

**MASTER 2 PMMC, option Physique Océan/Atmosphère
Université de Bretagne Occidentale, Brest
Laboratoire de Physique des Océans**

**Étude de variabilité des fronts et du transport total
de l'ACC dans un modèle global au $\frac{1}{4}$ de degré**

Guillaume Dencausse

Directeurs de stage: A.M. Tréguier
S. Speich

Juin 2005

Sommaire

I-Introduction.....	4
II-L'océan Austral.....	4
II.1.Le Courant Circumpolaire Antarctique.....	4
II.2.Les masses d'eau de l'océan Austral.....	5
II.3. Le transport zonal total et sa variabilité saisonnière.....	6
II.4.La caractérisation des fronts de l'ACC.....	7
III-Présentation du modèle.....	8
III.1. OPA9 et la configuration ORCA-R025.....	8
III.2. Les simulations étudiées.....	9
IV-Étude des sorties du modèle.....	11
IV.1. Transport total aux sections méridiennes d'étude.....	11
IV.1.1. Moyenne annuelle du transport zonal total.....	13
IV.1.2. Variabilité saisonnière des transports zonaux totaux.....	14
IV.2. Étude des fronts de l'ACC:.....	17
IV.2.1. Position des fronts en moyenne annuelle.....	18
IV.2.2. Variabilité mensuelle des fronts.....	23
V- Conclusion.....	26

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes responsables de stages, Sabrina Speich et Anne-Marie Tréguier, pour leur encadrement et ce malgré les aléas divers qui les ont parfois gardées alitées.

Ce stage aura nécessité dans un premier temps une initiation à des outils informatiques assez lourds, dont je n'avais aucune connaissance. C'est essentiellement à Nicolas Grima que je dois cet apprentissage accéléré, qui m'a donné beaucoup de son temps en début de stage. Je remercie également Sébastien Theeten pour son aide sur IDL.

Enfin, je souhaite remercier Bruno Blanke pour son aide précieuse sur Ariane (et pour le sauvetage in extremis de mon rapport...).

I-Introduction

L'Océan Austral joue un rôle crucial dans la circulation océanique mondiale de par la connexion qu'il établit entre les grands océans de la Terre. Il est donc le passage obligé de la circulation thermohaline. On pense que cette dernière est d'une grande importance dans la régulation du climat mondial, du fait des flux de chaleur et de salinité qu'elle engendre. Par ailleurs, les couches superficielles de l'océan austral sont le siège de flux air/mer importants, car à l'origine de la formation de masses d'eaux froides et peu salées issues de forts couplages air/atmosphère, qui sont injectées dans la thermocline principale. Celles-ci affectent ainsi également le bilan de transfert de chaleur, de salinité ou encore de carbone.

Or cet endroit de l'océan mondial n'a été que très peu mesuré, en raison de son éloignement et des difficultés climatiques que l'on y rencontre, et les mesures existantes ont pour la plupart été effectuées en été Austral. Notre connaissance de cet océan est donc limitée, à la fois dans l'espace et dans le temps. C'est pourquoi des programmes de mesures ont commencé à se développer depuis une dizaine d'années, afin de remédier à un déficit dont on mesure aujourd'hui toute l'importance. Il s'agit notamment de mesures effectuées à Drake (radiale SR3), au niveau de la Tasmanie (SR1) depuis une dizaine d'année, et du programme GOODHOPE (SR2), sur lequel doit se porter mon activité de thèse.

En attendant les données de mesures, ce stage vise à aborder la question de la variabilité de l'ACC et de l'Océan Austral telle que générée dans un modèle global au 1/4 de degré qu'est la configuration ORCA-R025 du projet DRAKKAR, en se focalisant sur le tronçon de l'Océan Austral se trouvant de part et d'autre de l'Afrique du Sud, et allant jusqu'au checkpoints voisins. Deux simulations récentes seront confrontées ici, différenciées en particulier par leur forçage.

Le stage vise à étudier plus particulièrement le transport total en différentes sections méridiennes clés de l'ACC et sa variabilité saisonnière, et d'autre part la représentation des fronts de l'ACC dans le modèle et leur représentation selon les critères d'Orsi (Orsi et al., 95). Il s'agit donc d'évaluer le modèle et l'influence de paramètres de forçage sur ces grandeurs caractéristiques de l'Océan Austral, autour de l'Afrique du Sud.

II-L'océan Austral

II.1.Le Courant Circumpolaire Antarctique

Le Courant Circumpolaire Antarctique (ACC) est un fort courant parcourant l'océan Antarctique d'ouest en est, d'une intensité de $134 \pm 11.2\text{Sv}$ (Cunningham et al., 2003) au niveau du passage de Drake, et allant jusqu'à $147 \pm 6.1\text{ Sv}$ (Rintoul et al., 2002) au sud de l'Australie. La différence est à attribuer principalement au throughflow Indonésien. L'océan Austral n'étant pas limité zonalement comme le sont les autres océans, la dynamique de Svredrup n'y est pas directement applicable, et il ne peut y

avoir d'écoulement géostrophique méridien aux latitudes de Drake, et au-dessus de la topographie. Ceci tend à isoler l'océan Austral des autres océans. De plus, la dynamique et les échanges thermique et d'eau douce sont liés à une forte activité tourbillonnaire, et au transport dans la couche d'Ekman.

L'ACC n'est toutefois pas un courant uniforme spatialement. Il consiste en une série de fronts qui sont associés à des jets profonds répartis dans le sens méridien, et encerclant le continent Antarctique (Fig. 1). On constate par ailleurs une remontée accentuée des isopycnes vers le sud à la traversée de ces fronts, en même temps qu'une baisse de la hauteur dynamique. Ces fronts sont donc des bandes de forts gradients méridiens de salinité, de température et densité, et dont le parcours est en outre influencé par la topographie.

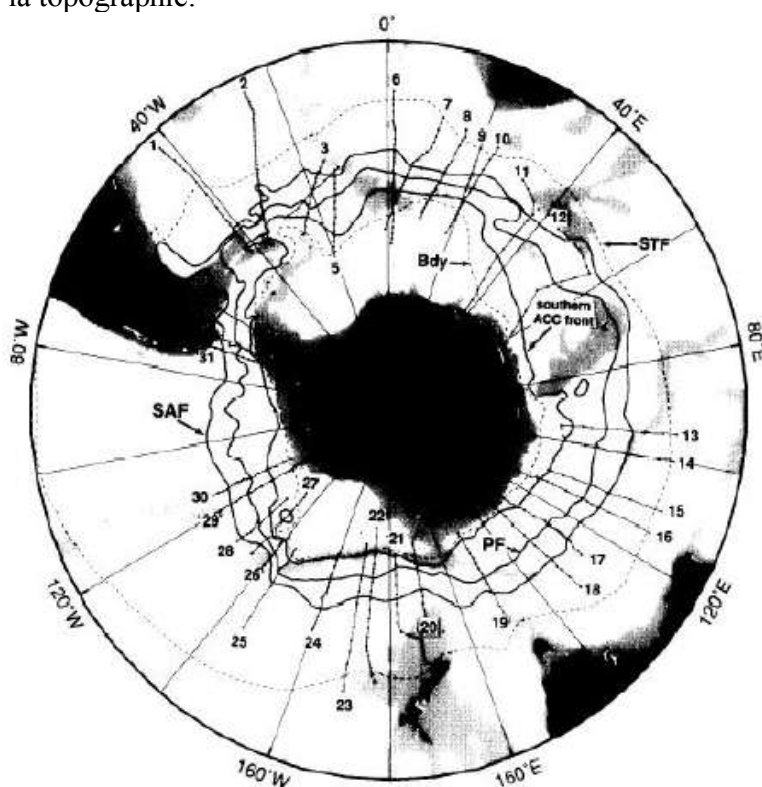


Fig. 1: Position des fronts de l'ACC. SAF: front Sub-Antarctique; PF: front Polaire; SACCF: front Sud de l'ACC; STF: front Sub-Tropical; Sbdy: limite sud de l'ACC. (Orsi et al., 95)

II.2. Les masses d'eau de l'océan Austral

Les vents soufflant au-dessus de l'océan Austral sont un moteur important de l'ACC, l'écoulement zonal n'étant quasiment pas gêné entre 45° et 55°S. Du sud au nord, on distingue trois zones océaniques: l'océan polaire, la région subantarctique et la région subtropicale. Les fronts constituent des frontières zonales délimitant différentes masses d'eau caractéristiques de surface. Leurs caractéristiques en salinité et température sont déterminées par les échanges de chaleur et d'eau douce qu'elles entretiennent avec l'atmosphère. Elles sont, pour certaines distribuées dans les bassins océaniques plus au nord, par des mécanismes qu'il reste à identifier clairement. Ces

masses d'eau sont:

- L'eau de surface subtropicale (STSW) située au nord du front subtropical (STF). Le STF est alors défini comme la limite entre les eaux de surface subtropicales, chaudes et salées, au nord, et celles plus froides et fraîches au sud où le climat devient polaire. Il existe là des gradients de ces propriétés très prononcés.
- L'eau de surface subantarctique (SASW) au sud du front subtropical. Elle est d'une profondeur d'environ 150 m et se trouve au-dessus de l'eau antarctique intermédiaire (AAIW) ou l'eau modale subantarctique (SAMW). Cette eau, qui fait partie de la bande de l'ACC, subit de forts échanges avec le gyre subtropical voisin, ainsi qu'avec l'atmosphère (Whitworth and Nowlin, 1987).
- L'eau modale subantarctique (SAMW) localisée principalement dans la zone subantarctique, surplombe l'AAIW (100-500m) et s'étend en moyenne zonale entre 40° et 45°S. Elle est issue de la convection hivernale lorsqu'un rafraîchissement de surface a effacé la thermocline saisonnière. (McCartney, 1977; Hanawa and Talley, 2001).
- L'eau de surface antarctique (AASW) occupant la région au sud du front polaire jusqu'aux côtes du continent Antarctique. Elle y occupe les 250 premiers mètres. Ses caractéristiques diffèrent de l'hiver à l'été, et on note la présence d'un minimum de température à 200m de profondeur en été.
- L'eau antarctique intermédiaire (AAIW). Elle se situe en surface au nord de la région du front polaire (PF), et est caractérisée par un minimum de salinité. Elle alimente la basse thermocline de l'Atlantique et du Pacifique en pénétrant par l'est des bassins pour la composante la moins riche en oxygène et par l'ouest pour la plus riche en oxygène (Fine, 1993; Toole et Warren, 1993).
- L'eau profonde circumpolaire (CDW), la plus étendue dans le courant circumpolaire antarctique, située sous l'AAIW. On distingue souvent la partie inférieure (LCDW) de la partie supérieure (UCDW) de cette masse d'eau.

II.3. Le transport zonal total et sa variabilité saisonnière

Différentes approches ont été mises en oeuvre pour chercher à quantifier l'intensité de l'ACC. Les auteurs déduisent de ces analyses des transports baroclines mais aussi des transports totaux moyens de l'ACC et à travers la section entière (du fond à la surface) (Tab. 1). Parmi ces méthodes et les transports zonaux totaux moyens obtenus, on peut citer: une méthode d'estimation utilisant des mesures d'XBT appliquée au sud de l'Australie (Rintoul et al., 2002: 165 ± 10 Sv) et dans le passage de Drake (Sokolov et al., 2004), des estimations à partir de mesures de courantomètres et de données hydrographiques (Whitworth et Peterson, 1985, au passage de Drake: 134 ± 11.2 Sv) ou encore une vision globale du transport de masse estimé par une modélisation inverse, à partir de sections hydrographiques (Ganachaud et Wunsch, 2002, 140 ± 6 au passage de Drake et 165 ± 10 Sv au niveau de la Tasmanie) dans un modèle inverse géostrophique.

<i>Transport total(Sv)</i>	<i>Drake</i>	<i>Australie</i>
Modèle inverse	140±6	165±10
XBT ou courantomètres et hydrographie	134±11.2	147±6.1

Tab. 1 transports totaux de l'ACC Il s'agit de valeurs qui sont des moyennes de valeurs annuelles calculées pour plusieurs années, mais ne tenant pas compte d'une variabilité saisonnière.

II.4.La caractérisation des fronts de l'ACC

Depuis que la structure en fronts de l'ACC a été remarquée par Deacon (1937), de nombreuses études locales ont été menées dans l'océan Austral afin d'étudier la position de ces fronts, qui ont été identifiés aussi bien au sud de l'Australie (Deacon, 1937; Gordon et al., 1977) qu'au passage de Drake (Nowlin et al, 1977) ou au sud de l'Afrique (Lutjeharms et Valentine, 1984). En 1995, Orsi a déterminé la structure frontale méridienne de l'ACC en se basant sur des critères en température, salinité et autres traceurs (Tab. 2). L'idée de positionner ainsi les fronts, zones de forts gradients méridiens de ces propriétés, s'appuie sur l'idée d'une stabilité assez forte au cours du cycle annuel moyen. Un des objectifs du stage a été la confrontation de ces définitions d'Orsi et al. (1995) avec les runs G32 et G42, afin de voir notamment la variabilité mensuelle observée dans ces modèles.

STF	$10^{\circ}\text{C} < \theta_{100\text{m}} < 12^{\circ}\text{C}$
SAF	$\theta > 4 - 5^{\circ}\text{C}$ à 400m, plus au nord
PF	$\theta < 2^{\circ}\text{C}$ le long de θ_{min} à $z < 200\text{m}$, plus au sud
SACCF	$\theta > 1,8^{\circ}\text{C}$ le long de θ_{max} à $z > 500\text{m}$, plus au nord $\theta < 0^{\circ}\text{C}$ le long de θ_{min} à $z < 150\text{m}$, plus au sud
Sby	limite sud du maximum vertical $\theta > 1,5^{\circ}\text{C}$ (~200m)

Tab. 2 Définitions des fronts selon Orsi (uniquement ceux en température).

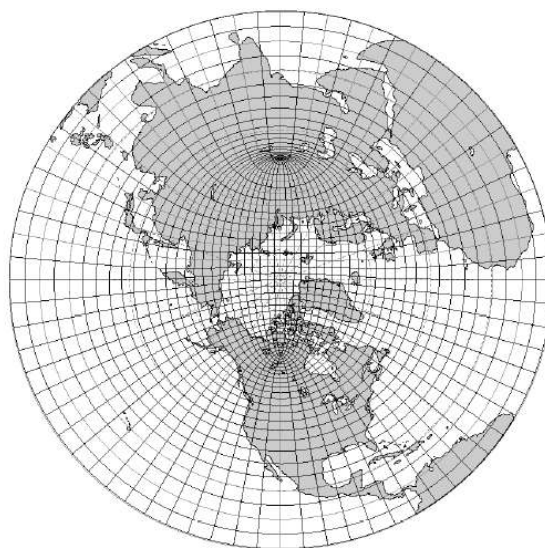
III-Présentation du modèle

III.1. OPA9 et la configuration ORCA-R025

Le projet DRAKKAR a mis en place de nouveaux développements dans des modèles numériques basés sur le code OPA9 pour l'étude de l'océan, avec une configuration globale au $1/4^\circ$. Un des objectifs du projet est l'amélioration de la représentation et la paramétrisation de forçages, de topographie de fond ou encore des effets de tourbillons. C'est dans cette optique que s'insère le sujet de stage.

OPA est une famille de modèles de circulation générale développée par le laboratoire LOCEAN, dont OPA9 constitue la dernière évolution. C'est un modèle aux équations primitives à résoudre numériquement sur une grille de type C. La résolution au $1/4$ de degré de la configuration ORCA-R025, basée sur OPA9, est dite eddy permitting, car la relative finesse du maillage permet de résoudre une partie de l'activité tourbillonnaire.

Cette grosse configuration compte $1442 \times 1021 \times 46$ points sur une grille globale de la famille ORCA (Fig. 2). C'est celle utilisée par le projet MERCATOR (configuration POG).



*Fig. 2: Grille ORCA025 (1 point sur 20 représenté).
(DRAKKAR, Report of activity, 2005)*

De nouveaux apports caractérisent la configuration ORCA-R025, parmi lesquels:

1. L'implantation d'un nouveau schéma d'advection de vorticité relative qui devrait être mieux conservée que le précédent.
2. Une représentation de la bathymétrie en partial steps, qui doit mieux épouser la

topographie réelle. La représentation partial steps plutôt que full steps permet d'attribuer à la cellule de fond, par laquelle passe la ligne de topographie, non plus une valeur non entière (terre ou océan) mais une valeur intermédiaire tenant compte de la position relative de la topographie dans la maille.

3. Un nouveau forçage, CORE (Large et Yeager, 2004), destiné à être utilisé assez largement par la communauté, afin de comparer les différents modèles.

III.2. Les simulations étudiées

Actuellement, des études de sensibilité ont été, et sont encore réalisées, afin d'apprécier, entre autres paramètres, les apports de chacune des modifications apportées par DRAKKAR. Il s'agit de runs d'une durée de 10 ans. Le stage porte sur l'étude de deux de ces runs (G32 et G42).

Les runs étudiés sont des études de sensibilité, et n'ont donc été effectués que sur une durée de 10 ans. Ils ne sont pas par conséquent pas tout à fait stabilisés au bout de ce temps. Pour l'ensemble des études effectuées, des fichiers de moyennes des 3 dernières années ont été réalisés. Ainsi, les questions de variabilité ont été abordé à pas de temps mensuel, sur des fichiers de moyennes des mois correspondant des trois dernières années.

Si les phénomènes mésoéchelles sont sensés être résolus par la configuration au 1/4 de degré, les fichiers mensuels, qui plus est moyennés sur trois ans, tendent à lisser et dissiper cette information. Cependant, le modèle résolvant cette échelle de phénomène, leur influence moyenne sur la dynamique est toujours présente dans ces fichiers moyennés.

Les comportements des deux simulations dans l'Océan Austral peut être modifié, outre quelques modifications sans conséquences, par un ensemble de modifications dont les impacts sur la dynamique de l'océan Austral peuvent être plus ou moins importants.

Modifications (de G32 à G42) dont les conséquences seront les plus importantes, et mises en relation avec les résultats de l'étude:

- Modification du forçage (Tab. 3):

Le forçage du run G32, nommé 'DRAKKAR set 1' est basée sur une climatologie des années 1992-2000, et calculées à partir de données de sources différentes. C'est le forçage très utilisé au LOCEAN jusqu'à aujourd'hui.

Le run G42 est soumis à un forçage nouveau, qui doit être proposé dans le cadre d'intercomparisons de modèles, avec l'arrivée prochaine d'une version interannuelle des années 1950 à 2005, au lieu d'une climatologie comme c'est ici le cas.

	Run G32	Run G42
Tension de vent	Diffusiomètre ERS de 50°S-50°N; NCEP (1992-2000) des pôles à 60°S et 60°N; combinaison linéaire des 2 entre 50°S-60°S et 50°N-60°N	Recalculée à partir des courants du modèle et u,v les vitesses; NCEP (1984-2002) des pôles à 60°S et 60°N
Flux d'eau douce; précipitation	Produit satellite	Mélange de produits satellites
Chaleur latente	Calculée avec formule bulk CLIO	Calculée avec formule bulk CORE (Large et Yeager 2004)
Température de l'air	Moyenne journalière NCEP	NCEP (moyenne 1984-2000)
Humidité de l'air	Climatologie CLIO	NCEP corrigé (1984-2000)
Module de la vitesse de vent	Combinaison ERS et NCEP	Mêmes u,v que pour la tension de vent
Flux radiatifs	Calculés avec formule astronomique, et couverture nuageuse de climatologie CLIO	Mesures satellites (1992-2000)

Tab. 3: modifications dans le forçage entre les runs G32 et G42.

- Des retouches de la bathymétrie, en particulier dans la zone des détroits indonésiens, qui pourraient influencer sur le throughflow indonésien.

Modifications (de G32 à G42) dont les conséquences ne seront pas considérées comme influant significativement sur le comportement de l'océan Austral, au regard notamment des changements du forçage:

- Runoff des rivières, mais sans changements dans la zone antarctique.
- Une procédure d'équilibrage global du terme de rappel en SSS qui a été retirée dans le run G42. On supposera cependant que les effets de cette modification ne se font pas ressentir sur des runs d'une durée de 10 ans seulement.

IV-Étude des sorties du modèle

Pendant la majeure partie du stage, seule la simulation G32 était disponible à l'étude dans le cadre du stage. Or, celui-ci est affecté d'une convection dans le gyre de Weddel beaucoup trop élevée, atteignant le fond, et ne semblant pas vouloir se stabiliser au bout des 10 ans du run. Ceci est susceptible d'avoir des conséquences importantes sur la caractérisation de la position des fronts, comme de l'étude de la région limitrophe au gyre en général. L'arrivée début juin de la simulation G42 ne présentant plus cette anomalie a permis une étude dont les résultats peuvent être considérée d'un intérêt supérieur.

Cette anomalie se voit par exemple dans la profondeur de la couche de mélange en moyenne mensuelle pour le mois de juillet (Fig. 3), au niveau du gyre de Weddel: pour la simulation G32 (a), l'ensemble du domaine atteint des profondeurs supérieures à 4000 m (profondeur de la couche de mélange correspondant à une augmentation de la densité σ_0 de 0.01 kg/m³). La simulation G42 (b) ne présente plus cette anomalie, qui n'apparaît pas dans la climatologie mensuelle de la couche de mélange à partir des profils température et salinité des données NODC et WOCE, et l'ensemble des profils issus des flotteurs ARGO (c) (Critère en densité de 0.03 kg/m³, ici).

IV.1. Transport total aux sections méridiennes d'étude

Afin de comparer le comportement de l'océan Austral tel que simulé par les deux simulations, les transports zonaux nets ont été calculés en différentes sections (Fig.4):

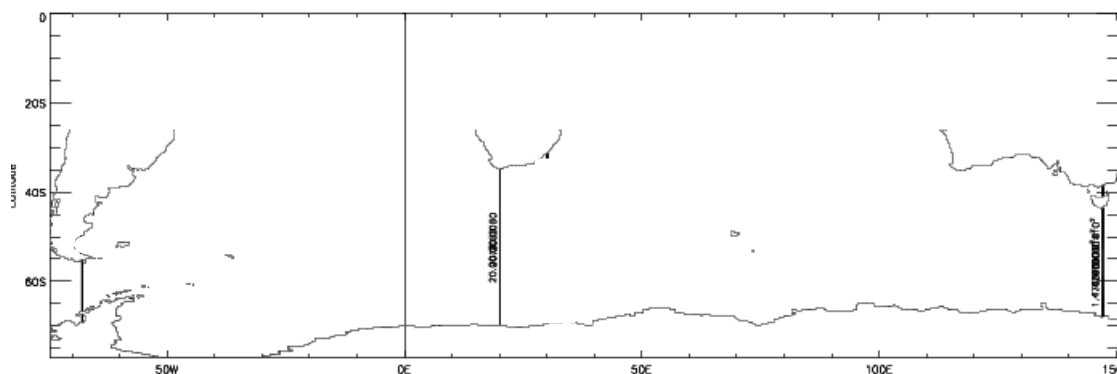


Fig. 4: Position des sections de calcul de transports totaux.

- Passage de Drake, à 68 degrés ouest.
- Afrique du Sud, à 20 degrés est.
- Tasmanie, à 147 degrés est.

Ces transports correspondent à celui l'ACC au passage de Drake, où il n'y a pas de courant de retour. Par contre, la présence du courant des Aiguilles et de son retour, ainsi que du gyre de Weddel ou de la pénétration de l'eau Nord Atlantique

Profonde (NADW), au sud de l'Afrique du Sud contribuent au transport total, et les valeurs de transport ne représentent donc pas celui de l'ACC. Il en est de même à la section méridienne au sud de la Tasmanie, avec la présence de courants de fuite.

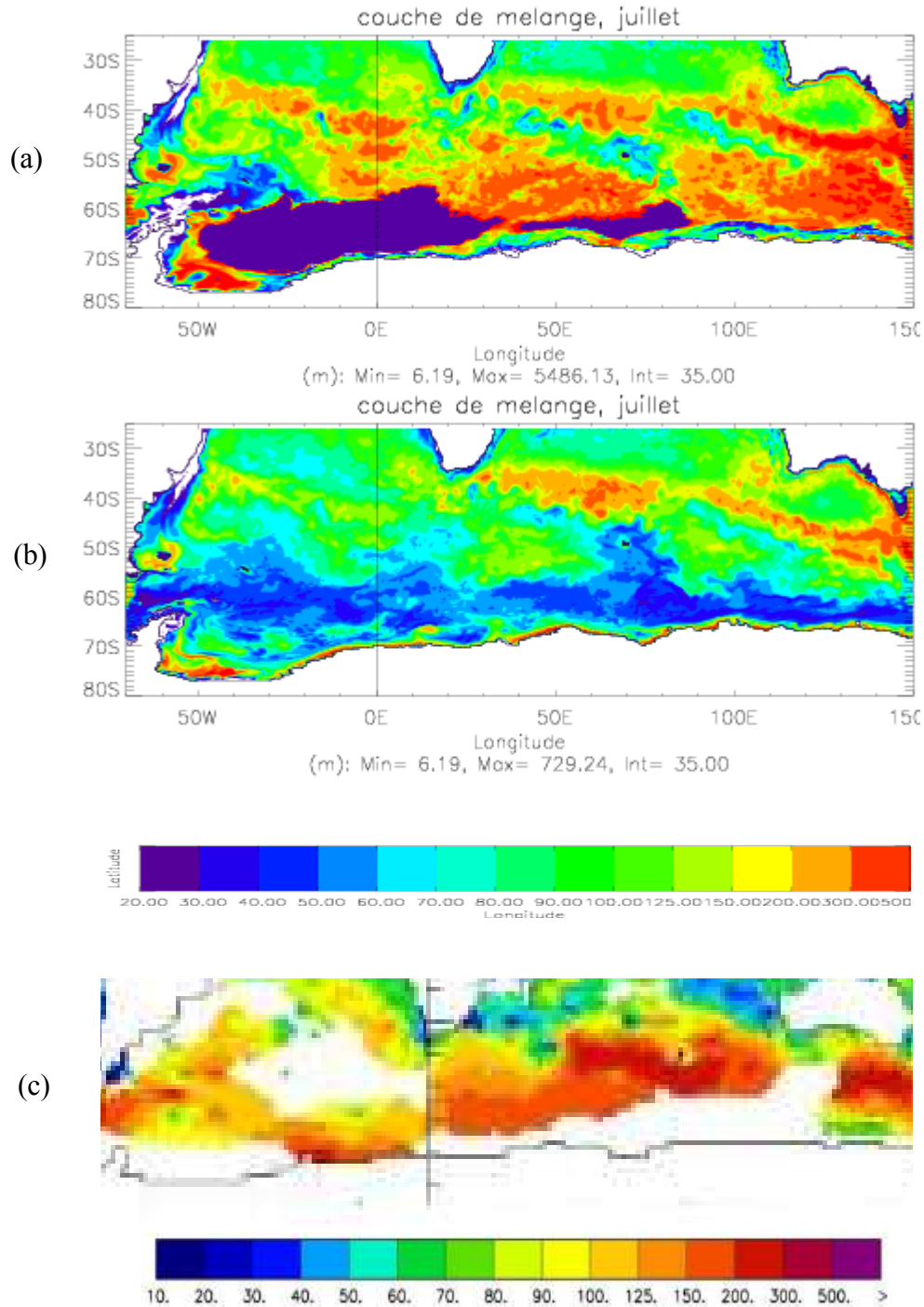


Fig. 3.: couches de mélanges du mois de juillet issues des simulations (a) G32, et (b) G42, et enfin (c) de données de mesures diverses.

IV.1.1. Moyenne annuelle du transport zonal total

Les transports totaux en moyenne annuelle calculés aux différentes sections, sur les moyennes des années 8, 9 et 10 des tests de sensibilité G32 et G42 donnent (Tab. 4):

<i>Transport (Sv)</i>	<i>Drake</i>	<i>Australie</i>	<i>Afrique du Sud</i>
Modèle inverse	140±6	165±10	-
XBT ou courantomètres et hydrographie	134±11.2	147±6.1	-
Run G32	143.5	164.5	144.7
Run G42	120.4	139.8	121.7

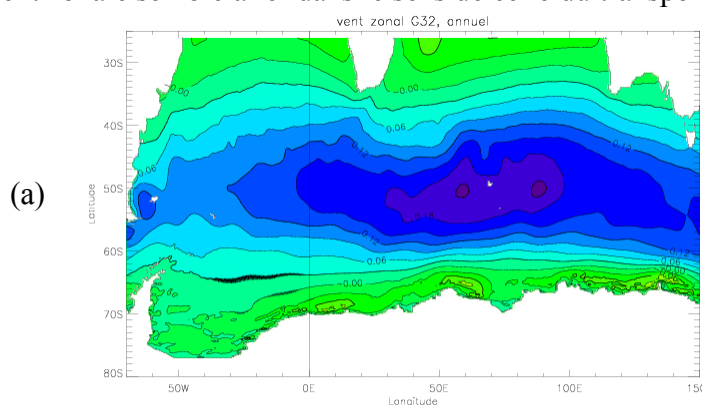
Tab. 4: transports totaux de l'ACC.

Le calcul du transport au sud de l'Afrique du Sud permet de déduire la valeur moyenne du transport de masse d'eau en provenance de Bering. On obtient 1.2 Sv pour le run G32, et 1.3 pour G42, ce qui est en bon accord dans les deux cas avec les valeurs acceptées actuellement (1 Sv, Coachman and Aagaard, 1988).

On constate que les valeurs du run G32 sont dans les fourchettes avancées par les différents auteurs, mis à part pour les 147±6.1 Sv proposés par Rintoul et al. (2002) au niveau de l'Australie. Les valeurs du modèle sont d'ailleurs très proches des estimations de Ganachaud et al. obtenues par leur modèle inverse.

En revanche, le run G42 se trouve en dehors des fourchettes avancés, avec une tendance à la sous-estimation. La principale raison derrière ce déficit en transport, est lié au passage d'un forçage 'DRAKKAR set 1' à CORE.

Une analyse de la tension zonale de vent en moyenne annuelle montre une intensité plus faible au nord de 60°S dans la simulation G42 (Fig. 5). La tension est quasiment identique plus au sud puisque basée sur NCEP dans les deux cas, mais sur un plus grand nombre d'années dans le cas de la simulation G42. Ainsi l'intensité de la tension de vent zonale semble aller dans le sens de celle du transport zonal total.



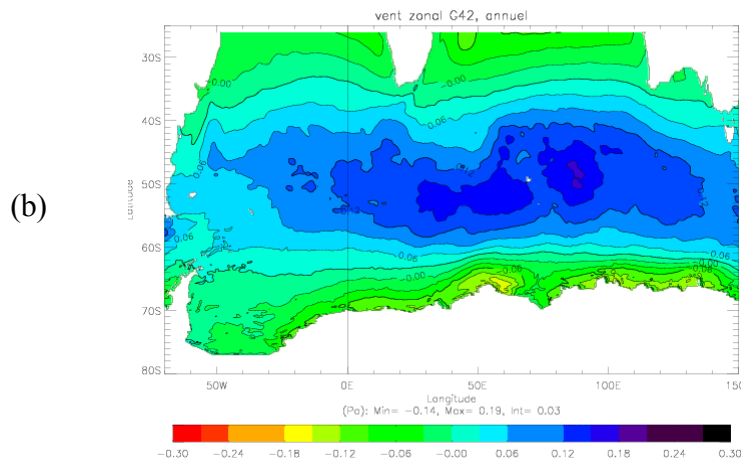


Fig. 5: vent zonal moyen des runs (a) G32 et (b) G42.

IV.1.2. Variabilité saisonnière des transports zonaux totaux

Le modèle permet d'aborder la question de la variabilité en général, dans une région où celle-ci n'est que mal connue. Ainsi la variabilité saisonnière du transport total zonal, sur des moyennes mensuelles des années 8 à 10 donne (Tab. 5):

	<i>Run G32</i>			<i>RunG42</i>		
	Drake	Afr. Sud	Tasmanie	Drake	Afr. Sud	Tasmanie
janvier	141.38	142.73	157.55	128.66	129.66	147.53
février	143.84	144.74	161.22	129.97	130.7	148.36
mars	144.86	145.92	164.82	126.15	127.5	143.28
avril	149.07	150.22	171.17	117.78	119.46	136.62
mai	145.12	146.19	167.28	115.93	117.45	134.27
juin	139.96	141.81	164.82	114.1	115.31	132.27
juillet	138.44	139.64	164.26	105.96	107.98	127.45
août	143.57	145.18	166.35	107.84	109.02	130.3
Septembre	142.93	144.02	165.42	119.93	121.39	141.35
octobre	143.7	144.63	166.2	119.7	120.73	139.72
novembre	146.92	148.37	166.38	126.52	127.62	145.1
décembre	142.46	143.44	159.07	132.47	133.36	151.86
Moyenne annuelle	143.52	144.74	164.54	120.42	121.68	139.84

Tab. 5: transports mensuels de l'ACC (Sv)

Si l'on regarde l'évolution du transport aux trois sections (Fig. 6), dans chaque cas on constate:

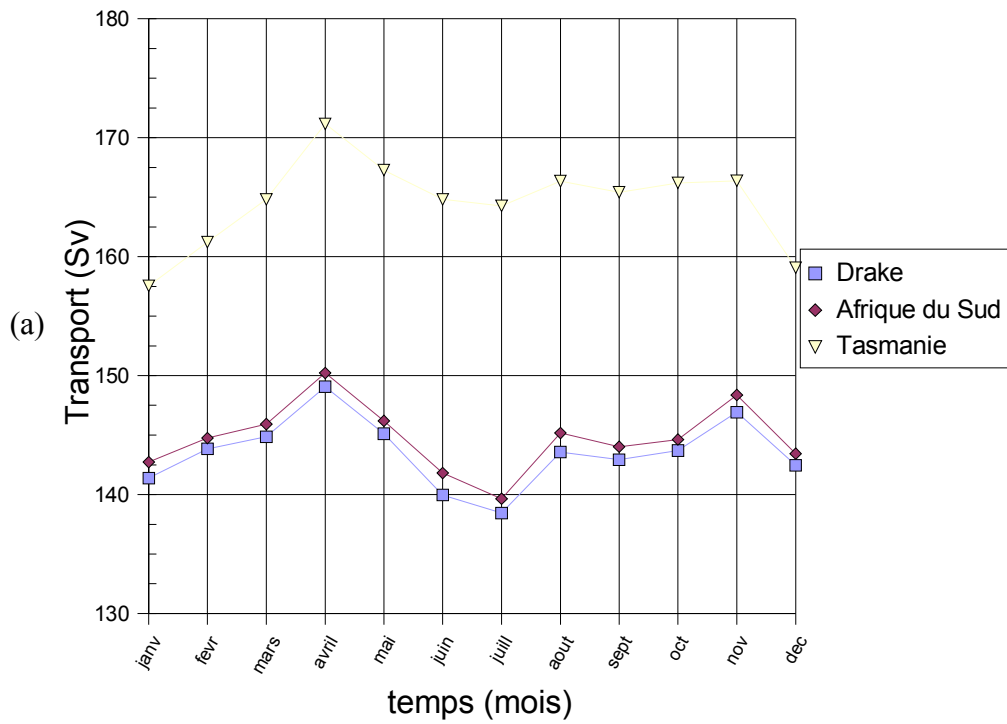
Run G32: une amplitude de variation de l'ordre de 10 Sv, franchie en trois mois, d'avril à juillet. La variation semble prendre une allure périodique, de période semi-annuelle. Les extremums d'intensité sont situés aux mois d'avril, avec un pic assez fort à 149.1 Sv, et au mois de novembre avec un pic moins prononcé.

Run G42: une amplitude de variation nettement plus élevée atteignant 26.5 Sv entre les mois de décembre (valeur maximale) et le mois de juillet. L'allure de variation est assez nettement périodique, mais ici la période est plutôt annuelle.

Les deux simulations présentent un minimum de transport autour du mois de juillet, les variations étant sensiblement différentes par ailleurs. On trouve par contre un pic maximal du transport autour des mois de décembre/janvier dans la simulation G42, à l'inverse de G32.

Pour chercher à lier ces allures de variations très fortement différenciées, une observation des variations de la tension zonale a été également initiée. Un calcul de la moyenne zonale de la tension zonale de vent aux latitudes de Drake, et dans la gamme de longitude de l'étude, ne met en évidence aucune corrélation. En revanche, une observation de la variation de la tension de vent zonale, en moyenne méridienne et aux longitudes du passage de Drake et au sud de l'Australie, semble plus en accord avec la variabilité du transport total. Ceci tendrait à conclure à une influence très locale de la tension zonale de vent sur la variabilité du transport dans le modèle.

Transport à travers les 4 sections méridiennes (G32)



Transport à travers les 4 sections méridiennes (G42)

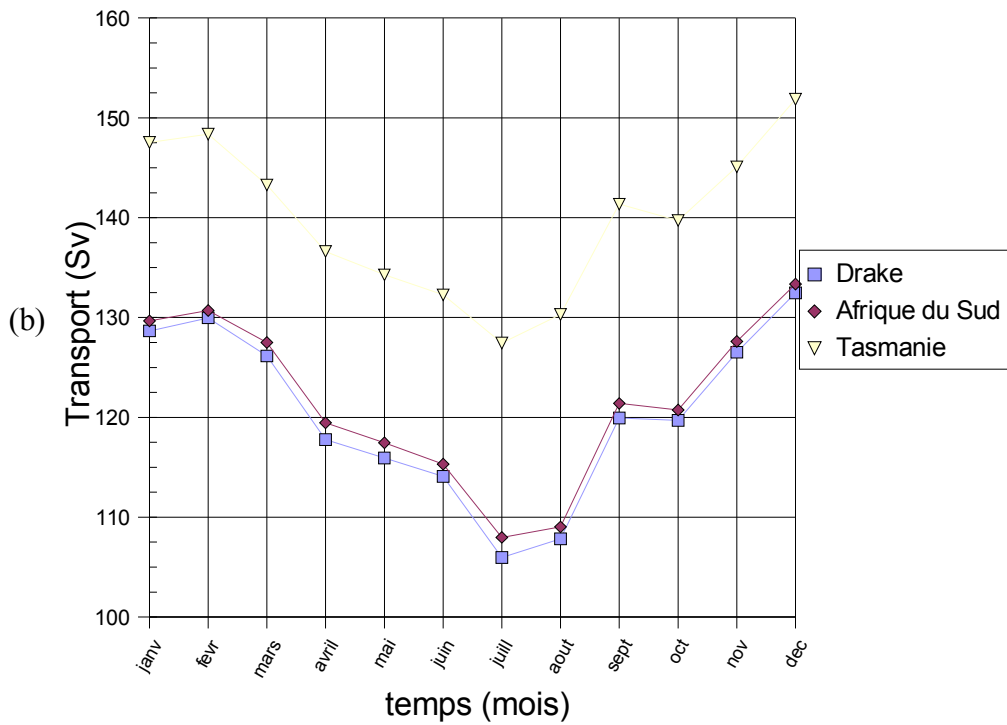


Fig. 6: Variabilité mensuelle du transport zonal total moyen (a) pour les simulations G32 et (b) G42

IV.2. Étude des fronts de l'ACC:

Les caractérisations des fronts selon Orsi et al. (95) (Fig. 7) exploitables dans le cadre du modèle sont celles portant sur les valeurs de salinité et de température. Cependant, une des difficultés du modèle est la reproduction de valeurs de salinité, qui sont trop élevées par rapport à la réalité et tendent à dériver. Ceci rend l'utilisation des critères en salinité inenvisageable dans la détermination des fronts. Ainsi, seuls les critères en température ont été utilisés. Or, les températures sont moins stables au cours de l'année que ne l'est la salinité, ce qui tend à atténuer un peu la pertinence de la détermination des fronts dans le cadre d'une étude de variabilité (il faudrait pouvoir recouper avec le critère en salinité). D'un autre côté, ceci nous permet de tester la robustesse du critère en température.

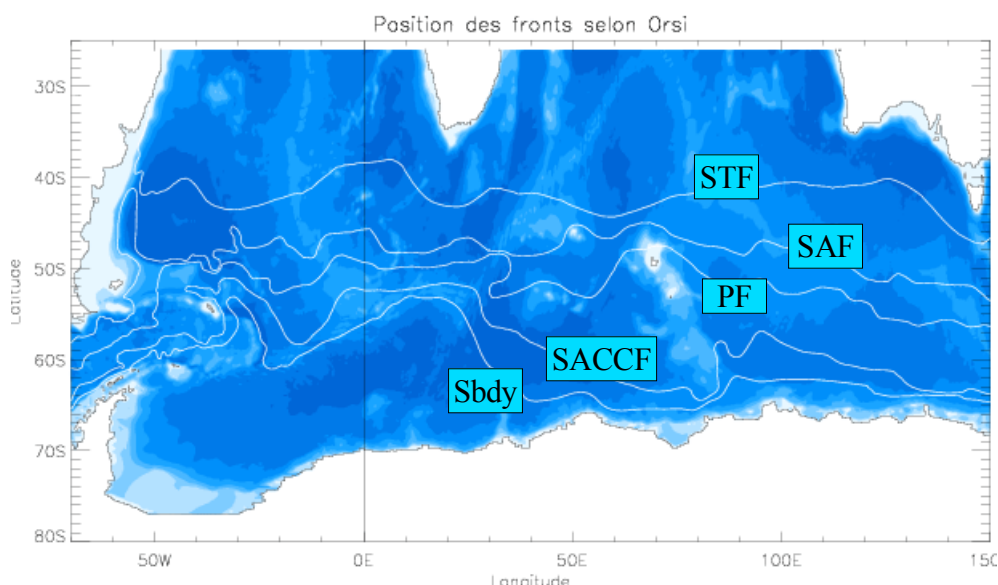


Fig. 7: Position des fronts selon les critères d'Orsi et al. (95)

On constate tout d'abord l'aptitude du modèle à créer les différents fronts de l'ACC, qui se retranscrivent par les zones de forts gradients méridiens de température. En prenant par exemple le mois de janvier pour les deux simulations au sud de l'Afrique du Sud (à 30 degrés est), on constate la ressemblance dans l'allure des isothermes avec les données de WOCE, et le bonne concordance dans le positionnement de ces isothermes (à la même longitude, radiale I6) (Fig. 8).

Sur cette figure, on peut également constater la nette amélioration du comportement dans le gyre de Weddel du run G42, où la convection n'atteint plus le fond, comme c'était le cas dans le run G32.

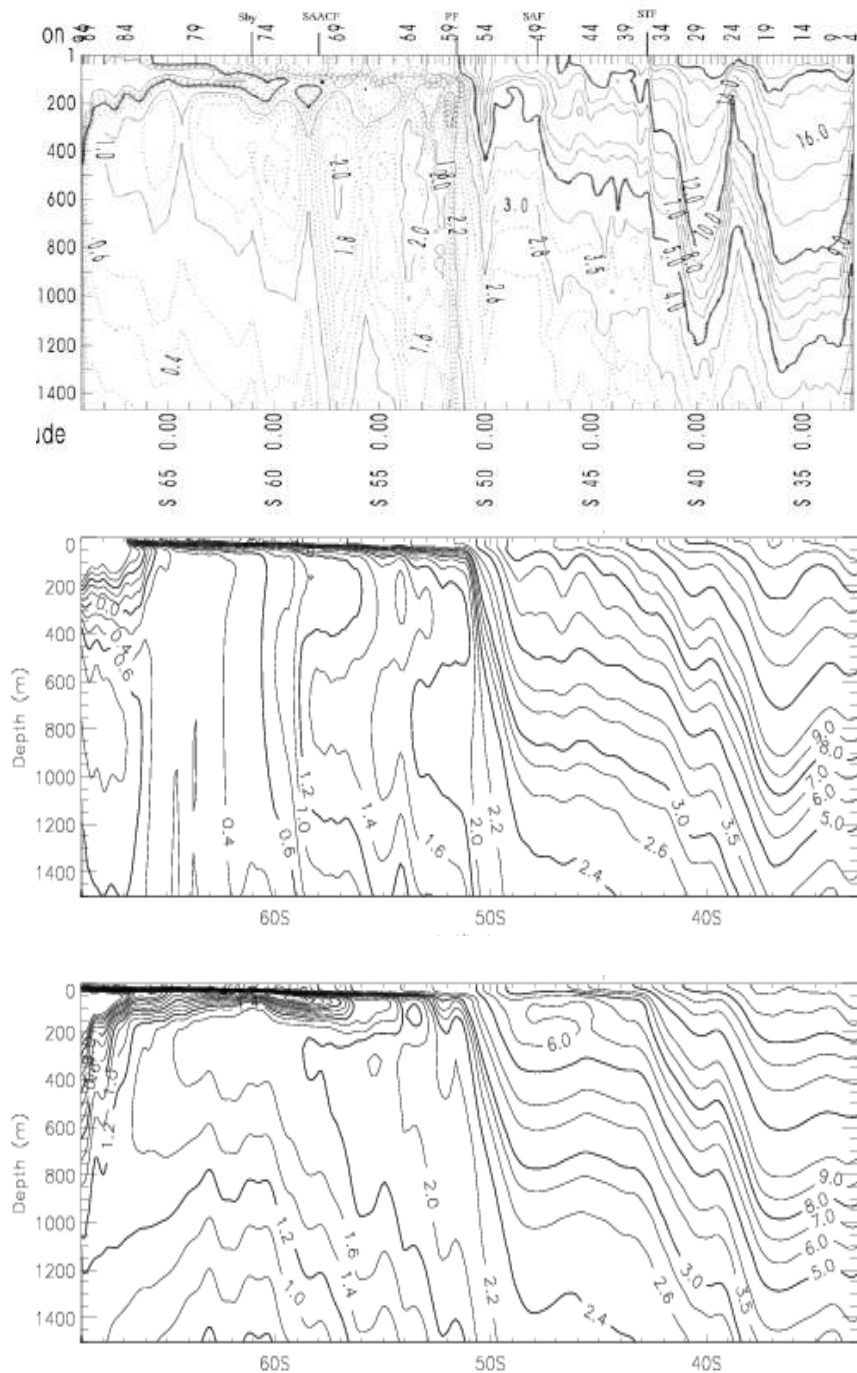


Fig. 8: (a) profil de température potentielle sur la radiale I6 de WOCE, 30degrés est; (b) profil de température du run G32, 30 degrés est au mois de janvier; (c) idem(b) pour le run G42.

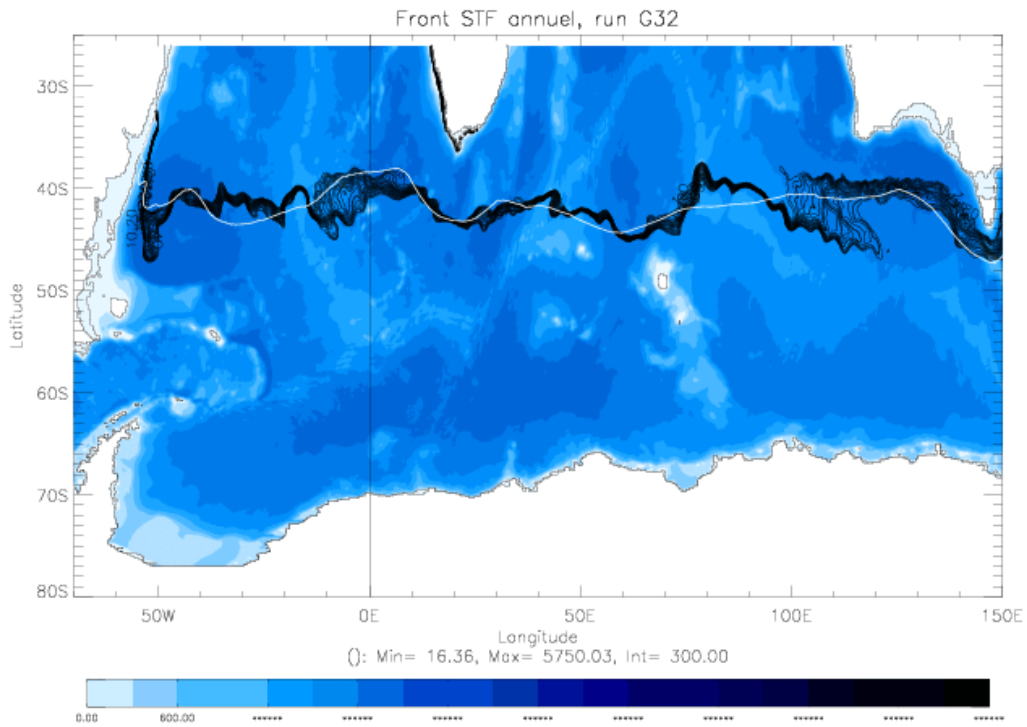
IV.2.1. Position des fronts en moyenne annuelle

L'application des critères d'Orsi et al. (95) en température aux fichiers de moyennes annuelles, permet de positionner les fronts dans chacun des runs (Fig. 9).

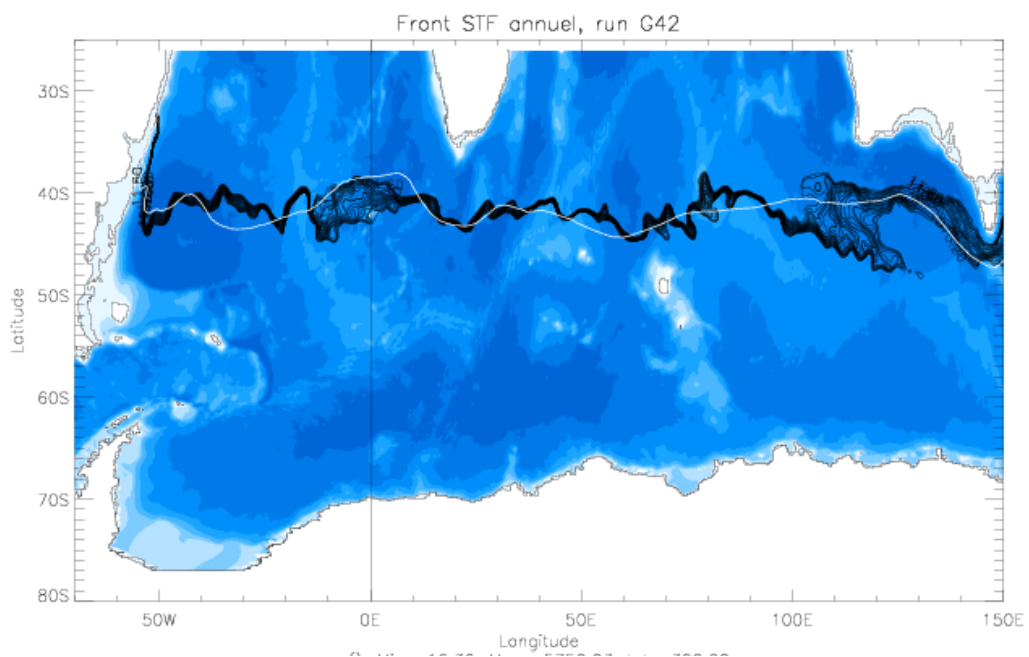
Fig. 9: Position des fronts (moyenne annuelle) du modèle (noir) et selon Orsi (blanc), dans les runs G32 et G42. STF, SAF, PF puis SACCF.

Position du Front Sub-Tropical (STF) en moyenne annuelle, sur les simulations G32 et G42 (noir). Comparaison avec les fronts selon Orsi et al. 95 (blanc).

Run G32:

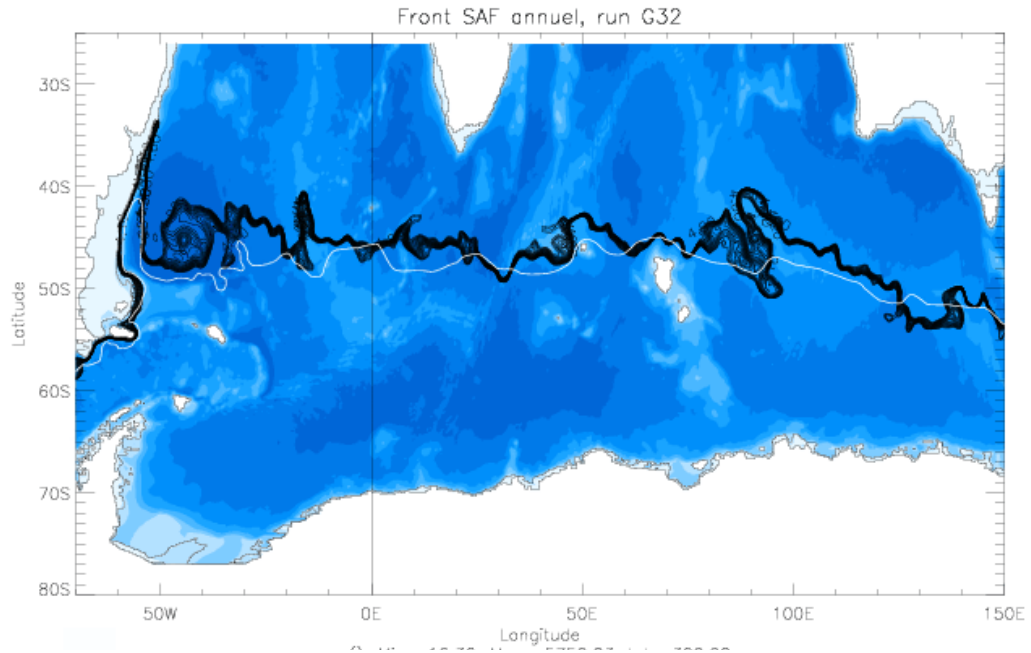


Run G42:

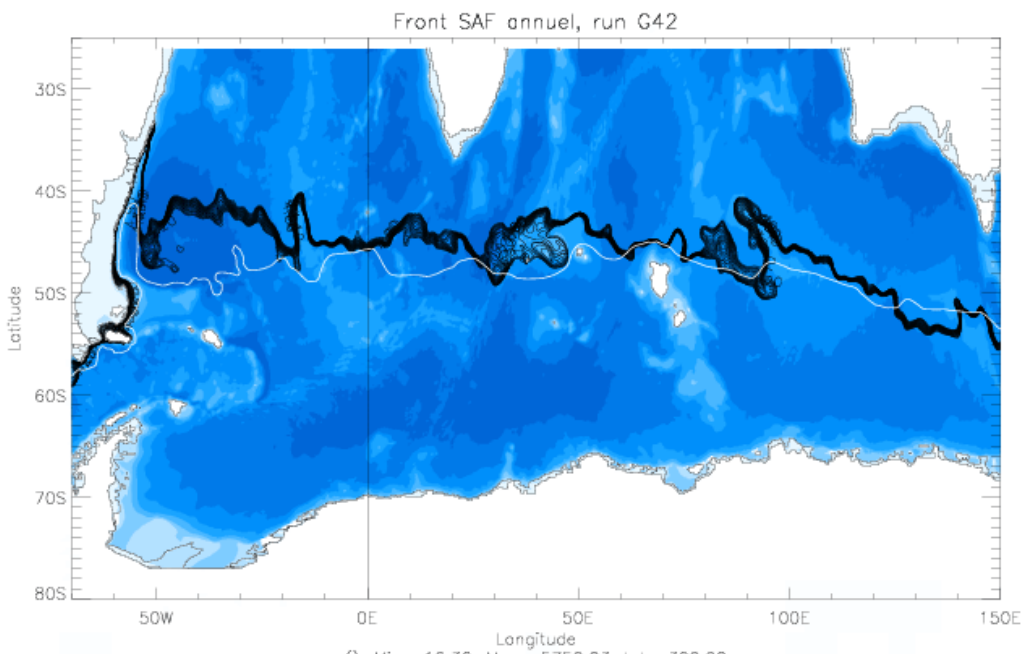


Position du Front Sub-Antarctique (SAF) en moyenne annuelle, sur les runs G32 et G42 (noir). Comparaison avec les fronts selon Orsi (blanc).

Run G32:

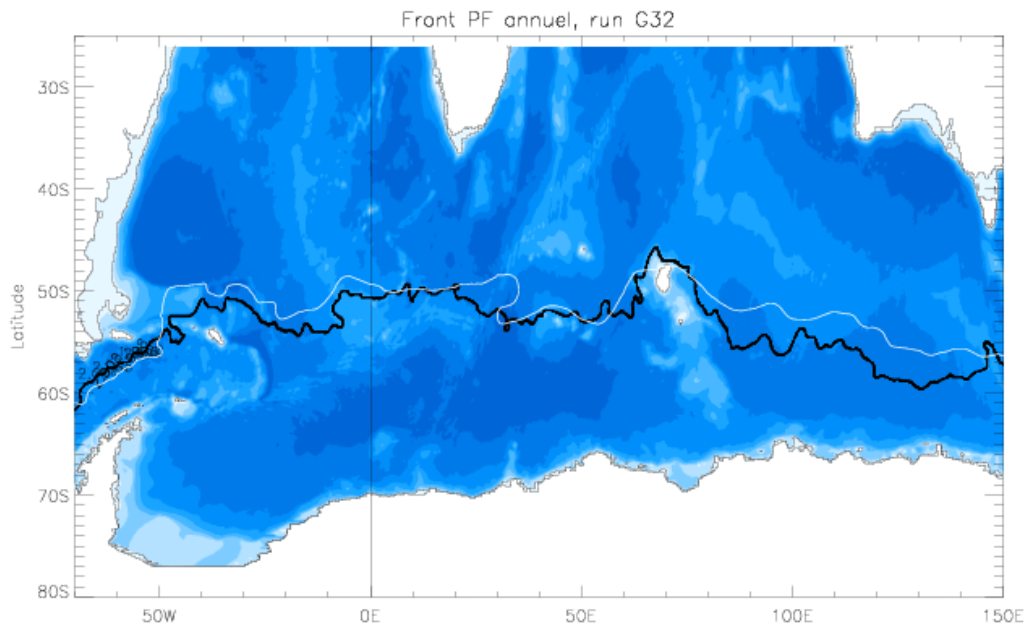


Run G42:

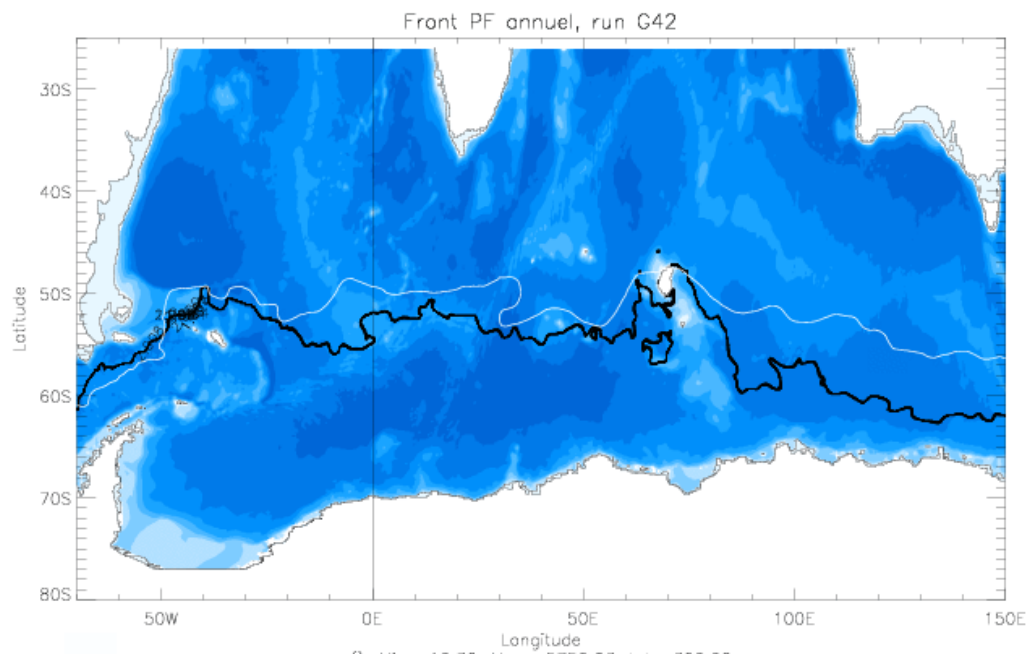


Position du Front Polaire (PF) en moyenne annuelle, sur les runs G32 et G42 (noir). Comparaison avec les fronts selon Orsi (blanc).

Run G32:

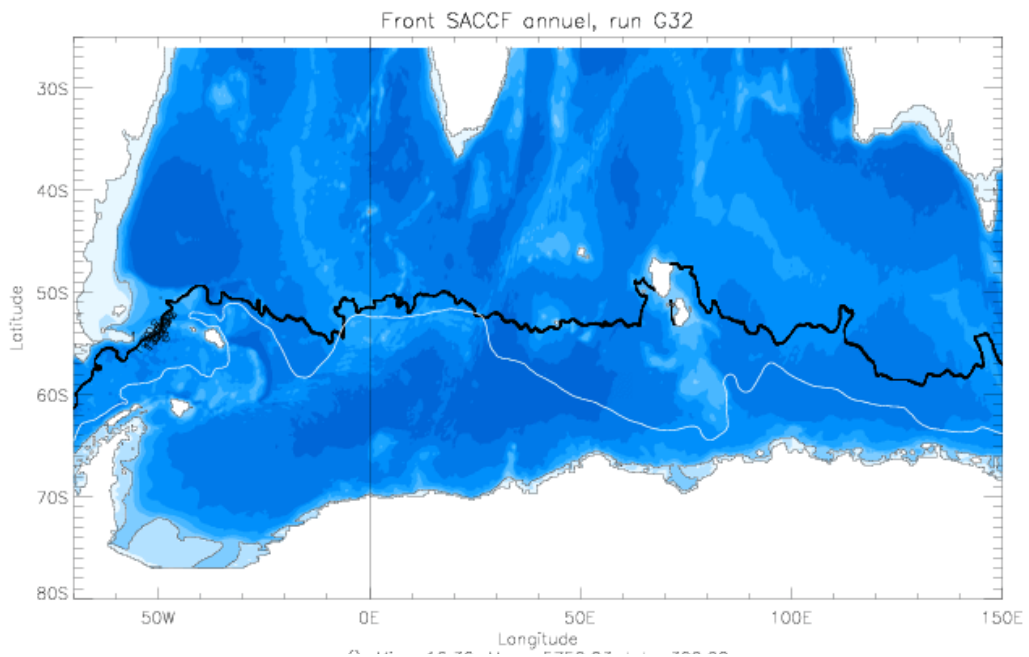


Run G42:

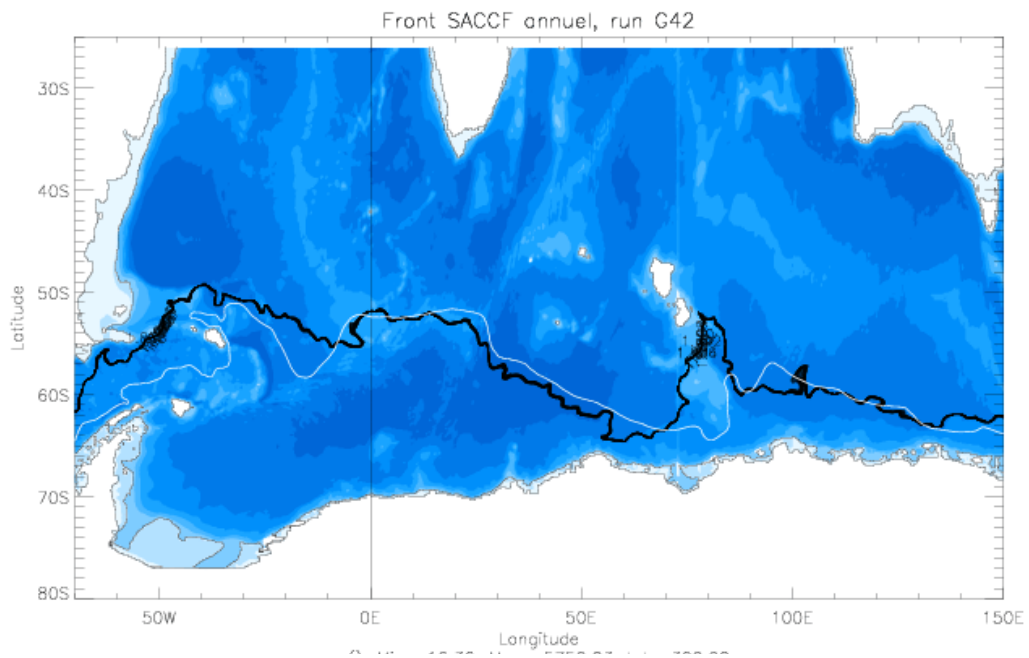


Position du Front Sud de l'ACC (SACCF) en moyenne annuelle, sur les runs G32 et G42 (noir). Comparaison avec les fronts selon Orsi (blanc).

Run G32:



Run G42:



Pour les 2 fronts les plus au nord, soit le STF et le SAF, on constate des positions assez proches entre les 2 simulations. Le front STF est dans l'ensemble proche du front d'Orsi et al. (95), mais le SAF est décalé légèrement au nord. La simulation G42 place le SAF un peu plus au nord encore que la première, notamment sur la partie atlantique du tronçon considéré. Pour les fronts se situant plus au sud, les PF et SACCF, les écarts de résultats sont plus conséquents, l'influence du gyre de Weddel se faisant plus sentir.

Concernant le PF, le modèle a cette fois-ci tendance à placer le front plus au sud que la définition d'Orsi et al. (95). Ceci est vrai pour le run G32 sur l'ensemble du tronçon d'ACC étudié, avec un décalage vers le sud légèrement plus accentué coté indien. Mais l'allure générale est assez bien reconstituée, avec un rapprochement vers le front d'Orsi et al. (95) notamment aux passages où la topographie peut influencer sur le parcours du jet. Pour ce qui est de la simulation G42, le décalage vers le sud est plus important encore, dans l'Indien, mais aussi dans l'est Atlantique. On constate ici que les points de rapprochements dans la simulation G32, qui pourraient être imputable à la topographie, ne sont plus observés dans la simulation G42. Le décalage important vers le sud semble avoir déplacé ces points particuliers des fronts dans des zones plus au sud, en contournant la topographie. Cela se voit par exemple au niveau de l'île Kerguelen, où le front contourne l'île par le sud plutôt que par le nord, ou encore vers 5 degrés ouest, où le front semble plonger vers le sud au lieu de remonter vers le nord, à l'approche du massif principal de la dorsale indo-atlantique.

La différence de positionnement des fronts la plus forte correspond au SACCF. Son comportement est bien mieux représenté dans le run G42. Son positionnement est quasiment identique dans les deux runs du côté atlantique du tronçon d'ACC. On observe en outre un décalage vers le nord de 3 à 7 degrés depuis le passage de Drake jusqu'au massif principal de la dorsale indo-atlantique, le front du modèle contournant les îles Sandwich entièrement par le nord, la définition d'Orsi donnant un contournement par le sud.

Les deux runs diffèrent principalement sur la position du SACCF côté indien. La définition d'Orsi et al. (95) indique une plongée du front vers le sud à l'est du gyre de Weddel, de sorte que le contournement du plateau de Kerguelen s'effectue vers 65 degrés sud. Le gyre beaucoup trop intense du run G32 semble empêcher une telle déportation vers le sud, et le front semble chercher à contourner le plateau par le nord. En revanche, le front est beaucoup mieux représenté entre 25 et 75 degrés est, malgré une remontée à 70 degrés est, de façon à contourner le massif sud du plateau de Kerguelen par le nord plutôt que par le sud. Sur le tronçon situé à l'est de ce plateau, le SACCF du run G42 est en bon accord avec la définition d'Orsi et al. (95), alors que le run G32 présentait un décalage vers le nord très important, de 7 à 8 degrés par endroits, certainement dû à la déviation vers le nord du plateau de Kerguelen par le gyre.

IV.2.2. Variabilité mensuelle des fronts

Les critères d'Orsi et al. (95) en température appliqués aux moyennes mensuelles donnent la position de chacun des fronts aux différents mois de l'année.

L'observation de la variabilité aux mêmes sections d'étude que plus haut donne les allures d'évolutions. Outre la visualisation du déplacement des fronts sur l'ensemble du domaine de Drake à la Tasmanie, une étude quantifiée, aux sections

méridiennes d'étude, donne les déplacement méridien de la figure 10 pour le SAF (Fig. 10).L'étude n'a été menée que sur le Front Antarctique Subtropical.

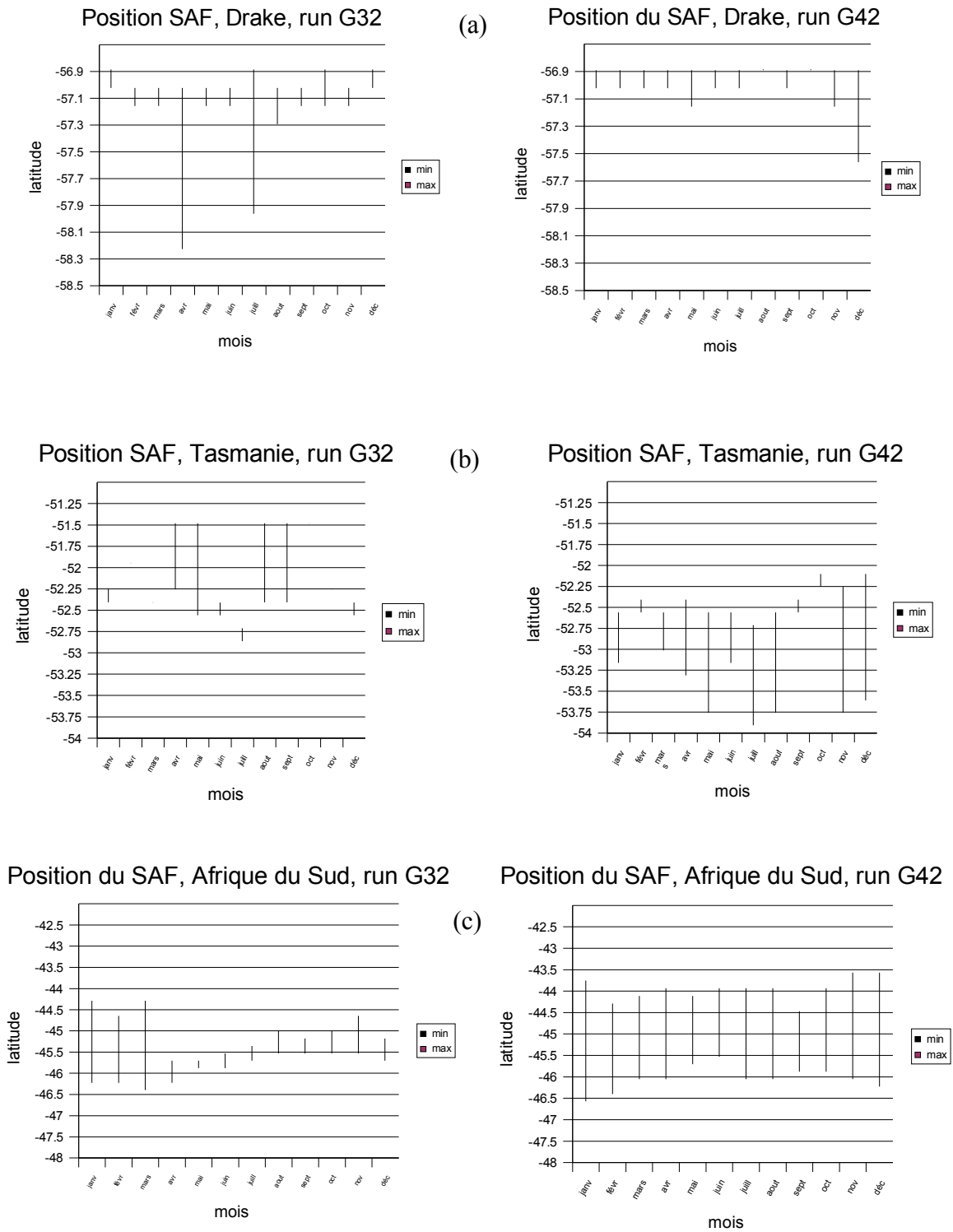


Fig. 10: Variabilité mensuelle du SAF pour les runs G32 et G42, pour les sections méridiennes au sud (a) du passage de Drake, (b) de la Tasmanie et (c) de l'Afrique du Sud.

Le SAF montre une stabilité relativement plus importante au passage de Drake qu'aux autres sections méridiennes, avec une amplitude de variation méridienne inférieure au demi degré dans la simulation G32, et une quasi immobilité pour G42. Aux autres sections méridiennes, l'amplitude, difficile à quantifier de par la plage variable de positionnement du front, semble ne pas trop excéder le degré de latitude.

La gamme du critère d'Orsi et al (95) est parfois assez large selon le mois, la section et la simulation considérée, mais des allures de variations saisonnières semblent se dégager dans certains cas.

Pour la simulation G32, il apparaît une variabilité saisonnière biannuelle au niveau de la Tasmanie, mais annuelle au sud de l'Afrique du Sud. Le front est le plus au sud vers la Tasmanie à la fin de l'été Austral, et le plus au nord six mois plus tard.

En revanche, la nature de la variabilité saisonnière semble moins distincte dans la simulation suivante, et les plages du critère d'Orsi et al. (95) plus souvent diffuses, dénotant un front moins marqué par son gradient de température.

V- Conclusion

Cette étude a mis en évidence la forte différence entre deux simulations, dans la représentation du transport net aux sections méridiennes situées: au passage de Drake, au niveau de l'Afrique du Sud, et au niveau de la Tasmanie. Une analyse de la tension de vent zonale et de sa variabilité saisonnière, dans chacune des simulations, a permis de constater une corrélation avec l'intensité moyenne du transport d'une part, et sa variabilité, cette dernière semblant suivre l'évolution de la tension de vent très localement aux niveaux des différentes sections.

Par ailleurs, l'analyse du positionnement des fronts, selon les critères d'Orsi et al. (95) en température, a également révélée une différence de comportement notable. Le parcours des fronts semble être fortement lié à la topographie, mais les parcours empruntés sont parfois très différents, révélant une sensibilité importante dans le cadre du modèle. Toutefois, la convection profonde du gyre de Weddel, dans la simulation G32, participe certainement au mauvais positionnement des fronts les plus au sud de l'ACC, en particulier le SACCF.

Afin de mieux identifier la part de variabilité saisonnière réellement imputable à l'ACC, au sud de l'Afrique et de l'Australie, et dans les deux simulations, une étude lagangienne a été initiée. Je n'ai pas encore pu étudier ces résultats de manière très approfondie. Ils pourraient permettre de mieux appréhender une possible sensibilité de l'ACC, ou le cas échéant de courants tels que le courant des Aiguilles, aux modifications apportées entre les deux simulations, notamment en terme de tension de vent.

Ces perspectives constitueront une première piste d'approfondissement pour mon travail de thèse, à mettre en relation l'étude initiée sur le modèle.

Bibliographie

- Arhan, M., Heywood K.J. And King B.A., The deep waters from the Southern Ocean at the entry to the Argentine Basin, *Deep-Sea Research II* 46, 475-499, 1999.
- Arhan, M., Mercier H. and Park Y-H, On the deep circulation of the eastern South Atlantic Ocean, *Deep-Sea Research I* 50, 889-916, 2003.
- Belkin I. M. and Gordon A.L. Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania, *J. Geophys. Res.*, 101, 3675-3696, 1996.
- Bryden H.L, and Cunningham S.A., How wind-forcing and air-sea heat exchange determine the meridional temperature gradient and stratification for the Antarctic Circumpolar Current, *J Geophys Res*, 108, C8, 3275, 2003.
- Budillon G. and Rintoul, S.R. Fronts and upper ocean thermal variability south of New Zealand, *Antarctic Science*, 15(1): 141-152, 2003.
- Cunningham S.A., S.G. Alderson and B.A. King, Transport and variability of the Antarctic Circumpolar Current in Drake passage, *J Geophys Res.*, 108, C5, 8084, 2003.
- De Boyer Montégut, C., Madec G., Fischer A.S., Lazar A. and Iudicone D., Mixed layer depth over the global océan: An examination of profile data and a profile based climatology, *J Geophys Res*, 109, C12003, 2004.
- Ganachaud, A. and Wunsch C., Large-Scale Heat and Fresh Transports during the World Ocean Circulation Experiment, *J Climate*, 16, pp. 696-705, 2003.
- Ganachaud, A., Large Scale Oceanic Circulation and Fluxes of Freshwater, Heat, Nutrients and Oxygen, Doctoral Dissertation, 2000.
- Gordon, A.L., D.T. Georgi, and H.W. Taylor, Antarctic Polar Front Zone in the western Scotia Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 7, 309-328, 1977b.
- Heywood, K. J. and King B.A., Water masses and baroclinic transports in the South Atlantic and Southern Oceans, *J Marine Research*, 60, 639-676, 2002.
- Heywood, K. J., M. D. Sparrow, J. Brown, and R. R. Dickson, Frontal structure and Antarctic Bottom Water flow through the Princess Elizabeth Trough, *Antarctica, Deep Sea Res.*, Part I, 46, 1181-1200, 1999.
- Holliday N.P. and J.F. Read, Surface oceanic fronts between Africa and Antarctica, *Deep Sea Res I*, 45, 217-238, 1997.
- Klatt, O., Fahrbach, E., Hoppema, M. and Rohardt G., The transport of the Weddel Gyre across the Prime Meridian.
- Legeais, J.F., Etude de données hydrologiques historiques récoltées dans l'océan austral au sud de l'Afrique: Transport du Courant Circumpolaire Antarctique et distribution spatiale des fronts océaniques, stage de DEA, LPO Ifremer Brest France, 2004.
- Lutjeharms, J. R. E., and H. R. Valentine, Southern Ocean thermal fronts south of Africa, *Deep Sea Res.*, 31, 1461-1475, 1984.
- Nowlin, W.D., Jr., T. Whitworth III, and R.D. Pillsbury, Structure and transport of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage from short-term measurements, *J. Phys. Oceanogr.*, 7, 788-802, 1977.
- Orsi, A. H., Smethie, W.M. and Bullister J.L., On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements, *J Geophys Res*, 107, C8, 2002.
- Orsi, A. H., T. W. Whitworth III, and W. D. Nowlin Jr., On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep Sea Res.*, Part I 42, 641-673, 1995.
- Phillips, H. E., and S. R. Rintoul, A mean synoptic view of the Subantarctic Front south

- of Australia, *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 1553-1563, 2002.
- Radko, T. and Marshall J., The Antarctic Circumpolar Current in three dimensions, MIT, Dept. Earth, Atmospheric and planetary Sciences.
- Rintoul, S.R., J.R. Donguy, and D.H. Roemmich, Seasonal evolution of upper ocean thermal structure between Tasmania and Antarctica, *Deep Sea Res., Part I*, 44, 1185-1202, 1997.
- Rintoul Stephen R, Sokolov S. and Church J., Antarctic Cooperative Research Centre and CSIRO Marine Research, Hobart, Tasmania, Australia, A six year record of baroclinic transport variability of the Antarctic Circumpolar Current at 140 E derived from expendable bathythermograph and altimeter measurements, *J. Geophys. Res.*, 107, C10, 3155, 2002.
- Rintoul Stephen R, Hughes C.W. and Olbers D., The Antarctic Circumpolar Current, *Ocean Circulation and Climate*, 4.6, Academic Press, 2001.
- Rintoul S. R., Sokolov S., Antarctic Cooperative Research Centre and CSIRO Marine Research, Hobart, Tasmania, Australia, Baroclinic transport variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia (WOCE repeat section SR3), *J. Geophys. Res.* 106, 2815-2832, 2001.
- Sloyan, B.M. and Rintoul S.R., The Southern Ocean Limb of the Global Deep Overturning Circulation, *J Phys. Oceanogr.*, 31,143-173, 2001.
- Sokolov S., King B. A., Rintoul S. R., and Rojas R. L., Upper ocean temperature and the baroclinic transport stream function relationship in Drake Passage, *J. Geophys. Res.*, 109, C05001, 2004.
- Sokolov S. and Rintoul S. R., Subsurface structure of interannual temperature anomalies in the Australian sector of the Southern Ocean, *J Geophys Research*, 108, NO. C9, 3285, 2003.
- Whitworth III, T. & Nowlin, W.D., Water masses and currents of the southern ocean at the Greenwich meridian. *J. Geophys. Res.*, 92, 6462-6476, 1987.
- Whitworth, T. & Peterson, R. G. 1985. Volume transport of the Antarctic Circumpolar Current from bottom pressure measurements. *J. phys. Oceanogr.*, 15:810-816.
- Report of Activity, DRAKKAR Project, The ocean circulation in the North Atlantic and the Nordic seas: Variability, processes and interactions with the global ocean.