

Habilitation à diriger des recherches

This manuscript ([permalink](#)) was automatically generated from lesommer/habilitation-recherche@484d9a1 on February 21, 2021.

Auteur

- **Julien Le Sommer**

 [0000-0002-6882-2938](https://orcid.org/0000-0002-6882-2938) ·  [@jlesommer](https://twitter.com/jlesommer) ·  [jlesommer](https://github.com/jlesommer)

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, G-INP, IGE, 38000 Grenoble, France

Résumé

Ce mémoire d'*habilitation à diriger des recherche* porte sur les activités que j'ai menées au sein de l'équipe MEOM depuis mon recrutement au CNRS. Il a pour objet d'illustrer mon travail de direction de recherche sur cette période. On y trouvera en introduction une présentation générale portant sur les modèles de circulation océanique et sur mon approche de travail. Le contenu du mémoire est ensuite divisé en trois parties portant respectivement sur trois séquences de travail qui illustrent ma pratique de la recherche, et discutent certains résultats scientifiques auxquels j'ai pu contribuer. Ces trois illustrations ont respectivement pour objet (i) l'étude de la réponse de l'océan austral à l'intensification des vents, (ii) l'étude des processus d'interaction entre cryosphère et océan dans l'océan austral subpolaire et (iii) l'étude des interactions d'échelles dans l'océan Atlantique Nord. Une dernière section porte sur un bilan de mon activité et les orientations que je souhaite donner à mes travaux au cours des années à venir.

Introduction générale

Dans cette introduction générale, je présente quelques éléments de contexte sur mon domaine d'activité scientifique, sur ma pratique de la recherche ainsi qu'une explication de l'approche que j'ai retenue dans la rédaction de ce mémoire.

La modélisation océanique comme outil et comme objet de recherche

Pour une large part, mes activités de recherche utilisent des données de simulations numériques de la circulation océanique ou contribuent au développement et à l'étude des modèles de circulation océanique. Il apparaît donc incontournable de commencer ce mémoire par une brève description des concepts et des domaines d'application de cet outil essentiel de l'océanographie moderne qu'est devenu la modélisation numérique au cours des dernières décennies.

Les modèles numériques de circulation océanique

La modélisation de la circulation océanique est une branche de la modélisation numérique qui s'attache à représenter de manière quantitative les processus physiques qui gouvernent l'évolution des propriétés physiques de l'océan (température T , salinité S , et courants (u, v, w)). Cette pratique est basée sur l'héritage combiné de la physique (notamment de la mécanique des fluides), des mathématiques appliquées (notamment les méthodes de résolution numérique des équations aux dérivées partielles) et de l'informatique (notamment le domaine du calcul scientifique). Cette pratique a émergé à la fin des années soixante [1,2] et son évolution a suivi depuis lors l'accroissement des capacités de calcul et la densification des réseaux d'observation de l'océan.

Modéliser la circulation océanique demande une bonne compréhension des processus physiques à l'oeuvre dans l'océan. En effet, à la différence de certains écoulements rencontrés dans des contextes expérimentaux ou industriels, la géométrie complexe des bassins océaniques, l'importance de la rotation de la Terre ainsi que la diversité des forcages mécaniques et thermodynamiques de la circulation océanique ont pour conséquence l'émergence de classes de mouvements aux propriétés distinctes et spécifiques, que l'on rassemble sous le terme générique de *processus physiques*.

Si décrire, même de manière superficielle, les principales propriétés de chacune de ces classes de processus dépasse l'ambition de ce mémoire, la Figure 1 donne toutefois un aperçu de la diversité du *zoo* des processus physiques à l'oeuvre dans l'océan. On retiendra que ces processus diffèrent généralement par les classes d'échelles spatiales et temporelles où ils émergent, ainsi que par l'équilibre des forces mécaniques qui les gouvernent. Evidemment, on gardera à l'esprit que cette classification n'est qu'une idéalisation correspondant à des régimes dynamiques qui ne sont réalisés que dans des situations asymptotiques très particulières. En réalité, la circulation océanique est une soupe complexe de mouvements à toutes les échelles échangeant continuellement de l'énergie et de l'information.

La modélisation numérique de la circulation océanique est fondamentalement articulée à la compréhension des processus physiques à l'oeuvre dans l'océan. Cette compréhension des processus est en effet essentielle à la construction des modèles, où l'on veillera à la bonne représentation des processus résolus *explicitement* ou de manière simplifiée via des *paramétrisations*. Symétriquement, les modèles de circulation sont devenus au fil du temps un outil de choix pour comprendre les processus océaniques, leurs interactions et leur impact à grande échelle, notamment dans des applications idéalisées qui permettent de capturer l'essence dynamique de ces processus.



Figure 1: Echelles de temps et d'espace des grandes classes de processus physiques à l'oeuvre dans l'océan (D. Chelton). On y distingue en particulier les processus équilibrés de méso-échelle (50-500km, 15-500j) et de subméso-échelle (1km-50km, 3h-30jours), les processus ondulatoires (10m-100km, 1min-1jour) et les processus turbulents tri-dimensionnels (<50m, <3h)

Les modèles de circulation océaniques les plus avancés sont aujourd'hui en mesure de décrire, dans une même simulation, la circulation océanique de l'échelle globale¹ à l'échelle du kilomètre en représentant de manière explicite des processus de l'échelle de l'heure à la décennie [3,4]. Bien que de telles simulations décrivent une part importante du spectre des échelles de la turbulence océanique, il doit être souligné que ces simulations ne représentent pas explicitement toutes les interactions d'échelle dans l'océan de sorte qu'une part d'entre elles doivent être paramétrisées au moyen de fermetures sous-mailles; selon toute vraisemblance ce sera le cas pour longtemps dans le futur également (voir par exemple [5] pour une discussion quantitative de cet aspect).

Sur un plan plus pratique, les modèles de circulation océanique sont des programmes informatiques qui résolvent de manière approximative un jeu d'équations aux dérivées partielles, dites *équations primitives*, basé sur une simplification des équations de Navier-Stokes. Ces équations sont résolues de manière discrète dans un domaine de géométrie fixée, à partir de conditions initiales fixées et sous la contrainte de conditions limites liées au forçage de la circulation océanique par les milieux environnants. Cette approche est toujours essentiellement basée sur les concepts proposés par Bryan [2,6]. Le lecteur intéressé par les fondements physiques et mathématiques de la formulation des modèles de circulation océanique pourra consulter l'excellente synthèse de [7].

Sur un plan encore plus pratique, les modèles de circulation océanique sont des applications générées à partir de quelques dizaines de milliers à centaines de milliers de lignes de code, généralement rédigés en FORTRAN (plus rarement en C/C++, ou plus récemment en Julia). Ils peuvent être compilés et déployés sur un ordinateur portable ou sur les super-calculateurs CPU les plus avancés. Leur développement est généralement le fruit d'au moins 5 à 10 années de travail de la part

de communautés rassemblant des experts en physique de l'océan, en mathématiques appliquées et en informatique.

Il existe aujourd'hui une dizaine de modèles de circulation océanique (globaux) activement développés. La plupart (sinon tous) sont distribués sous licence logicielle libre et open-source, et leurs modes de développement sont généralement ouverts. Ces codes ont chacun leurs spécificités (choix de discréétisation, type de grille, ...), et leurs domaines d'application de prédilection. Aussi important à mes yeux, ils rassemblent chacun une communauté d'utilisateurs scientifiques, un *écosystème scientifique*, qui contribue ponctuellement à leur développement. L'équipe MEOM de l'IGE à laquelle j'appartiens fait partie depuis plus de 20 ans de l'écosystème des utilisateurs du code NEMO, c'est donc naturellement dans ce cadre que s'est déployée mon activité scientifique.

Les différents usages et pratiques liés à la modélisation numérique de l'océan

Les modèles de circulation océanique sont aujourd'hui utilisés pour trois grands types d'applications. Comme *outils de recherche scientifique*, ils permettent d'améliorer notre compréhension de l'océan et de ces interactions avec les milieux environnants. Intégrés comme *composantes de système de prévision opérationnelle*, ils permettent d'extrapoler les données d'observations et de prédire la circulation sur des échéances de l'ordre d'une semaine. En tant que *composantes des modèles du système Terre* (Earth System Models, ESM), ils contribuent à établir des projections climatiques, comme celles présentées par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les configurations spécifiques de ces modèles (résolutions, paramétrisations) ainsi que les processus qu'ils résolvent varient entre ses différentes applications. Elles diffèrent en particulier par leur résolution spatiale et par l'horizon temporel sur lequel les modèles sont intégrés (voir Table 1).

Table 1: Caractéristiques indicatives des modèles de circulation océanique selon le type d'application.

| | Recherche | Prévision opérationnelle | Projection climatique |
|--|---|--|--|
| Domaine géographique | Régional/Global | Régional/Global | Global |
| Resolution spatiale typique | ~1km | ~10km | ~100km |
| Contexte d'intégration | forcé par l'atmosphère | forcé avec assimilation de données | couplé (ESM) |
| Horizon temporel typique | 1-20 ans | 10 jours | 10-1000 ans |
| Processus (partiellement) résolus | submesoéchelle balancée, interactions onde/vortex | ondes internes, tourbillons de mesoéchelle | gyres océaniques, circulation méridienne globale |
| Processus non-résolus | dynamique non-hydrostatique | submesoéchelle balancée | tourbillons et fronts de mésoscale |

Comme outil de recherche scientifique, les modèles océaniques sont généralement mis en oeuvre pour des simulations forcées par l'atmosphère, et peuvent éventuellement être couplés à d'autre composantes (comme par exemple des modèles de banquise ou de biogéochimie marine). Lorsqu'ils sont mis en oeuvre dans des configurations réalistes, ils servent, en lien avec des observations, à étudier les mécanismes gouvernant la variabilité océanique. Ils offrent alors aux océanographes physiciens des descriptions plausibles de la circulation océanique en quatre dimensions (x, y, z, t) qui sont utilisées pour formuler ou tester des hypothèses quant à la physique sous-jacente. Les

expériences de sensibilité notamment au forçage ou à la résolution, permettent de mieux comprendre ces processus. Cette compréhension peut alors nourrir la formulation de paramétrisations physiques pour des modèles ne résolvant pas explicitement les processus en cause. Les expériences réalisées au moyen de configurations plus idéalisées ou de complexité intermédiaire sont également un complément très utile aux expériences réalistes.

Intégrés comme composantes de systèmes opérationnels, les modèles de circulation permettent d'interpoler dans l'espace ou d'extrapoler dans le temps les données d'observations disponibles, de manière physiquement consistante. Les simulations sont alors généralement forcées par l'atmosphère mais également contraintes par des procédures d'assimilation de données. L'assimilation de données recouvre l'ensemble des méthodes permettant d'établir un compromis entre les contraintes dynamiques exprimées par les modèles et les contraintes liées aux observations, en prenant explicitement en compte les incertitudes inhérentes à chacun de ces deux sources d'information [8]. Ces simulations sont en pratique produites dans des centres opérationnels et servent à prédire la circulation océanique sur de échelles de temps courtes (*forecast*, typiquement à une semaine), ou à reconstruire retrospectivement la circulation sur des échelles de temps plus longues (*réanalyses*, typiquement quelques décennies). La mise en œuvre de ces systèmes requiert des moyens techniques et humains substantiels, comme par exemple ceux déployés en Europe dans le cadre des services marins du programme Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS).

En tant que composantes des modèles du système Terre, les modèles d'océan sont intégrés en parallèle à d'autres modèles, qui chacun représentent une composante fonctionnelle de la machine climatique terrestre (physique et chimie de l'atmosphère, cryosphère continentale, biosphère marine, biosphère continentale, ...). Ces modèles du système Terre sont alors utilisés pour fournir des réalisations scientifiquement plausibles de la trajectoire du système climatique pour les décennies et siècles à venir en réponse à différents scénarios d'évolution des activités humaines. Ces modèles sont systématiquement confrontés aux observations du climat récent (ou à des proxy paléoclimatiques pour des périodes plus anciennes) et leurs réponses aux différents scénarios sont confrontées dans le cadre d'exercices d'intercomparaison de modèles, comme par exemple le Coupled Model Intercomparison project (CMIP). Plus généralement, les modèles du système Terre (complets ou dans des formes simplifiées) sont également utilisés, dans le cadre d'expériences de sensibilité comme outils conceptuels permettant de comprendre la sensibilité et le fonctionnement du système climatique.

Cette classification des applications des modèles de circulation océanique est évidemment assez arbitraire. Il existe en fait un continuum d'applications émergentes à l'interface entre ces catégories arbitraires. Des modèles couplés océan-banquise-atmosphère à plus haute résolution ont ainsi par exemple été développés au court des dernières années dans le but de produire des projections climatiques aux échelle interannuelle à décennale (voir 2). Des systèmes couplés comparables sont également développés dans le contexte de la *prévision saisonnière*. Ces applications émergentes à l'interface entre prévision opérationnelle et projection climatique motivent des développements très actifs dans le domaine de l'assimilation de données pour les modèles couplés [9,10]. Plus généralement, ces nouvelles applications sont rendues possibles par l'adoption du paradigme de la modélisation *seamless*, où les différentes applications des modèles géoscientifiques utilisent les mêmes codes bien qu'elles s'intéressent à des échelles spatiales et des horizons temporels différents [11,12].

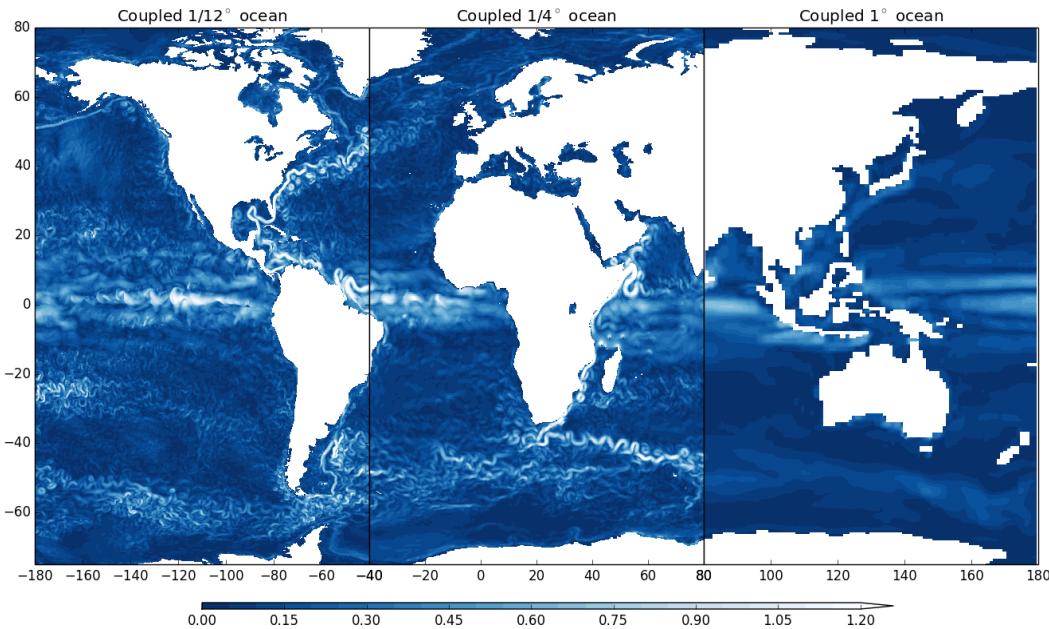


Figure 2: Intensité des courants océaniques de surface dans trois modèles océanique globaux couplés (atmosphère-océan/glace) basés sur NEMO à trois résolutions différentes - (à gauche) 25km-1/12 degrés, (au milieu) 60km-1/4 degrés, (à droite) 130km-1 degrés (crédit : Malcolm Roberts)

Un autre usage important des modèles de circulation océanique qui n'est pas listé ci-dessus est lié au développement des plateformes et des réseaux d'observation de l'océan. Les simulations océaniques servent en effet le développement des futurs réseaux d'observation dans le cadre d'expériences dites *Observing System Simulation Experiments* (OSSEs), qui aident à évaluer l'impact de différents scénarios d'observations sur les systèmes de prédiction [13]. Ces approches sont désormais couramment mises en oeuvre pour optimiser les réseaux de capteurs, comme l'illustrent par exemple les exemples de TPOS [14] et d'AtlantOS [15]. Les données virtuelles fournies par les modèles de circulation peuvent également s'avérer cruciales dans la définition de missions satellites et pour préparer les chaînes de traitement avales avant que les données effectives ne soient disponibles. Ce type d'approches s'est ainsi avéré essentiel dans la préparation de la future mission altimétrique SWOT [16] dont le lancement est prévu en 2022, notamment dans le cadre d'OSSE [17,18].

Il est d'ailleurs important de souligner que, si le développement des modèles s'appuie sur les champs de l'océanographie physique, des mathématiques appliquées et de l'informatique, il est aussi le fruit d'un contexte qui implique les possibilités du calcul haute performance (High Performance Computing, HPC) et les besoins en terme d'application et de capacités observationnelles. On peut noter par exemple que le développement des modèles réalistes décrivant explicitement la méso-échelle océanique est lié à l'émergence de l'altimétrie et aux échelles physiques qu'elle a permis d'observer dès les années 90' (avec les missions TOPEX et ERS-1). De même le développement des modèles résolvant aujourd'hui des échelles kilométriques à l'échelle globale est largement motivé par l'évolution des capacités des calculateurs et des altimètres (notamment avec la mission SWOT). Il faut donc reconnaître l'importance du contexte technologique autant que scientifique dans l'évolution de la modélisation océanique.

Force est également de constater qu'au-delà de la science du développement des modèles en tant que tels, un champ disciplinaire spécifique lié à leur mise en œuvre et à leur configuration s'est structuré au cours des deux dernières décennies. En effet, le développement de configurations de modèles de circulation océanique implique de choisir un nombre important de paramètres et d'options. Le nombre de paramètres, le coût calcul des simulations et le temps humain disponible rendent très délicate l'exploration systématique de l'espace des options disponibles de sorte que les choix sont souvent peu contraints par l'expérience. C'est dans ce contexte que se sont développés des efforts d'intercomparaisons systématiques des modèles et de leurs configurations, comme par exemple les intercomparaisons CORE et OMIP portées successivement le Working Group on Ocean

Model Development (WGOMD) devenu aujourd’hui le CLIVAR Ocean Model development Panel (OMDP).

Ce besoin de coordination et d’échanges scientifiques sur la science de la mise en oeuvre des modèles est également le principal moteur pour des initiatives structurées comme le consortium DRAKKAR, qui rassemble une part importante des utilisateurs du modèle NEMO, ou plus récemment le consortium COSIMA en Australie autour du modèle MOM du GFDL. C’est dans le cadre du consortium DRAKKAR, de ces outils et de ces protocoles, que sont développées une partie importante des activités que je décrirai plus loin dans ce mémoire.

Représentation des interactions d'échelles dans les modèles de circulation océanique

Parce que la circulation océanique est essentiellement turbulente, la représentation des interactions d'échelles est un enjeu crucial pour les modèles de circulation océanique; cette question concentre ainsi une partie importante des efforts de la communauté des modélisateurs. En pratique, cette question peut se poser de deux manières, selon que l'on souhaite représenter des interactions entre des échelles a priori explicitement résolues par le modèle ou non. La bonne représentation des interactions entre échelles explicitement résolues passe généralement par un travail sur les méthodes de discréétisation dans le but de garantir une bonne *précision* numérique, notamment pour l'approximation discrète des termes *non-linéaires* des équations primitives. La représentation des interactions impliquant des échelles non-explicitement résolues par le modèle pose quant à elle un problème classique, dit de *fermeture sous-maille*; ce problème est abordé en formulant des *paramétrisations physiques* qui visent à modéliser de manière simplifiée le résultat net des interactions sur les échelles résolues et non le détail phénoménologique des processus physiques en jeu.

Bien que le terme de *paramétrisation physique* soit un terme de jargon assez spécifique au champ de la modélisation des fluides environnementaux, le problème de la fermeture sous-maille est un problème générique en modélisation numérique des systèmes non-linéaires, notamment en mécanique des fluides. Comme le rappellent Griffies et Treguier (2013) [5], les écoulements océaniques sont turbulents jusqu’aux échelles de 10^{-3} m et 1s de sorte que simuler explicitement toutes les échelles de la circulation océanique demanderait environ 10^{27} points de grilles, ce qui dépasse de très loin la capacité des calculateurs. Les modèles de circulation océanique ont donc pour objet de décrire une version tronquée de la dynamique océanique, valide en *moyenne* pour les échelles que l’on souhaite décrire explicitement. On peut s’en convaincre en repartant des équations primitives qui, de manière schématique, peuvent s’écrire

$$\partial_t \mathbf{u} + \mathcal{L}_u \mathbf{u} + \mathcal{N}_u (\mathbf{u}) = 0 \quad \partial_t b + \mathcal{L}_b \mathbf{b} + \mathcal{N}_b (\mathbf{b}) = 0 \quad (1)$$

où \mathbf{u} , \mathbf{b} désignent respectivement le champ de vitesse horizontale et le champ de flottabilité, \mathcal{L}_u , \mathcal{L}_b désignent des opérateurs linéaires et \mathcal{N}_u , \mathcal{N}_b des opérateurs non-linéaires. Notons qu'on a négligé ici la non-linéarité de l'équation d'état de l'eau de mer et supposé égales les diffusivités moléculaires de la température et de la salinité. De manière générique, les équations qui décrivent l'évolution des propriétés moyennes de la circulation $\bar{\mathbf{u}}$, $\bar{\mathbf{b}}$, au sens d'une *moyenne spatio-temporelle* (possiblement partiellement lagrangienne) ou d'une *moyenne d'ensemble* sur les réalisations possibles de la circulation (étant données les informations dont on dispose à une certaine échelle), sont alors

$$\begin{aligned}\partial_t \bar{\mathbf{u}} + \mathcal{L}_u \bar{\mathbf{u}} + \mathcal{N}_u(\bar{\mathbf{u}}) &= \underbrace{\mathcal{N}_u(\bar{\mathbf{u}}) - \overline{\mathcal{N}_u(\mathbf{u})}}_{\simeq \mathcal{M}_u(\bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{b}})} \\ \partial_t \bar{\mathbf{b}} + \mathcal{L}_b \bar{\mathbf{b}} + \mathcal{N}_b(\bar{\mathbf{b}}) &= \underbrace{\mathcal{N}_b(\bar{\mathbf{b}}) - \overline{\mathcal{N}_b(\mathbf{b})}}_{\simeq \mathcal{M}_b(\bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{b}})}.\end{aligned}\quad (2)$$

On voit que ces équations ne sont pas *fermées*, à savoir qu'il n'est pas possible de calculer des solutions sans disposer d'information supplémentaire sur les champs \mathbf{u}, \mathbf{b} afin d'évaluer les termes des membres de droite. Ce problème de fermeture est en fait fondamentalement lié au caractère non-linéaire des équations de la dynamique océanique, une propriété qui est également la cause de la nature essentiellement turbulente des écoulements océaniques. Ces nonlinéarités permettent en effet des échanges d'énergie et d'information entre des échelles très différentes et sont donc un moteur essentiel des interactions d'échelle. Développer une fermeture sous-maille (ou une paramétrisation physique) consiste à obtenir de bonnes approximations $\mathcal{M}_u, \mathcal{M}_b$ des termes de droite des équations (2), qui soient calculables à partir des variables moyennes $\bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{b}}$ de sorte qu'on obtienne un système d'équations qui puisse être intégré numériquement.

Il existe deux grands cadres conceptuels pour concevoir des fermetures sous-mailles en mécanique des fluides et les modèles océaniques piochent alternativement dans l'un ou l'autre de ces cadres selon les cas ou les processus d'intérêt. L'approche RANS (pour *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) est basée sur l'idée que le détail de la réalisation d'un processus turbulent n'est ni accessible à la modélisation, ni important pour prédire l'évolution de l'état moyen du système [19]. L'état moyen s'entend ici comme moyenne d'ensemble sur tous les états possibles du système. On admet généralement par hypothèse que l'état moyen varie uniquement à des échelles macroscopiques (qui seront explicitement modélisées); en pratique l'hypothèse *ergodique* permet également de remplacer la moyenne d'ensemble par une moyenne temporelle sur des temps longs. L'approche LES (pour *Large Eddy Simulation*) suppose quant à elle que les propriétés d'invariance d'échelles de la turbulence fluide peuvent permettre de décrire l'effet des fluctuations à très fine échelle (non-résolues) sur des échelles plus grandes (résolues) pour peu que ces échelles plus grandes soit déjà turbulentes [20]. L'opération de moyenne sous-jacent qui distingue les fines échelles (*micro-états*) des plus grande échelles (*macro-états*) est ici une moyenne spatiale, typiquement basée sur un filtre convolutif. Les cadres RANS et LES permettent de développer des modèles phénoménologiques de la turbulence et du lien entre micro-états et macro-états. Ce lien est généralement supposé déterministe mais c'est une restriction assez forte que rien n'impose a priori, certaines communautés scientifiques défendent d'ailleurs l'utilisation systématiques d'approches stochastiques pour décrire ce type de lien.

Bien que le développement de fermetures sous-maille pour les modèles de circulation océanique s'appuie sur des cadres conceptuels pré-existants, il doit être noté qu'il existe relativement peu de cas dans lesquels des fermetures issues d'autres champs de la dynamique des fluides sont directement appliquées aux modèles de circulation océanique. Le problème de la formulation de paramétrisations physiques est en effet généralement abordé processus par processus; on s'intéresse ainsi par exemple de manière indépendante au mélange dû aux vagues de surface et au transport dû aux tourbillons de méso-échelle. Il s'agit alors, sur la base de considérations physiques, de formuler des expressions algébriques correspondant à la contribution de la classe de processus physiques considérée à $\mathcal{M}_u, \mathcal{M}_b$. De plus les grilles discrètes des modèles de circulation océanique étant généralement très anisotropes, avec des résolutions de l'ordre de 1 – 100m sur la verticale et 1 – 100km sur l'horizontale, la formulation des paramétrisations distinguera généralement les directions verticales et horizontales. Toutefois, même en gardant en tête ces différences d'ordre pratique, on peut légitimement s'interroger sur les raisons pour lesquelles il existe si peu de transferts directs des fermetures RANS et LES existantes vers les modèles de circulation océanique [21].

Une première spécificité des modèles de circulation océanique tient au caractère très anisotropes de processus turbulents dans l'océan. En effet, la stratification de l'océan et la rotation de la Terre ont pour effet de rendre relativement plus facile les mouvements lateraux que les mouvements verticaux [??]; plus précisément, les mouvements le long des surfaces d'égale densité potentielle (les *isopycnies*) demandent moins d'énergie car ils ne requièrent pas de travailler contre les forces de flottabilité. Comme la géométrie en couche mince de l'océan incite par ailleurs à utiliser des grilles discrètes très anisotropes entre les directions horizontales et verticales, les diffusivités turbulentes sont donc en pratique très différentes dans chacunes de ces deux directions, avec des valeurs de l'ordre de $10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans la direction verticale, et de l'ordre de $10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ sur l'horizontale. Cette différence pose non seulement des problèmes d'erreurs de discréttisation numérique [22], mais rend également non triviale la définition de l'opérateur de moyenne sur la base duquel sont formulées les fermetures sous-maille. En effet, cet opérateur de moyenne doit être partiellement lagrangien afin de ne pas mélanger la signature des processus qui agissent en moyenne au travers ou le long des isopycnies. Ce n'est finalement qu'au terme de décennies de débats scientifiques qu'un cadre général fait aujourd'hui l'objet d'un certain consensus [23].

Une deuxième spécificité de la formulation des fermetures sous-maille pour les modèles de circulation océanique est liée à l'imbrication entre erreurs de discréttisation numérique et termes de fermetures. Les modèles océaniques utilisent en effet traditionnellement des schémas de discréttisation numérique d'ordre relativement bas (typiquement d'ordre 2). Ceci est en partie un héritage historique et un choix permettant de garantir plus naturellement la conservation de propriétés intégrales, ce qui est important dans un contexte de modélisation climatique. Ce choix permet également de ne pas avoir à dégrader la précision du modèle dans les couches limites latérales et auprès de la bathymétrie. Mais une conséquence directe est alors que les erreurs de discréttisation numérique sont du même ordre de grandeur que les termes sous-mailles [24]. De même, on prend aujourd'hui graduellement conscience que l'effet macroscopique des fermetures dépend de la manière dont elles sont discréttisées [25]. Ces difficultés liées à l'imbrication entre discréttisation et paramétrisations sont assez rarement soulevées mais elles rendent en pratique plus difficile l'adoption de fermetures issues d'autres champs de la modélisation des écoulements fluides.

Une troisième spécificité tient au fait que les non-linearités convectives liés au terme de transport des équations primitives ne sont pas les seules susceptibles de justifier le développement de fermetures sous-maille. En effet, l'importance de la non-linéarité de l'équation d'état de l'eau de mer est connue depuis très longtemps [26, 27], mais ce n'est que relativement récemment que des travaux ont montré à quel point il est nécessaire de développer des fermetures représentant l'effet à grande échelle des fluctuations sous-maille via cette non-linéarité [28]. De même, les échanges à l'interface air-mer et la réponse océanique à ces échanges sont notamment non-linéaires et nécessitent à ce titre le développement de fermetures spécifiques. En effet les formules *bulk* qui prescrivent les flux air-mer dépendent non-linéairement des propriétés de surface de l'océan [29] et comme de plus la réponse de l'océan aux flux air-mer est également nonlinéaire, la présence de variabilité à fine échelle peut en effet induire des réponses à grande échelle [30, 31, 32]. Force est de constater cependant que les non-linearités convectives liées au processus de transport ont reçu beaucoup plus d'attention de la part de la communauté des océanographes modélisateurs.

Mais la spécificité la plus importante des problèmes de fermeture pour les modèles de circulation océanique est sans doute liée à la variété de processus dynamique à l'oeuvre et à leur dépendance vis-à-vis des échelles spatiales. On doit en effet noter que les cadres RANS et LES sont implicitement formulés pour des situations dans lesquelles la nature de la turbulence est supposée essentiellement invariante d'échelle [33, 34]. La turbulence océanique est cependant très particulière sur ce plan. Les contraintes liées à la géométrie de l'océan ainsi que la présence de rotation, ont pour effet de rendre possibles certains types de processus uniquement sur certaines gammes d'échelles : la turbulence balancée de mésoéchelle domine les échelles entre 50km et 500km, la turbulence tridimensionnelle domine aux échelles <10m, tandis que les échelles entre 50km et 10m sont le siège de processus de

submésos-échelle et de processus ondulatoires. Ces classes de processus ont de plus des propriétés très différentes en termes de flux inter-échelles de variance scalaire et d'énergie, sans compter qu'elles peuvent échanger très activement de l'énergie entre elles. Ainsi, s'il ne fait aucun doute que, dans des écoulements turbulents tridimensionnels homogènes et isotropes, l'énergie est échangée des grandes vers les fines échelles, cette propriété n'est pas vérifiée à toutes les échelles dans les écoulements océaniques. Les fermetures LES et RANS traditionnelles étant formulées pour reproduire le comportement fonctionnel typique de la turbulence tridimensionnelle homogène et isotrope, elles ne sont donc pas *a priori* adaptées aux situations océaniques (bien qu'elles puissent toutefois servir de base pour des adaptations au contexte océanique [21]).

Pour conclure sur un plan plus fondamental, il nous faut également reconnaître que la question de l'importance des processus de fine échelle dans la circulation océanique est encore largement ouverte. L'océan vu dans son ensemble est en effet un système thermodynamique ouvert, forcé et dissipatif. Dans un tel système, il est généralement difficile d'établir dans quelle mesure le détail des processus de fine échelle est important pour l'évolution macroscopique du système. Les processus turbulents sont-ils asservis aux forcages à grande échelle et aux apports d'énergie qu'ils induisent ou fixent-ils au contraire les flux à grande échelle en contrôlant le taux des échanges inter-échelles ? Ces questions dépassent sans doute le cadre de notre discussion, et nous tiendrons pour acquis le fait que le détail phénoménologique de l'évolution de l'océan aux échelles intermédiaires est directement affecté, et pour partie contrôlé, par les processus de fine échelle.

Limites et inflexions récentes des approches de modélisation en océanographie

Le cadre général de la modélisation océanique tel que nous l'avons décrit jusqu'ici traduit une démarche et une vision scientifique selon lesquelles les modèles de circulation sont construits sur la base d'une compréhension physique fine traduite en équations déterministes. Cette approche construite au fil du temps a montré sa pertinence, toutefois le cadre de travaux comme ceux du consortium DRAKKAR fait ressortir certaines limites intrinsèques et quelques inflexions importantes dans la manière dont sont développés et mis en œuvre les modèles de circulation océanique. Ces inflexions récentes concernent les limites des simulations forcées par l'atmosphère, le bénéfice des simulations d'ensembles, la représentation des erreurs des modèles ainsi que l'utilisation d'approches basées-données dans le développement des modèles. Sans remettre en cause le cadre décrit plus haut, ces inflexions ouvrent de nouvelles pistes de recherche qui font actuellement l'objet de beaucoup de travaux.

Une première inflexion récente des approches de modélisation océanique concerne donc la prise de conscience des limitations des approches de modélisation forcées (par l'atmosphère) pour l'étude des processus et de la variabilité océanique. On sait depuis longtemps que l'absence de rétroactions entre évaporation et précipitation est une limitation importante des protocoles de simulations forcées qui induit des dérives non-physiques de la structure thermohaline simulée par les modèles. Cette limitation est à l'origine de la forte sensibilité de la circulation méridienne au rappel en salinité de surface [35, 36]. Ce n'est toutefois que plus récemment que l'on a pris conscience de l'importance des mécanismes d'interactions à fine échelle entre les propriétés océaniques de surface et celles de la couche limite atmosphérique [37]. Représenter ou non ses interactions peut affecter notablement l'activité de méso-échelle simulée [38] mais également les grands systèmes de courants de bord ouest [39]. Plus généralement, on observe un intérêt croissant sur les questions liées à la représentation des processus d'échange et de couplage à l'interface air-mer, ce qui inclut notamment les vagues de surface et leur impact sur la couche limite atmosphérique et la turbulence océanique.

Une deuxième inflexion concerne la prise de conscience de l'intérêt des simulations d'ensemble en modélisation océanique. La simulation d'ensemble consiste à produire et analyser non pas une simulation déterministe unique mais un ensemble de simulations balayant une certaine gamme de

formulations possibles d'un même modèle. Cette approche permet ainsi de définir objectivement le degré de confiance qu'on peut accorder à une prédiction d'un modèle étant donnée l'incertitude sur ces paramètres ou sur l'état initial du système. Cette approche est particulièrement pertinente pour les systèmes physiques chaotiques dont la dynamique est fortement non-linéaire; elle est ainsi couramment utilisée en prévision météorologique depuis longtemps [40,41]. Cette approche est aujourd'hui également mise en oeuvre pour comprendre et prévoir la variabilité océanique, ceci notamment avec la découverte du rôle essentiel joué par la turbulence océanique dans la variabilité océanique basse fréquence (interannuelle à décennales) [42]. On sait en effet désormais que cette source de variabilité *intrinsèque* à l'océan peut dominer sur une large gamme d'échelles les fluctuations de l'état de l'océan, comme en particulier celles de la dénivellation de surface [43], de la circulation méridienne [44,45] ou du contenu thermique des couches superficielles [46,47]. Dans ce contexte, la simulation d'ensemble est utilisée pour prendre en compte l'incertitude liée à la phase des processus turbulents de méso-échelle [48]. Plus généralement, cette pratique accompagne l'émergence d'une vision probabiliste de l'utilisation et du développement des modèles de circulation océanique [49].

L'émergence d'une vision probabiliste de la modélisation océanique est également le résultat d'une troisième inflexion en cours, à savoir le recours plus systématique à des approches de modélisation *stochastique*. Le terme de modélisation stochastique désigne un champ de la modélisation numérique dans lequel les incertitudes sont modélisées explicitement au moyen de variables aléatoires. Cette rupture du caractère déterministe de la formulation des modèles de circulation océanique est tout d'abord intervenue dans le domaine des fermetures sous-maille (dites *paramétrisations stochastiques*, voir [50]). Les paramétrisations stochastiques permettent de prendre en compte le caractère incertain des fermetures sous-maille ou de représenter la nature non-déterministe du lien entre micro-états et macro-états [51,52]. Les modèles de circulation océanique ont ainsi recours à des approches stochastiques pour représenter les flux d'énergie cinétique depuis les échelles sous-maille [53,54] ou l'effet des nonlinearités de l'équation d'état de l'eau de mer [28]. Un fil de réflexion plus générique motive également l'utilisation d'approches stochastiques dans les modèles de circulation océanique en défendant que des perturbations stochastiques permettent d'améliorer la représentation de l'état moyen d'un système très fortement nonlinear en favorisant les transitions entre ses états stables [55]. Ces réflexions justifient également des questionnements quant à l'importance d'utiliser des schémas de discréétisation numérique très précis dans les modèles océaniques [56]. Sans rentrer dans de telles considérations épistémologiques, on peut constater que la réflexion sur la formulation stochastique des modèles de circulation océanique permet en tout cas d'aborder de manière mieux posée l'intégration des modèles physiques dans les systèmes de prévision avec assimilation de données [57] parce qu'elle permet de formuler plus explicitement l'incertitude des modèles. Partie des besoins des systèmes de prévision à court terme, cette tendance vers une vision probabiliste de la modélisation océanique, qui s'appuie sur des simulations d'ensemble et des formulations stochastiques, s'étend aujourd'hui graduellement à l'étude des échelles de temps longues [50,58].

Une dernière inflexion récente, sur laquelle porte actuellement beaucoup d'efforts, concerne l'utilisation systématique de base de données et de *méthodes d'apprentissage automatique* dans le développement des modèles géoscientifiques ou de leur applications. Historiquement en effet, ce sont les sciences physiques et les mathématiques qui dominent le développement des modèles géoscientifiques. De la sorte, les approches basées-données, exploitant des algorithmes d'apprentissage automatique, sont durant longtemps restées confinées en géosciences aux domaines de la télédétection (comme par exemple les problèmes inverses liés aux traitements de bas niveaux [59] ou les problèmes d'interpolation [60]) ou de l'analyse de série temporelle [61]. Toutefois, on voit émerger depuis plusieurs années des démonstrations de plus en plus convaincantes de l'apport possible de l'apprentissage automatique dans le développement de composantes de modèles géoscientifiques. Ces approches pourraient par exemple nourrir le développement de solveurs numériques permettant de réduire le coût des modèles océaniques [62] ou aider à formuler des

fermetures sous mailles [63,64]. Ces démonstrations récentes sont en partie le résultat d'avancées dans le domaine des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks, ANN), tant du point de vue de la performance des algorithmes que de la facilité de leur mise en oeuvre pratique dans le cadre de librairies standards (telles que PyTorch ou TensorFlow); ces avancées permettent désormais l'application des ANNs aux problèmes de très grande dimension issus de la mécanique des fluides [65,66]. Elles traduisent sans doute également une plus grande maturité scientifique de cette interface entre physique et apprentissage, avec de nombreux travaux visant à faire le pont entre ces disciplines. L'apprentissage automatique peut ainsi désormais être envisagé comme un outil de plus dans la boîte à outil du physicien (voir par exemple le domaine de la *recherche d'équations* [67] et ses applications en modélisation océanique [64]). Des avancées conceptuelles importantes permettent également aujourd'hui de rapprocher l'apprentissage automatique des méthodes numériques de résolution d'équations différentielles [68,69]. Toutes ces briques élémentaires en cours d'assemblage ouvrent en tout cas la possibilité réaliste d'envisager que la formulation des modèles de circulation océanique soient à l'avenir nourrie plus systématiquement de l'analyse de bases de données d'observations ou de modélisation à haute résolution. Un premier enjeu sera sans doute de faire en sorte de baser ces développements sur les apports conjoints de l'apprentissage et de la physique, par exemple en réduisant l'espace des solutions accessibles aux algorithmes d'apprentissage sur la base de contraintes physiques *a priori*. Un deuxième enjeu pour nos disciplines sera sans doute d'aborder l'usage des algorithmes d'apprentissage dans le cadre *conjoint* de la modélisation et de l'assimilation de données, pour formuler les problèmes de prévision (voir par exemple à ce propos les travaux de [70]).

Un esprit un peu taquin pourrait sans doute noter qu'aucune des inflexions présentées ci-dessus n'est vraiment nouvelle en soi. Si cet esprit taquin disposait d'un peu de temps, il pourrait même étayer son avis sur la base de travaux scientifiques publiés au cours des dernières décennies (voir notamment les essais de synthèses [71,72] ou certains exemples d'applications [73,74]). Contredire un tel esprit taquin sur une base purement factuelle serait sans doute malaisé. Ma perception *subjective* est en tout cas que, dans leur ensemble, les inflexions présentées ci-dessus traduisent un mouvement en cours en ce qui concerne les paradigmes qui sous-tendent les approches numériques en géosciences (et par là, en océanographie). Historiquement, les approches numériques en géosciences procèdent de la physique qui permet de formuler des modèles continus, supposés parfaits, qui sont ensuite mis en oeuvre au niveau discret grâce aux mathématiques appliquées. On obtient ainsi des modèles déterministes qui sont aujourd'hui considérés comme des sources de connaissances scientifiques acceptables (notons que cela n'a pas toujours été le cas au cours des décennies passées). La triste réalité obligeant parfois les modélisateurs à essayer de répondre à des problèmes concrets, les modèles de circulation, déterministes et parfaits, sont parfois mis en oeuvre pour produire des prévisions. On est alors bien obligé d'utiliser des observations réelles mais leur combinaison avec les modèles fait l'objet d'une *cuisine* généralement considérée comme de peu d'intérêt par les modélisateurs. Bon, bien évidemment ceci est une caricature, mais je vois dans les inflexions actuelles vers une prise en compte plus systématique des incertitudes (notamment de manière statistique) et vers l'utilisation de données dans la formulation des modèles, une opportunité pour renouveler graduellement le champ disciplinaire de la modélisation océanique. Cette évolution graduelle est aujourd'hui rendue possible pour partie par la quantité de données disponibles et par l'évolution des capacités de traitement systématique de ces données ainsi que des cadres logiciels qui le permettent. Elle est de mon point de vue également rendue possible par l'évolution (en partie générationnelle) de la communauté scientifique et de la maturité des idées qu'elle développe.

Le cadre général de mes activités de recherche

Après cette introduction générale sur la modélisation océanique, ses usages et ses limites, je présente brièvement dans ce qui suit le périmètre de mes activités, mon approche de travail et le contenu de ce mémoire.

Périmètre et domaine d'activité

Mon domaine d'activité scientifique a notablement évolué au fil du temps, s'étoffant au gré des collaborations, des opportunités et, plus généralement, de l'évolution de mes intérêts et de mes compétences scientifiques. Les catégories présentées ci-dessous ne sont qu'une proposition de relecture *a posteriori* de mon parcours de recherche. Elles ont toutefois l'avantage de répartir les travaux auxquels j'ai pu contribuer en trois sous-groupes à peu près équilibrés. Notons cependant que la nature de mes contributions peut notablement varier entre ces différents axes de travail. Notons également que si le premier axe est un fil conducteur de mon travail de recherche, j'ai graduellement fait évoluer mes activités du deuxième au troisième axe au fil du temps.

Science des modèles de circulation océanique en régime turbulent

Une première partie de mon travail porte sur la science des modèles de circulation océanique en régime turbulent. Mes travaux dans ce cadre ont porté sur quelques développements pour les modèles de circulation, mais ont surtout contribué au domaine scientifique lié à l'utilisation de ces modèles, et à l'analyse de leur fonctionnement. L'essentiel de ces travaux s'est concentré sur des régimes dynamiques turbulents dans lesquels les modèles résolvent pour partie la turbulence océanique équilibrée. Ils ont été menés pour une large part dans le cadre du consortium DRAKKAR et du CLIVAR-OMDP, ces deux efforts permettant notamment l'intercomparaison systématique des modèles. Cette dimension de la science de modèles de circulation est également une donnée transverse à la plupart des thèses à l'encadrement desquelles j'ai pu contribué. Un dénominateur commun de ces travaux porte sur la description et la compréhension de la capacité des modèles de circulation océanique à représenter la variabilité tourbillonnaire (la *macro-turbulence* océanique). En chemin, ces travaux ont pu contribuer à l'étude de l'impact de la discréétisation numérique sur les solutions, au développement de fermetures sous-maille, à l'amélioration de la représentation du transport de traceurs ou à des développements spécifiques pour représenter les processus océaniques à hautes latitudes.

Processus physiques et variabilité saisonnière à décennale de l'océan austral

Une deuxième partie de mon travail porte sur l'étude des processus océaniques à l'oeuvre dans l'océan austral et de la réponse de ce bassin océanique aux changements environnementaux planétaires. Ses activités, sur lesquelles porteront les deux prochains chapitres, s'inscrivent dans le cadre prévu par le projet de recherche pour lequel j'ai été recruté au CNRS en 2006. Mes travaux dans ce cadre ont porté dans une première phase sur la circulation au sein du courant circumpolaire antarctique, aux latitudes moyennes de l'océan austral. J'ai contribué à l'étude du rôle des tourbillons de méso-échelle dans la réponse physique et biogéochimique au changement des vents zonaux induit par la tendance du mode annulaire austral. Dans une deuxième phase de travail, j'ai eu l'occasion de m'intéresser aux zones subpolaires de l'océan austral en collaboration avec mes collègues de l'IGE. Dans ce cadre, j'ai contribué à l'étude des interactions entre océan austral et calotte antarctique, avec un regard particulier sur les processus affectant la glace de mer et sa variabilité saisonnière à décennale.

Synergie entre modèle et observations en préparation à l'observation spatiale des océans

Une troisième partie de mon travail porte sur le développement de synergies entre modèles et observation en préparation de l'observation, notamment spatiale, des océans. Il s'agit là d'un volet plus émergeant de mon activité, qui s'est essentiellement développé depuis 2013 avec ma participation à l'équipe scientifique de la mission SWOT (*SWOT Science Definition Team* puis *SWOT Science Team*). Le terme *synergies* est ici un mot valise pour désigner l'usage des modèles de

circulation dans le contexte de la préparation de l'observation des océans depuis l'espace et de l'exploitation des données spatiales. Les travaux auxquels j'ai eu l'occasion de contribuer dans ce cadre ont porté sur la simulation de système d'observation, l'étude de la variabilité océanique en vue de son estimation à partir d'observations ainsi que le développement de méthodes de traitement des données d'observations. Mes premières contributions se sont essentiellement inscrites dans le cadre de collaborations pour lesquelles j'apportais des données de modèles océaniques à haute résolution. Des collaborations plus structurées (notamment en interne à mon équipe de recherche) m'ont permis de m'investir de manière plus experte et plus autonome sur ces thématiques au fil du temps.

Approche de travail

J'aimerais également prendre le temps ici de décrire les principes qui guident plus moins consciemment mes choix en matière de recherche scientifique. J'espère de cette manière donner au lecteur quelques fils de lecture qui aider peut-être à comprendre certains des choix que j'ai pu faire au cours de cette première partie de ma carrière scientifique. Les éléments que je détaille ci-dessous ne sont en aucun cas des principes que je souhaiterais voir appliqués par d'autres mais juste une observation *a posteriori* de ma manière de fonctionner et de mes partis pris personnels.

1. Le choix de mes sujets de recherche est souvent le fruit d'évolutions récentes du *contexte technique ou scientifique*. En effet si la structuration internationale de la communauté des sciences du climat (notamment dans le cadre de CLIVAR) permet de partager une vision commune des grandes questions qui méritent d'être examinées, le choix de la question spécifique et de l'angle d'approche relève naturellement des équipes. J'observe que mes travaux portent souvent sur des problèmes spécifiques que l'évolution du contexte technologique rendent abordables. Cette évolution peut par exemple être liée au développement des capacités des calculateurs, à l'évolution des algorithmes (et de leur implémentation logicielle) ou à l'arrivée de nouvelles observations. La définition de mes questions de recherche est donc souvent autant la traduction de ce qu'on est capable d'étudier dans un contexte technique donné que de ce qu'il est intéressant d'étudier en soi.
2. J'essaye généralement de travailler en *cohérence avec mon environnement* institutionnel, scientifique et programmatique. Ceci recouvre deux aspects complémentaires. D'une part, je pense que notre communauté scientifique est trop petite au vu des enjeux et de la complexité des questions qu'elle doit traiter; dans ce contexte, j'estime que la collaboration est une stratégie plus efficace que la compétition. J'essaye donc de choisir mes questions de recherche de manière à ce qu'elles soient complémentaires et articulées avec celles de mes collègues. D'autre part, j'accorde de l'importance à la dimension des moyens humains et financiers dans le travail de recherche. Ayant pris conscience assez tôt que la recherche procède pour une large part d'une réalité politique et technologique et non de considérations purement abstraites et idéales, je prend le parti de privilégier les sujets qui permettent à mon équipe de disposer de moyens confortables pour travailler.
3. J'observe que je travaille essentiellement dans le cadre de *collaborations* avec des collègues. C'est évidemment le cas pour les travaux auxquels je suis associé et que je ne dirige pas directement mais c'est également l'approche de travail que je privilégie dans la direction de recherche et l'encadrement. En pratique, sur un sujet donné je participe à une équipe de pilotage qui rassemble des expertises complémentaires. Cette approche est bien évidemment un moyen d'élargir le champ des questions à l'étude desquelles je contribue. C'est aussi de mon point de vue la seule manière d'aborder les questions vraiment nouvelles en géosciences, domaines interdisciplinaires par nature. Si l'on applique le principe de James F. Watson², le travail en collaboration donne de nombreuses occasions d'apprendre, ce que je trouve être l'un des principaux intérêts de mon métier. Enfin, et c'est une dimension essentielles à mes yeux, je trouve le travail en collaboration tout simplement plus agréable et motivant au jour le jour.

4. Une autre particularité de mon approche de travail tient à l'attention particulière que j'accorde à la *dimension technique* de la recherche. Dans mon champ scientifique, cette dimension technique recouvre essentiellement la question du développement des ressources logicielles nécessaire au travail de recherche. Je pense que les outils logiciels sont une dimension essentielle de la recherche, en ce qu'ils peuvent permettre d'aborder des questions nouvelles avec plus ou moins de facilité. Je pense donc que les contributions au développement de ces outils doivent être encouragées et reconnues dans la carrière des chercheurs. Je fais en sorte que mes travaux s'appuient sur des logiciels libres, construits en collaboration et sur des temps longs. J'essaye par ailleurs de contribuer à ces développements en les encourageant chez mes étudiants et en participant au processus de coordination et d'intégration de certains d'entre eux. C'est le cas notamment pour le code numérique NEMO.
5. Le dernier aspect de mon approche de travail que j'aimerais souligner est lié à la *dimension humaine* du travail de recherche. Au risque de verser dans la tarte à la crème bienveillante et naïve, je pense sincèrement avoir en tant que chercheur une chance inouïe, à savoir celle de choisir avec qui je travaille. J'ai également eu la chance d'être accompagné au fil du temps par un collectif très fort au sein de mon équipe de recherche. Avec cette chance vient évidemment des devoirs, le principal d'entre eux étant de prendre soin du groupe et de chacun de ces membres. J'essaye donc de contribuer à faire vivre une équipe cohérente et agréable au jour le jour et veille à accompagner le mieux possible les jeunes chercheurs avec qui j'ai l'occasion d'interagir. Evidemment, j'ai conscience qu'il peut exister une certaine distance entre les intentions, les actes, et la manière dont ils peuvent être perçus et interprétés...

Sur le contenu de ce mémoire

Il n'aura pas échappé au lecteur que ce manuscrit d'*habilitation à diriger des recherches* intervient relativement tard dans ma carrière. J'en ai entamé la rédaction dès 2012, mais ce n'est finalement qu'en 2020 que je finalise ce travail. Entre temps et à mesure que s'élargissait le périmètre de mes activités scientifiques, j'en ai repris le plan à de nombreuses reprises, prenant à chaque iteration un peu plus conscience du caractère lacunaire de ma couverture de mon champ de recherche. J'ai finalement accepté l'idée qu'il me serait sans doute impossible de retracer le fil de mes expériences d'encadrement de manière exhaustive, cohérente et digeste pour le lecteur.

Ce mémoire, concrétisé ici dans une forme que j'espère lisible, est la traduction d'un parti pris de rédaction volontairement plus personnel. Il ne vise en aucun cas à décrire de manière exhaustive et objective mes expériences d'encadrement. Il ne vise pas non-plus à présenter une synthèse cohérente d'un ensemble de travaux sur un champ de recherche bien circonscrit. Je souhaite plutôt ici prendre acte de ma manière de travailler en tant que chercheur, dans son caractère intrinsèquement non-linéaire et forcément imparfait. Si ce parti pris me permet de concrétiser enfin un mémoire d'*habilitation*, il traduit également une prise de conscience plus personnelle de l'importance de la subjectivité et de la dimension humaine dans le travail de recherche scientifique.

Le parti pris de ce manuscrit est donc le suivant : je propose d'illustrer ici, en trois séquences successives, des situations concrètes de direction de recherche choisies au fil de mon parcours. Ces séquences ne couvrent pas l'ensemble des thèmes sur lesquels j'ai en l'occasion de travailler. Ils sont plutôt des exemples de moments que j'ai particulièrement appréciés et qui ont bien fonctionnés, en ce qu'ils ont ménés à des publications et permis la formation de jeunes chercheurs. Il s'agit en quelque sorte de trois situations de bon *alignement de planètes* où le contexte scientifique, le positionnement choisi, le contexte humain et les financements se sont révélés particulièrement propices à des interactions fructueuses.

Si j'espère que ce choix permettra d'illustrer mon aptitude à la direction de recherche scientifique, il a aussi ses limites. Il masquera de fait les situations qui ont été moins propices et productives au fil de

ma carrière. Il cachera également mes contributions en tant que collaborateur et non *directeur* de recherches. J'attire enfin l'attention du lecteur sur le fait que le contexte scientifique et bibliographique sera ici présenté tel qu'il apparaissait au moment où les séquences se sont déroulées. La bibliographie présentée ne sera donc pas à jour des développements plus récents sur chacun des thèmes.

En gardant bien ces limites en tête, le lecteur trouvera donc dans ce qui suit trois illustrations correspondant à trois séquences de travail de ma carrière au cours des 15 dernières années. Pour chacun d'entre eux, j'expliquerai le *contexte scientifique* dans lequel s'inscrit la séquence en question, je présenterai *le positionnement et l'approche de travail* que j'ai retenus, je présenterai certains *résultats obtenus* puis conclurai sur *les activités et les opportunités* qui se sont présentées à la suite de cette séquence. Après ces trois séquences, une dernière section présentera une synthèse plus large de mes contributions ainsi qu'une proposition de priorités scientifiques pour les années à venir.

Illustration n°1 : Etude de la réponse de l'océan austral aux changements des vents

Ce chapitre présente est une première illustration de mes activités de direction de recherche. Il est essentiellement basé sur des travaux menés entre 2009 et 2014, notamment dans le cadre du projet ANR Southern-Cross et de la thèse de Carolina Dufour [76]. Il porte sur la question de la réponse de la circulation de l'océan austral à l'intensification des vents liée au mode annulaire austral.

Contexte scientifique

Le rôle central de l'océan austral dans le système climatique

Le terme *océan austral* désigne le bassin océanique qui s'étend autour du continent antarctique et, par convention, jusqu'à 30°S [77] (voir la figure 3). L'absence d'obstacle lié à la géometrie circumpolaire de ce bassin océanique y rend possible l'existence d'un fort courant zonal, appelé *courant circumpolaire antarctique* (voir la Figure 3). Ce courant est entretenu par les forts vents zonaux qui induisent un puissant processus d'*upwelling* raidissant les pentes des isopycnes des couches profondes vers la surface [78]. En l'absence d'obstacle, un courant intense, très coherent sur la verticale, se met en place. La structure verticale de l'ACC est ainsi très particulière avec peu de déviation de l'orientation des courants entre la surface et le fond (on dit ce courant quasi-équivalent *barotrope* [79]) de sorte que les échanges méridiens au travers de l'ACC sont relativement faibles.

L'océan austral, et notamment l'ACC, est un lieu privilégié dans le cycle de vie des masses d'eaux de l'océan global en tant que lieu d'échanges entre l'océan intérieur, l'océan de surface et les milieux environnants (atmosphère et cryosphère). En effet, la résurgence des isopycnes au coeur de l'ACC ramène les eaux profondes de l'Atlantique Nord (NADW) auprès de la surface [80]. Une fraction de ces eaux y est alors transformée en eaux intermédiaires (AAIW) [80] et modales (SAMW) [81] (*upper branch*) tandis qu'une autre fraction migre à la surface vers le sud (ASW) pour participer *in-fine* à la formation des eaux antarctiques de fond (AABW) auprès des côtes [82] (*lower limb*). Ces échanges sont rendus possibles par l'intensité des transferts de quantité de mouvement et de flotabilité à l'interface air-mer dans ce bassin océanique. La force des vents, les températures extrêmement basses et la présence de glace de mer concourent ainsi à faire de ce bassin un lieu privilégié de formation de masses d'eaux.

La géométrie particulière de l'océan austral a également pour conséquence importante de donner un rôle essentiel aux fluctuations tourbillonnaires dans les équilibre de forces qui maintiennent la circulation méridienne des masses d'eaux au travers de l'ACC. En effet, l'absence d'obstacle sur le cours de l'ACC ne permet pas l'existence de courants méridiens permanents (ils seraient en effet alors nécessairement associés à des gradients de pression zonaux). Ainsi seules des circulations transitoires, en l'occurrence liées à la macroturbulence océanique peuvent maintenir les flux de masses qui équilibrivent les branches de la circulation méridienne au travers de l'ACC (ainsi que les flux verticaux de quantité de mouvement qui en sont le corollaire). La prise de conscience de l'importance de la circulation tourbillonnaire dans l'ACC date des premiers travaux de modélisation réaliste de ce bassin menés à la fin des années 90 [??] et des rationalisations théoriques de [83] pour la branche de surface (*upper branch*) et de [84] pour la branche abyssale (*lower limb*), résultats confirmés par des analyses approfondies dans des modèles à la fin des années 2000 [85].

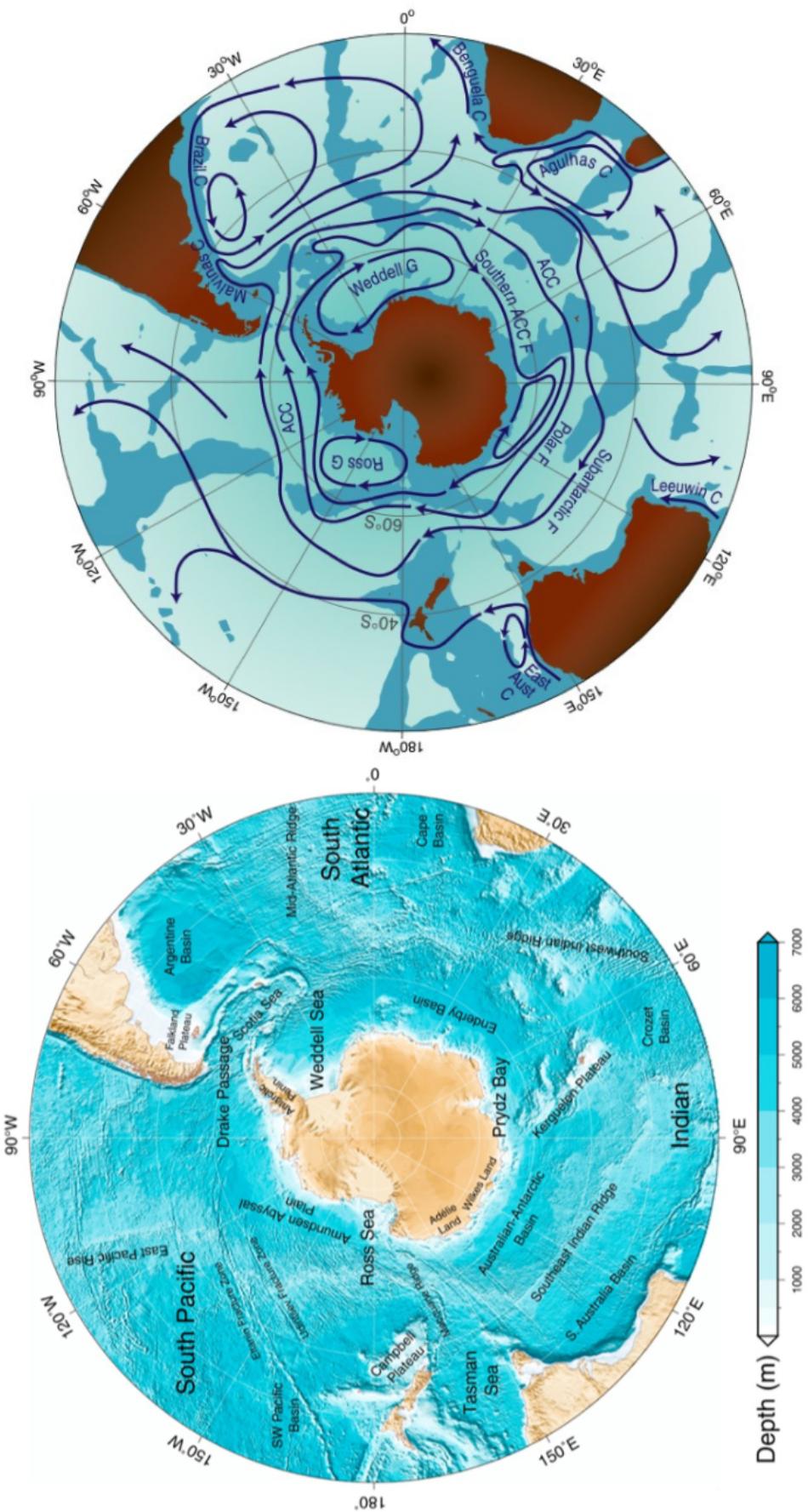


Figure 3: Circulation et bathymétrie de l'océan Austral autour de l'Antarctique. (haut) Représentation schématique des courants de l'océan Austral : le courant circumpolaire antarctique (ACC) circule d'ouest en est autour de l'Antarctique en deux grandes branches, le front polaire et le front subantarctique. Des recirculation cycloniques occupent les bassins profonds entre le continent antarctique et l'ACC (reproduit de [86]). (en bas) Données bathymétriques Etopo2 du NGDC de la NOAA (2008) et noms des principales caractéristiques bathymétriques de l'océan Austral (reproduit à partir de [77]).

C'est également au cours des années 2000, que s'est cristallisée la prise de conscience du rôle central joué par l'océan austral dans l'océan global en tant que composante de la machine climatique [87]. Si historiquement, l'océan atlantique nord a reçu beaucoup d'attention de la part des océanographes pour des raisons évidentes liées aux routes maritimes et aux enjeux géostratégiques, les observations collectées durant les campagnes WOCE ainsi que l'émergence des modèles de circulation océanique a permis de mieux comprendre comment l'océan austral contrôle pour une large part la circulation meridienne et la stratification globale (voir par exemple sur ce point [???, 88]), comment également l'intensité des processus de formation de masses d'eaux en fait un lieu clef en terme d'échanges de carbone d'origine anthropique entre l'atmosphère et l'océan [89]. Mieux comprendre les processus pilotant la variabilité de l'océan austral est ainsi une question de première importance pour anticiper et comprendre les changements environnementaux planétaires.

Des changements rapides dans l'océan austral

L'intérêt pour l'étude de l'océan austral s'est également accru au tournant des années 2000 lorsque les réseaux d'observation et les campagnes en mer ont montré à quel point ce basin était sujet à des changements rapides de ces propriétés, notamment au cours des dernières décennies (voir par exemple les synthèses de [90, 91]).

Ce sont en premier lieu les propriétés hydrographiques de l'océan austral qui ont attiré l'attention et en particulier le fort signal de réchauffement et d'adoucissement qu'on observe au coeur de l'ACC [92, 93, 94] (voir la figure 4), signal dont on sait qu'une part importante est liée à des changements effectifs des propriétés des masses d'eaux intermédiaires et modales [95]. Plus en profondeur, un réchauffement et un adoucissement des eaux antarctiques de fond (AABW) a également été détecté [96, 97].

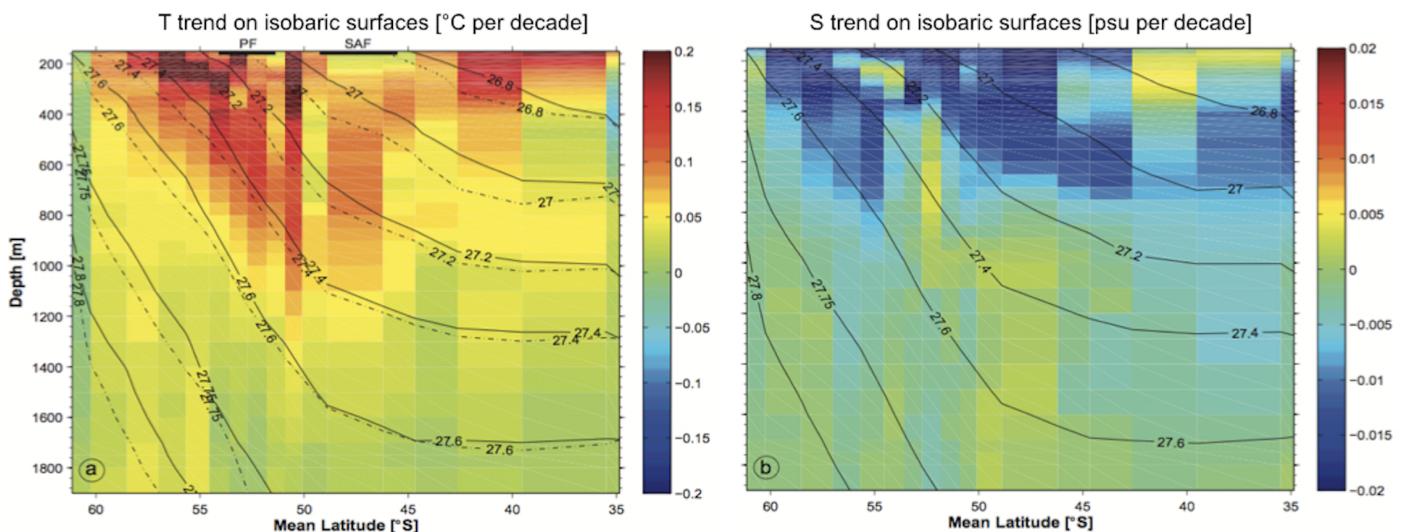


Figure 4: Tendances décennales de la température (à gauche) et de la salinité (à droite) entre 35°S et 60°S (reproduit de [92]). Les tendances sont estimées en soustrayant les mesures in-situ récentes d'une climatologie moyenne à long terme (couleur). Les différences sont prises sur des surfaces de pression constante et le long des lignes de courants moyennes de l'ACC. Les lignes noires indiquent les surfaces d'anomalie de densité constante (en kg m⁻³ - 1000). Les isopycnes se sont déplacées vers le sud avec le temps, mais avec peu de changement de pente, suggérant que le transport de l'ACC n'aurait pas changer sur la période considérée.

On observe aussi dans l'océan austral des changements de structure de circulation barotrope et d'activité tourbillonnaire avec notamment un décalage des fronts de l'ACC vers le sud. Ce décalage graduel des fronts vers le sud a pu être détecté grâce à l'altimétrie satellite depuis le début des années 1990 [98]. Ce sont également les altimètres qui nous ont permis de détecter une évolution significative de l'activité tourbillonnaire sur cette période [99]. En revanche, ni les altimètres ni les

mesures *in-situ* n'ont pas permis de détecter de changements notables du transport de l'ACC ([[100](#)], voir également la section 3.6.5.2 de [[101](#)]).

Les changements dans les taux de formation de masses d'eau et dans la circulation méridienne au travers de l'ACC sont cependant plus difficiles à détecter de manière directe. La faiblesse des changements de pentes des isopycnes observés par [[92](#)] suggèrerait que la circulation méridienne de l'océan austral n'aurait pas notablement évolué au cours de la deuxième moitié du XXI^e siècle, mais ce point a soulevé des débats. Il semblerait en revanche que les taux de formation des principales masses d'eaux montre des tendances plus nettes, avec en particulier des changements dans la formation des AAIW [[102](#)] et dans le renouvellement des AABW [[103](#)].

Concernant la glace de mer, les observations montrent que des changements rapides sont ici aussi en cours dans l'océan austral, mais la tendance y est plus complexe que celle observé en Arctique. Les observations satellite montrent en effet une légère augmentation globale de l'étendue de la glace de mer au cours des dernières décennies dans l'océan austral [[104](#),[105](#)]. Cette légère augmentation globale de l'étendue de la glace de mer résulte en fait de la combinaison de très fortes tendances régionales (augmentations et diminution) de la concentration de glace de mer autour de l'Antarctique [[106](#)].

Ces changements des conditions physiques de l'océan austral induisent des changements de la biogéochimie marine et des écosystèmes qui eux aussi sont détectables. La principale source d'inquiétude est en particulier liée à la capacité de l'océan austral à capter du carbone atmosphérique, notamment du carbone d'origine anthropique. Il semblerait en effet que cette fonction de puits de carbone net ait tendance à saturer [[107](#),[108](#)]. En parallèle, l'accumulation de carbone d'origine anthropique induit une acidification détectable des couches de surface [[109](#),[110](#)]. De nombreux autres changements, notamment dans la structure des écosystèmes, ont également pu être détectés dans l'océan austral. Notons ici par exemple les changements de productivité induits par l'évolution de la structure des écosystèmes phytoplanctoniques [[111](#)] (pour une revue plus récente de ces changements des écosystèmes, voir par exemple [[112](#)]).

Un stress climatique dominant : la tendance positive du mode annulaire austral

Tous ces changements des propriétés de l'océan austral sont en fait la signature de changements environnementaux affectant l'ensemble du système climatique de l'hémisphère sud, et notamment l'atmosphère, en réponse à des modifications du forçage radiatif par les activités humaines. Les émissions de gaz à effet de serre et la destruction de l'ozone stratosphérique ont en effet notablement modifié le climat de l'hémisphère sud au cours des dernières décennies [[113](#)]. Chacune des composantes du système couplé atmosphère-océan-glace de mer a ainsi été perturbée de sorte que les forçages océaniques (flux de quantité de mouvement, flux de chaleur et d'eau douce) ont notablement changé au cours des dernières décennies. Une manière simple de décrire ces changements est de les voir comme une tendance positive du principal mode de variabilité de l'hémisphère sud.

Le mode annulaire austral (en anglais ‘Southern Annular Mode’, SAM) est le principal mode de variabilité de l'hémisphère sud. Il s'agit d'un mode essentiellement annulaire, sorte d'équivalent de la North Atlantic Oscillation (NAO) pour l'hémisphère sud [[114](#)] dont les phases gouvernent notamment l'intensité et la structure de vents à la base de la troposphère. Les phases positives du SAM sont notamment caractérisées par des tempêtes plus fréquentes et plus intenses au sud de l'ACC. Le SAM explique en pratique une part notable de la variabilité de la plupart des variables observables dans l'hémisphère sud. C'est le cas en particulier de la température océanique de surface (SST) [[115](#)], de la profondeur de la couche de mélange océanique (MLD) [[116](#),[117](#)], de l'extension de glace de mer (SIE) [[118](#),[119](#)] ainsi que des fluctuations interannuelles de l'énergie cinétique des tourbillons de

mésoéchelle (EKE) [120]. Notons toutefois qu'il peut exister des réponses différentes aux phases du SAM selon les échelles de temps considérées.

En première approximation, les changements en cours dans l'hémisphère sud peuvent être décrits comme un décallage graduel du SAM vers ses phases positives en réponse aux changements de forçage radiatif. Du point de vue océanique, cette tendance se caractérise en particulier par une migration vers le sud et une intensification des vents zonaux au dessus de l'océan austral. Cette migration moyenne traduit en fait un changement dans la probabilité des tempêtes intenses dans l'océan austral. On notera également que tant la structure du SAM que sa tendance montre en réalité une très nette saisonnalité [121]. La tendance du SAM est en tout cas un pilote majeur des changements en cours dans l'océan austral (voir la figure 5 pour une synthèse des variations de propriétés océaniques induites par le SAM).

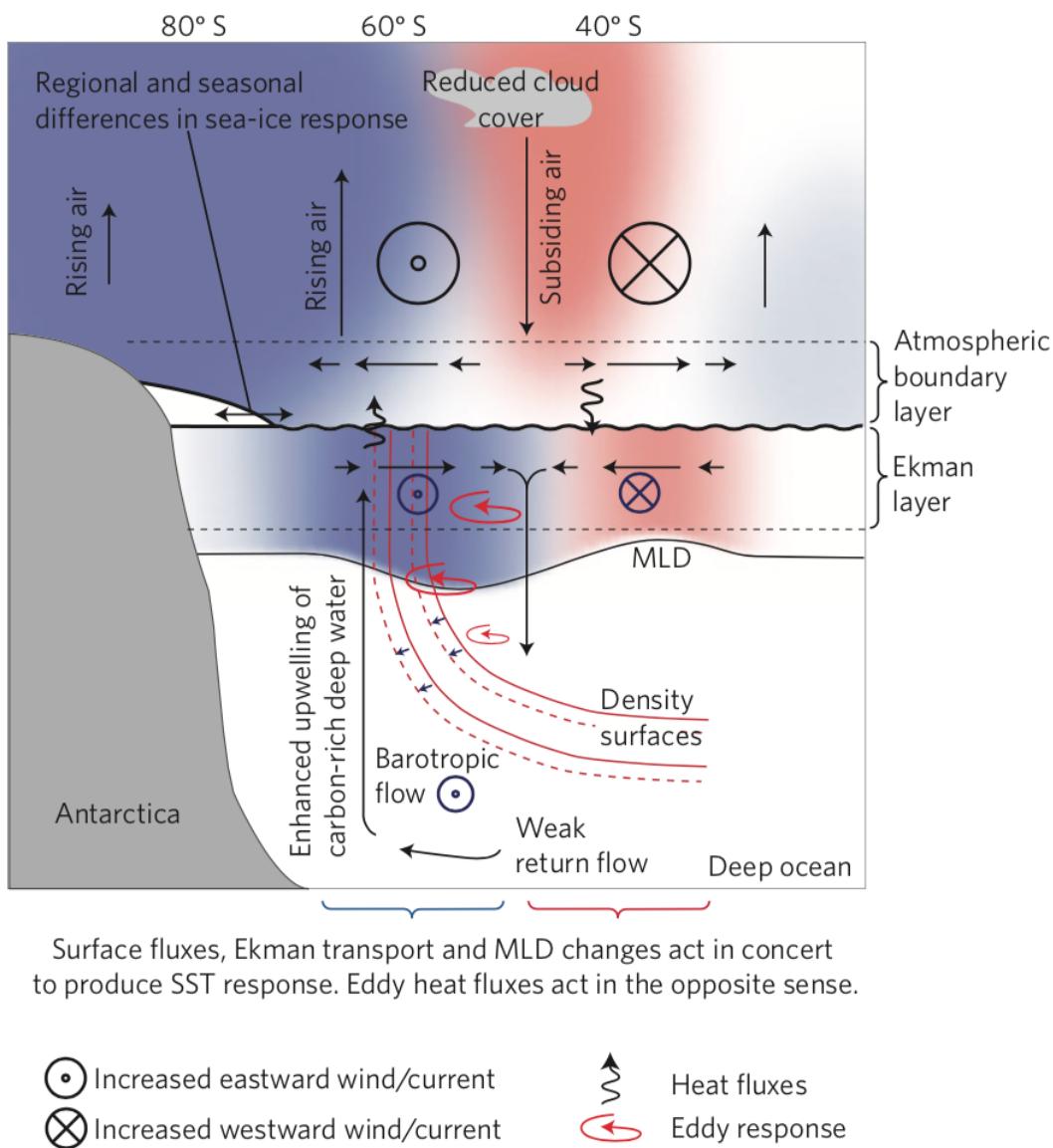


Figure 5: Schéma de la réponse de l'océan austral aux phases positives du mode annuel austral (repris de [113]). Les flèches pleines indiquent les mouvements méridien et verticaux dans l'atmosphère et l'océan. Les couleurs chaudes correspondent à des augmentations de température ou de contenu thermique, et les couleurs froides à des diminutions.

Il nous faudra bien évidemment garder à l'esprit que cette représentation de la tendance climatique de l'hémisphère sud comme une modification du mode de variabilité dominant cet hémisphère est une idéalisation qui a ses limites. La structure de la tendance de vents de surface observée au dessus

de l'océan austral n'est ainsi pas rigoureusement identique à la structure des variations à hautes fréquences (de quelques jours à quelques semaines) qui caractérise le SAM. En outre, la réponse océanique au SAM dépend de l'échelle de temps des fluctuations considérées. Cette réponse peut également rétroagir sur le moteur des changements en cours, à savoir le forçage radiatif, notamment via les changement de couverture de glace de mer mais surtout via la réponse des flux air-mer de CO₂. Enfin, la réponse de l'océan aux changements atmosphériques peut impliquer des mécanismes complexes de rétroactions avec la cryosphère que nous détaillerons dans le chapitre suivant.

Dans ce contexte de variabilités complexes et inter-dépendantes, et devant la difficulté à attribuer les changements détectés à des causes précises à partir des observations seules, les modèles numériques se sont imposés assez naturellement comme des outils de recherche essentiels. Les modèles de circulation océanique (éventuellement couplés à la glace de mer) ont ainsi été très largement utilisés pour comprendre les mécanismes impliqués dans la réponse de l'océan austral au stress climatique, notamment au travers d'expériences de sensibilité à des perturbations de forçage externes.

Des questions sur le rôle des tourbillons dans la réponse au SAM

Le travail de [122] fait figure de précurseur en matière d'étude de la réponse de l'océan austral à l'intensification des vents, il est en tout cas le premier à avoir montré l'importance des processus tourbillonnaires dans cette réponse. Si l'on savait déjà que les tourbillons de méso-échelle contrôlait de manière essentielle l'état moyen de la circulation de l'océan austral, tant en terme de circulation barotrope que de circulation méridienne, on s'est alors rendu compte qu'il en était de même pour sa réponse à des changements de forçage. Plus précisément, la réponse océanique aux changements de forçage étudiée par [122] semblait dépendre de manière non-triviale de la résolution (explicite ou non) de la variabilité de méso-échelle par le modèle utilisé. Ces résultats, complétés des travaux de [123], ont conduit à formuler les concepts de *saturation tourbillonnaire* et de *compensation tourbillonnaire* pour décrire le rôle des tourbillons de méso-échelle dans la réponse de l'océan austral aux changements de vents, concepts qui sont largement imposés depuis lors.

La notion de *saturation tourbillonnaire* ('eddy saturation') s'applique aux discussions de la sensibilité du transport de l'ACC aux changements des vents. Les travaux de modélisation (comme par exemple ceux de [122, 123]) ont montré qu'avec une meilleure résolution des processus tourbillonnaires, les modèles montraient généralement une plus faible sensibilité du transport de l'ACC à l'intensification des vents. Cette sensibilité à la résolution est compatible avec les résultats de simulations idéalisées du modèle quasi-géostrophique (QG) obtenus dans un régime d'écoulement qualifié d'*eddy-saturated* [120, 124]. Dans ce régime, on observe une réponse quasi-linéaire de l'intensité des tourbillons au changement des vents. Cette intensification des tourbillons permet alors un transfert plus efficace de quantité de mouvement de la surface au fond (*interfacial form stress*) de sorte que l'accroissement des vents de surface n'induit pas de changement du transport zonal moyen. On utilise donc la notion de *saturation tourbillonnaire* pour décrire des écoulements zonaux dans lesquels un accroissement du vent n'induit pas de changement notable du transport zonal mais induit des changement dans l'activité tourbillonnaire. De tels comportement ont en particulier été observés dans des modèles idéalisés basés sur les équations primitives [125].

La notion de *compensation tourbillonnaire* ('eddy compensation') s'applique quant à elle aux discussions de la sensibilité de la circulation méridienne aux changements des vents. Comme on l'a vu, l'état moyen de la circulation méridienne au travers de l'ACC est largement caractérisé par une compensation du transport d'Ekman vers le nord dans les couches de surface par un transport tourbillonnaire vers le sud de sorte que la circulation *résiduelle* est relativement faible (et équilibrée par les flux de surface) [83]. L'absence de tendance notable des pentes d'isopycnes diagnostiquée par [92] suggère que les changements de transport d'Ekman seraient également en grande partie compensés par des changements de flux tourbillonnaire. Ainsi le raidissement des isopycnes

consécutif à une modification du transport d'Ekman en surface serait directement compensé par une tendance à l'aplatissement des isopycnes moyennes par les flux tourbillonnaires. De la sorte la circulation méridienne *résiduelle* serait essentiellement indépendante des changements de vent. La validité de ce mécanisme a été discuté par plusieurs auteurs [[122](#),[123](#),[126](#),[127](#)]. Il semblerait qu'en pratique, les tourbillons de mésoéchelle puissent en effet partiellement compenser les changements de circulation méridienne induits par le transport d'Ekman. Toutefois, cette compensation n'est pas complète en pratique de sorte que les changements de circulation *résiduelle* au travers de l'ACC en réponse au vents sont très mal contraints par la théorie.

Ces discussions pourraient apparaître comme des débats de spécialistes quelque peu abscons si l'on ne gardait en tête que l'on parle ici des mécanismes contrôlant la réponse à l'ordre zéro de la circulation océanique à un stress majeur de son environnement. La réponse de la circulation méridienne au travers de l'ACC est en effet *a priori* le paramètre clé contrôlant la réponse des flux de CO₂ naturel aux changements des vents liés au SAM et donc *in-fine* l'amplitude du puits de CO₂ total océanique. Dans le contexte des conclusions de [[107](#)] sur la possible saturation du puits de CO₂ anthropique, il était donc important au tournant des années 2010 de tenter de comprendre le détail des processus impliqués dans la réponse de la circulation méridienne au changement des vents. C'est pourquoi les débats présentés ici ont suscité beaucoup de travaux de la part des modélisateurs et des dynamiciens. Ils ont par ailleurs nourris l'un des fils d'argumentaire les plus convaincants en faveur d'une augmentation de la résolution des composantes océaniques des modèles de climat pour CMIP6 afin de permettre une représentation explicite de la réponse de la méso-échelle océanique aux changements atmosphériques.

Positionnement et approche générale

Cette première séquence de travail que je souhaite décrire ici s'inscrit dans un contexte particulier qui m'a permis de contribuer par quelques travaux aux débats présentés plus haut. Le principal élément de ce contexte est la cacacité technique et scientifique développée par l'équipe MEOM dans le cadre du consortium DRAKKAR. Cet effort de collaboration pan-europeen dont les activités ont commencé vers 2003-2004 a porté sur tous les aspects scientifiques et techniques en lien avec la mise en oeuvre de simulations "hindcast réalistes" de la circulation océanique au moyen du code de circulation NEMO. En pratique, le consortium DRAKKAR a fourni un cadre à l'équipe MEOM pour développer son expertise sur les méthodologies et les produits de forcages des modèles océaniques, ainsi que sur la mise en oeuvre de simulations globales aux limites des possibilités des calculateurs. Le positionnement scientifique que j'ai choisi dans les débats présentés plus haut est donc directement basé sur cette compétence scientifique et technique de l'équipe MEOM.

Dans ce contexte, j'ai donc décidé de définir et de mener un programme d'expériences de sensibilité de la circulation de l'océan austral au changement des vents, programme pour une large part motivé par les travaux de [[122](#)] et de [[128](#)]. Cette approche permettait assez naturellement d'exploiter l'avantage scientifique de la capacité de notre équipe à construire et mettre en oeuvre des configurations réalistes de modèles de circulation océanique. La principale originalité de l'approche proposée tenait notamment à la définition d'un programme de simulations les plus réalistes possibles (dans un contexte où beaucoup d'équipe se proposaient de travailler dans des contextes plus idéalisés). Ceci se traduisait en particulier dans le soin apporté au réalisme des expériences de référence, basées ici sur des modèles couplés océan-glace de mer, là où par exemple [[122](#)] prescrivait les flux de surface de manière assez rudimentaire. Le réalisme des protocoles de forçage des expériences de sensibilité a également concentré beaucoup d'effort dans le but d'examiner la réponse à des changement des vents les plus proches possibles des tendances observées et non simplement un accroissement uniforme des vents.

Une originalité de l'approche que j'ai retenue était aussi de faire le pont entre les considérations liées à la réponse dynamique de l'océan austral et celle liées à la réponse de la biogéochimie marine, et

notamment des flux de CO₂ à l'interface air-mer. Des discussions avec les collaborateurs du groupe DRAKKAR m'ont permis d'identifier très tôt que peu d'équipe étaient en mesure d'aborder la question de la réponse des flux de CO₂ naturel au SAM dans le contexte des travaux de [107] et de [122]. C'est la raison pour laquelle nous avons alors établi une collaboration avec James Orr et Marion Gehlen du LSCE pour élargir le spectre des questionnements aux aspects biogéochimiques et mettre en oeuvre le modèle de biogéochimie marine PISCES dans certaines de nos expériences de sensibilité. C'est ainsi que nous avons pu nous trouver parmi les premiers groupes capables de mener des programmes de simulations de sensibilité au SAM dans des configurations réalistes, en régime *eddyng* avec une composante biogéochimique explicite.

En pratique, le travail mené durant cette séquence s'est inscrit dans le cadre du projet ANR Southern-Cross que j'ai proposé à l'appel JCJC en 2008 et d'une thèse financée par le CEA. Il a notamment impliqué Carolina Dufour, Jan Zika, Jean Marc Molines, Bernard Barnier, James Orr et Marion Gehlen. Mes travaux en lien avec la réponse de l'océan austral aux changements atmosphériques ont menés à plus d'une dizaine de publications. J'en garde le souvenir d'une séquence de travail en équipe très agréable et stimulante. Dans ce qui suit, je décrirai ce que je considère comme les travaux les plus représentatifs de cette période féconde.

Principaux résultats scientifiques obtenus

Réponse de la circulation méridienne aux changements des vents zonaux

Dans l'étude de [129], nous avons étudié la réponse de la circulation meridienne au travers de l'ACC à différents scenarii de changements de vents de surface. Cette étude est basée sur une série d'expériences de sensibilité et s'intéresse notamment à la question de la compensation tourbillonnaire de la réponse de la circulation méridienne. Nos résultats ont mis en lumière le rôle innattendu joué par les méandres stationnaires de l'ACC dans la réponse de la circulation méridienne ainsi que la très forte sensibilité de la réponse au détail de la structure spatiale du changement des vents.

Les expériences numériques de cette étude ont été menées au moyen de la suite de configurations régionales PERIANT du code NEMO, déployée dans le cadre du projet SouthernCross. Il s'agit de configurations couvrant l'océan austral au sud de 30°S, dont les grilles ont construites à partir des configurations globales à 1/2° (ORC05) et 1/4° (ORCA025) respectivement du code NEMO. Ces configurations sont donc forcées à leur frontière nord et leurs résolutions, bien que marginalement *eddy-resolving*, permet d'examiner l'impact de la résolution sur la réponse simulée.

La stratégie expérimentale visait à examiner la sensibilité de la circulation à des changements de structure spatiale et d'intensité de vents. Nous avons utilisé deux structures de perturbations des vents, à savoir des perturbations homogènes spatialement d'une part et des perturbations suivant la structure du SAM d'autre part. Comme l'illustre la figure 6, ces expériences ont été répétées pour des amplitudes de perturbations croissantes. Également répétées pour chacune des configurations (1/2° et 1/4°), ces expériences de sensibilité ont ainsi nécessité un total de 10 simulations numériques.

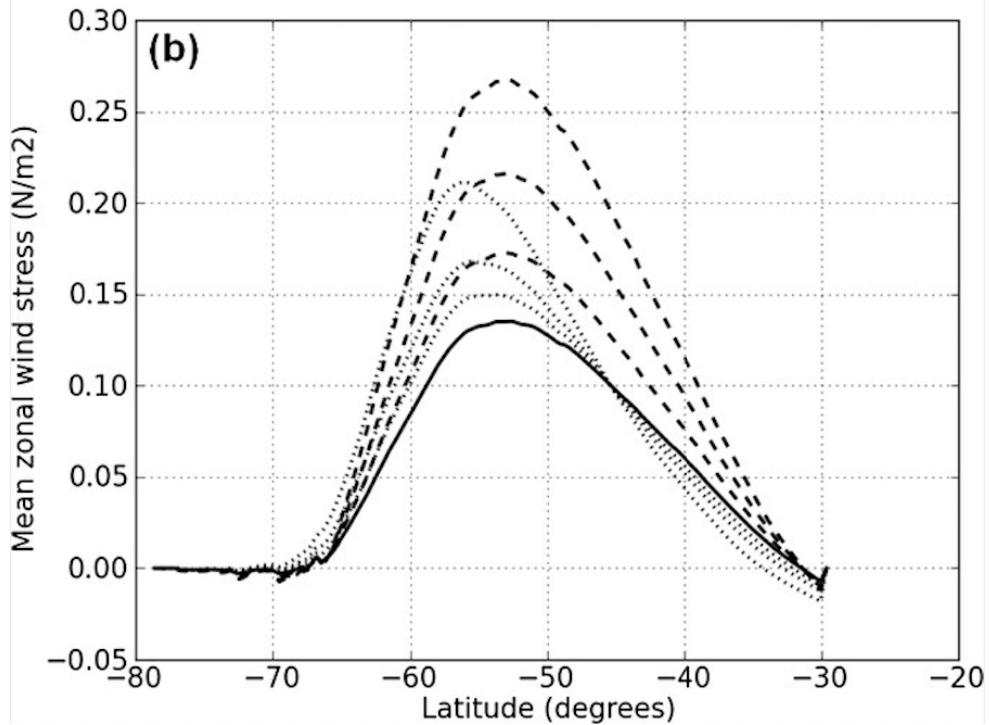


Figure 6: Illustrations de la moyenne zonale des tensions de vent (zonal) de surface imposées dans la série d'expériences de sensibilité de [129]. La ligne pleine indique la moyenne temporelle dans l'expérience de référence. Les lignes en tirets montrent les vents utilisés dans une première série d'expériences où les vents sont intensifiés sans changement de leur structure spatiale. Les lignes en pointillés montrent les vents d'une série d'expériences où les perturbations des vents suivent la structure spatiale de la corrélation du SAM avec les vents de surface.

Les sensibilités décrites par [129] sont essentiellement compatibles avec les comportements de *compensation tourbillonnaire* et de *saturation tourbillonnaire* évoqués plus haut. Ces simulations montrent en effet une relative insensibilité du transport de l'ACC au changement des vents et une plus grande sensibilité de la circulation méridienne. Comme on s'y attend également, on y observe que la réponse de la circulation méridienne au changement des vents est partiellement compensée par des contributions liées aux perturbations par rapport au moyenne zonales et temporelle (*eddies*).

L'analyse de la sensibilité de la circulation méridienne montre toutefois que deux types de mécanismes très différents se combinent pour compenser les changements des vents. La décomposition de la fonction de courant de la circulation méridienne (MOC) calculée en moyenne zonale à densités et latitudes constantes (*density-latitude streamfunction*) montrent en effet qu'en plus des tourbillons transitoires de méso-échelle (*transient eddies*), les déviations à la moyenne zonale associés aux méandres quasi-stationnaires de l'ACC (*standing meanders*) peuvent également compenser de manière non-triviale les changements de circulation lié au vents de surface.

Le premier des résultats importants de cette étude concerne la sensibilité de la MOC à la résolution. Nos résultats ont en effet montré que, de manière surprenante, la contribution des tourbillons transitoires de méso-échelle à la compensation de la circulation méridienne ne croit pas forcément avec la résolution du modèle comme on s'y attendait alors. Dans nos expériences, les méandres quasi-stationnaires de l'ACC répondent ainsi aux changement des vents de manière bien plus efficace à mesure que la résolution croît. Il semblerait donc que le principal apport d'une plus haute résolution du modèle soit ici de mieux prendre en compte le contrôle par la bathymétrie de la géométrie des méandres quasi-stationnaires de l'ACC.

Un second résultat notable concerne l'importance du détail de la structure spatiale des changements de vents de surface dans la réponse de la circulation. Nos expériences ont en effet montré que certaines structures spatiales de perturbations des vents sont susceptibles d'induire des réponses du transport de l'ACC bien plus marquées que des anomalies de vent spatialement homogènes. Ceci

suggère qu'il est important de prendre ce paramètre en considération dans la comparaison des différentes études portant sur ce sujet, ainsi que dans l'analyse de la réponse des modèles de projection climatique au changement de forçage radiatif.

Rôle des tourbillons de méso-échelle dans la compensation des changements de vent

Dans [130], nous avons analysé plus en détail les rôles respectifs des tourbillons transitoires de méso-échelles (*transient eddies*) et des méandres quasi-stationnaires de l'ACC (*standing meanders*) dans la compensation des changements de vents. Cette étude est basée sur les simulations présentées par [129] ainsi que sur des simulations à résolution plus fine ($1/8^\circ$) réalisées au moyen de la configuration PERIANT8 mise en place dans le cadre du projet SouthernCross³. Elle a permis de mettre en lumière dans quelle mesure l'interprétation du rôle des tourbillons dépend du cadre diagnostic utilisé et de guider le développement de paramétrisation du rôle des tourbillons dans les modèles à plus basse résolution.

L'objet principal de cette étude était donc de confronter les conclusions quant aux mécanismes de compensation impliqués dans la réponse de la circulation méridienne aux changement des vents obtenus dans différents cadres diagnostiques (voir la figure 7). Nous y avons donc mis en oeuvre l'approche diagnostique classiquement utilisée pour quantifier la circulation méridienne, à savoir une fonction de courant calculée en sommant les transports de volume en coordonnées densité-latITUDE (comme le regarde par exemple [122]), mais également une approche moins utilisée, à savoir un calcul de la fonction de courant en densité-profondeur proposé par [131,132]. Cette dernière approche (densité-profondeur) permet en effet de quantifier plus naturellement la circulation au travers des lignes de courant moyennes de la circulation horizontale de l'ACC.

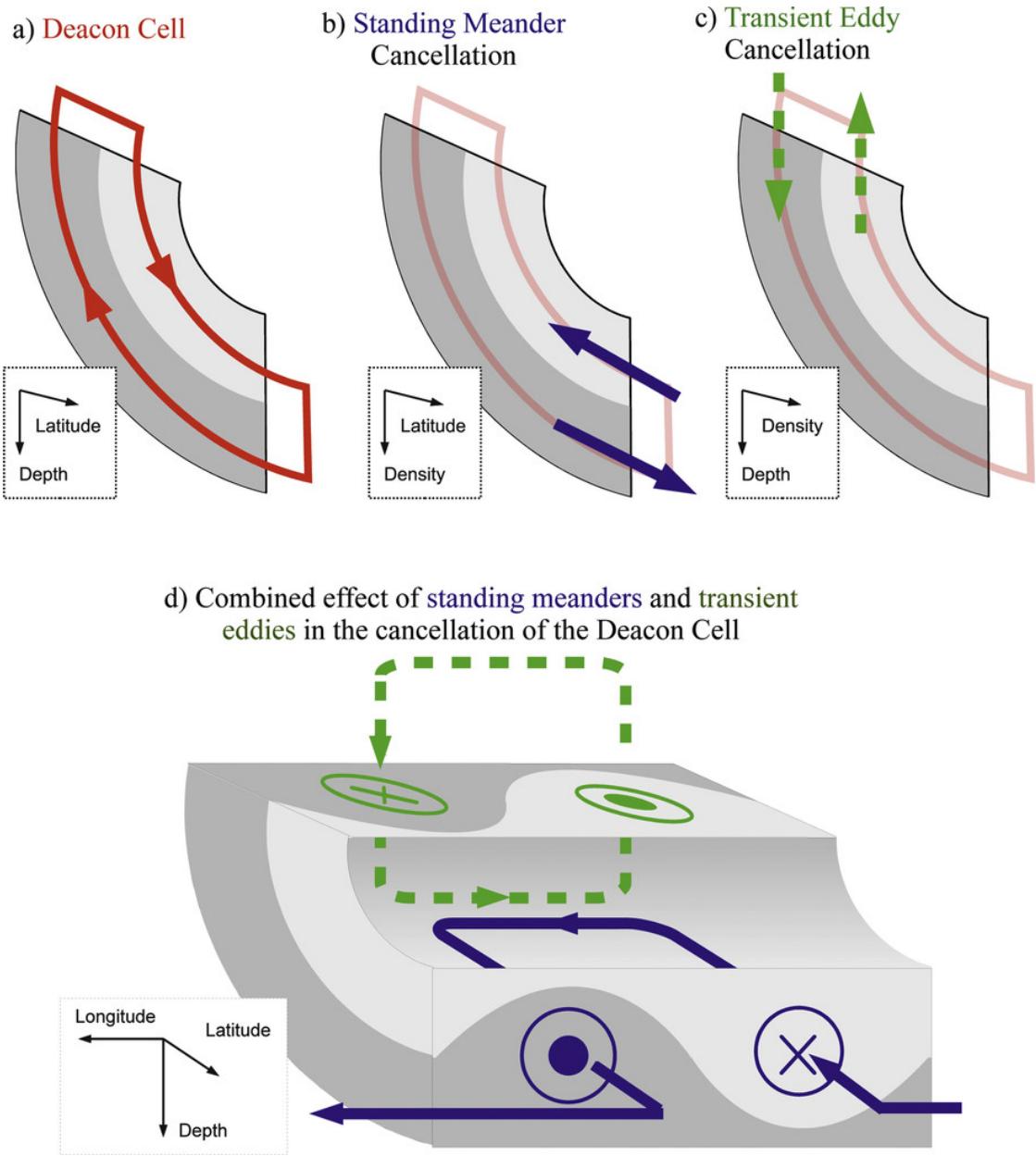


Figure 7: Schema illustrant les principales conclusions de [130] quant aux rôles respectifs des tourbillons transitoires (c) et des méandres quasi-stationnaire (b) de l'ACC dans la compensation de la circulation induite par le vent (a). Le schema (d) montre comment ces deux processus de compensation s'organisent en trois dimensions.

Lorsqu'on analyse la compensation en coordonnées *densité-latitude*, on observe que les transports vers le nord des eaux légères et vers le sud des eaux denses induits par le vent sont compensés par des méandres stationnaires et, dans une moindre mesure, par des tourbillons transitoires. Cette vision est consistante avec les résultats obtenus par [129] et vaut tant pour la circulation moyenne que l'organisation de la réponse à des changements de vents. Mais bien qu'elle soit basée sur le cadre diagnostique classiquement utilisé pour ces questions, cette vision ne rend pas justice au rôle important joué par les tourbillons de méso-échelle. Elle traduit simplement le fait que l'ACC ne suit pas un parcours strictement zonal.

L'analyse de la compensation en coordonnées *densité-profondeur*, par ce qu'elle est plus adapté à la géométrie particulière de l'ACC, donne en revanche une vision plus conforme aux attentes théoriques issus des modèles simplifiés. Dans ce cadre, on trouve en effet que la remontée des eaux denses et la plongée des eaux légères induits par le vent sont plus fortement compensées par des flux dus aux tourbillons transitoires qu'aux méandres stationnaires. Ce cadre diagnostique est donc mieux adapté à l'analyse du rôle joué par les tourbillons de méso-échelle dans la perspective de sa paramétrisation dans les modèles à plus basse résolution. Il permet en tout cas d'illustrer le rôle des tourbillons de

méso-échelle dans l'établissement de la stratification de l'océan global via les échanges verticaux [133].

Ces différences d'interprétation selon le cadre diagnostique valent non seulement pour l'analyse des mécanismes impliqués dans l'établissement de la circulation moyenne mais également dans l'organisation de la réponse aux changements de vent. Ainsi, en coordonnées *densité-profondeur*, les flux verticaux dus aux tourbillons transitoires s'opposent systématiquement et directement aux changements du pompage d'Ekman. En revanche, en coordonnées *densité-latitude*, les flux méridiens dus aux tourbillons transitoires peuvent augmenter pour contrer les changements de transport d'Ekman ou diminuer en réponse aux changements des méandres quasi-stationnaires de l'ACC. Les résultats de [130] montrent en tout cas dans quelle mesure l'interprétation de simulations réalistes dépend du cadre diagnostic utilisé. Ceci justifie à nouveau l'intérêt d'approche de travail mêlant théories et simulations numériques réalistes.

Les résultats de ces deux études [129, 130] soulignent le rôle clef joué par la topographie complexe de l'océan austral dans la réponse de la circulation méridienne et du transport de l'ACC aux changements des vents, notamment via les méandres quasi-stationnaire de l'ACC. Nos résultats suggèrent ainsi qu'il est assez délicat de paramétriser les modèles à basse résolution de sorte qu'ils montrent une réponse compatible avec celle des modèles à plus haute résolution. Parmis d'autres, ces travaux ont contribué à motiver le développement de composantes océaniques résolvant explicitement les processus de méso-échelle dans les modèles du système Terre, notamment ceux utilisés pour CMIP6 [133, 134]. Ils ont également participé à justifier les développements récents de paramétrisations capturant les effet de saturation et de compensation tourbillonnaire, comme par exemple celle du cadre GEOMETRIC [135, 136].

Réponse des flux air-mer de CO₂ naturel aux changements des vents

Dans l'étude de [137], nous avons poursuivi nos travaux sur la réponse de l'océan aux changement des vents en nous intéressant à la réponse des flux air-mer de CO₂ à la tendance du SAM. Nous y étudions comment les changements des vents amplifient le dégagement de CO₂ *naturel*, et réduisent ainsi d'autant le puit océanique de CO₂ *total*. Cette étude trouve ces principales motivations dans le travail de [107] que nous avons cité plus haut, ainsi que les travaux de [138] et [139]. Nous avons revisité ces travaux dans le cadre d'un dispositif expérimental basé sur un modèle à plus haute résolution spatiale afin notamment d'évaluer dans quelle mesure des modèles couplés physique-biogéochimie ne représentant pas explicitement les processus de méso-échelle auraient pu surestimer la réponse du dégagement de CO₂ naturel en réponse au SAM. L'objet de cette étude est donc d'examiner quels éléments nouveaux apporte une meilleure représentation de la compensation tourbillonnaire et de la structure spatiale des changements de profondeur de couche de mélange induit par le SAM [117].

Nous avons mis en oeuvre dans cette étude un dispositif expérimental similaire à celui mobilisé dans nos études de la réponse physique à la tendance du SAM [129, 130]. Nos configurations du code NEMO ont donc été étendues afin d'inclure une représentation explicite des principaux cycles biogéochimiques au moyen du code numérique PISCES, configuré pour représenter le cycle du carbone *naturel*. A cause du coût numérique substantiel de cette extension, nous nous sommes restreint à des expériences à la résolution de 1/2° (PERIANT05), et n'avons reproduit que les expériences de sensibilité à une perturbation typique du SAM (SAM05) ainsi que l'expérience de référence (REF05). Les expériences précédemment réalisées au moyen de la configuration physique seule nous permettent toutefois d'inférer ce que pourrait être la réponse du modèle biogéochimique à plus haute résolution.

Les résultats de notre étude montrent que le flux air-mer de CO₂ naturel augmenteraient dans l'océan austral d'environ 0,1 PgC par an par écart-type du SAM, ce qui est quantitativement

comparable aux résultats de [138, 139]. Nos résultats montrent toutefois que le dégazage serait très inhomogène et aurait principalement lieu dans la zone Antarctique (AZ) de l'océan austral (voir la Figure 8). Nos analyses montrent de plus que cette réponse des flux de CO₂ est largement pilotée par des changements de concentration océanique de surface en carbone inorganique dissous (DIC) mais aussi d'alkalinité (Alk). Nous avons donc consacré une part importante de l'étude à essayer de mieux comprendre quels mécanismes sont impliqués dans cette réponse localisée des concentrations de DIC et de l'Alk de surface.

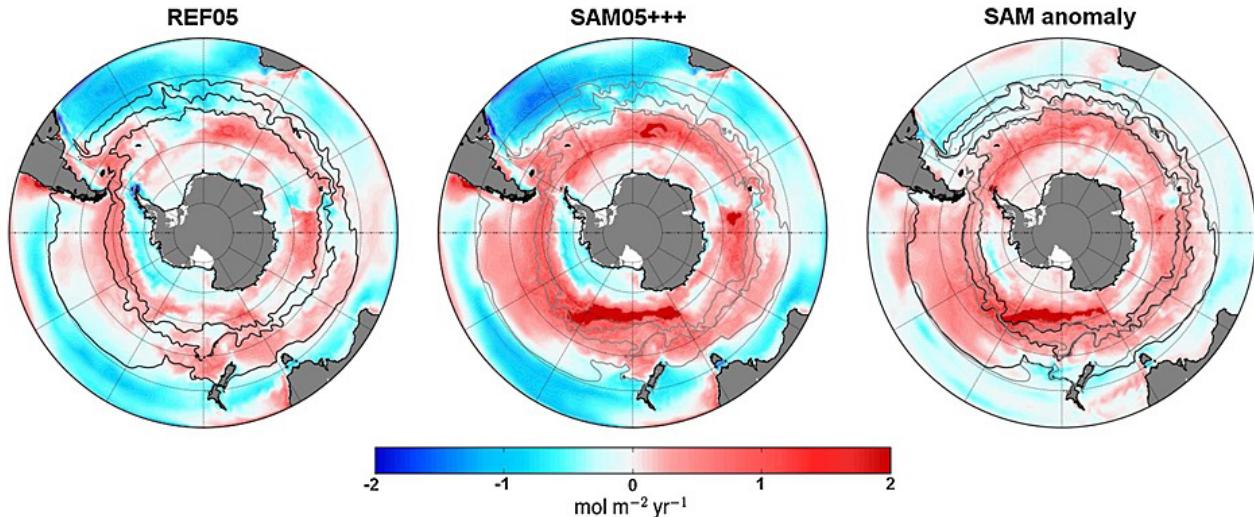


Figure 8: Moyenne des flux air-mer de CO₂ (1995-2004) dans les expériences REF05 (à gauche) et SAM05 (au centre). Le panneau de droite montre la différence entre les deux expériences. Les contours correspondent aux positions moyennes des fronts dans les expériences REF05 (noir) et SAM05 (gris). Les flux positifs indiquent un dégazage de l'océan. Cette illustration reproduit la Figure 2 de [137].

Nous avons ainsi montré que les principaux facteurs contrôlant la réponse des DIC et de l'Alk de surface au SAM seraient la réponse locale de la profondeur de la couche de mélange océanique au SAM ainsi que les changements des gradients verticaux de DIC et d'Alk immédiatement sous la couche de mélange. Il semblerait donc que l'intensité du transport méridien de DIC induit par le vent ne soit le seul paramètre contrôlant la réponse des flux de CO₂ naturel au SAM. Le degré de compensation des changements de transport méridien induit par le vent contrôlerait toutefois pour partie les gradients verticaux de DIC et d'Alk à la base de la couche de mélange. Notre étude suggère ainsi qu'environ un tiers de l'augmentation de la résurgence de DIC induite par les changements des vents serait compensé par le transport liés aux tourbillons de mésoscalaires et aux méandres stationnaires.

Cette étude participe d'une prise de conscience de la complexité des processus impliqués dans la réponse des flux air-mer de CO₂ naturel aux changements des vents, et notamment du rôle clé joué par les changements de profondeur de couche de mélange dans cette réponse. Si notre étude a également permis de confirmer l'importance de bien prendre en compte la compensation des changements de transport méridiens par les tourbillons et les méandres stationnaires, elle montre surtout à quel point c'est le détail de la réponse relative des DIC et de l'Alkalinité qui contrôle la réponse des flux de CO₂ au SAM. Elle souligne enfin l'importance des meandres stationnaires de l'ACC dans la réponse des flux de CO₂ naturel, importance dont une étude plus récente montre qu'elle s'étend également à la composante anthropique des flux air-mer de CO₂ [140].

Activités connexes, conséquence directes et indirectes

Dans le contexte de cette séquence de travail, j'ai eu l'occasion de contribuer à plusieurs autres travaux portant sur les mécanismes impliqués dans la réponse de la circulation de l'océan austral aux changements des vents. Dans le cadre du postdoc de Jan Zika, nous avons par exemple tenté de rationaliser les différents modes de réponse du transport de l'ACC à des changements de vent [141].

Les travaux de cette séquence ont également permis d'établir une collaboration avec Paul Spence à l'UNSW (Sydney), qui a donné lieu à plusieurs visites et échanges scientifiques; cette collaboration a notamment porté sur l'étude des mécanismes de réponse du transport méridien de chaleur au travers de l'ACC [142].

Une conséquence indirecte à plus long terme des travaux engagés durant cette séquence a également été ma contribution au développement d'une fonctionnalité permettant de réduire le coût d'intégration des modèles biogéochimiques dans la plateforme de modélisation NEMO. Comme nous l'avons noté plus haut, l'intégration d'un modèle de biogéochimie complet à la même résolution que le modèle dynamique demande des ressources calcul substantielles. C'est pourquoi il est assez courant d'intégrer ces modèles à partir de sorties de modèles de circulation océanique, mais moyennées sur une grille de résolution spatiale dégradée par rapport au modèle dynamique [143]. L'objet du travail auquel j'ai contribué dans une série de projets successifs a été de faire en sorte que cette fonctionnalité soit disponible dans NEMO dans le cadre d'intégrations conjointes physique-biogéochimie [144].

Une autre conséquence directe de cette première séquence de travail a été la définition et la conduite de la thèse de Gildas Mainsant [145], au cours de laquelle j'ai eu l'occasion de m'intéresser aux changements de propriétés des masses d'eaux en réponse à la tendance du mode annulaire austral (SAM). C'est notamment au cours de cette thèse que j'ai pris conscience de l'importance de la glace de mer dans les changements de flux air-mer en réponse au SAM, ainsi que de l'importance des apports continentaux d'eau douce dans le cycle de vie de la glace de mer. Cette thèse a donc naturellement servi de tremplin, sinon de tremplin, vers la séquence que je décrirai dans le prochain chapitre.

Illustration n°2 : Etude des interactions entre océan austral sub-polaire et calotte antarctique

Ce chapitre présente une deuxième illustration de mes activités de direction de recherche. Il est essentiellement basé sur des travaux menés entre 2014 et 2018 dans le cadre de la thèse de Nacho Merino [146], et poursuivi en collaboration avec des collègues glaciologues de l'IGE.

Contexte scientifique

La zone subpolaire de l'océan austral : processus et enjeux

Le terme *océan austral subpolaire* désigne la fraction de l'océan austral qui s'étend au sud du front polaire (qui marque la limite sud de l'ACC) et dont la position moyenne est proche de 60°S. Cette fraction de l'océan austral comporte notamment les gyres de recirculation des mers de Ross et de Weddell ainsi que les régions côtières sur les talus continentaux autour de l'Antarctique. Une particularité de ces régions est en outre l'existence de cavités océaniques qui peuvent s'étendre jusqu'à quelques centaines de kilomètres sous la calotte glaciaire continentale en régions côtières, formant ainsi des structures flottantes appelées plateformes glaciaires (*ice-shelves*). Ces plateformes glaciaires occupent environ 75% du trait de côte autour du continent antarctique. L'océan austral subpolaire est caractérisé par très forte saisonnalité de ses conditions et le rôle prépondérant qu'y jouent les interactions avec la cryosphère (comme l'illustre la Figure [9]).

Ces interactions avec la cryosphère concernent en premier lieu la glace de mer antarctique. La glace de mer (ou *banquise*) antarctique se forme en hiver dans les conditions atmosphériques extrêmes de ces latitudes (température, humidité, vents). Elle se distingue notamment de la banquise arctique par la très forte saisonnalité de son extension spatiale (variant de 3 à 18 millions de km² selon la saison) de sorte qu'elle comporte généralement peu de glace pluriannuelle et que son épaisseur reste relativement faible. La glace de mer antarctique joue en tout cas un rôle essentiel dans la modulation des flux de flottabilité au sud de l'ACC. En isolant ou non l'océan de l'air froid de l'atmosphère, elle module les flux de chaleur entre l'océan et l'atmosphère. Le cas extrême est notamment celui des *polynies*, ces régions d'océan ouvertes au cœur de la banquise qui permettent des échanges intenses entre océan intérieur et atmosphère. La formation et de la fonte saisonnière de la glace de mer antarctique contrôle également largement les flux d'eau douce à la surface de l'océan austral subpolaire. En fait, la glace de mer est même le principal facteur de redistribution méridienne de l'eau douce dans l'océan austral subpolaire [147, 148].

Les interactions de l'océan austral subpolaire avec la cryosphère concernent également la calotte glaciaire antarctique. La calotte glaciaire antarctique (Antarctic Ice Sheet, AIS) est la plus grande calotte glaciaire au monde. Elle s'étend sur 14 millions de km² et son écoulement du pôle vers les côtes fournit une très large fraction de l'eau douce de l'océan austral. Ce flux d'eau douce vers l'océan austral intervient sous la forme d'un flux d'eau liquide à la base des *ice-shelves* d'une part mais également sous la forme d'un flux de glace solide lors du vêlage intermittent des icebergs à l'extrémité des *ice-shelves*. Comme dans le cas de la banquise, les interactions de l'océan avec la calotte glaciaire sont en fait des interactions couplées où chacun des deux milieux influence l'autre et réagit simultanément au changement des propriétés de celui-ci. Ainsi, comme nous le verrons plus loin, les conditions océaniques contrôlent largement la perte de masse des plateformes glaciaires qui en retour, via les flux d'eau douce, contrôlent largement la stratification océanique.

En tant que lieu privilégié d'interaction entre l'océan, l'atmosphère et la cryosphère, l'océan austral subpolaire joue un rôle clé dans l'océan global et le système climatique terrestre dans son ensemble. Les interactions entre l'océan, l'atmosphère et la cryosphère y permettent en effet la formation des

High Salinity Shelf Waters (HSSW) sur les marges antarctiques, préconditionnant ainsi la formation par cascade gravitaire le long des talus continentaux des eaux antarctiques de fond (AABW) qui tapisse les plaines abyssales de l'océan global. Si la formation des AABW est un processus essentiel pour les océanographes en ce qu'elle participe de la circulation méridienne globale, c'est aussi et surtout un processus essentiel dans le système climatique dans son ensemble en ce qu'il contrôle une part importante de la capacité de puits de CO₂ anthropique de l'océan global [149].

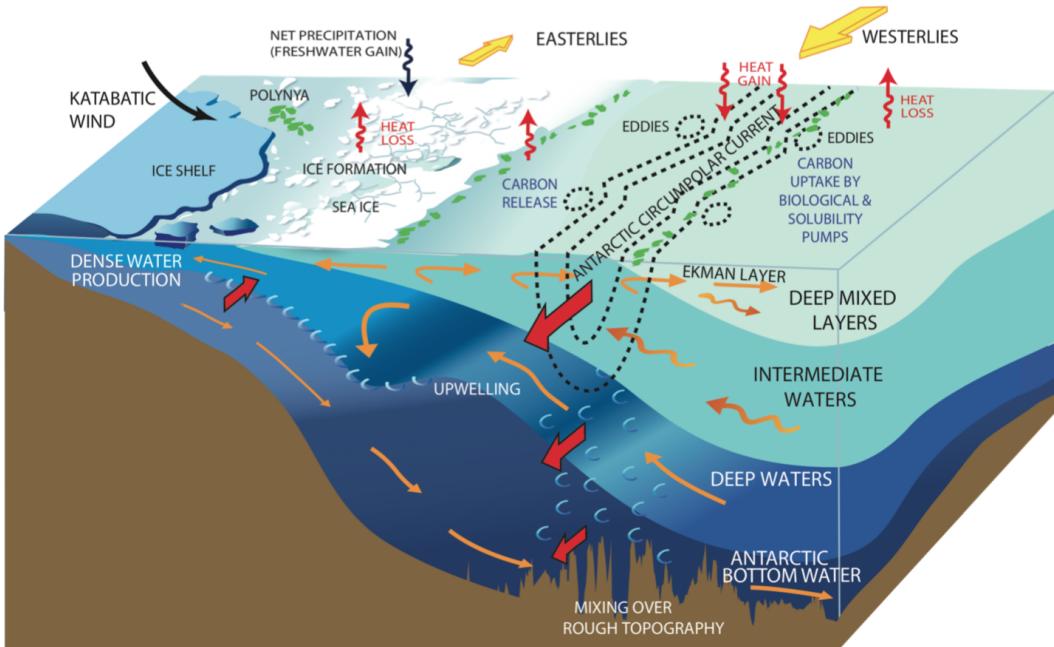


Figure 9: Schéma représentant en coupe méridienne les principales masses d'eaux de l'océan austral, leur circulation ainsi que leurs interactions avec la glace de mer et la calotte glaciaire antarctique. Cette figure est reproduite de [150] et extraite du cours d'introduction à l'océanographie physique de Lynne Talley [151]

Des changements rapides dans les régions antarctiques

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, on observe des changements très rapides dans le système climatique de l'hémisphère sud sous l'effet de l'activité humaine, et en particulier dans l'atmosphère. Nous avons déjà discuté des changements atmosphériques induits par la tendance du mode annulaire austral (SAM), avec notamment le décalage vers le sud et l'intensification des vents zonaux [??]. Plus près du continent antarctique, on observe également une nette évolution d'une structure de circulation atmosphérique appelée *Admunsen Sea Low*, caractérisée par un centre de basses pressions dans la région des mers d'Admunsen et de Ross (voir la Figure [3] pour la toponymie). La variabilité de ce centre de basse pression pilote pour une large part le climat de l'Antarctique de l'ouest [152] et montre des corrélations fortes aux phases du SAM et d'ENSO [152,153]. Ce centre de basse pression montre en tout cas une très nette tendance vers le creusement au cours des dernières décennies [154] induisant ainsi un changement très caractéristique des vents de surface dans les régions cotières de l'Antarctique de l'ouest.

L'extension de la glace de mer antarctique montre comme on l'a vu une légère tendance positive avec de grandes disparités régionales [105]⁴ (voir Figure [11]). Si l'on regarde plus en détail, on observe en fait que ces tendances reflètent des changements, régionalement contrastés, de la saisonnalité de la glace de mer [156] et notamment de la durée de la période englacée [157]. Si l'évolution de la concentration (et donc de l'extension) de la glace de mer antarctique est suivie depuis l'espace depuis longtemps, les tendances multidécennales de son épaisseur sont en revanche plus difficiles à estimer. Les séries temporelles des mesures *directes* sont en effet pour l'instant trop courtes pour estimer ces tendances [158]. Sur des échelles plus longues, les efforts de reconstructions *indirectes* de l'épaisseur

de la glace de mer (largement basées sur des modèles) montrent en tout cas des tendances notables mais leurs incertitudes sont encore très grandes [159, 160].

Les propriétés des masses d'eaux de l'océan austral subpolaire subissent également des changements rapides tant en profondeur que sur les marges antarctiques. Nous avons déjà discuté du réchauffement et de l'adoucissement des AABW aux latitudes de l'ACC; ce signal est en fait détectable dans tous les secteurs de l'océan austral jusqu'au talus continental antarctique [96, 97]. On observe également une contraction du volume des AABW au cours des dernières décennies, signal qui serait en grande partie expliqué par la tendance à l'adoucissement de cette masse d'eau [161]. Il semblerait donc bien que l'adoucissement des AABW soit un signal essentiel des tendances en cours comme l'illustre les flux d'eau douce équivalents diagnostiqués par [97] et reproduits ici dans la Figure [10]. Les eaux côtières sur les marges antarctiques montrent des tendances plus contrastées mais un signal de réchauffement rapide a été détecté auprès de la péninsule antarctique [162] et dans le secteur de la mer d'Admunsen [163] de sorte qu'on observe des tendances au réchauffement auprès des principales cavités d'ice-shelves en Antarctique de l'ouest. De manière générale, les eaux de surface de l'océan austral subpolaire semblent s'être adoucies aux cours des dernières décennies, renforçant ainsi notablement la stratification en sel entre surface et océan intérieur[164].

La calotte glaciaire antarctique semble également s'être engagée dans une transition rapide au cours des dernières décennies. L'altimétrie satellitaire a en effet permis de détecter un rapide perte de masse de la calotte antarctique au cours des dernières décennies, notamment dans les principaux glaciers émissaires [165]. Le taux de cette perte de masse semble même s'être récemment accéléré [166]. Ce signal préoccupe les glaciologues, qui cherchent à mieux contraindre la contribution de la perte de masse de la calotte antarctique à l'augmentation du niveau des mers, mais aussi les océanographes, qui y voient un indice de possibles changements rapides des flux d'eau douce vers l'océan austral. La nature extrêmement nonlinéaire de la dynamique de la calotte glaciaire pose également la question du possible franchissement de points de transition abruptes (*tipping points*) dans l'évolution de celle-ci. L'importance de l'effet d'arc boutant des plateformes glaciaires sur la dynamique glaciaire en amont [167] ainsi que des mécanismes d'instabilité comme la *Marine Ice Sheet Instability* [168] laissent en effet craindre une accélération dramatique de la perte de masse de la calotte antarctique [169]).

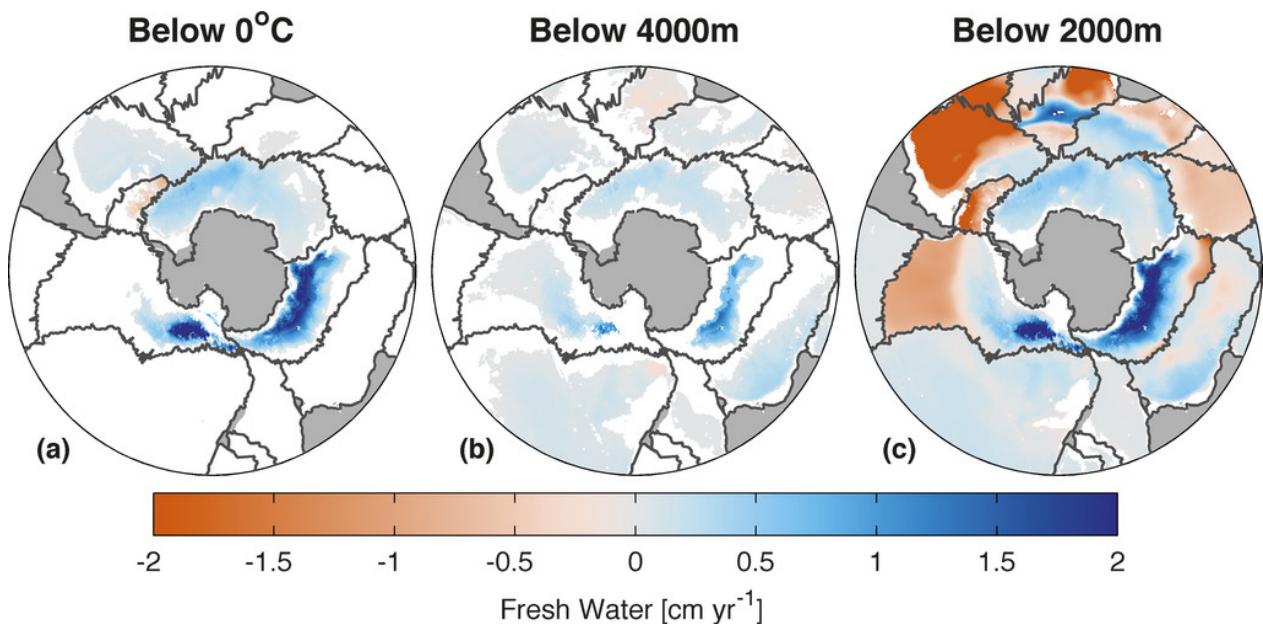


Figure 10: Flux d'eau douce équivalent aux changements de salinité observé dans les eaux abyssales entre les années 1980 et les années 2000 (reproduit de [97])

Rôle des interactions océan-cryosphère dans les tendances observées

La plupart des tendances observées dans les différentes composantes du système climatique mentionnées plus haut sont en fait la manifestation d'une variabilité couplée entre les différents milieux, c'est le cas notamment pour les interactions entre océan et cryosphère. Si l'importance des couplages dynamiques et thermodynamiques entre océan et glace de mer ne fait pas de doute, ce n'est en revanche que durant les années 2000 que l'on a pris conscience de la nécessité de bien prendre en compte la complexité des processus d'interactions entre océan austral subpolaire et calotte antarctique pour comprendre les évolutions de chacun de ces milieux.

Une première illustration de l'imbrication de ces processus d'interactions entre milieux concerne l'effet de la tendance des vents sur l'évolution en cours de la calotte antarctique. On sait en effet que la perte de masse de la calotte antarctique [165] est liée à l'augmentation de la fonte à la base des plateformes glaciaires. On observe en effet un amincissement rapide de nombreuses plateformes glaciaires [170,171], amincissement qui représente environ la moitié de la perte de masse totale de la calotte tandis que l'autre moitié serait liée à l'accélération des écoulements glaciaires dûe à la diminution de l'effet d'arc-boutant des plateformes glaciaires. Il semble donc bien que les changements de fonte à la base des plateformes glaciaires soient le moteur principal des changements de la calotte dans son ensemble. Ce n'est en revanche qu'assez récemment qu'on s'est rendu compte que les changements de fonte à la base des ice-shelves étaient pour partie pilotés par des intrusions d'eaux chaudes dans les cavités dues à des changements de circulation océanique, eux-mêmes déclenchés par la tendance des vents de surface [172].

Une autre illustration, cette fois encore moins intuitive, de l'imbrication de ces processus d'interactions entre océan et cryosphère concerne le lien possible entre la tendance positive de l'extension de la glace de mer antarctique et l'augmentation des flux d'eau douce dûe à la perte de masse de la calotte antarctique. Il se trouve en effet que les modèles de projection climatiques utilisés dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison CMIP5 échouent dans leur ensemble à reproduire la tendance observée de l'extension de glace de mer antarctique [173]. Comme aucun de ces modèles ne comportait de composantes représentant la calotte antarctique et comme en outre le protocole de forçage de ces modèles négligeait la tendance des flux d'eau douce issus de la calotte, l'hypothèse a été tôt émise que l'échec des modèles pouvait indiquer qu'un mécanisme analogue à celui discuté par [174] serait responsable de l'augmentation observée de l'extension de la glace de mer antarctique.

Le mécanisme discuté par [174] est un processus de retroaction entre eau douce et formation de glace de mer. Ces auteurs expliquent en effet qu'un apport d'eau douce en surface a pour effet direct de renforcer les gradients verticaux de densité. Dans des conditions favorables à la formation de glace de mer, le fait que la pycnocline soit plus marquée va alors réduire la possibilité pour les eaux chaudes de subsurface (typiques de l'océan austral subpolaire) de remonter à la surface par convection. De la sorte, la formation de glace de mer sera favorisée par rapport à la convection. Un apport d'eau douce en surface dans l'océan austral subpolaire est donc susceptible de favoriser la formation de glace de mer. Il semble donc naturel de se poser la question du lien entre la perte de masse de la calotte antarctique et l'augmentation de l'extension de la glace de mer antarctique.

Si cette question du lien entre perte de masse de la calotte et glace de mer a été formulée assez tôt, les conclusions des différents travaux de modélisation engagés pour répondre à cette question se sont avérées étonnamment contradictoires. Certains travaux, comme par exemple celui de [175], répondent par l'affirmative et expliquent que les flux d'eau douce liés à la perte de masse de la calotte peuvent quantitativement expliquer la tendance de la glace de mer. D'autres, comme par exemple [173], répondent au contraire que la perte de masse de la calotte ne peut expliquer l'augmentation de l'extension de glace de mer. Force est toutefois de constater que les cadres expérimentaux, très idéalisés, de ces deux études sont très différents, tant dans la formulation des modèles eux même que dans la formulation des expériences de sensibilité. La question de l'impact de la perte de masse de la calotte antarctique sur la glace de mer était donc encore largement ouverte au moment où nous avons entamé nos travaux sur ce thème.

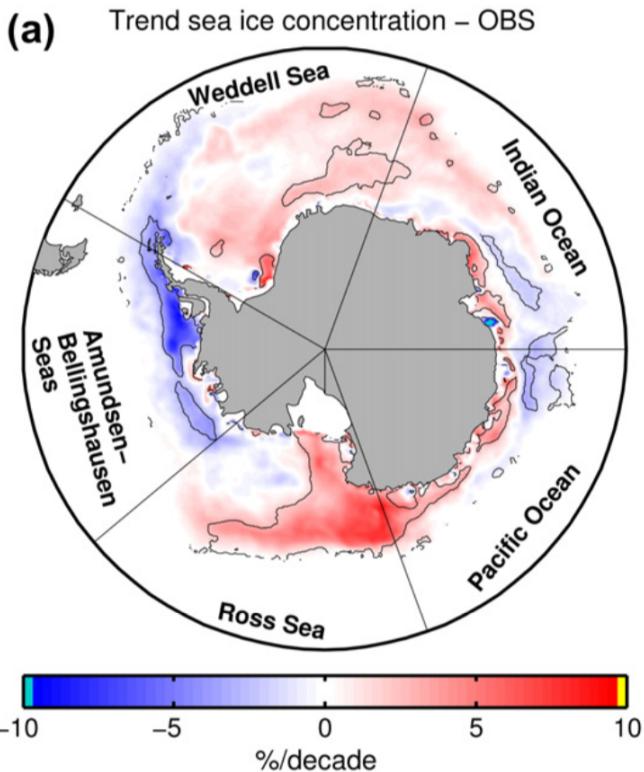


Figure 11: Tendance observée de concentration de glace de mer entre 1980 et 2008 (reproduit de [159])

Positionnement et approche générale

La phase de travail que je souhaite décire ici a été initiée suite aux sollicitations (répétées!) de mes collègues glaciologues du LGGE autour de 2012, et en particulier de Gael Durand. Comme on l'a vu plus haut un faisceau convergeant d'éléments indiquaient alors en effet qu'une part essentielle de l'incertitude quant à l'évolution future de la calotte antarctique était liée aux interactions de la calotte avec l'océan et aux processus de fonte dans les cavités sous les plateformes glaciaires. Aux yeux de mes collègues glaciologues, il était donc nécessaire d'avancer vers une meilleure compréhension des processus physiques responsable de la fonte à la base des plateformes glaciaires et d'entamer le long travail menant à une représentation explicite des processus de couplages entre ocean et calotte⁵.

Conscient pour ma part du fait que les tendances observés dans l'océan austral ne pouvaient pas toutes être directement attribuées aux changements des vents de surface discutés dans le chapitre précédent, et qu'une part de l'incertitude quant à l'évolution de l'océan devait être liée à notre représentation très rudimentaire des interactions avec la calotte, j'ai accepté d'engager un cycle de discussions avec mes collègues dans le but de positionner de manière optimale un travail à l'interface de nos équipes. Il s'agissait alors de définir une question scientifique et une approche permettant d'exploiter au mieux les forces respectives de nos équipes avant de nous engager dans ce champ scientifique que nous savions très compétitif.

Après un certain nombre de discussions ayant permis de clarifier que “*non tous les océanographes ne s'intéressent pas forcément au niveau des mer*” et à contourner les difficultés liées à la mauvaise représentation des processus de formation des AABW dans nos modèles océaniques, nous avons finalement convergé sur le principe d'une thèse à l'interface entre nos équipes. Cette thèse aurait pour ambition d'étudier des aspects spécifiques des interactions calotte-ocean sans aborder directement la question du couplage entre nos modèles. Sur le plan du questionnement océanographique, il était alors évident que nous avions entre les mains des atouts importants pour aborder la question de l'impact de la perte de masse de la calotte antarctique sur la glace de mer grâce notamment à l'expertise disciplinaire de mes collègues glaciologues qui pouvaient guider la construction d'un scénario de flux d'eau douce bien contraint par les observations.

C'est dans ce contexte qu'a démarré la thèse de Nacho Merino [146] sous la direction de Gael Durand et ma co-direction pour le volet océan. Au fil du projet, l'équipe scientifique impliquée s'est naturellement élargie à Nicolas Jourdain suite à son recrutement au LGGE et au démarrage de l'ANR TROIS-AS qu'il a piloté. Le contexte humain, technique et scientifique de ce projet s'est avéré très propice bien que la thématique abordée soit très compétitive scientifiquement. Nous avons notamment pu bénéficier de nombreux développements techniques réalisés par d'autres équipes, dont en particulier le module d'iceberg ICB (adapté de [176]) et la représentation des flux de fonte développée par Pierre Mathiot au UKMO en préparation au couplage de NEMO avec des modèles de calotte. Ces développements nous ont permis de définir un cadre expérimental notablement plus réaliste que ceux déployés par [173] et [175].

Principaux résultats scientifiques obtenus

Estimation du flux de fonte lié aux icebergs

Une première contribution de cette séquence a porté sur l'estimation des flux d'eau douce lié à la fonte des icebergs issus de la calotte antarctique et l'étude de leur impact sur la banquise ([177]). Dans cette étude, nous avons mis en oeuvre un stratégie de simulation basée sur un modèle océan-banquise (NEMO-OCE/NEMO-LIM) couplé avec un modèle lagrangien d'icebergs (NEMO-ICB). Ce système nous a permis d'estimer une climatologie mensuelle des flux de fonte des icebergs et d'évaluer l'impact de ce flux sur l'évolution de la glace de mer au travers de simulations de sensibilité. L'essentiel du travail a ici porté sur l'amélioration et la calibration du modèle d'icebergs ainsi que sur la comparaison aux observations altimétrique.

Un apport important de notre étude réside dans le choix des sources d'informations utilisées pour spécifier les différentes contributions des flux d'eau douce issus de la calotte antarctique. Notre configuration expérimentale nous permet en effet de spécifier indépendamment, et pour chaque plateforme glaciaire, les flux liés à la *fonte basale* et flux liés au *vêlage d'icebergs*. Nous avons pu profiter de la disponibilité d'estimations de ces flux publiées en 2013 et 2014 (par [178] et [170]), et c'est donc sur cet aspect que notre étude contraste avec les précédents efforts de modélisation des icebergs (comme notamment [176, 179]). En pratique, nous avons utilisé les estimations de flux de fonte basale et de flux de vêlage publiées par [170], qui traite indépendamment 32 plateformes glaciaires, et dont les résultats sont globalement en accord avec les estimations de [178].

Un autre aspect particulier du travail tient à la prise en compte explicite des variations avec la profondeur des paramètres océaniques utilisés par le modèle d'iceberg. Ceci recoupe en particulier la prise en compte du cisaillement vertical dans la dérive des icebergs, la prise en compte des profils verticaux de température dans le calcul de la fonte et une représentation de l'interaction avec la bathymétrie. Ces trois améliorations au module NEMO-ICB se sont avérées essentielles pour améliorer la représentation de la distribution des icebergs simulés par le modèle au regard des observations. Nous avons en effet évalué les distributions d'icebergs simulées en comparaison aux estimations obtenues à partir de la signature des icebergs dans le signal altimétrique par [180]. Nous avons ainsi montré que le modèle reproduit les principales caractéristique des distributions observées.

Notre étude a ainsi confirmé que la fonte des icebergs est un phénomène très saisonnier, que la distribution des flux est très organisée par basin et qu'elle affecte directement la production de glace de mer. Au premier orrdre, ces flux de fonte des icebergs ont pour effet d'augmenter la concentration et l'épaisseur de glace de mer tout autour de l'Antarctique. L'analyse montre que cette tendance est directement due à une augmentation de la production de glace de mer en automne et en hiver, à cause de l'intensification de la stratification selon un mécanisme très similaire à celui décrit par [174]. Notre étude montre toutefois que dans certaines régions (dont notamment la mer de Bellingshausen)

la réponse de la glace de mer aux flux de fonte est plus complexe et fait intervenir des processus différents.

Au delà de l'analyse des mécanismes physiques impliqués dans la réponse au flux de fonte, l'une des contributions de notre étude est également la mise à disposition d'une climatologie des flux de fonte liés aux icebergs. Cette climatologie peut être utilisée pour des études s'intéressant à l'impact des flux d'eau douce (notamment sur la formation de masse d'eau) à partir d'observations. Elle peut également être utilisée dans des modèles océaniques qui ne permettent par une représentation explicite de la dérive des icebergs, ce qui est notamment le cas de l'essentiel des composantes océaniques utilisées dans les systèmes de projection climatique. Cette climatologie, qui est depuis régulièrement mise à jour par Nicolas Jourdain, a ainsi été proposée dans le cadre du protocole de forçage des expériences OMIP coordonnées par le CLIVAR OMDP (voir [181]).

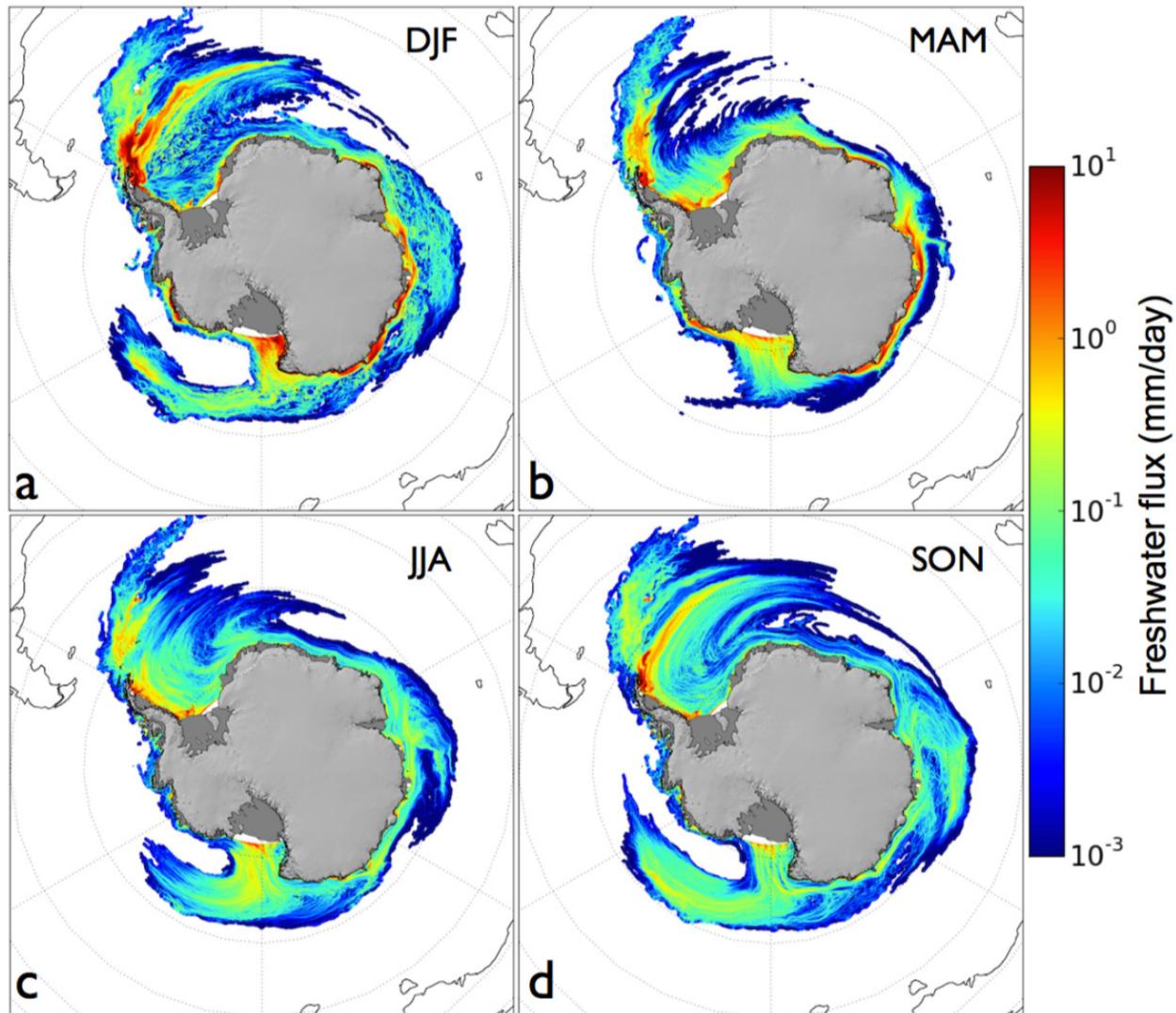


Figure 12: Climatologie du flux d'eau douce du à la fonte des icebergs dans l'océan austral (reproduit de [177])

Impact des changements de flux d'eau douce sur la glace de mer

La deuxième principale contribution de cette séquence a porté sur l'étude de l'impact des changements de flux d'eau douce induits par l'évolution de la calotte antarctique sur la banquise au cours des dernières décennies [182]. L'objet de cette étude était de contribuer à faire avancer la controverse ouverte par les résultats contradictoires des études de [173] et de [175], en prenant en compte les avancées les plus récentes dans la représentation des flux d'eau douce issus de la calotte antarctique dans les modèles océaniques. Par rapport aux études précédentes, notre travail contraste notamment par la séparation des contributions des flux de fonte basale et des flux liés au vêlage, et

l'utilisation d'un modèle d'icebergs interactif pour distribuer cette dernière composante dans l'océan austral. Les flux liés à la fonte basale sont quant à eux répartis en entrée des cavités d'ice-shelves.

La principale contribution de notre étude porte sans doute sur la manière dont nous avons construit notre protocole d'expériences de sensibilité au changement de flux d'eau douce. Nous proposons dans cet article de comparer les résultats de deux simulations correspondant respectivement à une situation typique de la période 2005-2010 (CTR) et à une situation typique de la période 1990-1995 (FW-). Pour l'expérience CTR (2005-2010), la fonte basale et les flux de vêlage sont tirés des reconstructions de bilan de masse des plateformes glaciaires antarctiques publiées par [170] comme pour notre étude précédente ([177]). Ces reconstructions proposent d'estimer la fonte basale (*basal melt balance*, BMB) comme le résidu d'un bilan de masse des ice-shelves contraint par les observations. Pour chaque plateforme glaciaire, ce bilan prend la forme

$$\frac{dh}{dt} = GLF + SMB - CF - BMB$$

qui exprime que les changements d'épaisseur des plateformes (qui sont observés par altimétrie) peuvent être dus aux flux de masse au travers de la ligne d'échouage (*grounding line flux*, GLF), au bilan de masse de surface (*surface mass balance*, SMB), au vêlage d'icebergs (*calving flux*, CF) ou à la fonte basale (*basal melt balance*, BMB). Les estimations de [170] portent sur la période 2005-2010, de sorte que, pour l'expérience FW- (1990-1995), nous avons du introduire des hypothèses supplémentaires pour construire le forçage. Le flux à la ligne d'échouage (GLF) est estimé à partir de [183], le bilan de masse de surface (SMB) est supposé inchangé (comme le suggère [184]) de même que le flux de vêlage (de manière consistante avec [185]). Cette approche nous permet ainsi d'obtenir une borne supérieure pour les changements de fonte basale entre les périodes 1990-1995 et 2005-2010, que nous estimons à un changement d'environ 350 Gt/an d'eau douce additionnelle.

Le jeu d'expérience de sensibilité est finalement complété d'une expérience (ATM-) pour laquelle le forçage atmosphérique est modifié en phase avec la tendance des vents de surface de sorte que notre stratégie expérimentale nous permet d'évaluer l'importance relative des changements atmosphériques et des changements de flux de fonte sur les tendances de glace de mer. De manière générale, notre étude montre que les changements de flux d'eau douce auraient induit des changements de glace de mer commensurables avec les changements dus à l'évolution de la circulation atmosphérique. Comme l'illustre la figure ??, l'augmentation de la fonte basale induirait une augmentation de la concentration de glace de mer de l'ordre de 1 à 2% par décennie. Nos résultats montrent ainsi qu'environ 50% du changement de volume de la banquise antarctique au cours des dernières décennies serait attribuable aux changements de flux de fonte, ce qui semblent donc confirmer les conclusions obtenues par [175].

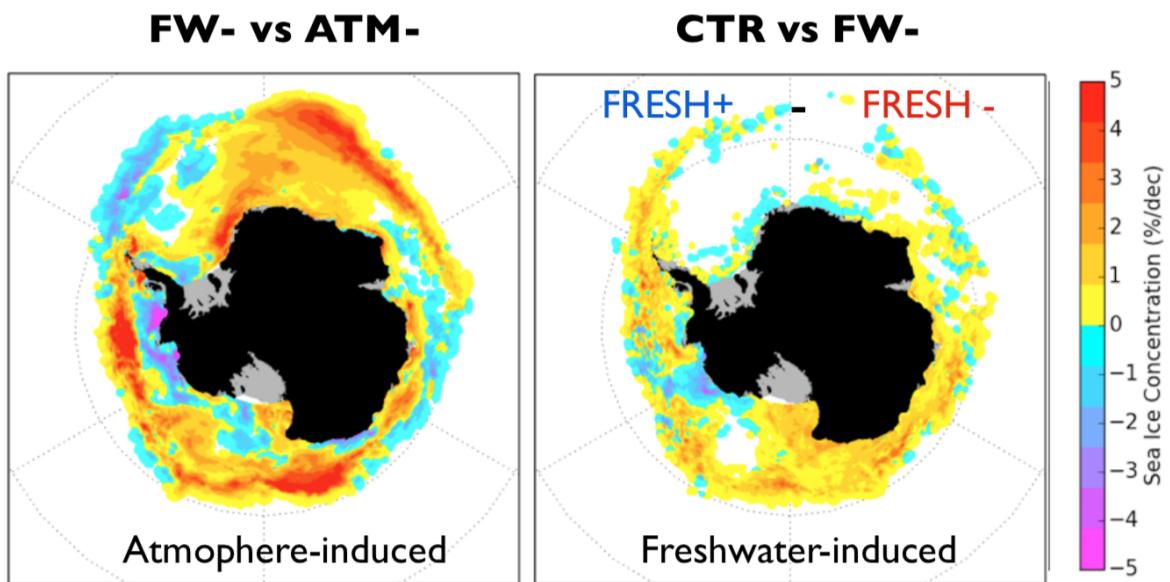


Figure 13: Estimation des changements de concentration de glace de mer induits par les changements de propriétés atmosphériques (à gauche) et par les changements de flux d'eau douce (à droite) (reproduit de [182])

Toutefois, comme précédemment dans l'étude de [177], nos résultats font également ressortir le comportement singulier des zones côtières ouest antarctiques dans leur sensibilité au flux d'eau douce. Nos simulations suggèrent en effet que la concentration de glace de mer aurait décrue dans la mer d'Admunsen en réponse à l'augmentation du flux de fonte basale. Une analyse plus approfondie nous a permis d'illustrer que cette sensibilité faisait intervenir un mécanisme différent de celui décrit par [174]. Dans cette région, les eaux de subsurface sont en effet notablement plus chaudes qu'ailleurs en Antarctique; de plus l'augmentation du flux de fonte en aval des principales plateformes glaciaires y est très importante. Nous avons montré que la réponse faisait intervenir une augmentation de l'upwelling côtier au niveau du talus continental. Le flux de chaleur induit par cet upwelling a pour effet de favoriser la fonte de la glace de mer. Ce mécanisme particulier a depuis été reproduit et documenté par [186].

Activités connexes, conséquence directes et indirectes

Le travail de thèse de Nacho Merino a également porté sur un volet de modélisation d'écoulements glaciaires, là encore dans le contexte de la préparation au couplage entre modèles océaniques et modèles de calotte. Ce travail, plus directement encadré par G. Durand, s'est concentré sur l'étude de l'impact des incertitudes dans la formulation physique des modèles d'écoulements glaciaires sur les prédictions de la migration de la ligne d'échouage en réponse à un changement de forçage océanique. Le scénario considéré est une situation favorable à l'instabilité de la calotte au mécanisme MISI (Marine Ice Sheet Instability) retenu pour l'exercice d'intercomparaison MISMIP+ décrit par [187]. Dans ce contexte, les résultats de Nacho Merino ont montré l'importance de la loi de friction basale sur les prédictions de migration de la ligne d'échouage. Ils ont en tout cas permis d'accompagner une étape importante du travail de l'IGE dans la perspective de la représentation explicite des couplages glace / ocean dans les modèles climatiques.

Une conséquence notable, bien que non-prévue, de cette séquence de travail sur les interactions glace/océan en Antarctique a été notre contribution à l'amélioration de la représentation des interactions icebergs-océan dans le modèle d'icebergs de NEMO. Comme je l'ai décrit plus haut, nous avons en effet proposé plusieurs améliorations au modèle NEMO-ICB (prise en compte du cisaillement vertical dans la dérive des icebergs, prise en compte des variations verticales de température dans leur fonte et représentation de leurs interactions avec la bathymétrie). Ces améliorations ont été décrites dans [188] puis versées dans la version de référence de NEMO en

2018. Cette meilleure représentation de la physique des icebergs s'est par la suite avérée également très importante dans d'autres régions du globe, comme l'ont montré [189].

Dans la continuité de cette séquence, Nicolas Jourdain m'a invité à poursuivre nos collaborations sur les interactions glace/océan en Antarctique, notamment dans le cadre de ses travaux sur le secteur de la mer d'Admunsen (dans le contexte du projet ANR TROIS-AS et de la thèse de Marion Donat-Magnin). Ces travaux ont porté sur la représentation explicite des cavités d'ice-shelves dans les modèles océaniques et sur l'étude de leur impact sur la circulation océanique, en particulier dans la mer d'Admunsen. Nous avons ici largement bénéficié du travail engagé par le UKMO pour préparer la représentation des cavités d'ice-shelves dans NEMO. Les travaux auxquels j'ai eu l'occasion d'être associé ont porté sur l'impact des lois pariétales à l'interface ice-shelfe/océan sur la fonte basale simulée [190], sur la sensibilité de la fonte aux changements atmosphériques [186] et sur la représentation de l'impact de la marée sur la fonte dans les cavités d'ice-shelves [191].

Illustration n°3 : Etude de interactions d'échelles dans l'Océan Atlantique Nord

Ce chapitre présente est une troisième illustration de mes activités de direction de recherche. Il est essentiellement basé sur des travaux menés entre 2016 et 2020, dans le cadre de la thèse d'Adekunle Ajayi [192] et du projet SWOT Science Team (2016-2019) de l'équipe MEOM que j'ai co-animé avec Emmanuel Cosme. Les travaux présentés ci-dessous portent sur l'étude des échanges d'énergie cinétique entre échelles aux latitudes moyennes; ils ont été menés sur la base de simulations numériques de la circulation de l'Océan Atlantique Nord menées en préparation à la mission SWOT.

Contexte scientifique

Circulation océanique, énergie cinétique et mélange irréversible

La dissipation et le mélange irréversible à micro-échelle (1mm-1m) sont des paramètres clés contrôlant la circulation océanique [193]. C'est pourquoi leur étude concentre l'attention d'une fraction importante des océanographes physiciens. Malgré de nombreuses avancées au cours des dernières décennies, la compréhension et la représentation des paramètres contrôlant la dissipation et le mélange irréversible dans l'océan n'en demeurent pas moins des problèmes encore largement ouverts aujourd'hui [194]. Du point de vue pratique, la représentation de la dissipation et du mélange irréversible est en tout cas l'une des principales sources d'incertitude irréductible des composantes océaniques des modèles de projection climatique [48].

A cause de la nature turbulente des écoulements océaniques (de 1m à 1000km), le mélange irréversible à micro-échelle est intrinsèquement lié à la circulation de plus grande échelle, au mélange turbulent et aux transferts de variance entre les échelles qu'elle induit. Ainsi, si, comme on l'a vu, la circulation à grande échelle (circulation globale et macroturbulence océanique) dépend du mélange irréversible, le mélange irréversible dépend lui-même de la circulation à plus grande échelle, des échanges d'énergie cinétique entre les échelles et de sa dissipation. Dans ce contexte, il est généralement admis que réduire l'incertitude liée à la représentation du mélange et de la dissipation dans les modèles océaniques requiert de mieux comprendre et de mieux contraindre l'énergétique de ces modèles [196, 197]. En pratique, il s'agit de s'assurer que les modèles représentent chacun des réservoirs d'énergie mécanique de l'océan ainsi que les processus d'échanges entre ces réservoirs (que ces processus soient représentés de manière explicite ou non dans le modèle).

Faire en sorte que les modèles de circulation imitent les échanges d'énergie mécanique de l'océan réel suppose évidemment tout d'abord d'avoir identifié les réservoirs, les sources et les puits d'énergie mécanique de l'océan réel. On sait sur ce point que la principale source d'énergie mécanique de la circulation océanique est liée au forçage par le vent [198] (le forçage de la marée est évidemment également important quantitativement). L'énergie mécanique injectée par les échanges de quantité de mouvement à l'interface air-mer est ensuite redistribuée dans l'océan, où elle alimente des mouvements de la micro-échelle à l'échelle globale. Environ 10% de cette énergie est *in fine* dissipée dans les couches de surface de l'océan, le reste serait dissipé auprès du fond [199], ou pour une faible fraction dans l'océan intérieur. Toutefois de grandes incertitudes subsistent quant au détail des processus impliqués dans ces échanges.

Le sort de l'énergie cinétique de méso-échelle

Parmi les réservoirs d'énergie mécanique de l'océan, la dynamique dite de méso-échelle fait quelque peu figure d'*éléphant dans la pièce*. Les mouvements océaniques de méso-échelle seraient en effet le

principal réservoir d'énergie cinétique aux échelles de temps superinertielles [200]. La dynamique de méso-échelle est une composante de la macro-turbulence océanique; elle est associée aux tourbillons et aux fronts d'échelle typique de l'ordre de quelques rayons de déformation de Rossby (~ 50 km à 500 km, voir par exemple [198]). En termes dynamiques, ces structures sont bien décrites par le régime asymptotique *quasi-géostrophique* (caractérisé par de faibles nombre de Rossby et nombre de Froude). Ces mouvements résultent essentiellement de l'instabilité barocline des grands systèmes de courants mis en mouvement par les vents de surface [201]. Ils sont aujourd'hui bien connus grâce à près de 30 années d'observation depuis l'espace par les altimètres conventionnels, comme l'illustre la Figure [14].

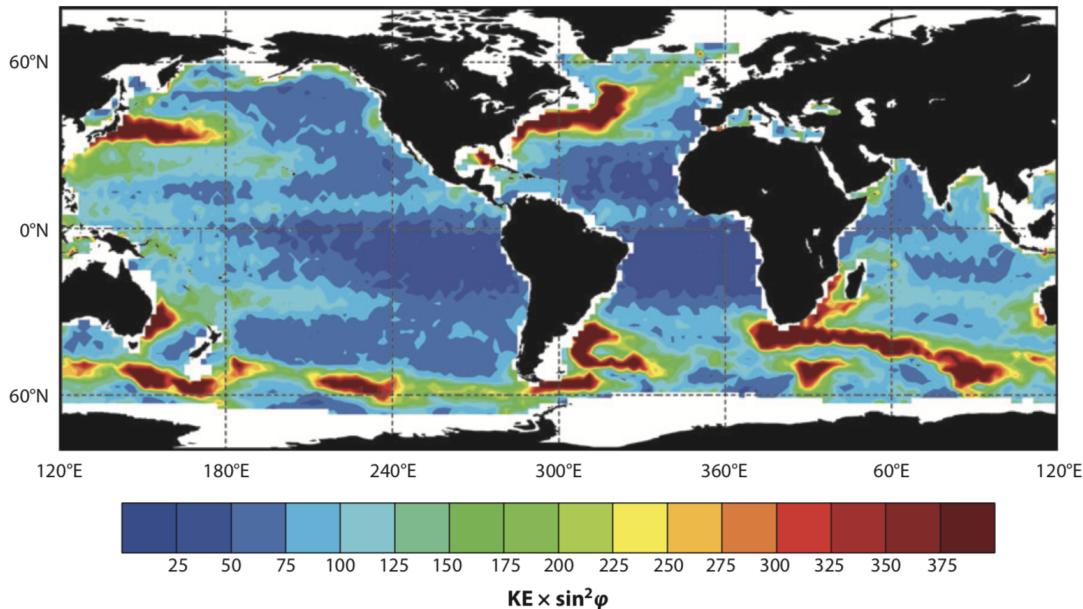


Figure 14: Estimation de l'énergie cinétique de surface [$(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})^2$] associée à la circulation géostrophique. L'énergie cinétique est ici multipliée par $\sin^2 \varphi$ où φ désigne la latitude (source: [202]).

Comprendre le sort de l'énergie cinétique de méso-échelle (comment elle circule, où et comment elle est dissipée ou échangée avec d'autres échelles) est donc une question importante pour les océanographes physiciens. Elle a été abordée en combinant des observations (in-situ et satellite), des modèles théoriques et des modèles réalistes. L'altimétrie satellite a permis de décrire la distribution de l'énergie de méso-échelle à l'échelle du globe [??] ainsi que la manière dont elle est redistribuée par les interactions non-linéaires [203,204]. Ces travaux ont alors suscité des avancées théoriques pour expliquer les observations [??,205,206] et des analyses sur la base de modèles réalistes [207,208,209].

Le consensus actuel est que l'énergie cinétique de la méso-échelle est essentiellement injectée par l'instabilité barocline et que cette énergie subit pour une large part une cascade inverse depuis les échelles d'injection vers des plus grandes échelles [203,210] et des plus basses fréquences [42] (voir la Figure [15]). La rationalisation théorique de cette cascade inverse est encore imparfaite, mais il s'agit d'un processus nonlinéaire dont on pense qu'il combinerait des composantes barotropes et baroclines [206]. On pense également que cette cascade inverse serait modulée par les fluctuations saisonnières de la stratification océanique et pourrait se combiner à une cascade directe vers les fines échelles dans certaines circonstances [211,212].

Cascades turbulentes et dynamique de fine échelle

Au cours des dernières années, l'intérêt pour ces questions d'échanges énergétique inter-échelle dans les régimes de macro-turbulence océanique s'est renouvelé, en particulier suite à plusieurs travaux qui ont identifié des mécanismes qui permettraient d'entretenir une cascade directe d'énergie

cinétique beaucoup plus efficace que l'on ne le pensait jusqu'alors [210]. Ces mécanismes sont liés au fait que les écoulements océaniques ne sont pas rigoureusement décrits par le régime *quasi-geostrophique* mais dévient légèrement de ce régime asymptotique, notamment près de la surface [213,214]. Il semblerait ainsi que deux types de mouvements seraient susceptibles de participer à l'établissement d'une cascade directe d'énergie cinétique : la *dynamique frontale de surface* (qu'on associe généralement au régime dit de *Charney*) ainsi que la dynamique hors équilibre liée aux *mouvements ondulatoires* (ondes internes, ondes inertielles).

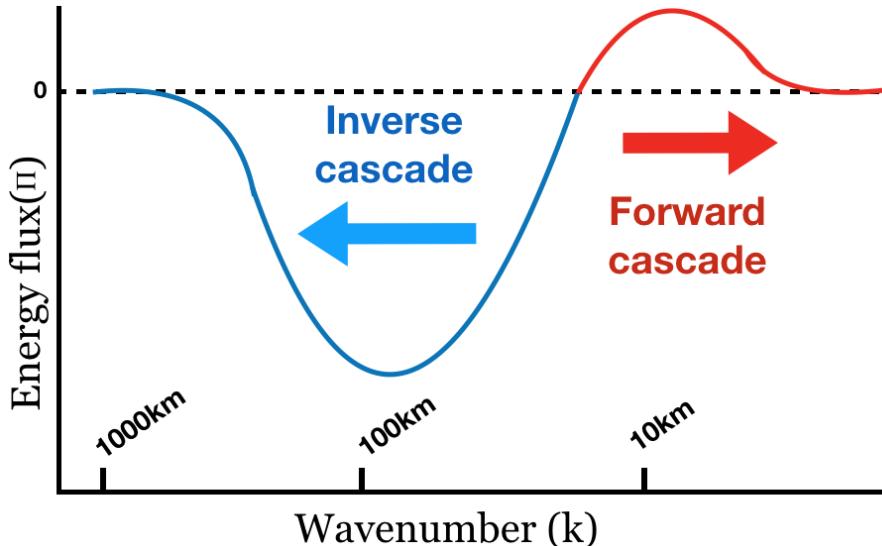


Figure 15: Schéma illustrant les flux inter-échelle d'énergie cinétique aux latitudes moyennes. en bleu : cascade inverse vers les grande échelles; Ren rouge : cascade directe vers les fines échelles. Les échelles spatiales sont indicatives.

Une première route possible pour une cascade directe de l'énergie cinétique de méso-échelle vers les échelles dissipatives pourrait donc être liée à l'intense activité frontale à submesoéchelle dans les couches de surface de l'océan. Cette dynamique quasi-équilibrée et intensifiée en surface partage beaucoup de similarités avec la dynamique quasi-geostrophique observée à plus grande échelle ou à l'intérieur de l'océan. Il semblerait toutefois que ce régime de Charney puisse être de plus associé à une intense cascade directe [215,216]. De nombreux travaux récents ayant par ailleurs montré la très forte saisonnalité de cette dynamique frontale, tant sur la base de modèles numériques [216,217,218] que d'observations [219,220,221], la question de la saisonnalité des échanges d'énergie cinétique apparaît donc assez centrale [212,222,223].

Une deuxième route possible pour une cascade directe de l'énergie cinétique de méso-échelle pourrait impliquer des interactions entre mouvements quasi-équilibrés et mouvements hors équilibres (ondes internes, oscillation inertielles). Plusieurs mécanismes impliquant des ondes proches inertielles (voir [224]) ont été identifiés au cours des dernières années [225,226,227,228]. Il s'agit pour l'instant de mécanismes théoriques liés à des configurations d'écoulements particulières, dont certaines impliquent des forcages externes (vents, ondes internes), mais une image générale semble déjà émerger (voir par exemple le très bonne synthèse de [229]). Ces mécanismes posent évidemment la question de l'interaction avec les ondes internes de manière générale, en premier lieu desquelles les ondes de marée interne. Là encore, la forte saisonnalité de l'expression de surface de la marée interne laisse supposer que les échanges énergétiques qui l'impliqueraient pourraient eux aussi être modulés en fonction de la saison [230].

Au moment où nous avons commencé nos travaux sur ces thématiques, la question de l'existence d'une cascade directe était encore hypothétique ou tout au moins fondée sur des considérations relativement théoriques. La possibilité de déployer des modèles réalistes résolvant simultanément une fraction du spectre de la marée interne et une partie de la dynamique de submesoéchelle ouvrirait alors la possibilité d'aborder ces questions en termes quantitatifs et de confronter les différent

mécanismes identifiés dans un même contexte réaliste. L'analyse de ces modèles numériques permet en tout cas de préparer l'étude des échanges énergétiques inter-échelle qu'on espère pouvoir mener avec les données de la mission altimétrique SWOT [231].

Positionnement et approche générale

Le travail que nous avons engagé sur ces thématiques du "sort de l'énergie de méso-échelle" s'inscrit donc dans le contexte particulier de l'émergence entre 2010 et 2015 de modèles de circulation océanique capables de décrire de manière "réaliste" la dynamique de submésoscale à l'échelle des bassins océaniques. Ces développements étaient largement motivés par la perspective de l'altimétrie à large fauchée, notamment les études d'observabilité à mener en préparation à la mission SWOT. Ils étaient également simplement rendus possibles par l'évolution des calculateurs. Ce sont en tout cas ces simulations, comme par exemple les simulations du JAMSTEC (OFES) entre 2011 et 2014 ou la simulation LLC4320 du JPL (MITgcm) en 2015, qui ont permis de mettre en lumière l'importance de la saisonnalité de la dynamique de submésoscale. Pourtant, comme l'ont montré les discussions dans le cadre de la SWOT Science Team, ces modèles avaient alors relativement peu été confrontés à des observations et aucun exercice d'intercomparaison systématique de ces modèles entre eux n'avait encore été mené.

Dans le cadre des activités de notre équipe en préparation à la mission SWOT, nous avons fait l'analyse que disposer de nos propres modèles réalistes *submesoscale-permitting* était une condition nécessaire pour aborder dans de bonnes conditions la préparation des chaines de traitement et des algorithmes pour traiter les données de la mission. Un premier effort a donc été engagé en 2014-2015 avec le développement de la configuration NATL60 du code NEMO et la production d'une première simulation dans le cadre des "Grands Challenges GENCI 2014". Cette première simulation s'est avérée être affectée par une instabilité numérique [232], mais a toutefois pu être exploitée par [233] et [234]. Une fois l'instabilité corrigée, nous avons pu engager une nouvelle campagne de calcul en 2016, dont les résultats ont largement été utilisés depuis lors dans le contexte de la préparation de la mission SWOT [235, 236, 237, 238].

Ces efforts ont été poursuivis en 2017-2018 en collaboration de la société Ocean Next avec l'objectif de rendre nos simulations encore plus réalistes en incluant une représentation explicite des courants de marée barotrope et des ondes de marée internes. Les travaux préparatoires à la mission SWOT ayant en effet souligné à quel point la dénivellation de surface de l'océan aux échelles <50Km risquait d'être affectée par la marée interne. La configuration eNATL60 du code NEMO a été développée dans ce contexte, en collaboration avec une équipe de collègues de la SWOT Science Team, et deux simulations, respectivement avec et sans marée, ont été produites [239]. Ces simulations font depuis l'objet d'analyses dont l'une d'entre elles est décrite plus bas.

Parmi les travaux menés sur la base des configurations NATL60 et eNATL60, j'ai pris le parti de ne présenter ici que les travaux portant sur les processus océaniques en tant que tels et de laisser de coté les études d'observabilité ou le développement d'algorithmes en préparation à la mission SWOT. Je décrirai donc dans ce qui suit trois études portant sur la variabilité et le sort de l'énergie de méso-échelle menées dans le cadre de la thèse d'Adekunle Ajayi [192]. Ces travaux ont été conduits dans le cadre de collaborations établies au sein de la SWOT Science Team et du CLIVAR Ocean Model Development Panel. Ils ont directement bénéficié des moyens et du contexte du projet CMEMS GLO-HR portant sur l'évolution du système opérationnel de prévision de Mercator Ocean International. Ces travaux ont été rendus possibles en pratique par l'utilisation des outils d'analyse de données massives de l'écosystème logiciel PANGEA.

Principaux résultats scientifiques obtenus

Variabilité spatiale et temporelle de l'échelle des tourbillons en Atlantique Nord.

Un premier travail a porté sur la description de l'échelle spatiale des tourbillons océaniques, et de la variabilité spatiale et temporelle de celle-ci [240]. Nous y avons étudié en particulier les tourbillons d'échelle $<100\text{km}$ dans le basin atlantique nord. Connaitre les échelles dominantes de la variabilité tourbillonnaire est en effet important dans le contexte du développement d'algorithmes d'estimation de la topographie dynamique des océans par altimétrie, qui pour beaucoup utilisent des informations statistiques *a priori* sur la variabilité océanique (voir [241]). Cette information est également clé pour la calibration des fermetures sous mailles de l'impact des tourbillons océaniques basées sur des hypothèses de longueur de mélange (voir par exemple [242]). Sur un plan plus fondamental, c'est enfin une première étape naturelle pour comprendre où et comment se dissipe l'énergie de la variabilité de méso-échelle.

Afin de garantir la robustesse de nos résultats, nous avons basé cette première étude sur deux simulations numériques distinctes et utilisé deux approches complémentaires pour décrire les échelles dominantes de la variabilité tourbillonnaire. Les simulations utilisées sont respectivement basées sur les codes HYCOM (simulation HYCOM50 décrite par [243]) et NEMO (simulation NATL60 décrite par [235]); leurs résolutions horizontales proches du kilomètre les rendent *a priori* apte à représenter la macro-turbulence océanique aux échelles $>10\text{km}$ que devrait observer la mission SWOT. L'échelle des structures tourbillonnaires est quant à elle estimée à partir d'un algorithme de suivi de tourbillons d'une part et comme l'échelle intégrale calculée à partir du spectre d'enstrophie de surface d'autre part.

Nos résultats montrent que les échelles dominantes de la macroturbulence océanique varient notablement au fil des saisons et au travers du basin nord atlantique. Ces prédictions sont reproduites de manière robuste par chacun des modèles. Nos analyses montrent que la variabilité spatiale est constistante avec les variations au travers du basin de l'échelle des modes les plus instables de l'instabilité barocline. La variabilité temporelle montre le fort constraste entre la fin de l'été, caractérisée par une échelle intégrale assez grande et peu de variance à fine échelle ($<50\text{km}$), et la fin de l'hiver, où l'échelle intégrale devient $<50\text{km}$ et la variance à fine échelle croit fortement (voir figure 16). Nos analyses ont montré que cette variabilité saisonnière résulte de l'émergence d'une population de tourbillons de submésos-échelle en fin d'hiver sous l'effet de l'instabilité de couche de mélange liée à la faible stratification de surface.

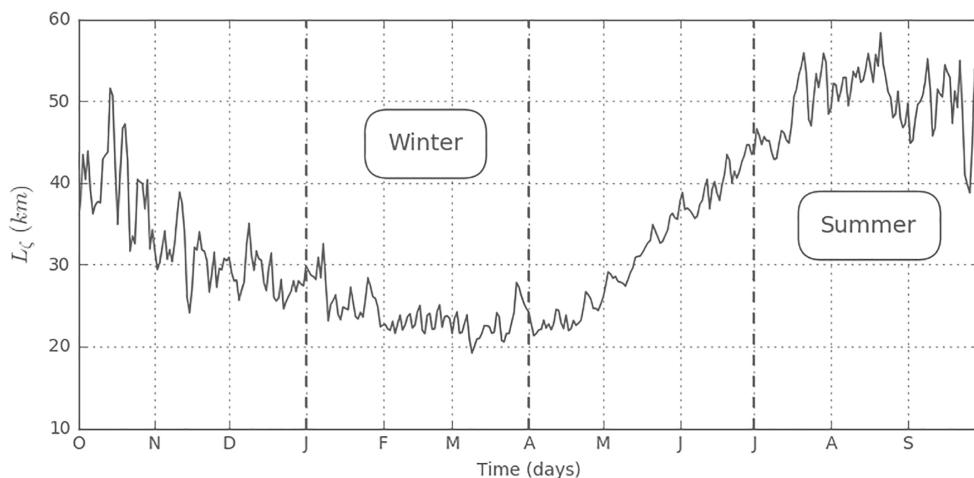


Figure 16: Série temporelle de l'échelle intégrale basée sur l'enstrophie (enstrophy-containing scale) dans une région proche du Gulf stream dans la simulation NATL60 (reproduction de la Figure 6 de [240])

L'intérêt de notre étude tient notamment au fait que l'analyse est reproduite de manière symétrique avec deux modèles distincts, ce qui offre la possibilité de comparer leur prédictions et d'analyser leurs

différences au regard de leur formulation respective. Il apparaît notamment que la simulation HYCOM50 prédit des échelles tourbillonnaires légèrement plus grandes que la simulation NATL60. La simulation NATL60 montre de plus des structures tourbillonnaires généralement plus confinées en surface à fine échelle (<50km). Ces résultats peuvent être interprétés comme résultant de la résolution légèrement plus fine de la configuration NATL60 (tant sur l'horizontale que sur la verticale). Ces différences pourraient toutefois être également dûes à la plus longue période de mise à l'équilibre (*spin-up*) de la simulation HYCOM50 qui pourrait favoriser la mise en place d'une cascade inverse plus intense. Cette étude souligne en tout cas l'intérêt de mener des intercomparaisons plus systématiques de ces modèles océaniques d'échelle kilométrique.

Cascades directes et indirectes d'énergie cinétique aux latitudes moyennes.

Dans une deuxième étude, nous nous sommes intéressés aux flux inter-échelle d'énergie cinétique dans la perspective de l'exploitation des données de la mission SWOT [244]. La méthode diagnostique mise en œuvre dans cette étude est de manière assez standard basée sur une équation d'énergie cinétique dans l'espace spectral (en nombre d'onde). Elle permet d'évaluer la tendance de chacun des termes de équations du mouvement à transferer de l'énergie cinétique entre les échelles, l'un des termes d'intérêt étant notamment le terme de transport non linéaire de quantité de mouvement⁶. L'originalité de notre étude tient au fait que nous nous sommes intéressé à la variabilité spatiale et temporelle de ces échanges à l'échelle du bassin atlantique nord dans son ensemble et que nous avons reproduit nos diagnostics sur la base de deux simulations numériques indépendantes (comme précédemment dans l'étude de [240]). Nous avons également porté un intérêt particulier aux informations sur les échanges énergétiques qui pourront être reconstruit sur la base des données altimétriques de la mission SWOT.

Le premier résultat de notre étude concerne la très forte saisonnalité de la distribution spectrale de l'énergie cinétique et des échanges nonlinéaires entre les échelles. Notre étude confirme en effet que la distribution de l'énergie cinétique par gamme d'échelles spatiales est relativement conforme aux prédictions de la théorie quasi-geostrophique en été mais en dévie notablement en fin d'hiver. Les spectres obtenus en conditions hivernales montrent en effet une pente plus proche de k^{-2} (voir la figure 17). Notre étude montre de plus une très forte saisonnalité des échanges énergétiques entre les échelles (la *cascade turbulente*). Si les échanges non-linéaires ont pour effet net de transférer de l'énergie cinétique vers les grandes échelles (*cascade inverse*), notre étude confirme également l'existence d'un mécanisme de *cascade directe* vers les fines échelles. Nous montrons que ce mécanisme est notablement plus intense en hiver, mais qu'il reste confiné aux couches de surface de l'océan (typiquement sur l'épaisseur de la couche de mélange).

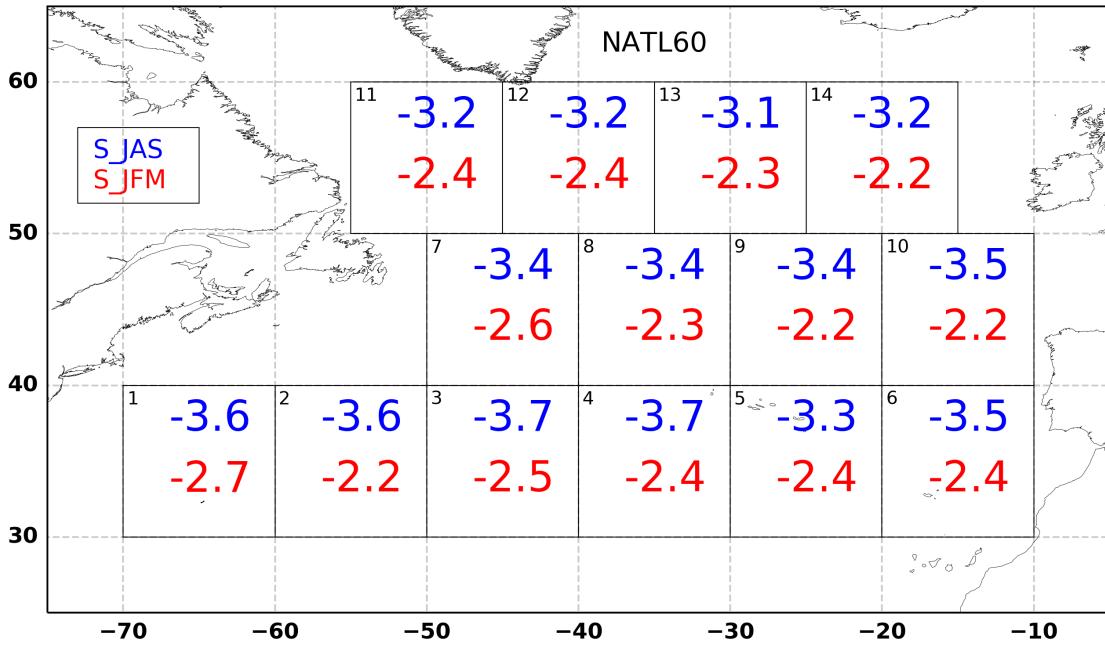


Figure 17: Pente des spectres d'énergie cinétique de surface dans la simulation NATL60 (bleu : hiver; rouge : été). Les spectres sont calculés à partir des moyennes horaires, les pentes moyennes sont évaluées entre l'échelle intégrale de l'énergie cinétique et la résolution effective du modèle (reproduction de la Figure 11 de [248])

Un deuxième type de résultats importants de notre étude concerne les variations saisonnières des échelles spatiales sur lesquelles s'opèrent ces échanges directs et indirects d'énergie cinétique. Notre étude indique ainsi que, de manière générale, l'intensité de la cascade inverse est maximale dans une gamme d'échelle proche de l'échelle la plus énergétique du spectre (plus précisément autour de l'échelle intégrale du spectre d'énergie cinétique). Cependant, notre étude souligne également la forte saisonnalité de l'échelle à laquelle s'opère la transition entre cascade directe et cascade indirecte. Nous montrons ainsi que la cascade indirecte s'étend sur une gamme d'échelles bien plus large en hiver. Comme par ailleurs les échelles en question varient également notablement au travers du bassin nord atlantique, notre étude questionne finalement la validité des conclusions quant aux régimes de cascade énergétique obtenues au travers d'études pour lesquelles les gammes d'échelles d'intérêt seraient fixées *a priori*.

L'intérêt de notre étude tient enfin à ce que nous avons pu mettre en lumière l'importance des processus rapides et non-équilibrés dans les échanges énergétiques inter-échelle. Nous avons en effet contrasté dans cette étude des résultats obtenus sur la base de sorties moyennes horaires des modèles et sur la base de moyennes journalières. En pratique, nos analyses ont montré que les résultats dépendent beaucoup de la fréquence de moyennage considérée. Ainsi les spectres d'énergie cinétique sont notamment plus plats s'ils sont calculés à partir de moyennes horaires. De même les échanges nonlinéaires vers les plus fines échelles sont beaucoup plus intenses s'ils sont évalués à partir des moyennes horaires. Ces résultats montrent que les processus rapides (et en particulier les processus ondulatoires) participent activement aux échanges énergétiques aux échelles <50km. Dans la perspective de l'exploitation des données altimétrique, nous avons également contrasté les résultats obtenus à partir des courants géostrophiques de surface seuls avec les résultats obtenus avec les courants totaux. Cette comparaison suggère que les estimations des cascades turbulentes que l'on obtiendra avec les données SWOT sous-estimeront notablement les échanges réels.

Modulation des échanges énergétiques inter-échelle par la marée interne

Dans une troisième étude, nous nous sommes intéressés plus avant au rôle des processus non-équilibrés, et notamment des ondes de marée interne, dans les échanges d'énergie cinétique inter-échelle. Les résultats de cette étude font l'objet du chapitre 5 de la thèse d'Adekunle Ajayi [192] et d'un article en préparation. Pour cette étude, nous avons utilisé les simulations jumelles de la

configuration eNATL60 du code NEMO réalisées en 2018 [239, 249]. L'une de ces simulations est forcée aux frontières et via un terme potentiel afin de représenter explicitement les mouvements de marée (barotropes et baroclines); l'autre en est exempte. Notre étude est motivée par plusieurs travaux récents qui suggèrent que les interactions entre macro-turbulence équilibrée et mouvements ondulatoires pourraient affecter la dissipation de la macro-turbulence océanique [225, 226, 227, 228]. Le matériel unique dont nous disposons nous permet d'examiner dans quelle mesure les échanges énergétiques sont affectés par la présence d'ondes de marée interne.

Sur le plan diagnostique, nous avons mis en oeuvre dans cette étude des analyses spectrales *temps-
espace* qui permettent d'examiner la distribution et les échanges énergétiques par classe de fréquences et de *nombre d'onde*. A titre d'exemple, la figure 18 montre la distribution de l'énergie cinétique de surface dans chacune des deux simulations considérées, pour deux saisons très contrastées (JFM et JAS). Comme on s'y attend, on observe que la signature des ondes internes est effectivement bien plus marquée dans la simulation avec marée, notamment autour des périodes de forçage de la marée. On observe également que les distributions d'énergie montrent une très forte saisonnalité. Si ces observations sont assez attendues, un point plus surprenant est l'accumulation d'énergie dans des mouvements superinertiels d'échelles <50km, notamment en hiver. Bien que rapides (et donc non-équilibrés), ces mouvements se distinguent des ondes internes, et semblent prolonger le spectre des mouvements équilibrés. Notre étude montre comment cette classe de mouvements participe activement aux échanges énergétiques à fine échelle.

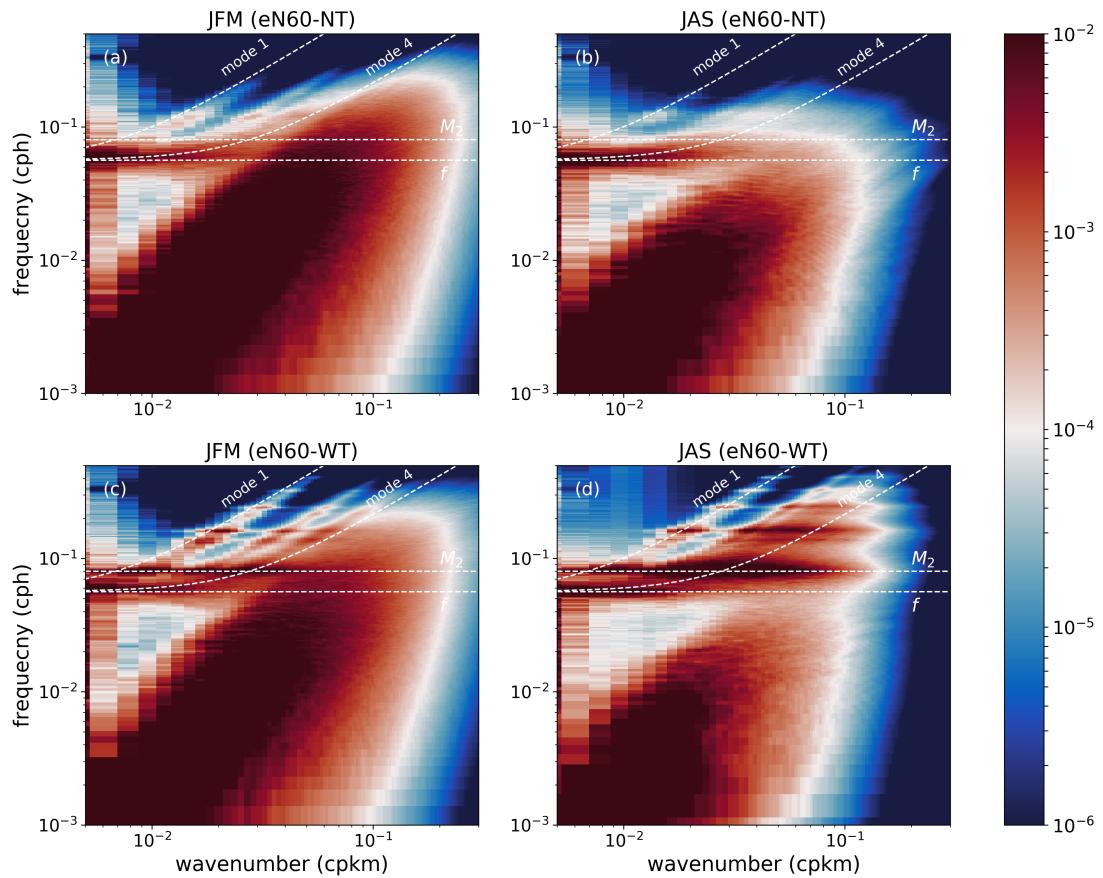


Figure 18: Distribution de l'énergie cinétique en fonction de la fréquence et du nombre d'onde dans une région de l'océan atlantique nord dans les simulations eNATL60 avec et sans marée (reproduction de [192]).

Le principal résultat important de notre étude concerne l'existence tant en hiver qu'en été d'une très forte cascade directe vers les fines échelles dans la simulation avec marée. Dans la simulation sans

marée en revanche, on observe un comportement comparable à celui que nous avons mis en évidence dans les simulations NATL60 et HYCOM50, à savoir une forte cascade directe durant les mois d'hiver uniquement [244]. Nos analyses montrent ici également que la cascade directe est essentiellement confinée en surface. Toutefois, en moyenne sur une année complète, la simulation avec marée montre en tout cas une cascade directe notablement plus intense que la simulation sans marée. Si l'on accepte que cette simulation avec marée reproduit plus fidèlement la dynamique de l'océan réel (ce que suggèrent notamment nos comparaisons aux observations altimétriques), il semble donc que les couches de surface de l'océan ouvert aux latitudes moyennes soient le siège d'une intense cascade directe vers les fines échelles tout au cours de l'année.

Nous avons examiné plus en détail les mécanismes impliqués dans cette cascade directe d'énergie cinétique vers les fines échelles au moyen de diagnostiques des taux de transferts d'énergie cinétique en *temps-espace* suivant l'approche de [250]. Ces diagnostiques ont montré que la cascade directe était le résultat de processus d'échanges très différents en hiver et en été. La situation hivernale est ainsi essentiellement inchangée selon que le modèle représente ou non les mouvements de marée. Le mécanisme à l'oeuvre est ici similaire à celui décrit plus tôt dans [244]. L'analyse des transferts temps-espace montre que dans ce cas l'essentiel de l'énergie cinétique perdue par les mouvements équilibrés de meso-échelle et submésos-échelle vers les échelles <20km est transférée vers la nouvelle classe de mouvements superinertiels identifiée plus haut.

La situation estivale fait en revanche intervenir une dynamique très différente où les échanges nonlinéaires responsables de la cascade directe font également explicitement intervenir les ondes internes. La situation estivale est ainsi très contrastée entre la simulation avec marée qui montre une cascade directe très active et une simulation sans marée ou celle-ci est absente. Nos analyses montrent de plus que les échanges vers les fines échelles sont liés notamment à une perte d'énergie cinétique des ondes de marée interne au profit des ondes internes de fréquence intertidales. Ce mécanisme est compatible avec la construction d'un spectre d'énergie des ondes internes (comme le prédit [251] et tel que l'analyse [252]). Les simulations montrent par ailleurs que le spectre en nombre d'ondes qui résulte de l'interactions des ondes interne avec la macro-turbulence est compatible avec les prédictions de [253]. Notre étude fait ainsi partie des premiers travaux portant sur l'analyse des interactions entre ondes internes et macro-turbulence océanique au moyen de simulations numériques réaliste de grande emprise géographique.

Activités connexes, conséquence directes et indirectes

Le travail de thèse d'Adekunle Ajayi s'est inscrit dans un contexte riche d'interactions scientifiques en préparation à la mission altimétrique SWOT, notamment au sein de notre équipe à l'IGE (citons par exemple les thèses de Laura Gomez-Navarro et Florian Le Guillou et le postdoc de Redouane Lguensat). Il a également bénéficié des interactions établies dans le cadre du projet CONTaCTS et des visites de W.K. Dewar à l'IGE. C'est dans ce contexte que j'ai eu l'occasion de contribuer au développement d'une méthode diagnostique originale pour analyser les échanges inter-échelle d'énergie [247]. J'ai également eu l'occasion d'interagir dans ce cadre avec Takaya Uchida autour du déploiement du formalisme *Thickness Weighted Average* de [23] pour l'analyse des interactions entre tourbillons et écoulements moyens (*eddy-mean flow interactions*) [254].

En parallèle à ces travaux, l'analyse des simulations NATL60 et eNATL60 a donné lieu à plusieurs collaborations; citons notamment sur les aspects dynamiques la collaboration avec Christian Buckingham et Alberto Naveira-Garabato établie pour dans le cadre de l'évaluation des simulations NATL60 avec les données de la campagne OSMOSIS. Dans ce cadre, les simulations NATL60 ont pu être utilisées pour mettre en contexte et pour extrapoler à d'autres régions les résultats de l'analyse des données in-situ quant aux mécanismes pilotant la turbulence tridimensionnelle de l'océan de surface [255].

Plus généralement, cette phase de travail autour de la mise en oeuvre et de l'analyse des simulations NATL60 et eNATL60 a renforcé ma conviction quant à la pertinence de développer une approche collaborative et ouverte en modélisation océanique. Sur un plan plus scientifique, cette phase m'a également convaincu un peu plus de l'importance de mener des travaux d'intercomparaison plus systématique des modèles océaniques de résolution kilométrique⁷. La perspective de la mission SWOT, et des collectes de données in-situ aux *cross-overs* de l'orbite de la phase d'échantillonage rapide (dans le cadre de l'initiative *Adopt-a-crossover*) semble offrir un très bon contexte pour développer ce type d'intercomparaisons à l'avenir. C'est dans cette perspective que s'inscrive les travaux entamés en ce sens dans le cadre de la SWOT Science Team et du CLIVAR Ocean Model Development Panel [[256](#)].

Synthèse et perspectives

J'ai tenté au fil des trois chapitres précédents de présenter quelques exemples illustrant ma pratique de la recherche scientifique. Ces exemples ne couvrent toutefois qu'une partie de mes activités depuis ma thèse de doctorat. Avant d'expliquer comment je souhaite orienter mes activités dans les années à venir, je prendrai donc tout d'abord ici le temps de présenter un rapide tour d'horizon plus exhaustif des travaux scientifiques auxquels j'ai pu contribuer. J'essaierai également d'expliciter certains enseignements que j'ai pu tirer de mes expériences d'encadrement.

Synthèse des principales contributions scientifiques :

Comme je l'ai décrit en introduction, mes activités de recherche se sont réparties autour de trois axes portant respectivement sur (1) la *science des modèles de circulation océanique*, la (2) *variabilité de l'océan austral* et (3) les *synergies entre modèles et observations*. Si le premier axe est un fil conducteur de mon travail de recherche, mes activités ont graduellement évolué du deuxième au troisième axe au fil du temps. Les paragraphes qui suivent tentent une rapide synthèse factuelle de mes contributions sur chacun de ces trois axes.

Contributions aux développement et à la compréhension des modèles de circulation océanique

Une première partie de mon travail a donc porté sur la science des modèles de circulation océanique, notamment en régime turbulent. Cette catégorie regroupe des travaux de nature très différentes, mais qui ont généralement pour objet de comprendre comment les modèles de circulation représentent les processus océaniques ou comment ils pourraient mieux les représenter. Plusieurs de ces travaux portent ainsi sur la description de la variabilité tourbillonnaire résolue par les modèles de circulation [240, 248, 257, 258]. Une question importante est en particulier d'examiner comment les choix de formulation de ces modèles (discrétisation, paramètres,...) peuvent affecter les solutions obtenues [232, 259, 260, 261]. J'ai également eu l'occasion de contribuer ponctuellement au développement de nouvelles fonctionnalités pour ces modèles [188, 189, 262] avec un intérêt particulier pour les fermetures sous-mailles, notamment sur la base de concepts issus de la *simulation des grandes échelles* (LES) [263, 264]. Dans le cadre de collaborations, je me suis aussi intéressé aux mécanismes contrôlant la turbulence tridimensionnelle de surface et de fond [255, 265, 266] ainsi qu'à l'amélioration des fonctions de forcages des modèles de circulation [181, 267, 177]. Plus récemment, j'ai eu l'occasion de contribuer à des travaux de synthèse sur l'état de l'art des modèles de circulation océanique [3, 6]. Au bilan, mes travaux sur ce premier axe ont mené à 26 publications, dont 8 ont impliqué l'un des jeunes chercheurs que j'ai directement encadrés (à savoir, sur cette thématique : Adekunle Ajayi, Nicolas Ducouso, Nacho Merino, Xavier Meunier et Antoine Venaille).

Contributions à la compréhension de la variabilité saisonnière à décennale de l'océan austral

Une deuxième partie de mon travail a porté sur l'étude des processus océaniques impliqués dans la réponse de l'océan austral aux changements environnementaux en cours dans l'hémisphère sud. Ces travaux, qui sont plus homogènes dans leurs approches, mobilisent généralement des expériences de sensibilité afin d'étudier la réponse des propriétés océaniques à des changements de forçages externes. Mes travaux ont tout d'abord porté sur la réponse océanique à l'intensification des vents zonaux liée à la tendance du mode annulaire austral. Comme je l'ai décrit plus haut dans le chapitre 2, les analyses ont porté notamment sur la réponse de la circulation au cœur de l'ACC à ce changement

de forçage [141, 142, 268], sur la réponse des flux de CO₂ à l'interface air-mer [137, 269] avec une attention particulière au rôle joué par la variabilité tourbillonnaire dans la réponse de la circulation méridienne [129, 130, 270]. Dans le cadre de collaborations, j'ai également pu contribuer à des études portant sur l'observabilité de la variabilité de l'océan austral [271, 272] à ces latitudes. Une deuxième phase de travail, décrite dans le chapitre 3, a porté sur l'étude des interactions entre calotte glaciaire et océan, et de leur évolution. Ces travaux se sont notamment focalisés sur l'impact à grande échelle de ces interactions et de leur évolution, en particulier sur la glace de mer [177, 182]. Dans le cadre de collaborations, j'ai pu également contribuer à l'étude de processus spécifiques à l'œuvre dans les zones côtières et sur les talus continentaux de l'Antarctique de l'ouest [186, 190, 191]. Au bilan, mes travaux sur ce deuxième axe ont mené à 22 publications, parmi lesquelles 11 ont impliqué l'un des jeunes chercheurs que j'ai directement encadrés (à savoir, sur cette thématique : Carolina Dufour, Pierre Labreuche, Nacho Merino et Jan Zika).

Contributions à la synergie entre modèles et observations

Une troisième partie de mon travail a porté sur le développement de synergies entre modèles et observations en préparation de l'observation de la circulation océanique, notamment depuis l'espace. Comme expliqué en introduction, ce terme de *synergies* désigne l'usage des modèles de circulation dans le contexte de la préparation de l'observation des océans ou de l'exploitation des données d'observations. Si on laisse à part les travaux spécifiques sur l'observabilité de la circulation de l'océan austral mentionnées au-dessus [271, 272] ou sur l'estimation des flux de fonte des icebergs [177], l'essentiel de mes travaux sur ce thème des synergies s'inscrivent dans le contexte de la préparation à la future mission altimétrique SWOT et de la participation de l'équipe MEOM à la SWOT Science Team. Les travaux auxquels j'ai pu contribuer ont porté sur le développement de méthodes spécifiquement adaptées à la prise en compte des erreurs d'observations de la mission SWOT dans un contexte de reconstruction ou d'assimilation de données. Ces travaux ont porté sur le traitement des erreurs spatialement corrélées [236, 273] ainsi que des erreurs instrumentales non-corrélées [238, 274]. J'ai pu travailler sur les techniques de cartographies utilisées pour construire des produits grillés (type L4) à partir des données altimétriques brutes (type L2). Ces travaux ont permis d'établir les limites des méthodes actuelles [235] et de proposer des pistes d'amélioration des ces techniques [241, 275]. Enfin, des collaborations m'ont permis de m'intéresser aux questions de reconstruction de la structure tridimensionnelle de la circulation [233, 234]. Au bilan, mes travaux sur ce troisième axe ont mené à 14 publications, dont 4 ont impliqués l'un des jeunes chercheurs que j'ai directement encadrés (à savoir, sur cette thématique : Laura Gomez-Navarro, Redouane Lguensat et Nacho Merino).

Quelques enseignements et réflexions personnelles

Les sous-sections qui suivent rassemblent quelques réflexions personnelles sur l'encadrement du travail de recherche et une brève analyse critique de mon approche de la direction de la recherche. Si ces éléments ne seront sans doute pas utiles au lecteur, les rassembler ici est important à mes yeux en ce qu'ils sont le résultat d'un apprentissage personnel au fil des expériences d'encadrement. Je remercie donc par avance le lecteur pour sa patience bienveillante dans la lecture des paragraphes qui suivent.

Réflexions sur le travail de recherche et sa direction

- **On ne dirige pas un travail de recherche**, on en conçoit le cadre et les objectifs *a priori*, on organise et accompagne son développement, on oriente l'attention vers ce que l'on juge important, on aide à créer des liens avec d'autres travaux. Si j'ai approché mes premières expériences d'encadrement de manière très directive, avec plus de pratique et d'expérience, j'ai aujourd'hui plus de confiance dans le processus d'interaction qui permet d'inventer ensemble le

développement d'un travail de recherche. J'apprécie de plus en plus qu'un travail dévie de ma vision initiale et accepte plus naturellement que les productions de mes étudiant.e.s ne soient pas les miennes propres.

- **Chaque étudiant.e est différent**, chaque relation est différente. Un mode d'interaction qui fonctionne bien avec un.e étudiant.e ne fonctionnera pas forcément avec un.e autre. Pour des questions de traits comportementaux et de biais cognitifs certains cerveaux se connectent plus facilement que d'autres. Mais si l'on prend deux cerveaux au hasard, le plus probable est qu'il aborderont les problèmes de manières assez différentes. Il faudra alors inventer une manière de réfléchir ensemble, une *danse des cerveaux* dont les pas devront idéalement être les plus naturels possibles pour chacun des danseurs. La mission de l'encadrant est ainsi de créer les conditions de l'épanouissement de l'étudiant.e en cherchant les meilleures solutions pour l'amener à son rythme au mieux de ce qu'il ou elle peut donner.
- **Les ressorts de motivation individuelle pour la recherche sont multiples** mais les plus durables sont sans doute la *curiosité* et le sentiment du *sens* de ce que l'on fait. Il revient donc à l'encadrant d'identifier le principal ressort de motivation de son étudiant.e et de susciter sa curiosité afin qu'il.elle garde confiance dans le sens dans ses efforts. Ceci passe en pratique par l'exemplarité dans l'éthique de la recherche, la disponibilité pour la *sérendipité* et la discussion. C'est sans doute ici qu'un encadrant aura le plus d'influence sur la future carrière de son étudiant.e.
- **Transmettre le sens de l'exigence et de l'éthique scientifique** est également à mes yeux une dimension fondamentale de l'accompagnement des jeunes chercheurs. Il s'agit ici d'encourager et de valoriser les efforts pour rendre le travail le meilleur possible à chaque étape de sa production et de sa communication. Si aucune production scientifique n'est parfaite, ni même exempte d'erreur, le processus de sa création doit être l'objet de tous les efforts dans le respect des principes éthiques de la recherche. Il appartient donc à l'encadrant d'encourager les jeunes chercheur.se.s à ne pas se contenter d'*à peu près*, de susciter leur tenacité et de leur transmettre un certain goût de l'exigence scientifique. Ceci passe ici encore essentiellement par l'exemple.
- **Nos biais cognitifs sont des singularités à cultiver**. Si bien évidemment, nos connaissances et nos compétences peuvent évoluer au fil du temps, certains biais cognitifs profonds persistent. Ce peut être une attention pour les détails, ou au contraire un sens de la généralisation; une aversion pour les formalismes mathématiques, ou au contraire un goût très marqué pour ceux-ci; ou encore une démarche très orientée vers les solutions concrètes et leur implémentation pratique. Toutes ces dimensions cognitives, dont certaines pourraient être qualifiées de faiblesses, sont en fait autant de chemins possibles pour rendre nos productions scientifiques originales. Il convient donc d'en prendre conscience pour bien les utiliser et éventuellement les compenser au travers de collaborations.
- **Le travail de recherche, des fois ça rate....** L'échec est une dimension intrinsèque et essentielle de la recherche scientifique. Les échecs peuvent être de nature scientifique, quand les résultats ne sont pas à la hauteur des espoirs, ou parfois dans les relations humaines elle-même, quand par exemple la relation de travail ne "prend" pas. J'observe que dans le deux cas, c'est souvent le *timing* qui est mauvais : une idée peut être trop précoce ou au contraire trop mûre, une relation de travail possible ou non à un certain moment donné. Prendre conscience du caractère intrinsèque de l'échec dans la recherche permet de mieux traverser les phases difficiles mais aussi de mieux profiter des succès. Cette prise de conscience permet aussi de prendre acte avec bienveillance et d'agir au mieux des intérêts de l'étudiant.e dans les situations difficiles.
- **Le rôle de l'encadrant au delà de la collaboration scientifique**. Au cours de la période de collaboration étroite un.e jeune chercheur.se, l'encadrant transmet évidemment plus que son expérience scientifique elle-même. Il transmet notamment les codes comportementaux de sa

communauté scientifique et l'accès à un certain réseau de collaborations. Cette dimension d'accompagnement et de conseil (de *mentoring*) est particulièrement importante à l'issue de la thèse ou du contrat de travail quand le.a jeune chercheur.se est amené à faire des choix pour la suite de sa carrière. Elle peut également s'étendre parfois bien au delà et je trouve particulièrement gratifiant d'être sollicité pour des conseils ou des recommandations de la part d'anciens étudiants longtemps après leurs passage dans mon équipe.

Analyse critique de mon approche de direction scientifique :

La rédaction de ce manuscrit me donne également l'opportunité de me pencher de manière plus réfléxive et critique sur ma pratique de la direction de la recherche. Ici encore, les paragraphes qui suivent me seront sans doute plus utiles qu'au lecteur. J'aimerais toutefois essayer de présenter ci-dessous ce que je pense être mes forces et mes faiblesses en tant qu'encadrant de travaux scientifiques.

- L'expérience me rend pour apte à identifier un contexte scientifique que je pense intéressant et, dans ce contexte, à *formuler une bonne question de départ* ou à proposer une approche originale du problème.
- Mes compétences organisationnelles et mon réseau de collaborations rendent assez naturelle *l'organisation d'un cadre* de financement et de collaborations pour mener à bien l'investigation de la question proposée.
- Je crois être capable de transmettre un certain enthousiasme dans la *dynamique de groupe*, ce qui permet de bien amorcer le travail et de mieux rebondir en cas de difficultés. Certains biais cognitifs (esprit de synthèse, psycho-rigidité...) me permettent également de bien structurer les réunions de travail des projets que je pilote.
- Au cours de la rédaction d'article ou de la préparation de communications scientifiques, mes biais cognitifs personnels me permettent de contribuer très activement à la *conception des messages*, à l'organisation et l'illustration du propos (plan, choix des expériences et des illustrations). Je suis en revanche moins efficace dans la correction de détail en phase de finalisation.
- J'observe également que la largeur du spectre des mes intérêts scientifiques me rend de fait *peu spécialiste*, ce qui peut être problématique pour des travaux pointus sur des sujets ayant déjà été bien défrichés. C'est la raison pour laquelle je préfère encadrer dans le cadre de collaborations afin de compenser mes lacunes.
- Enfin, ceux qui ont eu l'occasion de travailler avec moi savent que je suis *généralement bien trop occupés* et que ma gestion des priorités peut être parfois un peu chaotique. Si je pense sincèrement que la procrastination est pour moi un chemin efficace vers la sérendipité, c'est objectivement un mauvais exemple à donner aux jeunes chercheurs.

Je remercie le lecteur pour sa bienveillante lecture des paragraphes précédents et passe à présent à l'exposé des orientations que je souhaite donner à mes activités dans les années à venir.

Projet scientifique pour la période 2021-2025

Contexte général

Les processus océaniques de fine échelle spatiale (1km-200km) font l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté des océanographes physiciens. Comme on l'a vu au fil de ce mémoire, à ces

échelles on observe une combinaison de processus dynamiques de natures différentes avec en particulier la manifestation d'une turbulence associée aux mouvement équilibrés, la présence d'ondes internes, notamment lié au forçage de la marée, ainsi que des oscillations inertielles en large part forcées par le vent. Il est désormais évident que ces échelles dynamiques jouent un rôle important tant dans la redistribution de l'énergie et de la matière dans l'océan lui-même que dans les interactions de l'océan avec les milieux environnants (atmosphère, cryosphère, biosphère). Ce sont enfin des échelles importantes pour les activités humaines, ce qui justifie un besoin croissant d'observation et de capacité de prévision.

Notre capacité à comprendre les mécanismes physiques qui gouvernent ces échelles dynamiques, leur variabilité ainsi que leurs impacts est en train de changer aujourd'hui avec d'une part les évolutions récentes de la capacité des modèles de circulation mais également les évolutions en cours dans la capacité des réseaux d'observation. Citons notamment sur ce dernier plan, la future mission SWOT mais également la perspective de l'observation directe des courants de surface depuis l'espace par télédétection. Par ailleurs, l'émergence des applications de l'apprentissage automatique en océanographie semble ouvrir un champ de recherche spécifique dans l'étude, la compréhension, l'observation et la modélisation de la circulation océanique à fine échelle, notamment dans les couches de surface de l'océan pour lesquelles on dispose de plus nombreuses sources d'informations.

Objectifs scientifiques

Dans ce contexte, je souhaite concentrer mes activités autour des *processus océaniques de fine échelle*, dans la continuité des infléxions que j'ai données à mon activité au cours des dernières années et en cohérence avec le projet quinquennal de l'équipe MEOM de l'IGE. Je propose m'intéresser en parallèle à la *modélisation* de ces processus, à leur *observation* et à la *compréhension* de leur rôle au sein du système Terre. Les objectifs et l'ambition de ce projet de recherche sont détaillés dans ce qui suit.

A. Mieux modéliser les processus océaniques de fine échelle.

Il s'agit ici de poursuivre le développement des modèles de circulation océanique (notamment le code NEMO) en visant une meilleure prise en compte des processus de fines échelles, tant dans les modèles à haute résolution spatiale que dans les modèles à plus basse résolution. Je propose plus spécifiquement de me concentrer sur les objectifs suivants.

- *Accompagner NEMO vers une résolution effective des processus océaniques d'échelle kilométrique.* L'objet de cet axe de recherche est de poursuivre l'amélioration graduelle de la capacité du modèle NEMO à représenter les processus océaniques de fines échelles (1-200km). En pratique, il s'agit de développer des méthodes robustes permettant d'évaluer la capacité des modèles à résoudre les échelles kilométrique et de poursuivre le développement du code NEMO tant sur les aspects liés aux schémas de discréétisation, de performance HPC que de physique représentée. Cette activité bénéficiera notamment de mon implication dans le CLIVAR-OMDP et des programmes d'observation in-situ de l'initiative SWOT-Adopt-a-crossover.
- *Utiliser les modèles océaniques à haute résolution pour formuler des paramétrisations sous-maille à plus basse résolution.* L'objet de cet axe de recherche est d'aborder de manière systématique la formulation de fermetures sous-maille pour représenter les effets de la dynamique de fine échelle dans les modèles à plus basse résolution. Je souhaite aborder cette question par apprentissage automatique avec des approches permettant de contraindre la physique capturée par les algorithmes d'apprentissage dans la continuité des travaux engagés durant la thèse d'Hugo Frezat depuis octobre 2019.

B. Mieux comprendre l'impact des processus océaniques de fine échelle.

Il s'agit ici d'aborder de poursuivre l'étude des processus d'*upscaling* impliquant les fines échelles océaniques mais sans restreindre ces études aux seules non-linéarité hydrodynamiques. Je propose plus spécifiquement de me concentrer sur les objectifs décrits ci-dessous.

- *Etudier l'impact des fines échelles océaniques sur la circulation océanique de grande échelle.* L'objet de cet axe de recherche est de poursuivre l'étude des interactions d'échelles en se focalisant non seulement sur les échanges d'énergie au travers des échelles mais également sur les interactions entre écoulement ondulatoires et balancés ainsi que sur l'impact des fines échelles sur les processus océaniques d'intérêt climatique (ex : convection, ventilation)
- *Etudier l'impact des fines échelles océaniques sur les interactions de l'océan physique au sein de la machine climatique.* L'objet de cet axe de recherche est d'étudier comment les fines échelles de la circulation océanique affectent les interactions et les couplages avec les milieux environnants (notamment l'atmosphère et la cryosphère). Je propose ici de me focaliser en particulier sur les interactions glace de mer-océan à fine échelle dans le contexte du recrutement de Pierre Rampal à l'IGE.

C. Mieux observer et estimer la circulation océanique de fine échelle.

Il s'agit ici de poursuivre mes travaux sur les synergies entre modèles et observations dans le contexte de l'observation spatiale de la circulation océanique de fine échelle, lors la mission SWOT d'une part mais également à terme en vue de l'observation des courants de surface depuis l'espace. Je propose plus spécifiquement de me concentrer sur les objectifs décrits ci-dessous.

- *Caractériser la dynamique des fines échelles océaniques en vue de leur inversion.* L'objet de cet axe de recherche est d'aborder la description des fines échelles océaniques spécifiquement du point de vue des propriétés qu'il sera clé de connaître et d'exploiter dans les méthodes d'inversion. Ceci recoupe la question de l'étude du lien entre circulation de surface et circulation intérieure de l'océan, les questions de prédictibilité des fines échelles, notamment dans le contexte de la séparation entre ondes et tourbillons.
- *Développer des méthodes d'inversion en vue de l'observation spatiale des fines échelles océaniques.* L'objet de cet axe de recherche est de contribuer au développement de méthodes d'inversion adaptées aux caractères spécifiques des fines échelles océaniques et à la réalité instrumentale des capteurs considérés (ex : SWOT, STREAM). L'objet est ici en particulier de définir le bon niveau de complexité de ces méthodes et de les informer sur les propriétés dynamiques particulières à respecter ou à prendre en compte. Là encore, ces travaux mettront notamment en oeuvre de l'apprentissage automatique.

Implémentation du projet

L'implémentation du projet décrit ci-dessus s'appuiera sur la méthode de travail que j'ai développé au fil de ma carrière et présenté en introduction. Celle-ci combine la mise en cohérence des objectifs avec mon environnement scientifique immédiat, le développement de collaborations spécifiques, la construction et le pilotage de projet dédiés. Le projet que je propose de mener est ainsi aligné avec le programme scientifique de l'équipe MEOM pour le quinquennat en cours.

La réalisation de mon projet pour les années à venir bénéficiera notamment des éléments de contexte suivant :

- le contexte du lancement de la mission SWOT et de ma participation à l'équipe scientifique SWOT dans le cadre du projet SWOT Science Team MIDAS;

- le contexte du projet H2020 IMMERSE que je coordonne et dont l'activité recoupe une part des objectifs proposés ci-dessus;
- le réseau de collaborations établies sur le domaine de l'interface océanographie / apprentissage automatique et modélisation numérique / apprentissage automatique;
- le contexte de ma participation à l'animation du CLIVAR-OMDP (en tant que co-chair auprès de B. Fox Kemper depuis 2020) et de son articulation avec le programme SWOT-Adopt-a-Crossover;
- ma participation à l'initiative PANGEO et mon implication dans le déploiement de ce cadre logiciel sur les machines HPC nationales GENCI.

Enfin plusieurs actions de recherche récemment engagées permettront de mettre en oeuvre ce projet de recherche pour les années à venir. C'est le cas notamment des thèses d'Hugo Frezat et de Quentin Febvre ainsi que des projets JPI MEDLEY (PI: A.M. Treguier), ANR MeLODy (PI: R. Fablet), VESRI M2LINES (PI : L. Zanna/A. Adcroft) qui ont démarré récemment.

Références

1. A numerical investigation of the oceanic general circulation

Kirk Bryan, Michael D. Cox

Tellus (1967-02) <https://doi.org/b4jzk2>

DOI: [10.1111/j.2153-3490.1967.tb01459.x](https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1967.tb01459.x)

2. A numerical method for the study of the circulation of the world ocean

Kirk Bryan

Journal of Computational Physics (1969-10) <https://doi.org/bp2z7j>

DOI: [10.1016/0021-9991\(69\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0021-9991(69)90004-7)

3. General Circulation Models

Eric P. Chassignet, Julien Le Sommer, Alan J. Wallcraft

Elsevier BV (2019) <https://doi.org/ggrm5g>

DOI: [10.1016/b978-0-12-409548-9.11410-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11410-1)

4. Ocean Circulation Modeling for Operational Oceanography: Current Status and Future Challenges

Julien Le Sommer, Eric P. Chassignet, Alan J. Wallcraft

Florida State University College of Medicine (2018-08-11) <https://doi.org/ggrs49>

DOI: [10.17125/gov2018.ch12](https://doi.org/10.17125/gov2018.ch12)

5. Ocean Circulation Models and Modeling

Stephen M. Griffies, Anne Marie Treguier

International Geophysics (2013) <https://doi.org/gg3z3m>

DOI: [10.1016/b978-0-12-391851-2.00020-9](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-391851-2.00020-9)

6. Challenges and Prospects in Ocean Circulation Models

Baylor Fox-Kemper, Alistair Adcroft, Claus W. Böning, Eric P. Chassignet, Enrique Curchitser, Gokhan Danabasoglu, Carsten Eden, Matthew H. England, Rüdiger Gerdes, Richard J. Greatbatch, ... Stephen G. Yeager

Frontiers in Marine Science (2019-02-26) <https://doi.org/gfxzgw>

DOI: [10.3389/fmars.2019.00065](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00065)

7. Fundamentals of Ocean Climate Models

Stephen M. Griffies

JSTOR (2018-06-05) <https://doi.org/gg3z3t>

DOI: [10.2307/j.ctv301gzg](https://doi.org/10.2307/j.ctv301gzg)

8. Data assimilation in the geosciences: An overview of methods, issues, and perspectives

Alberto Carrassi, Marc Bocquet, Laurent Bertino, Geir Evensen

Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change (2018-09) <https://doi.org/ghnn4t>

DOI: [10.1002/wcc.535](https://doi.org/10.1002/wcc.535)

9. https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Final_WWRP_2017_3_27_July.pdf

10. Coupled Data Assimilation for Integrated Earth System Analysis and Prediction

Stephen G. Penny, Thomas M. Hamill

Bulletin of the American Meteorological Society (2017-07-01) <https://doi.org/gg8qxn>

DOI: [10.1175/bams-d-17-0036.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0036.1)

11. Toward Seamless Prediction: Calibration of Climate Change Projections Using Seasonal Forecasts

T. N. Palmer, F. J. Doblas-Reyes, A. Weisheimer, M. J. Rodwell

Bulletin of the American Meteorological Society (2008-04) <https://doi.org/b2qnx2>

DOI: [10.1175/bams-89-4-459](https://doi.org/10.1175/bams-89-4-459)

12. A Unified Modeling Approach to Climate System Prediction

James Hurrell, Gerald A. Meehl, David Bader, Thomas L. Delworth, Ben Kirtman, Bruce Wielicki

Bulletin of the American Meteorological Society (2009-12) <https://doi.org/cwxnw8>

DOI: [10.1175/2009bams2752.1](https://doi.org/10.1175/2009bams2752.1)

13. Observing System Evaluation Based on Ocean Data Assimilation and Prediction Systems: On-Going Challenges and a Future Vision for Designing and Supporting Ocean Observational Networks

Yosuke Fujii, Elisabeth Rémy, Hao Zuo, Peter Oke, George Halliwell, Florent Gasparin, Mounir Benkiran, Nora Loose, James Cummings, Jiping Xie, ... Norihisa Usui

Frontiers in Marine Science (2019-07-29) <https://doi.org/gg8s7t>

DOI: [10.3389/fmars.2019.00417](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00417)

14. Tropical Pacific Observing System

Neville Smith, William S. Kessler, Sophie Cravatte, Janet Sprintall, Susan Wijffels, Meghan F. Cronin, Adrienne Sutton, Yolande L. Serra, Boris Dewitte, Peter G. Strutton, ... Shelby Brunner

Frontiers in Marine Science (2019-02-18) <https://doi.org/gf43qq>

DOI: [10.3389/fmars.2019.00031](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00031)

15. An Integrated All-Atlantic Ocean Observing System in 2030

Brad deYoung, Martin Visbeck, Moacyr Cunha de Araujo Filho, Molly O'Neil Baringer, CarolAnne Black, Erik Buch, Gabrielle Canonic, Paulo Coelho, Janice T. Duha, Martin Edwards, ... Zdenka Willis

Frontiers in Marine Science (2019-07-26) <https://doi.org/gg8s7m>

DOI: [10.3389/fmars.2019.00428](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00428)

16. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission

Rosemary Morrow, Lee-Lueng Fu, Fabrice Arduuin, Mounir Benkiran, Bertrand Chapron, Emmanuel Cosme, Francesco d'Ovidio, J. Thomas Farrar, Sarah T. Gille, Guillaume Lapeyre, ... Edward D. Zaron

Frontiers in Marine Science (2019-05-15) <https://doi.org/gf7tps>

DOI: [10.3389/fmars.2019.00232](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232)

17. An Observing System Simulation Experiment for Ocean State Estimation to Assess the Performance of the SWOT Mission: Part 1—A Twin Experiment

Zhijin Li, Jinbo Wang, Lee-Lueng Fu

Journal of Geophysical Research: Oceans (2019-07-13) <https://doi.org/gg8s8q>

DOI: [10.1029/2018jc014869](https://doi.org/10.1029/2018jc014869)

18. Contribution of future wide-swath altimetry missions to ocean analysis and forecasting

Antonio Bonaduce, Mounir Benkiran, Elisabeth Remy, Pierre Yves Le Traon, Gilles Garric

Ocean Science (2018-11-16) <https://doi.org/gfp2vf>

DOI: [10.5194/os-14-1405-2018](https://doi.org/10.5194/os-14-1405-2018)

19. Turbulence Closure Models for Computational Fluid Dynamics

Paul A. Durbin

Wiley (2017-12-15) <https://doi.org/gg9c85>

DOI: [10.1002/9781119176817.ecm2061](https://doi.org/10.1002/9781119176817.ecm2061)

20. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction

P. Sagaut

Springer-Verlag (2006) <https://www.springer.com/gp/book/9783540263449>

ISBN: [9783540263449](#)

21. Can large eddy simulation techniques improve mesoscale rich ocean models?

B. Fox-Kemper, D. Menemenlis

Geophysical Monograph Series (2008) <https://doi.org/c848cx>

DOI: [10.1029/177gm19](#)

22. Quantifying spatial distribution of spurious mixing in ocean models

Mehmet Ilcak

Ocean Modelling (2016-12) <https://doi.org/f9hc66>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2016.11.002](#) · PMID: [28344508](#) · PMCID: [PMC5351820](#)

23. An Exact Thickness-Weighted Average Formulation of the Boussinesq Equations

William R. Young

Journal of Physical Oceanography (2012-05-01) <https://doi.org/dt9cj7>

DOI: [10.1175/jpo-d-11-0102.1](#)

24. A further study of numerical errors in large-eddy simulations

Fotini Katopodes Chow, Parviz Moin

Journal of Computational Physics (2003-01) <https://doi.org/czj94h>

DOI: [10.1016/s0021-9991\(02\)00020-7](#)

25. Comparing Ocean Surface Boundary Vertical Mixing Schemes Including Langmuir Turbulence

Qing Li, Brandon G. Reichl, Baylor Fox-Kemper, Alistair J. Adcroft, Stephen E. Belcher, Gokhan Danabasoglu, Alan L. M. Grant, Stephen M. Griffies, Robert Hallberg, Tetsu Hara, ... Zhihua Zheng
Journal of Advances in Modeling Earth Systems (2019-11-15) <https://doi.org/gg8gst>
DOI: [10.1029/2019ms001810](#)

26. Thermobaricity, cabbeling, and water-mass conversion

Trevor J. McDougall

Journal of Geophysical Research (1987) <https://doi.org/bf88vc>

DOI: [10.1029/jc092ic05p05448](#)

27. Oceanic Stochastic Parameterizations in a Seasonal Forecast System

M. Andrejczuk, F. C. Cooper, S. Juricke, T. N. Palmer, A. Weisheimer, L. Zanna

Monthly Weather Review (2016-05) <https://doi.org/gf3wjg>

DOI: [10.1175/mwr-d-15-0245.1](#)

28. Impact of uncertainties in the horizontal density gradient upon low resolution global ocean modelling

Jean-Michel Brankart

Ocean Modelling (2013-06) <https://doi.org/gg9fqn>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2013.02.004](#)

29. Climatologically Significant Effects of Some Approximations in the Bulk Parameterizations of Turbulent Air-Sea Fluxes

Laurent Brodeau, Bernard Barnier, Sergey K. Gulev, Cian Woods

Journal of Physical Oceanography (2017-01) <https://doi.org/f3sctf>

DOI: [10.1175/jpo-d-16-0169.1](#)

30. Effects of fluctuating daily surface fluxes on the time-mean oceanic circulation

Balan Sarojini Beena, Jin-Song von Storch

Climate Dynamics (2009-04-23) <https://doi.org/fbr9js>

DOI: [10.1007/s00382-009-0575-y](https://doi.org/10.1007/s00382-009-0575-y)

31. Climatic impacts of stochastic fluctuations in air-sea fluxes

Paul D. Williams

Geophysical Research Letters (2012-05-28) <https://doi.org/gf3wjw>

DOI: [10.1029/2012gl051813](https://doi.org/10.1029/2012gl051813)

32. A framework for parameterization of heterogeneous ocean convection

Mehmet Ilicak, Alistair J. Adcroft, Sonya Legg

Ocean Modelling (2014-10) <https://doi.org/f6jtwv>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2014.07.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.07.002)

33. Universal scaling laws in fully developed turbulence

Zhen-Su She, Emmanuel Leveque

Physical Review Letters (1994-01-17) <https://doi.org/cw9bm4>

DOI: [10.1103/physrevlett.72.336](https://doi.org/10.1103/physrevlett.72.336) · PMID: [10056405](#)

34. Scale-Invariance and Turbulence Models for Large-Eddy Simulation

Charles Meneveau, Joseph Katz

Annual Review of Fluid Mechanics (2000-01) <https://doi.org/d4mw42>

DOI: [10.1146/annurev.fluid.32.1.1](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.1)

35. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states

Gokhan Danabasoglu, Steve G. Yeager, David Bailey, Erik Behrens, Mats Bentsen, Daohua Bi, Arne Biastoch, Claus Böning, Alexandra Bozec, Vittorio M. Canuto, ... Qiang Wang

Ocean Modelling (2014-01) <https://doi.org/f5m4f3>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.10.005)

36. Spurious AMOC trends in global ocean sea-ice models related to subarctic freshwater forcing

Erik Behrens, Arne Biastoch, Claus W. Böning

Ocean Modelling (2013-09) <https://doi.org/f48hrd>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2013.05.004](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.05.004)

37. Disentangling the Mesoscale Ocean-Atmosphere Interactions

L. Renault, S. Masson, V. Oerder, S. Jullien, F. Colas

Journal of Geophysical Research: Oceans (2019-03-28) <https://doi.org/gg9z8m>

DOI: [10.1029/2018jc014628](https://doi.org/10.1029/2018jc014628)

38. Impact of Ocean-Atmosphere Current Feedback on Ocean Mesoscale Activity: Regional Variations and Sensitivity to Model Resolution

Swen Jullien, Sébastien Masson, Véra Oerder, Guillaume Samson, François Colas, Lionel Renault

Journal of Climate (2020-04-01) <https://doi.org/gg9z8s>

DOI: [10.1175/jcli-d-19-0484.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0484.1)

39. Remarkable Control of Western Boundary Currents by *Eddy Killing*, a Mechanical Air-Sea Coupling Process

L. Renault, P. Marchesiello, S. Masson, J. C. McWilliams

40. A review of ensemble forecasting techniques with a focus on tropical cyclone forecasting

Kevin KW Cheung

Meteorological Applications (2001-09) <https://doi.org/c34fnb>

DOI: [10.1017/s1350482701003073](https://doi.org/10.1017/s1350482701003073)

41. Roots of Ensemble Forecasting

John M. Lewis

Monthly Weather Review (2005-07-01) <https://doi.org/dxwg3j>

DOI: [10.1175/mwr2949.1](https://doi.org/10.1175/mwr2949.1)

42. Inverse Cascades of Kinetic Energy as a Source of Intrinsic Variability: A Global OGCM Study

Guillaume Sérazin, Thierry Penduff, Bernard Barnier, Jean-Marc Molines, Brian K. Arbic, Malte Müller, Laurent Terray

Journal of Physical Oceanography (2018-06) <https://doi.org/gdwm8b>

DOI: [10.1175/jpo-d-17-0136.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-17-0136.1)

43. Sea Level Expression of Intrinsic and Forced Ocean Variabilities at Interannual Time Scales

Thierry Penduff, Mélanie Juza, Bernard Barnier, Jan Zika, William K. Dewar, Anne-Marie Treguier, Jean-Marc Molines, Nicole Audiffren

Journal of Climate (2011-11-01) <https://doi.org/fd9dxf>

DOI: [10.1175/jcli-d-11-00077.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00077.1)

44. Intrinsic Variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at Interannual-to-Multidecadal Time Scales

Sandy Grégorio, Thierry Penduff, Guillaume Sérazin, Jean-Marc Molines, Bernard Barnier, Joël Hirschi

Journal of Physical Oceanography (2015-07) <https://doi.org/gf3wjv>

DOI: [10.1175/jpo-d-14-0163.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0163.1)

45. Intrinsic and Atmospherically Forced Variability of the AMOC: Insights from a Large-Ensemble Ocean Hindcast

Stephanie Leroux, Thierry Penduff, Laurent Bessières, Jean-Marc Molines, Jean-Michel Brankart, Guillaume Sérazin, Bernard Barnier, Laurent Terray

Journal of Climate (2018-02-01) <https://doi.org/gc362w>

DOI: [10.1175/jcli-d-17-0168.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0168.1)

46. A global probabilistic study of the ocean heat content low-frequency variability: Atmospheric forcing versus oceanic chaos

Guillaume Sérazin, Alexandre Jaymond, Stéphanie Leroux, Thierry Penduff, Laurent Bessières, William Llovel, Bernard Barnier, Jean-Marc Molines, Laurent Terray

Geophysical Research Letters (2017-06-16) <https://doi.org/gbnvns>

DOI: [10.1002/2017gl073026](https://doi.org/10.1002/2017gl073026)

47. Chaotic Variability of Ocean: Heat Content Climate-Relevant Features and Observational Implications

Thierry Penduff, Guillaume Sérazin, Stéphanie Leroux, Sally Close, Jean-Marc Molines, Bernard Barnier, Laurent Bessières, Laurent Terray, Guillaume Maze, CNRS

Oceanography (2018-06-01) <https://doi.org/gfzgnm>

DOI: [10.5670/oceanog.2018.210](https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.210)

48. Uncertainty and scale interactions in ocean ensembles: From seasonal forecasts to multidecadal climate predictions

L. Zanna, J. M. Brankart, M. Huber, S. Leroux, T. Penduff, P. D. Williams

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (2018-11-08) <https://doi.org/gfrhtw>

DOI: [10.1002/qj.3397](https://doi.org/10.1002/qj.3397)

49. Development of a probabilistic ocean modelling system based on NEMO 3.5: application at eddying resolution

Laurent Bessières, Stéphanie Leroux, Jean-Michel Brankart, Jean-Marc Molines, Marie-Pierre Moine, Pierre-Antoine Bourtier, Thierry Penduff, Laurent Terray, Bernard Barnier, Guillaume Sérazin

Geoscientific Model Development (2017-03-10) <https://doi.org/f92ht6>

DOI: [10.5194/gmd-10-1091-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-1091-2017)

50. Stochastic Parameterization: Toward a New View of Weather and Climate Models

Judith Berner, Ulrich Achatz, Lauriane Batté, Lisa Bengtsson, Alvaro de la Cámara, Hannah M. Christensen, Matteo Colangeli, Danielle R. B. Coleman, Daan Crommelin, Stamen I. Dolaptchiev, ... Jun-Ichi Yano

Bulletin of the American Meteorological Society (2017-03-01) <https://doi.org/gddmj4>

DOI: [10.1175/bams-d-15-00268.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-15-00268.1)

51. Modelling climate change: the role of unresolved processes

Paul D Williams

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (2005-10-24) <https://doi.org/d45m9d>

DOI: [10.1098/rsta.2005.1676](https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1676) · PMID: [16286298](#)

52. A nonlinear dynamical perspective on model error: A proposal for non-local stochastic-dynamic parametrization in weather and climate prediction models

T. N. Palmer

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (2001-01) <https://doi.org/dbcv9r>

DOI: [10.1002/qj.49712757202](https://doi.org/10.1002/qj.49712757202)

53. Toward a stochastic parameterization of ocean mesoscale eddies

PierGianLuca Porta Mana, Laure Zanna

Ocean Modelling (2014-07) <https://doi.org/f55czn>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2014.04.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.04.002)

54. Parameterizing subgrid-scale eddy effects using energetically consistent backscatter

Malte F. Jansen, Isaac M. Held

Ocean Modelling (2014-08) <https://doi.org/f6cpn>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2014.06.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.06.002)

55. Introduction. Stochastic physics and climate modelling

T. N Palmer, P. D Williams

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (2008-04-29) <https://doi.org/cc8xxw>

DOI: [10.1098/rsta.2008.0059](https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0059) · PMID: [18445565](#)

56. A Stochastic Representation of Subgrid Uncertainty for Dynamical Core Development

Aneesh Subramanian, Stephan Juricke, Peter Dueben, Tim Palmer

Bulletin of the American Meteorological Society (2019-06) <https://doi.org/gftgjm>

DOI: [10.1175/bams-d-17-0040.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0040.1)

- 57. A generic approach to explicit simulation of uncertainty in the NEMO ocean model**
J.-M. Brankart, G. Candille, F. Garnier, C. Calone, A. Melet, P.-A. Boutrier, P. Brasseur, J. Verron
Geoscientific Model Development (2015-05-04) <https://doi.org/f7d85q>
DOI: [10.5194/gmd-8-1285-2015](https://doi.org/10.5194/gmd-8-1285-2015)
- 58. Stochastic Subgrid-Scale Ocean Mixing: Impacts on Low-Frequency Variability**
Stephan Juricke, Tim N. Palmer, Laure Zanna
Journal of Climate (2017-07) <https://doi.org/gbj9cc>
DOI: [10.1175/jcli-d-16-0539.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0539.1)
- 59. Some neural network applications in environmental sciences. Part I: forward and inverse problems in geophysical remote measurements**
Vladimir M. Krasnopolksky, Helmut Schiller
Neural Networks (2003-04) <https://doi.org/cm4fhf>
DOI: [10.1016/s0893-6080\(03\)00027-3](https://doi.org/10.1016/s0893-6080(03)00027-3)
- 60. Neural network emulations for complex multidimensional geophysical mappings: Applications of neural network techniques to atmospheric and oceanic satellite retrievals and numerical modeling**
Vladimir M. Krasnopolksky
Reviews of Geophysics (2007-09) <https://doi.org/d29p2n>
DOI: [10.1029/2006rg000200](https://doi.org/10.1029/2006rg000200)
- 61. Statistical analysis in climate research**
H. v Storch, Francis W. Zwiers
Cambridge University Press (1999)
ISBN: [9780521450713](https://doi.org/9780521450713)
- 62. Accelerating Eulerian Fluid Simulation With Convolutional Networks**
Jonathan Tompson, Kristofer Schlachter, Pablo Sprechmann, Ken Perlin
arXiv (2017-06-23) <https://arxiv.org/abs/1607.03597>
- 63. Applications of Deep Learning to Ocean Data Inference and Subgrid Parameterization**
Thomas Bolton, Laure Zanna
Journal of Advances in Modeling Earth Systems (2019-01) <https://doi.org/gfsvqg>
DOI: [10.1029/2018ms001472](https://doi.org/10.1029/2018ms001472)
- 64. Data-Driven Equation Discovery of Ocean Mesoscale Closures**
Laure Zanna, Thomas Bolton
Geophysical Research Letters (2020-08-27) <https://doi.org/gg92dh>
DOI: [10.1029/2020gl088376](https://doi.org/10.1029/2020gl088376)
- 65. Deep learning in fluid dynamics**
J. Nathan Kutz
Journal of Fluid Mechanics (2017-01-31) <https://doi.org/gfxr5h>
DOI: [10.1017/jfm.2016.803](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.803)
- 66. Machine Learning for Fluid Mechanics**
Steven L. Brunton, Bernd R. Noack, Petros Koumoutsakos
Annual Review of Fluid Mechanics (2020-01-05) <https://doi.org/ggcgtl>
DOI: [10.1146/annurev-fluid-010719-060214](https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060214)

67. Data-driven discovery of partial differential equations

Samuel H. Rudy, Steven L. Brunton, Joshua L. Proctor, J. Nathan Kutz

Science Advances (2017-04-26) <https://doi.org/f97qf9>

DOI: [10.1126/sciadv.1602614](https://doi.org/10.1126/sciadv.1602614) · PMID: [28508044](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28508044/) · PMCID: [PMC5406137](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC5406137/)

68. Neural Ordinary Differential Equations

Ricky T. Q. Chen, Yulia Rubanova, Jesse Bettencourt, David Duvenaud

arXiv (2019-12-17) <https://arxiv.org/abs/1806.07366>

69. Universal Differential Equations for Scientific Machine Learning

Christopher Rackauckas, Yingbo Ma, Julius Martensen, Collin Warner, Kirill Zubov, Rohit Supekar, Dominic Skinner, Ali Ramadhan, Alan Edelman

arXiv (2020-08-10) <https://arxiv.org/abs/2001.04385>

70. Variational Deep Learning for the Identification and Reconstruction of Chaotic and Stochastic Dynamical Systems from Noisy and Partial Observations

Duong Nguyen, Said Ouala, Lucas Drumetz, Ronan Fablet

arXiv (2021-01-15) <https://arxiv.org/abs/2009.02296>

71. 70 years of machine learning in geoscience in review

Jesper Sören Dramsch

arXiv (2020-09-30) <https://arxiv.org/abs/2006.13311>

DOI: [10.1016/bs.agph.2020.08.002](https://doi.org/10.1016/bs.agph.2020.08.002)

72. Computational intelligence in earth sciences and environmental applications: Issues and challenges

V. Cherkassky, V. Krasnopolksy, D. P. Solomatine, J. Valdes

Neural Networks (2006-03) <https://doi.org/fvjszk>

DOI: [10.1016/j.neunet.2006.01.001](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.001) · PMID: [16527457](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16527457/)

73. A neural network technique to improve computational efficiency of numerical oceanic models

Vladimir M. Krasnopolksy, Dmitry V. Chalikov, Hendrik L. Tolman

Ocean Modelling (2002-06) <https://doi.org/bcq5xk>

DOI: [10.1016/s1463-5003\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/s1463-5003(02)00010-0)

74. Complex hybrid models combining deterministic and machine learning components for numerical climate modeling and weather prediction

Vladimir M. Krasnopolksy, Michael S. Fox-Rabinovitz

Neural Networks (2006-03) <https://doi.org/b2cxfn>

DOI: [10.1016/j.neunet.2006.01.002](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.002) · PMID: [16527454](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16527454/)

75. Avoid boring people: lessons from a life in science

James D. Watson

Oxford University Press (2007)

ISBN: [9780192802736](https://www.worldcat.org/identities/oclc/9780192802736)

76. Rôle des tourbillons océaniques dans la variabilité récente des flux air-mer de CO₂ dans l'océan Austral

Carolina Dufour

Université de Grenoble (2011-12-06) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00679918>

77. Southern Ocean

Lynne D. Talley, George L. Pickard, William J. Emery, James H. Swift
Elsevier BV(2011) <https://doi.org/ghqvn>
DOI: [10.1016/b978-0-7506-4552-2.10013-7](https://doi.org/b978-0-7506-4552-2.10013-7)

78. The dynamical balance, transport and circulation of the Antarctic Circumpolar Current

DIRK OLBERS, DANIEL BOROWSKI, CHRISTOPH VÖLKER, JORG-OLAF WÖLFF
Antarctic Science (2004-11-30) <https://doi.org/bzcnwm>
DOI: [10.1017/s0954102004002251](https://doi.org/10.1017/s0954102004002251)

79. The Antarctic Circumpolar Current as a free equivalent-barotropic jet

Peter D. Killworth, Chris W. Hughes
Journal of Marine Research (2002-01-01) <https://doi.org/cgt33r>
DOI: [10.1357/002224002762341230](https://doi.org/10.1357/002224002762341230)

80. Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling

John Marshall, Kevin Speer
Nature Geoscience (2012-02-26) <https://doi.org/gf7sc5>
DOI: [10.1038/ngeo1391](https://doi.org/10.1038/ngeo1391)

81. Subantarctic Mode Water Formation, Destruction, and Export in the Eddy-Permitting Southern Ocean State Estimate

Ivana Cerovečki, Lynne D. Talley, Matthew R. Mazloff, Guillaume Maze
Journal of Physical Oceanography (2013-07-01) <https://doi.org/f5n65x>
DOI: [10.1175/jpo-d-12-0121.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-12-0121.1)

82. Bottom water production and its links with the thermohaline circulation

STANLEY S. JACOBS
Antarctic Science (2004-11-30) <https://doi.org/cf7hht>
DOI: [10.1017/s095410200400224x](https://doi.org/10.1017/s095410200400224x)

83. A model of the upper branch of the meridional overturning of the southern ocean

John Marshall, Timour Radko
Progress in Oceanography (2006-08) <https://doi.org/bnk743>
DOI: [10.1016/j.pocean.2006.07.004](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.07.004)

84. Control of Lower-Limb Overturning Circulation in the Southern Ocean by Diapycnal Mixing and Mesoscale Eddy Transfer

Taka Ito, John Marshall
Journal of Physical Oceanography (2008-12-01) <https://doi.org/bhrz2p>
DOI: [10.1175/2008jpo3878.1](https://doi.org/10.1175/2008jpo3878.1)

85. Southern Ocean overturning across streamlines in an eddying simulation of the Antarctic Circumpolar Current

A. M. Treguier, M. H. England, S. R. Rintoul, G. Madec, J. Le Sommer, J.-M. Molines
Ocean Science (2007-12-19) <https://doi.org/bgj3vz>
DOI: [10.5194/os-3-491-2007](https://doi.org/10.5194/os-3-491-2007)

86. The Southern Ocean in the Earth System

Stephen R. Rintoul
Smithsonian Institution (2011) <https://doi.org/c4hdqr>
DOI: [10.5479/si.9781935623069.175](https://doi.org/10.5479/si.9781935623069.175)

87. The Southern Ocean, carbon and climate

Andrew J. Watson, Michael P. Meredith, John Marshall

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences
(2014-07-13) <https://doi.org/ghq4w7>

DOI: [10.1098/rsta.2013.0057](https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0057) · PMID: [24891393](#) · PMCID: [PMC4032511](#)

88. Role of the Southern Ocean in setting the Atlantic stratification and meridional overturning circulation

Igor Kamenkovich, Timour Radko

Journal of Marine Research (2011-03-01) <https://doi.org/dd2p5z>

DOI: [10.1357/002224011798765286](https://doi.org/10.1357/002224011798765286)

89. Oceanic sources, sinks, and transport of atmospheric CO₂

Nicolas Gruber, Manuel Gloor, Sara E. Mikaloff Fletcher, Scott C. Doney, Stephanie Dutkiewicz, Michael J. Follows, Markus Gerber, Andrew R. Jacobson, Fortunat Joos, Keith Lindsay, ... Taro Takahashi

Global Biogeochemical Cycles (2009-03) <https://doi.org/cf59hc>

DOI: [10.1029/2008gb003349](https://doi.org/10.1029/2008gb003349)

90. Dynamics of the Southern Ocean Circulation

Stephen R. Rintoul, Alberto C. Naveira Garabato

International Geophysics (2013) <https://doi.org/ghrbmz>

DOI: [10.1016/b978-0-12-391851-2.00018-0](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-391851-2.00018-0)

91. The Southern Ocean Observing System: initial science and implementation strategy

Stephen R. Rintoul, Scientific Committee on Antarctic Research, International Council of Scientific Unions (éditeurs)

Scientific Committee on Antarctic Research (2012)

ISBN: [9780948277276](https://doi.org/9780948277276)

92. The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change

C. W. Böning, A. Dispert, M. Visbeck, S. R. Rintoul, F. U. Schwarzkopf

Nature Geoscience (2008-11-23) <https://doi.org/d69xjt>

DOI: [10.1038/ngeo362](https://doi.org/10.1038/ngeo362)

93. Warming of the Southern Ocean Since the 1950s

S. T. Gille

Science (2002-02-15) <https://doi.org/d7zst8>

DOI: [10.1126/science.1065863](https://doi.org/1065863) · PMID: [11847337](#)

94. Decadal-Scale Temperature Trends in the Southern Hemisphere Ocean

Sarah T. Gille

Journal of Climate (2008-09-15) <https://doi.org/bszvtb>

DOI: [10.1175/2008jcli2131.1](https://doi.org/10.1175/2008jcli2131.1)

95. Frontal movements and property fluxes: Contributions to heat and freshwater trends in the Southern Ocean

A. J. S. Meijers, N. L. Bindoff, S. R. Rintoul

Journal of Geophysical Research (2011-08-23) <https://doi.org/c9j6nv>

DOI: [10.1029/2010jc006832](https://doi.org/10.1029/2010jc006832)

96. Warming and Freshening in the Abyssal Southeastern Indian Ocean*

Gregory C. Johnson, Sarah G. Purkey, John L. Bullister

Journal of Climate (2008-10-15) <https://doi.org/fmr6dk>
DOI: [10.1175/2008jcli2384.1](https://doi.org/10.1175/2008jcli2384.1)

97. Antarctic Bottom Water Warming and Freshening: Contributions to Sea Level Rise, Ocean Freshwater Budgets, and Global Heat Gain*

Sarah G. Purkey, Gregory C. Johnson

Journal of Climate (2013-08-15) <https://doi.org/kr6>
DOI: [10.1175/jcli-d-12-00834.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00834.1)

98. On the Variability of Antarctic Circumpolar Current Fronts Inferred from 1992–2011 Altimetry*

Yong Sun Kim, Alejandro H. Orsi

Journal of Physical Oceanography (2014-12-01) <https://doi.org/ghrfjg>
DOI: [10.1175/jpo-d-13-0217.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-13-0217.1)

99. Recent trends in the Southern Ocean eddy field

Andrew McC. Hogg, Michael P. Meredith, Don P. Chambers, E. Povl Abrahamsen, Chris W. Hughes, Adele K. Morrison

Journal of Geophysical Research: Oceans (2015-01) <https://doi.org/ghrfj>
DOI: [10.1002/2014jc010470](https://doi.org/10.1002/2014jc010470)

100. Changes in the ocean transport through Drake Passage during the 1980s and 1990s, forced by changes in the Southern Annular Mode

Michael P. Meredith, Philip L. Woodworth, Chris W. Hughes, Vladimir Stepanov

Geophysical Research Letters (2004-11) <https://doi.org/d64dkr>
DOI: [10.1029/2004gl021169](https://doi.org/10.1029/2004gl021169)

101. Observations: Ocean Pages

Cambridge University Press (CUP)

(2014-06-09) <https://doi.org/gf5hkb>

DOI: [10.1017/cbo9781107415324.010](https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.010)

102. Changes in the ventilation of the southern oceans

Darryn W. Waugh

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (2014-07-13) <https://doi.org/f59ht3>

DOI: [10.1098/rsta.2013.0269](https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0269) · PMID: [24891397](#)

103. Freshening drives contraction of Antarctic Bottom Water in the Australian Antarctic Basin

Esmee M. van Wijk, Stephen R. Rintoul

Geophysical Research Letters (2014-03-16) <https://doi.org/f5x9ff>
DOI: [10.1002/2013gl058921](https://doi.org/10.1002/2013gl058921)

104. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data

Josefino C. Comiso, Fumihiko Nishio

Journal of Geophysical Research (2008-02-22) <https://doi.org/fwfrm3>
DOI: [10.1029/2007jc004257](https://doi.org/10.1029/2007jc004257)

105. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010

C. L. Parkinson, D. J. Cavalieri

The Cryosphere (2012-08-15) <https://doi.org/gb9p2z>
DOI: [10.5194/tc-6-871-2012](https://doi.org/10.5194/tc-6-871-2012)

106. Non-annular atmospheric circulation change induced by stratospheric ozone depletion and its role in the recent increase of Antarctic sea ice extent

John Turner, Josefino C. Comiso, Gareth J. Marshall, Tom A. Lachlan-Cope, Tom Bracegirdle, Ted Maksym, Michael P. Meredith, Zhaomin Wang, Andrew Orr
Geophysical Research Letters (2009-04-23) <https://doi.org/cx567g>
DOI: [10.1029/2009gl037524](https://doi.org/10.1029/2009gl037524)

107. Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change

C. Le Quere, C. Rodenbeck, E. T. Buitenhuis, T. J. Conway, R. Langenfelds, A. Gomez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, N. Metzl, ... M. Heimann
Science (2007-06-22) <https://doi.org/fctrq9>
DOI: [10.1126/science.1136188](https://doi.org/10.1126/science.1136188) · PMID: [17510327](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17510327/)

108. The Changing Carbon Cycle in the Southern Ocean

Taro Takahashi, Colm Sweeney, Burke Hales, David Chipman, Timothy Newberger, John Goddard, Richard Iannuzzi, Stewart Sutherland
Oceanography (2012-09-01) <https://doi.org/f4bpqs>
DOI: [10.5670/oceanog.2012.71](https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.71)

109. Decreasing pH trend estimated from 35-year time series of carbonate parameters in the Pacific sector of the Southern Ocean in summer

Takashi Midorikawa, Hisayuki Y. Inoue, Masao Ishii, Daisuke Sasano, Naohiro Kosugi, Gen Hashida, Shin-ichiro Nakaoka, Toru Suzuki
Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers (2012-03) <https://doi.org/bgg3qt>
DOI: [10.1016/j.dsr.2011.12.003](https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.12.003)

110. Trends and drivers in global surface ocean pH over the past 3 decades

S. K. Lauvset, N. Gruber, P. Landschützer, A. Olsen, J. Tjiputra
Biogeosciences (2015-03-02) <https://doi.org/f65n48>
DOI: [10.5194/bg-12-1285-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-1285-2015)

111. Rapid climatic driven shifts of diatoms at high latitudes

Séverine Alvain, Corinne Le Quéré, Laurent Bopp, Marie-Fanny Racault, Grégory Beaugrand, David Dessailly, Eric T. Buitenhuis
Remote Sensing of Environment (2013-05) <https://doi.org/f4s542>
DOI: [10.1016/j.rse.2013.01.014](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.014)

112. Antarctic Futures: An Assessment of Climate-Driven Changes in Ecosystem Structure, Function, and Service Provisioning in the Southern Ocean

A. D. Rogers, B. A. V. Frinault, D. K. A. Barnes, N. L. Bindoff, R. Downie, H. W. Ducklow, A. S. Friedlaender, T. Hart, S. L. Hill, E. E. Hofmann, ... R. M. Wright
Annual Review of Marine Science (2020-01-03) <https://doi.org/ghhk53>
DOI: [10.1146/annurev-marine-010419-011028](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-011028) · PMID: [31337252](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31337252/)

113. Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change

David W. J. Thompson, Susan Solomon, Paul J. Kushner, Matthew H. England, Kevin M. Grise, David J. Karoly
Nature Geoscience (2011-10-23) <https://doi.org/fqzqm8>
DOI: [10.1038/ngeo1296](https://doi.org/10.1038/ngeo1296)

114. Annular modes of the troposphere and stratosphere

Paul J. Kushner

115. Sea Surface Temperature Variability along the Path of the Antarctic Circumpolar Current

Ariane Verdy, John Marshall, Arnaud Czaja
Journal of Physical Oceanography (2006-07-01) <https://doi.org/fsd5fz>
DOI: [10.1175/jpo2913.1](https://doi.org/10.1175/jpo2913.1)

116. Carbon dioxide and oxygen fluxes in the Southern Ocean: Mechanisms of interannual variability

A. Verdy, S. Dutkiewicz, M. J. Follows, J. Marshall, A. Czaja
Global Biogeochemical Cycles (2007-06) <https://doi.org/c5zqfg>
DOI: [10.1029/2006gb002916](https://doi.org/10.1029/2006gb002916)

117. Zonally asymmetric response of the Southern Ocean mixed-layer depth to the Southern Annular Mode

J. B. Sallée, K. G. Speer, S. R. Rintoul
Nature Geoscience (2010-03-14) <https://doi.org/cfk27b>
DOI: [10.1038/ngeo812](https://doi.org/10.1038/ngeo812)

118. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system

W. Lefebvre
Journal of Geophysical Research (2004) <https://doi.org/ckzt92>
DOI: [10.1029/2004jc002403](https://doi.org/10.1029/2004jc002403)

119. Modulation of the Seasonal Cycle of Antarctic Sea Ice Extent Related to the Southern Annular Mode

Edward W. Doddridge, John Marshall
Geophysical Research Letters (2017-10-05) <https://doi.org/gchknt>
DOI: [10.1002/2017gl074319](https://doi.org/10.1002/2017gl074319)

120. Circumpolar response of Southern Ocean eddy activity to a change in the Southern Annular Mode

Michael P. Meredith, Andrew M. Hogg
Geophysical Research Letters (2006) <https://doi.org/dfdkz2>
DOI: [10.1029/2006gl026499](https://doi.org/10.1029/2006gl026499)

121. Hemispheric-Scale Seasonality of the Southern Annular Mode and Impacts on the Climate of New Zealand

J. Kidston, J. A. Renwick, J. McGregor
Journal of Climate (2009-09-15) <https://doi.org/cfpvw9>
DOI: [10.1175/2009jcli2640.1](https://doi.org/10.1175/2009jcli2640.1)

122. The Role of Eddies in Determining the Structure and Response of the Wind-Driven Southern Hemisphere Overturning: Results from the Modeling Eddies in the Southern Ocean (MESO) Project

Robert Hallberg, Anand Gnanadesikan
Journal of Physical Oceanography (2006-12-01) <https://doi.org/fdpnrt>
DOI: [10.1175/jpo2980.1](https://doi.org/10.1175/jpo2980.1)

123. The Role of Mesoscale Eddies in the Rectification of the Southern Ocean Response to Climate Change

Riccardo Farneti, Thomas L. Delworth, Anthony J. Rosati, Stephen M. Griffies, Fanrong Zeng

Journal of Physical Oceanography (2010-07-01) <https://doi.org/dr4t5j>
DOI: [10.1175/2010jpo4353.1](https://doi.org/10.1175/2010jpo4353.1)

124. Eddy Heat Flux in the Southern Ocean: Response to Variable Wind Forcing

Andrew Mc C. Hogg, Michael P. Meredith, Jeffrey R. Blundell, Chris Wilson
Journal of Climate (2008-02-15) <https://doi.org/dqpnwr>
DOI: [10.1175/2007jcli1925.1](https://doi.org/10.1175/2007jcli1925.1)

125. On the Relationship between Southern Ocean Overturning and ACC Transport

Adele K. Morrison, Andrew McC. Hogg
Journal of Physical Oceanography (2013-01-01) <https://doi.org/f4mxb3>
DOI: [10.1175/jpo-d-12-057.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-12-057.1)

126. The Dependence of Southern Ocean Meridional Overturning on Wind Stress

Ryan Abernathey, John Marshall, David Ferreira
Journal of Physical Oceanography (2011-12-01) <https://doi.org/fkc9hb>
DOI: [10.1175/jpo-d-11-023.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-11-023.1)

127. Towards the impact of eddies on the response of the Southern Ocean to climate change

Jan Viebahn, Carsten Eden
Ocean Modelling (2010-01) <https://doi.org/cmbzhn>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2010.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.05.005)

128. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean system: the role of the thermal and mechanical forcing

W. Lefebvre, H. Goosse
Copernicus GmbH (2010-04-29) <https://doi.org/fmk23>
DOI: [10.5194/osd-2-299-2005](https://doi.org/10.5194/osd-2-299-2005)

129. Standing and Transient Eddies in the Response of the Southern Ocean Meridional Overturning to the Southern Annular Mode

C. O. Dufour, J. Le Sommer, J. D. Zika, M. Gehlen, J. C. Orr, P. Mathiot, B. Barnier
Journal of Climate (2012-10-15) <https://doi.org/f4b9c2>
DOI: [10.1175/jcli-d-11-00309.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00309.1)

130. Vertical Eddy Fluxes in the Southern Ocean

Jan D. Zika, Julien Le Sommer, Carolina O. Dufour, Jean-Marc Molines, Bernard Barnier, Pierre Brasseur, Raphaël Dussin, Thierry Penduff, Daniele ludicone, Andrew Lenton, ... Frederic Vivier
Journal of Physical Oceanography (2013-05-01) <https://doi.org/f4zhn4>
DOI: [10.1175/jpo-d-12-0178.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-12-0178.1)

131. Isopycnal Averaging at Constant Height. Part I: The Formulation and a Case Study

A. J. George Nurser, Mei-Man Lee
Journal of Physical Oceanography (2004-12-01) <https://doi.org/dz7f47>
DOI: [10.1175/jpo2649.1](https://doi.org/10.1175/jpo2649.1)

132. Thermodynamic Analysis of Ocean Circulation

J. Nycander, J. Nilsson, K. Döös, G. Broström
Journal of Physical Oceanography (2007-08-01) <https://doi.org/fwddxs>
DOI: [10.1175/jpo3113.1](https://doi.org/10.1175/jpo3113.1)

133. Impacts on Ocean Heat from Transient Mesoscale Eddies in a Hierarchy of Climate Models

Stephen M. Griffies, Michael Winton, Whit G. Anderson, Rusty Benson, Thomas L. Delworth,

Carolina O. Dufour, John P. Dunne, Paul Goddard, Adele K. Morrison, Anthony Rosati, ... Rong

Zhang

Journal of Climate (2015-02-01) <https://doi.org/f6zwz6>

DOI: [10.1175/jcli-d-14-00353.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00353.1)

134. Resolving and Parameterising the Ocean Mesoscale in Earth System Models

Helene T. Hewitt, Malcolm Roberts, Pierre Mathiot, Arne Biastoch, Ed Blockley, Eric P. Chassignet, Baylor Fox-Kemper, Pat Hyder, David P. Marshall, Ekaterina Popova, ... Qiuying Zhang

Current Climate Change Reports (2020-10-07) <https://doi.org/ghphx>

DOI: [10.1007/s40641-020-00164-w](https://doi.org/10.1007/s40641-020-00164-w)

135. Implementation of a Geometrically Informed and Energetically Constrained Mesoscale

Eddy Parameterization in an Ocean Circulation Model

J. Mak, J. R. Maddison, D. P. Marshall, D. R. Munday

Journal of Physical Oceanography (2018-10) <https://doi.org/gfjnpk>

DOI: [10.1175/jpo-d-18-0017.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0017.1)

136. Emergent eddy saturation from an energy constrained eddy parameterisation

J. Mak, D. P. Marshall, J. R. Maddison, S. D. Bachman

Ocean Modelling (2017-04) <https://doi.org/ghtph9>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2017.02.007](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.02.007)

137. Eddy compensation and controls of the enhanced sea-to-air CO₂ flux during positive phases of the Southern Annular Mode

Carolina O. Dufour, Julien Le Sommer, Marion Gehlen, James C. Orr, Jean-Marc Molines, Jennifer Simeon, Bernard Barnier

Global Biogeochemical Cycles (2013-09-23) <https://doi.org/f5dqsm>

DOI: [10.1002/gbc.20090](https://doi.org/10.1002/gbc.20090)

138. Enhanced CO₂ outgassing in the Southern Ocean from a positive phase of the Southern Annular Mode

Nicole S. Lovenduski, Nicolas Gruber, Scott C. Doney, Ivan D. Lima

Global Biogeochemical Cycles (2007-06) <https://doi.org/fpv2wt>

DOI: [10.1029/2006gb002900](https://doi.org/10.1029/2006gb002900)

139. Role of the Southern Annular Mode (SAM) in Southern Ocean CO₂ uptake

Andrew Lenton, Richard J. Matear

Global Biogeochemical Cycles (2007-06) <https://doi.org/bxt8mb>

DOI: [10.1029/2006gb002714](https://doi.org/10.1029/2006gb002714)

140. Stationary Rossby waves dominate subduction of anthropogenic carbon in the Southern Ocean

C. E. Langlais, A. Lenton, R. Matear, D. Monselesan, B. Legresy, E. Cougnon, S. Rintoul

Scientific Reports (2017-12-06) <https://doi.org/gg4mww>

DOI: [10.1038/s41598-017-17292-3](https://doi.org/10.1038/s41598-017-17292-3) · PMID: [29213120](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29213120/) · PMCID: [PMC5719014](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC5719014/)

141. Acceleration of the Antarctic Circumpolar Current by Wind Stress along the Coast of Antarctica

Jan D. Zika, Julien Le Sommer, Carolina O. Dufour, Alberto Naveira-Garabato, Adam Blaker

Journal of Physical Oceanography (2013-12-01) <https://doi.org/f5jjds>

DOI: [10.1175/jpo-d-13-091.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-13-091.1)

142. Mechanisms Maintaining Southern Ocean Meridional Heat Transport under Projected Wind Forcing

Paul Spence, Oleg A. Saenko, Carolina O. Dufour, Julien Le Sommer, Matthew H. England
Journal of Physical Oceanography (2012-11-01) <https://doi.org/f4d42m>
DOI: [10.1175/jpo-d-12-03.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-12-03.1)

143. A degradation approach to accelerate simulations to steady-state in a 3-D tracer transport model of the global ocean

O. Aumont, J. C. Orr, D. Jamous, P. Monfray, O. Marti, G. Madec
Climate Dynamics (1998-02-12) <https://doi.org/cjgvdp>
DOI: [10.1007/s003820050212](https://doi.org/10.1007/s003820050212)

144. Multi-grid algorithm for passive tracer transport in the NEMO ocean circulation model: a case study with the NEMO OGCM (version 3.6)

Clément Bricaud, Julien Le Sommer, Gurvan Madec, Christophe Calone, Julie Deshayes, Christian Ethe, Jérôme Chanut, Marina Levy
Geoscientific Model Development (2020-11-10) <https://doi.org/ghnn4x>
DOI: [10.5194/gmd-13-5465-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-5465-2020)

145. Réponse des masses d'eau intermédiaires et modales de l'océan Austral au mode annulaire austral : les processus en jeu et rôle de la glace de mer

Gildas Mainsant
Université Grenoble Alpes (2014-11-28) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01551769>

146. Ocean / Ice sheet interactions : toward a coupled model system

Nacho Merino
Université Grenoble Alpes (2016-12-02) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01760438>

147. Sea-ice transport driving Southern Ocean salinity and its recent trends

F. Alexander Haumann, Nicolas Gruber, Matthias Münnich, Ivy Frenger, Stefan Kern
Nature (2016-08-31) <https://doi.org/f83tv4>
DOI: [10.1038/nature19101](https://doi.org/10.1038/nature19101) · PMID: [27582222](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27582222/)

148. The southern ocean meridional overturning in the sea-ice sector is driven by freshwater fluxes

Violaine Pellichero, Jean-Baptiste Sallée, Christopher C. Chapman, Stephanie M. Downes
Nature Communications (2018-05-03) <https://doi.org/gdh4x3>
DOI: [10.1038/s41467-018-04101-2](https://doi.org/10.1038/s41467-018-04101-2) · PMID: [29724994](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29724994/) · PMCID: [PMC5934442](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC5934442/)

149. The formation of the ocean's anthropogenic carbon reservoir

Daniele Ludicone, Keith B. Rodgers, Yves Plancherel, Olivier Aumont, Takamitsu Ito, Robert M. Key, Gurvan Madec, Masao Ishii
Scientific Reports (2016-11-03) <https://doi.org/f89qj7>
DOI: [10.1038/srep35473](https://doi.org/10.1038/srep35473) · PMID: [27808101](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27808101/) · PMCID: [PMC5093862](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC5093862/)

150. Future science opportunities in Antarctica and the Southern Ocean

National Research Council (U.S.), National Research Council (U.S.) (éditeurs)
National Academies Press (2011)
ISBN: [9780309214698](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5093862/)

151. SIOC 210: Introduction to Physical Oceanography

<http://talleylab.ucsd.edu/ltalley/sio210/Southern/>

152. **The Amundsen Sea low**

John Turner, Tony Phillips, J. Scott Hosking, Gareth J. Marshall, Andrew Orr
International Journal of Climatology (2013-06-15) <https://doi.org/f4zzvc>
DOI: [10.1002/joc.3558](https://doi.org/10.1002/joc.3558)

153. **The relative influence of ENSO and SAM on Antarctic Peninsula climate**

Kyle R. Clem, James A. Renwick, James McGregor, Ryan L. Fogt
Journal of Geophysical Research: Atmospheres (2016-08-27) <https://doi.org/ghrnjZ>
DOI: [10.1002/2016jd025305](https://doi.org/10.1002/2016jd025305)

154. **The Amundsen Sea Low: Variability, Change, and Impact on Antarctic Climate**

M. N. Raphael, G. J. Marshall, J. Turner, R. L. Fogt, D. Schneider, D. A. Dixon, J. S. Hosking, J. M. Jones, W. R. Hobbs
Bulletin of the American Meteorological Society (2016-01-01) <https://doi.org/f795t2>
DOI: [10.1175/bams-d-14-00018.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00018.1)

155. **A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic**

Claire L. Parkinson
Proceedings of the National Academy of Sciences (2019-07-16) <https://doi.org/gf56gd>
DOI: [10.1073/pnas.1906556116](https://doi.org/10.1073/pnas.1906556116) · PMID: [31262810](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31262810/) · PMCID: [PMC6642375](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC6642375/)

156. **Change and Variability in East Antarctic Sea Ice Seasonality, 1979/80–2009/10**

Robert Massom, Philip Reid, Sharon Stammerjohn, Ben Raymond, Alexander Fraser, Shuki Ushio
PLoS ONE (2013-05-21) <https://doi.org/ghqn9c>
DOI: [10.1371/journal.pone.0064756](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064756) · PMID: [23705008](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23705008/) · PMCID: [PMC3660359](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC3660359/)

157. **Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability**

S. E. Stammerjohn, D. G. Martinson, R. C. Smith, X. Yuan, D. Rind
Journal of Geophysical Research (2008-03-14) <https://doi.org/fh7dtw>
DOI: [10.1029/2007jc004269](https://doi.org/10.1029/2007jc004269)

158. **Satellite observations of Antarctic sea ice thickness and volume**

N. T. Kurtz, T. Markus
Journal of Geophysical Research: Oceans (2012-08) <https://doi.org/gc4n6f>
DOI: [10.1029/2012jc008141](https://doi.org/10.1029/2012jc008141)

159. **A model reconstruction of the Antarctic sea ice thickness and volume changes over 1980–2008 using data assimilation**

François Massonnet, Pierre Mathiot, Thierry Fichefet, Hugues Goosse, Christof König Beatty, Martin Vancoppenolle, Thomas Lavergne
Ocean Modelling (2013-04) <https://doi.org/f4rjdh>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2013.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.01.003)

160. **Modeled Trends in Antarctic Sea Ice Thickness**

Paul R. Holland, Nicolas Bruneau, Clare Enright, Martin Losch, Nathan T. Kurtz, Ron Kwok
Journal of Climate (2014-05-15) <https://doi.org/f536h5>
DOI: [10.1175/jcli-d-13-00301.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00301.1)

161. **Global Contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s***

Sarah G. Purkey, Gregory C. Johnson

162. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century

Michael P. Meredith, John C. King
Geophysical Research Letters (2005-10) <https://doi.org/cx77hk>
DOI: [10.1029/2005gl024042](https://doi.org/10.1029/2005gl024042)

163. Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier ice shelf

Stanley S. Jacobs, Adrian Jenkins, Claudia F. Giulivi, Pierre Dutrieux
Nature Geoscience (2011-06-26) <https://doi.org/fc6j39>
DOI: [10.1038/ngeo1188](https://doi.org/10.1038/ngeo1188)

164. Cessation of deep convection in the open Southern Ocean under anthropogenic climate change

Casimir de Lavergne, Jaime B. Palter, Eric D. Galbraith, Raffaele Bernardello, Irina Marinov
Nature Climate Change (2014-03-02) <https://doi.org/ghrngt>
DOI: [10.1038/nclimate2132](https://doi.org/10.1038/nclimate2132)

165. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets

Hamish D. Pritchard, Robert J. Arthern, David G. Vaughan, Laura A. Edwards
Nature (2009-09-23) <https://doi.org/bfk8d2>
DOI: [10.1038/nature08471](https://doi.org/10.1038/nature08471) · PMID: [19776741](#)

166. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise

E. Rignot, I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan, J. T. M. Lenaerts
Geophysical Research Letters (2011-03-16) <https://doi.org/fckfn6>
DOI: [10.1029/2011gl046583](https://doi.org/10.1029/2011gl046583)

167. Ice Shelf Buttressing

Daniel N. Goldberg
Wiley (2017-03-06) <https://doi.org/ghrn8m>
DOI: [10.1002/9781118786352.wbieg0567](https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0567)

168. Stability of the Junction of an Ice Sheet and an Ice Shelf

J. Weertman
Journal of Glaciology (2017-01-30) <https://doi.org/ghrn5p>
DOI: [10.3189/s0022143000023327](https://doi.org/10.3189/s0022143000023327)

169. Marine Ice Sheet Collapse Potentially Under Way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica

I. Joughin, B. E. Smith, B. Medley
Science (2014-05-12) <https://doi.org/srg>
DOI: [10.1126/science.1249055](https://doi.org/10.1126/science.1249055) · PMID: [24821948](#)

170. Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves

M. A. Depoorter, J. L. Bamber, J. A. Griggs, J. T. M. Lenaerts, S. R. M. Ligtenberg, M. R. van den Broeke, G. Moholdt
Nature (2013-09-15) <https://doi.org/gc6v48>
DOI: [10.1038/nature12567](https://doi.org/10.1038/nature12567) · PMID: [24037377](#)

171. Ocean-driven thinning enhances iceberg calving and retreat of Antarctic ice shelves

Yan Liu, John C. Moore, Xiao Cheng, Rupert M. Gladstone, Jeremy N. Bassis, Hongxing Liu, Jiahong Wen, Fengming Hui

Proceedings of the National Academy of Sciences (2015-03-17) <https://doi.org/f3nsnq>

DOI: [10.1073/pnas.1415137112](https://doi.org/10.1073/pnas.1415137112) · PMID: [25733856](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25733856/) · PMCID: [PMC4371949](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC4371949/)

172. Rapid subsurface warming and circulation changes of Antarctic coastal waters by poleward shifting winds

Paul Spence, Stephen M. Griffies, Matthew H. England, Andrew McC. Hogg, Oleg A. Saenko, Nicolas C. Jourdain

Geophysical Research Letters (2014-07-16) <https://doi.org/tnv>

DOI: [10.1002/2014gl060613](https://doi.org/10.1002/2014gl060613)

173. The influence of recent Antarctic ice sheet retreat on simulated sea ice area trends

N. C. Swart, J. C. Fyfe

Geophysical Research Letters (2013-08-28) <https://doi.org/f5dhv2>

DOI: [10.1002/grl.50820](https://doi.org/10.1002/grl.50820)

174. On the sensitivity of Southern Ocean sea ice to the surface freshwater flux: A model study

S. J. Marsland, J.-O. Wolff

Journal of Geophysical Research: Oceans (2001-02-15) <https://doi.org/dsqcw>

DOI: [10.1029/2000jc900086](https://doi.org/10.1029/2000jc900086)

175. Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion

R. Bintanja, G. J. van Oldenborgh, S. S. Drijfhout, B. Wouters, C. A. Katsman

Nature Geoscience (2013-03-31) <https://doi.org/k2r>

DOI: [10.1038/ngeo1767](https://doi.org/10.1038/ngeo1767)

176. Parameterizing the fresh-water flux from land ice to ocean with interactive icebergs in a coupled climate model

T. Martin, A. Adcroft

Ocean Modelling (2010-01) <https://doi.org/cqccwb>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2010.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.05.001)

177. Antarctic icebergs melt over the Southern Ocean: Climatology and impact on sea ice

Nacho Merino, Julien Le Sommer, Gael Durand, Nicolas C. Jourdain, Gurvan Madec, Pierre Mathiot, Jean Tournadre

Ocean Modelling (2016-08) <https://doi.org/f8xcj4>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.05.001)

178. Ice-Shelf Melting Around Antarctica

E. Rignot, S. Jacobs, J. Mouginot, B. Scheuchl

Science (2013-06-13) <https://doi.org/f447td>

DOI: [10.1126/science.1235798](https://doi.org/10.1126/science.1235798) · PMID: [23765278](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23765278/)

179. A realistic freshwater forcing protocol for ocean-coupled climate models

J. van den Berk, S. S. Drijfhout

Ocean Modelling (2014-09) <https://doi.org/f6gg7p>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.07.003)

180. Antarctic icebergs distributions 1992–2014

J. Tournadre, N. Bouhier, F. Girard-Ardhuin, F. Rémy

181. JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do)

Hiroyuki Tsujino, Shogo Urakawa, Hideyuki Nakano, R. Justin Small, Who M. Kim, Stephen G. Yeager, Gokhan Danabasoglu, Tatsuo Suzuki, Jonathan L. Bamber, Mats Bentsen, ... Dai Yamazaki
Ocean Modelling (2018-10) <https://doi.org/gfcvn6>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2018.07.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.002)

182. Impact of increasing antarctic glacial freshwater release on regional sea-ice cover in the Southern Ocean

Nacho Merino, Nicolas C. Jourdain, Julien Le Sommer, Hugues Goosse, Pierre Mathiot, Gael Durand
Ocean Modelling (2018-01) <https://doi.org/gcq7hs>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.11.009)

183. A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance

A. Shepherd, E. R. Ivins, G. A. V. R. Barletta, M. J. Bentley, S. Bettadpur, K. H. Briggs, D. H. Bromwich, R. Forsberg, N. Galin, ... H. J. Zwally
Science (2012-11-29) <https://doi.org/jvr>
DOI: [10.1126/science.1228102](https://doi.org/10.1126/science.1228102) · PMID: [23197528](#)

184. Insignificant Change in Antarctic Snowfall Since the International Geophysical Year

A. J. Monaghan
Science (2006-08-11) <https://doi.org/bmcsvx>
DOI: [10.1126/science.1128243](https://doi.org/10.1126/science.1128243) · PMID: [16902135](#)

185. Interpretation of recent Antarctic sea ice variability

Jiping Liu, Judith A. Curry, Douglas G. Martinson
Geophysical Research Letters (2004-01) <https://doi.org/b8pps5>
DOI: [10.1029/2003gl018732](https://doi.org/10.1029/2003gl018732)

186. Simulating or prescribing the influence of tides on the Amundsen Sea ice shelves

Nicolas C. Jourdain, Jean-Marc Molines, Julien Le Sommer, Pierre Mathiot, Jérôme Chanut, Casimir de Lavergne, Gurvan Madec
Ocean Modelling (2019-01) <https://doi.org/ggrw3c>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2018.11.001](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.11.001)

187. Experimental design for three interrelated marine ice sheet and ocean model intercomparison projects: MISMIP v. 3 (MISMIP +), ISOMIP v. 2 (ISOMIP +) and MISOMIP v. 1 (MISOMIP1)

Xylar S. Asay-Davis, Stephen L. Cornford, Gaël Durand, Benjamin K. Galton-Fenzi, Rupert M. Gladstone, G. Hilmar Gudmundsson, Tore Hattermann, David M. Holland, Denise Holland, Paul R. Holland, ... Hélène Seroussi
Geoscientific Model Development (2016-07-25) <https://doi.org/f85qfs>
DOI: [10.5194/gmd-9-2471-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-2471-2016)

188. NEMO-ICB (v1.0): interactive icebergs in the NEMO ocean model globally configured at eddy-permitting resolution

R. Marsh, V. O. Ivchenko, N. Skliris, S. Alderson, G. R. Bigg, G. Madec, A. T. Blaker, Y. Aksenov, B. Sinha, A. C. Coward, ... V. B. Zalesny
Geoscientific Model Development (2015-05-27) <https://doi.org/gb9m8n>
DOI: [10.5194/gmd-8-1547-2015](https://doi.org/10.5194/gmd-8-1547-2015)

189. Using Vertically Integrated Ocean Fields to Characterize Greenland Icebergs' Distribution and Lifetime

Juliana M. Marson, Paul G. Myers, Xianmin Hu, Julien Le Sommer
Geophysical Research Letters (2018-05-16) <https://doi.org/gdjx8w>
DOI: [10.1029/2018gl077676](https://doi.org/10.1029/2018gl077676)

190. Ice-Shelf Melt Response to Changing Winds and Glacier Dynamics in the Amundsen Sea Sector, Antarctica

Marion Donat-Magnin, Nicolas C. Jourdain, Paul Spence, Julien Le Sommer, Hubert Gallée, Gaël Durand
Journal of Geophysical Research: Oceans (2017-12-29) <https://doi.org/gcwz24>
DOI: [10.1002/2017jc013059](https://doi.org/10.1002/2017jc013059)

191. Ocean circulation and sea-ice thinning induced by melting ice shelves in the Amundsen Sea

Nicolas C. Jourdain, Pierre Mathiot, Nacho Merino, Gaël Durand, Julien Le Sommer, Paul Spence, Pierre Dutrieux, Gurvan Madec
Journal of Geophysical Research: Oceans (2017-03) <https://doi.org/f97pkb>
DOI: [10.1002/2016jc012509](https://doi.org/10.1002/2016jc012509)

192. Cross-scale interactions and turbulent cascades in the North Atlantic Ocean

Adekunle Ajayi
Université Grenoble Alpes [2020-....] (2020-01-13) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02861906>

193. An Introduction to Ocean Turbulence

S. A. Thorpe
Cambridge University Press (CUP) (2007) <https://doi.org/ggm2ks>
DOI: [10.1017/cbo9780511801198](https://doi.org/10.1017/cbo9780511801198)

194. RECENT DEVELOPMENTS IN THE STUDY OF OCEAN TURBULENCE

S. A. Thorpe
Annual Review of Earth and Planetary Sciences (2004-05-19) <https://doi.org/bnbcpp>
DOI: [10.1146/annurev.earth.32.071603.152635](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.071603.152635)

195. Turning Ocean Mixing Upside Down

Raffaele Ferrari, Ali Mashayek, Trevor J. McDougall, Maxim Nikurashin, Jean-Michael Campin
Journal of Physical Oceanography (2016-07) <https://doi.org/f8xsfr>
DOI: [10.1175/jpo-d-15-0244.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-15-0244.1)

196. Closing the energy cycle in an ocean model

Carsten Eden
Ocean Modelling (2016-05) <https://doi.org/f8k6nb>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2016.02.005](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.02.005)

197. The Mechanical Energy Budget of a Regional Ocean Model

Parker MacCready, Sarah N. Giddings
Journal of Physical Oceanography (2016-09) <https://doi.org/f85nz2>
DOI: [10.1175/jpo-d-16-0086.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-16-0086.1)

198. Ocean Circulation Kinetic Energy: Reservoirs, Sources, and Sinks

Raffaele Ferrari, Carl Wunsch
Annual Review of Fluid Mechanics (2009-01) <https://doi.org/b5vj2s>
DOI: [10.1146/annurev.fluid.40.111406.102139](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102139)

199. Routes to energy dissipation for geostrophic flows in the Southern Ocean

Maxim Nikurashin, Geoffrey K. Vallis, Alistair Adcroft

Nature Geoscience (2012-12-21) <https://doi.org/gg4m4q>

DOI: [10.1038/ngeo1657](https://doi.org/10.1038/ngeo1657)

200. VERTICAL MIXING, ENERGY, AND THE GENERAL CIRCULATION OF THE OCEANS

Carl Wunsch, Raffaele Ferrari

Annual Review of Fluid Mechanics (2004-01) <https://doi.org/dwhkmj>

DOI: [10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121)

201. Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics

Geoffrey K. Vallis

Cambridge University Press (CUP) (2017) <https://doi.org/gg4m38>

DOI: [10.1017/9781107588417](https://doi.org/10.1017/9781107588417)

202. SATELLITE ALTIMETRY, THE MARINE GEOID, AND THE OCEANIC GENERAL CIRCULATION

Carl Wunsch, Detlef Stammer

Annual Review of Earth and Planetary Sciences (1998-05) <https://doi.org/fkmn6c>

DOI: [10.1146/annurev.earth.26.1.219](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.219)

203. Direct Evidence of an Oceanic Inverse Kinetic Energy Cascade from Satellite Altimetry

Robert B. Scott, Faming Wang

Journal of Physical Oceanography (2005-09-01) <https://doi.org/b9dpbk>

DOI: [10.1175/jpo2771.1](https://doi.org/10.1175/jpo2771.1)

204. Surface Ocean Enstrophy, Kinetic Energy Fluxes, and Spectra From Satellite Altimetry

Hemant Khatri, Jai Sukhatme, Abhishek Kumar, Mahendra K. Verma

Journal of Geophysical Research: Oceans (2018-05-26) <https://doi.org/gdvgqb>

DOI: [10.1029/2017jc013516](https://doi.org/10.1029/2017jc013516)

205. Spectral Energy Fluxes in Geostrophic Turbulence: Implications for Ocean Energetics

Robert B. Scott, Brian K. Arbic

Journal of Physical Oceanography (2007-03-01) <https://doi.org/bnv7xg>

DOI: [10.1175/jpo3027.1](https://doi.org/10.1175/jpo3027.1)

206. Scales, Growth Rates, and Spectral Fluxes of Baroclinic Instability in the Ocean

Ross Tulloch, John Marshall, Chris Hill, K. Shafer Smith

Journal of Physical Oceanography (2011-06-01) <https://doi.org/bk5926>

DOI: [10.1175/2011jpo4404.1](https://doi.org/10.1175/2011jpo4404.1)

207. Diagnosing the energy cascade in a model of the North Atlantic

F. Schlösser, C. Eden

Geophysical Research Letters (2007-01-18) <https://doi.org/bkj4z5>

DOI: [10.1029/2006gl027813](https://doi.org/10.1029/2006gl027813)

208. The Impact of Horizontal Resolution on Energy Transfers in Global Ocean Models

Joakim Kjellsson, Laure Zanna

Fluids (2017-08-28) <https://doi.org/gg4m4g>

DOI: [10.3390/fluids2030045](https://doi.org/10.3390/fluids2030045)

209. Ocean Eddy Energetics in the Spectral Space as Revealed by High-Resolution General Circulation Models

Shengpeng Wang, Zhao Jing, Qiuying Zhang, Ping Chang, Zhaohui Chen, Hailong Liu, Lixin Wu

210. Ocean-Scale Interactions From Space

Patrice Klein, Guillaume Lapeyre, Lia Siegelman, Bo Qiu, Lee-Lueng Fu, Hector Torres, Zhan Su, Dimitris Menemenlis, Sylvie Le Gentil
Earth and Space Science (2019-05-22) <https://doi.org/ghqb3b>
DOI: [10.1029/2018ea000492](https://doi.org/10.1029/2018ea000492)

211. Seasonal Mesoscale and Submesoscale Eddy Variability along the North Pacific Subtropical Counterurrent

Bo Qiu, Shuiming Chen, Patrice Klein, Hideharu Sasaki, Yoshikazu Sasai
Journal of Physical Oceanography (2014-12-01) <https://doi.org/f6rxwh>
DOI: [10.1175/jpo-d-14-0071.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0071.1)

212. Regionality and seasonality of submesoscale and mesoscale turbulence in the North Pacific Ocean

Hideharu Sasaki, Patrice Klein, Yoshikazu Sasai, Bo Qiu
Ocean Dynamics (2017-07-13) <https://doi.org/gbsw34>
DOI: [10.1007/s10236-017-1083-y](https://doi.org/10.1007/s10236-017-1083-y)

213. Stimulated Imbalance and the Enhancement of Eddy Kinetic Energy Dissipation by Internal Waves

Roy Barkan, Kraig B. Winters, James C. McWilliams
Journal of Physical Oceanography (2017-01) <https://doi.org/f9qsxn>
DOI: [10.1175/jpo-d-16-0117.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-16-0117.1)

214. Routes to Dissipation under Different Dynamical Conditions

Nils Brüggemann, Carsten Eden
Journal of Physical Oceanography (2015-08) <https://doi.org/f7nsbc>
DOI: [10.1175/jpo-d-14-0205.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0205.1)

215. Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part III: Energy Balance and Flux

X. Capet, J. C. McWilliams, M. J. Molemaker, A. F. Shchepetkin
Journal of Physical Oceanography (2008-10-01) <https://doi.org/fvt3bg>
DOI: [10.1175/2008jpo3810.1](https://doi.org/10.1175/2008jpo3810.1)

216. Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere

Hideharu Sasaki, Patrice Klein, Bo Qiu, Yoshikazu Sasai
Nature Communications (2014-12-15) <https://doi.org/f6vkpf>
DOI: [10.1038/ncomms6636](https://doi.org/10.1038/ncomms6636) · PMID: [25501039](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25501039/) · PMCID: [PMC4275589](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC4275589/)

217. Seasonality of submesoscale dynamics in the Kuroshio Extension

Cesar B. Rocha, Sarah T. Gille, Teresa K. Chereskin, Dimitris Menemenlis
Geophysical Research Letters (2016-11-16) <https://doi.org/f9frx3>
DOI: [10.1002/2016gl071349](https://doi.org/10.1002/2016gl071349)

218. The seasonal cycle of submesoscale flows

Liam Brannigan, David P. Marshall, Alberto Naveira-Garabato, A. J. George Nurser
Ocean Modelling (2015-08) <https://doi.org/ghqh9g>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2015.05.002](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.05.002)

219. Seasonality in submesoscale turbulence

Jörn Callies, Raffaele Ferrari, Jody M. Klymak, Jonathan Gula
Nature Communications (2015-04-21) <https://doi.org/f696rj>
DOI: [10.1038/ncomms7862](https://doi.org/10.1038/ncomms7862) · PMID: [25897832](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25897832/) · PMCID: [PMC4410631](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC4410631/)

220. Open-Ocean Submesoscale Motions: A Full Seasonal Cycle of Mixed Layer Instabilities from Gliders

Andrew F. Thompson, Ayah Lazar, Christian Buckingham, Alberto C. Naveira Garabato, Gillian M. Damerell, Karen J. Heywood
Journal of Physical Oceanography (2016-04) <https://doi.org/ggc8nd>
DOI: [10.1175/jpo-d-15-0170.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-15-0170.1)

221. Seasonality of submesoscale flows in the ocean surface boundary layer

Christian E. Buckingham, Alberto C. Naveira Garabato, Andrew F. Thompson, Liam Brannigan, Ayah Lazar, David P. Marshall, A. J. George Nurser, Gillian Damerell, Karen J. Heywood, Stephen E. Belcher
Geophysical Research Letters (2016-03-11) <https://doi.org/f8ghzt>
DOI: [10.1002/2016gl068009](https://doi.org/10.1002/2016gl068009)

222. Submesoscale Impacts on Mesoscale Agulhas Dynamics

R. Schubert, F. U. Schwarzkopf, B. Baschek, A. Biastoch
Journal of Advances in Modeling Earth Systems (2019-08-22) <https://doi.org/gg4m4k>
DOI: [10.1029/2019ms001724](https://doi.org/10.1029/2019ms001724)

223. The Seasonality of Submesoscale Energy Production, Content, and Cascade

Jihai Dong, Baylor Fox-Kemper, Hong Zhang, Changming Dong
Geophysical Research Letters (2020-03-23) <https://doi.org/gg4m4j>
DOI: [10.1029/2020gl087388](https://doi.org/10.1029/2020gl087388)

224. Near-Inertial Internal Gravity Waves in the Ocean

Matthew H. Alford, Jennifer A. MacKinnon, Harper L. Simmons, Jonathan D. Nash
Annual Review of Marine Science (2016-01-03) <https://doi.org/gdvjst>
DOI: [10.1146/annurev-marine-010814-015746](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-015746) · PMID: [26331898](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26331898/)

225. Turbulent exchanges between near-inertial waves and balanced flows

Jim Thomas, Don Daniel
Journal of Fluid Mechanics (2020-09-04) <https://doi.org/ghqh9h>
DOI: [10.1017/jfm.2020.510](https://doi.org/10.1017/jfm.2020.510)

226. Geophysical turbulence dominated by inertia-gravity waves

Jim Thomas, Ray Yamada
Journal of Fluid Mechanics (2019-07-18) <https://doi.org/ghqh9k>
DOI: [10.1017/jfm.2019.465](https://doi.org/10.1017/jfm.2019.465)

227. Near-inertial waves and geostrophic turbulence

Jim Thomas, S. Arun
Physical Review Fluids (2020-01-06) <https://doi.org/ghqh9z>
DOI: [10.1103/physrevfluids.5.014801](https://doi.org/10.1103/physrevfluids.5.014801)

228. Stimulated generation: extraction of energy from balanced flow by near-inertial waves

Cesar B. Rocha, Gregory L. Wagner, William R. Young
Journal of Fluid Mechanics (2018-05-23) <https://doi.org/gdq6qc>
DOI: [10.1017/jfm.2018.308](https://doi.org/10.1017/jfm.2018.308)

229. On the modifications of near-inertial waves at fronts: implications for energy transfer across scales

Leif N. Thomas

Ocean Dynamics (2017-08-04) <https://doi.org/gbxrxw>

DOI: [10.1007/s10236-017-1088-6](https://doi.org/10.1007/s10236-017-1088-6)

230. Sea Surface Signature of Internal Tides

Noé Lahaye, Jonathan Gula, Guillaume Roullet

Geophysical Research Letters (2019-04-05) <https://doi.org/ghqh9w>

DOI: [10.1029/2018gl081848](https://doi.org/10.1029/2018gl081848)

231. Diagnosing Ocean-Wave-Turbulence Interactions From Space

H. S. Torres, P. Klein, L. Siegelman, B. Qiu, S. Chen, C. Ubelmann, J. Wang, D. Menemenlis, L.-L. Fu

Geophysical Research Letters (2019-08-11) <https://doi.org/gg4m4n>

DOI: [10.1029/2019gl083675](https://doi.org/10.1029/2019gl083675)

232. Impact of the « Symmetric Instability of the Computational Kind » at mesoscale- and submesoscale-permitting resolutions

Nicolas Ducousoo, J. Le Sommer, J.-M. Molines, M. Bell

Ocean Modelling (2017-12) <https://doi.org/gcq7f2>

DOI: [10.1016/j.ocemod.2017.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.10.006)

233. Reconstruction of the 3-D Dynamics From Surface Variables in a High-Resolution Simulation of North Atlantic

S. Fresnay, A. L. Ponte, S. Le Gentil, J. Le Sommer

Journal of Geophysical Research: Oceans (2018-03) <https://doi.org/gdh33h>

DOI: [10.1002/2017jc013400](https://doi.org/10.1002/2017jc013400)

234. Skills and limitations of the adiabatic omega equation: how effective is it to retrieve oceanic vertical circulation at meso and submesoscale ?

Alice Pietri, Xavier Capet, Francesco d'Ovidio, Marina Levy, Julien Le Sommer, Jean-Marc Molines, Hervé Giordani

Journal of Physical Oceanography (2021-01-13) <https://doi.org/ghs99c>

DOI: [10.1175/jpo-d-20-0052.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-20-0052.1)

235. Up to What Extent Can We Characterize Ocean Eddies Using Present-Day Gridded Altimetric Products?

Angel Amores, Gabriel Jordà, Thomas Arsouze, Julien Le Sommer

Journal of Geophysical Research: Oceans (2018-10-12) <https://doi.org/gd85mw>

DOI: [10.1029/2018jc014140](https://doi.org/10.1029/2018jc014140)

236. Reduction of Spatially Structured Errors in Wide-Swath Altimetric Satellite Data Using Data Assimilation

Sammy Metref, Emmanuel Cosme, Julien Le Sommer, Nora Poel, Jean-Michel Brankart, Jacques Verron, Laura Gómez Navarro

Remote Sensing (2019-06-03) <https://doi.org/gg3qn7>

DOI: [10.3390/rs11111336](https://doi.org/10.3390/rs11111336)

237. Wide-swath altimetric satellite data assimilation with structured-error detrending

Sammy Metref, Emmanuel Cosme, Florian Le Guillou, Julien Le Sommer, Jean-Michel Brankart, Jacques Verron

California Digital Library (CDL) (2019-09-17) <https://doi.org/gg3qn6>

DOI: [10.31223/osf.io/yzj9v](https://doi.org/10.31223/osf.io/yzj9v)

238. Development of an Image De-Noising Method in Preparation for the Surface Water and Ocean Topography Satellite Mission

Laura Gómez-Navarro, Emmanuel Cosme, Julien Le Sommer, Nicolas Papadakis, Ananda Pascual
Remote Sensing (2020-02-22) <https://doi.org/gg3qn8>
DOI: [10.3390/rs12040734](https://doi.org/10.3390/rs12040734)

239. ocean-next/eNATL60: Material describing the set-up and the assessment of NEMO-eNATL60 simulations

Laurent Brodeau, Julien Le Sommer, Aurélie Albert
Zenodo (2020-09-21) <https://doi.org/ghcwgb>
DOI: [10.5281/zenodo.4032732](https://doi.org/10.5281/zenodo.4032732)

240. Spatial and Temporal Variability of the North Atlantic Eddy Field From Two Kilometric-Resolution Ocean Models

Adekunle Ajayi, Julien Le Sommer, Eric Chassignet, Jean-Marc Molines, Xiaobiao Xu, Aurelie Albert, Emmanuel Cosme
Journal of Geophysical Research: Oceans (2020-05-14) <https://doi.org/gg3zs9>
DOI: [10.1029/2019jc015827](https://doi.org/10.1029/2019jc015827)

241. An Adaptive Optimal Interpolation Based on Analog Forecasting: Application to SSH in the Gulf of Mexico

Yicun Zhen, Pierre Tandeo, Stéphanie Leroux, Sammy Metref, Thierry Penduff, Julien Le Sommer
Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (2020-09-01) <https://doi.org/ghcxtr>
DOI: [10.1175/jtech-d-20-0001.1](https://doi.org/10.1175/jtech-d-20-0001.1)

242. Rationalizing the Spatial Distribution of Mesoscale Eddy Diffusivity in Terms of Mixing Length Theory

Michael Bates, Ross Tulloch, John Marshall, Raffaele Ferrari
Journal of Physical Oceanography (2014-06-01) <https://doi.org/f554hp>
DOI: [10.1175/jpo-d-13-0130.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-13-0130.1)

243. Impact of Horizontal Resolution (1/12° to 1/50°) on Gulf Stream Separation, Penetration, and Variability

Eric P. Chassignet, Xiaobiao Xu
Journal of Physical Oceanography (2017-08) <https://doi.org/gf9rxb>
DOI: [10.1175/jpo-d-17-0031.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-17-0031.1)

244. Diagnosing cross-scale kinetic energy exchanges from two submesoscale permitting ocean models.

Adekunle Ajayi, Julien Le Sommer, Eric P. Chassignet, Jean-Marc Molines, Xiaobiao Xu, Aurelie Albert, William Dewar
Journal of Advances in Modeling Earth Systems (2021-02-13) <https://doi.org/gh2x2s>
DOI: [10.1029/2019ms001923](https://doi.org/10.1029/2019ms001923)

245. Mapping the Energy Cascade in the North Atlantic Ocean: The Coarse-Graining Approach

Hussein Aluie, Matthew Hecht, Geoffrey K. Vallis
Journal of Physical Oceanography (2018-02) <https://doi.org/gdhxp7>
DOI: [10.1175/jpo-d-17-0100.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-17-0100.1)

246. The Submesoscale Kinetic Energy Cascade: Mesoscale Absorption of Submesoscale Mixed Layer Eddies and Frontal Downscale Fluxes

René Schubert, Jonathan Gula, Richard J. Greatbatch, Burkard Baschek, Arne Biastoch

Journal of Physical Oceanography (2020-09-01) <https://doi.org/gh3svc>
DOI: [10.1175/jpo-d-19-0311.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-19-0311.1)

247. On Energy Cascades in General Flows: A Lagrangian Application

Q. Jamet, A. Ajayi, J. Le Sommer, T. Penduff, A. Hogg, W. K. Dewar

Journal of Advances in Modeling Earth Systems (2020-12-21) <https://doi.org/ghcwf9>

DOI: [10.1029/2020ms002090](https://doi.org/10.1029/2020ms002090)

248. Diagnosing cross-scale kinetic energy exchanges from two submesoscale permitting ocean models.

Adekunle Ajayi, Julien Le Sommer, Eric Chassignet, Jean-Marc Molines, Xiaobiao Xu, Aurelie Albert, William Dewar

Wiley (2019-11-04) <https://doi.org/gg3zs8>

DOI: [10.1002/essoar.10501077.1](https://doi.org/10.1002/essoar.10501077.1)

249. ocean-next/eNATL60

Ocean Next

(2021-01-08) <https://github.com/ocean-next/eNATL60>

250. Geostrophic Turbulence in the Frequency-Wavenumber Domain: Eddy-Driven Low-Frequency Variability*

Brian K. Arbic, Malte Müller, James G. Richman, Jay F. Shriver, Andrew J. Morten, Robert B. Scott, Guillaume Sérazin, Thierry Penduff

Journal of Physical Oceanography (2014-08-01) <https://doi.org/f6dm44>

DOI: [10.1175/jpo-d-13-054.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-13-054.1)

251. Space-time scales of internal waves: A progress report

Christopher Garrett, Walter Munk

Journal of Geophysical Research (1975-01-20) <https://doi.org/bj5h9b>

DOI: [10.1029/jc080i003p00291](https://doi.org/10.1029/jc080i003p00291)

252. Toward an internal gravity wave spectrum in global ocean models

Malte Müller, Brian K. Arbic, James G. Richman, Jay F. Shriver, Eric L. Kunze, Robert B. Scott, Alan J. Wallcraft, Luis Zamudio

Geophysical Research Letters (2015-05-16) <https://doi.org/f7f5c6>

DOI: [10.1002/2015gl063365](https://doi.org/10.1002/2015gl063365)

253. Diffusion of inertia-gravity waves by geostrophic turbulence

Hossein A. Kafiabad, Miles A. C. Savva, Jacques Vanneste

Journal of Fluid Mechanics (2019-04-30) <https://doi.org/ggnm4z>

DOI: [10.1017/jfm.2019.300](https://doi.org/10.1017/jfm.2019.300)

254. Diagnosing the thickness-weighted averaged eddy-mean flow interaction in an eddying North Atlantic ensemble

Takaya Uchida, Quentin Jamet, William K. Dewar, Dhruv Balwada, Julien Lesommer, Thierry Penduff
Wiley (2020-08-27) <https://doi.org/gg9c86>

DOI: [10.1002/essoar.10504082.1](https://doi.org/10.1002/essoar.10504082.1)

255. The Contribution of Surface and Submesoscale Processes to Turbulence in the Open Ocean Surface Boundary Layer

Christian E. Buckingham, Natasha S. Lucas, Stephen E. Belcher, Tom P. Rippeth, Alan L. M. Grant, Julien Le Sommer, Adekunle Opeoluwa Ajayi, Alberto C. Naveira Garabato

256. roxyboy/SWOT-AdAC-ocean-model-intercomparison

Takaya Uchida

(2021-02-18) <https://github.com/roxyboy/SWOT-AdAC-ocean-model-intercomparison>

257. Anisotropy of eddy variability in the global ocean

K. D. Stewart, P. Spence, S. Waterman, J. Le Sommer, J.-M. Molines, J. M. Lilly, M. H. England
Ocean Modelling (2015-11) <https://doi.org/f7xhzw>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2015.09.005](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.005)

258. Stochastic variability of oceanic flows above topography anomalies

A. Venaille, J. Le Sommer, J.-M. Molines, B. Barnier
Geophysical Research Letters (2011-08) <https://doi.org/dtj2xz>
DOI: [10.1029/2011gl048401](https://doi.org/10.1029/2011gl048401)

259. How momentum advection schemes influence current-topography interactions at eddy permitting resolution

Julien Le Sommer, Thierry Penduff, Sébastien Theetten, Gurvan Madec, Bernard Barnier
Ocean Modelling (2009-01) <https://doi.org/d9dxdg>
DOI: [10.1016/j.ocemod.2008.11.007](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.11.007)

260. Influence of numerical schemes on current-topography interactions in 1/4° global ocean simulations

T. Penduff, J. Le Sommer, B. Barnier, A.-M. Treguier, J.-M. Molines, G. Madec
Ocean Science (2007-12-20) <https://doi.org/fn6ddc>
DOI: [10.5194/os-3-509-2007](https://doi.org/10.5194/os-3-509-2007)

261. Impact of partial steps and momentum advection schemes in a global ocean circulation model at eddy-permitting resolution

Barnier Bernard, Gurvan Madec, Thierry Penduff, Jean-Marc Molines, Anne-Marie Treguier, Julien Le Sommer, Aike Beckmann, Arne Biastoch, Claus Böning, Joachim Dengg, ... Beverly De Cuevas
Ocean Dynamics (2006-06-14) <https://doi.org/bxbtfn>
DOI: [10.1007/s10236-006-0082-1](https://doi.org/10.1007/s10236-006-0082-1)

262. Multi-grid algorithm for passive tracer transport in NEMO ocean circulation model: a case study with NEMO OGCM (version 3.6)

Clément Bricaud, Julien Le Sommer, Madec Gurvan, Christophe Calone, Julie Deshayes, Christian Ethe, Jérôme Chanut, Marina Levy
Copernicus GmbH (2020-01-28) <https://doi.org/ghcwm3>
DOI: [10.5194/gmd-2019-341](https://doi.org/10.5194/gmd-2019-341)

263. A dynamic regularized gradient model of the subgrid-scale scalar flux for large eddy simulations

G. Balarac, J. Le Sommer, X. Meunier, A. Vollant
Physics of Fluids (2013-07) <https://doi.org/gbdgtm>
DOI: [10.1063/1.4813812](https://doi.org/10.1063/1.4813812)

264. Parameterization of subgrid stirring in eddy resolving ocean models. Part 1: Theory and diagnostics

J. Le Sommer, F. d'Ovidio, G. Madec

265. The Impact of a Variable Mixing Efficiency on the Abyssal Overturning

Casimir de Lavergne, Gurvan Madec, Julien Le Sommer, A. J. George Nurser, Alberto C. Naveira Garabato

Journal of Physical Oceanography (2016-02) <https://doi.org/f8ggbk>

DOI: [10.1175/jpo-d-14-0259.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0259.1)

266. On the Consumption of Antarctic Bottom Water in the Abyssal Ocean

Casimir de Lavergne, Gurvan Madec, Julien Le Sommer, A. J. George Nurser, Alberto C. Naveira Garabato

Journal of Physical Oceanography (2016-02) <https://doi.org/f8frjg>

DOI: [10.1175/jpo-d-14-0201.1](https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0201.1)

267. Sensitivity of coastal polynyas and high-salinity shelf water production in the Ross Sea, Antarctica, to the atmospheric forcing

Pierre Mathiot, Nicolas C. Jourdain, Bernard Barnier, Hubert Gallée, Jean Marc Molines, Julien Le Sommer, Thierry Penduff

Ocean Dynamics (2012-03-09) <https://doi.org/f3xrqj>

DOI: [10.1007/s10236-012-0531-y](https://doi.org/10.1007/s10236-012-0531-y)

268. Response of the Southern Ocean to the Southern Annular Mode: Interannual Variability and Multidecadal Trend

A. M. Treguier, J. Le Sommer, J. M. Molines, B. de Cuevas

Journal of Physical Oceanography (2010-07-01) <https://doi.org/csc6w7>

DOI: [10.1175/2010jpo4364.1](https://doi.org/10.1175/2010jpo4364.1)

269. Stratospheric ozone depletion reduces ocean carbon uptake and enhances ocean acidification

Andrew Lenton, Francis Codron, Laurent Bopp, Nicolas Metzl, Patricia Cadule, Alessandro Tagliabue, Julien Le Sommer

Geophysical Research Letters (2009-06-20) <https://doi.org/d5sxkd>

DOI: [10.1029/2009gl038227](https://doi.org/10.1029/2009gl038227)

270. Southern Ocean overturning across streamlines in an eddying simulation of the Antarctic Circumpolar Current

A. M. Treguier, M. England, S. R. Rintoul, G. Madec, J. Le Sommer, J.-M. Molines

Copernicus GmbH (2010-04-29) <https://doi.org/dzhsqs>

DOI: [10.5194/osd-4-653-2007](https://doi.org/10.5194/osd-4-653-2007)

271. Variability of the Antarctic Circumpolar Current transport through the Fawn Trough, Kerguelen Plateau

Frédéric Vivier, Young-Hyang Park, Hela Sekma, Julien Le Sommer

Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography (2015-04) <https://doi.org/f7b6pb>

DOI: [10.1016/j.dsr2.2014.01.017](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.01.017)

272. Can we map the interannual variability of the whole upper southern ocean with the current database of hydrographic observations?

C. Heuzé, F. Vivier, J. Le Sommer, J.-M. Molines, T. Penduff

Journal of Geophysical Research: Oceans (2015-12-17) <https://doi.org/f3ncfw>

DOI: [10.1002/2015jc011115](https://doi.org/10.1002/2015jc011115)

273. An Efficient Way to Account for Observation Error Correlations in the Assimilation of Data from the Future SWOT High-Resolution Altimeter Mission

Giovanni Abdelnur Ruggiero, Emmanuel Cosme, Jean-Michel Brankart, Julien Le Sommer, Clement Ubelmann

Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (2016-12) <https://doi.org/f9gshq>

DOI: [10.1175/jtech-d-16-0048.1](https://doi.org/10.1175/jtech-d-16-0048.1)

274. SWOT Spatial Scales in the Western Mediterranean Sea Derived from Pseudo-Observations and an Ad Hoc Filtering

Laura Gómez-Navarro, Ronan Fablet, Evan Mason, Ananda Pascual, Baptiste Mourre, Emmanuel Cosme, Julien Le Sommer

Remote Sensing (2018-04-12) <https://doi.org/ghcxtv>

DOI: [10.3390/rs10040599](https://doi.org/10.3390/rs10040599)

275. Wide-Swath Altimetric Satellite Data Assimilation With Correlated-Error Reduction

Sammy Metref, Emmanuel Cosme, Florian Le Guillou, Julien Le Sommer, Jean-Michel Brankart, Jacques Verron

Frontiers in Marine Science (2020-01-14) <https://doi.org/ghcxt2>

DOI: [10.3389/fmars.2019.00822](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00822)

Annexe A1 : Expérience d'encadrement

Thèses

- 2020 - ... Quentin Febvre mène actuellement ses travaux de thèse au LabSTICC sous ma co-direction depuis octobre 2020. Ces travaux, co-dirigés R. Fablet (LabSTICC) et C. Ubelmann (Ocean Next) portent sur l'inversion des futures données SWOT par apprentissage profond.
- 2019 - ... Hugo Frezat mène actuellement ses travaux de thèse au LEGI sous ma co-direction depuis octobre 2019. Ces travaux, co-dirigés G. Balarac (LEGI) et R. Fablet (LabSTICC), portent sur le développement de fermetures turbulentes par apprentissage profond.
- 2016 - 2020 : Laura Gomez Navarro a mené sa thèse sous ma co-direction de décembre 2016 à septembre 2020. Ces travaux, principalement dirigés par E. Cosme (IGE, MEOM), ont porté sur le débruitage des données SWOT et l'observabilité de la dynamique par la mission SWOT.
- 2016 - 2020 : Adekunle Ajayi a mené sa thèse sous ma direction entre octobre 2016 et janvier 2020. Ses travaux ont porté sur l'étude des mécanismes d'interaction d'échelle aux moyennes latitudes en Atlantique Nord sur la base des simulations NATL60, eNATL60 et HYCOM50.
- 2013 - 2016 : Nacho Merino a mené sa thèse sous ma co-direction d'octobre 2013 à décembre 2016. Cette thèse co-dirigée par G. Durand a porté sur les mécanismes d'interaction entre cryosphère et océan austral et leur impact sur la glace de mer.
- 2012 - 2015 : Pierre Labreuche a effectué sa thèse sous ma (co-)direction entre octobre 2012 et janvier 2015 (avec C. Staquet). Il s'est intéressé à la dissipation associée au déferlement des ondes de relief dans l'océan austral.
- 2012 - 2014 : Joan Llort a effectué sa thèse sous la direction de Marina Levy au LOCEAN avec ma participation comme co-directeur entre octobre 2012 et novembre 2014. Il s'est intéressé aux mécanismes pilotant la variabilité de la production primaire dans l'océan austral.
- 2011 - 2012 : Xavier Meunier a démarré une thèse sous ma (co-)direction en octobre 2011 (avec B. Barnier et L. Debreu). Son travail portait sur le développement de paramétrisation sous maille pour le transport de quantité de mouvement dans NEMO. Pour des raisons personnelles, Xavier a souhaité mettre un terme à sa thèse à l'automne 2012.
- 2010 - 2014 : Gildas Mainsant a effectué sa thèse sous ma (co-)direction entre octobre 2010 et novembre 2014 (avec B. Barnier et H. Gallée). Il s'est intéressé au rôle de la glace de mer dans la réponse de l'océan austral au mode annulaire austral.
- 2008 - 2011 : Carolina Dufour a effectué sa thèse sous ma (co-)direction entre octobre 2008 et décembre 2011 (avec B. Barnier, J. Orr et M. Gehlen). Elle s'est intéressée à la réponse dynamique et biogéochimique de l'océan austral aux changements des vents liés au SAM.

Master 2

- 2020 : Erika Henell a effectué un stage de M2R de 6 mois sous ma direction au printemps 2020. Son travail a porté sur l'analyse des interactions entre ondes de marée interne et turbulence de submeso-échelle sur la base des simulation eNATL60
- 2016 : Sylvie Su a effectué un stage de M2R de 6 mois sous ma direction au printemps 2016. Son travail a porté sur l'analyse de la variabilité saisonnière de la dynamique de submeso-échelle dans l'Atlantique Nord sur la base des simulation NATL60.
- 2015 : Yaroslavna Martemyanycheva a effectué un stage de M2R de 6 mois sous ma co-direction au printemps 2015. Son stage, co-encadré par E. Cosme portait sur l'observabilité de la marée interne à partir des données de la mission SWOT.
- 2014 : Pedro Colombo a effectué un stage de M2R de 6 mois sous ma (co-)direction (avec E. Cosme). Il s'est intéressé à la question de l'observabilité du signal de surface de la marée interne par la mission altimétrique SWOT.
- 2013 : Olivier Andry a effectué un stage de M2R de 6 mois sous ma direction au printemps 2013. Il s'est intéressé au contrôle topographique de la position des fronts de l'ACC.

- 2012 : Pierre Labreuche a effectué son stage de M2R sous ma (co-)direction au printemps 2012. Il s'est intéressé à la propagation d'ondes internes dans un milieu aux propriétés variables en temps.
- 2008 : Carolina Dufour a effectué son stage de M2R sous ma (co-)direction au printemps 2008. Elle s'est intéressée à la variabilité thermohaline dans l'ACC au sud de la Tasmanie.

Master 1

- 2015 : Alexandre Jaymond a effectué un stage de M1 de 4 mois sous ma direction au printemps 2015. Ses travaux ont porté sur l'analyse préliminaire de la première simulation NATL60.
- 2015 : Pierre-Vincent Huot a effectué un stage de M1 de 4 mois sous ma co-direction au printemps 2015 en collaboration avec N. Jourdain. Son travail a porté sur la variabilité des propriétés hydrographiques sur les marges antarctiques.

Postdocs

- 2017 - 2019 : Redouane Lguensat a travaillé sous ma direction de décembre 2017 à décembre 2019 dans le cadre de son postdoc CNES à l'IGE. Il s'est intéressé à l'application de méthodes d'apprentissage profond pour le traitement des données SWOT (débruitage, interpolation)
- 2013 - 2015 : Nicolas Ducouso a travaillé 30 mois sous ma direction dans le cadre du projet ANR COMODO jusqu'en avril 2015. Il s'est intéressé à la discréétisation des équations de quantité de mouvement dans le code NEMO.
- 2012 - 2012 : Carolina Dufour a travaillé 7 mois en tant que postdoc sous ma direction suite à sa thèse. Ses travaux ont essentiellement porté sur la finalisation des publications de sa thèse.
- 2011 - 2012 : Jan Zika a travaillé sous ma direction 14 mois dans le cadre du projet ANR SouthernCross. Il s'est intéressé aux équilibres dynamiques du transport de l'ACC et de la circulation méridienne au travers de l'ACC
- 2009 - 2009 : Antoine Venaille a travaillé sous ma correction au LEGI durant quelques mois suite à sa thèse. Il s'est intéressé au forçage de circulation barotrope par la turbulence de méso-échelle.

Ingénieurs

- 2016 - 2019 : Aurélie Albert a travaillé depuis mars à septembre 2019 dans l'équipe MEOM sous ma direction. Aurélie s'est notamment occupée de l'analyse et de la diffusion des simulations NATL60 au sein de la SWOT Science Team dans le cadre d'un contrat CNES. Elle a par ailleurs mené les études de sensibilité en préparation à l'évolution du système opérationnel global Mercator-Ocean dans le cadre du contrat CMEMS GLO-HR.
- 2016 - 2017 : Gildas Mainsant a travaillé comme ingénieur de janvier 2015 à janvier 2016 dans l'équipe MEOM sous ma direction. Son travail portait sur la préparation de la configuration globale 1/4° du modèle de circulation NEMO pour les ESM nationaux.
- 2015 - 2015 : Christophe Calone a travaillé 11 mois sous ma direction dans le cadre du projet MyOcean II. Il s'est occupé de la mise en oeuvre de la capacité de dégradation à basse résolution du transport de traceurs dans le système NEMO.
- 2011 - 2014 : Aurélie Albert a travaillé sous ma direction entre octobre 2011 et aout 2014 à la mise en place et l'exploitation d'une plate-forme de modélisation réaliste couplée physico-biogéochimique de l'Océan Indien Sud.

Annexe A2 : Projets de recherche

Pilotage ou co-pilotage de projets

- 2020 - 2023 : SWOT ST MIDAS : Modelling, Inversion and Data Assimilation for SWOT (CNES-NASA, PIs : J. Le Sommer et E. Cosme). Le projet MIDAS est un project collectif de l'équipe MEOM qui encadre notre participation à la SWOT Science Team. Ce projet poursuite les activités engagées

dans le cadre du projet SWOT ST précédent, avec des objectifs précis sur l'exploitation des données de la mission SWOT en 2022, en lien avec les campagnes en mer.

- 2019 - 2022 : IMMERSE (H2020, coord. J. Le Sommer). Le projet IMMERSE "Improving Ocean Models for Copernicus Environmental Monitoring Service" est en projet en réponse au call H2020 LC-SPACE-03-EO-2018 dont j'ai pris en charge le montage et dont j'assure la coordination. Le projet rassemble 14 institutions à travers l'Europe et une équipe d'environ 60 participants. Le projet se déroule de Décembre 2018 à Décembre 2022. Il a pour objet de préparer une nouvelle version du modèle de circulation NEMO et d'en préparer la transition dans les centres de production opérationnels du CMEMS. La coordination de ce projet recoupe pour une large part mon rôle au sein du dispositif de pilotage NEMO. Environ 25% de mon temps est aujourd'hui occupé par cette coordination.
- 2017 - 2020 : SOBUMS : Southern Ocean Biogeochemistry Under Multiple Stressors (ANR PRCE, PI initial : J. Le Sommer). Le projet SOBUMS a rassemblé le LOCEAN, le LSCE, Mercator-Ocean et l'IGE autour de l'études de la réponse du cycle du carbone de l'océan austral aux différents facteurs de stress climatique dans l'hémisphère sud (dont par exemple les changements des vents, des flux radiatifs, de flux d'eaux douces). Il s'est appuyé sur un plan de simulations basé sur la composante océanique des futurs ESMs à haute résolution, eORCA025 développé par le consortium DRAKKAR. J'ai pris en 2017 la décision de me retirer de ce projet et d'en confier le portage à James Orr (LSCE). Cette décision était motivée par le poids croissant des activités en lien avec la préparation de la mission SWOT ainsi qu'au contexte du démarrage du projet H2020 IMMERSE que je coordonne.
- 2016 - 2019 : SWOT ST : Preparing the inversion of SWOT Ocean Data (CNES-NASA, PIs : J. Le Sommer et E. Cosme). Le projet "Ocean modelling and data-assimilation for SWOT mission : preparing the inversion of SWOT Ocean Data" est un projet collectif de l'équipe MEOM que j'ai porté avec E. Cosme et au titre duquel nous avons participé à la SWOT Science Team. Ce projet proposait de mener à développer des approches originales d'inversion des futures données SWOT sur la base d'observations virtuelles produites à l'aide du modèle de circulation NEMO. C'est dans ce cadre que nous avons porté l'effort de modélisation NATL60/eNATL60. Il se prolonge actuellement dans le cadre du projet MIDAS démarré en 2020.
- 2016 - 2019 : OSTOMA-SWOT (AGIR/UGA, PI : J. Le Sommer). Le projet « OSTOMA-SWOT : Préparer l'Observation Spatiale de la Turbulence Océanique par la Mission Altimétrique SWOT » a assuré le financement de la thèse d'Adekunle Ajayi. Ce projet sélectionné par l'UGA vise à documenter les mécanismes par lesquels la variabilité de fine-échelles affectent la circulation dans le bassin atlantique nord aux moyennes et hautes latitudes.
- 2014 - 2015 : ENGLOBE : An Eddying Numerical Global Green Ocean (projet LEFE-INSU, co-PI : J. Le Sommer). Ce projet de coordination impliquant le LOCEAN, le LEMAR, le LSCE et le LGGE porte sur des questions de modélisation physique- biogéochimie à l'échelle globale. Il a permis de mener des activités préparatoires au projet ANR SOBUMS.
- 2013 - 2015 : Ocean mesoscales and submesoscale : observability, modelling and data assimilation for SWOT (projet CNES-TOSCA 2013-2015, PI : J. Le Sommer). Ce projet a regroupé les activités de l'équipe MEOM du LGGE en lien avec la mission altimétrique SWOT sur cette période et assuré notre participation à la SWOT Science Definition Team.
- 2012 - 2014 : MOREWAVES (Labex OSUG@2020 and LEFE/INSU, PI: C. Staquet and J. Le Sommer). Ces deux projets portent sur l'étude du déferlement des ondes de relief dans l'océan austral. Il a servi à couvrir les activités de thèse de Pierre Labreuche au LEGI ainsi que des interactions avec le groupe d'Alberto Naveira-Garabato au NOC.
- 2011 - 2014 : TANGGO: Toward AN Eddying Global Green Ocean (INSU/LEFE, PI: M. Levy, L. Bopp and J. Le Sommer). Ce projet de coordination nationale financé par le programme LEFE visait à réunir la communauté des bio-géochimistes marins autour de questions liées à la modélisation océanique. Il a permis de mettre en place une stratégie menant à la soumission de l'ANR SOBUMS à l'appel à projet générique de l'ANR en octobre 2014. C'est également dans ce cadre qu'a été organisé le colloque de Liège en 2013
- 2011 - 2013 : BIOCOSM: Un laboratoire régional pour mieux observer, modéliser et comprendre les interactions physico-biogéochimiques multi-échelles dans l'océan austral (CNES, PI: J. Le Sommer

and M. Levy). Ce projet de modélisation en lien avec la campagne in-situ KEOPS2 a permis les activités de modélisation en support de la thèse de Joan Llort au LOCEAN.

- 2010-2013 : VARFLUX: Impact du Mode Annulaire Austral sur les flux air-mer dans l'océan austral (CIBLE, région Rhône-Alpes, PI: J. Le Sommer and H. Gallée). Ce projet portait sur l'étude du rôle de la glace de mer dans la réponse au mode annulaire austral. Il a permis le financement partiel de la thèse de Gildas Mainsant défendue en novembre 2014.
- 2010 - 2012 : CO2SUD : Variabilité des flux air-mer de CO₂ dans l'hémisphère austral : rôle des modes de variabilité atmosphérique et de la mésoéchelle océanique (INSU/LEFE, 2010-2012, PI: J. Le Sommer and M. Gehlen). Ce portait sur le rôle des processus de méso-échelle dans la réponse des flux air-mer de CO₂ au mode annulaire austral. Ce projet a permis de financer les frais de fonctionnement et de coordination autour de la thèse et du postdoc de Carolina Dufour au LGGE.
- 2009 - 2012 : SOUTHERN-CROSS : Southern Ocean variability and Cross-scale interactions (ANR-JCJC, PI: J. Le Sommer). Ce projet portait sur le rôle des interactions d'échelle dans la variabilité de l'océan austral et sa réponse aux modes de variabilité atmosphérique. Il a permis le financement du postdoc de Jan Zika et de Carolina Dufour au LGGE. A plusieurs égards, il a joué un rôle de levier pour accéder à plusieurs financements complémentaires dont celui de la thèse de Carolina Dufour financée par le CEA.
- 2009- 2011 : MEDSO: Quantifying lateral stirring in the Southern Ocean (EGIDE PHC, PI: J. Le Sommer and E. Shuckburgh). Ce projet d'échange entre le LEGI et le BAS (Cambridge, UK) portait sur le diagnostic et la paramétrisation du mélange latéral dans l'océan austral.

Participation à des projets

- 2021 - 2025 : M2LINES (VESRI, PI : Laure Zanna and A. Adcroft). Ce projet financé par la fondation Schmidt Futures vise à exploiter au moyen d'apprentissage automatique les bases de données de simulations haute résolution et les réanalyses couplées océan-atmosphère pour réduire les biais systématiques des composantes océaniques et atmosphériques des modèles de climat.
- 2020 - 2024 : MeLODy (ANR, PI. R. Fablet). Ce projet rassemble 5 laboratoires nationaux autour de la mise en oeuvre de méthodes d'apprentissage automatique pour l'estimation et la prédiction de la circulation océanique de surface. J'y assure la coordination du work-package de démonstration.
- 2020 - 2022 : MEDLEY (JPI Climate / JPI Oceans, PI : A.M. Treguier). Ce projet d'envergure européenne dans le montage duquel j'ai été très impliqué vise à étudier l'impact des hétérogénéités latérales des propriétés dans la couche de mélange océanique sur son évolution et sa représentation dans les modèles. Je pilote l'un des work-packages du projet.
- 2019 - 2022 : LEFE IA-OAC. Le projet LEFE IA-OAC (PI. R. Fablet) est un projet de coordination visant à accélérer les interactions entre les communautés "machine learning" et "océanographie". En pratique, il est articuler avec l'organisation d'un workshop annuel à l'organisation duquel je participe depuis 2 ans.
- 2019 - 2021 : MOPGA CONTACTS. Le projet Make Our Planet Great Again CONTACTS est un projet porté par Bill Dewar (FSU/IGE) et qui finance sa présence dans l'équipe à 50% sur la durée du projet. Il vise à exploiter les simulations NATL60 et eNATL60 pour mieux comprendre les interactions d'échelles dans l'océan afin de guider le développement de fermeture sous-maille. Ce projet finance également la présence de deux postdocs dans l'équipe MEOM durant la durée du projet (T. Uchida et Q. Jamet). Je suis impliqué dans le déroulement scientifique du projet, en collaboration avec T. Penduff et B. Dewar.
- 2018 - 2021 : ANR BOOST SWOT. Le projet ANR BOOST-SWOT est coordonné par E. Cosme et implique l'IGE et CLS. Il vise à préparer des méthodes de cartographie de hauteur dynamique de l'océan capable de tirer parti de la richesse d'information des futures données SWOT. Ce projet finance une thèse (F. Le Guillou) et un postdoc (Sammy Metref) dans l'équipe MEOM. Je suis impliqué de près dans l'accompagnement scientifique de ce projet dont les objectifs scientifiques recoupent ceux du projet SWOT ST de l'équipe MEOM.
- 2019 - 2021 : DEDALES. Le projet 80 PRIME DEDALES (PI: G. Balarac, LEGI) est un projet en collaboration avec le LEGI (G. Balarac) et le LabSTICC (R. Fablet) et visant à développer des approches de fermeture sous-mailles par apprentissage automatique pour des écoulements LES et

océaniques. Le projet finance depuis octobre 2019 la thèse de Hugo Frezat au LEGI que je co-encadre avec G. Balarac et R. Fablet.

- 2017 - 2020 : GLO-HR (CMEMS, Pl. T. Penduff). Ce projet a été financé par Mercator Ocean International dans le cadre des services marins Copernicus (CMEMS). Il visait à préparer l'évolution du système de prévision global du CMEMS. J'ai été impliqué dans le pilotage de plusieurs actions dans ce cadre, en particulier concernant le développement de la fonctionnalité multi-grille de NEMO ainsi qu'une série d'expérience de sensibilité pour définir la grille verticale du système global. Ce projet nous a permis de disposer de ressources humaines pour l'analyse des simulations NATL60 au cours de la période 2015-2019.
- 2017 - 2020 : Data@UGA : Grenoble Data Institute. (CDP UGA, Pl. M. Blum). Ce projet est un projet interdisciplinaire financé dans le cadre de l'IDEX UGA. Il a accompagné la création du Grenoble-Alpes Data Institute, un institut interdisciplinaire pour la promotion des sciences de la données (méthodes statistiques permettant le traitement et l'exploitation de données massives) et l'étude des implications sociétales des données massives. J'étais en charge des activités en lien avec les thématiques INSU. En pratique, il s'agissait de mettre en place des activités de formation et d'animation transverses, et d'attribuer des ressources dans le cadre d'appels à projets compétitifs. Ce projet est arrivé à son terme fin 2020. Il a permis d'établir un réseau de collaborations locales sur les questions d'apprentissage automatique et de financer un ingénieur ainsi qu'une demi bourse de thèse dans l'équipe MEOM.
- 2016 - 2019 : MOMOMS (OSTST CNES/NASA, PI : E. Cosme). Ce projet est l'un des projets de l'équipe MEOM dans le cadre de l'Ocean Surface Topography Science Team mise en place par le CNES et la NASA. Sur la période 2016-2019, ce projet a permis de développer des approches de traitement multi-capteurs en synergies avec les données de SSH.
- 2015 - 2019 : TROIS-AS (ANR JCJC, PI : N. Jourdain). Ce projet ANR a permis de mieux comprendre les processus impliqués dans le couplage entre circulation océanique et dynamique des calottes glaciaires en préparation au couplage des modèles NEMO et Elmer-ICE. C'est dans ce cadre que s'est déroulé la fin de la thèse de N. Merino.
- 2012 - 2015 : COMODO: Communauté de Modélisation Océanographique (ANR-MN, PI: L. Debreu). Ce projet ANR dont j'ai assuré le portage pour le partenaire CNRS visait à mieux articuler les efforts de modélisation océanographique en France. Il a permis de renforcer les échanges méthodologiques et scientifiques entre les différents modèles de circulation océanique utilisés en France. Le postdoc de Nicolas Ducoussou a été financé dans ce cadre.
- 2012 - 2015 : MERCATOR-VERT (projet GMMC). Ce projet financé par le GMMC est un projet préparatoire qui a permis d'affiner la stratégie de modélisation bio-géochimique de MERCATOR-OCEAN. Nous avons assuré dans ce cadre un transfert méthodologique concernant la physique verticale du modèle NEMO vers les autres partenaires du projet.
- 2012 - 2014 : MyOceanII (EU FP7, 2012-2014) et MyOceanFo (EU H2020, 2014). Ces deux projets européens portaient sur la construction du dispositif d'océanographie opérationnel européen. Le succès de ces projets a mené la mise en place pérenne d'une délégation de service de la commission européenne vers MERCATOR-OCEAN pour assurer l'opération du service à partir de 2015. Le volet R&D sur lequel je suis intervenu concernait le développement et le test de la capacité de dégradation du transport des traceurs passifs dans NEMO. Ce projet a financé l'activité de Christophe Calone au LGGE.
- 2012 - 2014 : BIGSOUTH (BELSPO, Belgique). Ce projet belge portait sur l'étude et la modélisation de la biogéochimie dans la glace de mer. Nous sommes intervenus comme partenaire étranger dans ce projet pour fournir la suite de configuration PERIANT afin de tester les approches proposées dans le cadre du projet.

Annexe A3 : Responsabilités collectives

- 2021 - ... Membre du bureau scientifique du Multidisciplinary Institute for Artificial Intelligence (MIAI)
- 2021 - ... Membre du comité C4 (Comité des Chercheurs qui Calculent au CINES)

- 2020 - ... Membre de la Mercator Expert Team on Ocean Predictions
 - 2020 - ... Co-chair du CLIVAR Ocean Model Development Panel
 - 2016 - ... Responsable adjoint de l'équipe d'océanographie numérique de l'IGE (MEOM)
 - 2014 - ... Coordinateur national NEMO pour le CNRS et Mercator-Ocean-International
 - 2014 - ... Membre du Comité des Développeurs de la plateforme NEMO (bureau et WGs)
 - 2013 - ... Membre de l'équipe scientifique accompagnant la mission altimétrique SWOT
 - 2017 - 2020 : Membre du comité exécutif du Grenoble Alpes Data institute (Data@UGA)
 - 2014 - 2020 : Membre du comité CT1 GENCI (évaluation des demande de resources calcul)
 - 2014 - 2020 : Membre du CLIVAR Ocean Model Development Panel (2 mandats)
 - 2013 - 2015 : Membre de la Commission Observatoire de l'OSUG (éval. services et Labex)
 - 2010 - 2013 : Membre du comité de pilotage de la MaiMoSiNE (Maison de la Modélisation)
-

1. Dans tout ce qui suit, je ne discuterai que des modèles de circulation océanique pouvant être déployés à l'échelle globale (modèles dits de *circulation générale*), laissant ainsi de coté les modèles de circulation océanique côtière. ↵
2. "Never be the brightest person in a room, then you can't learn anything" [[75](#)]. ↵
3. A ma connaissance, il s'agissait alors de la configuration de modèle réaliste à plus fine résolution utilisée pour des expériences de sensibilité au SAM dans la communauté. ↵
4. Il est à noter toutefois cette tendance positive de l'extension de la glace de mer antarctique s'est inversée depuis lors [[155](#)] ↵
5. Les modèles couplés calotte-océan réalistes n'existaient en effet pas encore au moment où j'ai abordé ces questions. ↵
6. Notons que bien qu'elle soit régulièrement mise en oeuvre [[212](#),[215](#)], cette approche diagnostique fait l'objet de débats depuis quelques années [[245](#),[246](#),[247](#)] ↵
7. Une question essentielle est en particulier ici de comprendre dans quelle mesure les échanges énergétiques et l'expression de la dynamique de fine échelle est affectée par la résolution explicite des interactions couplées à fine échelle entre océan et atmosphère. ↵