

# Le Service national d'observation de la salinité de surface de la mer

## 50 ans de mesures océaniques globales

**Gaël Alory<sup>1</sup>, Philippe Téchiné<sup>1</sup>, Thierry Delcroix<sup>1</sup>, Denis Diverrès<sup>2</sup>, David Varillon<sup>2</sup>, Jean-René Donguy<sup>3</sup>, Gilles Reverdin<sup>4</sup>, Rosemary Morrow<sup>1</sup>, Jacques Grelet<sup>2</sup>, Yves Gouriou<sup>2</sup>, Stéphane Jacquin<sup>2</sup>, Elodie Kestenare<sup>1</sup>, Céline Bachelier<sup>2</sup>, Angelo DiMattéo<sup>2</sup>**

1. Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales, Cnes / CNRS / IRD / Université Paul-Sabatier, Toulouse
2. Instrumentation, moyens analytiques, observatoires en géophysique et océanographie, IRD, Brest et Nouméa
3. Retraité de l'IRD
4. Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques, Sorbonne Université / CNRS / IRD / MNHN, Paris

gael.alory@legos.obs-mip.fr

## Résumé

**La salinité de surface de la mer (SSS : *Sea Surface Salinity*) influence la dynamique océanique et porte la signature du cycle de l'eau à l'interface océan-atmosphère. Pour mieux comprendre ses variations, le Service national d'observation SSS (SNO SSS) du Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (Legos, Toulouse) gère un réseau global de navires d'opportunité équipés de thermosalinographes, initié il y a 50 ans. La maintenance des instruments est effectuée aux ports de Nouméa et du Havre par l'Institut de recherche pour le développement (IRD). Les données sont transmises en temps réel pour la surveillance des instruments et l'océanographie opérationnelle. Après correction des dérives instrumentales en temps différé, les données sont mises à disposition de la communauté scientifique internationale, et permettent d'étudier des processus océaniques et climatiques d'échelle régionale à globale, ou de valider modèles et données satellitaires.**

La salinité est aujourd'hui reconnue comme une variable climatique essentielle (GCOS-WMO, 2016 ; Guilyardi, 2001). Elle forme avec la température le couple de paramètres physiques fondamentaux de l'eau de mer, qui contrôle sa densité et joue ainsi un rôle majeur dans la circulation océanique. Dans les régions polaires, le refroidissement des eaux de surface augmente leur densité et conduit à la formation de la banquise. Ce processus entraîne un rejet de sel qui augmente la salinité des eaux sous-jacentes et donc, à nouveau, leur densité. La salinité contribue ainsi au déclenchement de la convection profonde, moteur de la circulation thermohaline globale (Dadou *et al.*, 2016). Dans les régions tropicales, près des grands fleuves ou des très pluvieuses zones de convergence intertropicales, la stratification verticale en salinité sous la couche de surface relativement peu salée forme une barrière. Celle-ci limite la profondeur de la couche de surface et piège ainsi la chaleur fournie par le flux solaire. Ce processus renforce le couplage océan-atmosphère et favorise la convection atmosphérique. Il contribuerait aussi au développement du phénomène El Niño-Southern Oscillation (Enso ; Saint-Lu et Leloup, 2016 ; Maes *et al.*, 2002 ; Zhu *et al.*, 2014). Enfin, la salinité de surface de

la mer (SSS pour *Sea Surface Salinity*) reflète les échanges d'eau douce (évaporation et précipitation) avec l'atmosphère par concentration/dilution du sel dans la couche de surface. Elle représente donc la signature du cycle de l'eau à l'interface océan-atmosphère, où transitent les trois quarts des flux globaux (Schmitt, 2008).

Pour toutes ces raisons, il est primordial d'observer les variations spatio-temporelles de la salinité, et en particulier son évolution à l'ère du changement climatique. C'est la mission du Service national d'observation (SNO) SSS, piloté par le Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (Legos) au sein de l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), à Toulouse. Il bénéficie de l'appui technique de l'unité de service Instrumentation, moyens analytiques, observatoires en géophysique et océanographie (Imago) de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) à Brest et Nouméa. Le SNO SSS gère un réseau global de mesures à partir de navires de commerce. Ce service est labellisé par l'Institut national des sciences de l'univers (Insu) depuis 2003, date de création des premiers observatoires de recherche sur l'environnement (Roux *et al.*, 2003), mais a en fait été initié dans le Pacifique tropical il y a maintenant 50 ans.

## Abstract

### The French Sea Surface Salinity Observation Service

50 years of measurements in the global ocean

Sea Surface Salinity (SSS) affects the ocean dynamics and bears the signature of the water cycle at the ocean-atmosphere interface. To better understand its variations, the French SSS Observation Service from the Laboratory for Studies in Geophysics and Spatial Oceanography (LEGOS, Toulouse, France) manages a global network of voluntary observing ships equipped with thermosalinographs (TSG), initiated 50 years ago. The instruments are regularly serviced at harbour calls in New Caledonia and mainland France by the French National Research Institute for Sustainable Development (IRD). Data are transmitted in real time for instrument monitoring and operational oceanography. After correction of instrumental drifts in delayed time, data are freely distributed to the international research community, and used for process-oriented climate studies from regional to global scale, or for validation of models and satellite data.

## Historique, évolution et extension du réseau de mesures

Au XIX<sup>e</sup> siècle, l'officier de marine américain Maury a l'idée de collecter les observations météorologiques recueillies dans les carnets de bord des navires pour établir les premières cartes marines de vents et courants. Reprenant ce principe et dans l'esprit de la poursuite d'observations entreprises dans le cadre du Ciem<sup>1</sup> avant la seconde guerre mondiale, une collaboration entre marins et chercheurs est initiée par des océanographes français de l'Orstom<sup>2</sup> basés outremer. En 1957, le centre Orstom de Pointe-Noire (Congo) sélectionne et équipe quatre paquebots desservant régulièrement la côte d'Afrique occidentale, leur demandant de mesurer la température de surface (SST pour *Sea Surface Temperature*) et de prélever de l'eau pour en analyser la salinité au laboratoire (figure 1 ; Berrit, 1962). Cependant, comme on supposait qu'il n'existait que des variations saisonnières qui se répétaient chaque année de manière quasi identique, ces observations n'ont duré qu'un an. Une expérience similaire a lieu de 1966 à 1968 dans l'ouest de l'océan Indien, à partir du centre Orstom de Nosy Bé (Madagascar). Quatre paquebots reliant Marseille à l'océan Indien par le canal de Suez jusqu'à La Réunion et Maurice, ainsi que des cargos reliant directement Djibouti à Madagascar, sont utilisés. Cette initiative a

malheureusement été écourtée avec la fermeture du canal de Suez à la suite de la guerre des Six Jours.

En 1969, une autre collaboration s'est instaurée dans le Pacifique Ouest entre les chercheurs du centre Orstom de Nouméa et les marins des minéraliers japonais qui venaient très régulièrement charger du nickel calédonien (figure 2a,b ; Donguy, 1999). Les mesures de température et les prélèvements pour la salinité sont alors faits en salle des machines plusieurs fois par jour. Contrairement aux précédents, cette campagne de mesures n'a pas été limitée dans le temps. Cela a permis d'observer de fortes anomalies de salinité en 1972-1973 dans le Pacifique Ouest, vite attribuées à El Niño qui était alors surtout connu pour ses impacts sur la température de la mer dans le Pacifique équatorial Est (Donguy et Hénin, 1976). Outre l'acharnement des scientifiques à obtenir des séries longues, ce succès scientifique motivera la poursuite des mesures (les lignes Nouvelle-Calédonie-Japon sont à ce jour toujours maintenues) et leur extension vers le Pacifique Est, à partir de cargos. Les mesures et prélèvements sont alors réalisés directement depuis la passerelle au moyen d'un thermomètre-seau (figure 2c), du fait de la réduction des équipages.

Dans les années 1970, les porte-conteneurs apparaissent et deviennent les plates-formes d'observation privilégiées, le long de lignes reliant Nouméa à l'Australie, l'Amérique du Nord, Tahiti et Panama. Dans les années 1980, les mesures de salinité et température de surface sont complétées par des profils de température effectués à l'aide de bathythermographes et des analyses biologiques des prélèvements (Dandonneau, 1992). Ce réseau de mesures est alors au cœur du programme Surtropac (Surveillance du Pacifique tropical), qui a permis d'observer à l'échelle du bassin le puissant El Niño de 1982-1983 et de beaucoup progresser dans la compréhension du phénomène (Delcroix et Hénin, 1991).

En parallèle, le réseau s'étend à l'Atlantique et à l'océan Indien à partir du Havre en 1977, en collaboration avec la Météorologie nationale (Dessier et Donguy, 1994). Ces nouvelles lignes partent vers les Antilles, la Guyane, le Brésil, l'Afrique du Sud et de l'Ouest, Djibouti et La Réunion.

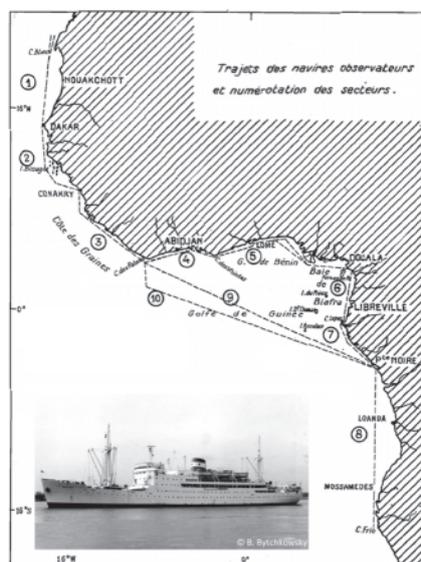


Figure 1. Carte des premières lignes de mesures océanographiques initiées par le centre Orstom de Pointe-Noire en 1957, à partir de paquebots mixtes, dont le Brazza (photo).

1. Conseil international d'exploration de la mer.  
2. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, devenu aujourd'hui IRD.



Figure 2. (a) Le *Koryu Maru*, l'un des premiers navires minéraliers utilisés pour la mesure continue de salinité de surface en 1969. (b) Feuille des prélèvements d'eau de mer réalisés à bord en septembre 1969. La salinité mesurée au laboratoire est reportée dans la dernière colonne. (c) Mise à l'eau d'un thermomètre-seau depuis la passerelle d'un cargo.

Au cours de cette même décennie, des mesures continues et automatisées à partir de thermosalinographes (TSG) remplacent progressivement les mesures au seau (figure 3). Le TSG est installé sur la prise d'eau de mer du navire, qui sert notamment au refroidissement du moteur (Hélin et Grelet, 1996). Alors que les mesures au seau étaient faites toutes les 4 à 6 heures, correspondant à une résolution spatiale de 100 à 200 km, les mesures TSG permettent d'avoir une résolution temporelle de 5 minutes, correspondant à une résolution spatiale de 2 km le long du trajet du navire.

Depuis le début des années 2000, avec la démocratisation des communications par satellite, les données collectées sont transmises en temps réel au Legos, et ce réseau de mesures de salinité de surface de la mer est labellisé Service national d'observation (Delcroix *et al.*, 2010 ; Alory *et al.*, 2015). Ce label implique une certaine pérennité du soutien par les organismes de recherche (IRD, CNRS, OMP, Cnes), favorise le montage de projets de recherche, mais engage aussi à assurer une continuité des mesures, notamment pour suivre l'évolution climatique. Pour maintenir

De 1980 à 1989, le *Marion Dufresne* est utilisé saisonnièrement entre Djibouti et La Réunion, dans le cadre du programme Sinode (Surface Indian Ocean Dynamics Experiment) sous la responsabilité du Muséum national d'histoire naturelle (Fieux et Levy, 1983).

Dans les années 1990, les navires « tour du monde » relient les trois océans tropicaux via le canal de Panama et le canal de Suez, et le réseau s'étend aux plus hautes latitudes avec l'ouverture d'une ligne Tasmanie-Antarctique en 1993 (Morrow et Kestenare, 2017), puis Danemark-Groenland en 1997.

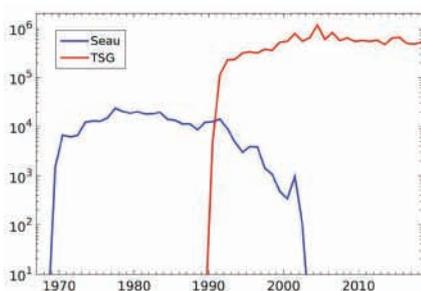


Figure 3. Évolution du nombre annuel d'observations françaises de SSS dans l'océan Pacifique (110° E-70° W, 50° S-50° N), par type de mesure (seau ou thermosalinographe).

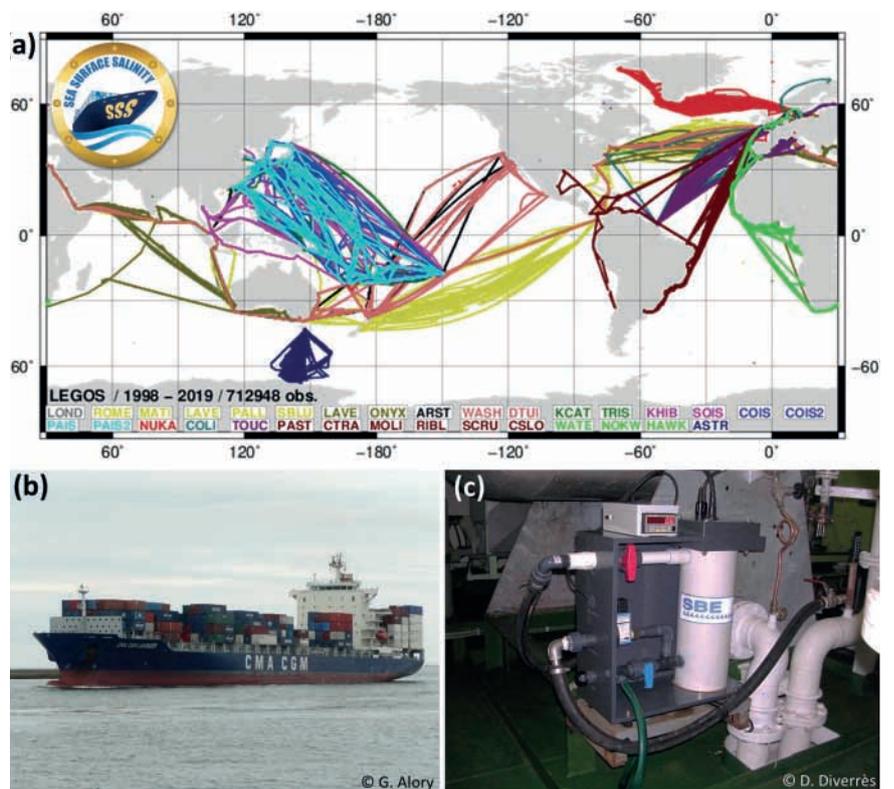


Figure 4. (a) Carte des lignes de navires équipés d'un TSG par le SNO SSS depuis la mise en place de la transmission temps réel. Les abréviations des noms des navires et couleurs associées (identiques pour ceux qui se sont succédé sur une même ligne) sont indiquées en bas de la carte. (b) Navire porte-conteneur *Lavender* (en jaune sur la carte) et (c) son système de mesure incluant un TSG SBE21, mesurant température et conductivité (dont on déduit la salinité), et un débitmètre électromagnétique avec affichage.

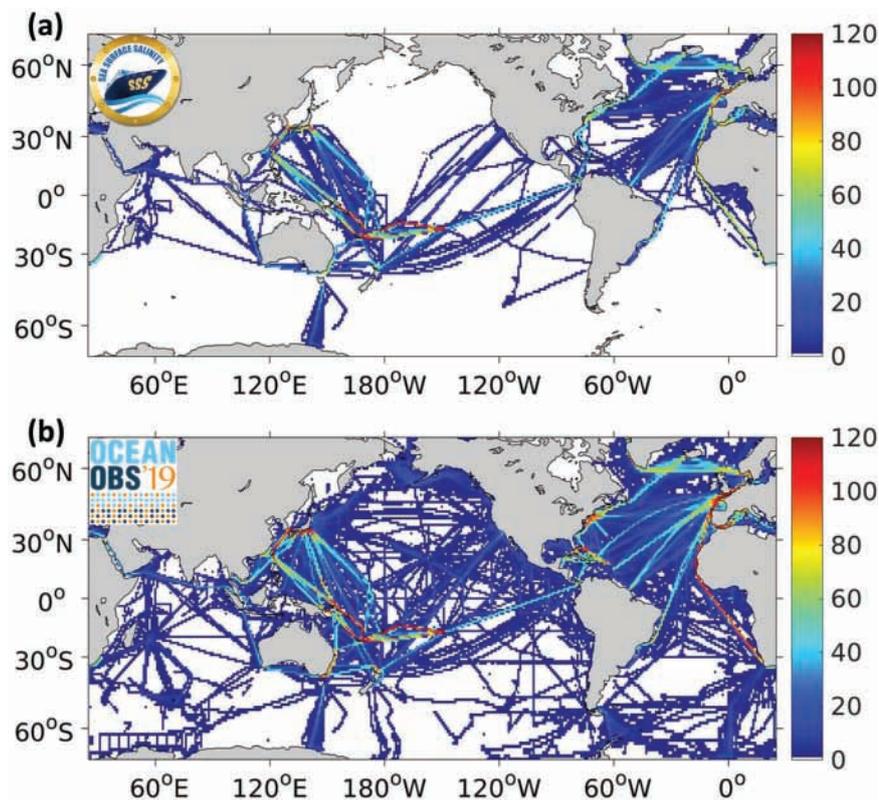


Figure 5. Comparaison de la densité d'observations TSG : (a) françaises en provenance du SNO SSS et des navires de recherche ; (b) mondiales, sur la période 2000-2010, en nombre de mois observés par maille de  $1^\circ \times 1^\circ$ . Adapté du Community White Paper OceanObs'19 de Smith *et al.* (2019).

les mesures sur les lignes actuelles, assurées chaque année par 10 à 12 navires, il a fallu identifier et équiper de TSG pas moins de 30 navires sur les vingt dernières années (figure 4). Grâce au SNO SSS, la France est devenue le principal pays fournissant des observations *in situ* de salinité de surface, avec une contribution estimée à 53 % des observations mondiales sur la période 2000-2010 (figure 5).

## Réception, traitement et distribution des données

### Temps réel

Depuis 2003, sur chaque navire, les mesures de salinité et de température de surface de la mer réalisées par le TSG, ainsi que la date, l'heure et la position GPS associées sont transmises par satellite au Legos. Les mesures, transmises deux fois par jour, correspondent à des médianes horaires construites par le logiciel d'acquisition. Depuis 2013, le débit d'eau dans le TSG est également mesuré et intégré aux messages temps réel.

Le message reçu déclenche automatiquement un logiciel qui décode le contenu, extrait les données et les enregistre dans une base de données. Un contrôle qualité entièrement automatisé est effectué à chaque étape du traitement des données temps réel. Des tests vérifient que les dates, heures et positions décodées sont réalistes et que les mesures sont comprises dans les limites instrumentales. Pendant ces contrôles, les éventuels problèmes détectés génèrent un message d'alerte à destination des gestionnaires du réseau d'observation. L'équipage du navire peut ensuite être contacté afin d'identifier et si possible corriger le problème. Des tests supplémentaires, basés sur des comparaisons de la salinité de surface à des valeurs moyennes mensuelles climatologiques, et de la température de surface à des valeurs moyennes hebdomadaires de température de surface d'un produit combinant mesures *in situ* et par satellite, sont réalisés. Si les données ne sont plus reçues, au bout de quelques jours, un contrôle automatique génère un message d'alerte permettant de diagnostiquer au plus vite les problèmes de transmission et de minimiser les pertes de données.

La visualisation des mesures temps réel est disponible sur le site web du Legos<sup>3</sup>. Une carte des trajets des

navires équipés d'un TSG donne accès aux informations nécessaires pour le suivi opérationnel du capteur, ainsi qu'aux mesures temps réel comparées à la climatologie SSS et au produit SST (figure 6). Cela sert à détecter rapidement un problème, en complément des éventuels messages d'alerte reçus. Dans certains cas, le problème peut être directement résolu avec l'aide de l'équipage. Dans d'autres, cela permet de préparer l'intervention qui aura lieu lors d'une escale du navire au port du Havre pour les navires sillonnant l'océan Atlantique ou de Nouméa pour ceux de l'océan Pacifique. Depuis 2018, le SNO SSS reçoit également les messages temps réel du réseau d'observation par TSG des navires de recherche français, qui suivent un traitement identique.

Les mesures temps réel sont téléchargées quotidiennement par le centre de données *in situ* pour l'océanographie opérationnelle Coriolis. Celui-ci alimente les systèmes de prévision océanique développés en France par Mercator. Des indicateurs mis à jour automatiquement chaque mois sur le site web du Legos permettent de suivre, sur le long terme, la répartition (cartes de distribution spatiale par année et sur plusieurs années, chronogramme de distribution temporelle) et l'amélioration ou le maintien de la qualité (statistiques sur le nombre de messages reçus, d'alertes envoyées, de mesures de salinité de surface en dehors des limites instrumentales, sur le nombre de messages émis depuis les navires et la comparaison avec les messages reçus au Legos, par année, par navire et totales) des mesures reçues en temps réel.

### Temps différé

À chaque escale d'un navire au port de Nouméa ou du Havre, les données à haute résolution (5 min) du TSG et associées à celui-ci (débit, coordonnées GPS), collectées au cours du voyage, sont récupérées. Des prélèvements d'eau de mer réalisés quotidiennement par l'équipage (formé pour cela) sont aussi récupérés, pour analyse ultérieure au laboratoire au moyen d'un salinomètre (figure 7). Une maintenance du dispositif instrumental, adaptée aux éventuels problèmes détectés en temps réel, est réalisée.

Le traitement de ces données en temps différé est réalisé en deux étapes, manuellement, à l'aide d'un logiciel

3. <http://www.legos.obs-mip.fr/observations/sss>

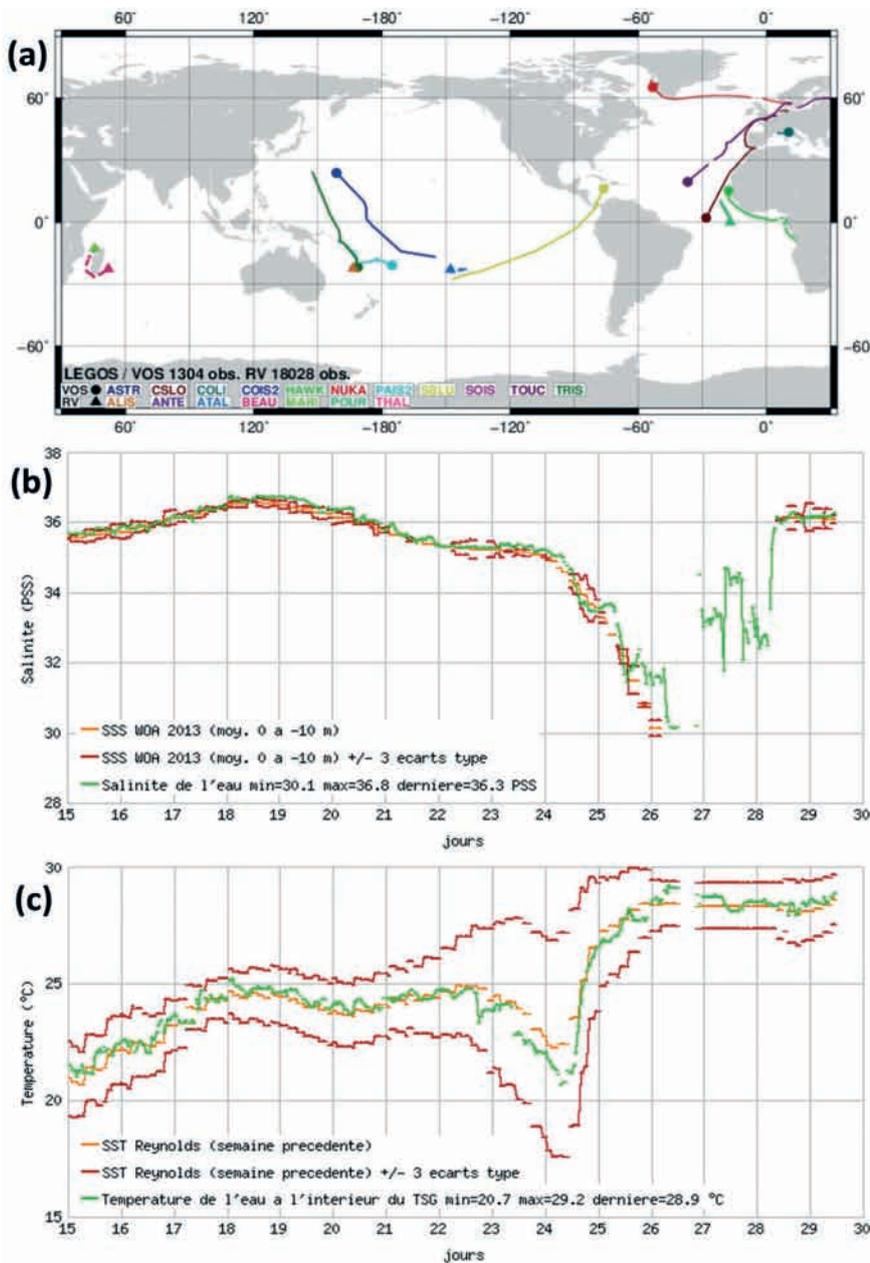


Figure 6. (a) Carte temps réel des trajets des navires équipés d'un thermosalinographe sur la période du 15 au 29 juillet 2019. Les ronds représentent les dernières positions des navires de commerce (VOS pour *Voluntary Observing Ships*), les triangles celles des navires de recherche hauturiers (RV pour *Research Vessels*). Les abréviations des noms des navires et couleurs associées sont indiquées en bas de la carte, mise à jour chaque heure en fonction des nouvelles données reçues. (b) SSS et (c) SST mesurées (vert) par le navire *Seatrade Blue* (en jaune sur la carte) sur la même période, comparées aux valeurs moyennes (orange) de SSS de la climatologie mensuelle WOA (Zweng *et al.*, 2013) et du produit hebdomadaire OISST (Reynolds *et al.*, 2002)  $\pm$  3 écarts types (rouge). La période du 26 au 28 juillet correspond au passage du canal de Panama, où la climatologie WOA n'est pas définie.

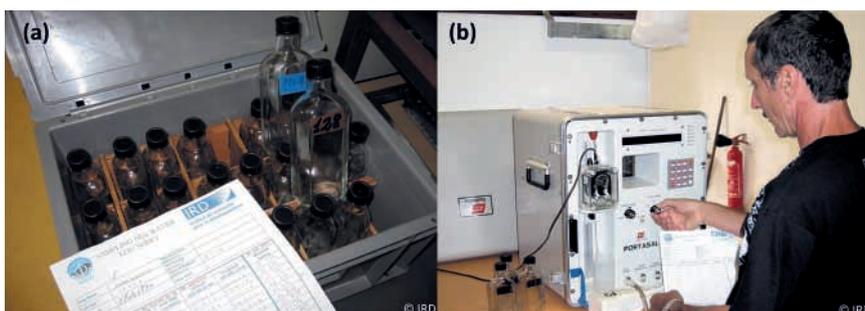


Figure 7. (a) Caisse de flacons étiquetés et fiche utilisés pour les prélèvements d'eau de mer à bord des navires. (b) Analyse des prélèvements à l'aide d'un salinomètre, instrument de référence pour la mesure de la salinité (voir encadré).

### La mesure de la salinité

La salinité est définie comme la concentration de sel dissous dans l'eau de mer. Ce sel est composé d'un mélange d'ions dont les proportions sont quasiment constantes partout dans l'océan, constitué à 85 % de chlorure (Cl<sup>-</sup>) et sodium (Na<sup>+</sup>). En pratique, la salinité d'un prélèvement d'eau de mer est mesurée en laboratoire à partir de sa conductivité électrique à l'aide d'un salinomètre (figure 7b). Cette conductivité augmente avec la salinité et dépend aussi de la température. La salinité s'exprime soit sans unité, car cette mesure est rapportée à la conductivité d'une eau de mer standard de référence de salinité connue très précisément, soit en PSU (*Practical Salinity Unit*) ou PSS (*Practical Salinity Scale*). Cette salinité pratique diffère très peu de la salinité absolue en g/kg, qui prend en compte les variations régionales dans la composition ionique de l'eau de mer (McDougall *et al.*, 2012).

La mesure de la salinité *in situ* repose sur des capteurs de conductivité et température. Pour obtenir des profils de salinité, ces capteurs sont associés à un capteur de pression et montés sur des sondes CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), mises à l'eau lors de campagnes océanographiques et étalonnées à l'aide de prélèvements, ou sur les flotteurs du réseau global Argo. Ces mêmes capteurs sont utilisés dans les thermosalinographes (figure 7c), alimentés par la prise d'eau de mer d'un navire, pour faire des mesures de salinité continues en surface.

La salinité de surface est aussi la dernière variable océanique mesurée par satellite, avec la mission européenne *Smos* (*Soil Moisture Ocean Salinity*, depuis 2010) et les missions américaines *Aquarius* (2011-2015) et *Smap* (*Soil Moisture Active Passive*, depuis 2015), permettant par ailleurs de mesurer l'humidité des sols. La technique utilise des radiomètres passifs dans le domaine micro-onde, plus précisément la bande L correspondant à la fréquence de 1,4 GHz (Verron et Brasseur, 2017). À cette fréquence, l'émissivité de l'eau de mer est particulièrement sensible à la salinité, mais dépend aussi de la température et de l'état de mer qui doivent être pris en compte dans les algorithmes d'inversion.

Dans les modèles de circulation générale océanique, la salinité n'est pas reliée à la composition ionique de l'eau de mer. Sa distribution spatiale est initialisée à partir d'une climatologie déduite des observations, puis ses variations sont pilotées par l'équation de salinité qui prend en compte les échanges d'eau douce (précipitation et évaporation) avec l'atmosphère, les apports fluviaux, le transport par les courants, les processus de mélange océanique. La salinité simulée peut être directement comparée aux mesures *in situ*, qui permettent d'évaluer le réalisme des modèles climatiques, notamment en configuration couplée océan-atmosphère (Delcroix *et al.*, 2011).

dédié (figure 8). Dans un premier temps, l'ingénieur responsable de la maintenance des systèmes embarqués attribue des codes qualité à la série temporelle de salinité mesurée par le TSG au cours du voyage (figure 8a). L'évaluation de la qualité des données repose sur leur comparaison à la climatologie, un contrôle du débit dans le TSG, l'éventuelle constatation au port et l'expérience acquise sur le diagnostic de problèmes instrumentaux. Le problème le plus fréquent est l'arrêt ou l'insuffisance de la circulation d'eau dans le TSG, détectable par un réchauffement anormal quand l'instrument est placé en salle des machines, ou plus sûrement par le débit-mètre. Dans un deuxième temps, un chercheur valide les codes qualité appliqués, en s'appuyant sur son expertise scientifique et sa connaissance du milieu, et compare la série temporelle de salinité mesurée par le TSG aux analyses des prélèvements effectués à bord. En effet, au cours d'un voyage de plusieurs mois, on observe généralement une lente dérive (négative) des mesures liée à l'encrassement du TSG, en particulier dans les eaux côtières et panaches fluviaux chargés en sédiment et micro-organismes, ou des sauts dans les mesures lors d'escales dans des ports pollués. Ces mesures

sont donc corrigées de biais ou tendances linéaires estimés à partir des différences entre les données TSG et celles des prélèvements (figure 8b). La dispersion de ces différences sert aussi à estimer une erreur qui est attribuée aux données TSG corrigées (figure 8c). Les données de surface des flotteurs Argo (Ollitrault, 2016) colocalisés aux trajets des navires sont également comparées aux mesures TSG, à titre de vérification. Des statistiques annuelles issues du traitement temps différé incluant la distribution des codes qualité, corrections et erreurs attribuées (figure 8d-f) servent d'indicateur qualité du réseau de mesures.

Les données TSG traitées en temps différé sont disponibles dans un délai de l'ordre d'un an et librement distribuées à la communauté scientifique par une interface web proposant des outils d'extraction spatio-temporelle. Elles sont avant tout destinées à la recherche. Elles sont aussi compilées avec les autres sources de données *in situ* de salinité de surface disponibles (flotteurs Argo, mouillages instrumentés, campagnes océanographiques) sous la forme de produits grillés multi-décennaux couvrant les océans Pacifique et Atlantique, issus d'une interpolation optimale (figure 9 ; Reverdin *et al.*,

2007 ; Delcroix *et al.*, 2011). Ces données et produits intègrent le catalogue du pôle national de données et services pour l'océan Odatis (<https://www.odatis-ocean.fr>).

## Optimisation du traitement temps réel

De nouveaux algorithmes automatiques s'inspirant du traitement temps différé sont en cours de développement pour améliorer le traitement temps réel. Ces algorithmes, se basant sur la comparaison des mesures TSG à la salinité de surface climatologique mensuelle et au produit de température de surface hebdomadaire, produisent des codes qualité temps réel qui sont à plus de 80 % en accord avec ceux attribués en temps différé (figure 10a). Ils produisent aussi des corrections fondées sur la comparaison des mesures TSG aux mesures de salinité de surface des flotteurs Argo colocalisés en temps réel aux trajets des navires. Après restriction aux données déclarées bonnes et correction par ces algorithmes, l'écart entre les données temps réel et les données temps différé est nettement diminué, jusqu'à être divisé par trois ou quatre pour certains navires (figure 10b). Ces algorithmes

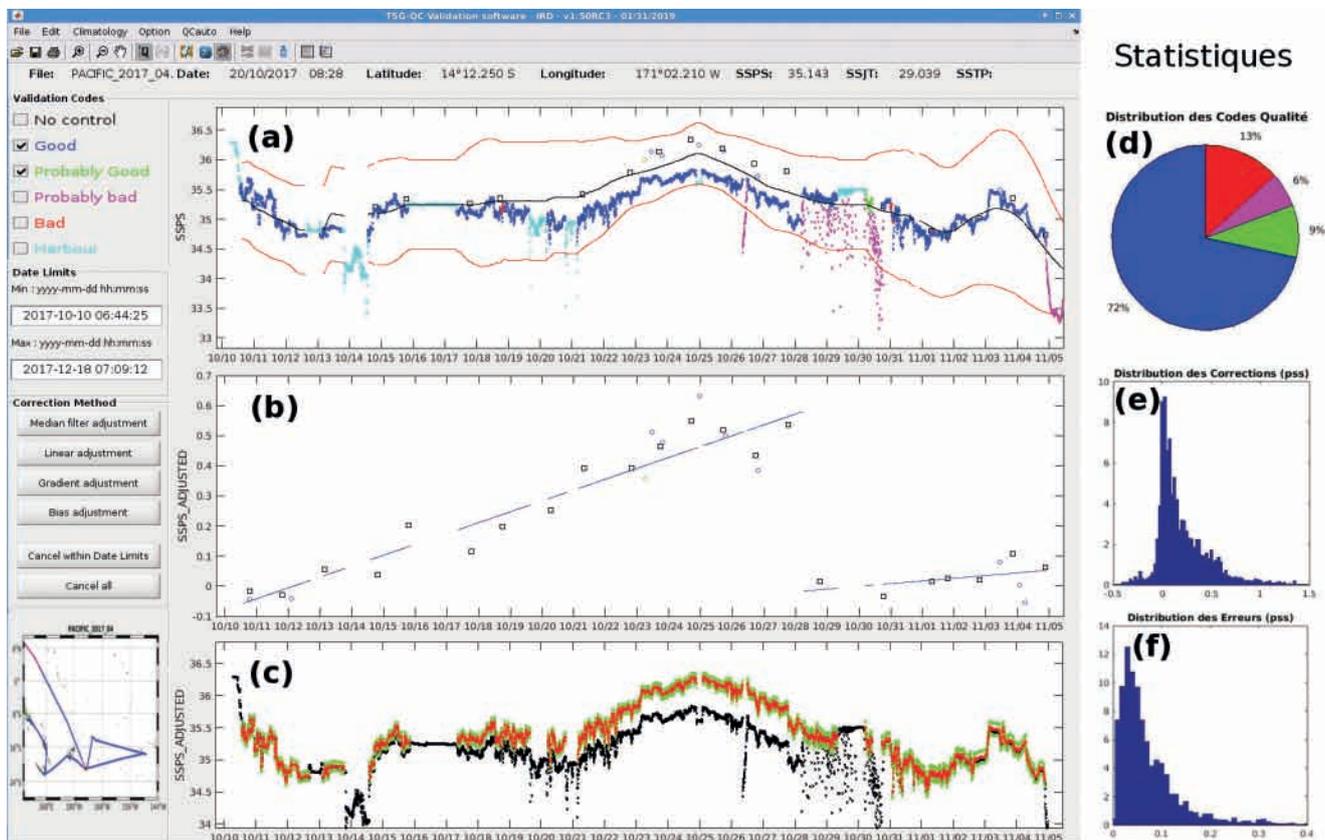


Figure 8. Logiciel de traitement des données TSG temps différé destiné à : (a) leur attribuer des codes qualité (couleurs), (b) les comparer aux données des prélèvements (et des flotteurs Argo) et déduire, des différences observées, des corrections (ici des tendances linéaires) et (c) des erreurs (noir : série brute ; rouge : série corrigée ; vert : erreur). Statistiques : (d) codes qualité, (e) corrections et (f) erreurs attribuées sur la période 2006-2017.

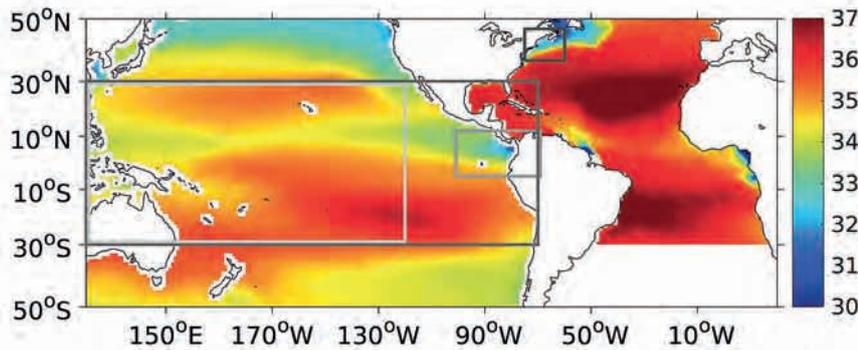


Figure 9. Carte moyenne de la salinité de surface de la mer issue des produits grillés Atlantique (1970-2016) et Pacifique (1950-2014) du SNO SSS. La salinité moyenne de l'océan de surface est d'environ 35 PSS, avec des contrastes reflétant le bilan évaporation-précipitation : salinité plus élevée au niveau des gyres subtropicaux où l'évaporation domine, plus faible sous les zones de convergence intertropicales où les précipitations dominent. Les plus faibles salinités se trouvent dans les panaches des grands fleuves tels que l'Amazone et le Congo dans l'Atlantique tropical. La salinité plus élevée dans l'Atlantique que dans le Pacifique est en partie liée à l'influence méditerranéenne et au transport d'eau douce par l'atmosphère de l'Atlantique vers le Pacifique. Les cadres gris correspondent aux régions pour lesquelles quelques applications scientifiques utilisant les données du SNO SSS sont présentées dans cet article.

devraient donc permettre de valoriser ces données et d'étendre leur utilisation, en particulier pour l'assimilation dans les modèles de prévision (Tranchant *et al.*, 2019) et pour la validation en quasi-temps réel des données satellitaires.

## Quelques applications scientifiques

### Étalonnage et validation des mesures satellitaires

Le rôle important de la salinité pour l'océan et le climat a motivé le développement de missions spatiales dédiées, du moins en partie, à sa mesure (voir encadré), qui permettent une couverture spatio-temporelle sans précédent. Les algorithmes permettant d'extraire la salinité de cette mesure indirecte ont cependant absolument besoin de données *in situ* collectées dans diverses conditions océaniques pour leur étalonnage. Et ces mesures restent indispensables pour valider les estimations de salinité obtenues par satellite. Les mesures répétées des navires équipés de TSG dans le Pacifique ont ainsi été utilisées conjointement aux données satellitaires pour étudier la formation et la variabilité du maximum de salinité du Pacifique Sud (Hasson *et al.*, 2013) ou la signature en salinité d'Enso (Hasson *et al.*, 2014).

Les flotteurs Argo offrent une couverture homogène et en profondeur de l'océan global, mais leur espacement

en surface n'est que de l'ordre de la centaine de kilomètres. De façon complémentaire, les mesures continues des navires équipés de TSG, plus localisées, ont une résolution horizontale très fine qui peut échantillonner la méso-échelle océanique, présente sous forme de tourbillons, méandres et fronts, d'une grandeur caractéristique de 50 à 500 km. Elles permettent ainsi d'observer de façon détaillée la structure de surface d'un tourbillon détaché du Gulf Stream, qu'Argo n'échantillonne qu'en un point, et de valider après lissage les données de salinité provenant de *Smos* à travers ce tourbillon (figure 11), pour en étudier ensuite la dynamique (Reul *et al.*, 2014). Elles ont aussi permis de valider les données satellitaires au travers des fronts bordant le panache de l'Amazone (Grodsky *et al.*, 2012).

Leur résolution horizontale (d'environ 2 km) étant supérieure à celle des satellites (typiquement de 1/4° soit environ 30 km), elles permettent aussi de quantifier la variabilité aux échelles plus fines que la résolution par satellite, qui explique une partie des différences lorsque l'on compare des données satellitaires et des données *in situ* ponctuelles de type Argo (Boutin *et al.*, 2016). Enfin, les données TSG fournissent des mesures côtières très précieuses pour optimiser les corrections appliquées dans certains produits *Smos*, afin de compenser des biais dus à une perturbation de la mesure par satellite près des continents (Boutin *et al.*, 2018).

## Interactions océan-atmosphère-continent régionales

La région du Pacifique Est située au large du Panama présente à la fois les plus faibles valeurs moyennes et les plus larges variations saisonnières de salinité de surface du Pacifique tropical. Pour comprendre l'origine de cette dynamique remarquable, les mesures répétées de salinité collectées pendant plus de 20 ans par les navires empruntant le canal reliant océans Pacifique et Atlantique (figure 12a) ont permis de construire une climatologie mensuelle qui a été comparée à celle d'autres paramètres : pluie, vents, courants, niveau de la mer. L'analyse révèle que la dynamique saisonnière de la salinité de surface est ici liée à de fortes interactions régionales entre océan, atmosphère et continent et que la salinité pourrait jouer un rôle actif sur le climat régional (Alory *et al.*, 2012).

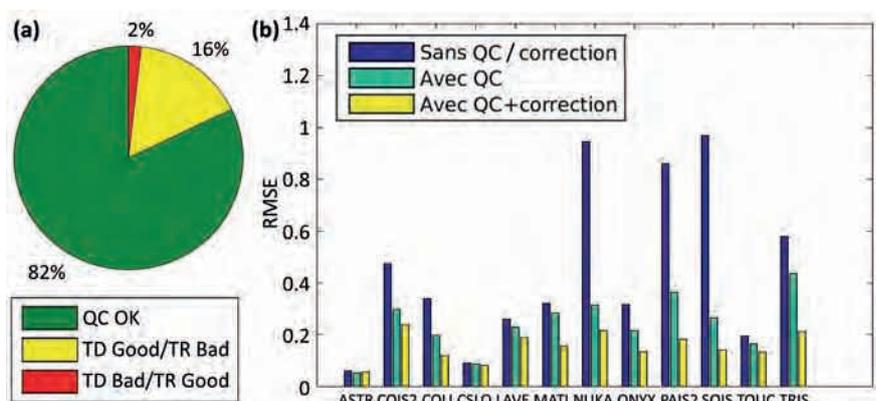


Figure 10. (a) Comparaison entre codes qualité (QC) temps réel (TR) et temps différé (TD), où l'on cherche à maximiser les codes identiques (vert) et minimiser ceux mauvais en TD et bons en TR (rouge), en se basant sur une climatologie issue de la réanalyse Mercator GLORYS12V1. (b) Écart (RMSE) entre données TD et TR, que l'on cherche à minimiser, pour chaque navire et selon le niveau de traitement TR (sans QC/correction : toutes données TR non traitées ; avec QC : données TR évaluées bonnes uniquement ; avec QC + correction : données TR évaluées bonnes et corrigées).

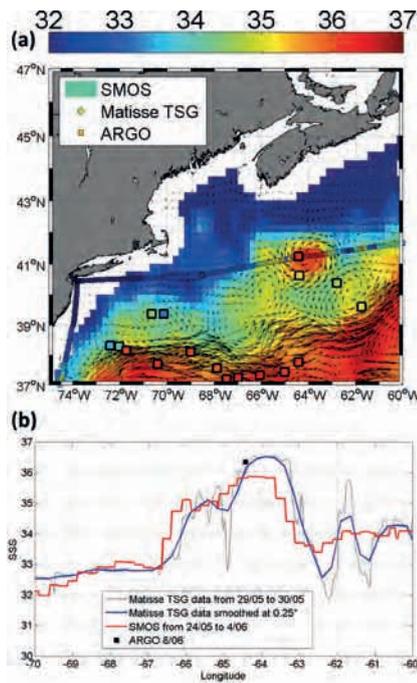


Figure 11. (a) Carte de salinité de surface issue du satellite *Smos* et courants de surface Oscar (Bonjean et Lagerloef, 2002), trajet du navire *Matisse* et positions des flotteurs Argo, dans la région du Gulf Stream lors du détachement d'un tourbillon fin mai 2012. (b) Évolution de la salinité à travers le tourbillon vue par les données *Smos*, TSG et Argo. Extrait de Reul *et al.* (2014).

Le minimum de salinité apparaît à l'automne, suite aux fortes pluies d'été générées par la rencontre des vents marins du sud-ouest chargés d'humidité avec les montagnes côtières et au ruissellement des eaux sur leurs pentes. Ces vents connus localement sous le nom de *Chocó Jet* font de la côte Pacifique colombienne l'une des régions les plus pluvieuses du monde (> 10 m/ans ; Poveda et Mesa, 2000).

Le minimum de salinité reste ensuite piégé près de la côte par les courants marins, notamment le contre-courant nord-équatorial, et est délimité par un front très intense. En hiver, la zone de convergence intertropicale se déplace vers le sud et les vents s'inversent. Venant de la mer des Caraïbes, ils s'assèchent en passant au-dessus de la cordillère d'Amérique centrale et accélèrent au passage de quelques brèches à travers ces montagnes, formant des *gap winds* (Xie *et al.*, 2005). L'un d'eux souffle au nord de la baie de Panama, crée des courants qui tirent alors vers l'ouest le minimum de salinité et génère un tourbillon cyclonique dans la baie de Panama, avec en son cœur une remontée d'eau profonde et salée qui atténue et fait finalement disparaître au printemps le minimum de salinité.

Dans cette région, les données du satellite *Smos*, dont seule une année de mesure était disponible au moment de l'étude, se comparent relativement bien aux données collectées par les navires et détectent les structures méso-échelle échantillonnées par les navires (figure 12b). Surtout, elles les complètent par leur couverture spatio-temporelle plus régulière qui permet de cartographier en continu cette zone de minimum de salinité, en dehors de la bande côtière. Ces travaux révélant la forte dynamique du minimum de salinité dans le Pacifique Est tropical ont contribué au choix d'y mener en 2016-2017 la deuxième campagne de mesure du projet Spurs (Salinity Processes in the Upper-ocean Regional Study) de la Nasa, par contraste avec la première menée en 2012-2013 dans le maximum

de salinité de l'Atlantique Nord (Lindstrom *et al.*, 2015, 2019). Une étude plus récente analyse la variabilité interannuelle de ces structures (Guimbard *et al.*, 2017).

## Observation et modélisation d'Enso

Les produits grillés du SNO SSS (figure 9) combinent les points forts des différentes observations *in situ* : l'extension multidécennale des séries de mesures répétées à partir des navires, le suivi continu de la bande équatoriale par les mouillages, la couverture homogène plus récemment permise par les flotteurs Argo. Ils permettent d'étudier l'impact des grands modes de variabilité interannuelle tropicaux sur la salinité. La signature caractéristique d'Enso a ainsi pu être analysée sur la période 1950-2008 (figure 13a ; Delcroix *et al.*, 2011). Elle se concentre principalement à l'ouest du bassin et est maximale 5 mois après le pic de température, observé généralement en décembre à l'est du bassin. Pendant El Niño, les pluies associées à la zone de convergence du Pacifique Sud se rapprochent de l'équateur, créant des anomalies positives de salinité de surface centrées sur les îles Fidji. Dans le même temps, la zone des eaux chaudes et peu salées du Pacifique Ouest s'étend vers l'est sous l'effet des courants océaniques (Picaut *et al.*, 1996), entraînant des anomalies négatives de salinité de surface à l'équateur, près de la ligne de changement de date (180° E).

Cette signature d'Enso en salinité a été extraite par la même méthode dans les modèles climatiques participant à la phase 3 du Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), pour tester leur capacité à simuler les interactions océan-atmosphère à l'échelle interannuelle. Les meilleurs des modèles capturent en partie cette signature dans les grandes lignes, malgré des différences notables avec les observations (figure 13b). Les progrès dans la simulation d'Enso, d'une génération de modèles à l'autre, sont limités mais encourageants (Bellenger *et al.*, 2014).

Une analyse complémentaire du jeu d'observations a montré que la salinité présente une signature distincte pour les événements El Niño que l'on dénomme maintenant Pacifique Central ou Pacifique Est, selon la région où se manifeste le réchauffement océanique (Singh *et al.*, 2011). Plus récemment, le produit grillé atlantique du SNO SSS a

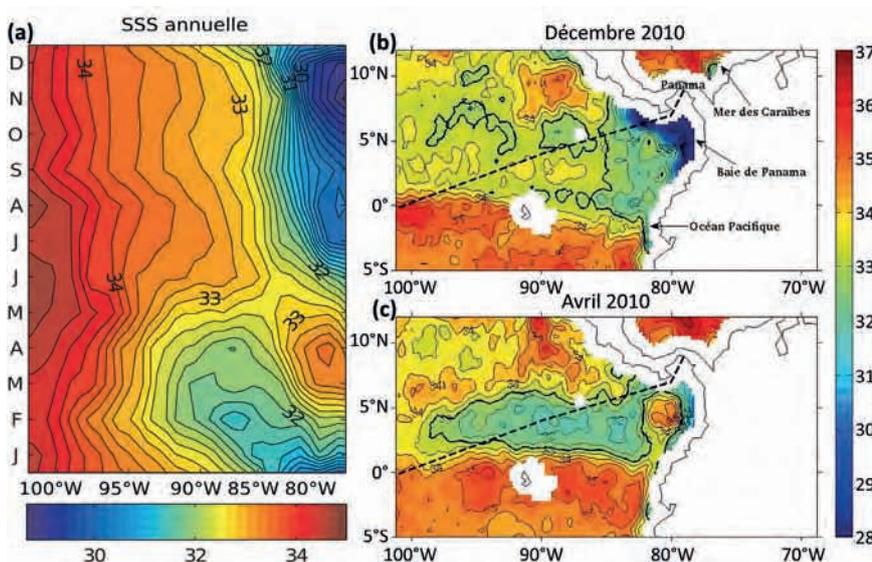


Figure 12. (a) Cycle saisonnier moyen de la salinité de surface de la mer d'après les données TSG collectées le long du trajet des navires passant par le canal de Panama. (b-c) Cartes de salinité de surface de la mer moyennes d'avril et décembre issues de la première année de mesure du satellite *Smos*, et trajet des navires (ligne pointillée). Adapté d'Alory *et al.* (2012).

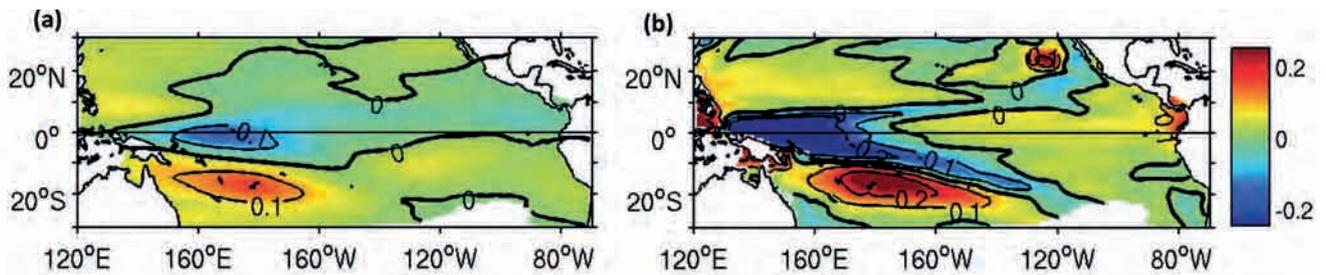


Figure 13. Signature en salinité de surface du phénomène El Niño dans le Pacifique tropical, d'après : (a) les observations *in situ* du produit grillé du SNO SSS et (b) l'un des meilleurs modèles climatiques du CMIP3. Cette signature est extraite par filtrage interannuel (filtre de Hanning de demi-largeur 12 mois) de la salinité de surface, puis régression linéaire de celle-ci sur la température de surface de la boîte NINO3.4 (5° S-5° N, 170° W-120° W) filtrée de la même façon et retardée de 5 mois. Ce retard de 5 mois correspond à la corrélation maximale entre le premier mode interannuel (issu d'une décomposition en fonctions empiriques orthogonales) de la salinité de surface et celui de la température de surface. Adapté de Delcroix *et al.* (2011).

été utilisé pour mettre en évidence la signature en salinité des deux modes de variabilité interannuelle (équatorial et méridien) de l'Atlantique tropical, qui peuvent moduler la mousson ouest-africaine (Awo *et al.*, 2018).

### Évolution climatique et cycle de l'eau

Les séries longues de salinité de surface sont d'un intérêt climatique majeur. À défaut de données de pluie et évaporation en nombre et précision équivalente au-dessus de l'océan, elles permettent un suivi indirect du cycle de l'eau sur plusieurs décennies. L'analyse des tendances en salinité dans le Pacifique tropical, reposant essentiellement sur les données du SNO SSS, a ainsi été reliée à l'évolution attendue du cycle de l'eau sous l'effet du changement climatique (figure 14a ; Cravatte *et al.*, 2009). La salinité a significativement baissé sur une grande partie du Pacifique Ouest au cours des dernières décennies. Elle a par contre augmenté dans la partie ouest de la mer de Corail, au large de l'Australie, et autour des îles Hawaii.

La loi thermodynamique de Clausius-Clapeyron prévoit une intensification du cycle de l'eau qui se traduirait, si l'on suppose la circulation atmosphérique stable, par une augmentation locale du bilan évaporation-précipitation d'environ 6 % par degré de réchauffement (Held et Soden, 2006). À partir du bilan évaporation-précipitation moyen et des tendances observées en température de surface, les tendances dans les échanges d'eau océan-atmosphère ont ainsi pu être estimées, puis traduites en termes de salinité dans la couche de mélange océanique (figure 14b). Les températures étant généralement à la hausse, le résultat suggère une baisse de salinité sous les zones de convergence intertropicale et du Pacifique Sud, et une augmentation maximale vers le centre des gyres subtropicaux. Si l'on imagine la redistribution de ces effets locaux par les courants moyens, alors l'accord qualitatif avec les tendances de salinité observées confirme, au premier ordre, la théorie thermodynamique. Les tendances théoriques sont toutefois jusqu'à deux fois plus fortes qu'observées pour les raisons suivantes : d'abord leur atténuation par le mélange océanique vertical n'est ici pas pris en compte,

ensuite d'autres analyses des tendances observées en salinité en profondeur suggèrent que l'amplification du cycle de l'eau ne serait en fait que d'environ 3 % par degré de réchauffement (Skiriris *et al.*, 2016). L'étude des tendances observées en salinité de surface a aussi été étendue à l'océan Atlantique, en s'aidant de modèles climatiques pour les interpréter (Terray *et al.*, 2012). Les résultats montrent que le contraste de salinité entre le Pacifique et l'Atlantique se renforce. L'influence anthropique est détectable dans la baisse de salinité décrite dans le Pacifique Ouest, et une augmentation de celle-ci dans l'Atlantique Nord subtropical, qui sont amenées à se renforcer dans le futur.

### Conclusion

Initiées il y a 50 ans par des chercheurs français dans le Pacifique tropical, les mesures océanographiques à partir de navires de commerce restent aujourd'hui très pertinentes, notamment pour l'étude des grands modes climatiques et du réchauffement global.

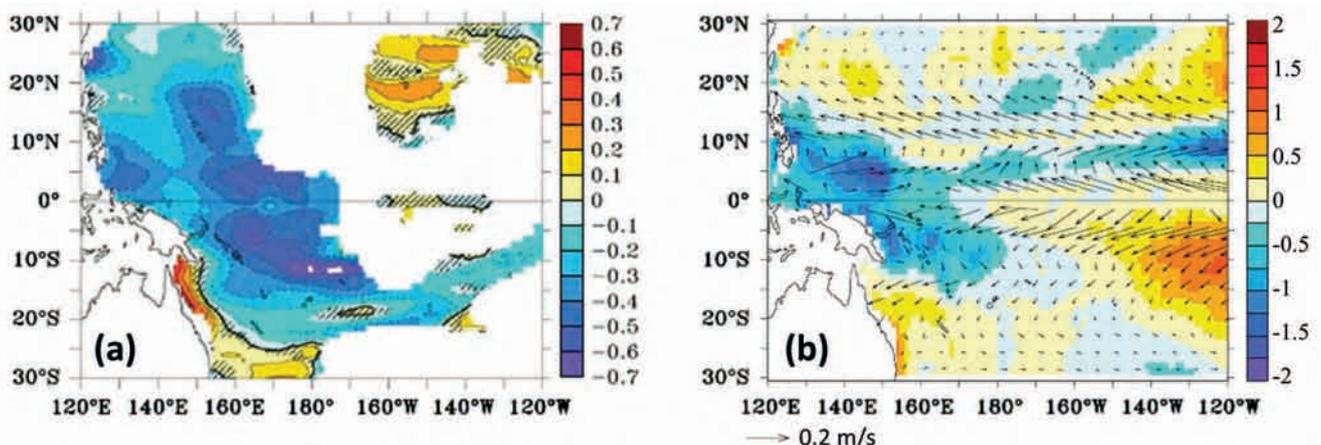


Figure 14. Tendances en salinité de surface dans le Pacifique tropical : (a) observées par le SNO SSS sur la période 1955-2003, comparées à (b) la prévision thermodynamique de ces tendances d'après la loi de Clausius-Clapeyron, superposées par les courants de surface moyens qui peuvent les redistribuer. Noter les différentes échelles de couleurs. Les tendances n'ont pu être estimées dans les zones en blanc en l'absence de données suffisantes et ne sont pas significatives à 90 % dans les zones hachurées. Adapté de Cravatte *et al.* (2009).

Elles permettent des mesures globales et répétées, à fine résolution spatiale, à bien moindre coût que celles des navires de recherche, et sont complémentaires d'autres réseaux de mesures *in situ* tels qu'Argo.

Dans la lignée de ces océanographes visionnaires, le SNO SSS collecte, traite et distribue les données issues d'un réseau actuel d'une douzaine de navires équipés d'instruments automatiques, reçues et traitées en temps réel pour l'océanographie opérationnelle, en temps différé pour la recherche. Les études scientifiques s'appuyant sur ces données de salinité couvrent la dynamique océanique et les interactions océan-atmosphère dans une large gamme d'échelles spatio-temporelles, la validation des modèles et celle des récentes mesures par satellite, qu'elles ont contribué à motiver et pour lesquelles les mesures *in situ* restent indispensables. Les méthodes de traitement de données définies par le SNO SSS ont été adoptées pour les mesures par thermosalinographes des navires de recherche français (Gaillard *et al.*,

2015) et des voiliers (Reverdin *et al.*, 2020). Ces mesures sur les navires de recherche viennent d'intégrer le périmètre du SNO SSS, dans le cadre de sa récente re-labellisation, qui devrait assurer une continuité des mesures primordiales pour le suivi du changement climatique.

Un effort mondial de réflexion sur l'avenir des observations océaniques vient d'être mené dans le cadre de la conférence décennale OceanObs'19. Concernant les mesures de surface par navires, outre la maintenance impérative des mesures actuelles, les recommandations majeures sont de renforcer la coordination internationale et d'étendre les observations multi-paramètres (Smith *et al.*, 2019). En dehors de la température et de la salinité, trois navires du SNO SSS mesurent les flux de CO<sub>2</sub> océan-atmosphère, ainsi que quelques autres paramètres biogéochimiques, en collaboration avec des partenaires. Cependant, les paramètres atmosphériques de base (pression, température de l'air, humidité, vent) ne sont pas

systematiquement collectés à haute résolution. Au niveau national, une meilleure coordination dans ce domaine avec Météo-France est sans doute envisageable.

## Remerciements

Nous remercions les différentes personnes ayant contribué au bon fonctionnement du réseau au fil du temps, notamment J. Aucan., S. Cravatte, A. Dessier, L. Foucher, F. Gaillard, F. Gallois, C. Hénin, N. Lefèvre, C. Maes, Y. Montel, J.-Y. Panché, C. Peignon, L. Petit de La Villéon, T. Reynaud. Nous remercions aussi les nombreuses compagnies maritimes, leurs officiers et équipages de toutes nationalités, qui ont contribué bénévolement et avec enthousiasme aux observations océaniques aux cours des 50 années passées, et sans qui le SNO SSS ne pourrait exister. La mise en forme de cet article a bénéficié des conseils judicieux de deux relecteurs et de l'éditeur.

## Bibliographie

- Alory G., Maes C., Delcroix T., Reul N., Illig S., 2012. Seasonal dynamics of sea surface salinity off Panama: The far Eastern Pacific Fresh Pool. *J. Geophys. Res. Oceans*, 117, C04028. doi: 10.1029/2011JC007802
- Alory G., Delcroix T., Téchiné P., Diverrès D., Varillon D., Cravatte S., Gouriou Y., Grelet J., Jacquin S., Kestenare E., Maes C., Morrow R., Perrier J., Reverdin G., Roubaud F., 2015. The French contribution to the Voluntary Observing Ships network of Sea Surface Salinity. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 105, 1-18. doi: 10.1016/j.dsr.2015.08.005
- Awo F.M., Alory G., Da-Allada C.Y., Delcroix T., Jouanno J., Kestenare E., Baloitcha E., 2018. Sea surface salinity signature of the tropical Atlantic interannual climatic modes. *J. Geophys. Res. Oceans*, 123, 7420-7437. doi: 10.1029/2018JC013837
- Bellenger H., Guilyardi E., Leloup J., Lengaigne M., Vialard J., 2014. ENSO representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5. *Clim. Dyn.*, 42, 1999-2018. doi: 10.1007/s00382-013-1783-z
- Berrit G.R., 1962. Contribution à la connaissance des variations saisonnières dans le golfe de Guinée : observations de surface le long des lignes de navigation. Pointe-Noire : Orstom, 33 p. multigr. Disponible à l'adresse : [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers10-10/32509.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-10/32509.pdf)
- Bonjean F., Lagerloef G.S., 2002. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 2938-2954. doi: 10.1175/1520-0485(2002)032<2938:DMAAOT>2.0.CO;2
- Boutin J., Chao Y., Asher W.E., Delcroix T., Drucker R., Drushka K., Kolodziejczyk N., Lee T., Reul N., Reverdin G., Schanze J., Soloviev A., Yu L., Anderson J., Brucker L., Dinnat E., Santos-Garcia A., Jones W.L., Maes C., Meissner T., Tang W., Vinogradova N., Ward B., 2016. Satellite and in situ salinity: understanding near-surface stratification and subfootprint variability. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 97, 1391-1407. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00032.1
- Boutin J., Vergely J.L., Marchand S., D'Amico F., Hasson A., Kolodziejczyk N., Reul N., Reverdin G., Vialard J., 2018. New SMOS sea surface salinity with reduced systematic errors and improved variability. *Remote Sens. Environ.*, 214, 115-134. doi: 10.1016/j.rse.2018.05.022
- Cravatte S., Delcroix T., Zhang D., McPhaden M., Leloup J., 2009. Observed freshening and warming of the western Pacific warm pool. *Clim. Dyn.*, 33, 565-589. doi: 10.1007/s00382-009-0526-7
- Dadou I., Sanial V., Guerreiro K., Bachèlery M.-L., Chastanet S., Alory G., Somot S., 2016. Reproduire la circulation thermohaline à échelle réduite et comprendre son rôle dans le climat. *La Météorologie*, 93, 15-22.
- Dandonneau Y., 1992. Surface chlorophyll concentration in the tropical Pacific Ocean: An analysis of data collected by merchant ships from 1978 to 1989. *J. Geophys. Res. Oceans*, 97, 3581-3591. doi: 10.1029/91JC02848
- Delcroix T., Henin C., 1991. Seasonal and interannual variations of sea surface salinity in the tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res. Oceans*, 96, 22135-22150. doi: 10.1029/91JC02124
- Delcroix T. *et al.*, 2010. Monitoring SSS in the Global Ocean from ships of opportunity: the French SSS Observation Service. In: Hall J., Harrison D.E., Stammer D. (Eds). Proceedings of the OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Conference (Annexe), 21-25, September 2009. Venice, Italy. ESA Publications, WPP-306.
- Delcroix T., Alory G., Cravatte S., Corrège T., McPhaden M., 2011. A gridded sea surface salinity data set for the tropical Pacific with sample applications (1950-2008). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58, 38-48. doi: 10.1016/j.dsr.2010.11.002
- Dessier A., Donguy J.-R., 1994. The sea surface salinity in the tropical Atlantic between 10°S and 30°N—Seasonal and interannual variations (1977–1989). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 41, 81-100. doi: 10.1016/0967-0637(94)90027-2

- Donguy J.-R., 1999. Quand les marins de commerce se font chercheurs. *Chasse-Marée*, 128, 2-11. Disponible à l'adresse : [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_7/b\\_fdi\\_51-52/010019799.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_51-52/010019799.pdf)
- Donguy J.-R., Hénin C., 1976. Anomalous navifacial salinities in the tropical Pacific Ocean. *J. Marine Res.*, 34, 355-364.
- Fieue M., Levy C., 1983. Seasonal observations in the Western Indian Ocean. In: *Hydrodynamics of the equatorial ocean*, J.C.J. Nihoul (Ed.). Amsterdam, Elsevier, Elsevier oceanography series, 36, 17-29. doi: 10.1016/S0422-9894(08)70625-1
- Gaillard F., Diverres D., Jacquin S., Gouriou Y., Grelet J., Le Menn M., Reverdin G., 2015. Sea surface temperature and salinity from French research vessels, 2001-2013. *Scientific Data*, 2, 150054. doi: 10.1038/sdata.2015.54
- GCOS-WMO, 2016. The global observing system for climate: Implementation needs. Reference Number GCOS-200, 315.
- Grodsky S.A., Reul N., Lagerloef G., Reverdin G., Carton J.A., Chapron B., Quilfen Y., Kudryavtsev V.N., Kao H.-Y., 2012. Haline hurricane wake in the Amazon/Orinoco plume: Aquarius/SACD and SMOS observations. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20603. doi: 10.1029/2012GL053335
- Guilyardi E., 2001. Quand le sel de l'océan pimente le climat. *La Météorologie*, 33, 34-44.
- Guimard S., Reul N., Chapron B., Umbert M., Maes C., 2017. Seasonal and interannual variability of the Eastern Tropical Pacific Fresh Pool. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 1749-1771. doi: 10.1002/2016JC012130
- Hasson A., Delcroix T., Boutin J., 2013. Formation and variability of the South Pacific Sea Surface Salinity maximum in recent decades. *J. Geophys. Res.*, 118, 1-8. doi:10.1002/jgrc.20367
- Hasson A., Delcroix T., Boutin J., Dussin R., Ballabrera-Poy J., 2014. Analyzing the 2010-2011 La Niña signature in the tropical Pacific sea surface salinity using in situ data, SMOS observations, and a numerical simulation. *J. Geophys. Res.*, 119, 3855-3867. doi: 10.1002/2013JC009388
- Held I.M., Soden B.J., 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Clim.*, 19, 5686-5699. doi: 10.1175/JCLI3990.1
- Héning C., Grelet J., 1996. A merchant ship thermo-salinograph network in the Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 43(11-12), 1833-1855. doi: 10.1016/S0967-0637(96)00084-2
- Lindstrom E., Bryan F., Schmitt R., 2015. SPURS: Salinity Processes in the Upper-ocean Regional Study: The North Atlantic Experiment. *Oceanography*, 28, 14-19. doi: 10.5670/oceanog.2015.01
- Lindstrom E.J., Edson J.B., Schanze J.J., Shcherbina A.Y., 2019. SPURS-2: Salinity Processes in the Upper-ocean Regional Study 2. The eastern equatorial Pacific experiment. *Oceanography*, 32, 15-19. doi: 10.5670/oceanog.2019.207
- Maes C., Picaut J., Belamari S., 2002. Salinity barrier layer and onset of El Niño in a Pacific coupled model. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 59-1. doi: 10.1029/2002GL016029
- McDougall T.J., Jackett D.R., Millero F.J., Pawlowicz R., Barker P.M., 2012. A global algorithm for estimating Absolute Salinity. *Ocean Science*, 8, 1123-1134. doi: 10.5194/os-8-1123-2012
- Morrow R., Kestenare E., 2017. Surveillance de l'Océan Austral. Rapport d'activité IPEV 2016, 44-51. Disponible à l'adresse : <http://www.legos.obs-mip.fr/actualites/actu-grand-public/V3RMorrowRA20162017IPEVProgrammeScience.pdf>
- Ollivault M., 2016. Les flotteurs Argo et la circulation générale océanique. *La Météorologie*, 94, 35-44.
- Picaut J., Ioualalen M., Menkès C., Delcroix T., McPhaden M.J., 1996. Mechanism of the zonal displacements of the Pacific warm pool: Implications for ENSO. *Science*, 274, 1486-1489. doi: 10.1126/science.274.5292.1486
- Poveda G., Mesa O.J., 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1675-1678. doi: 10.1029/1999GL006091
- Reul N., Chapron B., Lee T., Donlon C., Boutin J., Alory G., 2014. Sea surface salinity structure of the meandering Gulf Stream revealed by SMOS sensor. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3141-3148. doi: 10.1002/2014GL059215
- Reverdin G., Kestenare E., Frankignoul C., Delcroix T., 2007. Surface salinity in the Atlantic Ocean (30° S-50° N). *Progress in Oceanography*, 73, 311-340. doi: 10.1016/j.pocan.2006.11.004
- Reverdin G., Metzl N., Poli P., Reynaud T., Gribval Y., 2020. Le voilier *OceanScientific Explorer Boogaloo* – Une campagne péri-antarctique en 2017. *La Météorologie*, 109, 40-47.
- Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W., 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Clim.*, 15, 1609-1625. doi:10.1175/1520-0442(2002)015%3C1609:AIISAS%3E2.0.CO;2
- Roux F., Bergametti G., Hamelin B., 2003. Les ORE, nouveaux observatoires de recherche sur l'environnement. *La Météorologie*, 40, 101-107.
- Saint-Lu M., Leloup J., 2016. Petit précis de théorie pour comprendre El Niño. *La Météorologie*, 95, 30-38.
- Schmitt R.W., 2008. Salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 21, 12-19. <https://www.jstor.org/stable/24860148>
- Singh A., Delcroix T., Cravatte S., 2011. Contrasting the flavors of El Niño-Southern Oscillation using sea surface salinity observations. *J. Geophys. Res. Oceans*, 116, C06016. doi: 10.1029/2010JC006862
- Skliris N., Zika J.D., Nurser G., Josey S.A., Marsh R., 2016. Global water cycle amplifying at less than the Clausius-Clapeyron rate. *Scientific reports*, 6, 38752. doi: 10.1038/srep38752
- Smith S.R., Alory G., Andersson A., Asher W., Baker A., Berry D.I., Drushka K., Figurskey D., Freeman E., Holthus P., Jickells T., Kleta H., Kent E.C., Kolodziejczyk N., Kramp M., Loh Z., Poli P., Schuster U., Steventon E., Swart S., Tarasova O., Petit de la Villéon L., Vinogradova-Shiffer N., 2019. Ship-based contributions to global ocean, weather, and climate observing systems. *Frontiers in Marine Science*, 6, 434. doi: 10.3389/fmars.2019.00434
- Terray L., Corre L., Cravatte S., Delcroix T., Reverdin G., Ribes A., 2012. Near-surface salinity as nature's rain gauge to detect human influence on the tropical water cycle. *J. Clim.*, 25, 958-977. doi: 10.1175/JCLI-D-10-05025.1
- Tranchant B., Remy E., Greiner E., Legalloudec O., 2019. Data assimilation of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) observations into the Mercator Ocean operational system: focus on the El Niño 2015 event. *Ocean Science*, 15, 543-563. doi: 10.5194/os-15-543-2019
- Verron J., Brasseur P., 2017. Apports de l'observation satellitaire à l'océanographie. *La Météorologie*, 97, 62-69.
- Xie S.P., Xu H., Kessler W.S., Nonaka M., 2005. Air-sea interaction over the eastern Pacific warm pool: Gap winds, thermocline dome, and atmospheric convection. *J. Clim.*, 18, 5-20. doi: 10.1175/JCLI-3249.1
- Zhu J., Huang B., Zhang R.H., Hu Z.Z., Kumar A., Balmaseda M.A., Marx L., Kinter III J.L., 2014. Salinity anomaly as a trigger for ENSO events. *Scientific reports*, 4, 6821. doi: 10.1038/srep06821
- Zweng M.M., Reagan J.R., Antonov J.I., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Johnson D.R., Seidov D., Biddle M.M., 2013. *World Ocean Atlas 2013*, Vol. 2: Salinity. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed., NOAA Atlas NESDIS 74, 39 p.