

LABORATOIRE D'ÉTUDES EN GÉOPHYSIQUE ET  
OCÉANOGRAPHIE SPATIALES

STAGE DE FIN D'ÉTUDES

---

# Étude de la variabilité de l'océan Austral à partir de 25 ans de mesures SURVOSTRAL

---

*Auteur :*  
Matthis Auger

*Travail Réalisé sous la direction de :*

Rosemary Morrow et Elodie Kestenare (LEGOS, Toulouse)

*Dans le cadre de l'obtention des :*

Master 2 Recherche, Océanographie Physique et Climat

Diplôme d'ingénieur ENSTA Bretagne, option Océanographie/Hydrographie





## Remerciements

Ce stage de fin d'études, réalisé dans le cadre du Master 2 Océanographie Physique et Climat de l'IUEM et de la branche Océanographie/Hydrographie de l'ENSTA Bretagne s'est déroulé au Laboratoire d'études en Géophysique et Océanographie Spatiales de Toulouse.

Je tiens à remercier particulièrement mes encadrantes, Rosemary Morrow et Elodie Kestenare pour leur pédagogie, leur disponibilité et leur gentillesse. Elles m'ont ouvert aux multiples problématiques d'analyses de mesures *in situ* et à la rigueur d'un travail de recherche. J'aurai plaisir à continuer à travailler avec elles à l'avenir et j'espère en avoir l'opportunité.

Merci à Sara Fleury pour avoir pris de son temps pour m'aider à configurer mon ordinateur, et ce malgré les difficultés rencontrées.

Je pense également aux stagiaires du bureau, les partenaires de pause et bien sur les stagiaires du CTOH, pour ce magnifique quart de finale atteint lors du tournoi de pétanque de l'Observatoire Midi-Pyrénées.

Enfin, je remercie les professeurs de l'ENSTA Bretagne et de l'IUEM pour m'avoir ouvert au domaine passionnant de l'océanographie et pour m'avoir donné le bagage scientifique nécessaire à ce stage.



## Résumé

L'océan Austral est une zone clé de la circulation globale, à travers ses deux cellules de retournement et le courant Circumpolaire Antarctique qui connecte les bassins océaniques majeurs. Ces dernières années, des études ont montré une variabilité importante dans la structure et la température de cet océan. Dans le cadre de ce stage, ces variations sont étudiées à travers l'utilisation d'une série de 25 ans de mesure *in situ* de température en profondeur. Ces données sont obtenues chaque été austral par le programme SURVOSTRAL, sur une section entre Hobart (Tasmanie) et Dumont d'Urville (Terre Adélie) près de 140°E.

Après sélection et validation des données dans la zone frontale, des produits grillés de climatologie par mois, de moyennes estivales et d'anomalies de température sont créés pour l'analyse. Une estimation des tendances permet d'identifier distinctement quatre zones avec des comportements différents. Dans la partie Nord de la zone, un réchauffement de 0.29°C par décennie est observé. Il est en grande partie dû au *Southern Annular Mode* (SAM), via la contraction de la bande de vents d'Ouest autour de l'Antarctique et le déplacement vers le sud des fronts, ainsi que d'un apport d'eaux du Nord plus important. Les Eaux Hivernales (WW) ne montrent pas de tendance significatives mais leur température est directement liée à la température de surface en hiver précédent, qu'un SAM positif a tendance à refroidir. Les couches supérieures et inférieures des Eaux Circumpolaires Profondes (CDW) montrent respectivement un faible réchauffement et un refroidissement peu robuste.

## Abstract

The Austral ocean is a key zone of the global circulation, with its two overturning cells and the Antarctic Circumpolar Current, which connects the three major oceanic basins. Studies over the past few years have shown a high variability in the structure and temperature of this ocean. These variations are analyzed here thanks to 25 years of *in situ* temperature measurements, at depths of up to 900 meters. This data is obtained each austral summer by the SURVOSTRAL program, on a section from Hobart (Tasmania) to Dumont d'Urville (Adélie Land).

After the careful selection and validation of the data, gridded products of monthly climatology, summer means and temperature anomalies are created for the analysis. Four distinct zones with various behaviors have been identified thanks to an estimate of the temperature trends over the zone. In the Northern part of the zone, a warming of 0.29°C per decade has been found. It is mostly caused by the Southern Annular Mode (SAM), through the contraction of the westerly wind belt toward the pole, creating a Southward movement of the fronts and an increase in northern waters input. No clear trend has been observed in the Winter Waters (WW), but their temperature is in phase with the surface temperature of the previous winter; positive SAM phases tend to cool these surface waters. Upper Circumpolar Deep Waters (UCDW) show a slight warming and Lower Circumpolar Deep Waters (LCDW) are cooling, but the amount of data available for this water mass is low.



## Nomenclature

AASW	Antarctic Surface Water
ACC	Antarctic Circumpolar Current
ACW	Antarctic Circumpolar Wave
AW	Antarctic Water
CDW	Circumpolar Deep Water
ENSO	Oscillation Austral El Nino
EOF	Empirical Orthogonal Function
LDW	Lower Circumpolar Deep Water
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PF	Polar Front
SAF	Subantarctic Front
SAM	Southern Annular Mode
SAMW	Subantarctic Modal Water
SSH	Sea Surface Height
SST	Sea Surface Temperature
STF	Subtropical Front
STW	Subtropical Water
SURVOSTRAL	SURveillance de l'Océan auSTRAL
UDW	Upper Circumpolar Deep Water
WW	Winter Water





**Table des matières**

<b>Résumé</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Table des abbréviations</b>	<b>IV</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Présentation de la zone et des modes climatiques</b>	<b>3</b>
1.1 Fronts principaux . . . . .	3
1.2 Masses d'eaux principales . . . . .	3
1.2.1 Eaux Subtropicales (STW) . . . . .	3
1.2.2 Eaux Modales Subantarctiques (SAMW) . . . . .	4
1.2.3 Eaux Antarctiques de Surface (AASW) et Eaux Hivernales (WW) . . . . .	4
1.2.4 Eaux profondes circumpolaires (UCDW et LCDW) . . . . .	4
1.3 Modes de forçage grande échelle - SAM et ENSO, Onde Circumpolaire Antarctique . .	4
1.3.1 Southern Annular Mode (SAM) . . . . .	5
1.3.2 El Niño Southern Oscillation (ENSO) . . . . .	5
1.3.3 Onde Circumpolaire Antarctique (ACW) . . . . .	5
1.4 Extension au sud du courant Est Australien (EAC) . . . . .	5
<b>2 Contrôle des données XBTs et données externes utilisées</b>	<b>6</b>
2.1 Description des données XBTs . . . . .	6
2.1.1 Répartition temporelle et spatiale des profils XBTs . . . . .	7
2.1.2 Sélection de données et trajectoire du bateau . . . . .	8
2.1.3 Calcul de la position des fronts par altimétrie pour la validation des données . .	8
2.2 Autres données . . . . .	11
<b>3 Produits XBTs grillés finaux</b>	<b>11</b>
3.1 Transect sur une grille régulière . . . . .	11
3.2 Produit 1 : Climatologie en Moyenne Saisonnière . . . . .	12

3.3	Produit 2 : Moyennes Estivales NDJF	13
3.4	Produit 3 : Anomalies de Température	15
<b>4</b>	<b>Analyse des tendances locales et de la variabilité des masses d'eaux</b>	<b>15</b>
4.1	Tendances de température	15
4.2	Eaux Subtropicales (STW) et Eaux Modales Subantarctiques(SAMW)	16
4.2.1	EOFs	16
4.2.2	Influence des STW sur la température de zone	18
4.2.3	SAMW et détection de tourbillons	20
4.3	Eaux Antarctiques de Surface (AASW)	23
4.3.1	Couche supérieure des AASW	23
4.3.2	WW	23
4.4	Couche supérieure des Eaux Profondes Circumpolaires (UCDW)	25
4.5	Proche de l'Antarctique	27
	<b>Conclusion</b>	<b>30</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>i</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>iv</b>
<b>A</b>	<b>Tableaux de répartition des données</b>	<b>vi</b>
<b>B</b>	<b>Climatologie à partir du produit ISAS-CORA</b>	<b>vii</b>
<b>C</b>	<b>Outils statistiques utilisés dans l'analyse</b>	<b>viii</b>
C.1	EOFs	viii
C.2	Test de Mann-Kendall	viii
C.3	Coefficient de corrélation	viii
<b>D</b>	<b>Position des STW et SAMW sur la ligne SURVOSTRAL</b>	<b>ix</b>



## Introduction

L'océan Austral comprend les eaux les plus au Sud du globe. Ses conditions climatiques difficiles en font l'océan le plus méconnu de la planète. Il s'étend du continent Antarctique jusqu'au parallèle 40°S, et forme un océan annulaire, voisin des océans Atlantique, Pacifique et Indien. Il fait donc le lien entre ces trois bassins océaniques via le Courant Circumpolaire Antarctique (ACC), ce qui permet les transports globaux de chaleur à travers la circulation globale (Fieux (2017)). L'ACC est un courant extrêmement puissant d'Ouest en Est, qui isole l'Antarctique de l'arrivée des eaux chaudes plus au Nord. Ce courant n'est pas totalement uniforme. Il est composé de branches variables qui forment les fronts circumpolaires. Ces fronts créent des barrières entre les masses d'eaux, ainsi que des jets particulièrement puissants de l'ACC. Le transport moyen de l'ACC au niveau du sud de la Tasmanie est d'environ 147 Sv (Rintoul et al. (2002)).

L'océan Austral, à travers l'upwelling des eaux denses et profondes aux latitudes les plus au Sud, permet de réguler les échanges entre les eaux profondes et celles proches de la surface de l'ensemble des océans. Sa circulation est composée de deux cellules de retournement (figure 1a., Siedler et al. (2013)). En effet, les eaux profondes circumpolaires, se déplacent vers les pôles jusqu'à 60°S où elles remontent et atteignent la surface. Une première cellule se crée à partir de la couche inférieure de ces eaux (LCDW), qui sont plus denses et atteignent la surface au sud de l'ACC. Les interactions avec l'atmosphère et la glace de mer participent à leur changement en eaux antarctiques de fond (AABW), avec une subduction sous les eaux profondes qui ne sont pas encore remontées à la surface. La seconde cellule est formée par la couche supérieure des eaux profondes antarctiques (UCDW), qui remontent à la surface dans l'ACC et sont entraînées vers l'Est par l'ACC et vers le Nord par le transport d'Ekman associé aux forts vents d'Ouest. Elles se mélangent et interagissent avec l'atmosphère, jusqu'à devenir des eaux antarctiques intermédiaires (AAIW) ou des eaux modales subantarctiques (SAMW) moins denses.

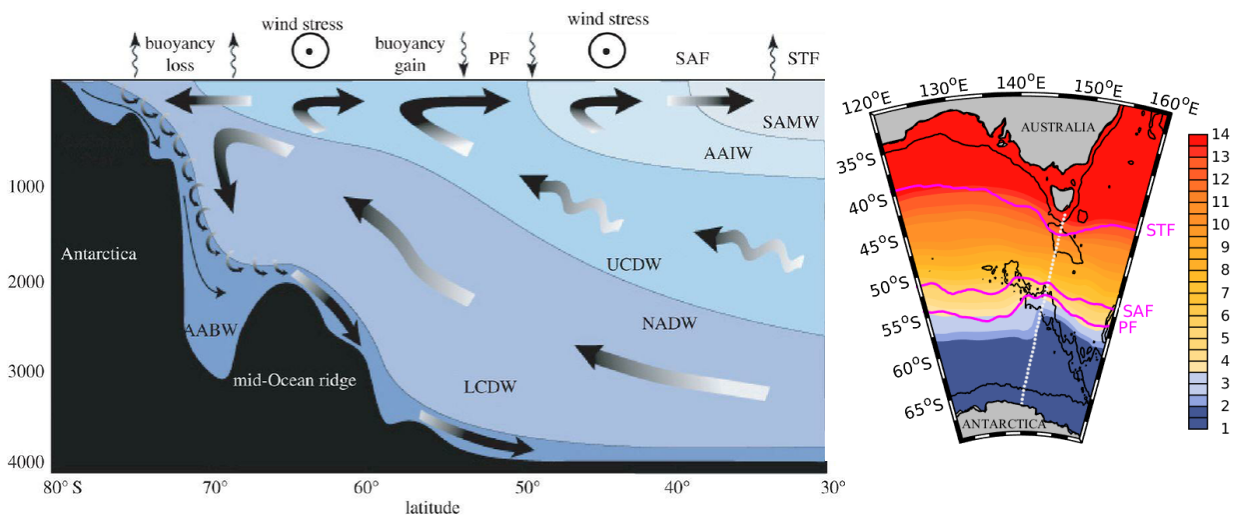


FIGURE 1 – a) : À gauche, coupe transversale de l'océan Austral d'après Speer et al. (2000). La double boucle de circulation de retournement y est présentée, ainsi que la position des masses d'eaux et fronts. b) : À droite, ligne de la trajectoire des mesures SURVOSTRAL entre Hobart et Dumont d'Urville dans l'océan Austral. Les trois fronts majeurs (Subtropical, Subantarctique et Polaire) y sont représentés, ainsi que la SST Reynolds de la zone moyennée sur les mois de décembre, janvier, février et mars.

Le sud de la Tasmanie, à 140°E, est un lieu d'échanges inter-océans particulier. Au sud de 48°S, de forts jets du courant circumpolaire portent les eaux du secteur austral de l'océan Indien vers l'océan Pacifique. Mais au Nord, il y a également une circulation des eaux subtropicales de la mer de Tasmanie vers l'océan Indien. Ce transport des eaux d'Est en Ouest représente le *Tasman leakage*, identifié par Speich et al. (2002).

Si ces eaux jouent un rôle important dans les échanges inter-océan, comprendre leur évolution au cours du temps est essentiel. Il existe très peu d'observations à long terme à travers l'océan Austral. Certaines lignes de mesures CTD ont été maintenues depuis 1-2 décennies dans le cadre du programme WOCE (SR1 sur le passage de Drake sous l'Amérique du Sud, SR2 au sud de l'Afrique, SR3 à 140°E au sud de l'Australie) avec des dizaines de sections répétées. Elles sont accompagnées de plusieurs lignes de mesures à haute résolution de température par sonde XBT (eXpandable BathyThermograph). Depuis 2005, le programme de flotteurs Argo vient compléter ces mesures *in situ*. Il permet un échantillonnage de profils verticaux de température et salinité à basse résolution sur l'ensemble de l'océan Austral. Depuis 5 ans, des mesures d'éléphants de mer sont aussi disponibles, mais il y en a relativement peu au sud de l'Australie (Pellichero (2018)).

La plus longue série de mesures de température par XBT, avec une couverture de plusieurs sections répétées par an est acquise avec le programme SURVOSTRAL (WOCE-IX28). Cette étude sera centrée sur une analyse de ces mesures. Le programme SURVOSTRAL est un programme de recherche mené par la France, l'Australie et les Etats-Unis qui consiste en l'acquisition de mesures *in situ* de température et de salinité de surface à l'aide d'un thermosalinographe, ainsi que des profils de température réalisés avec des sonde XBTs, chaque été austral de 1992 à aujourd'hui. Elles sont réalisées à bord de *l'Astrolabe*, le navire ravitailleur des Terres Australes et Antarctiques, sur une section entre Hobart (Tasmanie, 42.9°S, 147.3°E) et Dumont d'Urville (Terre Adélie, 66.6°S, 140.0°E). L'analyse de ces mesures permet de comprendre les variations des paramètres physiques, tels que les températures et positions des masses d'eaux ou les mouvements de fronts, dans la zone autour de 140°E, et ainsi de valider les modèles existants.

Ces données ont déjà fait l'objet d'analyses scientifiques. Sokolov and Rintoul (2003) ont montré l'adéquation de l'échantillonnage des mesures XBTs pour la résolution de la variabilité interannuelle, ainsi que la cohérence entre les anomalies de températures en été et celles de l'hiver précédent ou encore le lien entre la température et le déplacement des fronts. Chaigneau (2003) a établi le cycle saisonnier de réchauffement de la couche supérieure de l'océan Austral. Morrow et al. (2008) ont montré un affinement, un réchauffement et une remontée vers la surface de la langue d'eaux froides d'hiver. Un déplacement vers le sud des fronts a également été observé.

Avec 25 ans de profils XBTs, nous disposons d'une série temporelle assez longue pour pouvoir confirmer ou infirmer des conclusions antérieures.

- Nous cherchons à mieux quantifier des tendances et des évolutions dans le comportement des fronts et masses d'eaux de l'océan Austral. Il est capital de comprendre comment celui-ci, encore assez méconnu, fonctionne, car c'est un élément essentiel sur lequel repose le climat global. En effet, la modification des masses d'eaux par les flux air-mer est intense, et la recirculation des anomalies climatiques se fait non seulement autour de l'océan Austral mais également dans les 3 océans adjacents.
- Plus précisément, nous voulons savoir si les grands changements observés entre le début des années 1990 et les années 2000 sont continus jusqu'à aujourd'hui, ou s'ils ne sont que des variations interannuelles et décennales importantes.
- Le lien entre ces variations à 140°E et les modes climatiques, tels que le Southern Annular Mode et ENSO sera investigué.

Pour mener à bien ces objectifs, nous avons analysé les variations de température à fine échelle sur 25 ans et les avons interprété en considérant l'advection horizontale (courants, tourbillons) et en étudiant le forçage atmosphérique par les modes climatiques influents sur la zone. La position et variabilité des fronts océaniques a également été déterminée.

# 1 Présentation de la zone et des modes climatiques

## 1.1 Fronts principaux

Les fronts hydrologiques séparent les différentes masses d'eaux de l'océan Austral. Ils sont généralement associés à de forts gradients méridiens de propriétés, notamment de température et de salinité, et à des branches particulièrement puissantes de l'ACC. La position des fronts varie avec la topographie et le forçage atmosphérique. Ici les fronts seront caractérisés par des critères de température en profondeur, afin de pouvoir les retrouver sur nos mesures. Ils peuvent également être suivis par satellite (par SST Reynolds (Sea Surface Temperature), d'après [Sokolov and Rintoul \(2003\)](#), ou par altimétrie (SSH, Sea Surface Height) d'après [Sallée et al. \(2007\)](#) et [Sokolov and Rintoul \(2007\)](#)) Une dizaine de branches de fronts à 140°E a été trouvée par [Sokolov and Rintoul \(2007\)](#). Nous détaillons dans la table 1 les 7 fronts les plus importants, leur position moyenne et leur critère d'identification ainsi que les zones qu'ils délimitent.

Fronts (Position Moyenne)	Zones	Critères pour déterminer la position des fronts
STF (45.5°S)		$T = 11^{\circ}\text{C}$ à 150m de profondeur
	SAZ	
SAF (51°S)		$\max(\text{grad}T)$ à 400m de profondeur pour $T \in [3, 8]^{\circ}\text{C}$
	PFZ	
N-PF (53.5°S)		Extension au Nord de la couche de température minimale plus froide que $2^{\circ}\text{C}$ à 200m de profondeur
	AZ-N	
S-PF (61°S)		La couche de température maximale $T > 2.2^{\circ}\text{C}$ s'amincit rapidement vers le sud
	AZ-S	
N-SACCF (62.5°S)		$T = 2^{\circ}\text{C}$ dans la couche de $T$ max à 300m de profondeur
S-SACCF (63.5°S)	Divergence Antarctique Proche Antarctique	$T = 1.8^{\circ}\text{C}$ dans la couche de $T$ maximale
SB (64°S)		$T\text{-max} > 1.5^{\circ}\text{C}$

TABLE 1 – Fronts du Courant Circumpolaire Antarctique, avec leur position moyenne et le critère de température pour les obtenir. Leur position moyenne est calculée à partir des mesures XBTs analysées ici, à partir du produit "moyennes estivales" présenté section 3.3. Les zones que ces fronts délimitent sont également nommées. Ces critères sont issus de [Chaigneau \(2003\)](#).

## 1.2 Masses d'eaux principales

Les masses d'eaux principales dans l'océan Austral se situent entre chaque front défini en Table 1 ([Chaigneau \(2003\)](#)). Nous avons focalisé notre étude sur la couche 0-800m de profondeur. Le coeur de ce travail concerne les changements de température de différentes masses d'eaux entre les fronts. Leurs principales définitions et propriétés sont présentées, du Nord au Sud.

### 1.2.1 Eaux Subtropicales (STW)

Les Eaux Subtropicales sont visibles au nord de notre zone d'étude comme les eaux avec une température supérieure à  $11^{\circ}\text{C}$ . Elles sont limitées au Sud par le front subtropical, aux alentours de  $45.5^{\circ}\text{S}$ .

### 1.2.2 Eaux Modales Subantarctiques (SAMW)

Les Eaux Modales Subantarctiques sont formées lorsque le refroidissement en hiver provoque une convection profonde et engendre la formation d'une épaisse couche de mélange (jusqu'à 500-600m au sud de la Tasmanie), dans la zone Subantarctique au nord du front Subantarctique (SAF, [Rintoul and England \(2002\)](#)). Elles sont impactées par l'apport de l'eau peu salée et froide en surface en provenance du Sud (AASW), portée par le transport d'Ekman et par les tourbillons ([Morrow et al. \(2004\)](#)). Elles sont ensuite entraînées vers l'Est par le courant circumpolaire tout en se déplaçant vers le Nord, et en fin d'hiver sont subductées sous les eaux subtropicales plus chaudes. Elles circulent autour des gyres subtropicales, et une partie peut remonter en surface et ventiler la thermocline équatoriale des différents bassins océaniques ([Gao et al. \(2017\)](#)). Elle est également définie comme la masse d'eau avec la vorticité potentielle minimale. Dans notre zone, un apport d'eau peut aussi être réalisé par une injection des eaux subtropicales du nord.

### 1.2.3 Eaux Antarctiques de Surface (AASW) et Eaux Hivernales (WW)

Les AASW sont situ es dans la couche de mélange entre le PF et le continent Antarctique. Elles sont influenc es par la fonte de la glace de mer, les précipitations à 55 S, et elles sont brass es et port es vers le Nord par le transport d'Ekman. Elles sont caract ris es par un minimum de salinité relativement constant (33.8-33.9 psu, [Chaigneau \(2003\)](#)). Les eaux hivernales (WW) sont des eaux form es lors de l'augmentation de la profondeur de la couche de mélange d e à la glace de mer et au refroidissement de l'air accompagné d'un vent plus fort en hiver. Elles proviennent donc de la modification à travers divers processus des AASW entre le sud de l'ACC et le front polaire. Elles atteignent plus de 200m de profondeur, et sont caract ris es par un minimum de température. En été, l'air se réchauffe et la glace de mer fond ce qui entraîne le réchauffement de la couche de AASW en surface. Par stratification thermique, la couche de mélange form e par les eaux hivernales (WW) devient alors une langue d'eaux froides sous la couche superficielle, qui conserve les propriétés de l'hiver précédent ([Aoki et al. \(2013\)](#)). Elle est définie dans cette étude comme la langue d'eau froide avec une température inférieure à 2 C. Enfin, les AASW (et donc les WW) participent à la formation d'eaux modales lors de leur advection vers le Nord lorsque celles-ci traversent les fronts de l'ACC (voir [4.2.3](#)).

### 1.2.4 Eaux profondes circumpolaires (UCDW et LCDW)

Les eaux profondes circumpolaires (CDW) sont divis es en deux couches situ es en profondeur dans l'océan Austral. Ces couches proviennent directement des eaux profondes Nord Atlantique et se mélangent avec les eaux profondes des autres océans ([Fieux \(2017\)](#)). Elles sont amen es vers la surface vers 60 S par la divergence Antarctique. La couche supérieure (UCDW, caract ris e par un maximum d'oxygène et de température) est ensuite d plac e vers le Nord dans la couche de AASW/WW. La branche inférieure (LCDW, caract ris e par un maximum de salinité) se déplace vers le sud et plonge pour former les eaux antarctiques de fond (AABW). Les deux couches interviennent donc dans les deux boucles de la circulation de retournement méridionale profonde ([Aoki et al. \(2013\)](#)).

Nos mesures XBTs permettent d'observer la température jusqu'à 800m de profondeur. Nous pouvons donc observer la partie supérieure de ces eaux. Ces UCDW coïncident avec la couche de maximum de température sous la WW, et s'étendent de 250 - 400m de profondeur jusqu'au fond. Tout comme les LCDW, les gradients de température à l'intérieur de la masse d'eau sont très petits ([Sokolov and Rintoul \(2003\)](#)). Dans la zone 62-66.5 S de la ligne SURVOSTRAL, l'upwelling de la divergence Antarctique nous permet également d'observer les LCDW entre 0 et 800m. Elles sont caract ris es par un maximum de salinité que nous ne pouvons pas observer avec nos mesures XBTs.

## 1.3 Modes de forçage grande échelle - SAM et ENSO, Onde Circumpolaire Antarctique

Dans l'analyse de la variabilité de température, nous nous sommes intéressés à sa réponse aux deux grands modes de variabilité climatique sur la zone, SAM et ENSO. L'onde circumpolaire

antarctique (ACW), encore à l'étude, a également été prise en compte dans notre travail.

### 1.3.1 Southern Annular Mode (SAM)

Le SAM est le mode de variabilité atmosphérique dominant sur l'océan Austral. L'indice est défini par la différence de pression atmosphérique entre plusieurs stations météorologiques entre les latitudes 40°S et 60°S. SAM décrit le mouvement Nord - Sud de la bande de vents d'Ouest qui entoure l'Antarctique. Un SAM positif est associé à une intensification du vent et son déplacement vers le Sud, entraînant des vents d'Ouest plus forts aux hautes latitudes, et plus faibles aux latitudes moyennes. Au contraire, un SAM négatif correspond à l'expansion de la ceinture de vents d'Ouest vers l'équateur. Selon les études, la contraction de la bande de vents d'Ouest vers le pôle pendant les périodes de SAM positives pourrait provoquer une intensification vers le Sud des jets océaniques et donc un déplacement vers le Sud des fronts dans le même temps (Gupta and England (2006)), ou avec un léger délai de quelques mois (Sallée et al. (2007)). Dans les deux cas, les conséquences sont les mêmes. Le déplacement vers le sud du front Subtropical entraîne un plus grand apport d'eaux chaudes subtropicales au nord de l'océan Austral. Cependant, d'après Lovenduski and Gruber (2005), la contraction des vents au Sud entraîne une augmentation du transport d'Ekman au sud de l'ACC, avec un apport d'eaux plus froides et donc une anomalie de température négative créée dans la zone. Nous allons regarder les impacts de ce mode climatique dans nos analyses de température.

### 1.3.2 El Niño Southern Oscillation (ENSO)

ENSO est un indice qui représente le phénomène El Niño Oscillation Australe, qui est le mode de variabilité grande échelle majeur sur le Pacifique tropical. Il est associé à une variation de la température de surface et de la pression de l'air au dessus de celle-ci. Lors d'un ENSO positif, une anomalie positive de SST se crée dans le Pacifique Est (Siedler et al. (2013)). Au contraire, à l'Ouest, les eaux deviennent plus froides et sont amenées au sud du bassin par le Courant Est Australien (EAC) jusque dans l'océan Austral en passant au sud de la Tasmanie par l'extension de celui-ci (Morrow et al. (2008)). Lorsque l'indice est négatif (La Niña), c'est une anomalie de SST positive qui est initiée dans le pacifique Ouest et se propage jusqu'à la zone d'étude. D'après Sallée et al. (2007), aux basses fréquences, un phénomène El Niño est statistiquement associé avec un mouvement vers le Sud des fronts, et en particulier du front polaire dans le secteur Indo-Pacifique.

### 1.3.3 Onde Circumpolaire Antarctique (ACW)

L'Onde Circumpolaire Antarctique (ACW) est un phénomène toujours controversé identifié pour la première fois par White and Peterson (1996). L'application d'un filtre passe bande entre 3 et 7 ans de période à des données de pression au niveau de la mer, de tension de vent, de température de surface et d'extension de la couche de glace de mer sur l'océan Austral, permet d'observer clairement une propagation vers l'Est des anomalies. Cette onde peut prendre des formes différentes, avec des périodes d'entre 3 et 17 ans (White and Simmonds (2006)). L'absence d'observations évidentes de cette ACW pendant le début des années 2000 entraîne un abandon progressif de cette théorie par la communauté scientifique. Park et al. (2004) privilégient la piste d'une variabilité de la SST dominée par le mode SAM mais modulée par une connection avec ENSO. Aujourd'hui, il y a toujours de nombreux débats à propos de cette onde et de ses caractéristiques, et les définitions sont très diverses. Après avoir accumulé des données de SSH, SST, de température de l'air en surface et de pression atmosphérique à la surface entre 1871 et 2012, Cerrone et al. (2017) confirment la présence de l'ACW et des modifications dans son amplitude et sa vitesse au cours de la série temporelle.

## 1.4 Extension au sud du courant Est Australien (EAC)

En arrivant sur l'Australie, le SEC (South Equatorial Current) venant de l'Est alimente le jet vers le Nord du North Queensland Current, et le courant vers le Sud du courant Est Australien (EAC). La majeure partie de l'EAC se détache de la côte australienne entre 30°S et 34°S et traverse le nord de la mer de Tasmanie. L'autre branche continue vers le Sud le long de la côte australienne jusqu'au sud



de la Tasmanie. Ce jet est appelé l'Extension de l'EAC. Des mesures au niveau de Maria Island, proche de la côte Est de la Tasmanie, ont montré que la température et la salinité ont augmenté depuis 60 ans, indiquant une expansion vers le Sud de l'extension de l'EAC (Siedler et al. (2013)). Une partie de l'EAC est transférée vers l'Ouest par le sud de la Tasmanie, et relie l'EAC à la circulation subtropicale de l'Océan Indien formant le *Tasman Leakage* (Speich et al. (2002)). En réalité, l'extension de l'EAC n'est pas continue dans le temps. Comme le montre Pilo et al. (2015), à sa séparation de la côte à 31°S, l'EAC a une rétroflexion et dégénère en un terrain complexe de tourbillons méso-échelle, qui s'étend vers le Sud le long de la pente du talus continental de l'Australie jusqu'au sud de la Tasmanie.

## 2 Contrôle des données XBTs et données externes utilisées

### 2.1 Description des données XBTs

Les données XBTs se présentent sous la forme d'une série de profils de température, pour des latitudes et longitudes données, suivant la trajectoire du navire. Entre quatre et cinq aller-retours (donc entre 8 et 10 transects, ou rotations) sont effectués chaque été par *l'Astrolabe*. Les premières mesures sont effectuées mi-octobre et la dernière section se déroule au début du mois de mars. Lors de certaines rotations, des sondes XBTs (eXpendable BathyThermographs) sont lancées toutes les deux heures (soit 35km environ). Les différentes trajectoires prises par le bateau lors des 25 années d'acquisition sont présentées figure 2. Une sonde XBT de type *Deep Blue* permet la réalisation d'un profil de température avec une résolution verticale d'environ 0.7m et une précision de mesure de température d'environ 0.1°C (d'après la notice constructeur). Elle atteint une profondeur variable, soit de 800m à 900m la plupart du temps mais parfois beaucoup moins. Les mesures sont plus fréquentes en zone frontale (49-54°S), avec une fréquence de mesure d'une heure (soit 18km environ). En effet, la variabilité de cette zone est importante, car c'est la zone la plus énergétique de l'ACC au sud de l'Australie. Les déplacements de fronts y sont nombreux, et il est difficile de les observer à basse résolution. De plus, dans cette zone, les conditions en mer sont difficiles et il n'est pas toujours possible de sortir sur le pont pour le lancement de la sonde XBT, et celle-ci peut également casser rapidement une fois lancée. Nous disposons aujourd'hui d'un jeu de données de 25 ans. Un contrôle qualité est appliqué aux mesures par le Csiro Marine and Atmospheric Research (CMAR), Hobart, Australie.

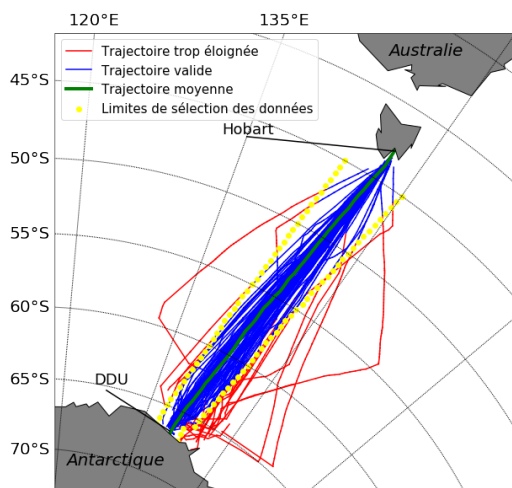


FIGURE 2 – Tracé des 25 ans de chemins empruntés par le bateau pour la traversée entre Hobart et Dumont d'Urville (DDU). La trajectoire théorique SURVOSTRAL est tracée en vert. La limite de sélection des données, discutée partie 2.1.2, est matérialisée par les points jaunes. Les parties de trajectoires sélectionnées lors de l'utilisation des données sont en bleu, celles rejetées sont en rouge.

Le jeu de données XBTs contient 10238 profils de température acquis entre Décembre 1992 et Mars 2017 (25 ans) pendant l'été Austral, soit un total de 148 rotations. Ces données ont été tracées, et un contrôle graphique a été effectué et stocké. Un exemple est présenté figure 3. Sur la figure 3a., les positions des profils effectués par les sondes XBTs sur la trajectoire du bateau sont tracées. Sur la figure 3b., l'ensemble des profils de température (température en fonction de la profondeur) est représenté. Cela permet d'observer non seulement les différences de température, mais également la variabilité importante de la forme des profils de température sur une même rotation. Le transect complet de la

température est affiché figure 3c., en fonction de la latitude et de la profondeur. Cette rotation est particulièrement bien échantillonnée, malgré quelques XBTs cassant dès la surface et entraînant des trous dans les données.

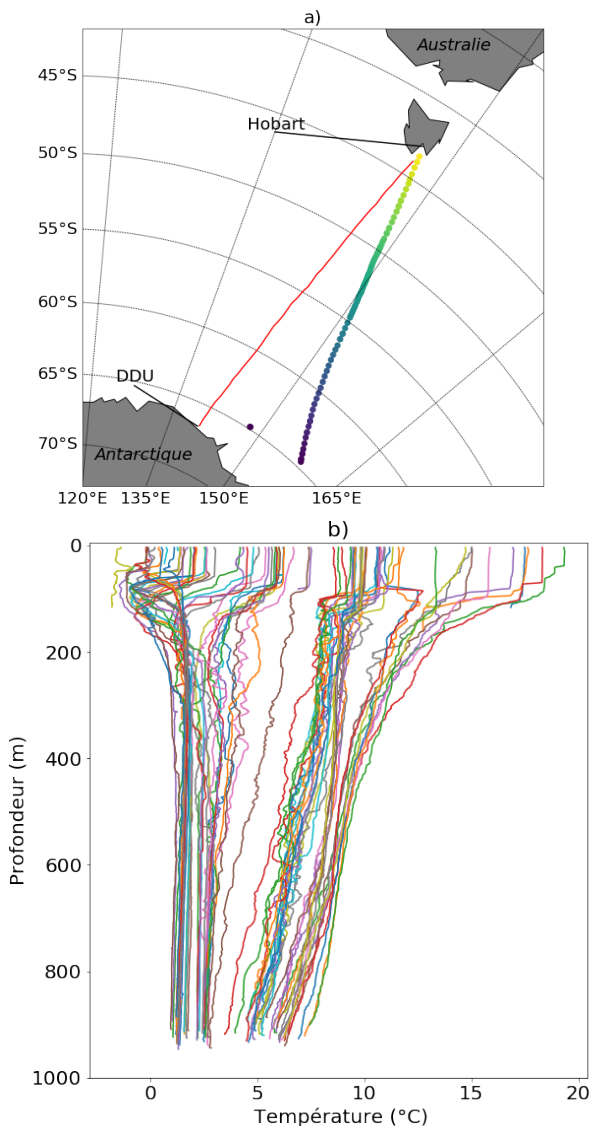


FIGURE 3 – a) Position de chaque profil effectué à bord du bateau lors du transect entre Hobart et Dumont d'Urville en février 2016 (points). La trajectoire théorique du bateau est en rouge. b) Profils de température des tirs de XBT correspondants à a). c) Une section verticale de température issue de la traversée. La position des mesures est marquée en rouge en haut de la figure. Une augmentation de la fréquence de mesure est identifiable entre 49°-54°S dans la zone frontale. Les sondes ayant cassé avant 800m sont repérables en blanc.

Notre objectif est d'analyser les variations interannuelles de température le long de notre ligne de mesure SURVOSTRAL. Pour cela, il faut interpoler les mesures sur une grille régulière en latitude, afin de créer une série temporelle. Mais avant, il faut vérifier d'une part la répartition spatiale et temporelle des profils, et d'autre part que les mesures sont prises sur des tracés bien répétés dans la même masse d'eau. Il faut également identifier à quel point le mouvement des fronts peut perturber nos mesures.

### 2.1.1 Répartition temporelle et spatiale des profils XBTs

Afin d'avoir un premier aperçu de la répartition des transects et profils sur les 25 ans de données et sur l'ensemble de la ligne SURVOSTRAL, deux tables sont effectuées en Annexe A : la première représente le nombre de jours de données par mois (table A.1a.) et la seconde liste le nombre de profils par tranche de degrés de latitude par année (table A.1b.). Ces tableaux permettent d'identifier rapidement la répartition temporelle et spatiale des mesures. Tous les profils rentrent en compte dans les deux tableaux, c'est-à-dire les profils cassant non loin de la surface ainsi que ceux réalisés loin du chemin moyen sont inclus.

Sur la table A.1a., le nombre de données en octobre et mars est très petit (compte tenu de l'agenda du navire). Pour ce qui est des années qui se détachent, il y a assez peu de données en 2012-2013 et elles sont très mal réparties sur l'été austral en 2013-2014. La volonté de déplacer une rotation de janvier à décembre à partir de la saison 2003-2004 est très visible. Globalement, la répartition temporelle est assez inégale entre les différentes années. Il faut donc être vigilant à ce que cela n'entraîne pas de biais dans le calcul et l'analyse de la variabilité interannuelle.

Sur la table A.1b., on retrouve la volonté d'augmenter l'échantillonnage spatial des données dans la zone frontale entre 49 et 54°S. La fréquence d'échantillonnage en latitude semble être similaire entre les années. Il n'y aura donc pas de grille différente à faire selon les années pour avoir une densité de mesures à peu près constante.

### 2.1.2 Sélection de données et trajectoire du bateau

Les fronts de l'ACC ne forment pas un cercle parfait autour de l'Antarctique. Leurs nombreux méandres, ainsi que leur fusion ou division, peuvent changer la structure méridienne de la température pour deux longitudes différentes. L'objectif étant de quantifier la variabilité dans une zone précise, il ne faut pas faire intervenir des variations dues à un échantillonnage dans des zones voisines de structure méridienne différente à une même latitude. Dans un premier temps, la trajectoire de chaque rotation est étudiée. Il faut identifier celles qui passent trop loin du chemin théorique de la ligne SURVOSTRAL. Elles ne pourront pas être incluses dans les études. En effet, la température mesurée pourra être celle d'une masse d'eau différente entre la position réelle du profil et celle recalée sur la ligne théorique SURVOSTRAL. Un aperçu de cette sélection de profil est réalisé figure 2. La sélection des profils à identifier comme inexploitable se fait selon les conditions suivantes :

- Le profil est réalisé à plus de 3° de longitude de part et d'autre du chemin moyen au nord de 65.5°S.
- Le profil est réalisé à plus de 3° à l'ouest du chemin moyen au sud de 65.5°S.
- Le profil est réalisé à l'est de 142°E au sud de 65.5°S.

La distance de 3° du chemin moyen est le meilleur compromis entre l'altération des données par la différence de structure de température pour une longitude différente de la ligne SURVOSTRAL, et le nombre de données qui ne seront pas exploitées après l'application de ces critères. Les données n'étant pas abondantes, il est important d'en conserver le plus possible afin de minimiser l'impact des erreurs de mesure ponctuelles. Pour ce qui est de la condition au sud de 65.5°S, les différences de bathymétrie à Dumont d'Urville et à l'est de la base sont telles que les bassins proches du continent ont une circulation bien différente. Il faut donc veiller à ne pas inclure des mesures de ce bassin voisin, juste à l'est de Dumont d'Urville.

Cette étude est légitime car effectivement beaucoup de trajectoires du bateau montrées en figure 2 sont très éloignées du chemin moyen. Cela peut être dû au ravitaillement d'une île à l'est du passage habituel du bateau, aux conditions de navigation ou encore à la recherche d'un passage à travers la glace de mer pour arriver à Dumont d'Urville ou en repartir. Ainsi, sur les 148 rotations, 34 contiennent des profils à écarter avec les conditions énoncées. Au final, sur 10238 profils réalisés sur l'ensemble des 25 ans, 614 ont été écartés.

### 2.1.3 Calcul de la position des fronts par altimétrie pour la validation des données

Une des difficultés de l'utilisation de ces données est le cas d'un transect ne passant pas exactement au niveau du chemin moyen sur la zone frontale. Une partie des données passant trop loin du chemin moyen a déjà été éliminée dans la première partie du traitement. Cependant, parmi celles restantes, certains profils éloignés de moins de 3° de longitude peuvent tout de même poser problème.

En effet, les méandres d'un front peuvent parfois être très prononcés, avec une position méridienne variant très fortement entre deux points décalés de  $1^\circ$  de longitude par exemple. Dans ce cas, si ce degré de longitude sépare la trajectoire du bateau et la ligne SURVOSTRAL moyenne, les profils de cette rotation positionneront le front à une latitude différente de celle de l'intersection réelle entre le front et la trajectoire moyenne.

D'après les études de Sallée et al. (2007), Sokolov and Rintoul (2007), Sokolov and Rintoul (2009), nous savons qu'il est possible d'identifier un front et son mouvement à partir de données de SSH (Sea Surface Height, variations du niveau de la mer). Au premier ordre, un front caractéristique possède une valeur de SSH constante sur l'ensemble de l'océan Austral. Ainsi, en identifiant une valeur de SSH associée à un maximum de gradient de SSH qui est lui-même associé à un front, il est possible de tracer sa position pour une date donnée sur les cartes correspondantes. Cependant, cette méthode de contour de SSH est très influencée par l'élévation du niveau de la mer à grande échelle ou des phénomènes plus locaux. Dans notre cas, cette méthode est suffisante car elle permet d'identifier les zones frontales et de faire un tri de données, mais elle n'a pas une précision suffisante pour étudier une évolution à long terme du positionnement des fronts.

Pour cette étude, de nouvelles valeurs de SSH ont été associées aux fronts polaires et sub-antarctiques. En effet, l'algorithme permettant le tracé des fronts sur l'océan Austral, créé par Sallée et al. (2007), permet de localiser certains fronts, mais le produit n'existe que jusqu'en 2013. Nous avons appliqué les mêmes techniques pour l'identification du contour de SSH que Sallée et al. (2007). Les cartes altimétriques AVISO en ADT (Absolute Dynamic Topography) de 2017 ont été utilisées, c'est-à-dire une version plus récente que celle analysée par Sallée et al. (2007). La nouvelle valeur de contour de SSH pour l'identification du SAF est  $SSH = -0.10m$  et  $SSH = -0.30m$  pour le PF. Leur position sur la carte ainsi que celle à la même date de Sallée et al. (2007) pour une date donnée est calculée pour le SAF et le PF (figure 4). Les résultats concordent globalement avec ceux de Sallée et al. (2007) dans la zone d'étude, et sont utilisés pour la validation des données *in situ*. Pour d'autres zones, telles que proche de  $50^\circ E$  et  $300^\circ E$ , des bruits importants sont observés. Ils ne sont pas étudiés ici. Cette série de positionnement de fronts effectuée sur le pourtour de l'océan Austral, faite dans le cadre de ce stage ainsi que le code permettant de la générer seront distribués aux autres utilisateurs via le CTOH, Service National d'Observations hébergé au LEGOS (ctoh.legos.obs-mip.fr).

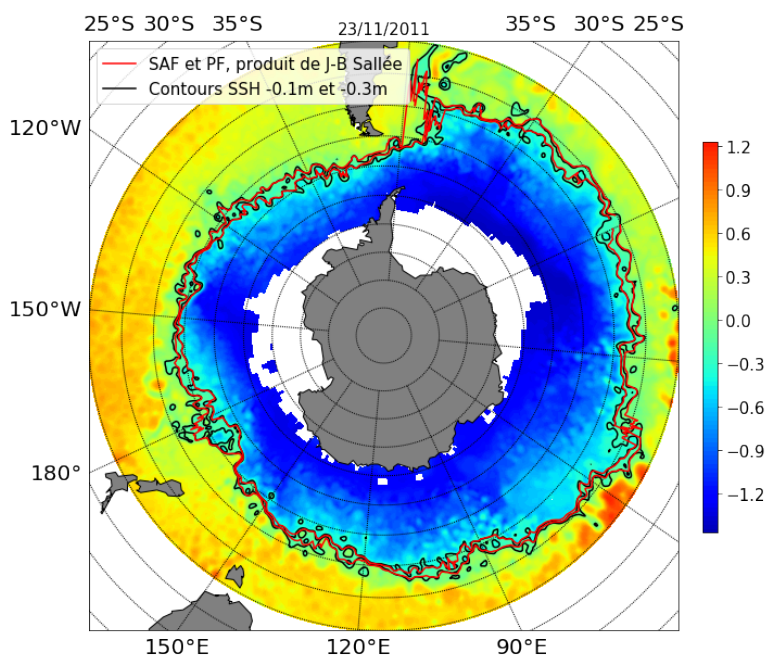


FIGURE 4 – Exemple du positionnement des fronts à partir d'un contour de SSH pour le 23 novembre 2011. En rouge, position des SAF (au Nord) et PF (au Sud) à partir du produit de Sallée et al. (2007). En noir, position du SAF et du PF à partir des contours de SSH obtenus dans cette étude pour le produit SSH AVISO en ADT (SAF =  $-0.1m$  et PF =  $-0.3m$ ).

Afin d'identifier les potentiels biais de mesure dûs aux méandres des fronts, l'ensemble des

trajectoires du bateau ainsi que les positions des fronts polaires et subantarctiques associés au moment de son passage sont tracés. Pour évaluer plus rapidement les trajectoires qui posent problème, pour chaque rotation, la latitude des fronts subantarctiques et polaires sur la trajectoire du bateau et sur le chemin moyen sont tracées, ainsi que la distance zonale qui sépare les deux positions. Ainsi, les éloignements zonaux entre rotations et chemins moyen entraînant un positionnement du front trop différent pourront être identifiés et potentiellement écartés. Un exemple de l'un de ces deux tracés est présenté figure 5a. et 5b., pour la saison 2007-2008. Une grande part des intersections des fronts avec les trajectoires de chaque rotation sont à moins de 50km en distance zonale de l'intersection du front et du chemin moyen. Il en résulte que les écarts en latitude de détection des fronts sont dans ce cas de l'ordre du quart de degré, ce qui est de la valeur la résolution en zone frontale de la grille choisie partie 3.1. Par conséquent, simplement combiner ces transects pour construire une série temporelle en latitude/profondeur ne va pas introduire de biais importants sur la température. Cependant, la rotation R0b (figure 5b.) montre une distance de plus de 100km en distance zonale avec la trajectoire moyenne du bateau. Cet éloignement s'accompagne d'un grand déplacement méridien du front entre les deux latitudes (front bleu sur figure 5a.), ce qui entraîne une différence de détection de front d'environ  $0.5^\circ$  de latitude qui peut poser problème en induisant un biais sur les séries temporelles.

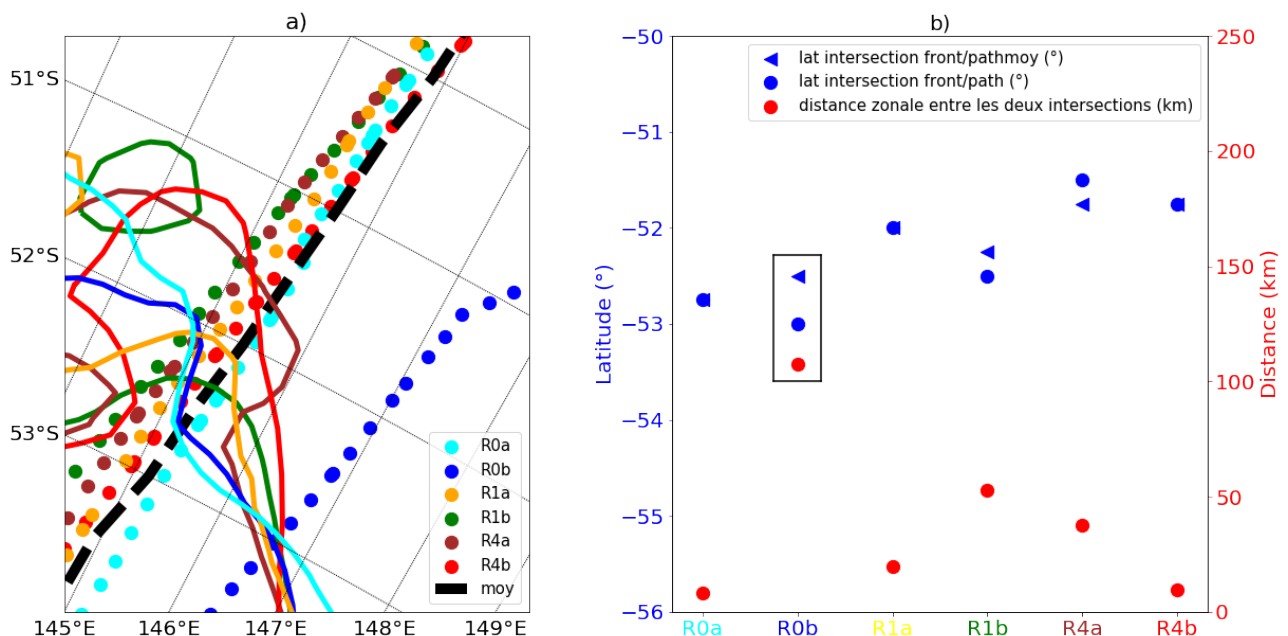


FIGURE 5 – a) Position des profils de température (points) pour chaque rotation de la saison 2007-2008, et position du front polaire au moment de chaque rotation (traits pleins). Le code couleur marque les profils de température et la position du front à la même date. La position du chemin moyen est marquée en pointillés noirs. b) Latitude de l'intersection du chemin moyen et du front polaire (triangle bleu), intersection de la trajectoire du bateau et du front polaire (rond bleu), distance zonale entre les intersections (rouge) pour chaque rotation de la saison 2007-2008. Le transect R0b est potentiellement problématique, il est encadré en noir.

La figure 5 permet également l'identification de certains tourbillons, qui peuvent perturber les mesures en apportant des eaux différentes de celle de la masse d'eau environnante. L'un d'eux est observable en vert sur la figure pendant la rotation R1b ( $51.5^\circ\text{S}$ ,  $144^\circ\text{E}$ ), mais ne semble pas impacter la mesure. Une liste complète des rotations passant un peu trop loin du chemin moyen et affectées par le mouvement des fronts a été réalisée. Les rotations affectées par les tourbillons y sont également répertoriées.

Plusieurs solutions ont été considérées pour résoudre ce problème, telles que la suppression de l'ensemble des profils concernés ou encore une projection des mesures sur le chemin moyen en prenant

en compte une zone d'influence autour du front.

La solution choisie a été différente, car la comparaison de l'évolution annuelle des transects de température, en supprimant totalement les données biaisées et en les conservant, a montré des résultats très similaires avec ceux obtenus en les gardant. Seule l'apparition de tourbillons dans certains transects pose problème. Dans un souci de maximiser le nombre de mesures utilisées, l'ensemble des données a été conservé et projeté directement sur le chemin moyen, tout en sachant que si un biais important est observé, il faudra prendre en compte ces transects biaisés avant d'apporter des conclusions hâtives. Ces vérifications n'ont été réalisées qu'en zones frontales, là où l'activité méso-échelle est importante et là où il y a le plus de chances de trouver des tourbillons. La présence de tourbillons n'a pas été vérifiée dans d'autres secteurs, excepté dans la zone des SAMW (partie 4.2.3), mais à partir d'une technique différente.

## 2.2 Autres données

D'autres données "externes" au projet ont été utilisées dans les analyses. Elles permettent de comparer les produits obtenus à partir du programme SURVOSTRAL avec d'autres sources de données, ainsi que d'étudier les forçages sur la zone.

- Des données SST Reynolds sont utilisées de 1992 à 2018. Elles sont échantillonnées sur une grille de  $1^\circ$  de résolution spatiale en latitude et longitude, et comportent des moyennes hebdomadaires sur la zone d'étude. Ces données proviennent à la fois de mesures *in situ* et d'observations satellites. Le produit NOAA Optimum Interpolation (OI) Sea Surface Temperature (SST) V2 est distribué par la NOAA ([www.esrl.noaa.gov/psd/](http://www.esrl.noaa.gov/psd/)).
- Les produits de courants géostrophiques calculés par altimétrie sont réalisés par AVISO (CNES) et disponibles via le CTOH (LEGOS). Le set de données utilisé est disponible de 1994 à 2016 sur une grille de  $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ .
- Le produit ISAS de température et salinité est disponible avec une bonne couverture de l'océan Austral à partir de 2005, année à partir de laquelle les flotteurs Argo viennent s'ajouter aux autres sources de données *in situ*. Le produit regroupe l'ensemble des données disponibles chaque mois sur une grille régulière de  $0.5^\circ$  de résolution entre 0 et 2000m. La précision est de  $\pm 0.005^\circ\text{C}$  pour la température et  $\pm 0.01$  PSU pour la salinité (Cabanes et al. (2013)). Les données sont disponibles sur <http://marine.copernicus.eu>.
- Les indices ENSO et SAM sont obtenus chaque mois. ENSO est disponible par la NOAA sur le site [www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/](http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/) et SAM par le British Antarctic Survey (<http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/sam.html>)

## 3 Produits XBTs grillés finaux

Afin de réaliser une analyse scientifique sur un ensemble de données uniforme, plusieurs produits ont été créés. Ils seront distribués par le programme SURVOSTRAL et le LEGOS.

### 3.1 Transect sur une grille régulière

Avant la création des produits que nous utiliserons dans l'analyse, les données de chaque rotation doivent être calées sur une section régulière, qui sera commune à l'ensemble des rotations. Pour cela, les étapes suivantes sont effectuées :

- La trajectoire moyenne du bateau est échantillonnée tous les demi-degrés en dehors de la zone frontale, et tous les quarts de degrés à l'intérieur de celle-ci ( $49-54^\circ\text{S}$ ). Cette différence de résolution en latitude est due à la différence d'échantillonnage observée en table A.1, afin d'avoir

une densité de données utilisées assez uniforme pour l'ensemble de la moyenne. Cela rejoint également la volonté d'avoir une meilleure résolution en zone frontale. La suite de points créés en latitude/longitude est le *chemin moyen*. Ce chemin moyen s'étend de 44°S à 66.5°S.

- Chaque profil conservé à l'issue de la sélection de données est affecté au point du chemin moyen avec la latitude la plus proche, et interpolé sur une grille en profondeur de 2m de résolution, entre 10 et 800m. Les données en surface ne sont pas conservées car elles sont fortement bruitées.

### 3.2 Produit 1 : Climatologie en Moyenne Saisonnière

La climatologie saisonnière de température à 140°E a été calculée par [Chaigneau \(2003\)](#) sur 8 ans de données. Nous avons recalculé cette climatologie à partir des 25 ans de données (figure 6), sur la grille créée dans la paragraphe précédent (0.5° de résolution en latitude et 0.25° en zone frontale, 2m de résolution en profondeur). Chaque profil est associé au mois correspondant à sa date d'acquisition, et la moyenne de l'ensemble des données disponibles pour un point de la grille est calculée pour chaque mois. La climatologie de la figure 6 et celle de [Chaigneau \(2003\)](#) sont très similaires.

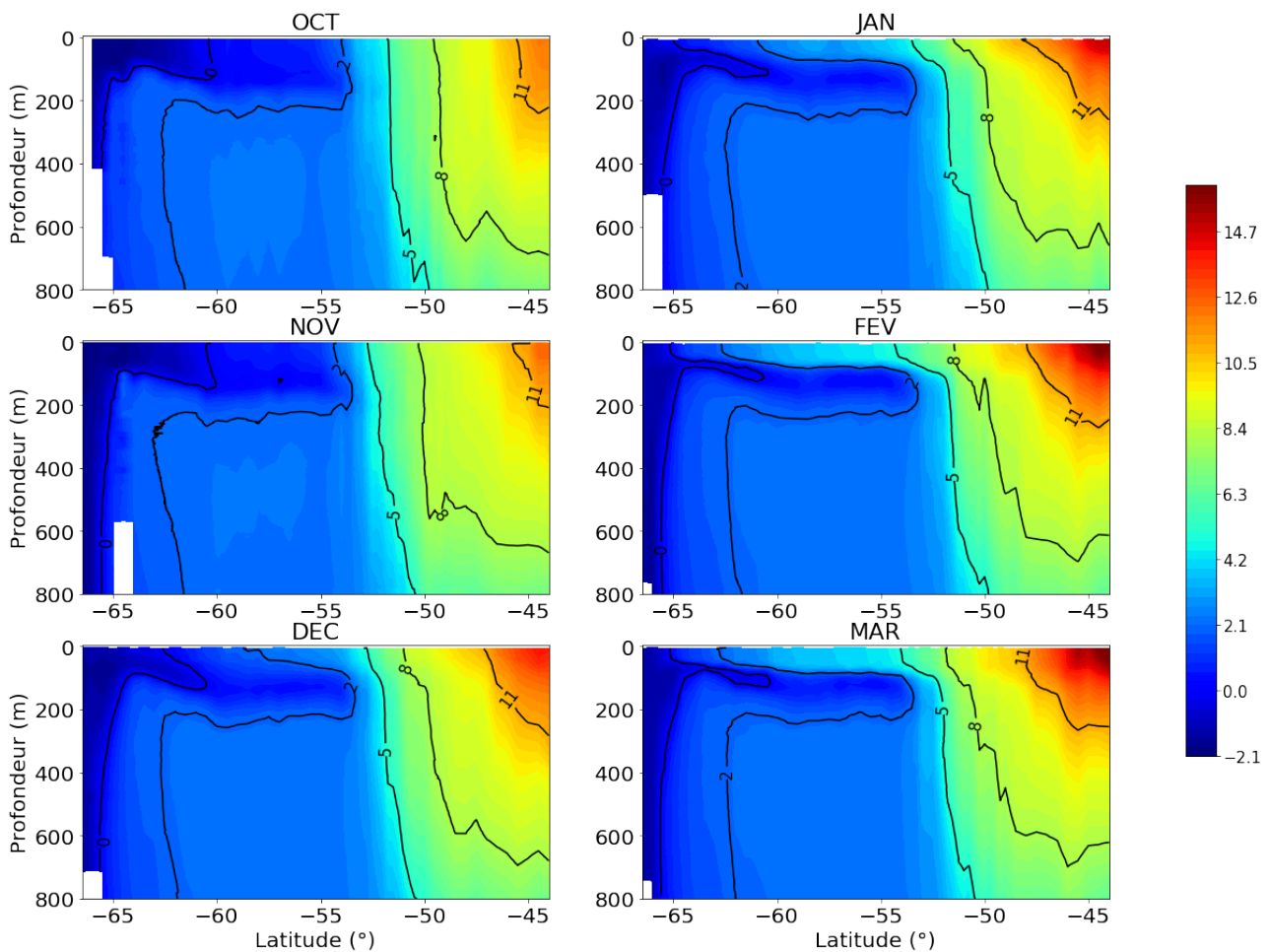


FIGURE 6 – Climatologie mensuelle pour les mois d'Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars. Les isothermes à 0°C, 2°C, 5°C, 8°C, 11°C (contours noirs) permettent d'identifier les différentes masses d'eaux.

Ces cartes en moyennes mensuelles (figure 6) permettent de dégager les variations saisonnières de la température dans les 800 premiers mètres de l'océan Austral sur la section Hobart - Dumont d'Urville. Plusieurs phénomènes y sont observables. L'un des plus visibles est le cycle saisonnier de l'AASW. En octobre, avant le début de l'été, l'AASW forme une couche uniforme de la surface jusqu'à 250m de profondeur, entre les latitudes 53°S et 60°S. Au-delà de 60°S, l'influence de la glace de mer

se fait sentir, avec des eaux plus froides en surface pour les mois d'octobre et novembre. À partir de décembre, et pendant l'été austral, une couche de surface plus chaude se crée. En dessous il reste une langue d'eau froide qui comporte un minimum de température. Elle est identifiée comme la WW. Plus au Nord, la température de l'eau augmente en surface jusqu'en février. À part les isothermes  $2^\circ$  et  $0^\circ$ , directement affectées par le cycle de la WW, le reste des isothermes n'a pas un cycle saisonnier marqué. De plus, la similarité entre les mois d'octobre et novembre, ou encore entre février et mars est forte. En effet, l'acquisition des données commence après le 20 octobre et se termine au début du mois de mars. La première moyenne représente donc la température de la fin du mois d'octobre, et la seconde le début du mois de mars. De plus, d'après l'annexe A, les moyennes d'octobre et mars incluent assez peu de données. Il faut donc être prudent avec les résultats qu'elles permettent d'avancer. L'impact est direct sur la figure 6 en octobre, avec des trous de données (en blanc) proche de l'Antarctique en octobre, dûs à la condition de sélection de données très restrictive au sud de  $65.5^\circ\text{S}$  et à la présence de glace de mer.

La climatologie de février obtenue à partir des données ISAS-CORA est tracée en Annexe B. Celle calculée avec les données SURVOSTRAL y est également montrée pour effectuer une comparaison. À grande échelle, les deux climatologies sont similaires. Cependant le résultat obtenu avec ISAS est bien plus lisse. Cela est dû à la différence de technique d'interpolation, car ISAS se base sur des données avec une répartition spatio-temporelle régulière mais à grande échelle, alors que SURVOSTRAL utilise des données bien plus locales et résolues. Cette comparaison confirme que nos moyennes saisonnières sont consistantes d'autres sources de données (ISAS), mais que notre technique de gridding maintient plus de structures à fine échelle.

### 3.3 Produit 2 : Moyennes Estivales NDJF

Les moyennes estivales sont calculées chaque été austral, de novembre à février. Elles permettent d'avoir un aperçu des évolutions des profils de température au fil des années (Figure 7). Pour leur calcul, les données grillées sont moyennées en novembre, décembre, janvier et février, en chaque point et pour chaque année. La moyenne des quatre mois pour chaque été austral est réalisée et permet l'obtention de la moyenne estivale (notée *moyenne NDJF*).

Cependant, d'après la table A.1a., il y a des mois de certaines années comportant des points sans donnée. Faire directement une moyenne conduira à un biais artificiel, dû au fait que la température d'un (ou des) mois en ce point est absente lors du calcul de la moyenne des quatre mois estivaux. Pour éviter au maximum ces écarts, nous avons remplacé la température du mois manquant au point correspondant par la climatologie du mois en question (figure 6) au même point, avant de calculer la moyenne NDJF. Sur la figure 7, les zones hachurées sont les zones pour lesquelles la climatologie est incluse au moins deux fois sur les quatre mois lors du calcul de la moyenne. Cela signifie que pour ces zones, la moyenne NDJF est composée d'au moins la moitié de données de la climatologie. Si quatre mois de climatologie sont utilisés, nous éliminons la moyenne NDJF.

La partie 3.2 a permis de montrer que les données d'octobre et novembre, ainsi que février et mars sont très similaires. De plus, les nombres de données d'octobre et de mars sont faibles. Dans le but d'utiliser un maximum de données et donc d'éviter le plus possible l'intervention de la climatologie dans les moyennes NDJF, les mesures d'octobre (à partir du 20 octobre) sont affectées au mois de novembre, et les mesures du début de mars (avant le 7 mars) à février.

Ces cartes permettent d'avoir une vision conjointe de la distribution spatiale et temporelle des données, grâce aux zones hachurées expliquées précédemment. Les années initialement identifiées comme pauvres en données sont encore plus visibles, et à partir de ces cartes il est possible d'identifier pour chaque année des zones où le nombre de données pour le calcul de la moyenne NDJF est faible. Nous reviendrons sur ce point pour l'analyse.



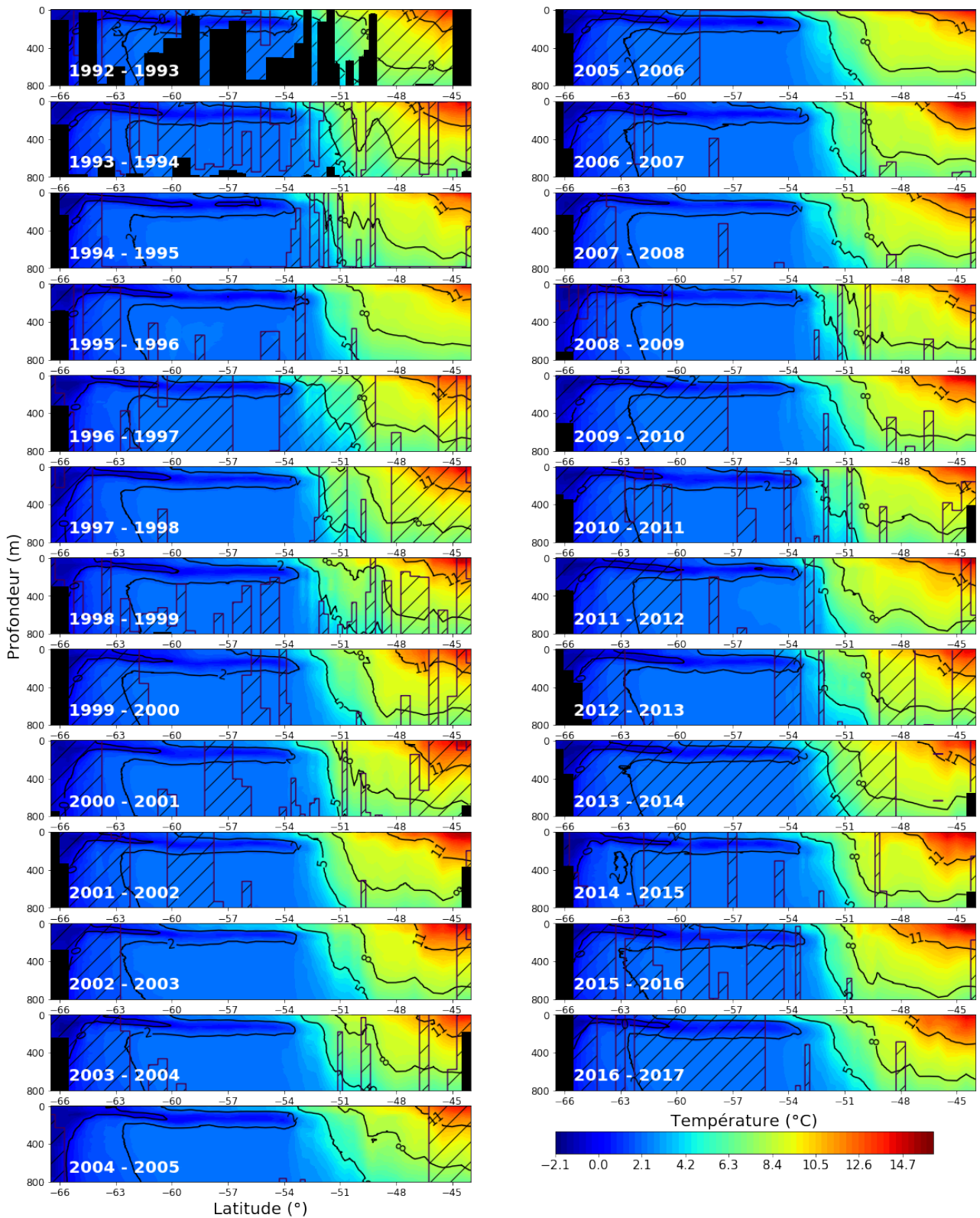


FIGURE 7 – Moyenne pour chaque année, avec une résolution de 2m en profondeur, de  $0.5^\circ$  en latitude sauf à  $49-54^\circ\text{S}$  où la résolution est de  $0.25^\circ$ . En hachuré, les points où la climatologie a été utilisée au moins deux fois sur quatre pour le calcul de la moyenne temporelle de la saison. Les contours en noir sont les isothermes à  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $8^\circ$ , et  $11^\circ\text{C}$ . Les surfaces noires sont les positions où aucun point n'a été réalisé dans toute la saison.

Un premier aperçu de la variabilité interannuelle de la zone est maintenant disponible. Les paramètres qui semblent avoir une forte variabilité sur la figure 7 sont le volume et la température de la WW, le volume des eaux subtropicales plus chaudes que 11°C et la forme des isothermes de 5 et 8°C, liées aux limites du SAF. L'analyse approfondie de la variabilité est effectuée par zone dans la partie 4.

Ce produit de moyennes NDJF est utilisé pour l'analyse de la variabilité spatiale des zones et des propriétés spatiales des masses d'eaux, telle que leur profondeur ou leur volume.

### 3.4 Produit 3 : Anomalies de Température

Pour le calcul de tendances à partir de moyennes estivales, l'introduction de la climatologie dans le produit peut induire des différences avec les tendances réelles. Pour cela, un produit d'anomalies est créé sur la grille introduite en 3.1. Il est composé de l'anomalie en température pour chaque rotation, c'est-à-dire que la climatologie du mois correspondant à la mesure de température au même point sur la grille régulière est soustraite. À partir de ce produit, des moyennes d'anomalies mensuelles et estivales peuvent être construites, et les mois pour lesquels les données sont absentes ne sont pas remplacés.

## 4 Analyse des tendances locales et de la variabilité des masses d'eaux

À partir des trois produits présentés précédemment, l'analyse de la variabilité des masses d'eaux peut être réalisée. Les techniques mathématiques et statistiques d'analyse utilisées ici (EOFs, test de Mann-Kendall, Coefficient de corrélation) sont présentées Annexe C.

### 4.1 Tendances de température

La moyenne des 25 ans de produits température estivales est tracée figure 8a., ainsi qu'une approximation de la position des masses d'eaux à l'étude et des positions des fronts. On pourra se reporter à cette figure pour avoir un aperçu visuel de la position des masses d'eaux sur les cartes analysées. La carte des tendances (figure 8b.) est calculée à partir du produit des anomalies. Pour chaque point de la grille on peut donc calculer une tendance locale. Des tests de Mann-Kendall montrent que ces tendances ponctuelles ne sont que rarement significatives. Cependant, les tendances calculées ci-après dans des zones plus larges sont significatives à plus de 95 %. Plusieurs zones se détachent de cette carte de tendance.

1. Une première zone avec un réchauffement important allant jusqu'à 0.1°C par an, entre 44°S et 53°S. C'est la zone frontale, et la zone la plus énergétique de l'ACC. C'est également la zone des SAMW et STW.
2. Une zone proche de la surface, avec une ligne de faible refroidissement aux alentours de 100m et un faible réchauffement autour. Elle se situe entre les latitudes 53°S et 62.5°S et s'étend jusqu'à 300m. C'est la zone de la WW.
3. Une zone de réchauffement faible en profondeur, également entre 53°S et 62.5°S. C'est la zone des CDW.
4. Une zone de faible refroidissement, allant tout de même ponctuellement jusqu'à 0.06°C par an. C'est la zone proche Antarctique.

L'analyse approfondie des tendances par zone est réalisée dans la suite de cette section. Les variations interannuelles de température contribuent aux tendances observées précédemment. Elles peuvent être causées par un grand nombre de phénomènes que nous avons tenté d'identifier dans cette partie.

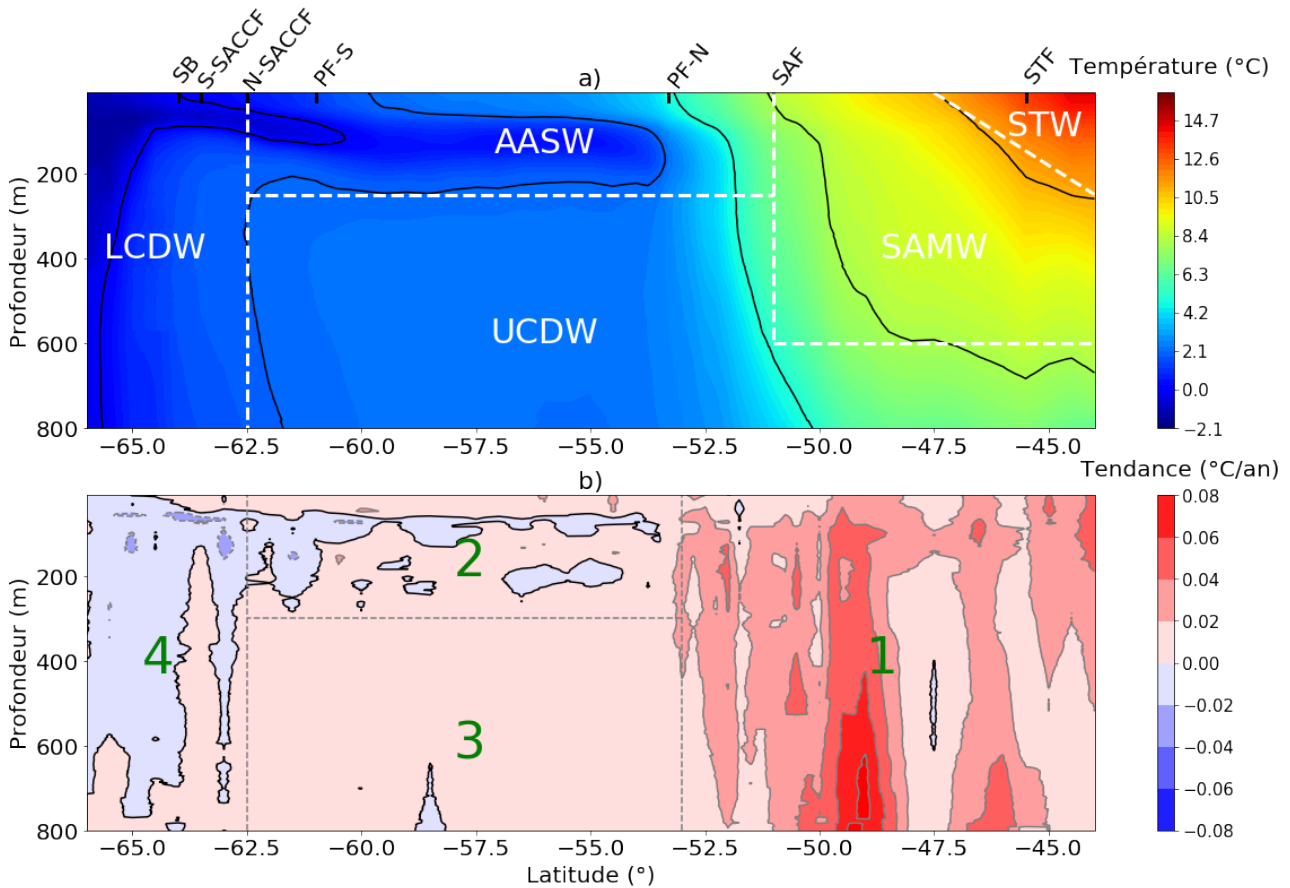


FIGURE 8 – a) Moyenne des 25 ans de moyennes estivales NDJF. Les positions simplifiées des principales masses d’eau à l’étude y sont indiquées en blanc, ainsi que la position des fronts de l’ACC. b). Carte des tendances obtenue à partir de la moyenne des anomalies en chaque point. Cette carte des tendances permet de dégager quatre zones avec des comportements différents. Elles sont numérotées de 1 à 4, ce qui correspond à leur ordre d’étude dans l’analyse.

## 4.2 Eaux Subtropicales (STW) et Eaux Modales Subantarctiques(SAMW)

La carte des tendances figure 8b. permet d’observer distinctement une zone où le réchauffement est plus important. C’est la zone la plus au nord, qui concerne donc les eaux subtropicales et subantarctiques ainsi que les fronts STF et SAF. Les eaux subtropicales sont définies par  $T_{STW} > 11^{\circ}\text{C}$ . La définition des SAMW est prise dans [Herraiz-Borreguero and Rintoul \(2010\)](#). Le critère appliqué pour l’identification des SAMW est  $T_{SAMW} \in [8, 9.5]^{\circ}\text{C}$  et  $|\frac{\nabla T}{\nabla z}| \leq 0.005^{\circ}\text{C}$ . Ces eaux sont identifiées en annexe D sur les cartes de moyennes estivales de chaque année et présentées figure D.1. Les fronts subantarctiques et subtropicaux sont également tracés à partir du critère vu en introduction pour les données *in situ*. Le volume de ces eaux varie fortement d’une année à l’autre, avec une variation sur leur profondeur mais aussi sur leur extension méridienne. De même, la position moyenne des fronts varie fortement d’un été austral à l’autre, et tous ces paramètres peuvent avoir des conséquences importantes sur l’évolution de la température de la zone.

### 4.2.1 EOFs

Pour avoir une idée plus précise de la variabilité spatio-temporelle de la température dans cette zone, une analyse en EOFs est effectuée. Les trois modes de variabilité principaux sont tracés figure 9, et représentent plus de 50% de la variance globale.

Le premier mode EOF est lié à une grande variation de la température autour de  $49.5^{\circ}$  et  $51^{\circ}\text{S}$ , avec 33% de la variance de la zone expliquée (figure 9a.). Ces latitudes sont reportées en noir sur la figure

D.1. Entre celles-ci, l'extension vers le sud des SAMW (en rose) est très variable. Ainsi, l'EOF1 montre un réchauffement important dans cette zone (anomalie spatiale positive, amplitude temporelle positive) en 1994, 1995, 2001, 2002, 2009, 2012, 2014, 2016, et la figure D.1 indique clairement le déplacement vers le sud des SAMW pendant ces années. La série temporelle associée à ce mode indique également que le minimum d'extension des eaux SAMW dans cette zone est atteint en 1997, 2003 et 2017, ce qui est également clair sur la figure D.1. Ce mouvement des SAMW vers le Nord ou le Sud capté par l'EOF1 est également bien corrélé aux mouvements du SAF positionné à partir des mesures *in situ*. Le calcul du coefficient de corrélation entre les deux séries temporelles (associées au mode 1 et la position en latitude du SAF) permet de confirmer le lien entre les deux, avec une corrélation  $r = 0.62$  qui est significative à 95%. Les déplacements de SAMW sur la région 50°S sont donc bien en phase avec les déplacements du SAF.

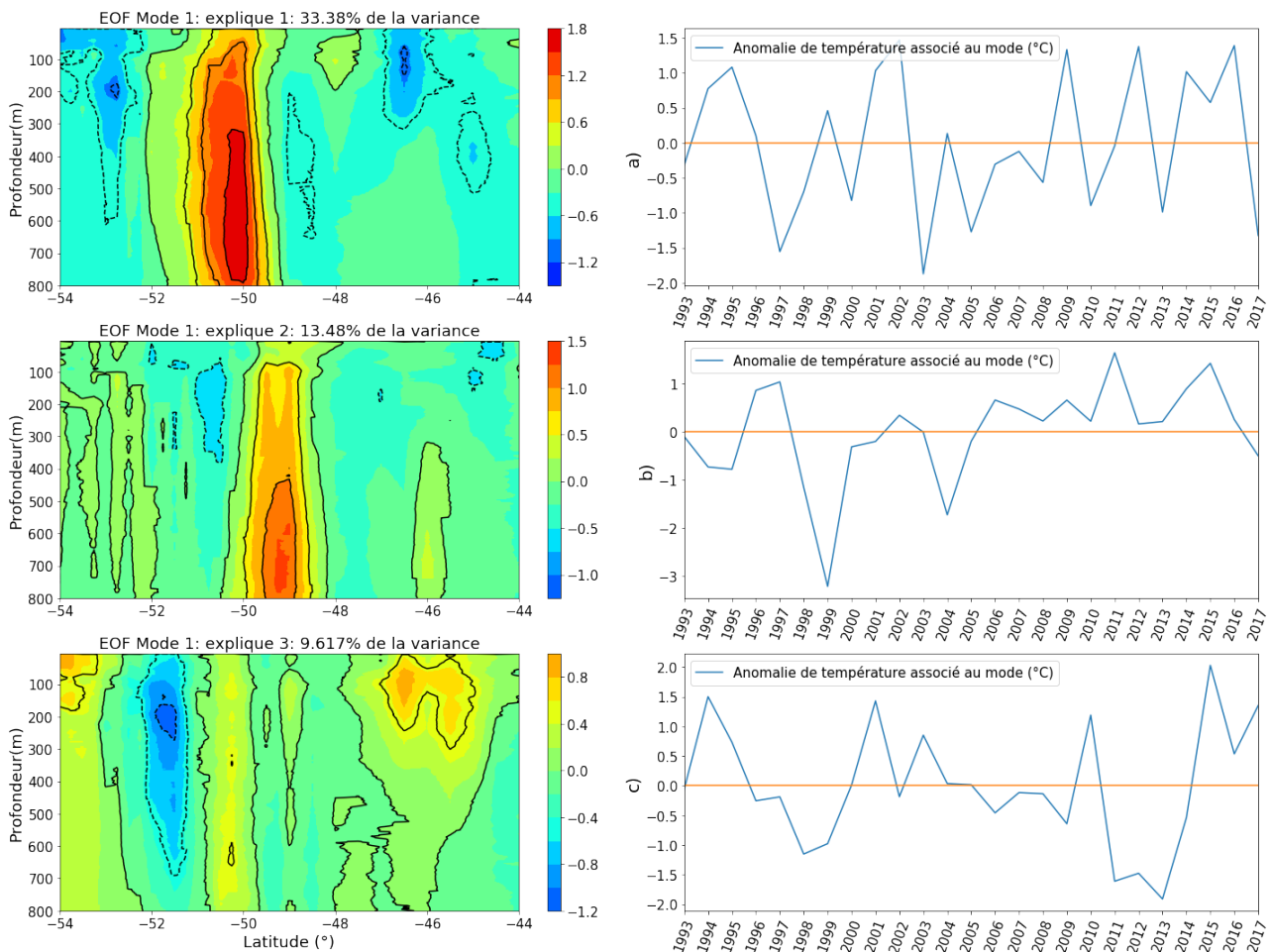


FIGURE 9 – Analyse en EOF de l'ensemble de la zone à forte variabilité. De a) à c), la distribution spatiale des modes 1 à 3 (à gauche) et la série temporelle associée (à droite).

L'amplitude du mode 2 est dominée par la saison 1998-1999 où elle atteint  $-3^{\circ}\text{C}$  (figure 9b.). En comparant avec les cartes de températures NDJF (figure D.1), nous constatons qu'en 1998-1999, l'isotherme à  $8^{\circ}\text{C}$  a subi un déplacement très important vers le Nord, ce qui s'accompagne d'une remontée de l'isotherme vers  $49^{\circ}\text{S}$ . Elle s'est ensuite replacée vers le Sud la saison suivante. Ce déplacement est accompagné d'une intrusion de l'eau froide qui est apportée jusqu'à la surface en figure D.1. Pour cette période, [Morrow et al. \(2004\)](#) ont déjà identifié la présence de tourbillons cycloniques (avec un noyau de faible température) au nord du SAF dans les sections 1994-1995. Ces tourbillons, qui sont formés par des méandres vers le nord du SAF, ont un temps de décorrélation de 90 jours

et peuvent être observés par plusieurs rotations SURVOSTRAL dans une saison. Ce mode représente 13.5% de la variance de température de la zone.

Le mode 3 semble être associé à des déplacements vers le Nord du SAF associés à une anomalie de température positive autour du STF (figure 9c.). Le mode explique 9.6% de la variance.

En résumé, ces analyses en modes EOF donnent une vision synthétique des grands changements de température dans notre zone par la mise en évidence de la forte contribution des mouvements des fronts STF et SAF, et la présence de tourbillons dans nos sections de température. Dans la prochaine section, nous allons approfondir les causes de ces variations interannuelles, en séparant spécifiquement les masses d'eaux STW et SAMW.

#### 4.2.2 Influence des STW sur la température de zone

Pour quantifier le réchauffement observé en figure 8b., nous définissons une zone géographique contenant SAMW et STW et y utilisons les anomalies moyennes de chaque mois et de chaque été austral (produit 3). La zone est définie à partir de la position la plus au Nord du SAF (suivi sur les moyennes estivales), qui limite l'extension au sud des SAMW. Les résultats sont présentés figure 10a.. Une tendance au réchauffement importante se dessine, avec un réchauffement de 0.29°C par décennie calculé à partir d'une régression linéaire et significatif à 95% d'après le test de Mann Kendall. La SST de Reynolds est également tracée sur la zone de SURVOSTRAL (figure 10b.), et moyennée entre 44.5°S et 49.5°S. Elle est très similaire à celle de l'anomalie de zone avec une tendance de 0.34°C par décennie et une corrélation  $r = 0.87$ . Cela confirme que la couche supérieure est assez homogène pendant l'été austral et que l'ensemble des 400 premiers mètres varie de la même façon dans la zone d'étude.

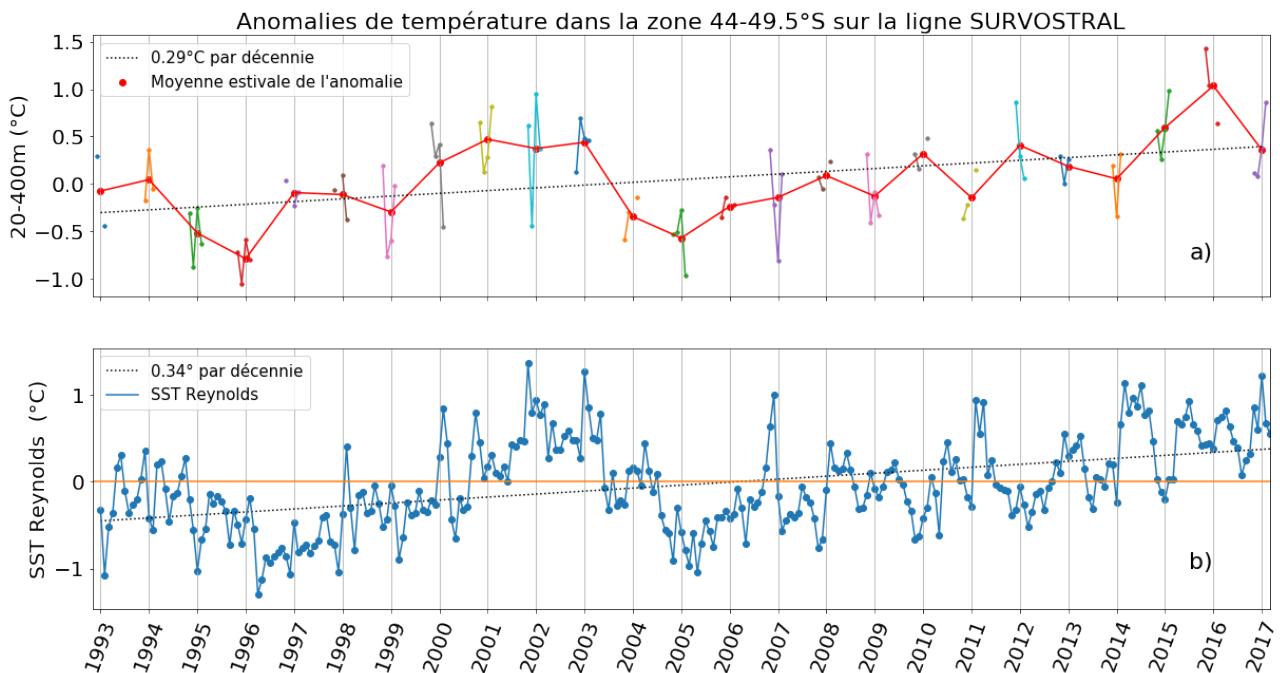


FIGURE 10 – a) Anomalies de température dans la zone 44-49.5°S, moyennées entre 20 et 400m de profondeur. Les points multicolores représentent les moyennes des anomalies sur les mois de novembre, décembre, janvier et février sur la ligne SURVOSTRAL lorsqu'ils sont disponibles. La moyenne de ces quatre mois est en rouge. En pointillés noirs, régression linéaire sur la série temporelle. b) Anomalies de température de surface de Reynolds moyenne dans la zone 44-49.5°S sur la ligne SURVOSTRAL. Une régression linéaire de cette série temporelle est faite en pointillés noirs.

Afin d'approfondir les causes des variations de la zone, la série temporelle d'anomalies de température de la zone (figure 10) a été comparée avec celles des mouvements de fronts. En effet, les

fronts induisent des gradients importants de température. Par conséquent, les mouvements des fronts pourraient expliquer la variation de température de la zone, ce qui est suggéré par notre analyse en EOF. Plus précisément, un déplacement vers le Sud d'un front dans l'océan Austral s'accompagnera d'un déplacement vers le Sud d'une eau plus chaude. À l'inverse, le déplacement vers le Nord entraînera un refroidissement de la zone. Ces anomalies sont également comparées avec d'autres paramètres de la zone. Nous nous sommes d'abord concentrés sur l'extension des STW dans cette zone, et avons donc comparé les anomalies de zone avec la position du front Subtropical et le volume des STW au sud de 44°S (figure 11a. et 11b.).

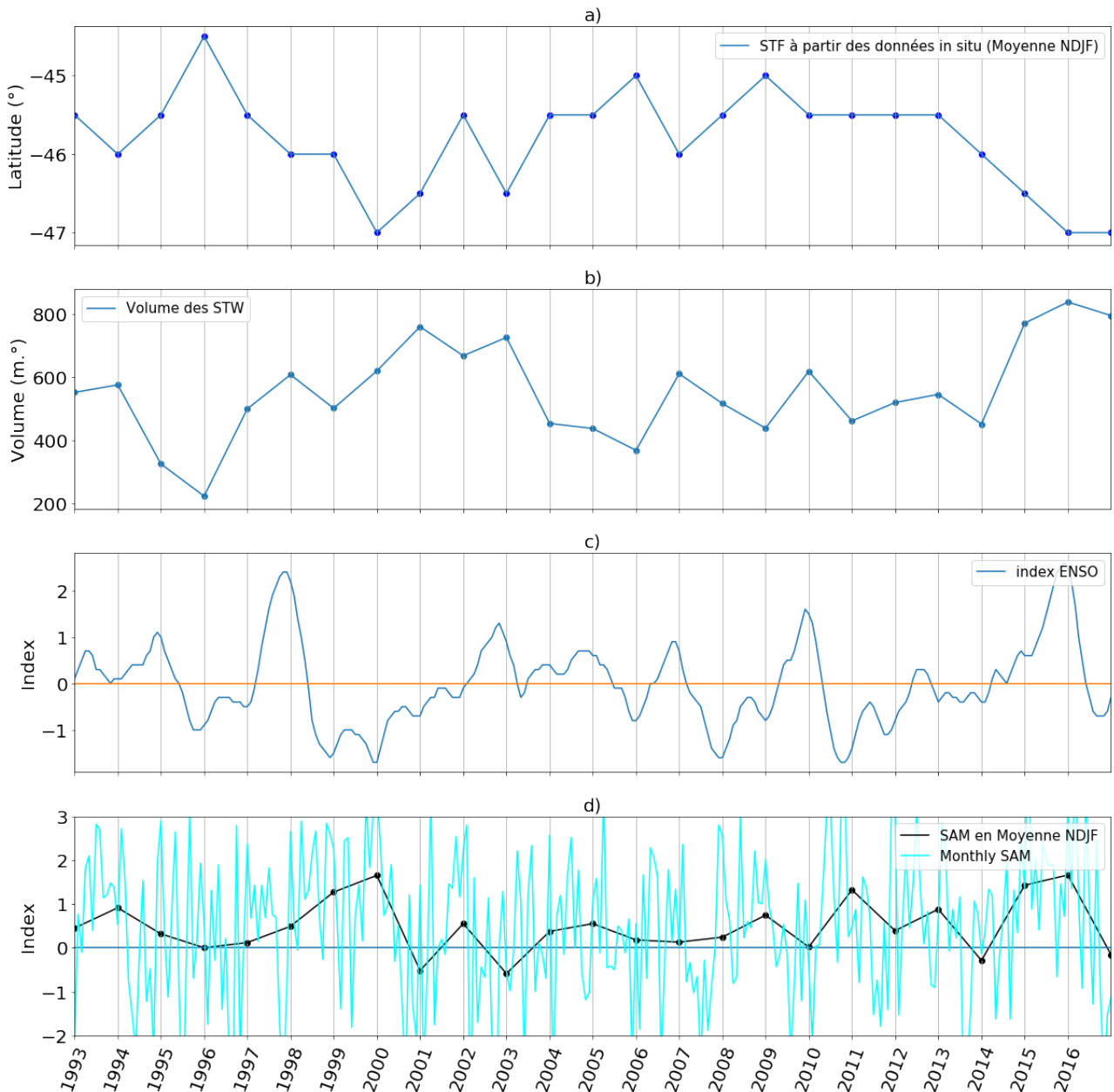


FIGURE 11 – *a)* Position méridienne du front subtropical sur la ligne SURVOSTRAL obtenue à partir du critère de la table 1 sur les moyennes estivales NDJF. *b)* Volume des eaux subtropicales dans la zone 44-49.5°S. Le terme "volume" est un abus de langage, en réalité il est calculé comme une profondeur multipliée par des degrés en latitude. *c)* Indice ENSO mensuel. *d)* Indice SAM mensuel (bleu clair) et moyenné sur NDJF (noir)

Par définition, la latitude du front subtropical est une bonne indication du volume des STW, avec une corrélation  $r = -0.83$ . Ce lien est directement visible sur les cartes de la figure D.1. Un

déplacement vers le Nord du STF entraîne un volume des STW moins important dans la zone. Par exemple, en 1996, le front subtropical est particulièrement avancé vers le Nord (figure 11a.). Cela entraîne un volume des eaux subtropicales très petit (figure 11a.).

Le volume des STW (figure 11a.) est une contribution majeure à la variation d'anomalies de température de la zone géographique fixe (figure 10), avec une corrélation  $r = 0.88$ . Plus le volume de STW dans la zone augmente, plus l'anomalie de température estivale est importante. En effet les STW amènent des eaux très chaudes qui impactent considérablement la moyenne de température de la zone. En reprenant l'exemple de 1996, le petit volume de STW induit une anomalie de température de la zone fortement négative. De la même façon, il est possible de faire un lien direct entre les maxima locaux de position du STF, du volume de STW et d'anomalies de température de la zone pour les années 1994, 1996, 2009, 2014, 2015 et 2016. Ceux-ci sont également cohérents avec le mode 3 des EOFs de la zone (figure 9) et les variations de température juste sous la surface entre 45°S et 47°S. L'anomalie positive de ce mode EOF est associée déplacement du STF, qui influe sur le volume des STW. Elle se retrouve également dans la série temporelle des anomalies de la zone. A travers sa variabilité fortement liée au volume des STW, c'est donc l'EOF3 qui décrit le mieux la série temporelle des anomalies de la zone (figure 10).

Le STF est la limite sud de la gyre subtropicale, et son mouvement à 140°E peut être lié aux forçages grande échelle ENSO et SAM (figures 11c. et 11d.). La position du STF est impactée par le SAM pour les années 1993 à 2000 et 2004 à 2016 ( $r = 0.56$ ). Le SAM impacte donc également le volume des STW ( $r = -0.64$ ) pour ces 21 années, ce qui est significatif à plus de 98%. Pour ces années, l'action du SAM présentée partie 1.3.1 est retrouvée, avec pour un SAM positif une contraction des vents vers l'Antarctique qui pousse le front subtropical vers le Sud, et donc permet à un volume plus grand de STW d'atteindre la zone. Pour expliquer les années où ce lien n'est pas effectif, entre 2000 et 2004 et après 2016, une comparaison avec l'indice ENSO peut apporter quelques pistes.

Les mouvements les plus au sud du STF se passent en 2000 et 2016-2017. Ces années 2000 et 2016 correspondent à un SAM très positif (figure 11d.), mais sont aussi impactées par les grands événements El Niño ou La Niña. En 2000, c'est une période la Niña forte, qui amène des eaux très chaudes vers le Pacifique Ouest tropical, avec un impact sur la chaleur apportée par l'EAC et son extension au sud de la Tasmanie (1.3.2). Les deux phénomènes combinés, la Niña et un SAM positif, contribuent à un grand réchauffement dans notre zone (figure 11b. et 10) entre 2000 et 2003. Ce réchauffement a été discuté par Morrow et al. (2008) et Sallée et al. (2007). La seconde période, à partir de 2016, correspond à un SAM positif mais lié à un phénomène El Niño. En 2017, l'indice SAM est neutre et il y a un léger phénomène la Niña. Le réchauffement dans notre zone n'est donc pas une réponse simple aux modes SAM et ENSO.

### 4.2.3 SAMW et détection de tourbillons

Nous avons vu dans l'analyse des EOFs que le mouvement du SAF a un fort impact sur l'évolution de la température sur des latitudes fixes. Dans cette section, nous allons étudier la façon qu'ont les SAMW d'évoluer, dans un volume variable, entre les SAF et STF.

L'évolution de la température moyenne des SAMW identifiés figure D.1 en rose avec le critère de température défini en 4.2 est tracée figure 12. Trois périodes se dégagent de cette série temporelle. Dans un premier temps, de 1993 à 1999, la variation de température est faible et reste autour de 8.65°C. Dans un second temps, de 1999 à 2007 une période de "battements" peut être observée, avec une variation de température allant jusqu'à 0.3°C d'une année à l'autre. Enfin, de 2007 à 2017, une tendance au réchauffement des SAMW est visible, d'environ 0.12°C sur la décennie. Les SAMW se trouvent par définition entre les fronts SAF et STF, et la température moyenne des SAMW ne semble pas liée aux mouvements de ces fronts ( $r = 0.05$ , très faible et non significatif). Pour le front subtropical, le coefficient de corrélation donne  $r = -0.30$ , ce qui n'est significatif qu'à 85% pour 25 ans de données.

La tendance au réchauffement observée les dix dernières années sur les SAMW est en phase avec le mouvement vers le sud du STF depuis 2009. Cependant, cette fois-ci, le STF ne peut pas influencer directement sur la température comme pour le calcul de la température moyenne de la zone, car seules les eaux identifiées comme SAMW sont incluses dans le calcul de la figure 12. Un mouvement du STF aura par contre tendance à diminuer le volume des SAMW ( $r = 0.34$ , significatif à 95%). Enfin d'après la figure 7, la distribution des données est assez bonne, il n'y a donc pas de problème d'échantillonnage majeur. La question qui se pose est donc de savoir si c'est la présence de tourbillons dans la zone qui impacte ces variations de température des SAMW surtout dans la période 1999-2007.

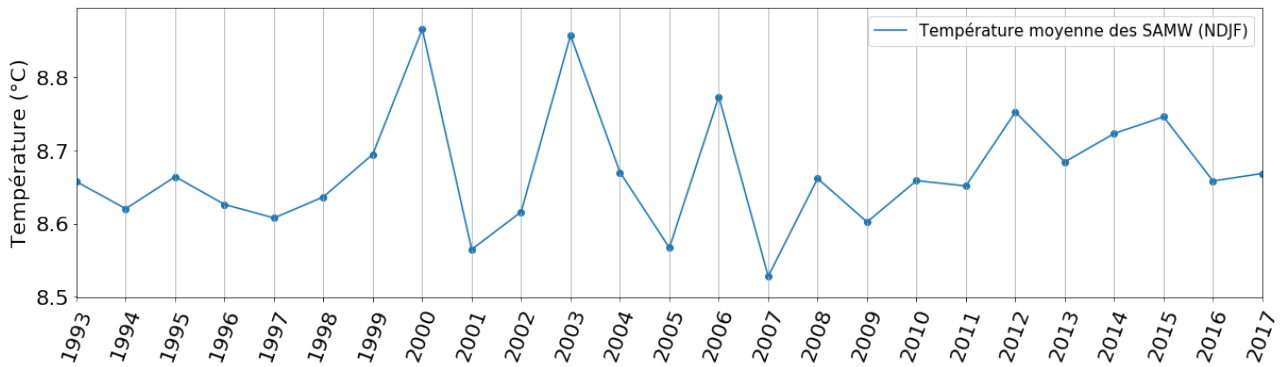


FIGURE 12 – Evolution temporelle de la température moyenne estivale des SAMW entre 1993 et 2017.

D'après [Herraiz-Borreguero and Rintoul \(2010\)](#) et [Pilo et al. \(2015\)](#), les SAMW sous la Tasmanie sont particulièrement influencées par la rétroflexion du Courant Est Australien (EAC). En effet, comme expliqué partie 1.4, la gyre de l'EAC peut parfois se prolonger le long des côtes australiennes plus au Sud, et donner lieu à une activité méso-échelle importante au Sud-Est de celles-ci. Certains de ces tourbillons poursuivent leur route en passant sous la Tasmanie, tout en apportant des eaux chaudes dans la zone. De la même façon, le front subantarctique est un front à activité méso-échelle importante. Les tourbillons qui se détachent de ses méandres peuvent apporter de l'eau froide du Sud aux SAMW qu'ils traversent ([Morrow et al. \(2004\)](#)), comme suggéré par les fortes anomalies en EOF2 (figure 9b.).

Afin d'identifier le parcours des SAMW, un programme de trajectoires lagrangiennes est utilisé pour l'étude et la quantification d'un apport d'eau potentiel au nord du STF ou au sud du SAF. Ce programme est basé sur l'article de [Morrow and Kestenare \(2014\)](#). Il permet de retracer dans le temps le parcours d'une particule d'eau en surface grâce aux courants géostrophiques et à partir d'une date donnée pendant une période précise. Dans le but de quantifier la variabilité de l'extension de l'EAC, ainsi que les tourbillons d'eaux froides du SAF, le programme est lancé au premier jour de chaque mois de 1995 à 2017, retraçant la provenance de 41 particules d'eaux sur la ligne SURVOSTRAL entre 46.5 et 51°S tous les 0.1° de latitude (zone des SAMW identifiée figure D.1), jusqu'à leur position six mois avant.

Cependant, la limites de cette méthode est à prendre en compte, car elle utilise des courants en surface uniquement. Or, comme vu figure 10, les anomalies de température sont cohérentes en surface et jusqu'à 400m. Nous pouvons donc nous attendre à ce que l'apport des SAMW ne se fasse pas qu'en surface mais bien sur toute la couche des SAMW à travers les tourbillons. De plus, la forme tourbillonnaire des apports d'eaux de l'EAC est souvent très marquée et ne concerne donc pas que les courants de surface.

Pour chaque année les origines des particules d'eau retrouvées sur la ligne SURVOSTRAL au premier jour de novembre, décembre, janvier et février sont utilisés. Ainsi, le nombre de mois pour chaque été austral comprenant des particules provenant de l'extension de l'EAC est calculé. L'EAC est



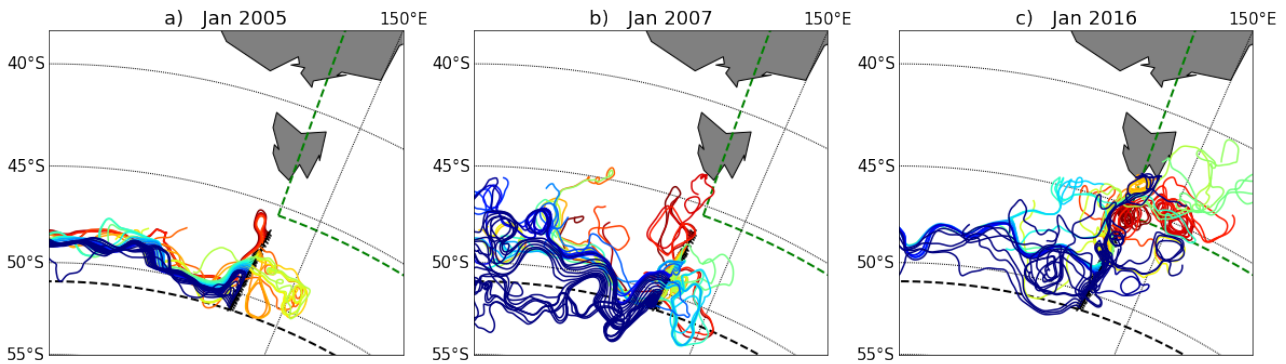


FIGURE 13 – Trajectoires des particules amenant à la ligne SURVOSTRAL au premier janvier des années 2005 (a), 2007 (b), et 2016 (c). Leur trajectoire est calculée jusqu'à atteindre leur position 6 mois avant, c'est à dire en juin de l'année précédente. Les pointillés verts représentent la zone dans laquelle nous considérons qu'il y a un apport d'eaux de l'EAC. Les pointillés noirs est la zone dans laquelle les particules retracées sont considérées comme provenant du sud du SAF.

considérée comme ayant eu de l'influence sur la SAMW d'un mois si, au premier janvier de ce mois, au moins l'une des 41 particules d'eau entre 46.5°S et 50.5°S sur la ligne SURVOSTRAL que l'on cherche à retracer provient du Nord Est de la zone, c'est à dire au Nord de 45.5 °S et à l'Est de 147°E (pointillés verts sur la figure 13). La technique pour quantifier l'apport d'eau venant du sud du SAF est très similaire. Le nombre de mois pour lesquels on retrouve un apport d'eau au sud de 51°S est compté (pointillés noirs sur la figure 13). 51°S correspond approximativement à la position moyenne du SAF à 140°E (51.06°S à partir des données *in situ*). La figure 13 montre trois cas possibles. En 13a., il n'y a d'apports d'eaux ni du Nord ni du Sud. En 13b., il y a un apport du sud du SAF, et en 13c. il y a un apport d'eaux chaudes de l'EAC.

Le nombre de mois avec influence de l'extension de l'EAC entre 1995 et 2016 est tracé figure 14 en rouge, et le nombre de mois avec apport des eaux au sud du SAF sur la même figure en bleu. La température des SAMW (en gris) semble liée à l'apport d'eaux chaudes de l'EAC ( $r = 0.40$ , significatif à 95%). Si on regarde directement les séries temporelles, l'augmentation de la température de 1997 à 2000 pourrait être due à un important "arrivage" d'eaux de l'EAC dans la zone. De même les faibles températures de 2005 et 2007 semblent être liées à l'absence d'apport de ces eaux du Nord.

Une vision globale des séries temporelles permet de vérifier qu'un SAM positif (figure 11d.) est lié à un déplacement des vents vers le Sud et une plus grande intrusion des eaux de l'EAC dans la zone, alors que des valeurs négatives du SAM semblent indiquer une extension de l'EAC moins importante dans la zone. Cela permet de retrouver l'une des conclusions de [Herraiz-Borreguero and Rintoul \(2010\)](#) : une tendance du SAM vers un indice plus grand (et positif) est observée depuis ces 30 dernières années, et un SAM positif entraîne des vents circumpolaires plus forts sur l'océan Austral, avec une augmentation de l'activité méso-échelle et une plus grande intensité de la pénétration vers le Sud du Courant Est Australien. Plus précisément, les années pour lesquelles le lien semble le plus direct sont les années 1999, 2000, 2009, 2014, 2015 et 2016.

En ce qui concerne les eaux froides du sud du SAF (en bleu sur la figure 14), nous pouvons émettre l'hypothèse que la faible température du noyau des SAMW en 2007 est due non seulement à un non apport d'eaux chaudes de l'extension de l'EAC, comme vu précédemment, mais aussi à un apport sur plusieurs mois des eaux au sud de 51°S. Des maxima locaux de la température des SAMW coïncidant avec des minima d'apport d'eaux froides (1995, 2006, 2008, 2010, et 2014-2015) peuvent également être observés.

L'analyse EOF (figure 9) montre qu'une grande partie du changement de température dans

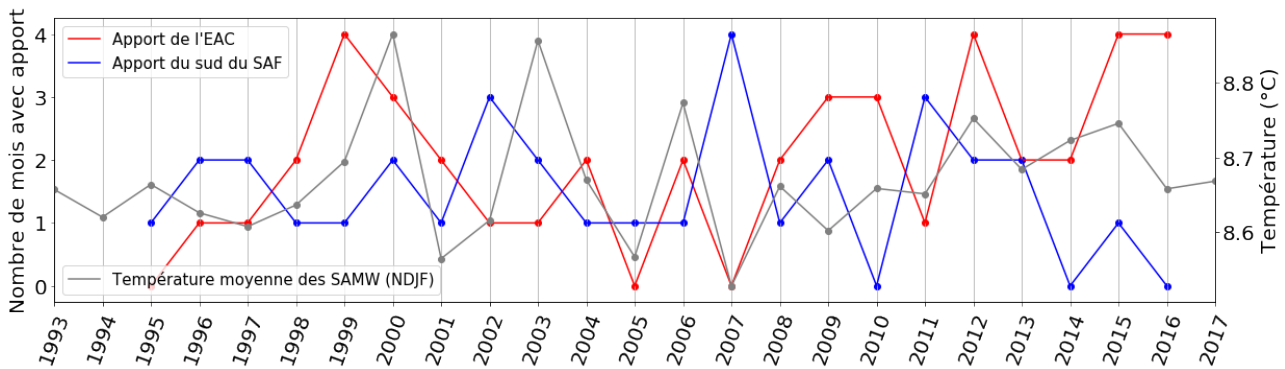


FIGURE 14 – Nombre de mois parmi novembre, décembre, janvier et février avec apport d’eaux chaudes de l’EAC (en rouge) et d’eaux froides du sud du SAF (en bleu). En gris, température des SAMW.

notre zone est liée aux mouvements du SAF et du STF. Au nord du SAF, les variations des SAMW et STW sont corrélées avec SAM. Le SAM semble être la principale cause des variations de température de la zone des STW et SAMW à 140°E par son influence sur la position du STF et donc sur le volume des STW. Or les eaux subtropicales sont très chaudes, et impactent fortement la température moyenne de la zone. Leur impact est notamment visible sur le mode 3 des EOFs de la zone. Le SAM est également lié à la température des SAMW à travers son impact sur l’apport d’eaux chaudes du Nord par les tourbillons de la rétroflexion de l’EAC. Un SAM positif a tendance à entraîner un apport plus important de ces eaux et donc une température des SAMW plus importante. Les autres causes de variations de la zone peuvent être de différents ordres, avec l’impact d’ENSO, l’autre mode climatique important pour la température de la zone, ou encore le mouvement du SAF et les tourbillons et méandres associés, qui apportent de l’eau froide dans la zone.

### 4.3 Eaux Antarctiques de Surface (AASW)

#### 4.3.1 Couche supérieure des AASW

Au sud du PF, dans les 300 premiers mètres sous la surface, on retrouve la couche des AASW. Comme expliqué en section 1.2.3, les WW sont la couche inférieure des AASW en été. Elles se forment en hiver par le mélange entraîné par le refroidissement de la couche de mélange. En été, une couche superficielle plus chaude se forme entre celles-ci et la surface. Elle se retrouve entre 54°S et 60°S et de la surface jusqu’à 75m de janvier à mars. Des anomalies de température sont tracées chaque saison pour la zone ainsi que les mois correspondants. La série temporelle montre une tendance au réchauffement de 0.04°C par décennie. Cependant, cette tendance n’est pas significative. De plus, cette couche de surface dépend directement des forçages atmosphériques et n’a pas d’impact fort sur le reste du bassin. Nous nous sommes donc concentrés sur l’autre partie des AASW, les WW.

#### 4.3.2 WW

La figure 8 montre des zones de refroidissement et de réchauffement de la zone 1, entre 54.5°S et 61.5°S et dans les 300 premiers mètres sous la surface. Ce genre de refroidissement pourrait indiquer une remontée de la langue de WW, qui aurait pour conséquence d’apporter des eaux froides plus en surface et donc de créer les tendances observables. De plus, certaines études (telles que Morrow et al. (2008)) ont émis l’hypothèse de cette remontée et d’un affinement de la couche de WW entre 1990 et 2005. Pour vérifier si cette tendance est continue sur 25 ans, les profondeurs du haut et du bas de la WW ont été tracées figure 15, respectivement en bleu et en noir. Ces évolutions sont calculées à partir des moyennes NDJF. Elles représentent les profondeurs minimales et maximales de l’isotherme à 2°C sur la ligne SURVOSTRAL moyennées entre 54.5 et 61.5°S. Les tendances, en pointillés, montrent bien que les profondeurs restent assez stables sur les 25 ans de données. Il y a des variations mais elles restent faibles. Cependant, en ne conservant que les données entre 1994 et 2015, il est possible d’obtenir une tendance à la remontée du bas de cette WW de 11m par décennie, significative à 95%. En effet la

saison 1992-1993 est très pauvre en données de WW (figure 7). D'autres saisons telles que 1993-1994, 1996-1997, 2012-2013, 2015-2016 ou encore 2016-2017 sont assez pauvres en données dans le secteur de la WW. Il est donc difficile avec les mesures que nous avons de déterminer si cette tendance est réelle ou artificielle. Dans tous les cas, la tendance très importante à l'affinement et à la remontée des WW est bien plus faible que dans Morrow et al. (2008), ou même inexistante. L'affinement et la remontée des WW en 2000-2004 par rapport au début des séries (1992-1996) reporté par Morrow et al. (2008) est surtout lié à la combinaison exceptionnelle d'un SAM positif et de la Niña en 2000, et ce n'est pas une tendance qui est continue. Mis à part cet évènement, ces eaux WW restent relativement stables.

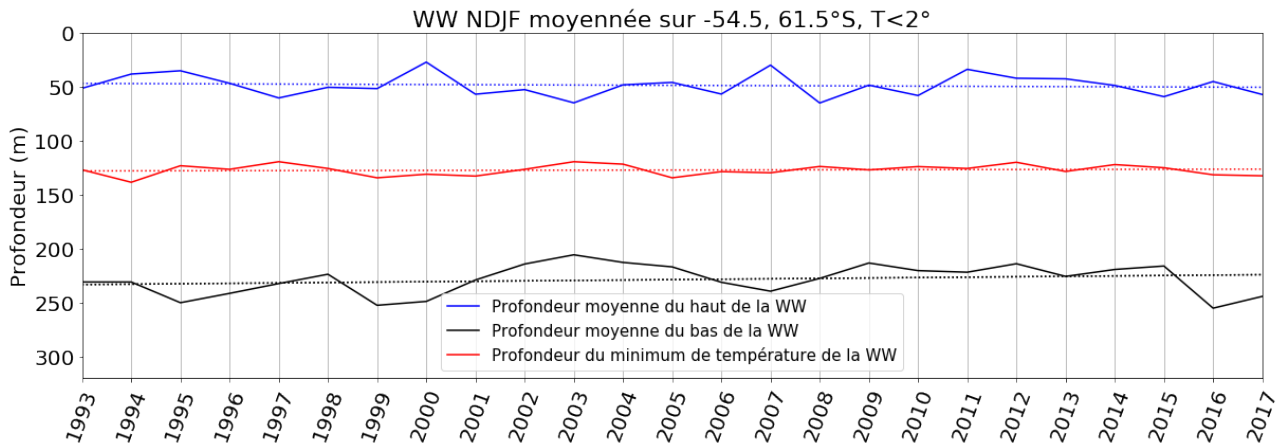


FIGURE 15 – Profondeur minimale (bleu) et maximale (noir) de la WW en moyenne sur la zone 54.5°-61.5°S, identifiée comme la masse d'eau avec  $T < 2^{\circ}\text{C}$  sur le produit de moyenne NDJF. En rouge, profondeur du minimum de température de la WW. En pointillet, les régressions linéaires de ces profondeurs.

Si la profondeur et l'épaisseur de la couche de WW sont plutôt stables, avec une variation de 10-20% de sa profondeur maximale autour de 225m (figure 15), sa température moyenne montre plus de variabilité, avec jusqu'à 25% de sa moyenne (figure 16). Afin d'établir l'origine de ces variations, nous avons cherché la provenance de ces eaux. En effet les WW sont portées et brassées par le courant circumpolaire. Si on observe les WW autour de 50-250m dans notre zone en été, leur point de départ est à l'Ouest dans la couche de mélange d'hiver.

Pour trouver cette origine, l'approximation *courant de surface altimétrique = courant subsurface* est une fois de plus utilisée, en assumant que la structure des courants est relativement homogène dans la couche superficielle. À partir du programme de trajectoires lagrangiennes vu précédemment, la zone de provenance de la WW lors de l'hiver précédent a été évaluée. Pour cela, des statistiques ont été faites en reconstruisant la trajectoire des particules arrivant dans la zone des WW (54.5 - 61.5°S) au premier jour des mois de novembre, décembre, janvier, février entre les années 1995 et 2003. Nous nous sommes rendu compte que 90% des origines des particules d'eaux de la WW se trouvent dans la tranche de latitude 57-61°S et entre 119°E et 146°E l'hiver précédent. Cette zone sera appelée ultérieurement la *zone en amont*. Les différentes propriétés de cette zone d'origine en hiver (MJJA) ont été calculées et comparées aux propriétés des WW sur la ligne SURVOSTRAL. La température moyenne *in situ* des WW ainsi que la SST de Reynolds moyenne de la zone en amont sont tracées respectivement en figures 16a. et 16b. en bleu. Ces courbes sont similaires, avec un coefficient de corrélation  $r = 0.53$ . Plus précisément, les pics de température des WW les plus importants en 1997-1998, 2003 ou 2008 se retrouvent dans la variation de SST de l'hiver précédent en amont de la ligne SURVOSTRAL. En 2012, la baisse de température dans la WW se retrouve initialement dans la SST.

Nous pouvons donc confirmer que la variation de température de la WW est en grande partie due à la variation de température de la couche de mélange lors de la formation de la WW pendant l'hiver austral. Cependant, en amont, les AASW en hiver sont sujettes à beaucoup d'interactions qui

peuvent modifier leur température. Lovenduski and Gruber (2005) montrent qu'un SAM positif ayant tendance à augmenter l'intensité du vent d'ouest autour de l'Antarctique, cela entraîne un transport d'Ekman plus important vers le Nord. Des anomalies de température négatives sont alors créées, qui impactent la couche de surface. Nous avons vérifié l'impact du SAM sur la couche de surface en amont en moyennant l'indice sur les mois MJJA (non montré ici). En le comparant avec la figure 16b., il ressort que les tendances négatives de 1997-1999, 2002-2006 et 2007-2016 sont toutes associées à une série de SAM positifs et faiblement négatifs. Au contraire, les augmentations de température de 1993-1994, 2000-2001 et 2006-2007 sont associées à des passages du SAM d'un index positif à un index négatif. Le SAM, à travers son influence sur le transport d'Ekman, modifie la température de surface en hiver. Ces anomalies se retrouvent ensuite pendant l'été austral sur nos mesures SURVOSTRAL. À travers la modification de la couche de mélange en hiver, le SAM a une influence importante sur la variation de température de la WW observée en été.

Nous avons également recherché des explications à la variation de profondeur du bas de la WW. Pour cela, nous avons calculé à partir la couche de mélange à partir du produit ISAS entre 2005 et 2015 (il y a très peu de données avant 2005). La profondeur de la couche de mélange (MLD, *Mixed Layer Depth*) d'hiver est basée sur le critère de densité  $\sigma_{MLD} < \sigma_{10m} + 0.5 kg.m^{-3}$  en amont de la WW. La température de la couche de mélange (figure 16b., en gris) montre des variations très similaires à celles de la SST et donc est également lié à la température de la WW observée par les mesures SURVOSTRAL. Nous n'avons pas trouvé de telles similitudes avec la salinité, ni-même la densité. Nous avons également cherché si une modification de la tension de vent pouvait expliquer les variations de la profondeur de la WW, sans résultats concluants. Nous n'avons pas poursuivi ces analyses. Une comparaison avec l'anomalie de SST de la zone filtrée sur 2 ans a également été réalisée, afin d'identifier le lien avec l'ACW. Cependant, les résultats semblent douteux et ne sont pas présentés ici.

En conclusion, la température de la couche de WW  $< 2^{\circ}C$  montre des variations interannuelles importantes, bien corrélées avec les variations de SST en hiver en amont de notre ligne de mesure, elles-mêmes fortement liées au SAM. La profondeur maximale de la couche a diminué de 11m par décennie pendant la période 1993-2015, mais le grand changement en 2000-2004 reste un événement exceptionnel.

#### 4.4 Couche supérieure des Eaux Profondes Circumpolaires (UCDW)

Les sondes XBT atteignent jusqu'à 800-900m de profondeur. Il est donc possible de vérifier la variation de température de la couche supérieure des CDW (UCDW) entre  $54^{\circ}S$  et  $62.5^{\circ}S$ . En observant la figure 8, la zone des CDW (zone 3) est une zone où un léger réchauffement se produit. Cependant celui-ci est très faible en comparaison avec celui de la zone plus au nord. Dans le but d'avoir une idée plus précise de cette tendance, la moyenne des anomalies a été calculée dans la zone de réchauffement. Afin de ne pas contenir l'influence de la WW, la profondeur minimale choisie pour la zone est de 300m. Pour la limite basse de la zone, nous avons choisi 600m afin d'avoir une couche assez grande mais tout en maximisant la densité de données de la zone. En effet, malgré le nombre de profils réalisés, beaucoup cassent avant d'atteindre 800m. Pour ce qui est de l'extension méridienne de la zone, la zone sous la WW a été choisie, à savoir entre  $54^{\circ}S$  et  $62.5^{\circ}S$ . Les résultats de ce calcul d'anomalie sont tracés figure 17. Une tendance de  $0.05^{\circ}C$  par décennie est obtenue, ce qui reste extrêmement faible par rapport aux autres zones d'étude. Cependant, cette tendance est tout de même significative à plus de 95% avec le test de Mann Kendall. Il est difficile d'établir l'origine de cette tendance car les CDW proviennent majoritairement des eaux Nord Atlantique, brassées ensuite autour du courant circumpolaire.

Une tendance de cet ordre avait déjà été observée par Aoki et al. (2013). Si cette étude ne concerne pas exactement la même zone (il trace la température entre  $63^{\circ}S$  à  $65^{\circ}S$  pour les UCDW), elle conserve la même masse d'eau. Or, à cause de leur grande profondeur et de leur volume très important, les UCDW sont particulièrement homogènes et varient de la même façon jusqu'à la divergence An-

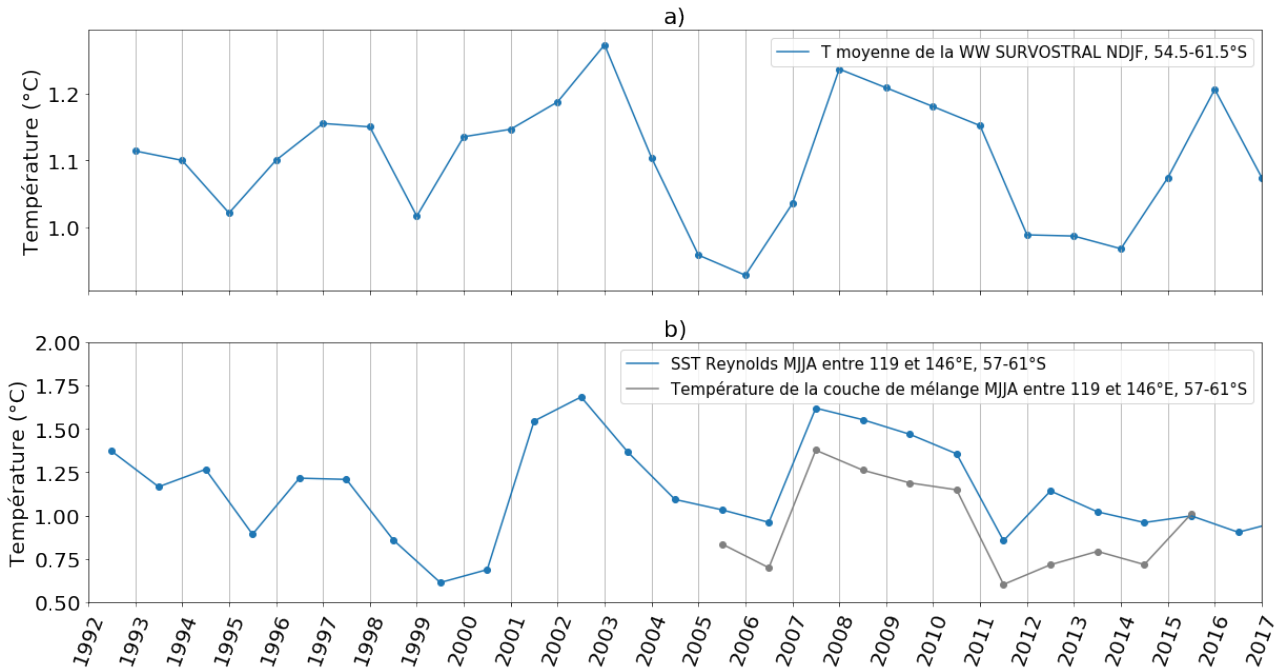


FIGURE 16 – a) Evolution de la température moyenne de la WW entre 54.5°S et 61.5°S, à partir du produit de moyennes NDJF. La WW est définie comme  $T < 2$  °C. b) En bleu, SST Reynolds sur la zone en amont de la WW, dans la zone 119-146°E, 57-61°S, moyennée entre mai et août (MJJA). En gris, la température de la couche de mélange moyenne pour la même zone en MJJA.

tarctique, où elles remontent à la surface. Les variations et tendances observées sont donc les mêmes. La tendance trouvée par Aoki et al. (2013) était de 0.06°C par décennie, ce qui est du même ordre de grandeur que celle obtenue dans notre étude. Or, cette étude n'avait que 9 moyennes sur la zone pour ses calculs, et avait donc jugé la tendance trouvée comme trop faible pour être significative. Dans notre cas les 25 ans de données permettent de confirmer qu'il y a bien une tendance observable sur cette série d'anomalies.

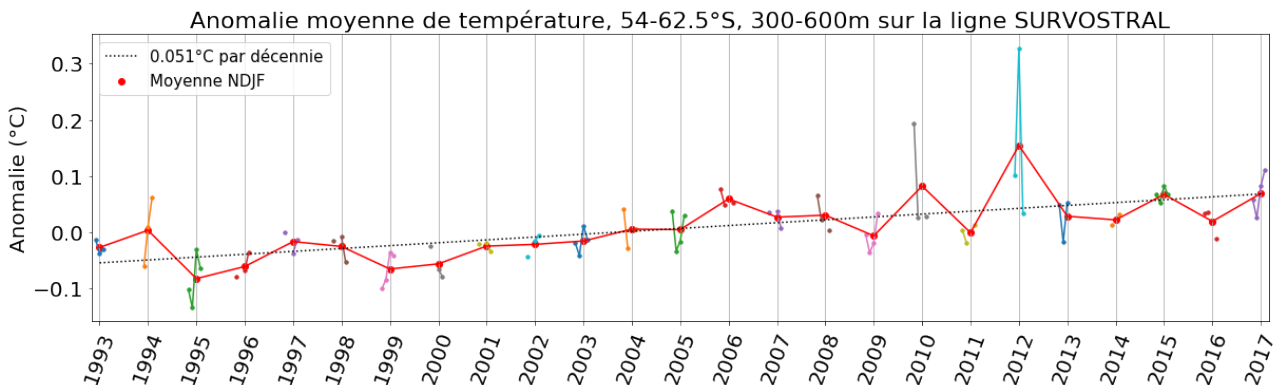


FIGURE 17 – Anomalies de température dans la zone 54-62.5°S, moyennées entre 300 et 600m de profondeur. Les points multicolores représentent les moyennes des anomalies sur les mois de novembre, décembre, janvier et février sur la ligne SURVOSTRAL lorsqu'ils sont disponibles. La moyenne de ces quatre mois est en rouge. En pointillés noirs, régression linéaire sur la série temporelle.

Une autre manière d'étudier les variations des UCDW est de regarder le maximum de température sous la WW. Sa température et profondeur, calculées à partir des cartes de moyennes estivales, sont présentées figure 18.

Deux tendances claires se détachent de cette figure. La première est la tendance de tempéra-

ture (figure 18, en rouge). Elle est de  $0.026^{\circ}\text{C}$  par décennie, et est du même ordre que celle de l'anomalie de température de la zone. La différence peut être due à l'atténuation des anomalies sur les moyennes estivales NDJF introduite par la climatologie. Cela permet tout de même de confirmer que les UCDW sont bien homogènes et varient en même temps en fonction des variations à la source de la masse d'eau. La seconde est la tendance au niveau de la profondeur de ce maximum (figure 18, en bleu). En effet si une tendance de 11m par décennie a été observée pour la WW en figure 15, elle est plus importante dans le cas de la remontée du maximum de température, avec environ 17m par décennie. Cette tendance est inférieure à celle trouvée par Schmidtko et al. (2014), qui obtient une tendance moyenne tout autour de l'Antarctique d'environ 30m par décennie. Dans certaines zones telles que les mers de Bellingshausen ( $70^{\circ}\text{W}$ ) et Adundsen ( $110^{\circ}\text{W}$ ), la remontée de ce maximum de température atteint 50m par décennie (cette étude est réalisée avec des données Argo et dispose donc d'une série temporelle moins longue que la nôtre).

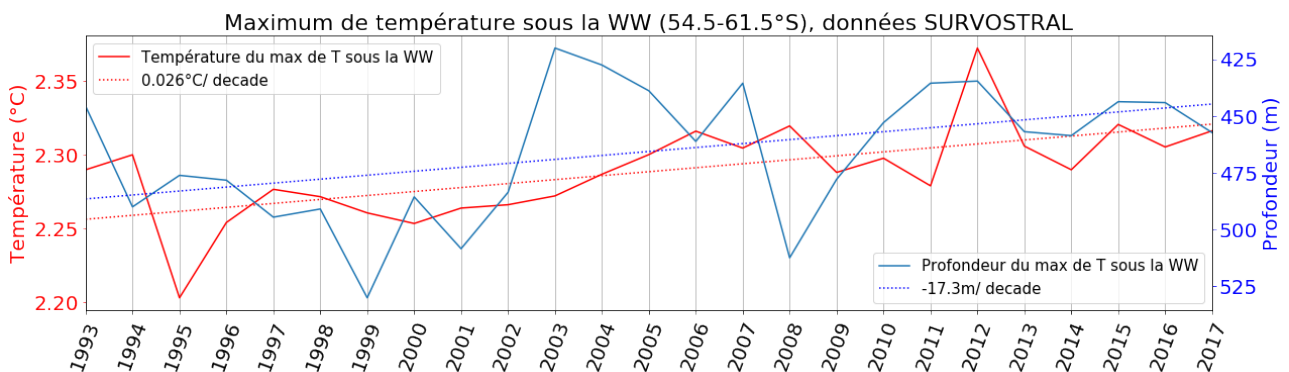


FIGURE 18 – Evolution de la température (rouge) et de la profondeur (bleu) du maximum de température sous la WW, à partir des moyennes estivales NDJF. Les tendances des deux séries temporelles sont tracées en pointillés.

Malgré la variabilité temporelle des séries temporelles figure 18, leur tendance est significative à 95% avec le test de Mann Kendall. Or, le réchauffement du maximum de température et sa remontée vers la surface peut avoir des conséquences importantes. En effet, ces tendances induisent un transport de chaleur plus important. D'après Aoki et al. (2013), l'augmentation de température et de salinité accompagnée d'une baisse d'oxygène dissous indique une intensification de l'upwelling des UCDW liée à un SAM positif et une tension de vent plus forte. Si ce phénomène persiste, la WW, qui sert de barrière entre les CDW et les glaces de mer pourrait se réchauffer ou devenir plus fine, ce qui pourrait entraîner une fonte de la glace de mer importante qui impacterait l'ensemble de l'océan Austral.

#### 4.5 Proche de l'Antarctique

Finalement, nous avons fait une étude préliminaire sur l'évolution de la température au plus proche de l'Antarctique, dans la zone la plus au Sud (zone 4 sur la figure 8), entre  $64$  et  $66.5^{\circ}\text{S}$ , sur la pente du plateau continental. Sur la figure 8, c'est la seule zone pour laquelle toute la masse d'eau est affectée par un refroidissement de température. Cependant, cette zone est la moins couverte de l'ensemble de la ligne SURVOSTRAL (figure 7) : Peu de données y sont disponibles à cause de la quantité de glace de mer présente qui empêche le bon déroulement des mesures.

Une fois de plus, nous étudions l'évolution de la moyenne des anomalies estivales dans la zone (figure 19). La tendance est nette, avec environ  $-0.07^{\circ}\text{C}$  par décennie, significative à 95%. L'apport des eaux proches de l'Antarctique est fait par les LCDW, la couche inférieure des CDW, qui monte vers la surface au sud de la divergence Antarctique. Dans ce secteur, Aoki et al. (2013) a mesuré une baisse de la salinité de ces eaux, et un changement faible en température avec 8 observations (réchauffement de  $0.01^{\circ}\text{C}$  par décennie). Notre refroidissement est plus régulier et marqué. D'autres causes de variations

de température pourraient être la glace de mer, ou l'anomalie de SST causé par l'ACW. La question est donc de savoir si l'ACW impacte les CDW une fois celles-ci remontées en surface à la divergence Antarctique.

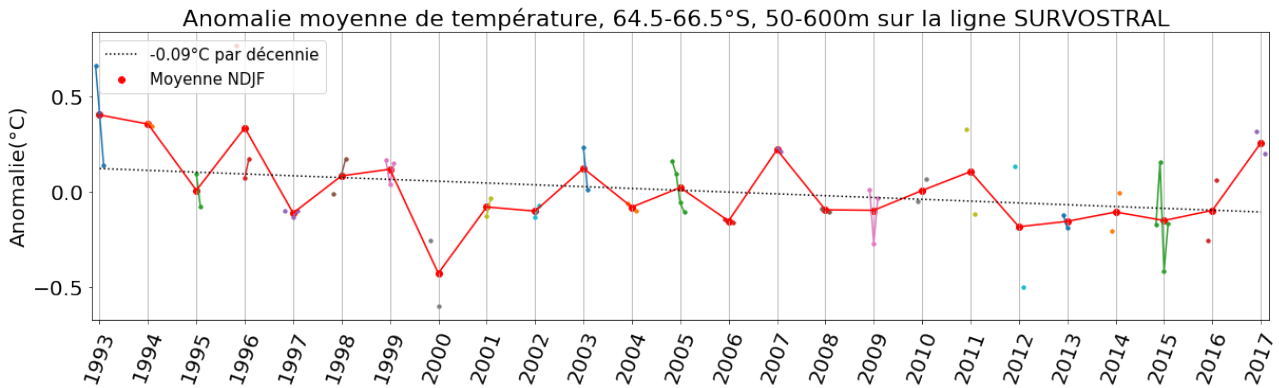


FIGURE 19 – Anomalies de température dans la zone 64.5-66.5°S, moyennées entre 50 et 600m de profondeur. Les points multicolores représentent les moyennes des anomalies sur les mois de novembre, décembre, janvier et février sur la ligne SURVOSTRAL lorsqu'ils sont disponibles. La moyenne de ces quatre mois est en rouge. En pointillés noir, régression linéaire sur la série temporelle.

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons comparé l'anomalie de la température en profondeur avec la SST de la zone. D'abord, l'anomalie de SST Reynolds de chaque mois est calculée entre les latitudes 64.5°S et 66.5°S (en gris, figure 20). Les variations de cette SST ne suivent pas les variations d'anomalies de la zone (en orange, figure 20). Cette même SST est filtrée sur 2 ans avec un filtre passe bas de Lanczos (en vert, figure 20). D'abord, l'ACW est très visible de 1993 à 2000, avec une période d'environ 3 ans. Entre 2003 et 2007, une seconde onde est identifiable, d'amplitude plus importante (environ 0.2°C contre 0.1°C pour la précédente). Enfin, de 2009 à 2017, les ondulations d'une onde d'environ 2 ans de période sont identifiables, cependant, elles ne dominent pas le signal. Cela pourrait être dû à la superposition d'une seconde onde d'amplitude plus importante et de 7 ans de période, avec 2009-2012 et 2012-2015 comme phases positives puis négatives de cette onde.

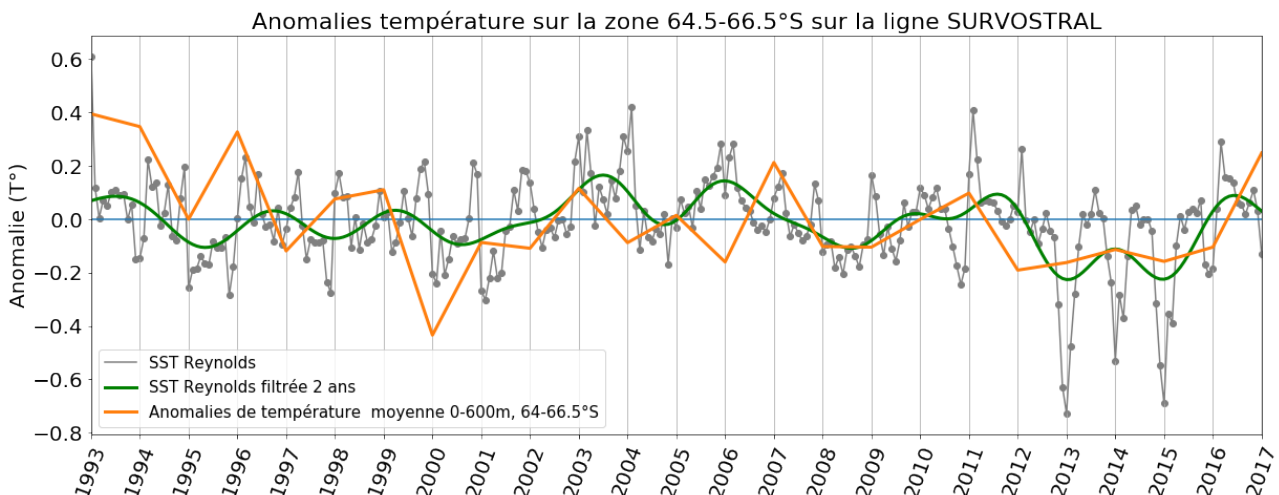


FIGURE 20 – Moyenne des anomalies de température dans la zone 64.5-66.5°S entre 50 et 600m (orange). En gris, évolution de l'anomalie de SST Reynolds dans la même zone. Cette SST est filtrée avec un filtre passe bas Lanczos de 2 ans pour identifier l'ACW (vert).

Certaines variations de température des LCDW peuvent être expliquées par les différentes ACWs identifiées. De 1993 à 1996, puis de 1999 à 2000, les variations semblent suivre celles de la première onde identifiée. La seconde onde identifiée semble être peu liée à nos anomalies. Les variations

de température sont très différentes voir opposées de 2001 à 2006. Enfin, l'anomalie de zone semble suivre en partie l'onde longue de 7 ans de période, avec des anomalies positives ou faiblement négatives associées à la phase positive de l'onde en 2009-2011, et des anomalies négatives associées à la phase négative de l'onde en 2013-2016. En 2017, nous constatons également une anomalie de température positive qui semble suivre le passage en phase positive de l'onde longue de 2016-2017.

Le refroidissement observé est assez consistant entre surface et profondeur (figure 8), mais la SST de Reynolds filtrée n'est en phase que dans des périodes précises (2001-2003, 2007-2016). Cependant, nous avons montré qu'à 140°E, il y a une influence de l'ACW à travers des anomalies de température en surface transmises lors de l'upwelling de la masse d'eau. Les anomalies en profondeur peuvent également être impactées par le mouvement des fronts locaux (Southern Boundary, SB : la frontière sud de l'ACC; branches du Southern ACC Front, SACCF). Sokolov and Rintoul (2003) montrent que les fronts du sud de l'ACC se déplacent légèrement vers le nord de 1994 à 1999, ce qui s'accompagne d'un apport d'eaux froides sur la pente. Il est cependant difficile de suivre ces fronts avec l'altimétrie ou la SST Reynolds dans ces zones de glace, et le peu de mesures XBTs disponibles entraîne des réserves concernant leur positionnement par critère de température/profondeur. Les séries temporelles du positionnement de ces fronts montrent néanmoins un léger déplacement vers le Sud, mais pour la plupart des saisons le manque de données entraîne un positionnement identique d'une année à l'autre. Plus généralement, le nombre de données dans la zone étant faible, ces résultats ne sont pas des conclusions définitives et restent en attente d'un nombre plus important de mesures.



## Conclusion

L'océan Austral est un élément central de la circulation océanique globale. Les variations et tendances des propriétés de ses masses d'eaux se propagent dans l'ensemble des bassins océaniques. Il est donc primordial de les quantifier et d'identifier à quoi elles sont dues. Par conséquent les programmes de mesure dans cet océan sont cruciaux. Dans cette étude, la plus longue série saisonnière de mesures *in situ* à haute résolution de l'océan Austral, réalisée par le programme SURVOSTRAL a été analysée.

Ce programme SURVOSTRAL permet un suivi des variations de température en profondeur de l'océan Austral à 140°E. Cependant, ces mesures sont sensibles aux conditions d'acquisition, et ne sont régulières ni dans le temps, ni dans l'espace. La difficulté des analyses est donc de représenter au mieux la zone telle qu'elle est en réalité tout en conservant le plus de données possibles.

Ces 25 ans de données permettent de dégager des changements de température robustes et d'identifier certains comportements des masses d'eaux. Les STW influent fortement sur la zone Nord de la ligne SURVOSTRAL. Ces dernières années montrent un déplacement vers le Sud du STF, entraînant une augmentation du volume de celles-ci. Une tendance à un SAM de plus en plus positif semble être la raison de ces changements. Le SAM impacte également les SAMW, à travers une intensification de l'apport d'eaux chaudes de l'EAC par les tourbillons au Nord. Au sud des SAMW, c'est un apport d'eaux froides par les méandres et tourbillons du SAF qui impacte également celles-ci.

Après 15 ans de mesures, [Morrow et al. \(2008\)](#) ont montré que la langue de WW est devenue plus mince et proche de la surface. Nos données sur 25 ans montrent que cette tendance n'est pas continue. En effet, les WW restent plutôt stables sur l'ensemble de la série temporelle. Leurs variations de température se retrouvent dans celles à la surface en amont lors de l'hiver précédent, qui sont elles-mêmes impactées par le SAM à travers une intensification du transport d'Ekman lors d'un SAM positif. Les grands changements après 15 ans semblent être plutôt liés à la grande perturbation de 2015. Les UCDW, observées de 200 à 600m de profondeur, montrent un léger réchauffement de l'ordre de 0.05°C par décennie, ce qui confirme celui trouvé par [Aoki et al. \(2013\)](#). Ce réchauffement est accompagné d'une remontée rapide en profondeur et en valeur du maximum de température qu'elles contiennent, de 20m par décennie (de l'ordre de celle trouvée par [Schmidtke et al. \(2014\)](#)). Enfin, les LCDW captées proches de l'Antarctique par les mesures montrent un refroidissement significatif sur l'ensemble de la masse d'eau. Les déplacements vers le Nord des fronts au sud de l'ACC pourraient engendrer ce refroidissement. Cependant, [Aoki et al. \(2013\)](#) trouve des LCDW stables ou un léger réchauffement dans la même zone d'étude. L'origine de ces changements reste à élucider, mais nos observations restent relativement robustes. L'origine de ces eaux est au nord des grands bassins océaniques. Après sa remontée à la surface, elle semble influencée par l'ACW et ses anomalies de température en surface.

Les tendances sont calculées à partir de moyennes réalisées sur une grande superficie d'une masse d'eau, ce qui est nécessaire afin que les tendances soient statistiquement robustes. Nous avons veillé à ce que ces aires soient incluses dans une masse d'eau la plus homogène possible, avec néanmoins une étude sur le mouvement de fronts au Nord (lié aux volumes de STW, SAMW). Un travail plus fin sur la séparation des masses d'eaux et des mouvements de fronts reste à faire dans les LCDW plus au Sud. Pour les variations interannuelles de nos moyennes estivales, faute d'une couverture spatio-temporelle complète entraînant des biais de température importants dans la couche superficielle, nous avons remplacé les mois manquants par la climatologie SURVOSTRAL. Nos anomalies interannuelles sont donc tirées vers la moyenne, et nous nous attendons à des vraies anomalies potentiellement plus fortes.

Les dernières semaines de stage seront consacrées à la quantification des erreurs sur les produits (notamment celui de moyennes estivales), pour leur distribution par la suite. Il sera également intéressant à l'avenir de compléter cette étude par une analyse plus approfondie des données satellites sur la zone, en parallèle avec les mesures XBTs. Dans le nord de la zone, beaucoup de données satellite

sont déjà disponibles. Certaines ont déjà été utilisées ici pour la validation des données et l'analyse (SSH, SST Reynolds, courants de surface). Au sud, celles-ci sont plus rares et limitées par la glace de mer. De récents programmes prévoient cependant de mettre au point des techniques de mesures dans les zones de glace de mer, afin de comprendre plus précisément la circulation sous celle-ci. Des techniques d'altimétrie dans les cracks de glace sont déjà en place dans l'océan Arctique. Dans le cadre de ma thèse, je serai amené à travailler sur la mise au point de ces techniques en Antarctique. Une connaissance plus précise de la circulation de la zone permettrait de mieux comprendre les variations proches de la pente du talus continental Antarctique.



Table des figures

1	<p><i>a)</i> : À gauche, coupe transversale de l'océan Austral d'après Speer et al. (2000). La double boucle de circulation de retournement y est présentée, ainsi que la position des masses d'eaux et fronts. <i>b)</i> : À droite, ligne de la trajectoire des mesures SURVOSTRAL entre Hobart et Dumont d'Urville dans l'océan Austral. Les trois fronts majeurs (Subtropical, Subantarctique et Polaire) y sont représentés, ainsi que la SST Reynolds de la zone moyennée sur les mois de décembre, janvier, février et mars. . . . .</p>	1
2	<p>Tracé des 25 ans de chemins empruntés par le bateau pour la traversée entre Hobart et Dumont d'Urville (DDU). La trajectoire théorique SURVOSTRAL est tracée en vert. La limite de sélection des données, discutée partie 2.1.2, est matérialisée par les points jaunes. Les parties de trajectoires sélectionnées lors de l'utilisation des données sont en bleu, celles rejetées sont en rouge. . . . .</p>	6
3	<p><i>a)</i> Position de chaque profil effectué à bord du bateau lors du transect entre Hobart et Dumont d'Urville en février 2016 (points). La trajectoire théorique du bateau est en rouge. <i>b)</i> Profils de température des tirs de XBT correspondants à <i>a)</i>. <i>c)</i> Une section verticale de température issue de la traversée. La position des mesures est marquée en rouge en haut de la figure. Une augmentation de la fréquence de mesure est identifiable entre 49°-54°S dans la zone frontale. Les sondes ayant cassé avant 800m sont repérables en blanc. . . . .</p>	7
4	<p>Exemple du positionnement des fronts à partir d'un contour de SSH pour le 23 novembre 2011. En rouge, position des SAF (au Nord) et PF (au Sud) à partir du produit de Sallée et al. (2007). En noir, position du SAF et du PF à partir des contours de SSH obtenus dans cette étude pour le produit SSH AVISO en ADT (SAF = -0.1m et PF = -0.3m). . . . .</p>	9
5	<p><i>a)</i> Position des profils de température (points) pour chaque rotation de la saison 2007-2008, et position du front polaire au moment de chaque rotation (traits pleins). Le code couleur marque les profils de température et la position du front à la même date. La position du chemin moyen est marquée en pointillés noirs. <i>b)</i> Latitude de l'intersection du chemin moyen et du front polaire (triangle bleu), intersection de la trajectoire du bateau et du front polaire (rond bleu), distance zonale entre les intersections (rouge) pour chaque rotation de la saison 2007-2008. Le transect R0b est potentiellement problématique, il est encadré en noir. . . . .</p>	10
6	<p>Climatologie mensuelle pour les mois d'Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars. Les isothermes à 0°C, 2°C, 5°C, 8°C, 11°C (contours noirs) permettent d'identifier les différentes masses d'eaux. . . . .</p>	12
7	<p>Moyenne pour chaque année, avec une résolution de 2m en profondeur, de 0.5° en latitude sauf à 49-54°S où la résolution est de 0.25°. En hachuré, les points où la climatologie a été utilisée au moins deux fois sur quatre pour le calcul de la moyenne temporelle de la saison. Les contours en noir sont les isothermes à 0°, 2°, 5°, 8°, et 11°C. Les surfaces noires sont les positions où aucun point n'a été réalisé dans toute la saison. . . . .</p>	14
8	<p><i>a)</i> Moyenne des 25 ans de moyennes estivales NDJF. Les positions simplifiées des principales masses d'eaux à l'étude y sont indiquées en blanc, ainsi que la position des fronts de l'ACC. <i>b)</i> Carte des tendances obtenue à partir de la moyenne des anomalies en chaque point. Cette carte des tendances permet de dégager quatre zones avec des comportements différents. Elles sont numérotées de 1 à 4, ce qui correspond à leur ordre d'étude dans l'analyse. . . . .</p>	16

9	Analyse en EOF de l'ensemble de la zone à forte variabilité. De <i>a)</i> à <i>c)</i> , la distribution spatiale des modes 1 à 3 (à gauche) et la série temporelle associée (à droite). . . . .	17
10	<i>a)</i> Anomalies de température dans la zone 44-49.5°S, moyennées entre 20 et 400m de profondeur. Les points multicolores représentent les moyennes des anomalies sur les mois de novembre, décembre, janvier et février sur la ligne SURVOSTRAL lorsqu'ils sont disponibles. La moyenne de ces quatre mois est en rouge. En pointillés noir, régression linéaire sur la série temporelle. <i>b)</i> Anomalies de température de surface de Reynolds moyenne dans la zone 44-49.5°S sur la ligne SURVOSTRAL. Une régression linéaire de cette série temporelle est faite en pointillés noirs. . . . .	18
11	<i>a)</i> Position méridienne du front subtropical sur la ligne SURVOSTRAL obtenue à partir du critère de la table 1 sur les moyennes estivales NDJF. <i>b)</i> Volume des eaux subtropicales dans la zone 44-49.5°S. Le terme "volume" est un abus de langage, en réalité il est calculé comme une profondeur multipliée par des degrés en latitude. <i>c)</i> Indice ENSO mensuel. <i>d)</i> Indice SAM mensuel (bleu clair) et moyenné sur NDJF (noir) . . . . .	19
12	Evolution temporelle de la température moyenne estivale des SAMW entre 1993 et 2017.	21
13	Trajectoires des particules amenant à la ligne SURVOSTRAL au premier janvier des années 2005 ( <i>a)</i> , 2007 ( <i>b)</i> , et 2016 ( <i>c)</i> ). Leur trajectoire est calculée jusqu'à atteindre leur position 6 mois avant, c'est à dire en juin de l'année précédente. Les pointillés verts représentent la zone dans laquelle nous considérons qu'il y a un apport d'eaux de l'EAC. Les pointillés noirs est la zone dans laquelle les particules retracées sont considérées comme provenant du sud du SAF. . . . .	22
14	Nombre de mois parmi novembre, décembre, janvier et février avec apport d'eaux chaudes de l'EAC (en rouge) et d'eaux froides du sud du SAF (en bleu). En gris, température des SAMW. . . . .	23
15	Profondeur minimale (bleu) et maximale (noir) de la WW en moyenne sur la zone 54.5°-61.5°S, identifiée comme la masse d'eau avec $T < 2^{\circ}\text{C}$ sur le produit de moyenne NDJF. En rouge, profondeur du minimum de température de la WW. En pointillet, les régressions linéaires de ces profondeurs. . . . .	24
16	<i>a)</i> Evolution de la température moyenne de la WW entre 54.5°S et 61.5°S, à partir du produit de moyennes NDJF. La WW est définie comme $T < 2^{\circ}\text{C}$ . <i>b)</i> En bleu, SST Reynolds sur la zone en amont de la WW, dans la zone 119-146°E, 57-61°S, moyennée entre mai et août (MJJA). En gris, la température de la couche de mélange moyenne pour la même zone en MJJA. . . . .	26
17	Anomalies de température dans la zone 54-62.5°S, moyennées entre 300 et 600m de profondeur. Les points multicolores représentent les moyennes des anomalies sur les mois de novembre, décembre, janvier et février sur la ligne SURVOSTRAL lorsqu'ils sont disponibles. La moyenne de ces quatre mois est en rouge. En pointillés noirs, régression linéaire sur la série temporelle. . . . .	26
18	Evolution de la température (rouge) et de la profondeur (bleu) du maximum de température sous la WW, à partir des moyennes estivales NDJF. Les tendances des deux séries temporelles sont tracées en pointillés. . . . .	27

19	Anomalies de température dans la zone 64.5-66.5°S, moyennées entre 50 et 600m de profondeur. Les points multicolores représentent les moyennes des anomalies sur les mois de novembre, décembre, janvier et février sur la ligne SURVOSTRAL lorsqu'ils sont disponibles. La moyenne de ces quatre mois est en rouge. En pointillés noir, régression linéaire sur la série temporelle. . . . .	28
20	Moyenne des anomalies de température dans la zone 64.5-66.5°S entre 50 et 600m (orange). En gris, évolution de l'anomalie de SST Reynolds dans la même zone. Cette SST est filtrée avec un filtre passe bas Lanczos de 2 ans pour identifier l'ACW (vert). .	28
B.1	<i>a)</i> Moyenne de Février de la température sur la section SURVOSTRAL, à partir du produit grillé ISAS. <i>b)</i> Moyenne de Février de la température à partir des données SURVOSTRAL . . . . .	vii
D.1	Moyennes Estivales (NDJF), identification des STW (bleu) et SAMW (en rose) sur les 25 ans de données. Les contours en noir représentent les isothermes à 3°, 5°, 8° et 11°C. Les lignes verticales en noir à 51°S et 49.5°S sont la limite des anomalies du premier mode EOF. Les lignes verticales rouges et bleues positionnent respectivement le SAF et le STF . . . . .	ix

## Références

- Aoki, S., Kitade, Y., Ohshima, K. I., Tamura, T., Bajish, C. C., Moteki, M., and Rintoul, S. R. (2013). Widespread freshening in the seasonal ice zone near 140°e off the adélie land coast, antarctica, from 1994 to 2012. *Journal of geophysical research : Oceans*, vol. 118, :6046–6063.
- Cabanes, C., Grouazel, A., von Schukmann, K., Hamon, M., Turpin, V., Coatanoan, C., Paris, F., Guinehut, S., Boone, C., Ferry, N., de Boyer Montégut, C., Carval, T., Reverdin, G., Pouliquen, S., and Le Traon, P. Y. (2013). The cora dataset : validation and diagnostics of in-situ ocean temperature and salinity measurements. *Ocean Science*, 9 :1–18.
- Cerrone, D., Fusco, G., Cotroneo, Y., Simmonds, I., and Budillon, G. (2017). The antarctic circumpolar wave : Its presence and interdecadal changes during the last 142 years. *Journal of Climate*, pages 6371–6389.
- Chaigneau, A. (2003). *Variabilité de la couche superficielle de l'océan Austral entre la Tasmanie et l'Antarctique*. PhD thesis, Université Toulouse III.
- Emery, W. J. and Thomson, R. E. (2004). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier.
- Fieux, M. (2017). *The Planetary Ocean*. edp sciences.
- Gao, L., Rintoul, S. R., and Yu, W. (2017). Recent wind-driven change in subantarctic mode water and its impact on ocean heat storage. *nature climate change*, 8 :58–63.
- Gupta, A. S. and England, M. H. (2006). Coupled ocean-atmosphere-ice response to variations in the southern annular mode. *Journal of Climate*, 19 :4457–4486.
- Herraiz-Borreguero, L. and Rintoul, S. R. (2010). Subantarctic mode water : distribution and circulation. *Ocean Dynamics*, pages DOI 10.1007/s10236–010–0352–9.
- Lovenduski, N. S. and Gruber, N. (2005). Impact of the southern annular mode on southern ocean circulation and biology. *Geophysical research letters*, 32 :L11603, doi :10.1029/2005GL022727.
- Morrow, R., Donguy, J. R., Chaigneau, A., and Rintoul, S. R. (2004). Cold-core anomalies at the subantarctic front, south of tasmania. *Deep-Sea Research I*, 51 :1417–1440.
- Morrow, R. and Kestenare, E. (2014). Nineteen-year changes in surface salinity in the southern ocean south of australia. *Journal of Marine Systems*, 129 :472–483.
- Morrow, R., Valladeau, G., and Sallée, J. B. (2008). Observed subsurface signature of southern ocean sea level rise. *Progress in Oceanography*, 77 :352–367.
- Park, Y.-H., Roquet, F., and Vivier, F. (2004). Quasi-stationary enso wave signals versus the antarctic circumpolar wave scenario. *Geophysical research letters*, 31 :L09315, doi :10.1029/2004GL019806.
- Pellichero, V. (2018). *Etude de la dynamique de la couche de surface et des interactions surface/océan dans l'Océan Austral sous la glace de mer*. PhD thesis, Sorbonne Université.
- Pilo, G. S., Oke, P. R., Rykova, T., Coleman, R., and Ridgway, K. (2015). Do east australian current anticyclonic eddies leave the tasman sea? *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 120 :8099–8114.
- Rintoul, S. R. and England, M. H. (2002). Ekman transport dominates local air-sea fluxes in driving variability of subantarctic mode water. *Journal of Physical Oceanography*, 32 :1308–1321.
- Rintoul, S. R., Sokolov, S., and Church, J. (2002). A 6 year record of baroclinic transport variability of the antarctic circumpolar current at 140°e derived from expendable bathythermograph and altimeter measurements. *Journal of geophysical research*, 107 :doi :10.1029/2001JC000787.

- Sallée, J. B., Speer, K., and Morrow, R. (2007). Response of the antarctic circumpolar current to atmospheric variability. *Journal of Climate*, 21 :3020–3038.
- Schmidtko, S., Heywood, K. J., Thompson, A. F., and Aoki, S. (2014). Multidecadal warming of antarctic waters. *Science*, 346 :1227–1231.
- Siedler, G., Griffies, S. M., Gould, J., and Church, J. A. (2013). *Ocean Circulation and Climate, A 21st century perspective*. Academic Press, Elsevier.
- Sokolov, S. and Rintoul, S. R. (2003). Subsurface structure of interannual temperature anomalies in the australian sector of the southern ocean. *Journal of Geophysical Research*, 108 :3285, doi :10.1029/2002JC001494.
- Sokolov, S. and Rintoul, S. R. (2007). Multiple jets of the antarctic circumpolar current south of australia. *Journal of Physical Oceanography*, 37 :1394–1412.
- Sokolov, S. and Rintoul, S. R. (2009). Circumpolar structure and distribution of the antarctic circumpolar current fronts : 1. mean circumpolar paths. *Journal of Geophysical Research*, 114 :C11018, doi :10.1029/2008JC005108.
- Speer, K., Rintoul, S. R., and Sloyan, B. (2000). The diabatic deacon cell. *Journal of Physical Oceanography*, 30 :3212–3222.
- Speich, S., Blanke, B., de Vries, P., Drijfhout, S., Döös, K., Ganachaud, A., and Marsh, R. (2002). Tasman leakage : A new route in the global ocean conveyor belt. *Geophysical research letters*, 29 :doi :10.1029/2001GLO14586.
- White, W. B. and Peterson, R. G. (1996). An antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent. *Nature*, 380 :699–702.
- White, W. B. and Simmonds, I. (2006). Sea surface temperature-induced cyclogenesis in the antarctic circumpolar wave. *Journal of geophysical research*, 111 :C08011, doi :10.1029/2004JC002395.



## A Tableaux de répartition des données

a) Nombre de jours de données par mois							b) Nombre de profils par tranche de latitude (°)										
1992-1993	0	0	11	3	5	6	1	9	20	25	17	20	7	9	10	13	0
1993-1994	0	0	9	14	27	7	2	42	40	54	54	39	31	29	31	16	0
1994-1995	0	10	6	5	10	2	6	63	45	62	59	52	49	52	30	20	0
1995-1996	0	13	1	11	6	4	2	46	41	84	67	35	40	41	31	18	2
1996-1997	7	12	0	13	6	7	6	44	44	60	59	39	36	31	47	34	0
1997-1998	7	6	0	15	6	5	1	30	31	55	75	39	34	37	33	36	15
1998-1999	0	4	11	16	6	6	2	48	40	93	95	45	38	40	43	44	0
1999-2000	5	6	2	10	6	4	3	32	46	89	75	32	43	39	33	10	0
2000-2001	6	5	2	9	6	7	0	25	33	67	83	35	30	42	33	22	0
2001-2002	5	6	2	11	6	5	4	40	49	70	94	38	31	40	33	17	0
2002-2003	8	3	3	8	8	4	2	36	41	80	89	39	33	42	34	23	0
2003-2004	9	9	12	0	8	4	2	32	53	87	86	40	45	46	53	42	1
2004-2005	8	7	12	5	8	2	1	34	45	1e+02	96	58	42	44	51	45	0
2005-2006	5	4	12	0	10	2	2	43	43	84	96	37	43	37	32	28	0
2006-2007	6	6	2	9	7	4	5	39	40	62	86	42	38	43	37	27	0
2007-2008	4	8	12	0	9	2	2	44	48	91	87	52	53	45	41	32	3
2008-2009	0	8	12	11	8	3	6	37	36	78	85	60	51	46	43	36	1
2009-2010	5	6	12	0	7	5	6	47	43	68	73	50	37	43	36	37	1
2010-2011	1	7	12	0	5	5	2	44	46	86	61	26	34	42	35	52	5
2011-2012	2	0	16	4	7	6	2	41	36	72	70	33	36	35	39	54	1
2012-2013	0	5	8	5	0	0	1	22	17	53	39	22	27	22	19	11	0
2013-2014	0	0	18	2	0	12	2	38	34	64	58	34	26	31	25	52	0
2014-2015	3	7	6	6	0	13	3	37	41	63	62	29	32	34	38	45	0
2015-2016	0	8	8	0	8	5	5	33	36	74	79	31	33	33	30	21	0
2016-2017	8	6	7	3	6	6	5	60	51	1e+02	1e+02	53	43	47	56	28	0
	October	November	December	January	February	March	41.5 - 44	44 - 46.5	46.5 - 49	49 - 51.5	51.5 - 54	54 - 56.5	56.5 - 59	59 - 61.5	61.5 - 64	64 - 66.5	66.5 - 69

TABLE A.1 – a) Nombre de jours de données par mois pour chaque année. b) Nombre de profils réalisés par tranche de latitude par mois pour chaque année

## B Climatologie à partir du produit ISAS-CORA

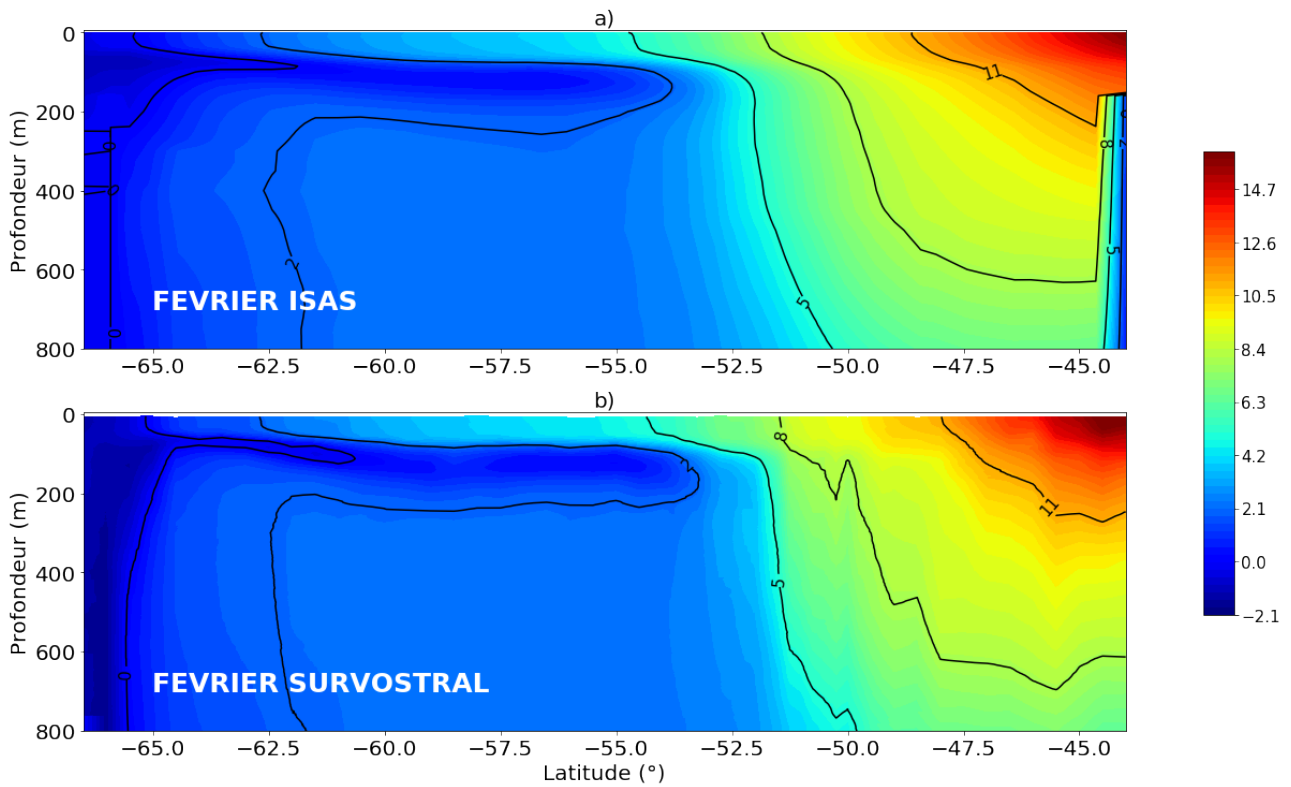


FIGURE B.1 – *a)* Moyenne de Février de la température sur la section SURVOSTRAL, à partir du produit grillé ISAS. *b)* Moyenne de Février de la température à partir des données SURVOSTRAL

## C Outils statistiques utilisés dans l'analyse

### C.1 EOFs

Dans l'étude de la variabilité océanique, on peut avoir la volonté de compresser un grand nombre de données grillées en fonction du temps en un nombre plus petit d'informations indépendantes. Pour cela, on utilise des EOFs (Empirical Orthogonal Functions). Les EOFs permettent la combinaison de prédicteurs orthogonaux, aussi appelés modes, pour laquelle la réponse en fonction du temps compterait comme la variance combinée de toutes les observations. Dans notre cas, ces EOFs seront appliqués sur des séries temporelles en section  $(x_i(t) \ z_i(t))$ . En résumé, ces EOFs permettent d'identifier les principaux modes de la variabilité de notre signal, et les représenter à partir de leur structure spatiale et évolution temporelle (Emery and Thomson (2004)).

### C.2 Test de Mann-Kendall

Le test de Mann- permet d'affirmer statistiquement qu'il y a une tendance monotone d'une variable d'intérêt par rapport au temps. Ce test est utilisé pour vérifier une tendance au refroidissement ou au réchauffement sur les observations. Le test indique que l'hypothèse d'une population de données avec des réalisations indépendantes est conservée tant que la tendance n'est pas confirmée au-delà d'un certain doute (Emery and Thomson (2004)). Les différentes étapes du test incluent le calcul de la variance de la série temporelle ou encore le comptage des pentes positives et négatives. Enfin, à partir d'une valeur  $\alpha$  qui correspond à la probabilité tolérable qu'une tendance soit affirmée par erreur, le test indique la significativité ou non de la tendance à  $100 * (1 - \alpha) \%$ .

### C.3 Coefficient de corrélation

Dans l'étude suivante, de nombreux tests de corrélation ont été effectués, dans le but de déduire des liens entre différents paramètres et variables de masses d'eaux ou atmosphériques.

Dans le but de quantifier des relations linéaires entre les variables, le coefficient de Pearson  $r$  est utilisé. La valeur de  $r$  prend une valeur entre -1 et 1, selon que la force de la relation linéaire soit négative forte, faible ou positive forte. Cependant, la significativité prend également en compte le nombre d'observations en plus de la valeur du coefficient de corrélation. Ainsi, en se reportant sur une table de Pearson, on peut affirmer l'existence ou non d'une relation entre deux variables avec un pourcentage de sûreté.

## D Position des STW et SAMW sur la ligne SURVOSTRAL

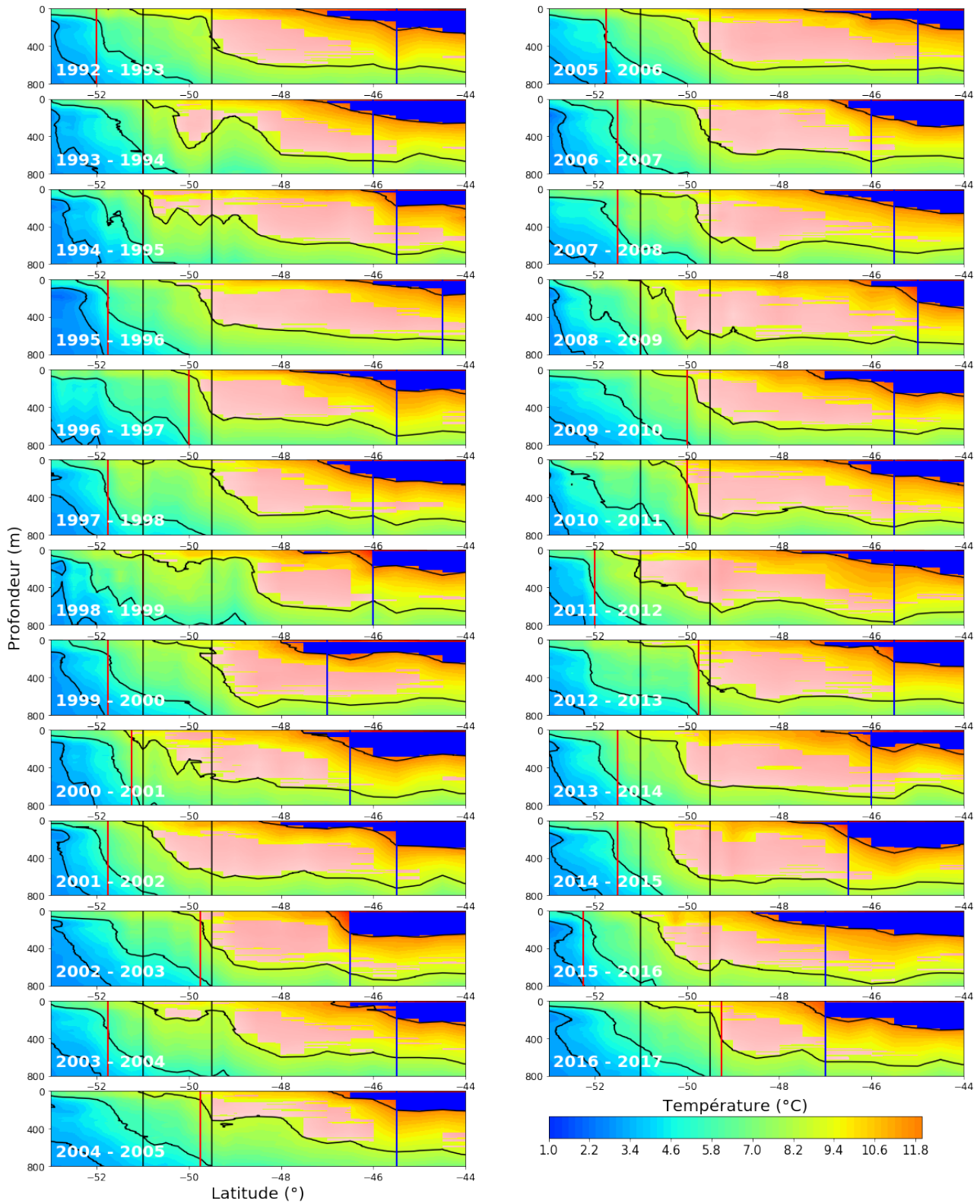


FIGURE D.1 – Moyennes Estivales (NDJF), identification des STW (bleu) et SAMW (en rose) sur les 25 ans de données. Les contours en noir représentent les isothermes à 3°, 5°, 8° et 11°C. Les lignes verticales en noir à 51°S et 49.5°S sont la limite des anomalies du premier mode EOF. Les lignes verticales rouges et bleues positionnent respectivement le SAF et le STF