

## CAMPAGNE OCÉANOGRAPHIQUE OUTPACE

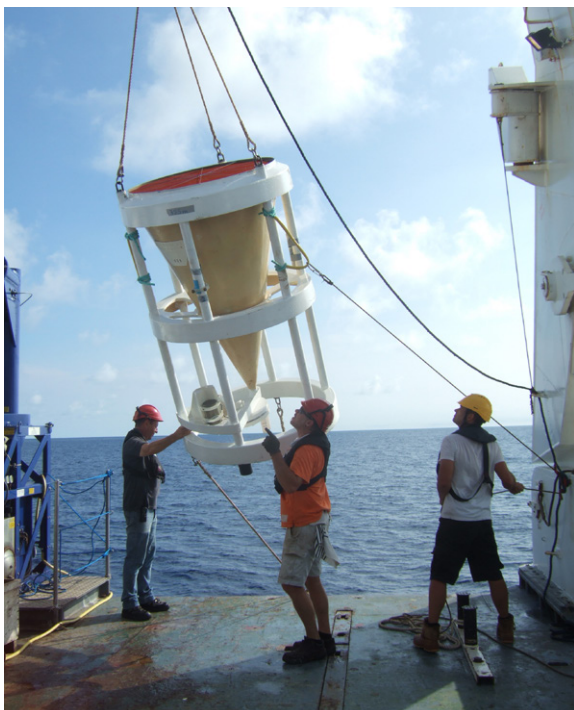
45 jours à bord de *L'Atalante* pour étudier la fixation de N<sub>2</sub> et la régulation de la pompe biologique de carbone dans le Pacifique tropical sud-ouest

### AUTEUR.E.S

Thierry Moutin, Sophie Bonnet, Andrea Doglioli et l'équipe OUTPACE

### CAMPAGNE OUTPACE

Chefs de mission : MOUTIN Thierry et BONNET Sophie<sup>3</sup>  
Pacifique Sud  
Du 18 février au 3 avril 2015  
À bord de *L'Atalante*



Remontée avec le portique d'un des pièges de la ligne. © Campagne OUTPACE

### OBJECTIFS

Le projet OUTPACE vise à obtenir une meilleure représentation des interactions entre les organismes planctoniques et les cycles des éléments biogènes (C, N, P, Si, Fe) pour des échelles allant de l'étude de processus à l'étude de l'océan Pacifique sud-ouest.

## LE PACIFIQUE TROPICAL SUD-OUEST ET LA RÉGULATION DE LA POMPE BIOLOGIQUE DE CARBONE

La pompe biologique de carbone océanique correspond au transfert de carbone de la couche de surface océanique vers l'intérieur de l'océan par des processus biologiques (figure 1). Elle influence fortement la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique et par conséquent le climat de la Terre.

L'intensité de la pompe biologique dépend de la disponibilité de certains éléments nutritifs comme l'azote dans l'océan de surface. Dans les régions océaniques où les concentrations en azote sont particulièrement faibles, certains organismes du plancton sont capables d'utiliser l'azote atmosphérique de l'air dissous dans l'eau pour se développer. On les appelle fixateurs d'azote ou diazotrophes. De plus, ces organismes fertilisent les eaux de surface en azote et le rendent disponible pour les autres organismes du plancton, soutenant ainsi la vie marine dans les déserts océaniques, tel que le Pacifique Tropical.

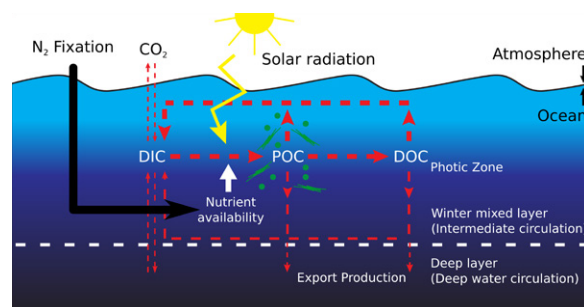


FIGURE 1. Schéma présentant la pompe biologique de carbone (transfert de carbone de l'océan de surface vers l'intérieur de l'océan par des processus biologiques) et l'influence de la fixation d'azote sur la disponibilité nutritive. DIC : Carbone inorganique dissous, POC : Carbone organique particulaire. DOC : Carbone organique dissous (Moutin et al., 2017).

L'expérience OUTPACE était organisée autour de 3 objectifs principaux :

- donner une description zonale de la biogéochimie et de la diversité biologique dans le Pacifique tropical Sud-ouest durant l'été austral ;
- étudier la production biologique et son devenir (incluant l'exportation de C) dans 3 sites contrastés, avec une attention particulière pour la production supportée par la fixation d'azote ;
- obtenir une représentation satisfaisante des principaux flux biogéochimiques (C, N, P, Si, Fe) et de la dynamique du réseau trophique planctonique.

<sup>3</sup> Institut Méditerranéen d'Océanologie (UMR MIO) – Aix Marseille Univ., Université de Toulon, CNRS, IRD, Marseille

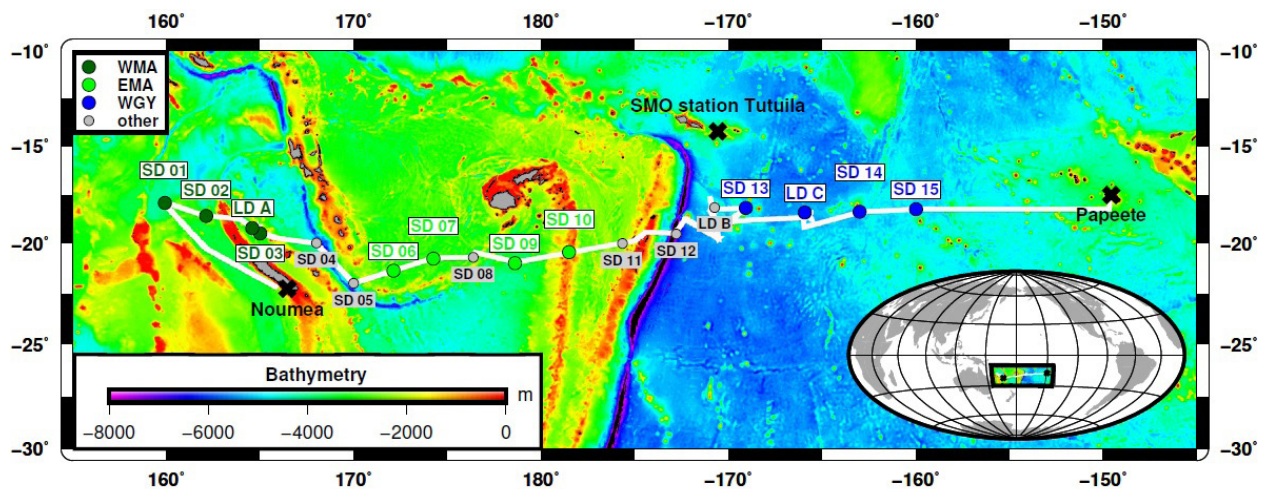


FIGURE 2. Transect de la campagne OUTPACE (blanc) superposé sur une carte indiquant les concentrations quasi-lagrangiennes de la chlorophylle a. Les stations de courte durée (1 à 15) et les stations de longue durée «étude de processus» A, B et C sont également indiquées.

Notre stratégie a été de réaliser 15 stations de courte durée (8h) où des prélèvements ont été effectués de la surface jusqu'au fond afin de décrire cette région très peu explorée jusqu'alors (figure 2). De plus, 3 stations «processus» de plus longue durée (7 jours) ont été étudiées en détail, en particulier en déployant des mouillages dérivants, pour comprendre le contrôle de la production biologique et son devenir dans l'océan.

#### UNE STRATÉGIE LAGRANGIENNE POUR SUIVRE UNE MASSE D'EAU ET ÉTUDIER LA PRODUCTION BIOLOGIQUE ET SON DEVENIR DANS LA COLONNE D'EAU

Le projet OUTPACE est l'aboutissement d'un long processus qui a permis à des scientifiques de différents domaines (de physiciens spécialisés dans la navigation lagrangienne à des biologistes spécialistes des gènes et de la biodiversité/fonction à l'échelle individuelle des cellules) de travailler ensemble sur le même projet. Le couplage original de techniques alliant l'imagerie satellitale, les Flotteurs dérivants, les profileurs de turbulence, les capteurs biogéochimiques et les outils moléculaires, a permis une acquisition simultanée de variables physiques, chimiques et biologiques en suivant la même masse d'eau pendant plusieurs jours. Cette stratégie, dite Lagrangienne en référence au mathématicien J.L. Lagrange, permet de relier les mesures effectuées à des processus biologiques internes à la masse d'eau (de Verneil et al., 2018, figure 3).

Nous avons par exemple été capables de conclure que la fixation d'azote permettait de soutenir la quasi-totalité de la production nouvelle (non reliée au recyclage à court terme de la matière organique) dans le Pacifique tropical SW durant l'été austral (Caffin et al., 2018). En plus des approches transdisciplinaires de terrain, le travail de modélisation réalisé dans ce projet (Dutheil et al., 2018, Gimenez et al., 2018) a permis d'affiner notre connaissance sur le fonctionnement de l'écosystème et d'obtenir des paramétrisations utiles pour la communauté internationale des modélisateurs. Ces résultats contribuent à répondre aux questions scientifiques du projet et génèrent de nouvelles connaissances concernant la capacité de l'océan oligotrophe à séquestrer du carbone.

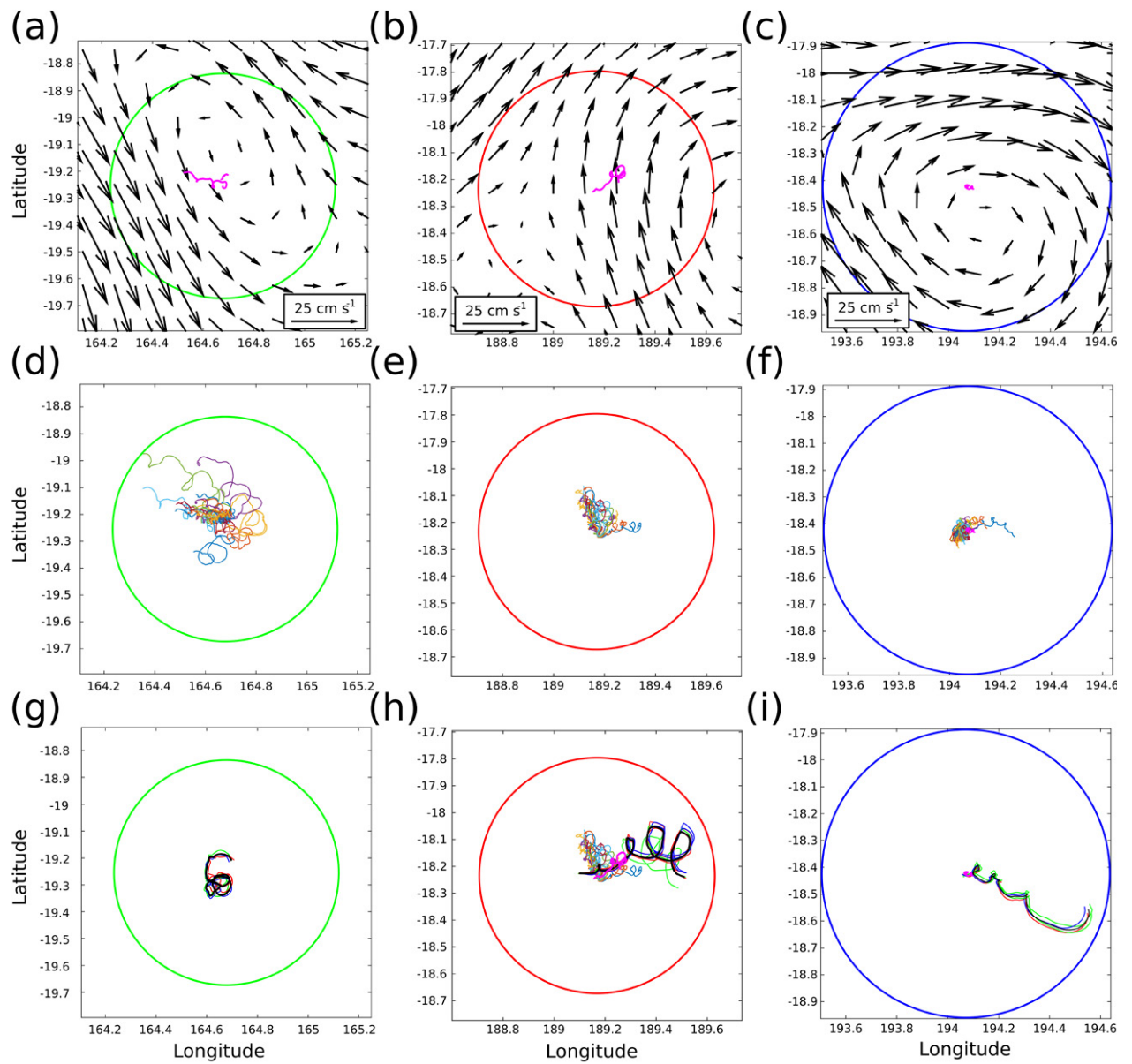


FIGURE 3. Trajectoires observées et calculées pour l'analyse des courants aux trois stations de longues durées échantillonnées lors de la campagne OUTPACE à partir (a) des mouillages dérivants, (b) de l'ADCP de coque et (c) des flotteurs SVP (de Verneil et al., 2018).



## UNE POMPE BIOLOGIQUE SIGNIFICATIVE SOUTENUE PAR LA FIXATION D'AZOTE

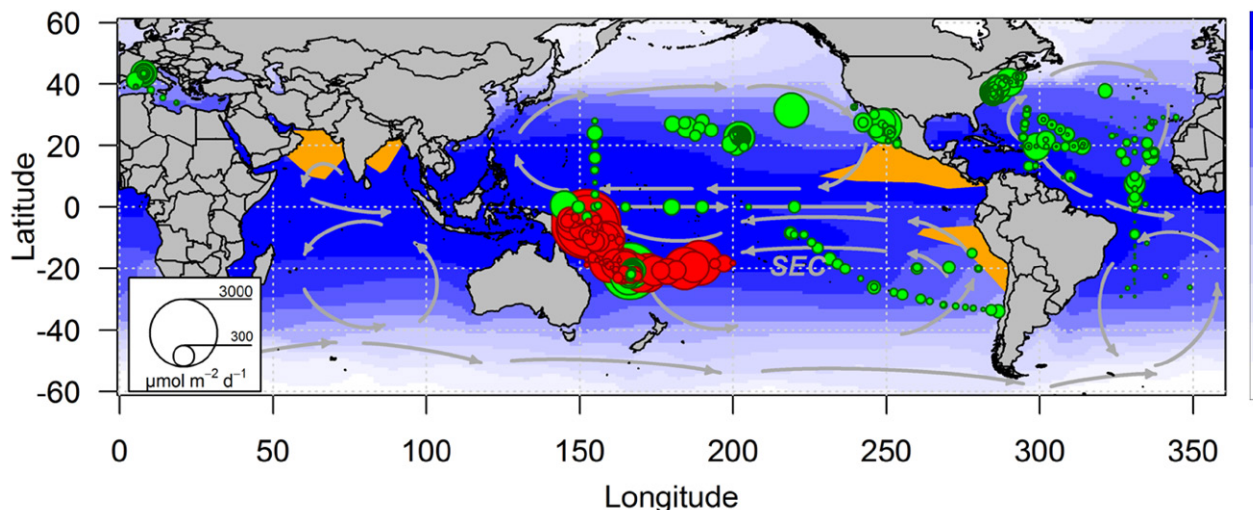


FIGURE 4. Taux intégrés de fixation de  $N_2$  dans la couche éclairée (Figure 4. Taux intégrés de fixation de  $N_2$  dans la couche éclairée ( $\mu\text{mol N m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) provenant essentiellement de la campagne océanographique OUTPACE (en rouge) et de la base de données MAREDAT (en vert). Les flèches grises représentent schématiquement les principaux courants de surface. SEC: Courant équatorial sud. Les régions ombrées en orange représentent les principales zones à minima d'oxygène (OMZs). In Bonnet, S., Caffin, M., Berthelot, H. and Moutin, T.: *Hot spot of  $N_2$  fixation in the western tropical South Pacific pleads for a spatial decoupling between  $N_2$  fixation and denitrification*, Proc. Natl. Acad. Sci., 114(14), E2800–E2801, doi:10.1073/pnas.1619514114, 2017.

Nous avons trouvé une pompe biologique de carbone significative dans le Pacifique tropical SW riche en fer. La fixation de  $N_2$  est le processus majeur introduisant l'azote nécessaire pour soutenir cette pompe et permettre une assimilation significative de carbone atmosphérique par l'océan. Le lien direct entre fixation de  $N_2$  et exportation de carbone proposé pour le Pacifique tropical SW (Moutin et al., 2018), point chaud de la fixation de  $N_2$  océanique (Bonnet et al., 2017, 2018, et figure 4), nécessite de considérer les changements à courtes échelles de temps comme en particulier celle associée au changement climatique en cours, l'échelle décennale. Dans ce milieu riche en fer (Moutin et al., 2008; Guieu et al., 2018), la disponibilité en phosphate pourrait apparaître comme le contrôle ultime de l'apport d'azote par la fixation de  $N_2$ , et par conséquent de l'efficacité de la pompe biologique du carbone dans cette région.

## EN CONCLUSION

Nous pouvons considérer que 100% des objectifs initiaux ont été atteints. L'amélioration de la connaissance scientifique acquise durant le projet OUTPACE est importante à plusieurs niveaux. Elle permet de mieux comprendre la relation entre disponibilité nutritive, production biologique et export de carbone. Cette relation est essentielle car elle détermine la force de la pompe biologique qui dans les derniers millénaires était considérée à l'équilibre, et dont l'intensité risque d'être modifiée avec l'altération du climat. L'amélioration de cette connaissance scientifique est donc particulièrement importante au niveau sociétal, car le réchauffement climatique est le principal défi auquel notre société va devoir faire face dans les années à venir. Nous devons impérativement mieux comprendre l'ensemble des processus influençant la séquestration océanique du carbone anthropique car le réchauffement futur de la Terre en dépend. Les données OUTPACE actuellement disponibles pour la communauté internationale (<http://www.obs-vlfr.fr/proof/php/outpace/>; <https://www.nodc.noaa.gov/ocads/data/0177706.xml>) répondent clairement à un manque dans cette région sous-échantillonnée de l'océan. Elles vont être largement utilisées pour calibrer les modèles à l'échelle globale.

Les principaux résultats scientifiques de la campagne OUTPACE sont détaillés dans 26 articles d'une issue spéciale de la revue *Biogéosciences* intitulée « Interactions entre les organismes planctoniques et les cycles biogéochimiques à travers des gradients trophique et de fixation d'azote dans l'océan Pacifique

tropical sud-ouest : une approche multidisciplinaire (l'expérience OUTPACE)», éditeurs : T. Moutin, S. Bonnet, K. Richards, D. G. Capone, E. Marañón, et L. Mémerly ; [https://www.biogeosciences.net/special\\_issue894.html](https://www.biogeosciences.net/special_issue894.html)

Cinq autres articles ont été publiés en dehors de l'issue spéciale.

#### POUR PLUS D'INFORMATIONS

- Site web de la campagne : <https://outpace.mio.univ-amu.fr/>  
DOI : <https://doi.org/10.17600/15000900>
- Les financements ont été obtenus par les participants étrangers, et nationalement pour la France de l'ANR pour les 3 laboratoires partenaires français (MIO, LOCEAN, LOV), du CNRS-INSU-LEFE, de l'IRD (Action Incitative Sud et GOPS-Grand Observatoire du Pacifique Sud) et du laboratoire MIO (financement total 635 k€, sans considérer les coûts du navire océanographique et des salaires). Le financement par l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-14-CE01-0007>) représente environ 60 % du financement.
- Toute l'équipe OUTPACE tient à chaleureusement remercier l'équipage de *L'Atalante* pour son professionnalisme et sa sympathie.

#### RÉFÉRENCES

Bonnet, S., Caffin, M., Berthelot, H., Grosso, O., Benavides, M., Helias-Nunige, S., Guieu, C., Stenegren, M., and Foster, R. A. : In-depth characterization of diazotroph activity across the western tropical South Pacific hotspot of N<sub>2</sub> fixation (OUTPACE cruise), *Biogeosciences*, 15, 4215-4232, <https://doi.org/10.5194/bg-15-4215-2018>, 2018.

Bonnet, S., M. Caffin, H. Berthelot and Moutin, T. (2017) *Hotspot of N<sub>2</sub> fixation in the western tropical South Pacific pleads for a spatial decoupling between N<sub>2</sub> fixation and denitrification*. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.16195184114](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.16195184114).

Caffin, M., Moutin, T., Foster, R. A., Bouruet-Aubertot, P., Doglioli, A. M., Berthelot, H., Guieu, C., Grosso, O., Helias-Nunige, S., Leblond, N., Gimenez, A., Petrenko, A. A., de Verneil, A., and Bonnet, S. : N<sub>2</sub> fixation as a dominant new N source in the western tropical South Pacific Ocean (OUTPACE cruise), *Biogeosciences*, 15, 2565-2585, <https://doi.org/10.5194/bg-15-2565-2018>, 2018.

de Verneil, A., Rousselet, L., Doglioli, A. M., Petrenko, A. A., Maes, C., Bouruet-Aubertot, P., and Moutin, T. : OUTPACE long duration stations : physical variability, context of biogeochemical sampling, and Evaluation of sampling strategy, *Biogeosciences*, 15, 2125-2147, <https://doi.org/10.5194/bg-15-2125-2018>, 2018.

Dutheil, C., Aumont, O., Gorguès, T., Lorrain, A., Bonnet, S., Rodier, M., Dupouy, C., Shiozaki, T., and Menkes, C. : Modelling N<sub>2</sub> fixation related to *Trichodesmium* sp. : driving processes and impacts on primary production in the tropical Pacific Ocean, *Biogeosciences*, 15, 4333-4352, <https://doi.org/10.5194/bg-15-4333-2018>, 2018.

Gimenez, A., Baklouti, M., Wagener, T., and Moutin, T. : Diazotrophy as the main driver of the oligotrophy gradient in the western tropical South Pacific Ocean : results from a one-dimensional biogeochemical-physical coupled model, *Biogeosciences*, 15, 6573-6589, <https://doi.org/10.5194/bg-15-6573-2018>, 2018.

Guieu, C., S. Bonnet, A. Petrenko, C. Menkes, V. Chavagnac, K. Desboeufs, C. Maes & T. Moutin. Iron from a submarine source impacts the productive layer of the Western Tropical South Pacific (WTSP). *Nature Scientific Reports*, volume 8, Article number : 9075 (2018).

Moutin, T., Doglioli, A. M., de Verneil, A., and Bonnet, S. : Preface : The Oligotrophy to the Ultra-oligotrophy PACific Experiment (OUTPACE cruise, 18 February to 3 April 2015), *Biogeosciences*, 14, 3207-3220, <https://doi.org/10.5194/bg-14-3207-2017>, 2017.

Moutin, T., Karl, D. M., Duhamel, S., Rimmelin, P., Raimbault, P., Van Mooy, B. A. S., and H. Claustre. 2008. Phosphate availability and the ultimate control of new nitrogen input by nitrogen fixation in the tropical Pacific Ocean, *Biogeosciences*, 5, 95-109.

Moutin, T., Wagener, T., Caffin, M., Fumenia, A., Gimenez, A., Baklouti, M., Bouruet-Aubertot, P., Pujol-Pay, M., Leblanc, K., Lefevre, D., Helias Nunige, S., Leblond, N., Grosso, O., and de Verneil, A. : Nutrient availability and the ultimate control of the biological carbon pump in the western tropical South Pacific Ocean, *Biogeosciences*, 15, 2961-2989, <https://doi.org/10.5194/bg-15-2961-2018>, 2018.

## LE CHEF DE MISSION ET SON ÉQUIPE



Réunion Post-campagne *OUTPACE* à l'Institut Méditerranéen d'Océanographie (MIO) à Marseille les 4 et 5 juillet 2016.

L'expérience *OUTPACE* (*Oligotrophy to Ultraoligotrophy PACific Experiment*) coordonnée par le MIO (*Mediterranean Institute of Oceanography*) a débuté en octobre 2014 et s'est terminée en septembre 2018. Ce projet a offert l'opportunité de renforcer les collaborations françaises avec différentes équipes internationales et a permis à environ 50 scientifiques de 7 laboratoires de recherche français et 7 laboratoires étrangers (USA, Israël, Allemagne, Suède, Fidji, Chili, Japon) de travailler ensemble autour d'un objectif commun.

L'expérience *OUTPACE* est basée sur une expertise forte des différents partenaires dans leurs domaines de recherche complémentaires : physique, chimie, biogéochimie marine, optique, microbiologie marine, biologie moléculaire, génétique et modélisation. Ce large spectre d'expertises a permis de lier les spécialités de façon originale, comme le montre les nombreux articles interdisciplinaires proposés dans l'issue spéciale publiée dans *Biogeosciences*. *OUTPACE* traite de recherche fondamentale étroitement liée à un challenge sociétal dans la mesure où cette recherche concerne le rôle de l'océan dans la régulation du climat

## LE PROJET OVIDE :

### 16 ANS D'OBSERVATION DE L'ATLANTIQUE NORD SUBPOLAIRE

#### AUTEURS

Pascale Lherminier et l'équipe OVIDE

#### CAMPAGNES OVIDE, CATARINA, GEOVIDE, BOCATS

Océan Atlantique Nord  
Étés 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018  
À bord des navires *Thalassa*, *Pourquoi Pas ?*, *Maria S. Merian* et du *Sarmiento de Gamboa*



THALASSA © Ifremer. Séverine Tourbot-Paul

#### OBJECTIFS

Depuis 2002, le projet OVIDE a contribué à l'observation des propriétés de circulation et des masses d'eau le long de la section joignant le Groenland au Portugal référencée comme WOCE A25 ou «section OVIDE». Dans le contexte du changement climatique, l'objectif était de documenter et