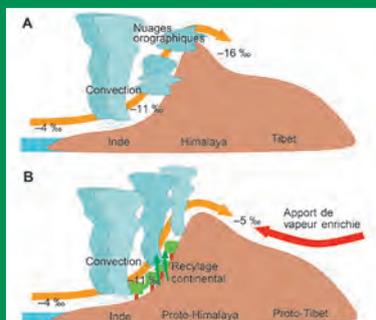
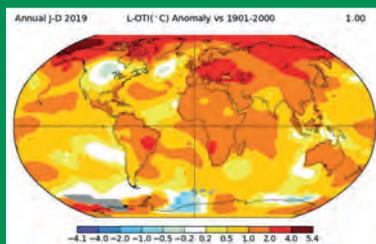


# La Météorologie

Revue de l'atmosphère et du climat

8<sup>e</sup> série - n° 109 - mai 2020



**Photo de couverture**  
Sud de la France : 15 février 2019 (en haut)  
et 15 février 2020 (en bas).

Éditorial \_\_\_\_\_ 1

Écho \_\_\_\_\_ 2

2019, deuxième année la plus chaude dans le monde  
Amélioration de la qualité de l'air durant le confinement  
La réduction du trafic aérien affecterait la qualité des prévisions météorologiques\*  
Une nouvelle version de SimClimat pour ordinateurs et smartphones  
Prix et récompenses pour les scientifiques français

La photo du trimestre \_\_\_\_\_ 12

La vie de météo et climat \_\_\_\_\_ 13

L'assemblée générale 2020 de Météo et Climat

Neige et glace \_\_\_\_\_ 16

**Prix Prud'homme 2019**  
**Les glaciers noirs à l'épreuve du climat**  
*Fanny Brun, Étienne Berthier, Patrick Wagnon*

Paléoclimatologie \_\_\_\_\_ 23

**Comprendre la dynamique atmosphérique pour mieux reconstituer l'altitude passée des chaînes de montagnes**  
*Svetlana Botsyun, Pierre Sepulchre, Camille Risi*

Océanographie \_\_\_\_\_ 29

**Le Service national d'observation de la salinité de surface de la mer**  
**50 ans de mesures océaniques globales**  
*Gaël Alory, Philippe Téchiné, Thierry Delcroix, Denis Diverres, David Varillon, Jean-René Donguy, Gilles Reverdin, Rosemary Morrow, Jacques Grelet, Yves Gouriou, Stéphane Jacquin, Elodie Kestenare, Céline Bachelier, Angelo DiMattéo*

Océanographie \_\_\_\_\_ 40

**Le voilier *OceanoScientific Explorer Boogaloo***  
**Une campagne péri-antarctique en 2017**  
*Gilles Reverdin, Nicolas Metz, Thierry Reynaud, Paul Poli, Yvan Griboval*

Récit \_\_\_\_\_ 48

**Un an en Terre Adélie (2)**

Lu pour vous \_\_\_\_\_ 52

**Cap Horn à la voile et La Longue route**  
*Bernard Moitessier*

Vient de paraître \_\_\_\_\_ 54

Saison cyclonique \_\_\_\_\_ 56

Pacifique Nord-Est et central, 2019  
Pacifique Nord-Ouest, 2019

Les photos du mois \_\_\_\_\_ 71

Résumé climatique \_\_\_\_\_ 77

Décembre 2019 - Janvier 2020 - Février 2020

Abonnement - Adhésion \_\_\_\_\_ 86

# Le voilier *OceanoScientific Explorer Boogaloo*

## Une campagne péri-antarctique en 2017

Gilles Reverdin<sup>1</sup>, Nicolas Metzl<sup>1</sup>, Thierry Reynaud<sup>2</sup>, Paul Poli<sup>3</sup>,  
Yvan Griboval<sup>4</sup>

1. Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques, Institut Pierre-Simon Laplace, Sorbonne Université / CNRS / IRD / MNHN, Paris
2. Laboratoire d'océanographie physique et spatiale, Université de Bretagne occidentale / CNRS / IRD / Ifremer, Plouzané
3. Direction des systèmes d'observation, Centre de météorologie marine, Météo-France, Brest
4. OceanoScientific, Paris

gilles.reverdin@locean-ipsl.upmc.fr

## Résumé

L'utilisation de voiliers comme pourvoyeurs de données océanographiques et météorologiques de qualité scientifique a été testée dans le cadre du programme *OceanoScientific* et en particulier lors de la navigation péri-antarctique en solitaire du voilier *OceanoScientific Explorer Boogaloo* début 2017. Les caractéristiques du système et les données océanographiques recueillies (température, salinité, fluorescence de la chlorophylle A, pression partielle de dioxyde de carbone) sont présentées, illustrant le succès de l'approche, malgré quelques contraintes qui sont évoquées.

Le besoin de collecte de données sur l'océan est récurrent, tant pour des fins d'études du rôle de l'océan sur le climat et sur ses cycles biogéochimiques que pour améliorer la prévision météorologique, la circulation océanique et la compréhension du changement climatique. Ce besoin a été maintes fois souligné au cours des dernières décennies, avec comme dernière illustration les publications effectuées pour la conférence OceanObs19 tenue à Honolulu (Hawaï, 16-20 septembre 2019) et dont une introduction se trouve dans l'éditorial de Speich *et al.* (2019). Dans cet article, nous présentons une campagne d'observation réalisée par un voilier qui est un démonstrateur du potentiel d'utilisation des voiliers pour compléter les réseaux d'observations en place, tels que celui des profileurs autonomes Argo (Ollitrault, 2016), celui des bouées dérivantes, ainsi que les campagnes océanographiques et autres navires d'opportunité.

Le programme *OceanoScientific*, dont cette campagne est une des réalisations récentes, a été initié en 2005-2006 à partir d'une idée que Yvan Griboval avait mûrie au cours d'années antérieures, durant son activité de coureur au large professionnel, de journaliste, puis d'organisateur d'événements nautiques médiatiques.

L'idée consistait alors à profiter des courses océaniques autour du monde passant les trois principaux caps

continentaux : Bonne Espérance (Afrique du Sud), Leeuwin (Australie) et Cap Horn (Amérique du Sud) dans des mers peu fréquentées, pour collecter des données à l'usage des scientifiques en charge de l'étude du dérèglement climatique. La décision de lancer ce projet a été prise lors d'une réunion tenue à Paris au Locean<sup>1</sup> le 14 novembre 2006 avec un groupe de scientifiques, incluant Jean-Claude Gascard – qui mit Yvan Griboval en contact avec les scientifiques du Locean et de l'Ifremer<sup>2</sup> – Nicolas Metzl, Gilles Reverdin et Laurence Eymard (Locean), ainsi que Fabienne Gaillard (Ifremer).

La principale difficulté rencontrée était l'absence d'instrumentation adaptée pour équiper un petit voilier de compétition de 16 mètres et y loger un matériel alors volumineux (typiquement de l'ordre de 1 m<sup>3</sup> pour réaliser les mesures océanographiques prévues), gros consommateur d'énergie et peu ou pas adapté à subir des chocs répétés dans un environnement humide et salin. Ce voilier allait donc devenir l'*OceanoScientific Explorer*. Autre handicap : il n'y avait pas de budget conséquent disponible dans les instituts scientifiques pour financer un tel projet. Et ce, même s'il était entendu que les données seraient transmises gratuitement aux institutions, qui allaient fournir les moyens

1. Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques.

2. Institut français de recherche pour l'exploration de la mer.

## Abstract

Using sailing vessels to provide surface oceanographic and meteorological data for operational and scientific use has been promoted in the *OceanoScientific* programme. It has been tested during the circum-Antarctic sailing of the *Explorer OceanoScientific Boogaloo* in early 2017. The instrumentation, data acquisition, processing and transmission characteristics are described. Then, the ocean data collected (temperature, salinity, fluorescence of Chlorophyll-A, partial pressure of carbon dioxide) are presented, illustrating the success of the approach, but also some constraints that were encountered.

humains ainsi que les ressources techniques pour étudier les données collectées. Il fallait donc recourir à des fonds privés, principalement issus du mécénat.

De 2006 à 2013, le voilier tout carbone a été construit. Mais cette période a surtout été consacrée à la conception et à la réalisation du matériel de collecte de données océanographiques innovant, puis à ses tests et à sa validation. Ainsi est né l'OSC System, OSC pour *OceanoScientific*.

Les essais du système ont été réalisés dans différentes régions du globe, en particulier sur *La Louise* de Thierry Dubois dans le Grand Nord, ainsi que sur le trois-mâts *Bark Europa* dans l'océan Austral. L'OSC System a été réalisé par un consortium de compagnies privées en lien avec l'Ifremer, le Locean ainsi que Météo-France.

L'OSC System mesure automatiquement, toutes les six secondes, dix à quinze variables, dont au moins cinq caractérisent l'océan de surface et cinq l'atmosphère. Pour l'océan, les capteurs sont placés sur un circuit d'eau captée sous la coque afin de mesurer la température, la salinité, l'acidité, la fluorescence de la chlorophylle A, ainsi que la pression partielle du dioxyde de carbone dissous. Pour l'atmosphère, les capteurs sont placés dans le mât afin de mesurer vitesse et direction du vent, température et humidité de l'air (figure 1c). Un baromètre placé à l'arrière du voilier mesure la pression atmosphérique.

Un logiciel a été développé, l'OSC-Software, en collaboration avec les ingénieurs d'IBM Nice qui ont défini son cahier des charges. Il a ensuite été réalisé par Dimitri Voisin, l'informaticien de l'équipe « Mer agitée » de Michel Desjoyeaux. Le logiciel réceptionne

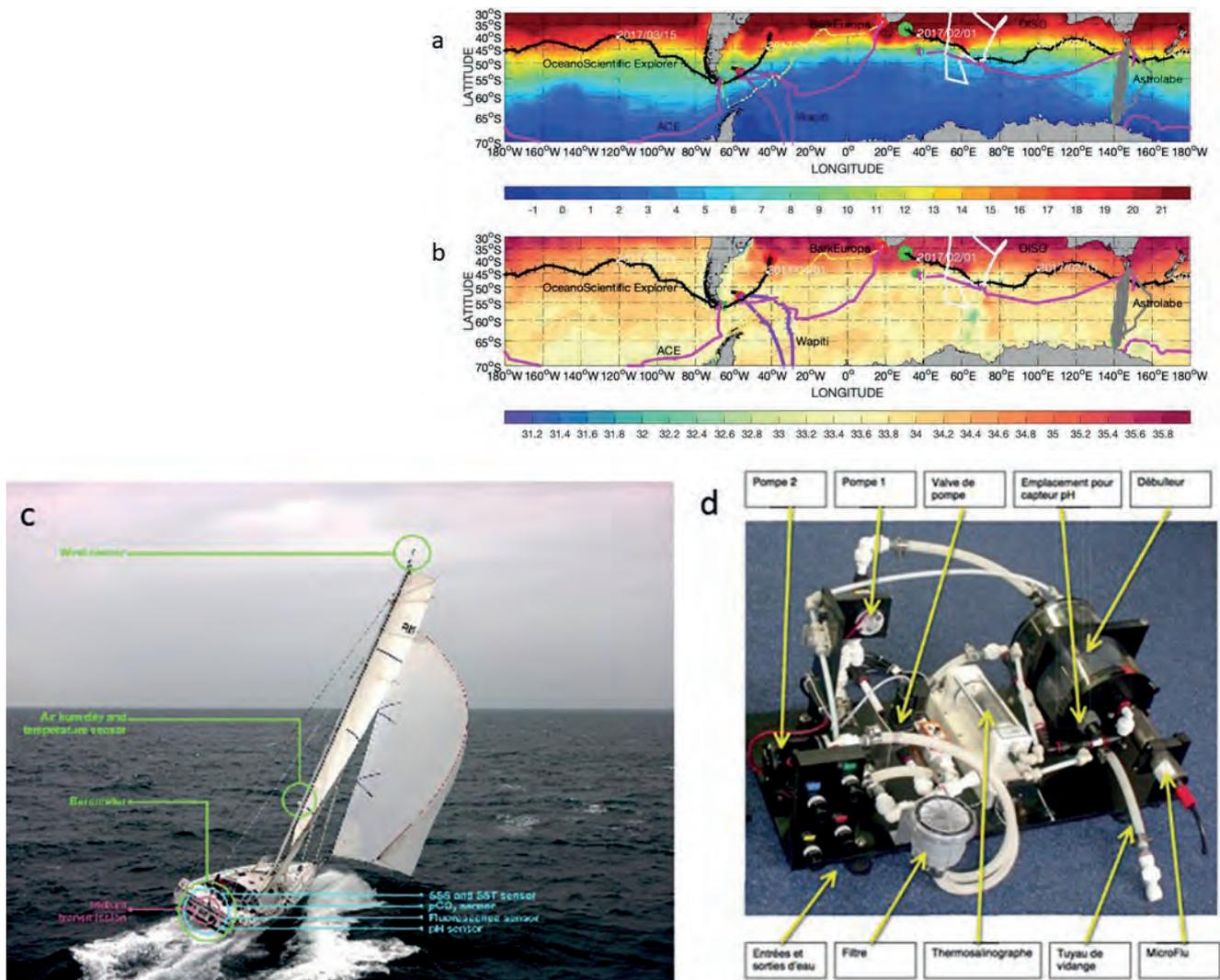


Figure 1. (a, b) Positions journalières du *Boogaloo* (croix) du 30 janvier (vert) au 4 avril 2017 (rouge). Les trajets d'autres campagnes réalisées au début de 2017 dans l'océan Austral et mentionnées dans le texte sont aussi indiqués. Les cartes de (a) température et de (b) salinité correspondent aux produits ISAS-15 (Kolodziejczyk *et al.*, 2017 ; Gaillard *et al.*, 2016) pour le mois de février 2017. (c) L'*OceanoScientific Explorer Boogaloo* de 16 mètres en route vers Monaco dix jours avant son départ de la principauté, le 17 novembre 2016, avec ses principaux instruments. (d) Le module instrumental OSC water du circuit eau de mer. © Photo : Guilain Grenier – *OceanoScientific*.

et sauvegarde les données mesurées toutes les six secondes, puis transmet par liaison satellitaire au réseau international de données météorologiques (GTS<sup>3</sup>) une version horaire réduite de ces données, par le biais de passerelles mises en place par Météo-France. Une médiane est donc établie chaque heure sur 10 minutes de  $H - 10 \text{ min}$  à  $H$ . Elle est transmise à  $H + 2 \text{ min}$  toutes les heures sans discontinuer.

Ces essais ont ainsi abouti grâce aux efforts conjoints des spécialistes de la mesure et de l'instrumentation scientifiques et des navigateurs à un OSC System permettant de faire face à un environnement marin agressif, du fait de l'humidité, du sel et des chocs répétés subis sur les voiliers de course océanique.

Cet article concerne la phase suivante de réalisation d'un tour du monde en solitaire mené par Yvan Griboval sur l'*OceanoScientific Explorer Boogaloo* (plus simplement *Boogaloo*) au départ de Monaco le 17 novembre 2016, et plus particulièrement les mesures collectées par l'OSC System sous le quarantième degré de latitude Sud, un peu après le passage du Cap de Bonne-Espérance, jusqu'après celui du Cap Horn, soit durant soixante jours, du 26 janvier au 4 avril 2017 (figure 1a, b). Cette région australe avait en effet été ciblée comme étant moins pourvue en données océanographiques et météorologiques. Toutes les informations relatives à cette navigation sont à lire sur le site de l'association OceanoScientific : [www.oceanoscientific.org](http://www.oceanoscientific.org).

## Déroulement de la campagne et de l'acquisition des données

### Conditions météorologiques

L'acquisition horaire des données météo (pression atmosphérique de surface, vent, température de l'air, humidité relative) s'est faite en continu et sans incident. Les données horaires ont été systématiquement comparées en temps réel par Météo-France aux données de différents modèles de prévision météorologique et océanographique et ont été jugées de qualité suffisante pour être transmises par le

système GTS aux différents centres de prévision et au centre de données océanographiques Coriolis.

Les données ont souvent été collectées dans des zones largement dénuées d'autres mesures *in situ*, comme on peut le voir sur une animation retraçant les observations météorologiques effectuées par l'expédition et les observations disponibles par ailleurs (Poli, 2019). Il est donc probable que ces données ont eu un impact sur les prévisions météorologiques de l'océan Austral. La pression de surface telle qu'observée par l'expédition reste en effet un paramètre qui ne peut encore être estimé par les satellites. L'animation mentionnée ci-dessus montre que les conditions rencontrées ont été très variables comme on s'y attendait dans cette région, avec de longues périodes de vent souvent d'ouest en bordure nord de systèmes cycloniques. Les vents rencontrés au sud de 40° S étaient supérieurs à trente nœuds la majeure partie du temps et l'on n'observait quasiment jamais des vitesses de vent réel inférieures à vingt nœuds.

### Données de l'océan de surface

Le système de captage d'eau de mer était positionné à environ un mètre sous la surface de la mer et la circulation d'eau était isolée thermiquement. De surcroît, la coque en carbone étant très conductrice, la température dans ce prototype de course océanique résultait d'un compromis entre la température de la mer et celle de l'air, peu différentes l'une de l'autre en ces zones maritimes. L'eau de mer passait par un débitmètre pour contrôler que le flux était régulier quelle que soit la vitesse du navire. En cas de ralentissement de ce flux, une pompe pilotée par l'OSC-Software se déclenchait pour augmenter l'alimentation du circuit en eau de mer.

L'OSC System a fonctionné quasiment sans interruption durant les soixante jours de la campagne, à l'exception d'interventions ponctuelles en particulier durant les deux premiers jours de février pour chasser des morceaux d'algues qui s'étaient infiltrés dans le circuit d'eau à l'est des Kerguelen.

L'instrumentation (figure 1d) incluait une cellule thermo-salinomètre (issue du programme SeaKeeper et basée sur les capteurs du thermosalinographe SBE45 de la société SeaBird, ci-dessous, TSG) pour mesurer température

et conductivité (à partir de laquelle on estime la salinité), ainsi que de capteurs permettant la mesure de la pression partielle de dioxyde de carbone dans l'eau ( $p\text{CO}_2$ ) et du pH (pH-mètre). Ils ont tous deux été volontairement déconnectés par le navigateur après quelques jours de navigation. Un fluorimètre destiné à mesurer la fluorescence de la chlorophylle A (Chl-a) complétait l'équipement de collecte de données à la surface de la mer. La validation des données a pu être réalisée sur les mesures de température et de salinité et est présentée dans le rapport technique de Reynaud *et al.* (2018).

Le débit au travers de la cellule de conductivité s'est avéré être fonction de la vitesse du navire, mais aussi de la présence d'une circulation d'eau au travers du capteur de mesure du  $p\text{CO}_2$  – circulation interrompue le 10 février, à la suite de dysfonctionnements – ainsi que de la présence d'obstacles dans les tuyaux (par exemple, débris d'algues). Ce débit a varié de près de 0 à 2,5 litres/minute. Nous avons estimé que tout débit supérieur à 0,65 litre/minute offrait des données raisonnables. C'est une différence importante par rapport aux données acquises sur les navires de commerce et pour lesquelles le débit requis pour avoir des données non biaisées est beaucoup plus important (Alory *et al.*, 2019).

Par ailleurs, deux capteurs de température (capteurs S2T) placés sur la coque ont permis l'acquisition en continu de la température de la mer du 17 novembre 2016 à avril 2017, date à laquelle leur batterie n'a plus permis l'acquisition de données, c'est-à-dire bien au-delà de la période considérée ici de navigation au sud de 40° S.

De surcroît, chaque jour, des échantillons d'eau de mer étaient recueillis au seau et mis dans des flacons de verre scellés pour en mesurer la salinité une fois rapatriés à terre dans nos laboratoires. Ces échantillons ont été récupérés à l'arrivée du voilier à Monaco et analysés avec un salinomètre Guidline au Lops<sup>4</sup> (Reynaud *et al.*, 2018). Ces échantillons, ainsi que d'autres échantillons recueillis quotidiennement, ont aussi permis la mesure de la composition isotopique de l'eau de mer avec un spectromètre Picarro CRDS (modèle L2130-1), mesure réalisée en août 2017 au Locean. Les mesures de température et de salinité

3. Global Telecommunication System (Organisation météorologique mondiale).

4. Laboratoire d'océanographie physique et spatiale (Ifremer et CNRS).

du thermo-salinomètre ont enfin été comparées aux données du modèle d'analyse océanique PSY4V3R1 de Mercator-Océan.

## Température et salinité de surface

Jusqu'au 2 février à 17 h 02 TU, une grosse bulle présente dans le thermo-salinomètre – remonté à l'envers lors de la révision et de l'étalonnage de l'appareil par les techniciens de SeaBird aux États-Unis – bloquait partiellement la circulation d'eau, faussant les mesures. Après l'intervention d'Yvan Griboval sur la recommandation de Denis Diverrès (IRD Brest) dans des conditions tempétueuses, les données de température  $T$  et de salinité  $S$  ont présenté en général les caractéristiques attendues sur cette route australe.

Nous ne considérons donc que les données acquises entre cette date et le 4 avril 2017, quand le *Boogaloo* coupa le 40° S dans l'Atlantique Sud au sortir des quarantièmes rugissants, et que l'acquisition de données fut interrompue volontairement par le navigateur-explorateur (figures 1 et 2a) (Reynaud *et al.*, 2018).

Il y eut quelques périodes où le débit d'eau fut trop bas du fait de la présence de macro-algues ayant pénétré dans le circuit d'eau. La comparaison aux mesures de température sous coque illustre bien l'impact sur les mesures de cette faible circulation qui induit un trop faible renouvellement d'eau de la cuve du thermo-salinomètre. Ce problème a surtout été rencontré les 10-13 février 2017 (figure 2b).

En dehors de ces épisodes, la comparaison des températures de mer  $T$  (TSG) avec celles du capteur S2T 36097, corrigées sur la base d'un étalonnage ultérieur, indique une différence moyenne de 0,00 °C avec un écart type de 0,041 °C. L'autre capteur de coque (S2T 36098) présentait un biais positif de 0,14 °C. Ces données suggèrent qu'il n'y a pas de réchauffement marqué de l'eau au sein du système de l'OSC System et que la mesure de température caractérise bien cette eau proche de la surface de la mer – à une profondeur d'environ un mètre – et donc à mieux de 0,05 °C de la température de surface de la mer dans ces régions australes d'ordinaire bien brassées par des vents violents et des vagues puissantes.

La comparaison de la salinité mesurée avec celle des échantillons prélevés

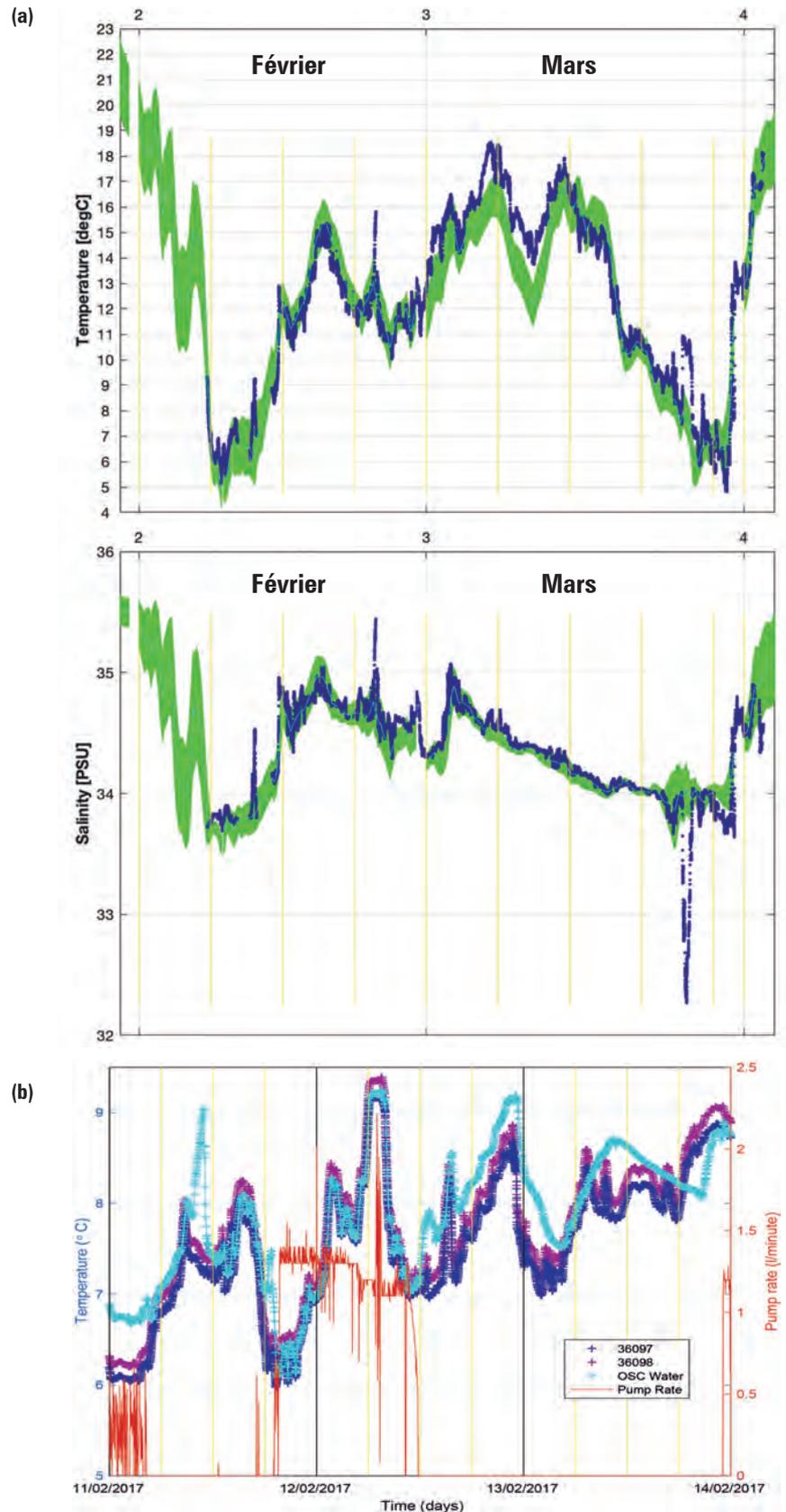


Figure 2. (a) Série temporelle des données de température de surface (SST, en haut) et de salinité de surface (SSS, en bas) recueillies dans le secteur péri-antarctique (bleu foncé, du 2 février au 4 avril). La courbe en vert correspond aux analyses ISAS-15 (Kolodziejczyk *et al.*, 2017). (b) Période d'intermittence de la circulation d'eau traversant la cellule de mesure de l'OSC System, due à la présence de macro-algues (11-14 février 2017). La courbe bleue claire illustre la température de la cellule, alors que les courbes bleu royal et violette viennent des deux capteurs de température de coque. La courbe brune (échelle de droite) donnant le débit d'eau dans le circuit (en amont de la cellule) illustre bien les désaccords de température entre les capteurs (avec un réchauffement de la cellule) quand le débit est trop faible (ou nul, la courbe brune n'apparaissant alors pas), ainsi qu'il y a un bon accord quand le débit est établi.

indique un léger biais négatif de l'ordre de  $-0,02$ , en échelle pratique de salinité pss-78<sup>s</sup>. Il est possible que ce biais fut plus fort avant le 20 février du fait de petits morceaux d'algues qu'il était impossible d'extraire du circuit d'eau. Cela est toutefois difficile à confirmer du fait du petit nombre d'échantillons, d'une dispersion assez importante des points de comparaison et de la possibilité d'un léger vieillissement de l'eau des flacons avant leur analyse au laboratoire.

Une partie de cette dispersion est liée à l'incertitude sur l'heure exacte de prélèvement qui est de l'ordre de 10 minutes, du fait des contingences du bord consécutives à la navigation en solitaire en milieu hostile. Le choix a été de corriger les données enregistrées de salinité du biais moyen de  $-0,02$ , en estimant qu'il peut rester une incertitude atteignant  $0,04$  pss-78 sur certaines portions des enregistrements. Que cette incertitude ne soit pas plus importante est aussi suggéré par la comparaison des données lors du croisement à neuf milles nautiques d'écart de la route du *Boogaloo* avec celle de l'*Astrolabe*, navire équipé pour le ravitaillement de la base antarctique française de Dumont-d'Urville.

Ces données corrigées et validées du thermo-salinomètre ont ainsi pu servir à la qualification des données du modèle océanique opérationnel Mercator-Océan PSY4V3R1, en comparant les données réduites au pas de temps horaires du TSG avec les sorties journalières du modèle. Cette comparaison a porté sur la période du 8 février 6h00 GMT au 2 avril 0h00 GMT, en excluant les données correspondant à une circulation d'eau déficiente les 11, 12 et 13 février. Elle montre la présence d'environ 30 % de fortes différences en température supérieures à  $2$  °C ou en salinité supérieures à  $0,5$  pss-78. Ces forts écarts sont indicatifs de positionnements incorrects dans le modèle de certains fronts océaniques, que le *Boogaloo* a souvent franchi (figures 1a, 1b et 2a).

Pour les 70 % restants (770 couples), nous trouvons que la différence moyenne et l'écart type (entre parenthèses) entre la mesure et le modèle sont de  $0,12$  ( $0,56$ ) °C pour  $T$  et de  $+0,009$  ( $0,110$ ) pss-78 pour  $S$ . Les températures mesurées dans le premier mètre sous la surface sont donc un peu plus élevées que dans la simulation, alors que les salinités simulées sont très proches en moyenne de celles observées, avec un écart type qui est du même ordre que

celui des comparaisons réalisées dans les régions bien observées de l'hémisphère Nord, comme dans le gyre subtropical nord-atlantique en 2012-2014 lors de l'expérience internationale Spurs (communication d'Anna Denvil-Sommer, Locean, 2018).

## Fluorescence de la chlorophylle A et pression partielle du dioxyde de carbone dissous

La fluorescence de la chlorophylle A, convertie empiriquement en unités de concentration du pigment Chl-a (en  $\mu\text{g/l}$ ) a été mesurée en continu par un fluorimètre (*Chlorophyll-a Fluorometer TriOS microFLU*). Nous en présentons ici les données réduites au pas de temps horaire.

Les mesures du *Boogaloo* de février à avril 2017 présentent la plupart du temps des valeurs comprises entre  $0,2$  et  $2$   $\mu\text{g/l}$  (figure 3), avec une valeur moyenne/écart type de Chl-a de  $0,70/1,2$   $\mu\text{g/l}$ . Cet écart type élevé est associé à trois passages dans des régions de très forte Chl-a rencontrées pendant quelques jours dans des eaux relativement chaudes : température de surface de la mer  $13-18$  °C, au nord du front subantarctique du Pacifique Sud.

Si on filtre ces valeurs inattendues, la valeur moyenne et l'écart type de la concentration en Chl-a sont de  $0,44$  et

$0,35$   $\mu\text{g/l}$ , ce qui est typique des conditions climatologiques pendant l'été austral (Moore et Abbott, 2000). C'est aussi très proche des valeurs moyennes et de l'écart type de Chl-a ( $0,36$  et  $0,53$   $\mu\text{g/l}$ ) trouvées lors de l'expédition circumpolaire ACE (<http://spi-ace-expedition.ch/>), qui s'est aussi déroulée durant l'été austral 2017 dans l'océan Austral (communication de David Antoine, 2018, Curtin University, Australie).

Une différence notable entre les deux expéditions concerne les parages de Kerguelen ( $49^\circ$  S- $70^\circ$  E), dans l'océan Indien austral. Lors de l'expédition ACE, des échantillons pris au sud-est des Kerguelen le 8 janvier 2017 présentaient des concentrations de  $3$   $\mu\text{g/l}$ . Or, les valeurs collectées à bord du *Boogaloo* à proximité des Kerguelen étaient bien plus faibles. Quoique cette région présente souvent des floraisons planctoniques importantes (Blain *et al.*, 2007), il est probable que les faibles valeurs observées dans le second cas résultent d'une route au nord de la région de floraison, qui de surcroît a connu son pic plus tôt, soit en décembre 2016-janvier 2017.

Au contraire, dans le Pacifique Sud, de très fortes valeurs de concentration en Chl-a ( $> 3$   $\mu\text{g/l}$  et jusqu'à  $10$   $\mu\text{g/l}$ ) ont été observées par le *Boogaloo* au sud de la Nouvelle-Zélande, ainsi que vers  $43^\circ$  S- $160^\circ$  W et vers  $42^\circ$  S- $130^\circ$  W (figure 3). Alors que dans le secteur au

5. Practical Salinity Scale 1978.

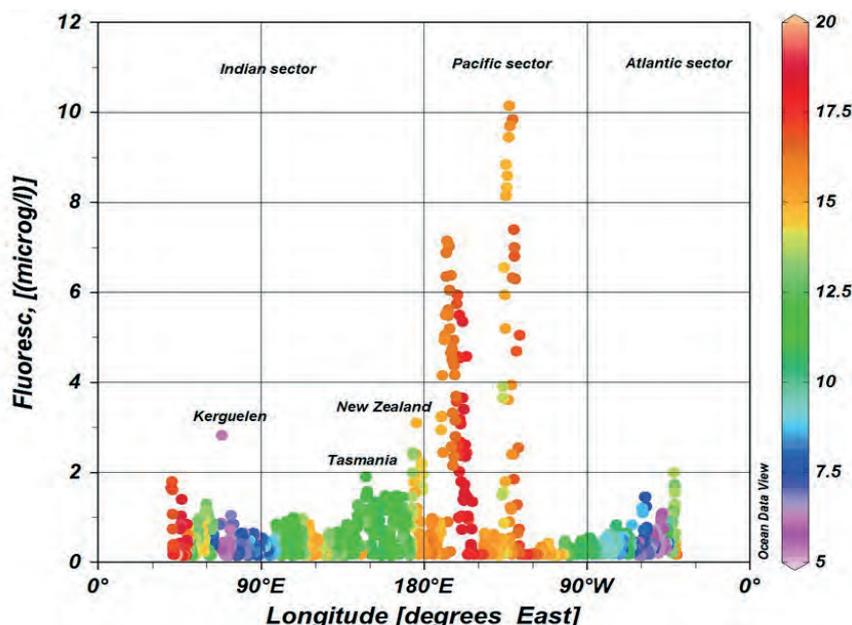


Figure 3. Mesures horaires de fluorescence chlorophyllienne (convertie en unités de Chl-a,  $\mu\text{g/l}$ ) de l'OSC System de février à avril 2017 présentées en fonction de la longitude (voir figure 1). Le code couleur se rapporte à la température de surface de mer (échelle à droite). Noter les très fortes valeurs de concentration en chlorophylle dans des eaux relativement chaudes du Pacifique Sud vers  $160-180^\circ$  W.

sud-est de la Nouvelle-Zélande des valeurs assez élevées sont fréquemment observées à partir des missions satellitaires en été austral (Jones *et al.*, 2013 ; <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), dans la région centrale du Pacifique Sud les valeurs élevées observées ici en mars 2017 vers 42-43° S n'ont jamais été observées par satellite.

Selon les bases de données (Valente *et al.*, 2019), ce n'est que plus au sud, en bordure de glace (vers 65° S) ou plus rarement dans les parages des îles Kerguelen – par exemple, lors de la campagne Oiso-01 en janvier-février 1998 (Lourantou et Metzl, 2011) – que de telles valeurs sont parfois rencontrées. On pourrait éventuellement aussi s'appuyer sur les observations de flotteurs bio-Argo (Organelli *et al.*, 2017) récemment déployés dans l'océan Austral, mais ces bouées ne couvrent pas encore le secteur du Pacifique Sud vers 40-50° S où le *Boogaloo* a rencontré de fortes concentrations de Chl-a. Les flotteurs n'observent pas non plus de concentrations aussi élevées dans d'autres secteurs de l'océan Austral (<http://www.oao.obs-vlfr.fr/mapsf/en/>). Enfin, les données de pression partielle de dioxyde de carbone dans l'eau de mer (pCO<sub>2</sub>) de la base de données Socat-V6 (Bakker *et al.*, 2016) n'indiquent pas non plus de signal qui résulterait de telles floraisons dans ce secteur.

Ces valeurs élevées de Chl-a observées par le *Boogaloo* sont donc intrigantes, mais elles ne peuvent pas être validées indépendamment. Il est possible que les températures anormalement chaudes dans cette région du Pacifique Sud avant le passage du voilier, soit au cours des mois de janvier et février 2017 (anomalies supérieures à 2 °C, figure 4), aient favorisé la floraison planctonique, même si ce sont des régions éloignées d'îles ou de monts sous-marins qui auraient pu en favoriser l'apparition.

Comme les deux événements de forte concentration en Chl-a rencontrés ici sont séparés par quatre jours, nous ne soupçonnons pas de dérive instrumentale. On peut donc envisager que ces événements aient été associés à des remontées de sels nutritifs en présence de tourbillons océaniques très fréquents à ces latitudes de l'hémisphère Sud, proches des branches du courant circumpolaire antarctique. De telles structures n'ont cependant été observées que dans quelques régions

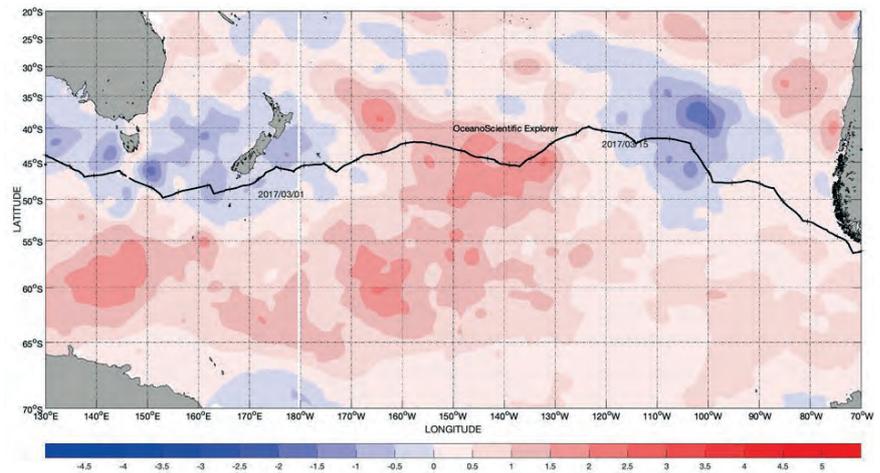


Figure 4. Anomalie mensuelle de température de surface de la mer en février 2017 dans le Pacifique Sud d'après le produit ISAS-15 (Kolodziejczyk *et al.*, 2017 ; Gaillard *et al.*, 2016). Noter les anomalies très positives (autour de +1,5 à 2 °C) observées dans la région centrale de la carte où l'OSC System a mesuré les très fortes concentrations en Chl-a de la figure 3.

(Hughes et Miller, 2017). Il semble aussi improbable que des apports atmosphériques de sels nutritifs, tels ceux d'origine australienne pendant la saison sèche australe (Brévière *et al.*, 2006), aient pu induire ces floraisons. Il est intéressant qu'Yvan Griboval ait observé, dans les parages de ces fortes valeurs, des macrophytes, algues qui verdissent en quelques heures le pont et le tableau arrière de son voilier, ainsi que la présence accrue d'oiseaux de mer. Le navigateur-explorateur et son routier à terre (Christian Dumard) ont également observé dans ces mêmes zones du Pacifique Sud des gyres de courant très violents qui levaient une mer chaotique.

Si ces valeurs s'avéraient réelles, de telles concentrations de Chl-a illustrent le potentiel des nouveaux moyens d'observation fournis dans le domaine péri-antarctique par des

voiliers équipés ou des instrumentations autonomes, tels les flotteurs bio-Argo.

L'OSC System a aussi collecté des données de pCO<sub>2</sub> pendant une petite période au début (avant le 10 février), malheureusement trop courte pour être confiant dans les données. Cependant, elles co-varient de façon attendue avec la fluorescence chlorophyllienne (figure 5). Notons aussi que, sans être certain de l'étalonnage à appliquer, il semble que les données de pCO<sub>2</sub> des 5-10 février soient inférieures à la pression partielle atmosphérique (concentration autour de 402 ppm dans l'hémisphère Sud en janvier-mars 2017). La moyenne de pCO<sub>2</sub> océanique étant de 366 ± 25 ppm, cela suggère que la région est un puits de CO<sub>2</sub> dans les échanges avec l'atmosphère, comme cela a été régulièrement observé (Metzl, 2009).

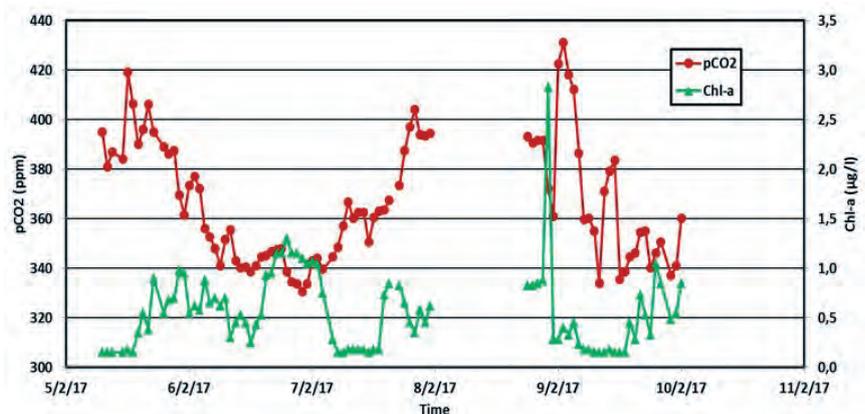


Figure 5. Enregistrement de pCO<sub>2</sub> (rouge, échelle de gauche) et de Chl-a (vert, échelle de droite) durant les premiers jours de route de 2017, dans le secteur des îles Kerguelen. Bien que le capteur pCO<sub>2</sub> n'ait pu être étalonné et les mesures qualifiées, ces données « brutes » suggèrent une anticorrélation entre les concentrations en Chl-a et celles de pCO<sub>2</sub>. Noter aussi que la plupart des valeurs de pCO<sub>2</sub> sont inférieures aux concentrations atmosphériques (402 ppm), confirmant que cette région agit comme un puits de CO<sub>2</sub> dans les échanges avec l'atmosphère pendant l'été austral.

## Isotopes de l'eau

Les échantillons recueillis par le *Boogaloo* et d'autres expéditions scientifiques ayant eu lieu en début d'année 2017, tous mesurés au Locean, contribuent très largement à l'ensemble de données recueillies au sud de 40° S depuis les années 1970. Ces autres expéditions du début de 2017 sont : la campagne du N/O Explora en mer de Ross et dans le Pacifique Sud-Ouest ; la campagne Oiso-27 dans l'océan Indien sud ; la campagne Wapiti au sud du passage de Drake et en mer de Weddell, ainsi que des données provenant du trois-mâts *Bark Europa* et de l'expédition ACE.

Ces données permettent en particulier de bien préciser les forts gradients méridiens de salinité et de concentration en isotopes de l'eau qui séparent les régions subtropicales des plus hautes latitudes. Les régions subtropicales sont en effet caractérisées par un excès d'évaporation, alors que les plus hautes latitudes sont influencées par des excès de précipitations, ainsi que par la fonte d'icebergs ou de glace de mer, et donc avec des valeurs bien plus basses en concentration d'isotopes de l'eau ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ ). Ces forts gradients se retrouvent en particulier au niveau des différentes branches (fronts) du courant circumpolaire antarctique. Les données du *Boogaloo* s'alignent très bien avec les données des autres campagnes de début 2017 (figure 6) suggérant une précision meilleure que 0,05 (0,10) en  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\delta^2\text{H}$ ). Ces données isotopiques, rares dans l'océan Austral, devraient contribuer à mieux préciser les sources d'eau douce et leur évolution dans le temps, en particulier dans

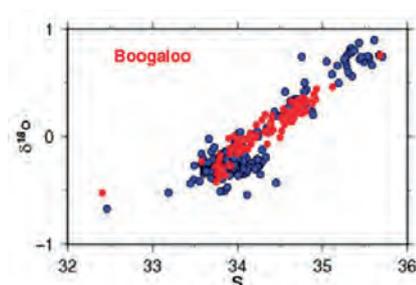


Figure 6. Diagramme de dispersion entre les concentrations relatives en  $^{18}\text{O}$  de l'eau en fonction de la salinité. Ce diagramme inclut les 105 échantillons collectés par le *Boogaloo* (en rouge), ainsi que 206 autres échantillons de surface collectés en janvier-mars 2017 dans l'océan Austral et analysés au Locean lors d'autres campagnes indiquées sur la figure 1ab. Les données du *Boogaloo* remplissent bien un trou relatif de données dans l'intervalle de salinité de 34 à 35.

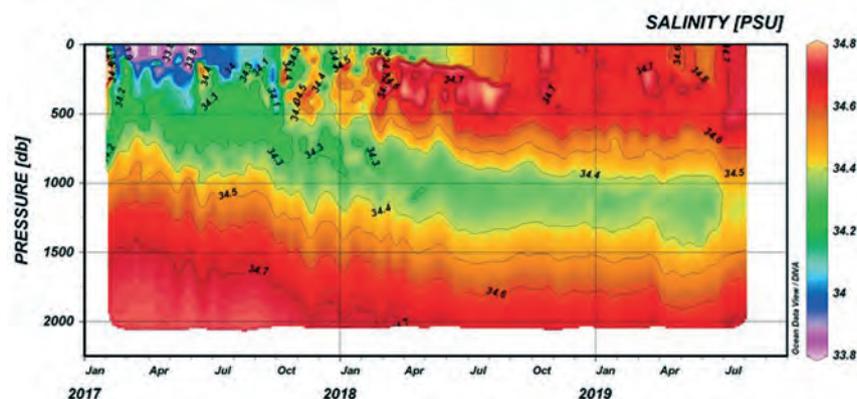


Figure 7. Évolution de la salinité (0-2000 m) enregistrée entre février 2017 et juillet 2019 par le flotteur Argo largué dans l'océan Indien austral durant le programme OceanScientific. Données extraites de la base de données Coriolis (<http://www.coriolis.eu.org>).

le contexte du changement climatique (réchauffement, modes de précipitations, fonte des glaces), tel que relevé dans le récent rapport IPCC/SROCC (2019).

## Flotteur-profileur Argo

Enfin, un flotteur Argo (Arvor 6902715) a été déployé le 12 février 2017 par 50° S-88° E ; il fonctionne correctement depuis<sup>6</sup>. Après quelques jours de dérive vers l'ouest, ce flotteur a suivi la route classique circumpolaire vers l'est. Depuis 2018, il présente une forte intrusion salée en subsurface, indiquant la pénétration vers le sud de l'eau modale subtropicale, ainsi que le minimum de salinité vers 1000 m caractéristique des eaux antarctiques intermédiaires formées plus au sud (figure 7). Les données de ce flotteur, retransmises par Coriolis, sont incluses dans le réseau global d'observations, utilisé par exemple pour évaluer l'évolution du contenu thermique de l'océan (Cheng et Zhu, 2018).

## Perspectives

Cette expédition OceanScientific réalisée avec l'OSC System a permis de tester la possibilité de récolter des jeux de données de qualité scientifique à partir de voiliers opérés en solitaire dans des régions pauvres en observations de l'océan Austral, et donc à un coût énergétique très faible, sans aucun rejet de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. C'est la confirmation de la pertinence de cette idée, née dans l'esprit du navigateur-explorateur Yvan Griboval en 2005-2006, puis développée et mise au point pendant plus de dix ans par ses soins

sous les directives des scientifiques. Désormais, plusieurs industriels proposent des équipements prêts à embarquer sur des voiliers de course océanique de moins de vingt mètres, que ce soit par exemple pour un usage dans le *Vendée Globe* comme dans la future *Ocean Race* (ex-*Volvo Ocean Race*) autour du monde, permettant ainsi au sport d'être au service de la science.

Cette campagne a aussi démontré que les données pouvaient être retransmises en temps réel toutes les heures sans interruption pendant plusieurs mois. Le mode opératoire est cependant contraignant en solitaire, en particulier pour la prise d'échantillons (figure 1) ou leur stockage, suggérant des modifications à apporter dans le circuit d'eau pour permettre un accès plus facile à l'eau de mer.

Par ailleurs, pour atteindre une précision requise scientifiquement, certains paramètres nécessitent la collecte d'échantillons et la comparaison à des standards en mode quasi continu qui requièrent des installations de plus grande taille. C'est le cas, par exemple, pour la pression partielle en dioxyde de carbone dissous.

Ces enseignements ont amené à envisager une instrumentation plus importante sur un voilier permettant d'embarquer une personne dédiée au suivi des instrumentations et à la collecte des mesures océanographiques et météorologiques. Un tel voilier permettrait d'envisager des expéditions dans des secteurs difficiles de l'océan Austral, en différentes saisons.

6. On peut le suivre sur <http://www.ifremer.fr/co-argo/Floats/float?ptfCode=6902715> ou sur le site de l'association OceanScientific ([www.oceanoscientific.org](http://www.oceanoscientific.org)).

Ce projet est actuellement en cours de réalisation avec l'acquisition d'un nouvel *OceanoScientific Explorer*, capable cette fois-ci non seulement de retourner naviguer à la voile sans rejet de CO<sub>2</sub> dans l'océan Austral sous le 40° S, cette fois-ci en équipage, mais surtout d'y aller durant l'hiver austral (juin-septembre). À ce jour, aucun équipage n'a réussi le tour complet *non-stop* de l'Antarctique à cette saison. C'est le nouveau challenge que s'est fixé le navigateur-explorateur Yvan Griboval à échéance de l'hiver austral 2022.

## Remerciements

Nous avons en premier lieu une pensée émue pour Fabienne Gaillard (Lops, Ifremer) qui nous a quittés

le 25 mars 2017. Fabienne a guidé la conception, la réalisation puis le développement du programme *OceanoScientific*. Son nom est désormais à tout jamais associé au comité scientifique Fabienne Gaillard d'*OceanoScientific*. Nous remercions l'équipe à terre qui a joué un rôle primordial pour que la navigation et la collecte de données océanographiques soient couronnées de succès et en particulier Cécile d'Estais (coordinatrice *OceanoScientific*), Maxime Dreno (second et préparateur de l'*OceanoScientific Explorer Boogaloo*), Christian Dumard (routeur), Denis Diverrès (IRD Brest) et Dimitri Voisin (Mer agitée, Team Michel Desjoyeaux). Mentionnons le rôle particulier de SAS le Prince Souverain Albert II de Monaco qui a mobilisé ses quatre entités

dédiées à l'océan pour aider à la réussite de cette expédition inédite : Yacht Club de Monaco, Fondation Albert II de Monaco (FPA2), Institut océanographique de Monaco et Centre scientifique de Monaco. De nombreux mécènes ont contribué au projet, parmi lesquels le Groupe des papeteries de Clairefontaine, la société Lise Charmel et Biologique Recherche. Notons enfin le soutien sans faille depuis 2006 de l'Ifremer, de Météo-France, du CNRS et l'aide apportée par Mercator Océan, puis par le Soere<sup>7</sup> CTDO2, ainsi que Coriolis pour des aspects essentiels, tels que la transmission, le traitement, la validation, la mise en base et la diffusion des données.

*7. Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement.*

## Bibliographie

- Alory G., Téchiné P., Delcroix T., Diverrès D., Varillon D., Donguy J.R., Reverdin G., Morrow R., Grelet J., Gouriou Y., Jacquin S., Kestenare, Bachelier C., DiMattéo A., 2020. Le Service national d'observation de la salinité de surface de la mer : 50 ans de mesures océaniques globales. *La Météorologie*, 109, 29-38.
- Bakker D.C.E., Pfeil B., Landa C.S., Metzl N., O'Brien K.M. *et al.*, 2016. A multi-decade record of high-quality fCO<sub>2</sub> data in version 3 of the Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas (SOCAT). *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 383-413. doi: 10.5194/essd-8-383-2016
- Blain S., Quéguiner B., Armand L., Belviso S., Bombled B., Bopp L., Bowie A., Brunet C., Brussaard C., Carlotti F., Christaki U., Corbière A., Durand I., Ebersbach F., Fuda J.L., Garcia N., Gerringa L., Griffiths B., Guigue C., Guillemin C., Jacquet S., Jeandel C., Laan P., Lefèvre D., Lo Monaco C., Malits A., Mosseri J., Obermosterer I., Park Y.H., Picheral M., Pondaven P., Remenyi T., Sandroni V., Sarthou G., Savoye N., Scouarnec L., Souhaut M., Thuiller D., Timmermans K., Trull T., Uitz J., van Beek P., Veldhuis M., Vincent D., Viollier E., Vong L., Wagener T., 2007. Effect of natural iron fertilisation on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature*, 446, 1070-1074. doi: 10.1038/nature05700
- Brévière E., Metzl N., Poisson A., Tilbrook B., 2006. Changes of oceanic CO<sub>2</sub> sink in the Eastern Indian sector of the Southern Ocean. *Tellus*, 58B, 438-446. doi: 10.1111/j.1600-0889.2006.00220.x
- Cheng L., Zhu J., 2018. 2017 was the warmest year on record for the global ocean. *Adv. Atmos. Sci.*, 35, 261-263. doi: 10.1007/s00376-018-8011-z
- Gaillard F., Reynaud, T., Thierry V., Kolodziejczyk N., Von Schuckmann K., 2016. In-situ based reanalysis of the global ocean temperature and salinity with ISAS: variability of the heat content and steric height. *J. Clim.*, 29, 1305-1323. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0028.1
- Hughes C.W., Miller P.I., 2017. Rapid water transport by long-lasting modon eddy pairs in the southern midlatitude oceans. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 12,375-12,384. doi: 10.1002/2017GL075198
- IPCC, 2019. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer, eds.), <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- Jones K.N., Currie K.I., McGraw C.M., Hunter K.A., 2013. The effect of coastal processes on phytoplankton biomass and primary production within the near-shore Subtropical Frontal Zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 124, 44-55. doi: 10.1016/j.ecss.2013.03.003
- Kolodziejczyk N., Prigent-Mazella A., Gaillard F., 2017. ISAS-15 temperature and salinity gridded fields. Sea scientific open data edition. doi: 10.17882/52367
- Lourantou A., Metzl N., 2011. Decadal evolution of carbon sink within a strong bloom area in the subantarctic zone. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23608. doi: 10.1029/2011GL049614
- Metzl N., 2009. Decadal increase of oceanic carbon dioxide in the Southern Indian Ocean surface waters (1991-2007). *Deep-Sea Res II*, 56, 607-619. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.12.007
- Moore J.K., Abbott M.R., 2000. Phytoplankton chlorophyll distributions and primary production in the Southern Ocean. *J. Geophys. Res.*, 105, 28709-28722. doi: 10.1029/1999JC000043
- Ollivault M., 2016. Les flotteurs Argo et la circulation générale océanique. *La Météorologie*, 94, 35-44. doi: 10.4267/2042/60703
- Organelli E., Barbioux M., Claustre H., Schmechtig C., Poteau A., Bricaud A., Boss E., Briggs N., Dall'Olmo, D'Ortenzio G., Leymarie E., Mangin A., Obolensky G., Penkerch C., Prieur L., Roesler C., Serra R., Uitz J., Xing X.G., 2017. Two databases derived from BGC-Argo float measurements for marine biogeochemical and bio-optical applications. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 861-880. doi: 10.5194/essd-9-861-2017
- Poli P., 2019. Meteorological observations and context of the 2017 Antarctic Circumpolar sailing campaign *OceanoScientific*. doi: 10.5281/zenodo.3528936
- Reynaud T., Griboval Y., Reverdin G., Metzl N., 2018. Expédition *OceanoScientific* 2016-2017 : Études des mesures de température et de salinité de surface. LOPS/18-05. doi: 10.13155/58356
- Speich S., Lee T., Muller-Karger F., Lorenzoni L., Pascual A., Jin D., Delory E., Reverdin G., Siddorn J., Lewis M.R., Marba N., Buttigieg P.L., Chiba S., Manley J., Tierayang Kabo-Bah A., Desai K., Ackerman A., 2019. Editorial: OceanObs'19: An Ocean of Opportunity. *Frontiers Mar. Sci.* doi: 10.3389/fmars.2019.00570
- Valente A. *et al.*, 2019. A compilation of global bio-optical in situ data for ocean-colour satellite applications – version two. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1037-1068. doi: 10.5194/essd-11-1037-2019