

Rentrée 2019

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Formulaire demande de financement : ARED - ISblue - ETABLISSEMENTS - ...

pour dépôt sur le serveur <https://theses.u-bretagne.fr/sml> au format PDF

### Identification du projet

**Acronyme du projet** (8 caractères *maximum*) :

VERTIGO (VERTical dynamics of the subpolar Gyre Overturning)

**Intitulé du projet en langue française :**

Dynamique de bord ouest et circulation méridienne verticale dans le Gyre Subpolaire de l'Atlantique Nord

**Intitulé du projet en langue anglaise :**

Western boundary dynamics and overturning circulation in the subpolar North Atlantic

### Domaine d'innovation stratégique (DIS) du projet

**Cocher le DIS prioritaire** au sein duquel le projet de thèse s'intègre.

- DIS 1 : Innovations sociales et citoyennes pour une société ouverte et créative
  - DIS 2 : Chaîne alimentaire durable pour des aliments de qualité
  - DIS 3 : Activités maritimes pour une croissance bleue
  - DIS 4 : Technologies pour la société numérique
  - DIS 5 : Santé et bien-être pour une meilleure qualité de vie
  - DIS 6 : Technologies de pointe pour les applications industrielles
  - DIS 7 : Observation et ingénieries écologique et énergétique au service de l'environnement
- Si aucun DIS ne correspond, cocher « Projet Blanc ».
- « Projet Blanc »

**Préciser le sous-domaine correspondant :** liste en dernière page de ce document

7A. Observation, surveillance et gestion de l'environnement et des écosystèmes et de leurs interactions

### Présentation de l'établissement porteur (bénéficiaire de l'aide régionale)

**Établissement porteur du projet :** Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer)

**École Doctorale :** École Doctorale des Sciences de la mer et du littoral (EDSM)

### Identification du/de la responsable du projet (futur-e directeur-trice de thèse)

**Nom du laboratoire d'accueil :** Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale

**Code du laboratoire (U/UMR/USR/EA/JE/...):** UMR 6523

**Directeur du Laboratoire :** Fabrice Ardhuin

**Nom de l'équipe de recherche :** Océan et Climat

**Nombre HDR dans le laboratoire :** 13

**Nombre de thèses en cours :** 32

**Nombre de post-docs en cours :** 11

**Nom et prénom du directeur de thèse (HDR), porteur du projet :** Herlé Mercier

- **e-mail :** herle.mercier@ifremer.fr

- **Téléphone :** 02 98 22 42 86

- **Publications récentes du directeur-trice de thèse (nb total et 5 références max au cours des 5 dernières années) :**

92 publications dans des revues à Comité de lecture dont :

- Desbruyères, D., H. Mercier, V. Thierry, 2015: On the mechanisms behind decadal heat content changes in the eastern subpolar gyre. *Progress in Oceanography*, 132, 262-272, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2014.02.005>.
- Mercier, H., P. Lherminier, A. Sarafanov, F. Gaillard, N. Daniault, D. Desbruyères, A. Falina, B. Ferron, T. Huck, V. Thierry, 2015: Variability of the meridional overturning circulation at the Greenland-Portugal Ovide section from 1993 to 2010. *Progress in Oceanography*, 132, 250-261, doi:10.1016/j.pocean.2013.11.001.
- Daniault, Nathalie, Herlé Mercier, Pascale Lherminier, Artem Sarafanov, Anastasia Falina, Patricia Zunino Rodriguez, Fiz Fernandez Pérez, Aida F. Rios, Bruno Ferron, Thierry Huck, Virginie Thierry, Sergey Gladyshev, 2016 : The northern North Atlantic Ocean mean circulation in the early 21st century. *Progress in Oceanography*, 146, 142-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2016.06.007>.
- Fiz F. Perez\*, Marcos Fontela\*, Maribel I. García-Ibáñez\*, Herlé Mercier\*, Anton Velo, Pascale Lherminier, Patricia Zunino, Mercedes de la Paz, Fernando Alonso-Pérez, Elisa F. Guallart & Xose A. Padin, 2018 : Meridional overturning circulation conveys fast acidification to the deep Atlantic Ocean. *Nature*, doi : 10.1038/nature25493. \*These authors contributed equally to the article.
- Petit, T., H. Mercier, V. Thierry: First direct estimates of volume and water mass transports across the Reykjanes Ridge. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 123, 6703-6717. <https://doi.org/10.1029/2018JC013999>, 2018.

**- Expériences d'encadrement et co-encadrement de doctorants (passées et en cours)**

(nom des doctorants dirigés et en cours et antérieurement, sur les 6 années passées : sujet, financement, date de soutenance, et situation professionnelle actuelle si connue)

- F. Koskoszka (co-encadrement B. Ferron), thèse en cours sur l'estimation et les mécanismes de génération du mélange vertical dans le gyre subpolaire de l'Atlantique Nord. Thèse soutenue en 2012. Position actuelle : Ingénieur de recherche.
- D. Desbruyères (co-encadrement V. Thierry), thèse sur la variabilité du Courant Nord Atlantique et son lien avec la cellule méridienne de circulation. Thèse Soutenue en 2012. Position actuelle : Chercheur à Ifremer.
- A. Piron (co-encadrant V. Thierry), thèse sur la variabilité de la couche de mélange hivernale et des eaux modales subpolaires à l'échelle du bassin Atlantique Nord sur la période 2002-2012. PhD Soutenu en 2015. Position actuelle : Cadre de recherche à Altran (CDI).
- C. Feucher (co-encadrement avec G. Maze), thèse sur la variabilité de la pycnocline de la gyre subtropicale de l'Atlantique Nord. Thèse soutenue en 2017. Position actuelle, post-doc à l'Université d'Alberta au Canada.
- T. Petit (co-encadrement avec V. Thierry), thèse sur les interactions courant-bathymétrie dans la région de la dorsale de Reykjanes. Thèse soutenue le 15 novembre 2018. Position à venir : post-doc à Duke University, USA.
- K. Lee (co-encadrement avec G. Maze), Impact des régimes de temps sur les événements extrêmes en Atlantique subtropical. Thèse en cours depuis 2017.

**Co-directeur-trice de thèse et co-encadrant scientifique :** Damien Desbruyères

- **Laboratoire de recherche co-encadrant** (nom + code U/UMR/USR/EA/JE/...) Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS) – UMR 6523

- e-mail : damien.desbruyeres@ifremer.fr

- Téléphone : 02 29 00 85 05

## **Présentation du projet (en langue française ou anglaise, 2 à 3 pages)**

### **Résumé du projet (4000 caractères maxi espaces compris) :**

La circulation générale de l'océan joue un rôle majeur dans la régulation du climat terrestre en transportant et séquestrant des propriétés physico-biogéochimiques (chaleur, eau douce, carbone, oxygène) sur de longues échelles spatiales et temporelles. Une composante cruciale mais vulnérable de cette circulation globale est la plongée des eaux de surface en Atlantique Nord prenant part à la circulation méridienne de retournement. Théoriquement, cette plongée doit s'effectuer le long des pentes continentales via des interactions complexes entre l'atmosphère, la circulation océanique de bord ouest, et la dynamique de méso-échelle. Jusqu'à présent étudiées par le biais de modèles numériques et seulement localement validé par l'observation, ces interactions sont désormais quantifiables dans l'océan réel grâce à une quantité et une qualité de données océanographiques adéquates. L'objectif de cette thèse est donc d'étudier la dynamique océanique connectant la surface et les grandes profondeurs le long des marges du gyre subpolaire de l'Atlantique Nord. Il s'agira d'estimer le flux vertical net de volume et sa répartition spatiale dans le bassin, de détailler les équilibres dynamiques sous-jacents, et d'appréhender leurs évolutions futures dans le contexte du changement climatique actuel. L'analyse reposera principalement sur une synergie de jeux de données variés (flotteurs autonomes profileurs, hydrographie, altimétrie, réanalyses atmosphériques) mais sera complétée par l'utilisation de modèles numériques à haute résolution.

### **Présentation détaillée du projet :**

#### **1 - Hypothèse et questions posées, identification des points de blocages scientifiques**

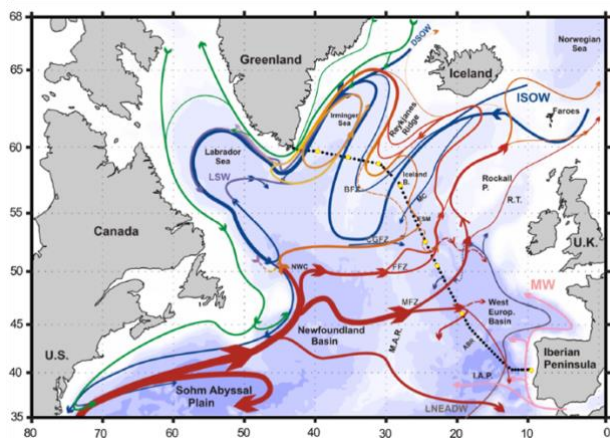
L'équilibre énergétique de la Terre est fortement perturbé par l'augmentation d'origine anthropique de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les océans absorbent 93% de l'excès d'énergie généré par ce déséquilibre (Rhein et al., 2013). Décrire de la dynamique connectant les différents compartiments océaniques est donc indispensable pour aider au diagnostic des changements en cours et leurs potentielles évolutions dans un contexte futur (e.g. adoucissement des eaux de surface par la fonte de la glace de mer et des calottes glaciaires). Dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons à l'Atlantique Nord subpolaire et à sa circulation méridienne de retournement (MOC – pour Meridional Overturning Circulation ; Buckley & Marshall, 2016 ; voir Figure 1). En s'appuyant sur les grands réseaux d'observations de l'océan (Argo, GO-SHIP, altimétrie), nous proposons d'étudier ces maillons dynamiques entre océan de surface et océan profond afin de mieux comprendre leurs vulnérabilités dans le cadre du changement climatique en cours.

La localisation de la plongée nette des eaux de surface a longtemps été associée aux mers de Labrador et d'Irmingier car l'intensité du mélange convectif à l'intérieur de ces bassins, pouvant dépasser 2000 m de profondeur, montre des corrélations importantes avec l'intensité de MOC. Mais le rôle de cette convection profonde « intérieure » dans la plongée nette des eaux de surface est en fait moindre, les descentes d'eau dans les cheminées convectives étant compensées par des remontées d'eau périphériques (Marshall & Schott, 1999). Le « downwelling » serait plutôt confiné le long des marges continentales des bassins convectifs et contrôlé « géostrophiquement » par la modification des propriétés des courants de bord par la turbulence de méso-échelle (Straneo, 2006). La théorie associée a été largement décrite via des modèles idéalisés (Spall, 2008, 2010; Straneo, 2006) et validée par des expériences de laboratoire (Cenedese, 2012). Elle fut récemment revisitée via l'analyse de modèles numériques réalistes qui confirment la présence de vitesses verticales très importantes le long des marges du gyre subpolaire (Katsman et al., 2018). Cependant, la description de cette plongée de bord et des mécanismes associés via l'observation in situ est encore largement incomplète (Pickart & Spall, 2007; Spall & Pickart, 2001). C'est le principal objectif de la thèse présentement proposée.

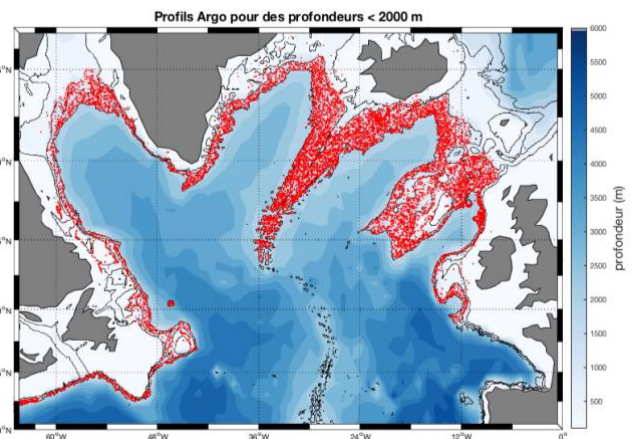
#### **2 - Approche méthodologique et techniques envisagées :**

Une cartographie des propriétés hydrographiques moyennes le long des marges continentales subpolaire sur la période 2000-2020 sera reconstruite. Celle-ci sera principalement dérivée des données Argo (voir Figure 2) et validée localement via les mesures hautes résolution récoltées le long de sections clés (e.g. AR7W, A25-OVIDE, OSNAP). Depuis cette cartographie du bord ouest, une estimation du flux vertical de volume sera calculée, puis décrite et contrastés à celle issue de modèles numériques. Les produits altimétriques constitueront un outil supplémentaire pour étudier les mécanismes impliqués dans ces flux verticaux de volume. Ils seront utilisés pour traquer les tourbillons de mésoéchelles expulsés des

courant de bords vers l'intérieur des bassins. Les flotteurs Argo co-localisées dans ces tourbillons fourniront les anomalies en température et salinité via lesquelles le transport de flottabilité bord-intérieur sera estimée (Dong et al., 2014; Hátún et al., 2007; Qiu & Chen, 2005). Cette contribution tourbillonnaire au refroidissement du courant de bord pourra être comparée à celle déduite des flux locaux à l'interface air-mer issue des réanalyses atmosphériques. Enfin, l'impact du refroidissement « grande échelle » du gyre subpolaire depuis le milieu des années 2000s (Robson et al., 2016) sur l'intensité de la plongée nette de bord ouest pourra être investigué, via l'observation (si le nombre de données le permet) et via l'analyse de modèle numériques haute résolution qui ont atteint un degré de réalisme satisfaisant pour étudier les dynamiques locales des courants de bord et de leur variabilité (Katsman et al., 2018). Les résultats obtenus sur la plongée nette de bord seront complétés par ceux d'une analyse distincte sur la transformation des masses d'eau dans le gyre subpolaire, c'est-à-dire par des estimations du flux diapycnal de volume associé aux échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère (théorie de Walin, 1982). Cette thèse visera donc à accroître notre connaissance de la MOC dans deux systèmes de coordonnées distincts (profondeur et densité) et permettra d'émettre des hypothèses sur leurs évolutions respectives dans le contexte de réchauffement climatique actuel, un problème au coeur des discussions dans la communauté « Atlantique Nord » internationale.



**Figure 1.** La circulation du gyre subpolaire de l'Atlantique Nord. Noter la tendance des grands courants à suivre les pentes continentales des bassins. Cette thèse s'intéresse aux flux verticaux de propriétés dans ces grand courant de bords (traits bleu). Daniault et al (2016)



**Figure 2.** La majorité des profils Argo le long de la pente continental (profondeur < 2000 m).

On peut résumer les trois grands objectifs intermédiaires du sujet comme suit :

- Cartographier les propriétés des courant de bord du gyre subpolaire (température, salinité, densité) et en déduire l'intensité du « downwelling » local connectant les branches haute et basse de la MOC.
- Identifier les mécanismes dynamiques associés à ce « downwelling » (e.g circulation grande échelle, fluxes air-mer locaux, fluxes tourbillonnaires).
- Contraster le « downwelling » de bord avec la transformation des masses d'eau du gyre subpolaire et contextualiser ces mécanismes (e.g. changement naturels et anthropiques).

L'échéancier de la thèse est planifié comme suit :

- Mois 1 à 3 : Bibliographie, prise en main des outils, et travail sur les questions scientifiques à traiter.
- Mois 4 à 15 : Interpolation de données Argo pour une cartographie des propriétés de bord. Comparaison / validation par les données hydrographiques GO-SHIP. Estimation du flux vertical de volume associé et mise en parallèle avec la transformation « totale » des masses d'eau dans le gyre subpolaire.
- Mois 16 à 18 : Rédaction d'une première publication.

- Mois 19 à 30 : Étude des mécanismes contrôlant le flux vertical de volume (e.g flux air-mer, courant moyen, mésoéchelle) via l'analyse combinée de données T/S, altimétriques, et des réanalyses atmosphériques. Etude de la variabilité à partir de simulations numériques.
- Mois 31 à 36 : Rédaction d'une deuxième publication et du manuscrit de thèse.

### 3 - Positionnement et environnement scientifique dans le contexte régional, national et international :

Le sujet de thèse présentement proposée s'inscrit tout d'abord dans le plan stratégique de l'Ifremer, co-financeur du projet, et contribuera donc à « connaître la dynamique océanique pour enrichir le diagnostic du changement global ». Elle adhère également au premier grand axe « Océan et Climat » de l'EUR IsBlue portée par l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM). Le projet de thèse sera réalisé au Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS) du centre de Brest, une unité mixte de recherche (UMR6523 CNRS-Ifremer-IRD-UBO) mondialement reconnu pour la qualité de ses travaux sur la physique de l'océan observé, et leader français sur cette thématique. Cette thèse valorisera les efforts technologiques mis en œuvre par l'institut et ses partenaires privés de la région Bretagne (NKE instrumentation). Elle s'insèrera enfin fortement dans l'environnement des grands systèmes nationaux et internationaux d'observation de l'océan que sont GO-SHIP (campagnes hauturières) et Argo (réseau de flotteurs autonomes), et dans les thématiques climatiques qui leur sont associées (programme international CLIVAR).

### 4 - Pour la région Bretagne: adéquation du projet au regard du DIS de rattachement (et/ou du DIS secondaire).

Le présent projet de thèse est très largement bâti sur l'utilisation d'observations environnementales (océan, atmosphère), et vise à identifier et expliquer le changement récent du climat de l'océan Atlantique Nord, et d'expliquer ses causes et les processus physiques qui le génère. Il s'insère donc pleinement dans le DIS7 et son sous-domaine 7A.

### 5 - Si « projet blanc » (hors DIS), préciser les raisons de ce choix :

### 6 - Si lien avec projet ERC, préciser lequel :

### 7 - Autres informations utiles (CPER, FEDER, concernant la politique régionale) :

### 8 - Le cas échéant, précisez le lien du sujet avec les thèmes ISblue

- la régulation du climat par l'océan
- les interactions entre la Terre et l'océan
- la durabilité des systèmes côtiers
- l'océan vivant et les services écosystémiques
- les systèmes d'observation à long terme

Le cas échéant (si financement ISblue demandé): en regard de la formation par la recherche du futur docteur, perspectives d'insertion professionnelle dans le milieu académique et non académique :

Sur les cinq doctorants formés ces dernières années, deux ont des postes permanents dans le milieu académique, 1 dans le milieu non académique et les deux ayant soutenu leur thèse le plus récemment sont en post-doc au Canada et aux USA. Nous sommes confiants que l'étudiant-e su ce sujet de thèse puisse avoir les mêmes opportunités professionnelles.

### 9 - Contexte scientifique et partenarial : éléments généraux

La science proposée vise à répondre à des interrogations actuelles dans la communauté internationale « climat de l'Atlantique Nord » sur la dynamique de la grande circulation méridienne de retournement (voir par exemple les programmes internationaux « RAPID » et « OSNAP »). Son originalité repose sur la description d'un phénomène clé pour cette circulation – la plongée des eaux de surface – qui a été jusqu'alors principalement décrit théoriquement, observé localement et ponctuellement, et validé par modèles idéalisés.

Par ce sujet, l'étudiant recruté s'intégrera pleinement dans les recherches scientifiques de l'équipe « Océan et Climat » du LOPS, et collaborera avec les nombreux scientifiques travaillant sur l'observation et l'étude de l'Atlantique Nord (Projet OVIDE et RREX, par exemple). Ces collaborations internes viseront aussi bien des aspects méthodologiques et techniques (e.g. interpolation de donnée Argo – expertise « ISAS ») que théoriques (e.g. théorie de la circulation grande échelle). L'étudiant sera également amené à collaborer avec des équipes de recherche internationales et notamment avec les

océanographes physiciens du National Oceanography Center (Southampton, GB) qui s'intéressent à des thématiques similaires via des approches de modélisation numériques lagrangienne. Un séjour de quelques mois au NOCS pourra être envisagé.

10 - Si projet de co-tutelle, internationale, précisez le pays et l'établissement

11 - Financements Région Bretagne acquis par le porteur au cours des 3 dernières années (titre, montant)

Néant

12 - Si projet cofinancé, nom du cofinancier (sollicité et ou acquis)

Ifremer (acquis)

13 - Si cofinancement refusé, autres sources de cofinancement identifiées

### Le - la candidat.e

Profil souhaité du candidat (compétences scientifiques et techniques requises) :

Master 2 en océanographie physique, météorologie dynamique, ou discipline associée. Bonne connaissance en programmation informatique pour l'analyse de données environnementales (Matlab, Python, ...). Bonne maîtrise de l'anglais (écrit et parlé)

### Projet de thèse en cotutelle internationale

**S'agit-il d'un projet de thèse en cotutelle internationale (oui/non) :**

Non

**Si oui, préciser l'établissement pressenti (et le pays de rattachement) :**

**Ce projet de thèse fera-t-il l'objet d'un cofinancement international (oui/non) :**

*(Rémunération du doctorant par l'établissement implanté sur le territoire régional (18 mois sur 36 mois), et l'établissement étranger, qui s'engage également à rémunérer le doctorant dans le cadre de son séjour à l'étranger, soit durant 18 mois -a minima-)*

Non

**En cas de cofinancement international, préciser -si vous en avez connaissance- l'organisation du calendrier des périodes de séjour :**

### Financement du projet de thèse

**Part de l'enveloppe financière régionale affectée au projet :**

Financement Région 100 %

Financement Région 50 % (préconisé)

**En cas de financement à 50 %, le cofinancement est-il déjà identifié (oui/non) :**

Oui

**Si oui, préciser la nature du cofinancement (ANR, partenaire privé, Ademe, etc.) :**

Ifremer

## Bibliographie

- de Boissésou, E., Thierry, V., Mercier, H., Caniaux, G., & Desbruyères, D. (2012). Origin, formation and variability of the Subpolar Mode Water located over the Reykjanes Ridge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C12), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JC007519>
- Buckley, M. W., & Marshall, J. (2016). Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 5–63. <https://doi.org/10.1002/2015RG000493>
- Cenedese, C. (2012). Downwelling in Basins Subject to Buoyancy Loss. *Journal of Physical Oceanography*, 42(11), 1817–1833. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-0114.1>
- Desbruyères, D. G., Purkey, S. G., McDonagh, E. L., Johnson, G. C., & King, B. A. (2016). Deep and abyssal ocean warming from 35 years of repeat hydrography. *Geophysical Research Letters*, 43(19), 10,356–10,365. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>
- Dong, C., McWilliams, J. C., Liu, Y., & Chen, D. (2014). Global heat and salt transports by eddy movement. *Nature Communications*, 5, 1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms4294>
- Hátún, H., Eriksen, C. C., & Rhines, P. B. (2007). Buoyant Eddies Entering the Labrador Sea Observed with Gliders and Altimetry. *Journal of Physical Oceanography*, 37(12), 2838–2854. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3567.1>
- Katsman, C. A., Drijfhout, S. S., Dijkstra, H. A., & Spall, M. A. (2018). Sinking of Dense North Atlantic Waters in a Global Ocean Model: Location and Controls. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 3563–3576. <https://doi.org/10.1029/2017JC013329>
- Marshall, J., & Schott, F. (1999). Open-Ocean Convection ' Theory , and Models Observations ,. *Reviews of Geophysics*, 37(98), 1–64. <https://doi.org/10.1029/98RG02739>
- Pickart, R. S., & Spall, M. A. (2007). Impact of Labrador Sea Convection on the North Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 37(9), 2207–2227. <https://doi.org/10.1175/JPO3178.1>
- Qiu, B., & Chen, S. (2005). Eddy-Induced Heat Transport in the Subtropical North Pacific from Argo, TMI, and Altimetry Measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 35(4), 458–473. <https://doi.org/10.1175/JPO2696.1>
- Rhein, M., Rintoul, S. R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R. A., ... Wang, F. (2013). Observations: Ocean. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, 255–316. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.010>
- Robson, J., Ortega, P., & Sutton, R. (2016). A reversal of climatic trends in the North Atlantic since 2005. *Nature Geoscience*, 9(7), 513–517. <https://doi.org/10.1038/ngeo2727>
- Spall, M. A. (2008). Buoyancy-Forced Downwelling in Boundary Currents. *Journal of Physical Oceanography*, 38(12), 2704–2721. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3993.1>
- Spall, M. A. (2010). Dynamics of Downwelling in an Eddy-Resolving Convective Basin. *Journal of Physical Oceanography*, 40(10), 2341–2347. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4465.1>
- Spall, M. A., & Pickart, R. S. (2001). Where Does Dense Water Sink? A Subpolar Gyre Example\*. *Journal of Physical Oceanography*, 31(3), 810–826. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0810:WDDWSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0810:WDDWSA>2.0.CO;2)
- Straneo, F. (2006). On the Connection between Dense Water Formation, Overturning, and Poleward Heat Transport in a Convective Basin\*. *Journal of Physical Oceanography*, 36(9), 1822–1840. <https://doi.org/10.1175/JPO2932.1>
- Walín, G. (1982). On the relation between sea-surface heat flow and thermal circulation in the ocean. *Tellus*, 34(2), 187–195. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v34i2.10801>

