

PROGRAMME SURVOSTRAL

Surveillance de l'Océan Austral

ROSEMARY MORROW

rosemary.morrow@legos.obs-mip.fr

LEGOS, Toulouse
UMR5566 (CNRS, CNES, IRD,
Université Toulouse III, OMP)

ÉLODIE KESTENARE

elodie.kestenare@legos.obs-mip.fr

LEGOS, Toulouse
UMR5566 (CNRS, CNES, IRD,
Université Toulouse III, OMP)

Depuis 25 ans, le programme scientifique Survostral effectue régulièrement des observations océanographiques dans l'océan Austral, en utilisant l'*Astrolabe* comme plate-forme d'observation. Les observations incluent des XBTs qui mesurent un profil de température de la surface jusqu'à - 800 mètres de profondeur et des observations en continu de salinité de surface. L'échantillonnage régulier nous a montré comment la structure de la température de l'océan Austral a répondu au réchauffement climatique, avec des déplacements des fronts polaires vers le sud et une pénétration moins profonde des eaux froides d'hiver. Les séries temporelles de salinité de surface montrent également l'adoucissement des eaux de surface près de l'Antarctique qui a fortement accéléré après le vêlage du glacier de Mertz en 2010. La longue série temporelle est une précieuse « sentinelle » de la réponse de l'océan au forçage climatique. La surveillance SURVOSTRAL continuera avec le nouveau navire *Astrolabe* au cours des prochaines années.

Over 25 years, the Survostral scientific program has been making regular oceanographic observations across the Southern Ocean, using the Astrolabe as its observation platform. The observations include XBTs which measure a temperature profile over 800 meters depth, and continuous underway surface salinity observations. The regular sampling has shown us how the Southern Ocean's temperature structure has adjusted to the warming climate, with shifts in the polar fronts and a shallower penetration of cool winter waters. The surface salinity time series also shows the net surface freshening near Antarctica that increased strongly after the Mertz Glacier calving in 2010. The long continual time series is a precious sentinel of the ocean's response to the climate forcing. The SURVOSTRAL monitoring will continue with the new Astrolabe ship over the next years.



Figure 1a
L'*Astrolabe* au large de l'Antarctique.

Figure 1b
Une sonde XBT.



Figure 1c
Technique artisanale pour lancer les sondes XBT loin de la coque du navire, dans les conditions de mer forte.



1. LES ENJEUX ET LES MESURES

Depuis 25 ans, le programme scientifique Survostral a accompli une surveillance régulière de l'état de l'océan Austral, entre Hobart (Tasmanie) et Dumont d'Urville (DDU, base française en Antarctique), grâce aux observations menées à bord de l'*Astrolabe*. En effet, si le premier objectif de l'*Astrolabe* est de faire le transport de la logistique et des passagers vers DDU, le navire a toujours servi de plateforme d'observations océanographiques hors norme. À raison de 5 rotations (eg allers retours) par an entre fin octobre et début mars, l'*Astrolabe* traverse le courant circumpolaire en passant par les quarantièmes rugissants et les cinquantièmes hurlants. Pour les océanographes, c'est une opportunité précieuse d'observer cet océan lointain et rude, si fondamental pour notre climat. Le sud de la Tasmanie est un passage important des eaux subtropicales circulant de l'océan Pacifique vers l'océan Indien. Plus au sud, dans le cœur du courant circumpolaire, l'échange des eaux subpolaires se fait dans l'autre sens, c'est-à-dire de l'océan Indien vers l'océan Pacifique. Les conditions extrêmes en surface (vents forts, vagues importantes, températures froides) tant ressenties par les passagers de l'*Astrolabe* sont aussi les conditions qui favorisent le brassage des eaux de surface, et leurs plongées dans les abysses ou leurs remontées depuis les profondeurs. Une grande partie des eaux profondes à l'échelle du globe sont formées ou modifiées par les conditions extrêmes dans l'océan Austral. D'où notre intérêt de surveiller régulièrement ces eaux, de veiller à leurs évolutions et de comprendre leurs modifications.

Le programme Survostral a débuté en octobre 1992, avec l'idée géniale de lancer des sondes XBT (eXpendable BathyThermographe, cf. Figure 1) afin de mesurer la température entre la surface et - 800 mètres de profondeur à travers l'océan Austral, à partir des rotations de l'*Astrolabe*. Le programme a été initié par un trio de scientifiques: Jean-René Donguy de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) à Nouméa, Gary Meyers du Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) en Australie et Dean Roemmich de la Scripps institution of oceanography aux États-Unis. L'année suivante, ils ont installé un thermosalinographe (TSG) pour effectuer des mesures en continu de la salinité de surface. Ce paramètre clé dans l'estimation de la stabilité de l'océan est également un indicateur de pluie et de la fonte de glace dans l'océan hauturier. Cette coopération internationale continue, assurée actuellement par un autre trio: Rosemary Morrow, du Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS) en France, Rebecca Crowley du CSIRO et Janet Sprintall de la Scripps. L'Institut polaire français a fortement soutenu ces observations depuis 25 ans.

Les mesures XBT sont faites sur 3 rotations au début du réchauffement de l'océan au printemps (octobre - novembre), au milieu de l'été (décembre - janvier) et au début du refroidissement (février - mars). Il est important d'assurer un tir toutes les 2 heures, 24 heures sur 24 et par tout temps, pendant les traversées qui durent environ 6 jours. Cette cadence s'intensifie aux passages des fronts polaires, avec un tir toutes les heures, soit pendant 36h. Depuis 25 ans, une centaine de volontaires scientifiques ont assuré l'acquisition de ces observations, malgré les conditions difficiles et le mal de mer pour bon nombre d'entre eux.

2.

EN 20 ANS, COMMENT CETTE COUCHE DE TEMPÉRATURE ENTRE 0-800 MÈTRES A-T-ELLE CHANGÉ ?

Chaque saison, le programme Survostral permet d'obtenir 4-6 sections verticales de température entre la surface et - 800 mètres de profondeur, grâce aux sondes XBTs. La **Figure 2** ci-dessous illustre la température de surface (SST) moyenne du nord au sud le long de la ligne de mesures et en particulier la diminution de la SST à travers les fronts polaires. Dans la région entre le front Subtropical (STF) et le front Subantarctique (SAF) où les eaux de subsurface se forment en hiver, la SST reste assez constante en été, avec 9-10° en moyenne.



© Bruno et Marie Cusa

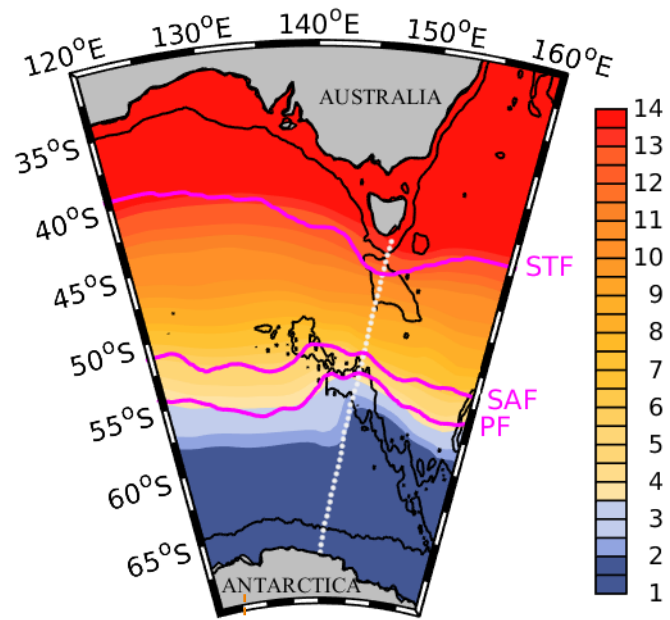


Figure 2 - En couleur: la température de surface (SST) moyenne estivale (DJFM) issue de données satellitales et in situ (Reynolds), avec la position moyenne de mesures SURVOSTRAL (ligne pointillée blanche) entre la Tasmanie et l'Antarctique. En rose, les fronts subtropicaux (STF) et subantarctique (SAF) et le front polaire (PF).

Mais la température en profondeur montre une autre histoire. La **Figure 3** montre la structure de la température dans les premiers 500 mètres avec les données Survostral, moyennées sur 2 périodes: 1992-1996 pour le début de notre série et 2000-2004, 8 ans plus tard. Au premier regard, les 2 moyennes se ressemblent, avec des eaux chaudes subtropicales près de la Tasmanie vers 44°S, des forts gradients de température au niveau des fronts Subantarctiques et Polaire vers 50°S et des eaux froides près de l'Antarctique vers 66°S. Au sud des fronts polaires, une langue d'eau très froide entre 100 mètres et 200 mètres de profondeur témoigne de la limite des eaux d'hiver (froides et peu salées). Ces moyennes en été montrent que les eaux de surface sont réchauffées de quelques degrés.

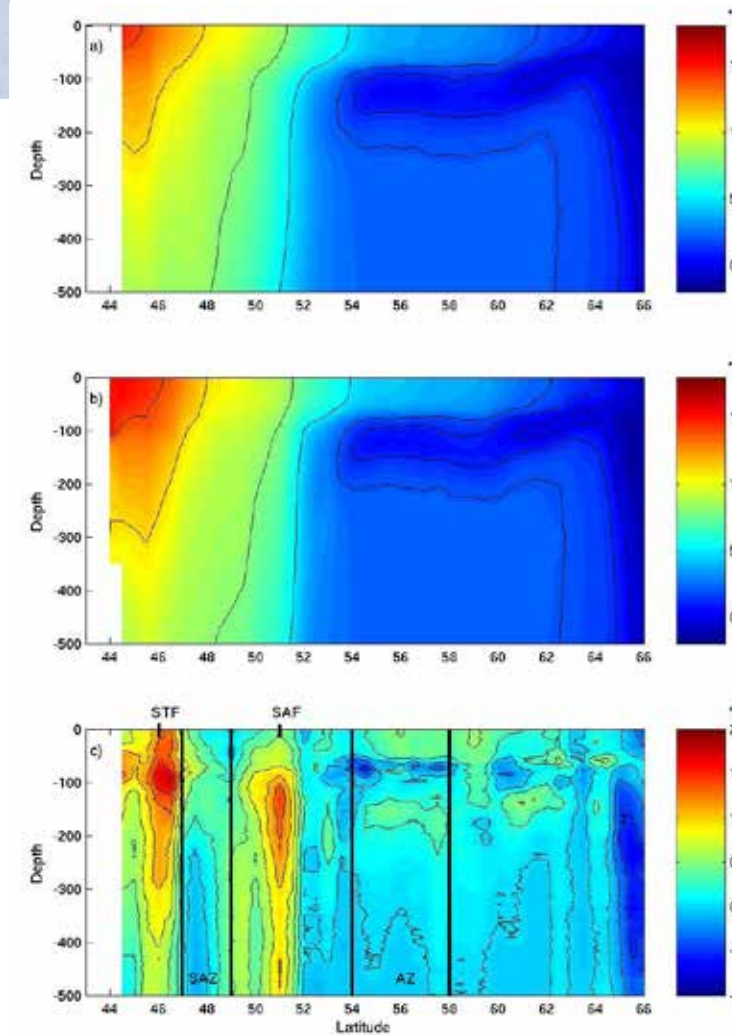


Figure 3 - Moyenne estivale (DJFM) de la température le long de la ligne Survostral en °C entre 0-500-m pour 1992-1996 (en haut) et 2000-2004 (au milieu). Différence 2000/2004 - 1992/1996 (en bas).

La carte des différences entre les 2 périodes (**Figure 3**, en bas) montre que les fronts subtropicaux (STF) et subantarctique (SAF) se sont déplacés vers le sud. Le front subtropical correspond à la limite sud des eaux subtropicales, chaudes et salées: en une dizaine d'années, il y a eu un déplacement de ces eaux vers le Pôle Sud. Le front subantarctique est associé au courant circumpolaire, également déplacé vers le sud. En revanche, la langue d'eau formée en hiver en subsurface est devenue plus mince et plus proche de la surface. L'ensemble de la section s'est réchauffé mais pas uniformément car les différentes couches d'eau de l'océan Austral réagissent chacune avec leur propre dynamique. Nos études complémentaires ont montré que ce réchauffement en profondeur a contribué à la hausse du niveau de la mer dans l'océan Austral, associé aux renforcements et déplacements des vents vers le sud¹. Enfin, le déplacement des fronts vers le sud a aussi eu un impact sur la distribution des espèces du phytoplancton² et sur l'absorption de CO₂³.

1. Morrow et al., 2008
2. Cubillos et al., 2007
3. Breviere et al., 2006



© Eduardo Da Forno

Ces changements ne se réalisent pas de façon constante dans le temps. Les données satellites peuvent fournir des informations précieuses sur les chemins pris par les eaux qui traversent la ligne Survostral chaque année. La Figure 4 montre un exemple pour 6 saisons estivales: des pseudo-particules sont lâchées en surface en novembre et, portées par les courants altimétriques, elles passent la ligne Survostral en mars. On voit que certaines années, il y a beaucoup d'eau d'origine subtropicale qui atteint la ligne Survostral (eg 2000/2001), tandis qu'en 1995/1996, les eaux prennent leur origine dans la zone subantarctique. Ces analyses complémentaires sont indispensables pour bien interpréter la variabilité des observations vue sur notre ligne de mesures.

3

LA SALINITÉ DE SURFACE

La stratification de l'océan Austral est délicate car elle est stabilisée par un minimum de sel dans la couche supérieure. Cette stabilité est donc sensible aux changements des flux d'eau douce qui dépendent des variations de l'interface océan-atmosphère via les évaporations/précipitations et/ou de la fonte de la glace de mer. Les observations de la salinité de surface (SSS) du programme SURVOSTRAL montrent qu'aux hautes latitudes, elle a baissé dans les années 1990 ; d'une part à cause de l'augmentation des précipitations entre 50-60°S pendant cette période¹ et d'autre part, de l'augmentation de la fonte de la glace près de l'Antarctique. Cependant, la baisse de la SSS n'a pas perduré après les années 2000⁴.

Près de la côte en Terre Adélie dans la zone de glace de mer (Sea Ice Zone, SIz, 60-66°S), les études de modélisation et des analyses à partir de données in situ ont toutes indiqué une baisse de la salinité en profondeur dans les dernières décennies, avec un impact sur le volume des eaux du fond formées, moins salées, moins denses⁵. Grâce à notre surveillance de la salinité de surface à long terme, nous avons pu donner un contexte plus continu de ces changements épisodiques⁶. La Figure 5 montre, dans la zone côtière, les fluctuations bisannuelles de la couverture de glace et la SSS dans les années 1990: l'augmentation de glace de mer en novembre est associée à une baisse de la salinité l'été suivant. Par contre, dans les années 2000, la couverture de glace en novembre est faible mais une baisse constante de la SSS est évidente. Suite au vèlage du glacier de Mertz, à l'est de DDU en février 2010, une grande quantité de glace de mer a été libérée apportant davantage d'eau douce sur notre ligne de mesures, avec également des fluctuations bisannuelles de la SSS et de la glace de mer. Nous avons pu montrer que ces changements de couverture de glace de mer sont aussi en phase avec le déplacement des vents à grande échelle dans la région. Mais la série de 25 ans de mesures reste trop courte compte tenu des fluctuations climatiques dans la région. Par conséquent, une série temporelle plus longue est aussi nécessaire pour confirmer ces cycles et ces tendances.

Figure 4
Trajets des eaux de surface qui traversent la ligne SURVOSTRAL en mars, représenté ici pour 6 saisons différentes. Les couleurs indiquent la provenance des eaux: en bleu au sud, proche du SAF, et en rouge au nord, proche du STF. (Morrow et Kestenare, 2014).

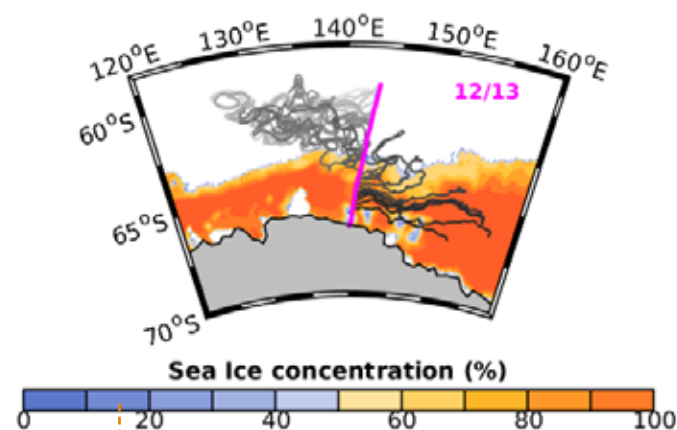
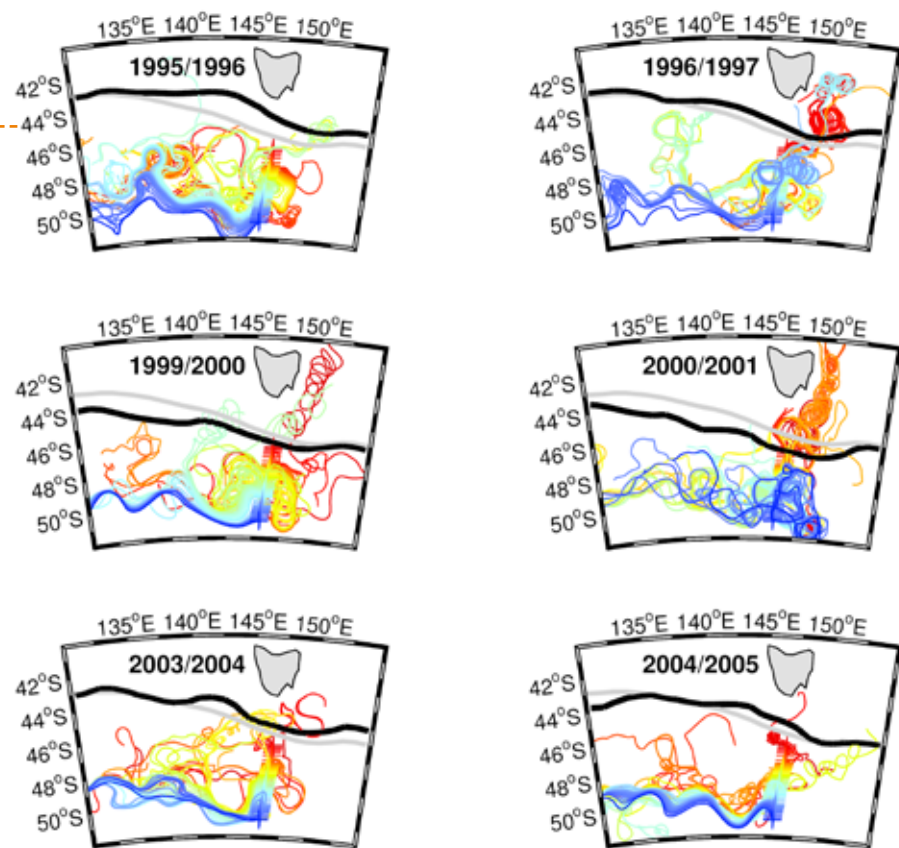


Figure 5a - Concentration de glace de mer en novembre (en couleur) extraite au CERSAT (Centre ERS d'Archivage et de Traitement) et (en gris) les chemins parcourus par les eaux observées entre novembre et mars (mois pour lequel les pseudo-particules atteignent la ligne SURVOSTRAL), au sud de 60°S pendant la saison 2012-2013. En gris clair, les courants proviennent de l'ouest, et en gris foncé, proche de la côte Antarctique, les courants proviennent de l'Est.

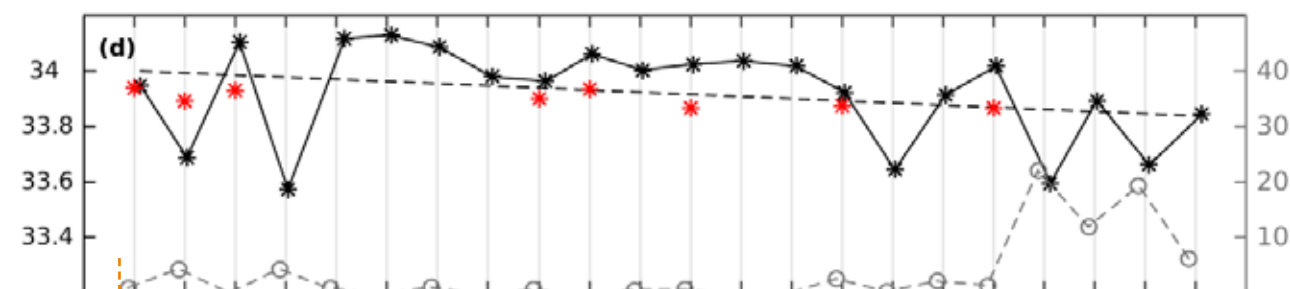


Figure 5b - Moyenne estivale (DJFM) de la SSS SURVOSTRAL près de 65°S (étoiles noires) et couverture de glace de mer en novembre dans la boîte 140-145°E (ronds gris). Les points rouges correspondent aux données en profondeur prises par Aoki et al. (2013). La ligne pointillée montre la baisse de la salinité pour cette période de 0.08 unités par décennie. (Morrow et Kestenare., 2017)



1. Morrow, R., G Valladeau, and JB Sallée, 2008
4. Morrow, R, E Kestenare, 2014
6. Morrow R, E Kestenare, 2017

4.

UNE SÉRIE PRÉCIEUSE, POUR LA SCIENCE ET POUR L'OPÉRATIONNEL

Ces séries d'observations représentent un jeu de données in situ de référence unique ("benchmark") du changement de température dans la couche superficielle de l'océan et de la SSS dans l'océan Austral. Les SSS sont intégrées au Service national d'observations SNO-SSS. Elles sont utilisées pour valider les modèles numériques à haute ou basse résolution. Les observations Survostral sont aussi transmises en temps réel et sont assimilées dans les modèles opérationnels (Mercator, Bluelink, etc.). Survostral fournit une longue série temporelle précise à très haute résolution mais sur une section géographique fixe. Ces mesures sont parfaitement complémentaires de jeux d'observations in situ plus récents, telles que les données issues des flotteurs de surface (GDP – Global Drifter Program), des flotteurs

profilant de subsurface (ARGO), des profils acquis avec les animaux marins (phoques et éléphants de mer). Ces données GDP, ARGO, animaux marins fournissent une couverture spatio-temporelle plus large mais des séries temporelles plus courtes : par exemple, les premiers flotteurs ARGO ont été mis à l'eau dans l'océan Austral en 2002, mais la couverture spatio-temporelle n'est complète qu'à partir de 2005.

À partir d'octobre 2017, les observations Survostral seront assurées à bord du nouveau navire l'*Astrolabe* pour les 4 prochaines années au moins, assurant ainsi la continuité du jeu de données existant. 30 ans de données, cela fera une belle et inestimable série pour suivre les modes de variabilité et la réponse de l'océan Austral aux fluctuations climatiques aux échelles interannuelles et décennales.

RÉFÉRENCES

- Morrow, R., G Valladeau, and JB Sallée (2008). Observed subsurface signature of Southern Ocean decadal sea level rise. *Prog. Oceanogr*, 77 No 4, 351-366.
- Cubillos JC, Wright SW, Nash G, de Salas MF and others (2007) Calcification morphotypes of the coccolithophorid *Emiliana huxleyi* in the Southern Ocean: changes in 2001 to 2006 compared to historical data. *Mar Ecol Prog Ser* 348: 47-54. <https://doi.org/10.3354/meps07058>
- Breviere E, N Metzl, A Poisson and B Tilbrook (2006) Changes of the oceanic CO₂ sink in the Eastern Indian sector of the Southern Ocean. *Tellus*, 58B, 438-446.
- Morrow, R, E Kestenare (2014). Nineteen-year changes in surface salinity in the Southern Ocean south of Australia. *J. Mar. Sys.* doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.09.011.
- Aoki, S., Y. Kitade, K. Shimada, K. I. Ohshima, T. Tamura, C. C. Bajish, M. Moteki, and S. R. Rintoul (2013), Widespread freshening in the seasonal ice zone near 140°E off the Adélie Land Coast, Antarctica, from 1994 to 2012, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6046-6063, doi: 10.1002/2013JC0090009.
- Morrow R, E Kestenare (2017). 22-year surface salinity changes in the Seasonal Ice Zone near 140°E off Antarctica. *J. Mar. Sys.* doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.07.003.



© Bruno et Marie Cusa

