experiment ») dont l'objectif principal est d'étudier la formation de la LIW et son rôle dans la distribution des

nutriments, de l'O<sub>2</sub> et la structuration des écosystèmes planctoniques dans la Méditerranée orientale (action conjointe MERMEX/HYMEX).

La stratégie d'observation de ce projet est axée sur 3 campagnes qui auront lieu sur plusieurs saisons en fonction des scénarios de formation d'eau dense et du bloom phytoplanctonique (PERLE 1 en octobre 2018, PERLE 2 en février/mars 2019 et PERLE 3 en juillet 2019). A cela se rajouteront les déploiements du réseau de flotteurs Argo qui commenceront en octobre 2018 autour et dans le « gyre » de Rhodes (zone propice à la formation d'eau dense), celui des gliders, des mouillages fixes et des bouées dérivantes. Cette stratégie multiplateformes et multi-variables devrait garantir un flux de données *in situ* essentiel dans cette région très peu couverte par les observations pérennes et les sorties de modèles (Fig. 18).

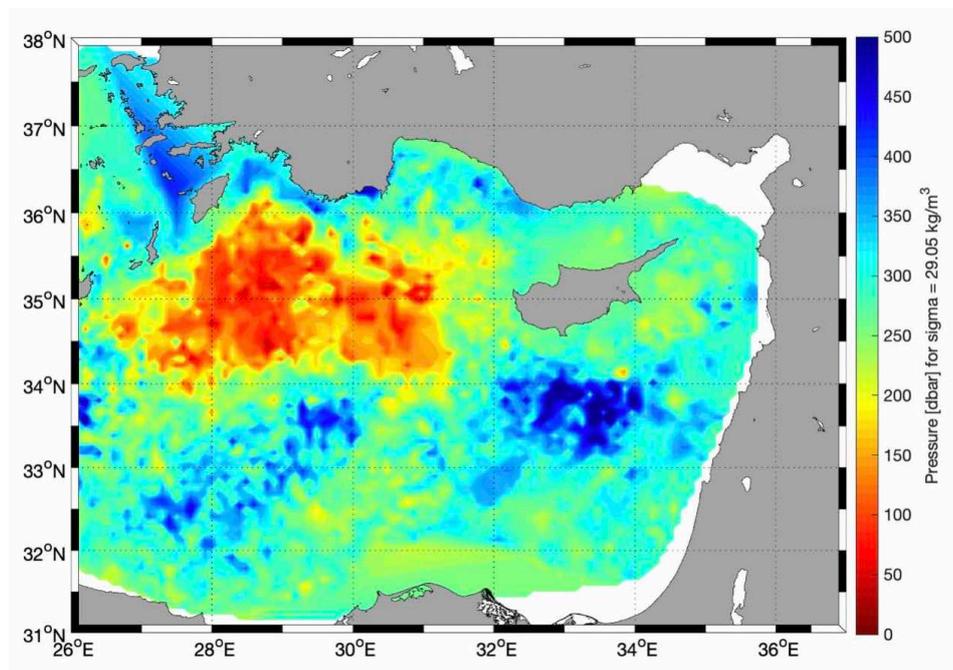


Fig. 18 : Iso-contours de la profondeur pour une densité potentielle égale à  $29.05 \text{ kg/m}^3$  (indicateur de la LIW) dans le bassin Levantin de 1990 à 2017. Ce critère montre que la formation de la LIW serait située plus en surface dans la zone Nord-Ouest du bassin, vers le «gyre» de Rhodes (en rouge sur la carte ; données issues du GDAC Coriolis)

Dans le projet PERLE, mon travail à partir de 2019 se concentrera sur le bassin Levantin, avec la caractérisation de la zone de formation de la LIW, l'estimation du volume d'eau dense formée en hiver et l'étude de l'impact de la dispersion de la LIW nouvellement formée sur les cycles biogéochimiques. Ces estimations seront réalisées en se basant sur les données hydrologiques et les concentrations en O<sub>2</sub>, comme indicateur de la masse d'eau dense formée, plus riche en O<sub>2</sub>. L'objectif sera aussi de comprendre quand et comment le contenu en O<sub>2</sub> évolue dans cette zone, sa variabilité saisonnière et son impact sur le contenu en nutriments. Pour traiter ces problématiques, la stratégie adoptée se fondera sur mon expérience acquise au cours du projet HYMEX/DEWEX :

- Participation aux campagnes en mer PERLE 2 et/ou PERLE 3,
- Ensemencement de 6 flotteurs Argo-O<sub>2</sub> dans le bassin avant et pendant la période de formation d'eau dense (Fig. 19 ; projet LEFE-GMMC LOVABLE),

- Intégration de toutes les données issues des autres plates-formes qui seront déployées dans le bassin Levantin pendant la période du projet et qui viendront alimenter le recueil de données biogéochimiques (gliders, mouillages),
- Fourniture de données  $O_2$  de qualité pour améliorer les simulations de modèle couplé physique-biogéochimie,
- Participation à la production de données virtuelles biogéochimiques à partir d'un réseau de neurones (voir section suivante).

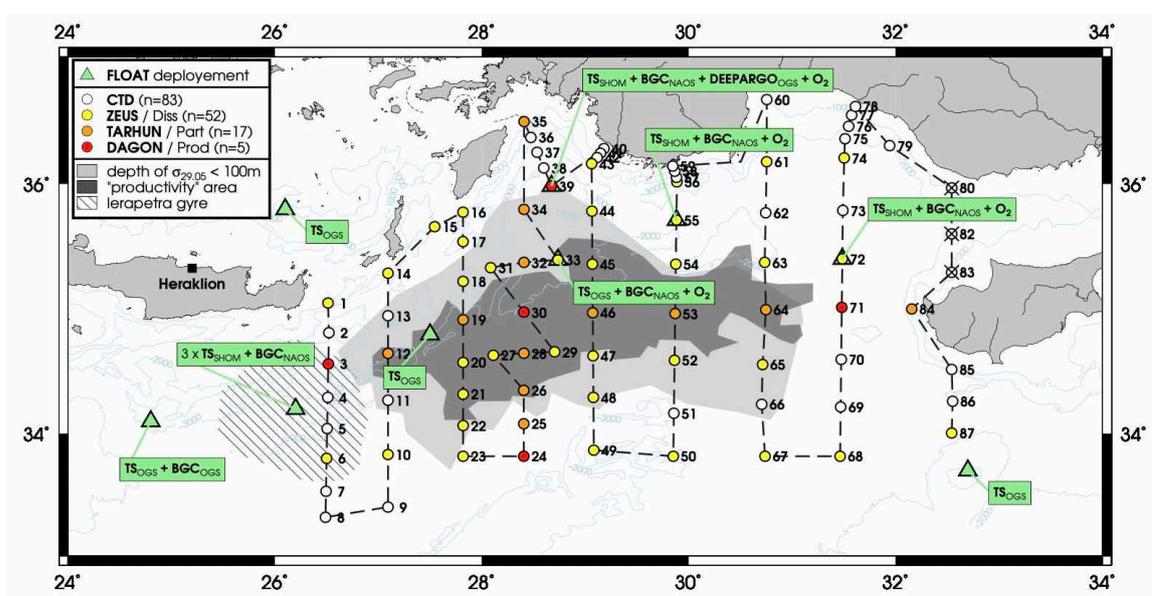


Fig. 19 : Stratégie d'échantillonnage pendant les campagnes PERLE dans le bassin Levantin. Les déploiements des différents flotteurs Argo sont illustrés par les triangles verts

### 3. Comprendre la variabilité saisonnière et interannuelle de l'OML : approche observations *in situ* et modèle couplé

Pour comprendre la dynamique de l'OML face à ces forçages physiques changeants, il est essentiel de disposer d'une vue d'ensemble sur la dynamique de l' $O_2$  dans le bassin occidental. Avec l'implantation du réseau MOOSE dans la partie nord-occidentale, l'émergence de réseaux d'observation intégrés en Espagne (SOCIB, RADMED) et en Italie (RITMARE), et le réseau de flotteurs profileurs Argo opérationnel depuis 2012/2013 (MOOXY, NAOS, remOcean), le jeu de données en  $O_2$  est devenu suffisamment conséquent pour améliorer notre compréhension du système. Cependant, seule la modélisation pouvait nous aider à comprendre la variabilité saisonnière de l' $O_2$  dans les couches intermédiaire et profonde. Pour cela, une collaboration étroite s'est établie avec l'équipe SIROCCO (C. Ulses, C. Estournel, LA OMP) pour rajouter un module  $O_2$  dans le modèle couplé SYMPHONIE-ECO3M-S (co-encadrement du stage de M1 de M. Fourier).

Les premiers résultats des variabilités saisonnières des concentrations en  $O_2$  dans le bassin nord-occidental face aux forçages physiques (mélange, convection) et biologiques (production,

respiration) comparés avec les observations *in situ* sur la période 2012-2013 ont été concluants (Fig. 20). Il convient maintenant d'étendre ces simulations à l'ensemble du bassin occidental et jusqu'à 2018 à l'aide notamment du dispositif Argo dont le nombre de flotteurs est devenu conséquent (29 flotteurs déployés depuis 2012 dont 8 sont toujours actifs dans le bassin occidental) et des gliders opérant en continu sur deux radiales nord-sud (MOOSE T00 Nice-Calvi et MOOSE T02 Marseille-Lion-Minorque). La dynamique de l'O<sub>2</sub>, pendant la période 2013-2018, ayant connu une forte variabilité du forçage convectif dans ce bassin (intense en 2013, pas de convection de 2014 à 2017 puis à nouveau convection intense début 2018), ces simulations nous aideront à comprendre quand et comment la signature de l'OML a évolué.

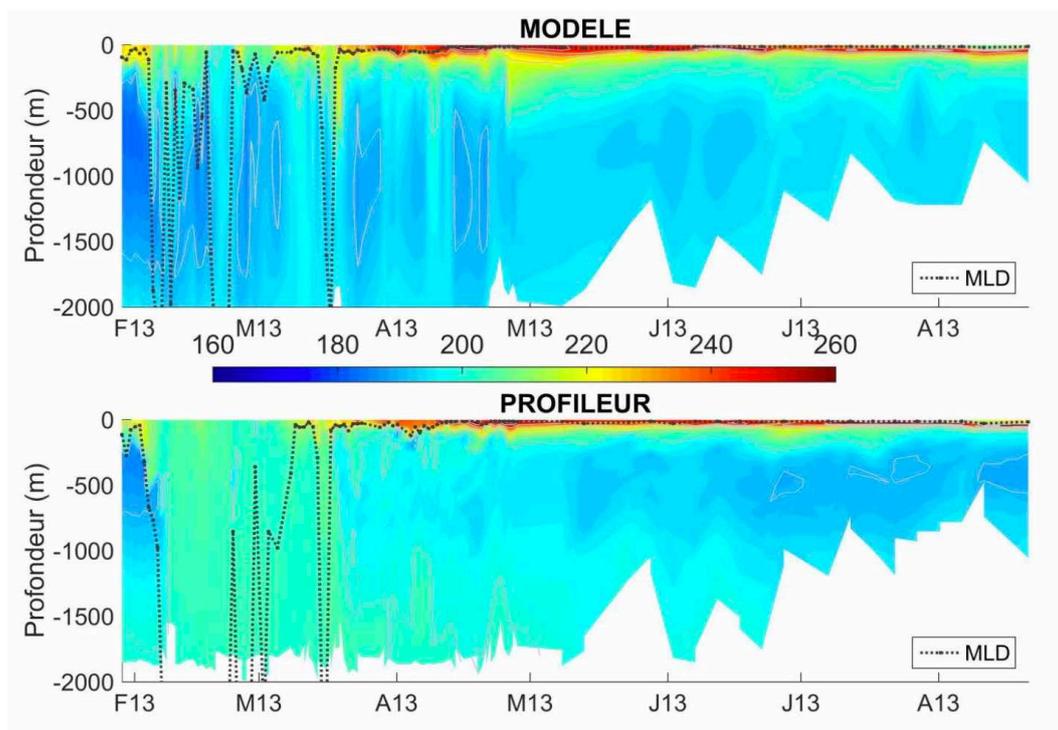


Fig. 20 : Comparaison entre les concentrations en O<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ) et la MLD (m) mesurées par le flotteur Argo 6901471 dans la zone de convection du Golfe du Lion en 2013 avec les valeurs simulées par le modèle SYMPHONIE-ECO3M pour la même trajectoire (stage M1, M. Fourier)

#### 4. Améliorer notre compréhension de la biogéochimie en Méditerranée à l'aide d'un réseau de neurones (sujet de thèse de M. Fourier)

Comme nous l'avons développé précédemment, malgré l'effort national et international pour accentuer les observations *in situ* en Méditerranée, notre compréhension du système des variabilités saisonnières et interannuelle reste incomplète. Ceci est en grande partie dû à un manque de données de type nutriments et carbonates, pourtant essentiel dans le cycle du carbone, tandis qu'elles sont pourtant peu ou pas acquises de manière automatique. Face à ce manque crucial, des programmes et des systèmes d'observation intégrés se sont mis en place,

principalement dans le bassin ouest depuis 2010 (HYMEX, MERMEX, MOOSE, MED-SHIP, NAOS), contribuant ainsi à augmenter la densité des mesures physiques et biogéochimiques. Dans ce contexte, le développement et la mise en œuvre de plates-formes autonomes instrumentées (planeurs sous-marin, flotteurs profileurs, mouillages) laissent espérer, à moyen terme, de densifier les mesures de certaines variables biogéochimiques. Ceci constitue un préalable permettant de mieux observer pour – mieux comprendre – les processus clefs, et de réduire les incertitudes qui leur sont associées. Néanmoins, les mesures réalisées par ces plates-formes autonomes ne sont pas exhaustives (il n'existe pas de capteurs pour toutes les variables). En outre, il faut s'assurer de leur qualité, notamment en les comparant à des mesures de référence, généralement effectuées à partir de prélèvements *in situ* réalisés lors de campagnes océanographiques (MOOSE, MED-SHIP).

Concernant les mesures O<sub>2</sub> effectuées par les flotteurs Argo, les mesures dans l'air et les protocoles de calibration multipoints des optodes (capteur optique utilisé majoritairement pour la mesure d'O<sub>2</sub> sur les plateformes mobiles) ont permis d'améliorer considérablement le contrôle qualité et la précision des données O<sub>2</sub> (Bittig et al., 2018). Ces données sont devenues aujourd'hui plus fiables et même si les mesures *in situ* type Winkler restent la référence, les mesures Argo-O<sub>2</sub> actuelles présentent des incertitudes proches de celles réalisées lors des campagnes en mer (1-2 μmol/kg). Ces avancées rendent donc l'utilisation de données Argo-O<sub>2</sub> plus robustes et plus fiables qu'auparavant.

Parallèlement à cette intensification dans l'acquisitions de données en Méditerranée, des travaux relativement récents montrent que les techniques dérivées de l'IA et des « machine learning » permettent d'estimer avec une précision connue un certain nombre de variables biogéochimiques. Ainsi, les fonctions de transfert développées à partir du réseau de neurones CANYON (« CARbonate system and Nutrients concentration from hYdrological properties and Oxygen using a Neural network ») permettent, à partir de mesures facilement réalisables par des plates-formes autonomes (température salinité, oxygène) de prédire avec une précision connue des variables importantes mais qui ne sont pas mesurables de manière autonome (ex. silicates, phosphates, pCO<sub>2</sub>, pH) (Sauzède *et al.*, 2017, Bittig et al., 2018).

En Méditerranée, ce type de réseau a été adapté et entraîné au cours du récent stage de M2 que j'ai encadré (stage de M. Fourrier). Ce réseau, appelé CANYON-MED, donne des résultats satisfaisants en Méditerranée : exactitude de 0.64, 0.038 et 0.8 μmol/kg pour les concentrations de nitrates, phosphates et silicates respectivement, et 0.012, 9.0 μmol/kg et 9.0 μmol/kg pour pH<sub>T</sub>, alcalinité et Carbone Inorganique Dissous respectivement (Fig. 21). Bien que les précisions obtenues pour la Méditerranée soient tout à fait satisfaisantes, l'actuelle version de CANYON-MED a été entraînée à partir des mesures prélevées lors des campagnes océanographiques (de 1981 à 2016) et ces mesures ne couvrent pas l'ensemble des saisons et des bio-régions en Méditerranée. De ce fait, le réseau n'ayant pas été entraîné suffisamment dans les conditions hivernales, il ne reproduit pas correctement toutes les variabilités saisonnières. Cette version de CANYON-MED ne constitue donc qu'une première étape, et il conviendra dans un premier temps de le faire évoluer pour prendre en compte la variabilité saisonnière et interannuelle de certaines variables en Méditerranée. Cet enjeu fait l'objet d'une thèse que j'encadrerai et qui débutera en octobre 2018 (thèse de M. Fourrier).

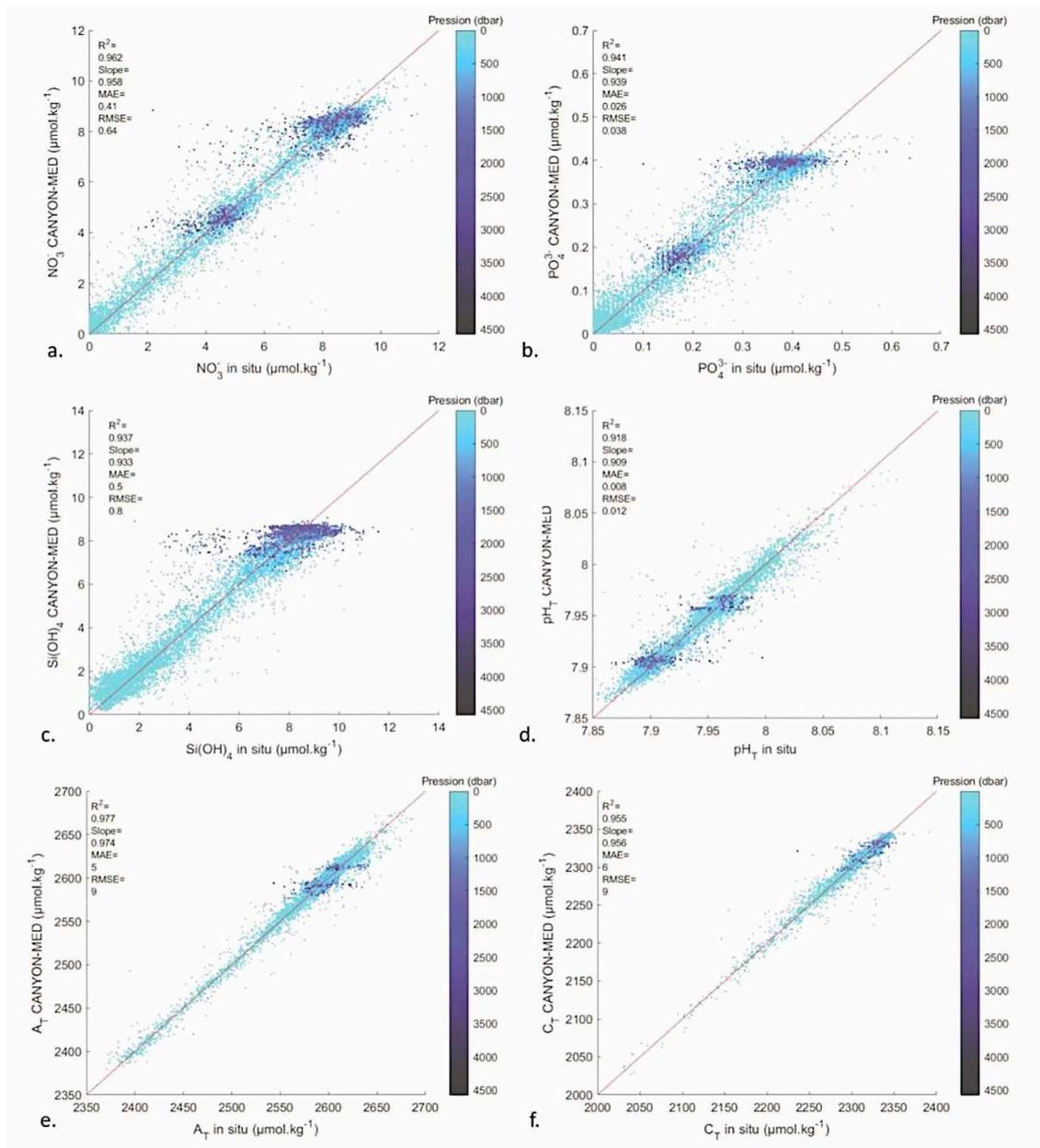


Fig. 21 : Diagrammes de dispersion entre les valeurs issues de DYFAMED et leurs sorties de CANYON-MED colorées selon la pression (dbar) pour : a. nitrate, b. phosphate, c. silicate, d. pH total, e. alcalinité, et f. carbone total. La droite rouge représente la droite d'égalité 1:1 (stage M2, M. Fourier)

Pour la deuxième étape d'entraînement, les séries temporelles en Méditerranée (type DYFAMED) seront utilisées afin de mieux contraindre la variabilité saisonnière et notamment les conditions hivernales. Une fois cette étape validée, la densité des données TSO<sub>2</sub> issues des flotteurs Argo et des gliders acquises pendant la période 2012-2018 (précédemment discuté), devraient permettre d'améliorer la distribution spatiale des données issues de CANYON-MED et notamment d'inclure les régions habituellement sous-échantillonnées. En effet, depuis 2007 et 2012, respectivement, les données acquises par les gliders et les flotteurs Argo ont permis d'intensifier considérablement les mesures en O<sub>2</sub> dans le bassin occidental de la Méditerranée (Fig. 22 & 23). Avec les progrès concernant la qualité des mesures en O<sub>2</sub> à partir des optodes, ces plateformes offrent ainsi un jeu de variables essentielles couvrant plusieurs saisons et plusieurs bio-régions qui sera bénéfique pour une utilisation du réseau CANYON-MED.

Dans ce contexte, la complémentarité entre les sorties de modèle de type SYMPHONIE-ECO3M-S-O<sub>2</sub> et CANYON-MED sera aussi abordée. En effet, un champ de données T, S et O<sub>2</sub> en sortie de simulations plus denses sur le bassin occidental (bassin pour l'instant le mieux contraint par les simulations) pourrait alimenter le réseau de CANYON-MED en entrée et ainsi améliorer son apprentissage. En contrepartie, les données virtuelles de nutriments produites par CANYON-MED permettraient de valider les sorties du modèle couplé ECO3M-S dont un des modules produit une simulation des nutriments dans le bassin occidental de la Méditerranée (Kessouri, 2015). Il est évident que ces validations entre le réseau de neurones et le modèle couplé seront dépendantes de la qualité et de la précision des variables produites en sortie afin de limiter la propagation d'erreur.

Par la suite, une fois les données dites « virtuelles » validées (à partir des longues séries temporelles biogéochimiques comme par exemple DYFAMED pour les sels nutritifs et les carbonates), celles-ci permettront d'étudier l'impact des processus physiques qui prédominent en Méditerranée (convection/mélange, ventilation) sur :

- La dynamique de la couche du minimum d'oxygène (OML) face à la variabilité des processus de ventilation des eaux intermédiaires,
- La variabilité de la nitracline et phosphacline conditionnant la production dans les eaux de surface,
- Le devenir du système des carbonates face à l'augmentation du pCO<sub>2</sub> atmosphérique.

Les sorties de CANYON-MED devraient également permettre d'obtenir des séries biogéochimiques avec une meilleure résolution temporelle, mais aussi de combler certaines zones peu échantillonnées (rive sud, mer Tyrrhénienne, bassin Levantin).

*In fine*, la méthode CANYON-MED sera appliquée aux campagnes intensives PERLE prévues dans le bassin Levantin en 2018-2019, campagnes dans lesquelles j'ai explicité mon implication. Dans ce bassin très peu échantillonné (hormis les mesures fournies par les flotteurs profileurs et les campagnes MED-SHIP/BOUM), cette méthode sera essentielle pour nous apporter des informations pertinentes sur la variabilité saisonnière de certaines variables biogéochimiques clefs depuis le début du mélange jusqu'à la fin du bloom phytoplanctonique en 2019. Cette approche sera en effet cruciale car entre les campagnes océanographiques, la période hiver-printemps-été 2019 sera « seulement » observée par le réseau de flotteurs Argo et de gliders dans cette zone.

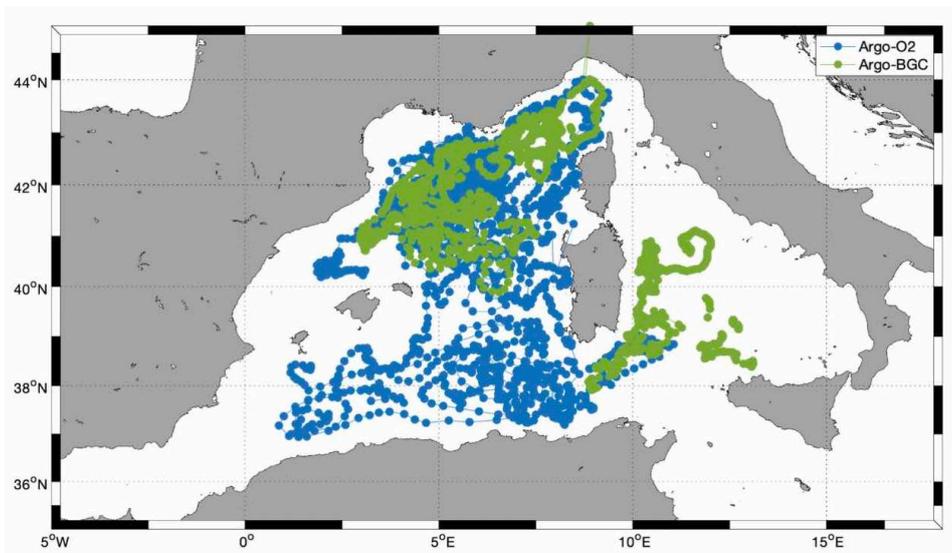


Fig. 22 : Carte des profils en  $O_2$  obtenus à partir des déploiements de flotteurs Argo dans le bassin occidental de la Méditerranée de novembre 2012 à août 2018 (29 flotteurs au total équipés d'optode). Les points bleus représentent les flotteurs Argo- $O_2$  profilant de 0 à 2000m et les verts les Argo-BGC profilant de 0 à 1000m

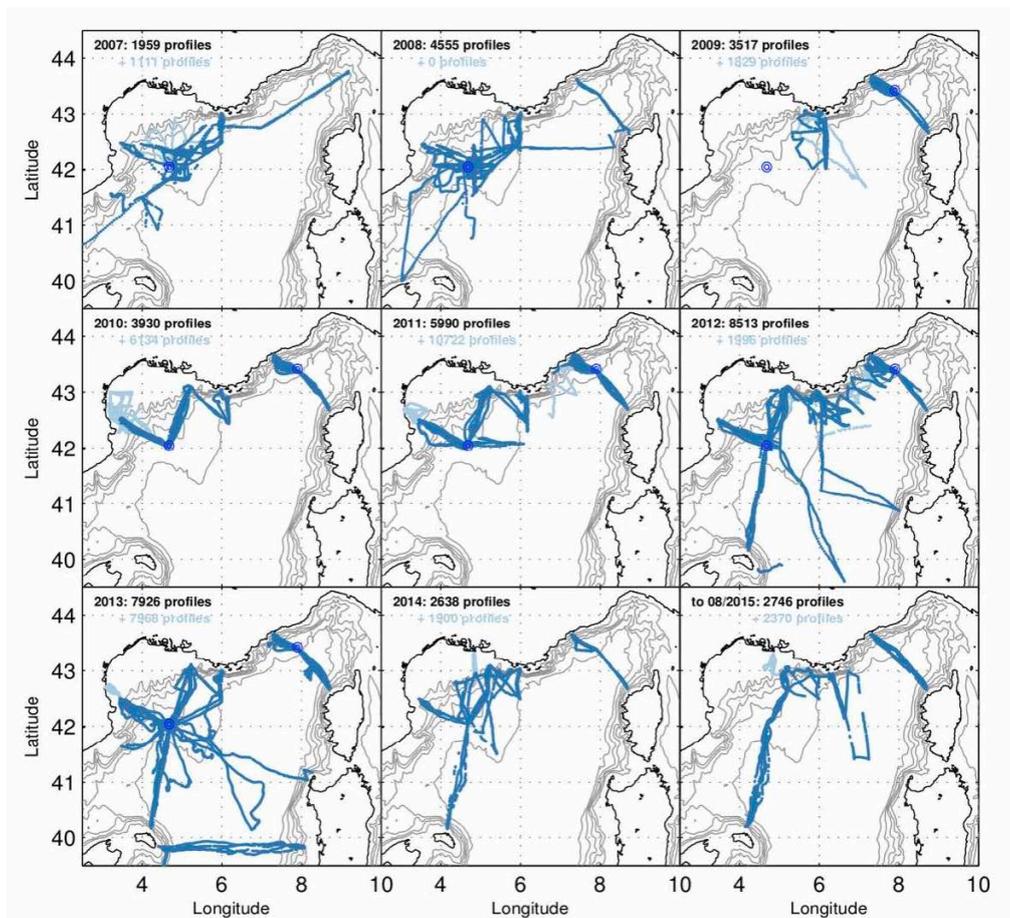


Fig. 23 : Carte des profils collectés par les gliders sur la période 2007-2015 dans le bassin nord-occidental de la Méditerranée (A. Bosse, 2015). Les points bleu foncé correspondent aux gliders profonds (0-1000m) et les points bleu clair représentent les gliders côtiers (0-200m).

## Bibliographie

- Adloff, F., et al. (2015), Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios, *Climate Dynamics*, 45, 2775-2802.
- Álvarez, M., H. Sanleón-Bartolomé, T. Tanhua, L. Mintrop, A. Luchetta, C. Cantoni, K. Schroeder, and G. Civitarese (2014), The CO<sub>2</sub> system in the Mediterranean Sea: A basin wide perspective, *Ocean Science*, 10, 69-92.
- Bartoli, G., C. Migon, and R. Losno (2005), Atmospheric input of dissolved inorganic phosphorus and silicon to the coastal northwestern Mediterranean Sea: Fluxes, variability and possible impact on phytoplankton dynamics, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(11), 2005-2016.
- Béranger, K., Y. Drillet, M.-N. Houssais, P. Testor, R. Bourdallé-Badie, B. Alhammoud, A. Bozec, L. Mortier, P. Bouruet-Aubertot, and M. Crépon (2010), Impact of the spatial distribution of the atmospheric forcing on water mass formation in the Mediterranean Sea, *Journal of Geophysical Research*, 115(C12), C12041.
- Bethoux, J. P., B. Gentili, J. Raunet, and D. Tailliez (1990), Warming trend in the western Mediterranean deep water, *Nature*, 347(6294), 660-662.
- Bethoux, J. P., P. Morin, and D. P. Ruiz-Pino (2002), Temporal trends in nutrient ratios: chemical evidence of Mediterranean ecosystem changes driven by human activity, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(11), 2007-2016.
- Bittig HC, Körtzinger A, Neill C, van Ooijen E, Plant JN, Hahn J, Johnson KS, Yang B and Emerson SR (2018) Oxygen Optode Sensors: Principle, Characterization, Calibration, and Application in the Ocean. *Front. Mar. Sci.* 4:429. doi: 10.3389/fmars.2017.00429
- Borghini, M., H. Bryden, K. Schroeder, S. Sparnocchia, and A. Vetrano (2014), The Mediterranean is becoming saltier, *Ocean Science*, 10(4), 693-700.
- Bosse, A., et al. (2016), Scales and dynamics of Submesoscale Coherent Vortices formed by deep convection in the northwestern Mediterranean Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(10), 7716-7742.
- Bosse, A., et al. (2017), A submesoscale coherent vortex in the Ligurian Sea: From dynamical barriers to biological implications, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(8), 6196-6217.
- Bosse, A., P. Testor, L. Mortier, L. Prieur, V. Taillandier, F. d'Ortenzio, and L. Coppola (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.
- Buat-Ménard, P., J. Davies, E. Remoudaki, J. C. Miquel, G. Bergametti, C. E. Lambert, U. Ezat, C. Quétel, J. La Rosa, and S. W. Fowler (1989), Non-steady-state biological removal of atmospheric particles from Mediterranean surface waters, *Nature*, 340(6229), 131-134.
- CIESM (2009), Dynamics of Mediterranean deep waters., *CIESM Workshop Monographs n. 38, N° 38*, 132.
- Coppola, L., L. Legendre, D. Lefevre, L. Prieur, V. Taillandier, and E. Diamond Riquier (2018), Seasonal and inter-annual variations of dissolved oxygen in the northwestern Mediterranean Sea (DYFAMED site), *Progress in Oceanography*, 162, 187-201.
- Coppola, L., L. Prieur, I. Taupier-Letage, C. Estournel, P. Testor, D. Lefevre, S. Belamari, S. LeReste, and V. Taillandier (2017), Observation of oxygen ventilation into deep waters through targeted deployment of multiple Argo-O<sub>2</sub> floats in the north-western Mediterranean Sea in 2013, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(8), 6325-6341.
- Davis, R. E., M. D. Ohman, D. L. Rudnick, J. T. Sherman, and B. Hodges (2008), Glider surveillance of physics and biology in the southern California Current System, *Limnology and Oceanography*, 53(5 PART 2), 2151-2168.
- Diffenbaugh, N. S., J. S. Pal, F. Giorgi, and X. Gao (2007), Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot, *Geophysical Research Letters*, 34(11), 1-6.
- Ducklow, H., D. Steinberg, and K. Buesseler (2001), Upper Ocean Carbon Export and the Biological Pump, *Oceanography*, 14(4), 50-58.
- Durrieu De Madron, X., et al. (2013), Interaction of dense shelf water cascading and open-sea convection in the northwestern Mediterranean during winter 2012, *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1379-1385.
- Estournel, C., et al. (2016), High resolution modeling of dense water formation in the north-western Mediterranean during winter 2012-2013: Processes and budget, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7), 5367-5392.
- Fowler, S. W., P. Buat-Menard, Y. Yokoyama, S. Ballestra, E. Holm, and H. V. Nguyen (1987), Rapid removal of Chernobyl fallout from Mediterranean surface waters by biological activity, *Nature*, 329(6134), 56-58.

- Giorgi, F. (2006), Climate change hot-spots, *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- Grignon, L., D. A. Smeed, H. L. Bryden, and K. Schroeder (2010), Importance of the variability of hydrographic preconditioning for deep convection in the Gulf of Lion, NW Mediterranean, *Ocean Science*, 6(2), 573-586.
- Heimbürger, L.-E. (2010), Dynamics of chemical contaminants in the open ocean, the Mediterranean Sea as an example, University of Nice.
- Heimbürger, L.-E., H. Lavigne, C. Migon, F. D'Ortenzio, C. Estournel, L. Coppola, and J.-C. Miquel (2013), Temporal variability of vertical export flux at the DYFAMED time-series station (Northwestern Mediterranean Sea), *Progress in Oceanography*, 119, 59-67.
- Heimbürger, L.-E., C. Migon, R. Losno, J.-C. Miquel, B. Thibodeau, M. Stabholz, A. Dufour, and N. Leblond (2014), Vertical export flux of metals in the Mediterranean Sea, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 87, 14-23.
- Herrmann, M., F. Diaz, C. Estournel, P. Marsaleix, and C. Ulses (2013), Impact of atmospheric and oceanic interannual variability on the Northwestern Mediterranean Sea pelagic planktonic ecosystem and associated carbon cycle, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(10), 5792-5813.
- Herrmann, M., F. Sevault, J. Beuvier, and S. Somot (2010), What induced the exceptional 2005 convection event in the northwestern Mediterranean basin? Answers from a modeling study, *Journal of Geophysical Research*, 115(C12).
- Heslop, E. E., S. Ruiz, J. Allen, J. L. López-Jurado, L. Renault, and J. Tintoré (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(20).
- Houpert, L. (2013), Contribution to the Study of Transfer Processes from the Surface to the Deep Ocean in the Mediterranean Sea using in situ Measurements, 219-219 pp.
- Houpert, L., et al. (2016), Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual variability of mixing and deep water masses for the 2007-2013 Period, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(11), 8139-8171.
- Kessouri, F. (2015), Cycles biogéochimiques de la mer Méditerranée : processus et bilans, University Paul-Sabatier, Toulouse.
- Kessouri, F., C. Ulses, C. Estournel, P. Marsaleix, F. D'Ortenzio, T. Severin, V. Taillandier, and P. Conan (2018), Vertical Mixing Effects on Phytoplankton Dynamics and Organic Carbon Export in the Western Mediterranean Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(3), 1647-1669.
- Krahmann, G., and F. Schott (1998), Longterm increases in Western Mediterranean salinities and temperatures: Anthropogenic and climatic sources, *Geophysical Research Letters*, 25(22), 4209-4212.
- Lee, K., C. L. Sabine, T. Tanhua, T.-W. Kim, R. A. Feely, and H.-C. Kim (2011), Roles of marginal seas in absorbing and storing fossil fuel CO<sub>2</sub>, *Energy & Environmental Science*, 4(4), 1133-1146.
- Macias, D., E. Garcia-Gorriz, and A. Stips (2018), Deep winter convection and phytoplankton dynamics in the NW Mediterranean Sea under present climate and future (horizon 2030) scenarios, *Sci Rep*, 8(1), 6626.
- Marty, J.-C., and J. Chiavérini (2002), Seasonal and interannual variations in phytoplankton production at DYFAMED time-series station, northwestern Mediterranean Sea, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(11), 2017-2030.
- Marty, J. C., and J. Chiavérini (2010), Hydrological changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean, DYFAMED site) during 1995–2007 and biogeochemical consequences, *Biogeosciences*, 7(7), 2117-2128.
- MEDOC-Group (1970), Observation of Formation of Deep Water in the Mediterranean Sea, 1969, *Nature*, 227, 1037.
- MERMEX-group (2011), Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean, *Progress in Oceanography*, 91(2), 97-166.
- Mertens, C., and F. Schott (1998), Interannual Variability of Deep-Water Formation in the Northwestern Mediterranean, *Journal of Physical Oceanography*, 28(7), 1410-1424.
- Migon, C., V. Sandroni, J.-C. Marty, B. Gasser, and J.-C. Miquel (2002), Transfer of atmospheric matter through the euphotic layer in the northwestern Mediterranean: seasonal pattern and driving forces, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(11), 2125-2141.
- Miquel, J.-C., J. Martín, B. Gasser, A. Rodríguez-y-Baena, T. Toubal, and S. W. Fowler (2011), Dynamics of particle flux and carbon export in the northwestern Mediterranean Sea: A two decade time-series study at the DYFAMED site, *Progress in Oceanography*, 91(4), 461-481.

- Moon, J.-Y., K. Lee, T. Tanhua, N. Kress, and I.-N. Kim (2016), Temporal nutrient dynamics in the Mediterranean Sea in response to anthropogenic inputs, *Geophysical Research Letters*, 43(10), 5243-5251.
- Niewiadomska, K., H. Claustre, L. Prieur, and F. D'Ortenzio (2008), Submesoscale physical-biogeochemical coupling across the Ligurian Current (northwestern Mediterranean) using a bio-optical glider, *Limnology and Oceanography*, 53(5 PART 2), 2210-2225.
- Oschlies, A., K. G. Schulz, U. Riebesell, and A. Schmittner (2008), Simulated 21st century's increase in oceanic suboxia by CO<sub>2</sub>-enhanced biotic carbon export, *Global Biogeochemical Cycles*, 22(4), n/a-n/a.
- Pasqueron de Fommervault, O., C. Mignon, F. D'Ortenzio, M. Ribera d'Alcalà, and L. Coppola (2015), 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.
- Pelland, N. A., C. C. Eriksen, and C. M. Lee (2013), Subthermocline Eddies over the Washington Continental Slope as Observed by Seagliders, 2003–09, *Journal of Physical Oceanography*, 43(10), 2025-2053.
- Perry, M. J., B. S. Sackmann, C. C. Eriksen, and C. M. Lee (2008), Seaglider observations of blooms and subsurface chlorophyll maxima off the Washington coast, *Limnology and Oceanography*, 53(5 PART 2), 2169-2179.
- Puig, P., et al. (2013), Thick bottom nepheloid layers in the western Mediterranean generated by deep dense shelf water cascading, *Progress in Oceanography*, 111, 1-23.
- Pujo-Pay, M., P. Conan, L. Oriol, V. Cornet-Barthaux, C. Falco, J. F. Ghiglione, C. Goyet, T. Moutin, and L. Prieur (2011), Integrated survey of elemental stoichiometry (C, N, P) from the western to eastern Mediterranean Sea, *Biogeosciences*, 8(4), 883-899.
- Rhein, M. (1995), Deep water formation in the western Mediterranean, *Journal of Geophysical Research*, 100(C4), 6943-6959.
- Ruiz, S., L. Renault, B. Garau, and J. Tintoré (2012), Underwater glider observations and modeling of an abrupt mixing event in the upper ocean, *Geophysical Research Letters*, 39(1), n/a-n/a.
- Sauzède, R., H. C. Bittig, H. Claustre, O. Pasqueron de Fommervault, J.-P. Gattuso, L. Legendre, and K. S. Johnson (2017), Estimates of Water-Column Nutrient Concentrations and Carbonate System Parameters in the Global Ocean: A Novel Approach Based on Neural Networks, *Frontiers in Marine Science*, 4, 1-33.
- Schneider, A., T. Tanhua, A. Körtzinger, and D. W. R. Wallace (2010), High anthropogenic carbon content in the eastern Mediterranean, *Journal of Geophysical Research*, 115(C12), C12050.
- Schneider, A., T. Tanhua, W. Roether, and R. Steinfeldt (2014), Changes in ventilation of the mediterranean Sea during the past 25 year, *Ocean Science*, 10(1), 1-16.
- Schott, F., M. Visbeck, U. Send, J. Fischer, L. Stramma, and Y. Desaubies (1996), Observations of Deep Convection in the Gulf of Lions, Northern Mediterranean, during the Winter of 1991/92, *Journal of Physical Oceanography*, 26(4), 505-524.
- Schroeder, K., M. Borghini, G. Cerrati, V. Difesca, R. Delfanti, C. Santinelli, and G. P. Gasparini (2008a), Multiparametric mixing analysis of the deep waters in the Western Mediterranean Sea, *Chemistry and Ecology*, 24(sup1), 47-56.
- Schroeder, K., J. Chiggiato, S. A. Josey, M. Borghini, S. Aracri, and S. Sparnocchia (2017), Rapid response to climate change in a marginal sea, *Sci Rep*, 7(1), 4065.
- Schroeder, K., S. A. Josey, M. Herrmann, L. Grignon, G. P. Gasparini, and H. L. Bryden (2010), Abrupt warming and salting of the Western Mediterranean Deep Water after 2005: Atmospheric forcings and lateral advection, *Journal of Geophysical Research*, 115(C8), 1-18.
- Schroeder, K., et al. (2013), Long-term monitoring programme of the hydrological variability in the Mediterranean Sea: A first overview of the HYDROCHANGES network, *Ocean Science*, 9(2), 301-324.
- Schroeder, K., A. Ribotti, M. Borghini, R. Sorgente, A. Perilli, and G. P. Gasparini (2008b), An extensive western Mediterranean deep water renewal between 2004 and 2006, *Geophysical Research Letters*, 35(18).
- Schroeder, K., T. Tanhua, H. Bryden, M. Alvarez, J. Chiggiato, and S. Aracri (2015), Mediterranean Sea Ship-based Hydrographic Investigations Program (Med-SHIP), *Oceanography*, 28(3), 12-15.
- Smith, R. O., H. L. Bryden, and K. Stansfield (2008), Observations of new western Mediterranean deep water formation using Argo floats 2004–2006, *Ocean Science*, 4(2), 133-149.
- Somot, S., F. Sevault, and M. Déqué (2006), Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model, *Climate Dynamics*, 27(7-8), 851-879.

- Stabholz, M., et al. (2013), Impact of open-ocean convection on particle fluxes and sediment dynamics in the deep margin of the Gulf of Lions, *Biogeosciences*, 10(2), 1097-1116.
- Stöven, T., and T. Tanhua (2014), Ventilation of the mediterranean sea constrained by multiple transient tracer measurements, *Ocean Science*, 10(3), 439-457.
- Testor, P., et al. (2018), Multiscale Observations of Deep Convection in the Northwestern Mediterranean Sea During Winter 2012-2013 Using Multiple Platforms, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(3), 1745-1776.
- Timmermans, M.-L., and P. Winsor (2013), Scales of horizontal density structure in the Chukchi Sea surface layer, *Continental Shelf Research*, 52, 39-45.
- Waldman, R., et al. (2016), Estimating dense water volume and its evolution for the year 2012-2013 in the Northwestern Mediterranean Sea: An observing system simulation experiment approach, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(9), 6696-6716.
- Zunino, P., K. Schroeder, M. Vargas-Yáñez, G. P. Gasparini, L. Coppola, M. C. García-Martínez, and F. Moya-Ruiz (2012), Effects of the Western Mediterranean Transition on the resident water masses: Pure warming, pure freshening and pure heaving, *Journal of Marine Systems*, 96-97, 15-23.

## Annexe

### Sélections de 5 articles

1. Coppola, L., L. Legendre, D. Lefevre, L. Prieur, V. Taillandier, and E. Diamond Riquier (2018), Seasonal and inter-annual variations of dissolved oxygen in the northwestern Mediterranean Sea (DYFAMED site), *Progress in Oceanography*, 162, 187-201, doi:10.1016/j.pocean.2018.03.001.
2. Coppola, L., L. Prieur, I. Taupier-Letage, C. Estournel, P. Testor, D. Lefevre, S. Belamari, S. LeReste, and V. Taillandier (2017), Observation of oxygen ventilation into deep waters through targeted deployment of multiple Argo-O<sub>2</sub> floats in the north-western Mediterranean Sea in 2013, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122
3. Houpert, L., Durrieu de Madron, X., Testor, P., Bosse, A., D'Ortenzio, F., Bouin, M.N., Dausse, D., Le Goff, H., Kunesch, S., Labaste, M., Coppola, L., Mortier, L., Raimbault, P., 2016. Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual variability of mixing and deep water masses for the 2007-2013 Period. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 8139-8171.
4. 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 Part I: Oceanographic Research Papers*, 100, 1-12.
5. 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

# Relation entre les forçages physiques et la dynamique de l'oxygène dissous en Méditerranée

Laurent Coppola  
HDR 2018

## Résumé

Mon activité de recherche vise à améliorer notre compréhension de l'impact des forçages physiques sur la dynamique des éléments biogéochimiques en Méditerranée occidentale et, plus particulièrement, celui de l'oxygène dissous. A cette fin, j'ai mis en œuvre une approche intégrée multiplateformes (flotteurs profileurs, gliders, bateaux, mouillages) qui englobe à la fois des observations long terme type MOOSE et des observations spéciales comme celles des programmes océan-atmosphère de MISTRALS.

Mon projet de recherche s'inscrit dans la continuité de mes thématiques de recherche en intégrant l'approche modèles couplés physique-biogéochimie et l'approche par un réseau de neurones appliqués sur l'ensemble de la mer Méditerranée. Dans ce contexte, mon projet se focalisera particulièrement sur le bassin oriental, zone peu observée et pourtant essentielle dans la compréhension du système Méditerranéen.

## Abstract

My research activity aims to improve our understanding of the impact of physical forcing on the dynamics of biogeochemical elements in the western Mediterranean Sea and, more particularly, the dissolved oxygen. To this end, I have implemented an integrated multi-platforms approach (profiling floats, gliders, research vessels, moorings) that includes both long-term observations (e.g. MOOSE) and special observations such as those of the MISTRALS ocean-atmosphere programs.

My research project will be in line with my research themes by integrating the coupled physical-biogechemistry model approach and the neural network approach applied throughout the Mediterranean Sea. In this context, my project will focus particularly on the Eastern basin, a region poorly observed and yet essential in the understanding of the Mediterranean system.