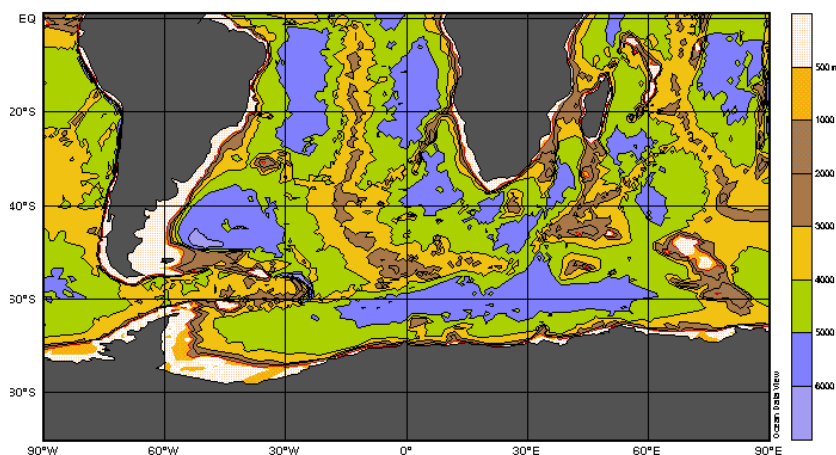


Projet de fin d'études ENSIETA  
Stage de D.E.A. (Océanologie, Météorologie, Environnement – Physique de  
l'océan, U.B.O.)

- *Océanographie physique* -

## 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



Laboratoire de Physique des Océans, IFREMER, Brest, France

Du 05-04 au 14-05-2004 et du 16-08 au 31-08-2004

Sabrina SPEICH (LPO-UBO) et Michel ARHAN (LPO-IFREMER)

Et

Department of Oceanography, University of Cape Town, South Africa

Du 17-05 au 13-08-2004

Dr. Isabelle Ansorge et Prof. Johann Lutjeharms

**LEGEAIS Jean-François**  
Promotion 2004 – HY



## **Remerciements**

Pour cette expérience très enrichissante qu'a été ce stage, je souhaite particulièrement remercier Sabrina Speich et Michel Arhan, à l'origine de ce projet, qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps pour que cette étude se déroule au mieux. Egalement un grand merci à Isabelle Ansoorge pour son accueil chaleureux à Cape Town et sa bonne humeur mais aussi au Professor Johann Lutjeharms et toutes les personnes du *Department of Oceanography* qui ont contribué à mon agréable séjour en Afrique du sud.

## **Mots-clés**

Courant Circumpolaire Antarctique (ACC), Océan austral, fronts océaniques, front subantarctique (SAF), front polaire (PF), transport océanique, XBT.



# Sommaire

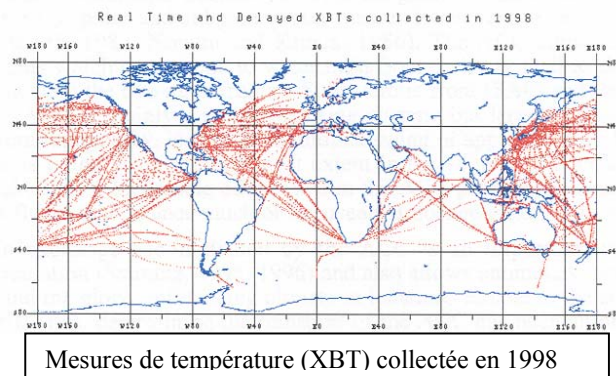
Introduction	p 6
1 Approche de l'étude	p 10
1.1 Masses d'eau et fronts océaniques au sud de l'Afrique	p 10
1.1.1 Masses d'eau	p 10
1.1.2 Fronts océaniques	p 12
1.2 Transports océaniques	p 15
1.2.1 Transports océaniques de l'océan austral	p 15
1.2.2 Méthode de calcul	p 16
2 Etude au sud de l'Afrique	p 20
2.1 Exploitation des données CTD	p 20
2.1.1 Radiales hydrologiques	p 20
2.1.2 Calcul de transports océaniques par les données CTD	p 21
2.1.3 Transports par les données XBT	p 27
2.1.4 Validité de la relation $\chi_{2500}/T_{650}$	p 30
2.2 Etude du courant circumpolaire antarctique par les données XBT	p 32
2.2.1 Transport barocline estimé par les données XBT	p 32
2.2.2 Variabilité des fronts de l'ACC par les données XBT	p 35
3 Discussion et perspectives	p 40
3.1 Comparaison avec le sud de l'Australie et le passage de Drake	p 40
3.2 Transport barocline issu de données altimétriques	p 42
3.3 Intérêt du projet GoodHope au sud de l'Afrique	p 43
4 Résumé et conclusions	p 46
Page personnelle	p 48
Bibliographie	p 50
Annexe	p 52



## Introduction

L'océan mondial est animé en permanence par le vent, les marées et des courants résultants de différences de densités de l'eau de mer. Ceux-ci forment la circulation dite « thermohaline » qui relie les différents bassins océaniques et les scientifiques savent aujourd'hui qu'elle assure la régulation du climat terrestre par l'intermédiaire des échanges océan – atmosphère. L'Océan Austral a la particularité d'être réparti tout autour de la planète et de relier les océans Atlantique, Indien et Pacifique entre eux. Les couches superficielles de l'océan austral, réceptacles des flux air – mer – glaces de mer, sont le lieu privilégié de la formation et transformation de masses d'eau qui sont une composante essentielle de la circulation thermohaline. Ces masses d'eau, qui acquièrent leurs caractéristiques en surface, plongent ensuite dans l'océan intérieur et circulent vers des latitudes plus basses. Elles ont donc des répercussions climatiques importantes, tant à l'échelle locale que globale. Malgré cela et par manque de mesures répétitives dans l'Océan Austral, les propriétés des couches de surface et leur variabilité restent mal connues.

En particulier, le passage entre le sud de l'Afrique et l'Antarctique est d'importance capitale pour la circulation de l'Océan Austral et l'impact de celle-ci sur la circulation à grande échelle de l'océan global et le climat. Or cet endroit est une des zones de l'océan austral très peu mesurée du fait de son hostilité et de son éloignement.



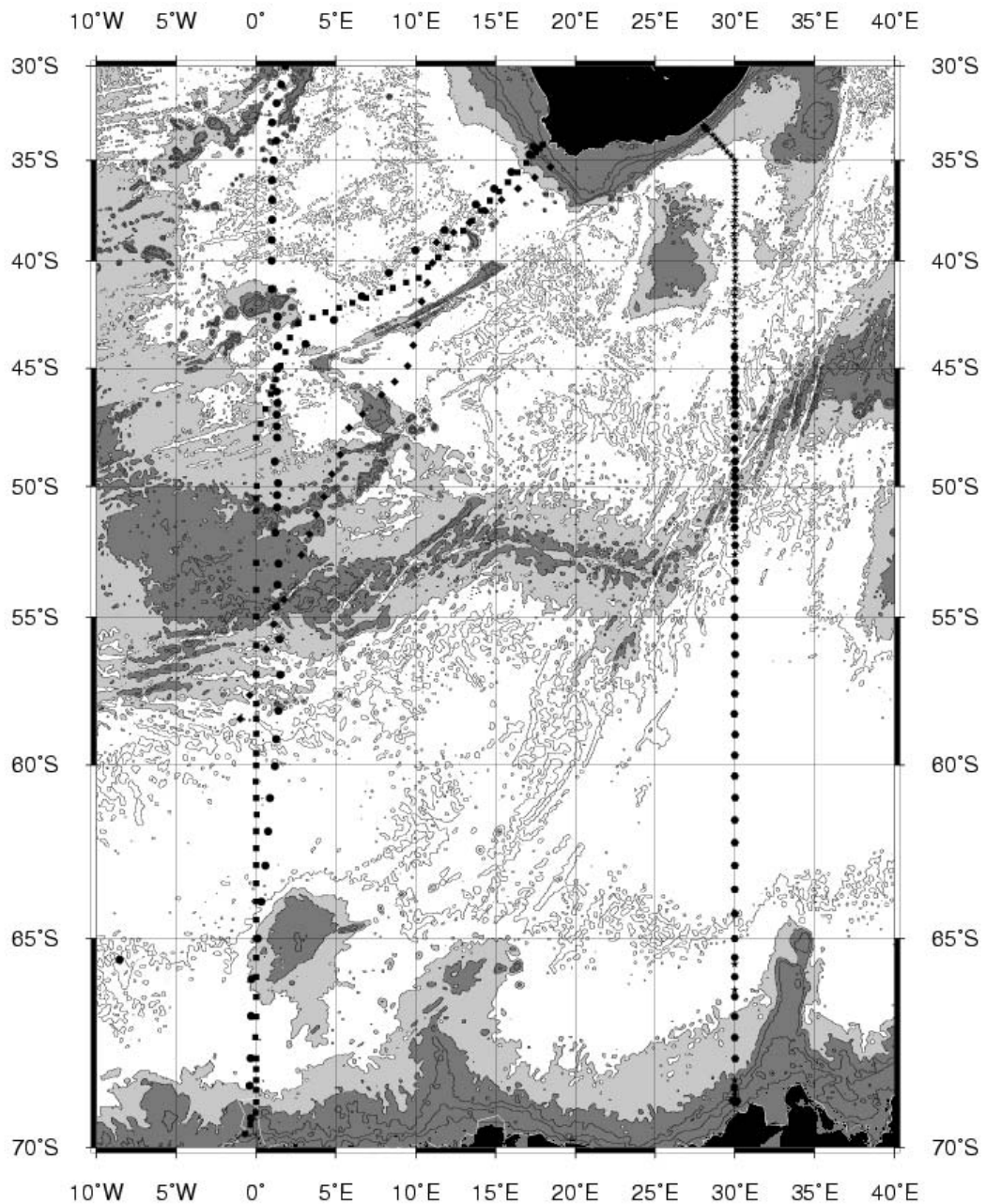
Des mesures répétitives sont cependant possibles grâce aux XBT (*eXpendable BathyThermograph*), qui donnent la température dans les 800 premiers mètres de la colonne d'eau. Elles peuvent être déployées lorsque le navire fait route et sont d'un prix abordable. Ainsi il est prévu, dans le cadre du programme expérimental « Good Hope » de réaliser des lâchers de profileurs d'hydrologie et des radiales répétées de mesure de température (XBT) entre l'Afrique du sud et l'Antarctique. L'objectif de ce programme est de mieux connaître cette région de l'océan mondial, de quantifier ses courants, et d'établir son influence dans la régulation du climat global et régional en Afrique australe.

Ce projet de fin d'étude, qui constitue également un stage de DEA (DEA Océanologie, Météorologie, Environnement – Physique de l'océan, UBO), contribue à la réalisation de ce programme. Son objectif est d'appliquer à la région sud Afrique une méthode d'estimation du transport du Courant Circumpolaire Antarctique (ACC) utilisant des mesures d'XBT, tel que cela a déjà été réalisé au sud de l'Australie (Rintoul et al, 2002) et dans le passage de Drake au sud de l'Amérique (Sokolov et al, 2004).

Du fait de la collaboration de chercheurs sud-africains au programme « Good Hope », le stage est séparé en deux périodes : dans une première partie (2 mois) au Laboratoire de Physique des Océans, Ifremer Brest, il s'est agit d'utiliser quelques radiales hydrologiques CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) (cf carte 1), qui donnent les propriétés de la colonne d'eau jusqu'au fond pour déterminer une relation empirique entre la température de la couche haute de l'océan (telle que donnée par les XBT) et le transport de volume de l'ACC.

Lors de la deuxième partie (3 mois) au *Department of Oceanography, University of Cape Town*, j'ai utilisé cette relation sur un ensemble plus important de radiales XBT disponibles. J'ai pu ensuite analyser, en tenant compte des incertitudes, la variabilité de la structure hydrologique de l'ACC et de son transport barocline ainsi que de la position des fronts océaniques et de leur contribution au transport total. Une comparaison a alors été possible avec d'autres lieux tels que le passage de Drake au sud de l'Amérique ou au sud de l'Australie.

Cette méthode paraît intéressante dans la mesure où une radiale hydrologique (CTD) permettant d'obtenir la relation empirique, seules des radiales XBT (plus simples et plus rapides à mettre en œuvre) permettent ensuite de calculer le transport barocline et d'estimer sa variabilité.



Carte 1: Emplacement des radiales hydrologiques utilisées dans l'Océan Austral au sud de l'Afrique, I6 (étoile), I6s (hexagone), Ajax (rond), A12 (carré) et A21 (losange).

Les radiales hydrologiques exploitées dans un premier temps traversent l'Océan Austral : trois à l'ouest de l'Afrique (le long du méridien de Greenwich) et deux à l'est (30°E) (cf carte 1).



# **1 Approche de l'étude**

Mener à bien cette étude nécessite tout d'abord une bonne compréhension de la circulation océanique globale et en particulier celle de l'Océan Austral ainsi que de ses propriétés hydrologiques. Il convient de se demander comment définit-on un front et quels sont les critères permettant de déterminer la structure thermohaline d'un front le long de radiales hydrologiques? Comment calcule-t-on un transport barocline et en particulier à partir des seules mesures de température de la couche superficielle (XBT)?

## **1.1 Masses d'eau et fronts océaniques au sud de l'Afrique**

### **1.1.1 Masses d'eau**

Les cinq radiales hydrologiques CTD utilisées sont des radiales méridiennes à travers l'Océan Austral. Celui-ci joue un rôle important dans la distribution des propriétés des eaux abyssales de l'océan mondial. La principale raison est le Courant Circumpolaire Antarctique qui permet l'échange de grands volumes d'eau entre les divers bassins des océans Indien, Pacifique et Atlantique. Ce courant, essentiellement forcé par le vent, a une structure annulaire liée au fait qu'aucune côte méridienne ne vient perturber l'écoulement autour du globe entre 45° et 55°S. Du sud au nord, on distingue trois zones océaniques dans l'Océan Austral : l'océan polaire, la région subantarctique et la région subtropicale, au sein desquelles on peut distinguer différentes masses d'eau. Celles-ci acquièrent leurs caractéristiques (température, salinité, oxygène, nutriments...) lorsqu'elles sont en contact avec l'atmosphère, puis elles plongent et participent à la ventilation de l'océan mondial. Lorsque la masse d'eau s'éloigne de sa zone de formation, ses caractéristiques peuvent être modifiées par des processus de diffusion, de mélange, biologique ou par interaction avec les sédiments.

On trouve entre l'Afrique australe et l'Antarctique :

\* *L'eau de surface subtropicale* (STSW) située au nord du front subtropical (voir figure 1) qui marque la limite entre un climat subtropical au nord et un climat devenant polaire au sud. L'extension de la STSW au nord du front subtropical varie suivant que la radiale hydrologique coupe la région de rétroflexion du courant des Aiguilles ou pas.

\* *L'eau de surface subantarctique* (SASW) immédiatement au sud du front subtropical depuis la surface jusqu'à une profondeur d'environ 150m où elle surplombe l'eau antarctique intermédiaire ou l'eau modale subantarctique. Elle constitue la portion nord de l'ACC et est ainsi fortement influencée par le mélange avec le gyre subtropical adjacent et l'interaction air-mer le long de son parcours circumpolaire (Whitworth and Nowlin, 1987).

\* *L'eau modale subantarctique* (SAMW) localisée principalement dans la zone subantarctique, constitue une couche homogène en-dessous la SASW et au-dessus l'eau antarctique intermédiaire (100-500m) entre approximativement 40° et 45°S. Elle est formée par convection hivernale à la fin de l'hiver : le rafraîchissement de surface durant l'automne et l'hiver fait

disparaître la thermocline (zone de fort gradient de température) saisonnière permettant cette convection profonde (McCartney, 1977 ; Hanawa and Talley, 2001).

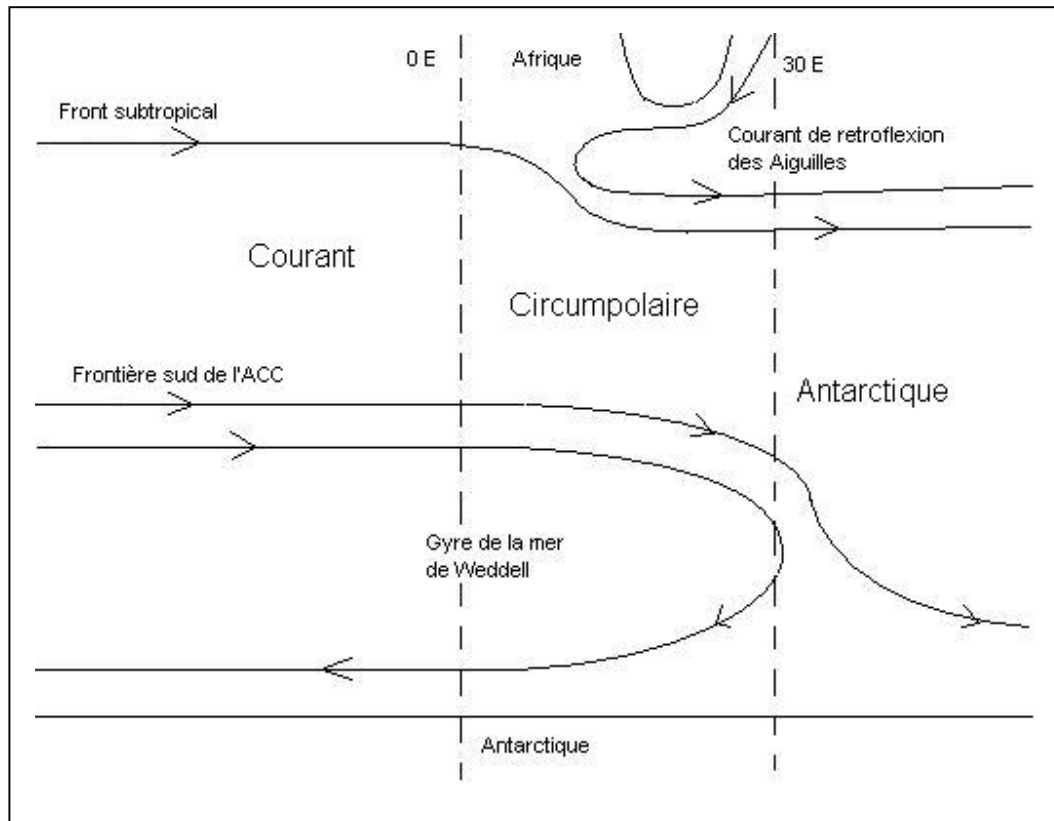


Figure 1 : Schéma de la circulation océanique au sud de l'Afrique

\* *L'eau de surface antarctique (AASW)* est située dans les 250 premiers mètres de la colonne d'eau au sud du front polaire (cf. définition du front polaire plus bas) et s'étend jusqu'à la côte antarctique. Cette masse d'eau diffère de l'hiver à l'été. En été, l'AASW est marquée par un minimum de température intense à 200m qui marque la base de la couche de mélange hivernale. On observe une augmentation de sa salinité de l'été à l'hiver (de 33.8 à 34.6‰) due à la formation de glace.

\* *L'eau antarctique intermédiaire (AAIW)* se trouve en surface au nord de la région du front polaire et s'approfondit en s'écoulant vers le nord entre les valeurs des densités potentielles de 27.1 et 27.2 kg/m<sup>3</sup> (Whitworth and Nowlin, 1987) jusqu'à 1000m aux moyennes latitudes (Piola and Georgi, 1982). Initialement deux théories s'opposent pour expliquer la formation de cette masse d'eau. L'une l'attribue à la convergence contrôlée par le vent (Sverdrup, 1940) et l'autre à l'influence de la circulation thermohaline (Wüst, 1935 ; Deacon, 1933, 1937).

\* *L'eau profonde circumpolaire (CDW)*, la plus étendue dans le courant circumpolaire antarctique, située sous l'eau antarctique intermédiaire. Il est commun de distinguer l'eau profonde circumpolaire supérieure et inférieure sur la base de propriétés acquises dans des régions différentes (Gordon, 1967).

## 1.2.2 Fronts océaniques

En décrivant la structure de l'ACC entre l'Australie et l'Antarctique, Deacon (1937) remarqua une remontée des isothermes et isohalines vers le sud qui n'est pas prononcée et continue mais par série de « marches » qui correspondent à des fronts océaniques. Depuis, plusieurs investigations ont décrit la structure de ces fronts dans l'océan austral : Gordon et al, 1977 (sud de l'Australie), Nowlin et al, 1977 (passage de Drake au sud de l'Amérique) et Lutjeharms et Valentine, 1984 (sud de l'Afrique). Un front océanique est une zone à grande échelle, quasi stationnaire, relativement étroite où des gradients horizontaux prononcés des propriétés de l'océan séparent des zones plus larges aux propriétés thermohalines différentes, les masses d'eau.

Depuis des années, de nombreuses définitions ont été données par les scientifiques pour décrire les fronts océaniques et il semble que celles-ci dépendent du type et de la qualité des données qui sont alors disponibles. Lorsque la circulation est quelque peu perturbée comme dans l'océan Indien aux abords du plateau des Kerguelen, la définition non ambiguë d'un unique front n'est pas toujours possible.

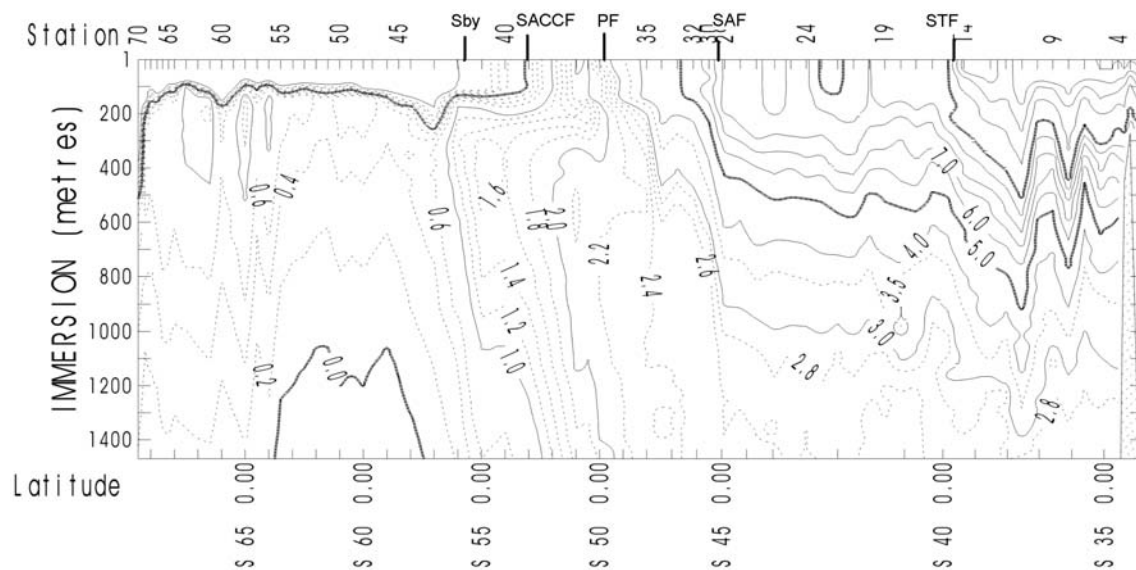


Figure 2 : section de température potentielle le long de la radiale A12 à 0°E

Dans le cadre de ce projet, j'ai restreint mon étude au courant circumpolaire antarctique et aux fronts océaniques qui lui sont associés. L'analyse de la variabilité de la structure de l'ACC et de son transport à l'aide de mesures de température (XBT) qui représentait la deuxième partie de mon travail nécessite de caractériser chaque front par sa signature en

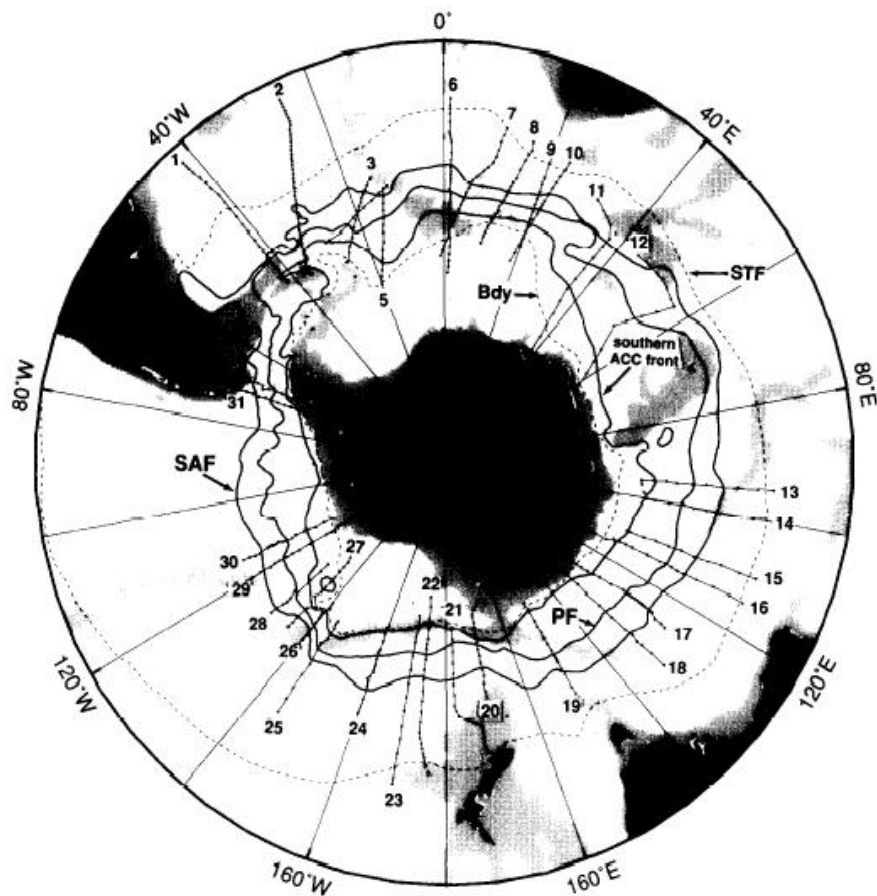
température. En 1995, Orsi a déterminé la structure frontale méridienne de l'ACC à l'aide de critères auxquels je me suis référencé pour cette étude (cf tableau 1). Il considère le *front subtropical* (STF) comme la limite nord de l'ACC et l'extrémité sud des caractéristiques de l'eau profonde circumpolaire supérieure comme la frontière australe de l'ACC (Sby, *Southern boundary*). Celle-ci marque la limite sud de l'unique masse d'eau trouvée exclusivement dans l'ACC et non dans le régime subpolaire (Orsi et al, 1995). Au sein de l'ACC, il fait la distinction entre trois fronts océaniques du nord au sud : le *front subantarctique* (SAF), le *front polaire* (PF) et le *front sud de l'ACC* (SACCF). On peut voir l'emplacement de ces fronts océaniques sur la section de température de la radiale A12 à 0°E (voir figure 2). Les signatures de ces différents fronts sont visibles principalement dans la couche superficielle de l'océan (1000 premiers mètres). Plus en profondeur, les gradients des propriétés de l'océan sont plus atténués.

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 $\theta_{\text{min}}$ à $z < 200\text{m}$ , plus au sud
SACCF	$\theta > 1,8^{\circ}\text{C}$ le long de $\theta_{\text{max}}$ à $z > 500\text{m}$ , plus au nord $\theta < 0^{\circ}\text{C}$ le long de $\theta_{\text{min}}$ à $z < 150\text{m}$ , plus au sud
Sby	limite sud du maximum vertical $\theta > 1,5^{\circ}\text{C}$ (~200m)

Tableau 1 :  
Caractéristiques  
thermiques des  
limites de l'ACC et  
de ses fronts  
océaniques selon  
Orsi et al, 1995.

Différentes études ont permis de cartographier l'ensemble de ces fronts le long de tout l'océan austral, tel que sur la figure 3 (Orsi et al, 1995).

Figure 3 :  
distribution  
circumpolaire  
du SAF, PF,  
SACCF : le  
STF et la Sby  
sont montrés en  
pointillés (Orsi  
et al., 1995).



Au cours de l'exploitation de données hydrologiques, il est important de garder un œil critique quant à la détermination de la structure de l'ACC et sa variabilité. En effet, de nombreux paramètres entrent compte pour obtenir des données de qualité permettant une analyse et une intercomparaison menant à des résultats pertinents. La qualité et la précision des mesures ainsi que des méthodes d'acquisition est importante car avant de comparer des séries de données, il faut s'assurer que les méthodes de calibration des appareils de mesure et les valeurs de référence sont bien les mêmes. La largeur mesurée d'un front en un lieu et une date donnée peut par exemple varier d'une radiale à une autre car elle dépend du pas d'échantillonnage des stations le long des radiales. Il faut également tenir compte de la méthode de traitement des données : élimination des valeurs erronées, filtrage, etc... L'orientation de la section réalisée par rapport à l'axe de l'ACC est aussi un paramètre à vérifier.

Pour comparer les valeurs de plusieurs radiales, il faut que celles-ci se trouvent dans la même zone et il est intéressant lorsqu'elles ont été réalisées au même moment de l'année. Les mesures peuvent différer fortement entre le début de l'été austral (novembre) et à la fin de l'été (mars) : il y aura par exemple une variation de l'épaisseur et des propriétés de la couche de mélange. Un problème se pose alors pour l'étude de la variabilité inter saisonnière dans la mesure où on ne dispose d'aucune mesure durant l'hiver austral en raison des conditions d'accès difficile.

## 1.2 Transports océaniques

### 1.2.1 Transports océaniques dans l'océan austral

On a vu précédemment que l'océan austral a un rôle fondamental dans le cadre des échanges inter océans. Il constitue la route pour l'eau profonde nord Atlantique qui s'écoule vers les océans Indien et Pacifique et le chemin de retour des eaux centrales et intermédiaires qui constitueront les eaux de surface de l'océan Atlantique. Le courant circumpolaire antarctique constitue un gigantesque transport de volume d'environ 135 Sv (l'unité de Sverdrup, Sv correspond à  $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dans le passage de Drake au sud de l'Amérique (pour comparaison, le flux du Gulf stream en Atlantique nord est d'environ 100 Sv).

L'équilibre géostrophique, qui s'applique en grande partie dans l'océan austral, signifie que chaque parcelle de fluide est en équilibre sous l'influence de la force liée au gradient de pression et la force de Coriolis liée à la rotation de la Terre. Lorsque entre deux stations les isopycnes (lignes d'égale densité) sont en pente, un gradient de pression horizontal s'installe et est compensé par la force de Coriolis. Une vitesse (dite géostrophique) apparaît alors perpendiculairement à la force de Coriolis et donc le long de la pente. En intégrant cette vitesse le long d'un profil vertical, on obtient le transport barocline. Dans un champ de vitesse, on considère que celle-ci a deux composantes : une composante barocline et barotrope. La composante barocline est obtenue à partir de la circulation géostrophique alors que la composante barotrope en est indépendante. On écrira alors l'anomalie de hauteur de surface de la mer  $\eta$  comme  $\eta = \eta_{bc} + \eta_{bt}$  avec  $\eta_{bc} = 1/\rho_0 \cdot \int_{-H}^0 \rho'(z) dz$  et  $\eta_{bt} = P_b / (g\rho_0)$  où  $\rho'$  est l'anomalie de densité par rapport à la référence  $\rho_0$  et  $P_b$  est l'anomalie de pression au fond. Le cas barotrope correspond en fait à la situation où les isopycnes sont horizontales, parallèles aux isobares.

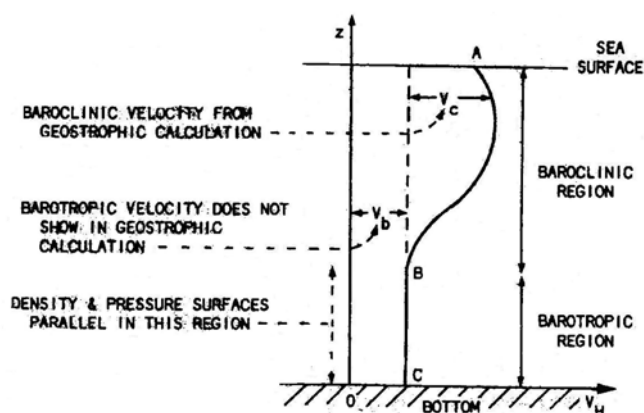


Figure 4 : Contribution barotrope et barocline de la vitesse horizontale.

Sur la figure 4 représentative de la colonne d'eau, on s'aperçoit que la variabilité intervient principalement dans la couche supérieure de l'océan.

Ainsi, le long d'une radiale perpendiculaire au courant circumpolaire antarctique, on trouve au passage de chaque front une pente prononcée des isopycnes qui correspond à une intensification de la vitesse géostrophique. L'estimation de ces transports dans une zone peu connue peut permettre de mieux évaluer les échanges inter océaniques et contribuer à la calibration des modèles numériques pour la prévision de l'évolution du climat.

## 1.2.2 Méthode de calcul

D'une manière générale, si on dispose de la masse volumique  $\rho$ , on peut obtenir l'anomalie de volume spécifique  $\delta$  telle que :

$$1/\rho = \alpha_{35,0,p} + \delta \text{ avec } \alpha_{35,0,p} \text{ le volume spécifique standard à 35‰, } 0^\circ\text{C, et la pression P.}$$

Alors, on peut calculer la hauteur dynamique de la colonne d'eau  $\Delta D$  en intégrant  $\delta$  sur la verticale :

$$\Delta D = \int_{p_1}^{p_2} \delta \, dp .$$

L'écart de vitesse géostrophique entre deux niveaux  $p_1$  et  $p_2$  et entre deux stations hydrologiques consécutives A et B est donnée par la formule :

$$V_1 - V_2 = 10 / (Lf) * (\Delta D_B - \Delta D_A)$$

où le paramètre de Coriolis  $f = 2\Omega \sin(\varphi)$  avec  $\varphi$  la latitude du lieu.

(Détail de la méthode de calcul dans « Introductory dynamic oceanography », S. Pond and G. L. Pickard, 1978).

En général, on prend un niveau de référence à la profondeur  $p_2$  tel que  $V_2 = 0$ , ce qui permet d'obtenir la vitesse sur la colonne d'eau référencée à une profondeur donnée. Le transport barocline entre les deux stations se déduit en intégrant la vitesse sur le profil vertical entre ces deux stations.

Le mètre dynamique, unité de la hauteur dynamique, est défini comme une unité de géopotentiel. La quantité  $d\Phi$  correspond à la variation de géopotentiel selon un déplacement vertical  $dz$  et s'écrit  $d\Phi = g \, dz$  où  $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$  est l'accélération de la pesanteur. L'unité du géopotentiel  $\Phi$  est donc des  $\text{J.Kg}^{-1}$  ou des  $\text{m}^2.\text{s}^{-2}$ . On définit alors le mètre dynamique tel que :

$$1 \text{ m dyn} = 10.0 \text{ J.Kg}^{-1} .$$

Pour exemple, une hauteur de 100m correspond à une anomalie de géopotentiel de 980  $\text{J.Kg}^{-1}$  et donc une hauteur dynamique de 98 m dyn.

Beaucoup de régions océaniques sont caractérisées par une relation biunivoque entre la température et la salinité de la colonne d'eau qui peut être exploitée pour déterminer les vitesses géostrophiques à partir de la seule donnée de la température. La salinité correspondant à la température mesurée est obtenue par ce diagramme T – S et on calcule ensuite la densité et la hauteur dynamique pour trouver le profil vertical de vitesse. Le transport barocline se calcule alors comme expliqué ci-dessus et sa détermination ne nécessite que la connaissance de la température de la colonne d'eau.

Le problème est que dans l'océan austral, les courbes T-S tracées à partir des observations ne sont pas bijectives. A une température donnée peut correspondre plusieurs salinités différentes. La méthode classique n'est donc pas utilisable.

En revanche, les courbes T – S dans l'océan austral sont stables : chaque front et chaque zone séparée par ces fronts ont des familles de courbes T – S caractéristiques qui sont invariables dans le temps. Une façon d'exploiter la stabilité de ces courbes est de tirer parti de la corrélation entre la température observée et certaines quantités dynamiques de la colonne d'eau. En particulier, Rintoul et al (1997) ont montré qu'il existe une relation biunivoque entre

la température moyenne de surface (0 – 600m) et la hauteur dynamique de la colonne d'eau (en surface, référencée à 2000m) dans l'océan austral au sud de l'Australie le long d'une radiale effectuée en 1993. Ils ont ensuite utilisé cette relation pour déterminer la hauteur dynamique entre 0 et 2000m à partir des seules mesures de température (XBT) le long d'une radiale qui a été effectuée par la suite. La hauteur dynamique permet alors de déterminer le transport barocline.

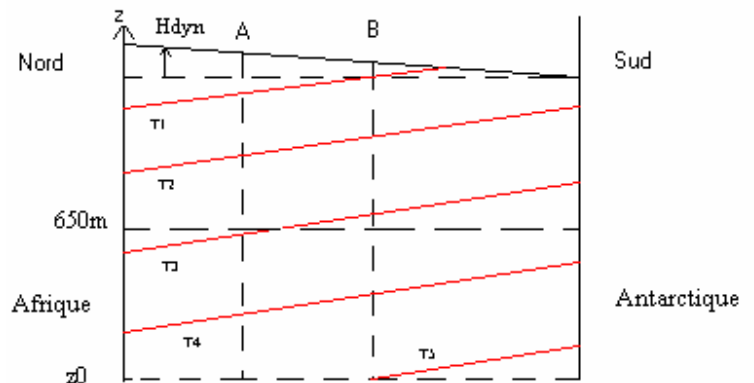
Dans l'océan austral, les isopycnes (et donc les isothermes) sont en pente vers le sud de sorte que la température diminue vers le sud. Par comparaison entre deux stations A et B, la température moyenne de la colonne d'eau en A, située plus au nord sera plus élevée qu'en B (cf figure 5).

La densité étant inversement proportionnelle à la température, la densité en A sera plus faible qu'en B, d'où une anomalie de volume spécifique plus élevée en A. La hauteur dynamique s'obtient en l'intégrant à partir d'un niveau de référence d'où une hauteur dynamique plus élevée en A qu'en B :

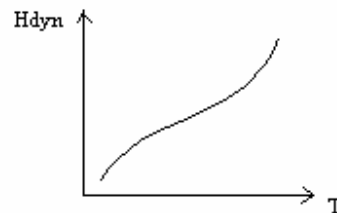
$$H_{dyn} = \int_{p(z=0)}^{p^0} \delta dp$$

$$\text{et } T_1 > T_2 > T_3 > T_4$$

$$\begin{aligned} T_{moyA} &> T_{moyB} \\ \Rightarrow \rho_{moyA} &< \rho_{moyB} \\ \Rightarrow 1/\rho_{moyA} &< 1/\rho_{moyB} \\ \Rightarrow \delta_{moyA} &> \delta_{moyB} \\ \Rightarrow H_{dynA} &> H_{dynB} \end{aligned}$$



Il est donc logique de trouver une courbe monotone entre la hauteur dynamique et la température moyenne de subsurface comme ci-contre.



Pour accéder directement au transport barocline, Rintoul et al (2002) définissent directement une anomalie d'énergie potentielle qui est une fonction courant pour le transport barocline telle que :

$$\chi(p_0) = 1/g \int_0^{p^0} p \delta dp$$

à partir de laquelle on peut en déduire le transport (en Sv).

Figure 5 : explication de la relation entre la hauteur dynamique et la température de subsurface.

On a :

$u_1 - u_2 = u = -1/f \cdot \partial \Phi / \partial y$  , avec  $\Phi = \int_{p_0}^p \delta dp$  l'anomalie de géopotentiel et  $u$  la vitesse zonale.

Le transport s'écrit alors :  $U(p_0) = \int_{z_0}^0 u dz = -1/f \int_{z_0}^0 (\partial \Phi / \partial y) dz = -1/f \partial / \partial y (\int_{z_0}^0 \Phi dz)$

$$\text{et } \Phi dz = dz \int_{z_0}^p \delta dp = -1/(\rho_0 g) \cdot dp \cdot \int_{z_0}^p \delta dp .$$

A l'aide d'une intégration par parties, il vient :

$$dp \cdot \int_{z_0}^p \delta dp = d[p \int_{z_0}^p \delta dp] - p \delta \cdot dp$$

$$\text{soit } \Phi dz = -1/(\rho_0 g) \{ d[p \int_{z_0}^p \delta dp] - p \delta \cdot dp \}$$

$$\text{et } \int_{z_0}^0 \Phi dz = -1/(\rho_0 g) [p \int_{z_0}^p \delta dp]_{p_0}^0 + 1/(\rho_0 g) \int_{p_0}^0 p \delta dp = 1/(\rho_0 g) \int_{p_0}^0 p \delta dp$$

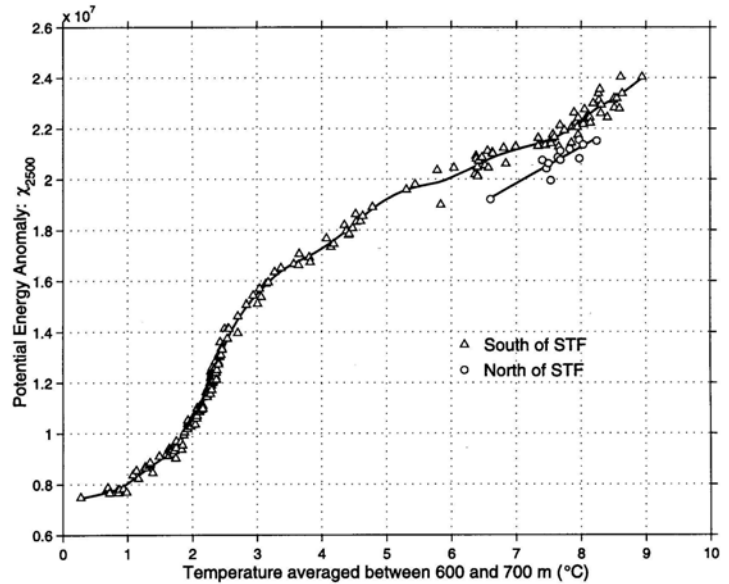
d'où l'expression du transport volumique géostrophique zonal par unité de largeur à partir de la vitesse zonale  $u$  :

$$U(p_0) = \int_{z_0}^0 u dz = -1/(\rho_0 f) \partial / \partial y (\chi(p_0))$$

$$\text{Avec } \chi(p_0) = 1/g \int_0^{p_0} p \delta dp .$$

Rintoul et al (2002) obtiennent ainsi la courbe suivante (Figure 6) :  $\chi$  référencée à 2500m / température moyenne entre 600 et 700m au sud de l'Australie. Dans cette étude, ils utilisent  $\chi$  référencée à 2500db car c'est la plus grande profondeur qui subsiste au-dessus de la dorsale au milieu de l'océan et  $\chi$  est ainsi définie le long de toute la radiale. De plus, le transport au-dessus et référencé à 2500db représente une partie importante et quasiment constante du transport barocline total le long de la radiale

Figure 6 : Courbe reliant l'anomalie d'énergie potentielle à la température établie à partir de six radiales au sud de l'Australie (Rintoul et al, 2002).



utilisée : le rapport de ces deux transports est de  $65.8\% \pm 2.1$  (transport total pris relativement à la profondeur commune la plus grande). Dans mon étude au sud de l'Afrique, il s'agira également de calculer ce rapport.

Au nord du front subtropical, la masse d'eau a des caractéristiques en température et salinité très différentes du reste de l'océan plus au sud, d'où la présence d'une relation  $\chi - T$  différente sur le diagramme. Connaissant le lieu de la mesure de la température par rapport à ce front, on utilise alors l'une ou l'autre des deux courbes pour déterminer  $\chi$  et obtenir le transport barocline entre n'importe quelle paire de stations.

En comparant les valeurs de transport calculées par cette courbe et directement par les mesures CTD, Rintoul et al. ont montré qu'au sud de l'Australie, la moyenne des différences de transports à chaque paire de stations pour une radiale varie entre 1.7 et 3.2 Sv soit une moyenne sur les six radiales utilisées de 2.6 Sv ou 2.5% du transport moyen au-dessus et référencé à 2500m. Là aussi, il s'agira de faire la même étude au sud de l'Afrique.

Il est important de remarquer que pour déterminer les courbes  $\chi - T$  ou  $H_{dyn} - T$ , il est nécessaire de connaître les valeurs de  $\delta$  et donc de la masse volumique (qu'on détermine par T et S mesurées) sur toute la colonne d'eau. Il faut donc réaliser une première campagne à la mer pour mesurer les caractéristiques T et S jusqu'au fond pour chaque station (mesures CTD). L'intérêt fondamental est que par la suite, il suffit de faire des campagnes dans la même région en ne mesurant que la température dans la couche superficielle de l'océan (XBT) pour obtenir directement le transport barocline. La logistique à mettre en œuvre pour des mesures XBT étant beaucoup moins importante et plus rapide que pour des mesures CTD.

Tout l'intérêt de mon travail consiste à voir si la méthode décrite ci-dessus est applicable à l'océan austral au sud de l'Afrique et si on obtient des courbes d'anomalie d'énergie potentielle en fonction de la température moyennée en subsurface de suffisamment bonne qualité pour être exploitées. En effet, les masses d'eau et les conditions de mélange au sud de l'Afrique et au sud de l'Australie ne sont pas les mêmes.

## **2 Etude au sud de l'Afrique**

### **2.1 Exploitation des données CTD**

#### **2.1.1 Radiales hydrologiques**

Pour étudier la région de l'océan austral j'ai disposé des radiales hydrologiques (CTD) AJAX (janvier 1984), A21 (WOCE SR2) et A12 (1990, 1992) qui relie Cape Town à l'Antarctique le long du méridien de Greenwich et I6s (Civa 1, février-mars 1993) et I6 (Civa 2, février-mars 1996) le long du méridien 30°E. La radiale I6s ne s'étend vers le nord que jusqu'à 44°S car la campagne avait dû être écourtée à l'époque en raison d'une urgence médicale. La radiale a alors été répétée en 1996 (I6) jusqu'à la côte sud-africaine (cf carte 1).

Il s'agit d'abord de savoir s'il est possible d'appliquer dans cette région la méthode utilisée au sud de l'Australie : les propriétés des masses d'eau au sud de l'Afrique permettent-elles d'obtenir une relation biunivoque entre la hauteur dynamique de la colonne d'eau et la température de subsurface ?

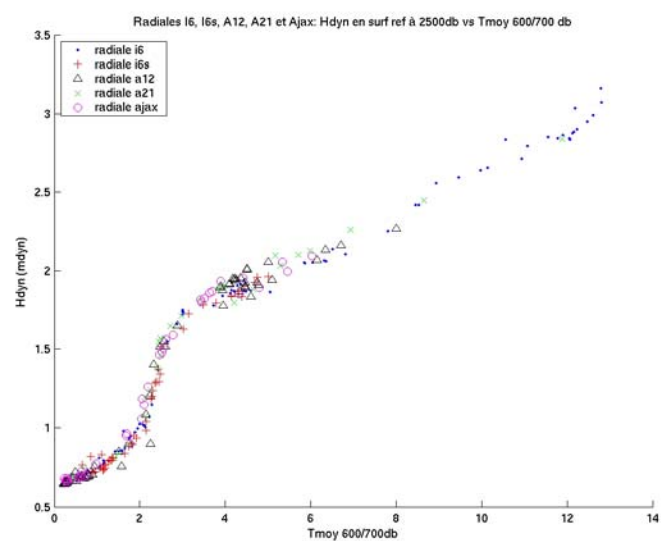
Ne sachant pas a priori quelle couche de la colonne d'eau est la plus représentative des variations de la structure hydrologique, j'ai cherché à tracer la hauteur dynamique en surface référencée à 2500db en fonction des températures moyennées entre 0/600db, 100/200db, 300/400db et entre 600/700db. Les résultats pour les radiales I6 et I6s d'une part et les trois autres radiales sont visibles sur les figures 7, 8, 9 et 10 en annexe.

On observe tout d'abord que pour l'ensemble des radiales, quelque soit la température choisie en abscisse, l'allure des courbes correspond à celle que l'on obtient au sud de l'Australie (Rintoul et al, 1997). On peut de même voir qu'au nord (température plus élevée), les valeurs sont plus dispersées qu'au sud (température plus faible). Cela montre qu'au sud de l'Afrique, la variabilité des propriétés de l'eau au nord du front subtropical est également importante et qu'elle est plus réduite plus au sud, proche de l'Antarctique.

Le choix de la température moyennée en abscisse ne paraissant pas déterminant, on pourra retenir pour d'éventuels calculs de vitesses géostrophiques et de transports baroclines la température moyennée entre 600 et 700db telle que sur la figure 11 où sont représentées l'ensemble des stations des cinq radiales.

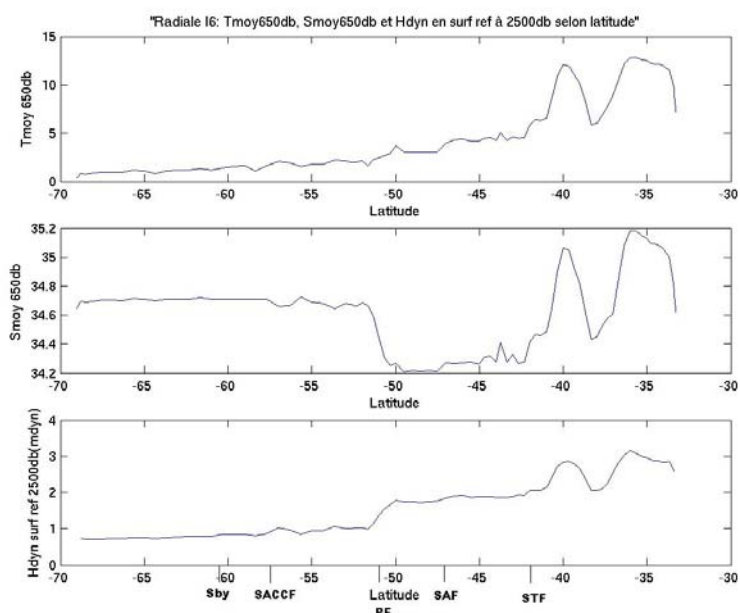
Figure 11 : Radiales I6, I6s, A12, A21, Ajax : Hdyn en surface référencée à 2500db vs température moyennée entre 600 et 700db.

Pour s'assurer que les propriétés de l'eau (température, salinité) moyennées entre 600 et 700 db (notées  $T_{650}$  et  $S_{650}$ ) sont bien représentatives des variations de la structure hydrologique de l'océan austral, il



peut être intéressant de tracer des sections de  $T_{650}$  et  $S_{650}$  et de la hauteur dynamique en surface référencée à 2500db pour chaque radiale (latitude en abscisse). Sur la radiale I6 à 30°E, certains détails apparaissent visiblement (voir figure 12 et en annexe les figures 13, 14, 15 et 16 pour les autres radiales).

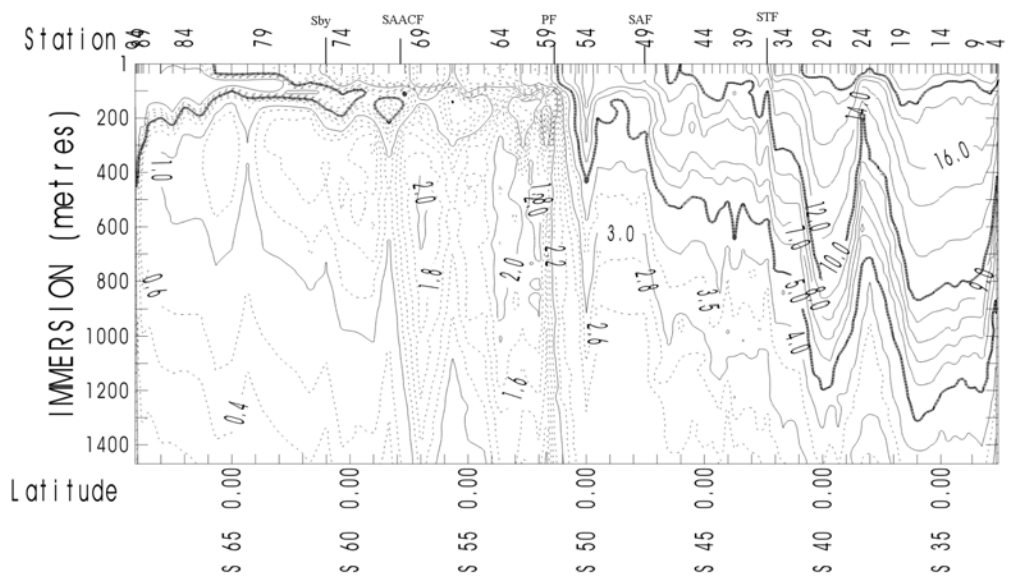
Figure 12:  $T_{650}$ ,  $S_{650}$  et  $H_{dyn}$  en surface référencée à 2500db vs la latitude le long de la radiale I6.



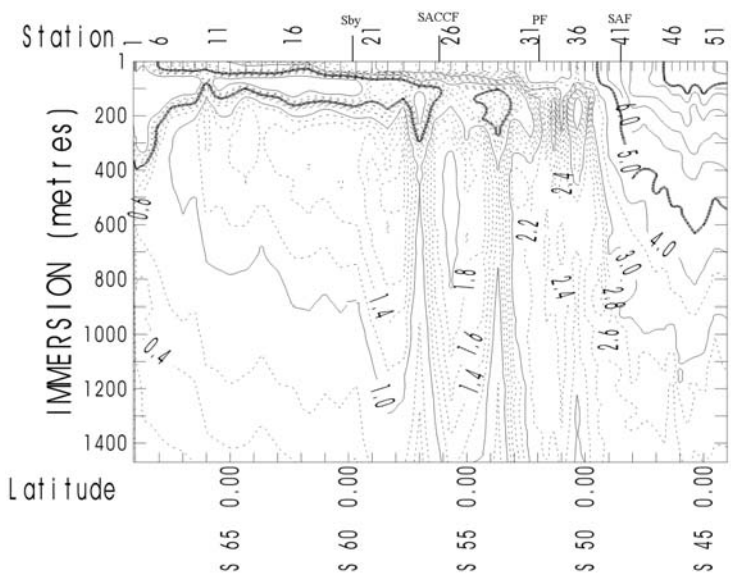
Ces courbes illustrent le fait expliqué précédemment que la hauteur dynamique et la température ont le même sens de variation. Alors qu'il n'est presque pas discernable sur la courbe de température, le front polaire est très fortement marqué sur la courbe de hauteur dynamique à 51°S ainsi que sur la courbe de salinité. De plus, on distingue parfaitement plus au nord, l'interaction du courant de retour des Aiguilles avec le front subtropical. On observe une très nette distinction en température entre les eaux subtropicales ( $<6^{\circ}\text{C}$ ) au nord de 40°S et les eaux plus froides ( $<6^{\circ}\text{C}$ ) plus au sud. Aux alentours de 38°S - 30°E, le courant de retour des Aiguilles effectue un méandre en forme de « S » renversé qui est particulièrement visible ici dans les eaux de subsurface. En allant vers le sud, on traverse une première fois le courant avec des eaux chaudes ( $T_{650} = 12^{\circ}\text{C}$  à 36°S), puis on se situe dans le creux du méandre avec des eaux plus froides ( $T_{650} = 7^{\circ}\text{C}$  à 38°S), on retransverse le courant de l'autre côté du méandre avec à nouveau des eaux chaudes ( $T_{650} = 12^{\circ}\text{C}$  à 40°S) et on s'éloigne finalement du courant vers le sud avec des eaux plus froides. On constate que la hauteur dynamique rend très bien l'allure de ce méandre.

On peut noter que sur des séries temporelles de ces courbes (interannuelles par exemple), la hauteur dynamique étant fonction de la température, cela signifie que si on constate une augmentation du transport d'une année sur l'autre, la différence de température entre le nord et le sud a donc augmenté. La variabilité dans le sud de l'océan austral étant très faible, c'est la température le long de la côte nord qui a augmenté ce qui se traduit par un approfondissement de la thermocline.

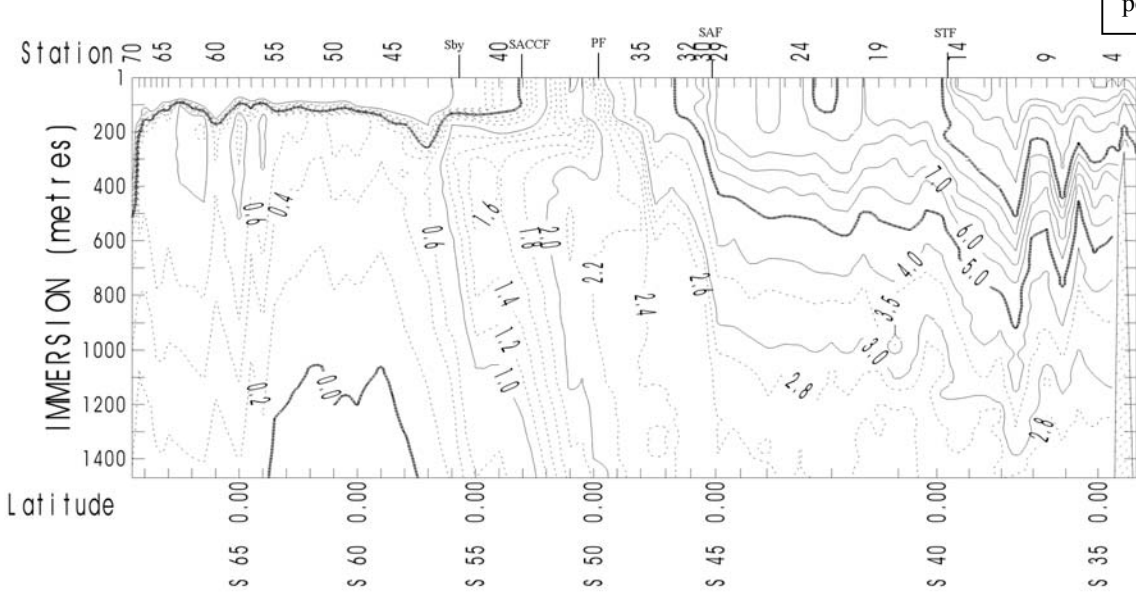
Pour pouvoir identifier les limites nord et sud de l'ACC ainsi que les fronts océaniques qui lui sont associés, il est nécessaire de visualiser les coupes des différentes propriétés de l'eau le long des radiales hydrologiques. On peut voir sur les figures 17, 18, 19, 20 et 21 en annexe les coupes de température potentielle, de salinité et de densité ( $\sigma_0$  et  $\sigma_1$ ) pour chacune des cinq radiales étudiées. En vue de l'utilisation de radiales de température (XBT) dans la deuxième partie de l'étude, il est intéressant de s'attacher à déterminer la position des fronts par les seuls critères de température tels que ceux d'Orsi et al. cités plus haut (cf tableau 1).



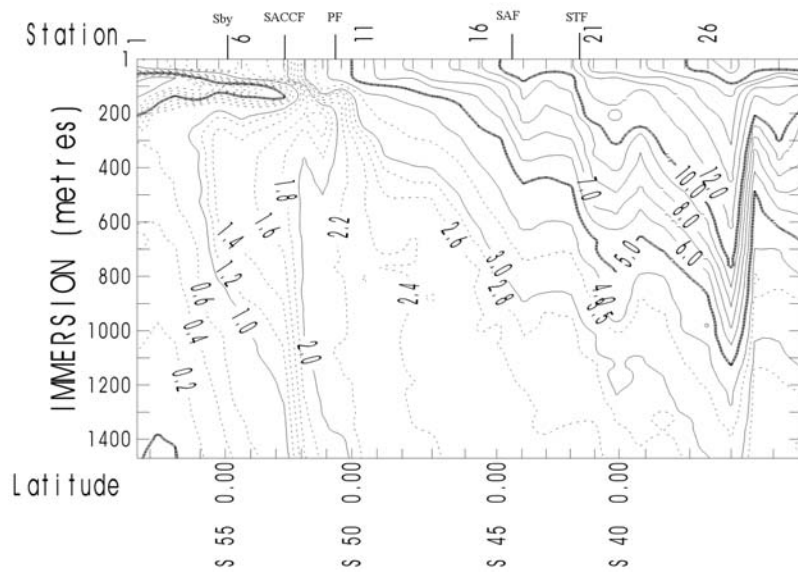
Radiale 16 :  
température  
potentielle



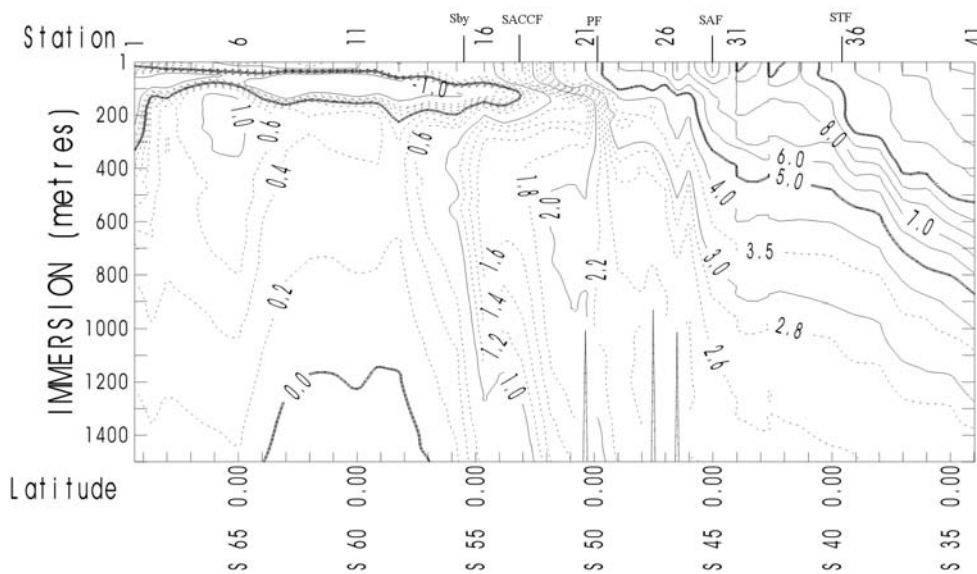
Radiale 16s:  
température  
potentielle



Radiale A12:  
température  
potentielle



Radiale A21:  
température  
potentielle



Radiale Ajax:  
température  
potentielle

Coupes de température potentielle des radiales I6, I6s, A12, A21 et Ajax sur les 1500 premiers mètres (voir figures 17, 18, 19, 20 et 21 en annexe).

Les coupes de température potentielle des cinq radiales sont visibles sur les figures ci-dessus (les figures 17, 18, 19, 20 et 21 en annexe montrent en plus les sections de salinité et de densité). Si on résume les statistiques de chaque front : stations extrêmes encadrant le front, latitudes extrêmes, bande de latitude et latitude moyenne du front pour l'ensemble des radiales (voir tableau 2), on s'aperçoit que la largeur moyenne de l'ACC (en considérant le STF pour limite nord et la Sby pour limite sud) varie fortement entre le côté Atlantique (radiales A12, A21 et Ajax à 0°E) et le côté Indien (30°E). On peut noter que la radiale I6s ne s'étend pas suffisamment au nord pour échantillonner tout l'ACC. Elle s'arrête à 44°S alors que le STF devait se trouver 1 à 2° maximum plus au nord. A 0°E, la largeur de l'ACC varie entre 13.5 et 15.5° pour une valeur moyenne de 14.7° et à 30°E, elle est de 19° pour I6 et vraisemblablement

18° pour I6s. Cette différence d'environ 5° de latitude peut s'expliquer par la présence plus au sud du gyre cyclonique de la mer de Weddell qui repousse l'ACC vers le nord (voir figure 1).

	STF	SAF	PF	SACCF	Sby
I6	36 / 38 42,3 / 43,0°S 0,7° 42,65°S	46 / 49 46,0 / 47,5°S 1,5° 46,75°S	54 / 59 50,0 / 51,7°S 1,7° 50,85°S	69 / 71 57,0 / 58,3°S 1,3° 57,65°S	73 / 75 59,7 / 61,0°S 0,3° 60,35°S
I6s	- - - -	41 / 37 48,5 / 50,0°S 1,5° 49,25°S	32 / 29 51,6 / 53,7°S 2,1° 52,65°	26 / 24 55,7 / 57,0°S 1,3° 56,35°	22 / 20 58,3 / 59,7°S 1,4° 59,0°S
A12	549 / 550 39,8 / 40,3°S 0,5° 40,05°S	564 / 568 44,9 / 46,8°S 1,9° 45,85°S	569 / 572 47,4 / 50,5°S 3,1° 48,95°S	573 / 575 51,0 / 54,0°S 3,0° 52,5°S	576 / 578 55,0 / 57,0°S 2,0° 56,0°S
A21	153 / 154 41,0 / 41,9°S 0,9° 41,45°S	157 / 161 43,9 / 47,0°S 3,1° 45,45	162 / 165 47,6 / 50,4°S 2,8° 49,0°	166 / 168 51,1 / 52,7°S 1,6° 51,9°S	169 / 170 54,4 / 55,2°S 0,8° 54,8°
AJAX	36 / 35 39,0 / 40,0°S 1,0° 39,5°S	30 / 28 44,0 / 46,0°S 2,0° 45,01°S	23 / 20 49,0 / 50,8°S 1,8° 49,7°S	19 / 17 51,8 / 53,8°S 2,0° 52,8°S	16 / 15 54,6 / 55,8°S 1,2° 55,2°S
MOY:	40,9°S (0,8°)	46,5°S (2,0°)	50,2°S (2,3°)	54,2°S (1,8°)	57,1°S (1,1°)

Tableau 2: Fronts et limites de l'ACC: stations extrêmes, latitudes extrêmes, bande de latitude et latitude moyenne. La dernière ligne indique la latitude moyenne des fronts sur toutes les radiales.

On sait que la frontière Est du gyre de Weddell est relativement bien marquée aux alentours de 30°E. Cette différence de largeur est également bien visible sur les coupes de température. Lorsqu'on traverse le gyre de Weddell au sud de l'ACC à 0°E, on traverse une première fois le courant, ce qui correspond à une inclinaison plus importante des isothermes, puis au cœur du gyre, le courant est très faible d'où des isothermes horizontales et enfin plus au sud, on traverse le courant de retour du gyre vers l'ouest où l'on retrouve des isothermes plus inclinées. En revanche, à 30°E, on ne retrouve pas la même structure hydrologique. Le phénomène est flagrant sur les radiales A12 et Ajax où l'isotherme 0,4°C remonte jusqu'à 300m et l'isotherme 1°C s'étend jusqu'à 56°S alors qu'à 30°E (I6 et I6s), l'isotherme 0,4°C reste dans la même gamme de longitude en-dessous 1200m et l'isotherme 1°C atteint 67°S.

## 2.1.2 Calcul de transports océaniques par les données CTD

Après avoir déterminé la position de l'ACC le long de chacune des radiales hydrologiques, on peut calculer le transport barocline de l'ACC à l'aide des mesures CTD. Il est important de noter que la position des limites de l'ACC selon les critères de température se trouve en général entre deux stations hydrologiques le long des radiales. Les calculs de transport qui suivent ont été réalisés en utilisant les radiales que j'appellerai « majorées », i.e. que pour le STF j'ai limité l'ACC à la station juste au nord du front et pour la Sby, la limite a été prise à la station juste au sud de ce front. On verra plus loin quelle est l'importance du choix de ces stations aux limites ou « échantillonnage latéral ».

Pour calculer le transport barocline à partir des mesures XBT, Rintoul et al (2002) ont utilisé au sud de l'Australie l'anomalie d'énergie potentielle référencée à 2500db car il y a toujours au minimum cette profondeur d'eau entre l'Australie et l'Antarctique. Ils trouvent un rapport entre le transport au-dessus et référencé à 2500m et le transport barocline total le long de la radiale relativement à la profondeur commune la plus grande de 65.8%. Au sud de l'Afrique, j'ai cherché de même à estimer la part du transport barocline en surface référencé à 2500db par rapport au transport sur toute la colonne d'eau. Pour cela, j'ai tracé pour chacune des cinq radiales d'une part le transport pour chaque paire de stations entre 0 et 2500db référencé à 2500db et entre 0db et le fond référencé à la profondeur commune la plus grande et d'autre part, le transport cumulé intégré du sud au nord dans les deux mêmes couches (voir figures 22, 23, 24, 25 et 26 en annexe). Les valeurs principalement intéressantes sont alors les transports cumulés (voir tableau 3). La radiale I6s n'échantillonne pas complètement l'ACC mais une très grande partie malgré tout (comparaison avec I6). Il est donc intéressant de calculer également le transport barocline avec les données de cette radiale.

	0/2500db (Sv)	0/fond (Sv)	Rapport
I6	83,67	160,27	52,20%
I6s	79,26	167,51	47,32%
A12	90,28	154,85	58,30%
A21	94,77	135,55	69,91%
AJAX	96,34	172,51	55,84%
moy :			56,7% avec I6s 59,1% sans I6s

Si l'on ne considère pas la radiale I6s, on trouve un rapport de 59.1% avec un écart-type de 7.7 Sv, ce qui est comparable au résultat trouvé au sud de l'Australie.

Tableau 3: Comparaison des transports baroclines cumulés de l'ACC intégrés du sud au nord des couches 0 / 2500db et 0 / fond (profondeur commune la plus grande).

Pour étudier la variabilité spatiale de la position de l'ACC et de ses fronts, on peut observer la figure 27 qui résume les transports cumulés intégrés du sud au nord pour la couche 0db/fond à 30°E d'une part et à 0°E d'autre part, en parallèle avec les données du tableau 2 qui donne les statistiques géographiques des différents fronts. On retrouve très nettement le fait que l'ACC s'étend plus au sud à 30°E qu'à 0°E. Le front polaire, bien visible à 30°E entre 53 et 50°S, semble avoir une contribution au transport total plus importante à 30°E qu'à 0°E.

Figure 27: Transports cumulés intégrés du sud au nord pour la couche 0db/fond à 30°E et à 0°E.

Connaissant la position de chaque front le long des radiales (cf tableau 2), il est alors possible à partir des courbes de transports cumulés de calculer le transport associé à chaque front et d'étudier leur contribution au transport barocline total de l'ACC (voir tableau 4).

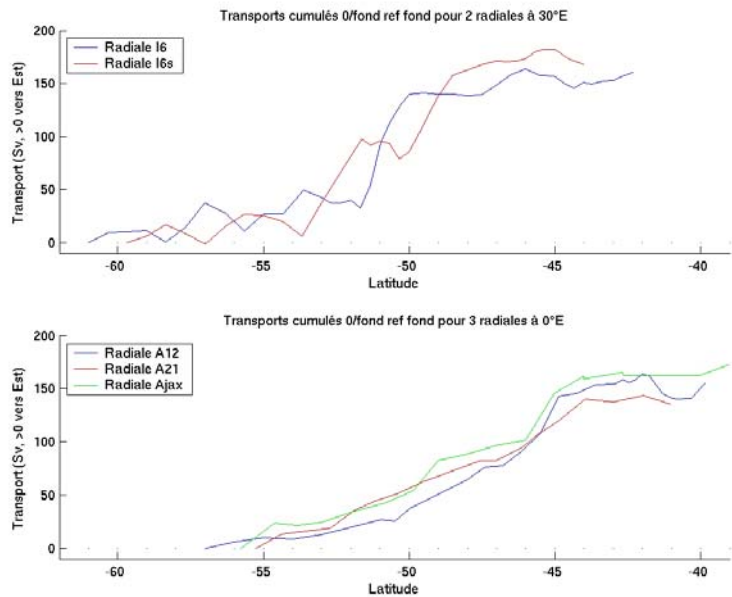


Tableau 4: Transports baroclines (Sv) associés à chaque front pour les couches surface/fond (1<sup>o</sup> ligne pour chaque radiale) et surface/2500db (2<sup>o</sup> ligne). Les moyennes des transports de chaque front sont calculées pour les radiales indiennes (30°E), atlantiques (0°E) et pour l'ensemble des radiales.

	STF	SAF	PF	SACCF	Sby
I6	7.8	24.5	107	37.2	10.3
	2.2	12.9	64	16.5	4
I6s	-	70.8	91.6	27.9	16.6
	-	41.8	36.6	14.8	6.4
<b>moy 30E</b>	7.8	47.65	99.3	32.55	13.45
	2.2	27.35	50.3	15.65	5.2
A12	14.2	65.2	50.2	18	9.9
A21	7.8	58	31.4	25.8	13.2
	5.2	30.8	24.7	21.8	3.1
AJAX	10	60.1	40.2	13.4	23.3
<b>moy 0E</b>	4.5	28.9	27.1	13.3	10.9
	10.66	61.1	40.6	19.06	15.46
<b>MOY:</b>	3.93	31.56	29	17.66	7.26
	10	55.7	64.1	24.4	14.7
	3.5	29.9	37.5	16.9	6.4

On constate qu'en moyenne, les parts de transport associées aux STF, SAF et Sby côté Indien (30°E) sont inférieures au côté Atlantique (0°E). En revanche, les transports du PF et du SACCF côté Indien sont bien supérieurs au côté Atlantique, et cela quelle que soit la couche considérée. Dans l'ensemble, les transports du SAF et du PF sont majoritaires avec une domination du PF, bien que côté Atlantique, son transport soit plus faible que celui du SAF. On remarque également que les transports associés aux frontières nord et sud (STF et Sby) sont relativement faibles comparés aux autres fronts. Mais on peut voir que ces valeurs peuvent changer en fonction de la station hydrologique choisie pour frontière.

En effet, nous avons déterminé la position des fronts et notamment des limites de l'ACC selon les critères d'Orsi et al. (voir tableau 1) mais ces positions se trouvent la plupart du temps entre deux stations hydrologiques consécutives (voir figure 28). Selon le choix des

stations extrêmes, on échantillonnera plus ou moins l'ACC et les valeurs de transports de l'ACC pourront varier (voir tableau 5).

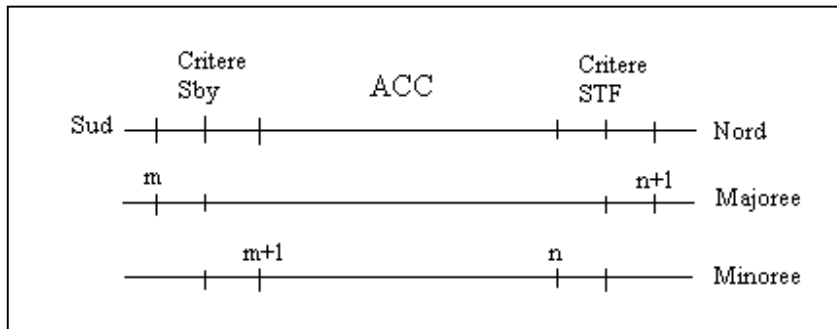


Figure 28: Echantillonnage latéral

	Majorée	Minorée	TMaj-Tmin	0,5* (Tmaj+Tmin)	Ecart (%)
I6	160.27 83.68	147.19 83.01	13.08 0.67	153.73 83.35	8.5 0.8
A12	154.85 90.29	134.98 84.74	19.87 5.55	144.92 87.52	13.7 6.3
A21	135.55 94.77	130.18 86.5	5.37 8.27	132.86 90.63	4 9.1
AJAX	172.51 96.34	139.25 80.89	33.26 15.45	155.88 88.62	21.3 17.4
<b>Moy:</b>	<b>155.79</b> <b>91.27</b>	<b>137.9</b> <b>83.78</b>	<b>17.9</b> <b>7.5</b>	<b>146.85</b> <b>87.53</b>	<b>11.9</b> <b>8.4</b>

0/fond  
0/2500db

Tableau 5: Transports de l'ACC (en Sv) et échantillonnage latéral: incertitude du transport de l'ACC selon le choix des stations extrêmes.

Selon l'échantillonnage latéral, une estimation du transport barocline de l'ACC dans la couche 0/fond peut être modifiée de 11.9% de sa valeur (ou 17.9 Sv) et 8.4% pour la couche 0/2500db (ou 7.5 Sv). Les valeurs des transports du STF et de la Sby sont donc à utilisées avec précaution.

L'exploitation des données CTD me permet de dire que le transport barocline moyen de l'ACC pour la couche 0/fond varie temporellement entre 132.9 Sv et 155.9 Sv (soit 23 Sv d'écart) pour une valeur moyenne de 146.9 Sv avec un écart-type de 10.5 Sv. Pour la couche 0/2500db, ce transport varie entre 83.6 Sv et 90.6 Sv (soit 7 Sv d'écart) pour une valeur moyenne de 87.5 Sv avec un écart-type de 3.1 Sv (l'écart-type  $\sigma$  étant normalisé par (N-1),  $\sigma^2$  est un estimateur non biaisé de la variance).

Avec ces valeurs de transports moyennées entre radiales majorées et minorées, on trouve une proportion entre le transport de la couche 0/2500db par rapport au transport 0/fond de 59.6%, ce qui correspond parfaitement au rapport de 59.1% trouvé précédemment avec les transports cumulés des radiales majorées.

### 2.1.3 Détermination de la relation entre transport et température

Les données CTD m'ont permis d'obtenir une estimation du transport barocline de l'ACC. Le but est maintenant de trouver une relation permettant de calculer ce transport à

l'aide de mesures de température de subsurface seules (XBT). Pour cela, Rintoul a cherché une relation entre la température moyennée entre 600 et 700m, et l'anomalie d'énergie potentielle référencée à 2500db,  $\chi_{2500}$ . Celle-ci permet alors de calculer le transport barocline de la colonne d'eau tel qu'expliqué précédemment (cf paragraphe 1.2.2).

Avec cet objectif, j'ai calculé pour chaque station hydrologique des radiales CTD la température moyennée entre 600 et 700m, notée  $T_{650}$ , et l'anomalie d'énergie potentielle de la colonne d'eau,  $\chi_{2500}$ . Il est alors possible de tracer un diagramme  $\chi_{2500}/T_{650}$  (chaque point représentant une station hydrologique) et de trouver l'équation d'un polynôme qui s'adapte au nuage de point et fournisse une relation empirique. A partir d'uniquement les stations se trouvant au sein de l'ACC, j'ai fait le choix ici d'utiliser un polynôme du huitième degré. Les propriétés des masses d'eau étant quelque peu différentes entre le côté Atlantique et le côté Indien, j'ai tracé une première courbe correspondant aux radiales côté Atlantique, une deuxième correspondant au côté Indien et une dernière sur l'ensemble des points des cinq radiales (cf figure 29).

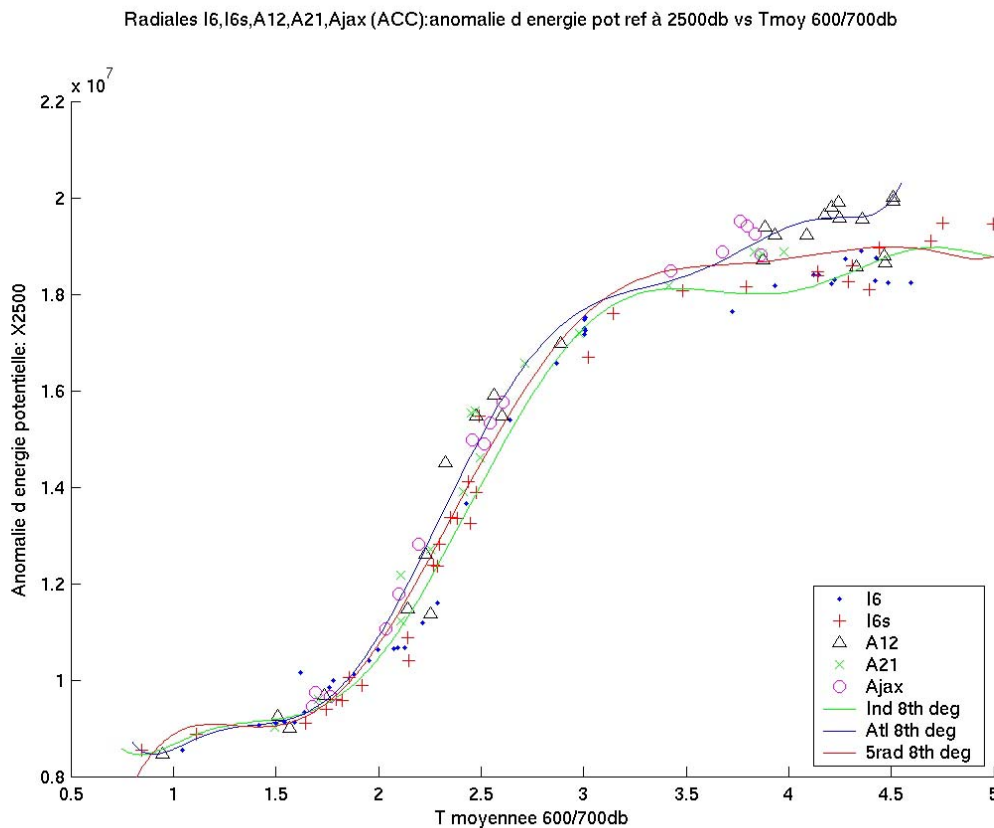


Figure 29: Anomalie d'énergie potentielle intégrée entre 2500db et la surface ( $\chi_{2500}$ ) en fonction de la température moyennée entre 600 et 700m ( $T_{650}$ ). Les données utilisées correspondent aux points de cinq radiales hydrologiques se trouvant au sein de l'ACC. Une première courbe s'adapte aux radiales de l'Atlantique, une deuxième aux radiales de l'Indien et une troisième à l'ensemble des radiales.

D'une manière générale, malgré le fait que les radiales aient été réalisées dans des endroits et à des périodes différents, l'allure du nuage de points semble tout à fait satisfaisante dans la mesure où il ressemble très fortement à la courbe qu'à obtenue Rintoul (Rintoul et al,

2002) au sud de l'Australie (voir figure 6). On constate que pour les températures les plus faibles (qui correspondent aux régions les plus au sud), la variabilité est très faible. Pour les radiales atlantique, il n'y a pas de valeurs entre 1.2 et 1.5°C et le polynôme s'adapte alors mal aux différents points. Il a donc été décidé d'utiliser six points des radiales indiennes (quatre de I6 et deux de I6) se trouvant dans cette gamme de température pour mieux contraindre la courbe à suivre le nuage de points.

Par ailleurs, on constate que certaines stations de la radiale A12 sont assez éloignées des autres stations de cette radiale et sont au milieu de points provenant des radiales indiennes (voir les trois triangles vers 4.4°C et 1.85 sur la figure 29). Or la partie nord de l'ACC n'a pas été échantillonnée à 0°E mais entre 0 et 12°E car à partir de 43°S, la radiale relie le méridien de Greenwich à Cape Town (34°S) (cf carte 1). On peut alors imaginer que ces trois stations de la radiale A12 ont été effectuées au sein d'eau intermédiaire provenant de l'océan Indien et ayant été apportée par la rétroflexion du courant des Aiguilles. L'observation d'un diagramme T-S confirme cette idée. La figure 30 montre un tel diagramme avec les stations de A12 situées à l'Est de 2°E. Les stations en bleu sont situées au sud du STF et ont été réalisées au sein de l'eau antarctique intermédiaire provenant de l'océan Atlantique peu salée. Elles forment une branche bien compacte sur le graphique dont le minimum de salinité atteint 34.25‰ (on peut voir cette masse d'eau sur la coupe de salinité de la radiale A12 entre 41 et 44°S sur la figure 19 en annexe). Celles en rouge sont situées au nord du STF et se trouvent dans de l'eau antarctique intermédiaire de l'océan Indien. Les couples T-S des trois stations en question correspondent aux points bleus situés dans le nuage rouge. Cela montre que ces trois stations ont été réalisées au sein d'une masse d'eau provenant de l'océan Indien qui s'est insérée dans de l'eau antarctique intermédiaire de l'Atlantique. Cela correspond au resserrement des isohalines à 41°S sur la coupe de salinité de la figure 19. Les points de la figure 29 ne sont donc pas représentatifs de l'eau environnante et fausse l'allure du polynôme. J'ai donc préféré ne pas prendre en compte ces trois points pour déterminer le polynôme s'adaptant aux points des radiales atlantiques. Pour les valeurs inférieures à 3.5°C, les polynômes atlantique et indien peuvent être considérés comme identiques mais au-delà, le nuage de points se sépare en deux branches bien distinctes. C'est pourquoi lors de l'utilisation de mesures XBT pour déterminer  $\chi_{2500}$  puis le transport barocline, on utilisera d'une part le polynôme issu des radiales A12, A21 et Ajax pour les radiales XBT situées côté Atlantique (<20°E) et d'autre part le polynôme issu des radiales I6 et I6s pour les radiales XBT situées côté Indien (>20°E).

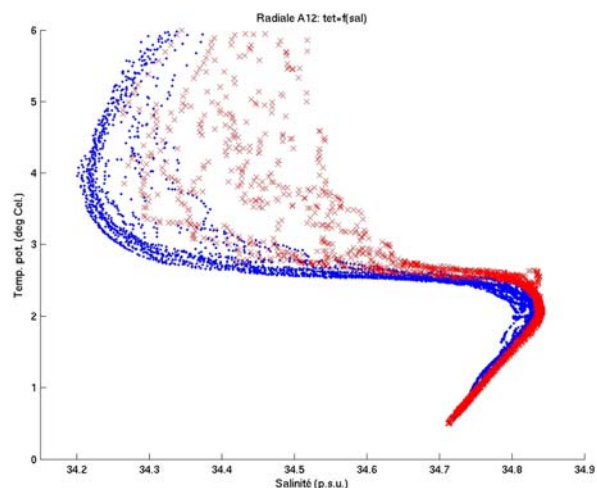


Figure 30 : diagramme T-S de la radiale A12 avec les stations situées à l'Est de 2°E. Les stations en bleu sont situées au sud du STF et les rouges au nord du STF. La présence de points bleus dans le nuage rouge montre l'intrusion d'eau antarctique intermédiaire de l'Indien dans les eaux intermédiaires de l'Atlantique.

### 2.1.4 Validité de la relation $\chi_{2500}/T_{650}$

Pour tester la validité de cette méthode de déduction du transport à partir des données XBT, j'ai utilisé les polynômes indien et atlantique trouvés précédemment pour obtenir les valeurs de  $\chi$  à partir de données de  $T_{650}$  des cinq radiales hydrologiques. Cela me permet alors de calculer le transport référencé à 2500db. J'ai pu ensuite comparer ces valeurs de transports cumulés à celles obtenues directement par les données CTD. Les résultats sont montrés figure 31.

L'accord entre les deux courbes semble très correct pour l'ensemble des radiales. L'erreur RMS des transports par paire de stations (moyenne des erreurs le long de l'axe des abscisses) est donnée pour chacune des radiales dans le tableau 6.

	RMS (Sv)
I6	3,25
I6s	3,48
A12	3,73
A21	4,03
AJAX	2,67
moy :	3,43

Tableau 6 : Erreur RMS des transports par paire de stations.

La moyenne des différences de transports par paire de stations pour une radiale varie entre 2.7 et 4.0 Sv pour une valeur moyenne de 3.4 Sv ou 3.9% du transport moyen au-dessus et référencé à 2500db (87.5 Sv). Au sud de l'Australie, cette valeur varie entre 1.7 et 3.2 Sv pour une valeur moyenne de 2.6 Sv ou 2.5% du transport moyen au-dessus et référencé à 2500db (Rintoul et al, 2002).

Chacune des augmentations du transport cumulé (i.e. les fronts) est restituée sur ces estimations de transports basées sur des données de température. Les erreurs sont plus importantes près du PF et du SAF où les transports eux-mêmes sont plus élevés, mais varient cependant aléatoirement avec la latitude sans biais apparent.

Par ailleurs, on peut comparer les valeurs des transports cumulés obtenus de deux façons différentes pour chaque radiale (voir tableau 7).

	1 CTD	2 $\chi_{2500}/T_{650}$	(2) - (1)
I6	83,01	82,1	-0,9
I6s	76,31	80,45	4,15
A12	84,68	94,26	9,58
A21	86,5	89,02	2,52
AJAX	80,89	85,03	4,13
moy :			3,9 Sv

Tableau 7 : Comparaison des transports cumulés de l'ACC référencés à 2500db calculés par les données CTD et par la relation  $\chi/T_{650}$  sur les radiales « minorées ».

La moyenne des écarts entre les transports cumulés (0/2500db) sur les radiales minorées donnés par la relation  $\chi_{2500}/T_{650}$  et calculés à partir des données CTD est de 3.9 Sv avec un écart-type de 3.8 Sv.

Comparaison des transports cumulés >2500db et différences a chaque paire de stations

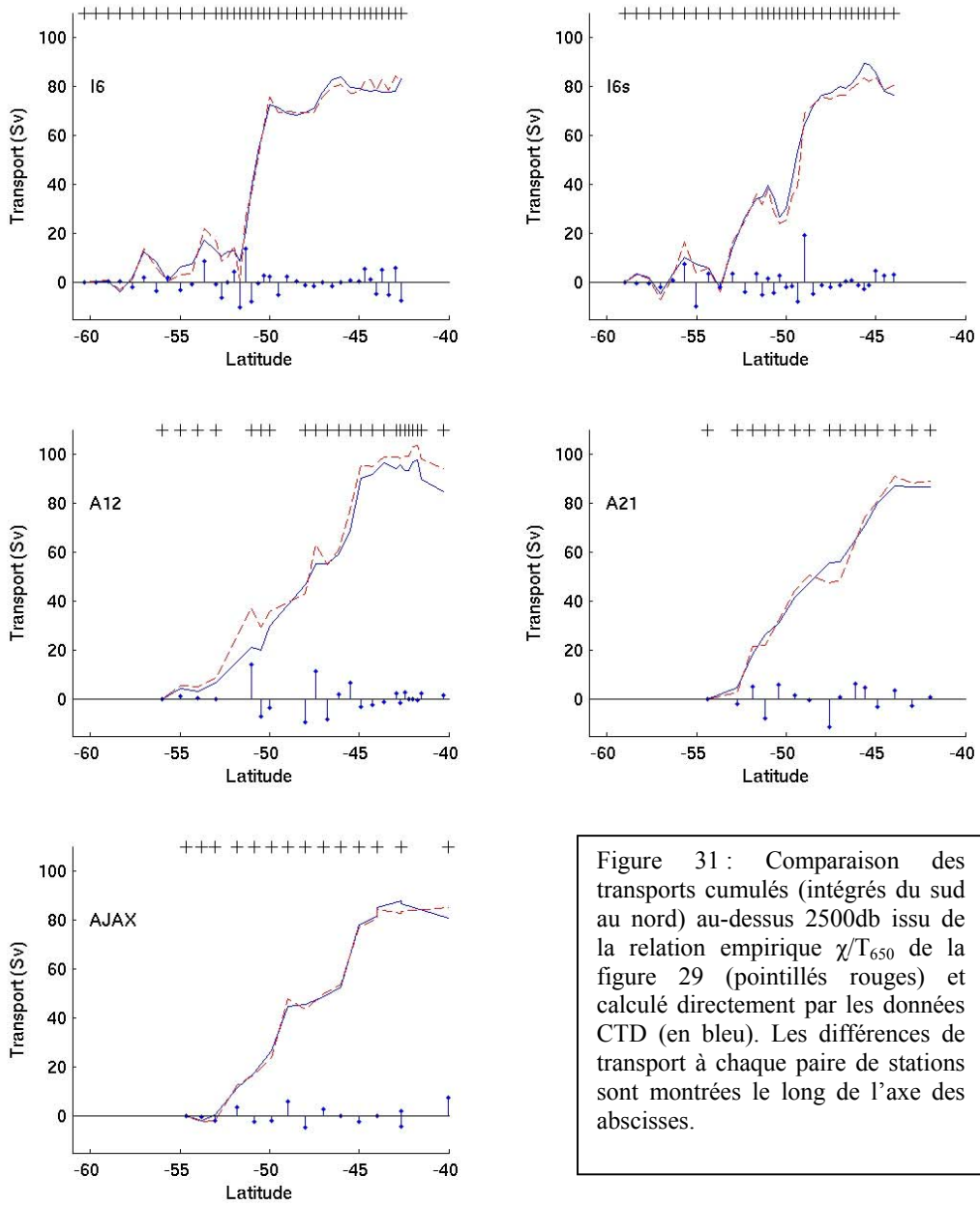


Figure 31 : Comparaison des transports cumulés (intégrés du sud au nord) au-dessus 2500db issu de la relation empirique  $\chi/T_{650}$  de la figure 29 (pointillés rouges) et calculé directement par les données CTD (en bleu). Les différences de transport à chaque paire de stations sont montrées le long de l'axe des abscisses.

## **2.2 Etude du courant circumpolaire antarctique par les données XBT**

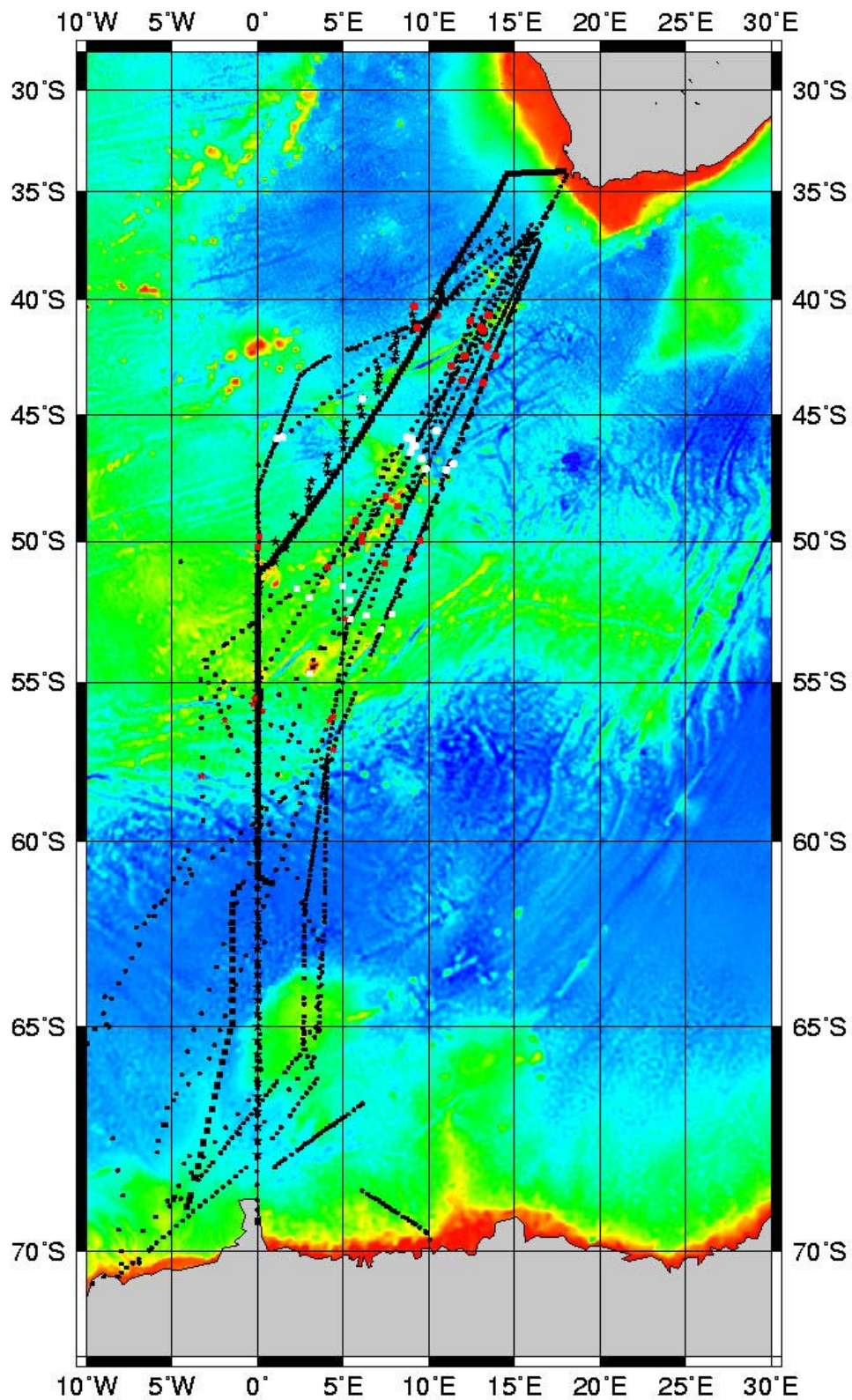
Nous avons montré qu'en utilisant la relation empirique entre  $\chi_{2500}$  et  $T_{650}$  obtenue à l'aide de radiales hydrologiques au sud de l'Afrique, le transport barocline de l'ACC au-dessus et référencé à 2500db peut être estimé à partir de données XBT avec une erreur moyenne d'environ 3.9 Sv. Pour cela, les radiales XBT utilisées doivent se trouver dans la même région que les radiales hydrologiques avec lesquelles a été obtenue la relation.

Dans cette étude, 14 radiales méridiennes XBT à faible pas d'échantillonnage ont été exploitées pour étudier le transport et la position de l'ACC et de ses fronts océaniques : la radiale « Good Hope I » de Mars 2004 dont les stations sont espacées en moyenne de 1/4 de degré de latitude ; une radiale du « Arctic and Antarctic Research Institute » de Février 2004, échantillonnée à 1/3 de degré ; et 12 radiales allemandes réalisées entre Septembre 1989 et Décembre 2000, échantillonnées de 1/5 à 1/8 de degré. Les positions de ces radiales sont montrées sur la carte 2 suivante. Leurs tracés se superposent quasiment à ceux des trois radiales hydrologiques côté Atlantique utilisées précédemment (radiales A12, A21 et AJAX sur la carte 1). Le transport barocline estimé pour chaque radiale à partir de  $T_{650}$  a donc été obtenu exclusivement à l'aide de la relation empirique calculée côté Atlantique (cf figure 29).

### **2.2.1 Transport barocline estimé par les données XBT**

Pour toutes ces radiales, les profils de température de chaque station ont été visualisés et ceux présentant des pics de température importants n'ont pas été utilisés. De plus de nombreux profils ayant une allure en « dents de scie », ils ont tous été « lissés » à l'aide d'un filtre de « Lanczos ». Il s'agit d'un filtre passe-bas dont la fonction de transfert est une fonction de type « créneau » dont les angles sont atténués. Les limites nord (STF) et sud (Sby) de l'ACC ont été déterminées à l'aide de contours de température à partir des critères d'Orsi et al. (1995) (cf tableau 1). La température moyennée entre 600 et 700m ( $T_{650}$ ) des stations situées entre ces deux limites permet alors d'obtenir  $\chi_{2500}$  grâce à la relation empirique puis le transport barocline au-dessus et référencé à 2500db. Le nombre de stations XBT utilisées le long d'une radiale au sein de l'ACC varie entre 21 et 92 pour une moyenne de 49 stations. Pour chaque radiale ont été tracés d'une part le transport barocline par paire de stations et d'autre part le transport barocline cumulé intégré du sud au nord. Les estimations du transport barocline de l'ACC au-dessus et référencé à 2500db s'étendent de 87.5 à 109.6 Sv, soit 22.1 Sv d'écart, pour une valeur moyenne de 97.5 Sv avec un écart-type de 5.5 Sv. L'utilisation des radiales hydrologiques CTD (sans prendre en compte la radiale I6s qui n'est pas complète au nord) avait donné un transport moyen de 87.5 Sv avec un écart-type de 3.1 Sv (cf tableau 5).

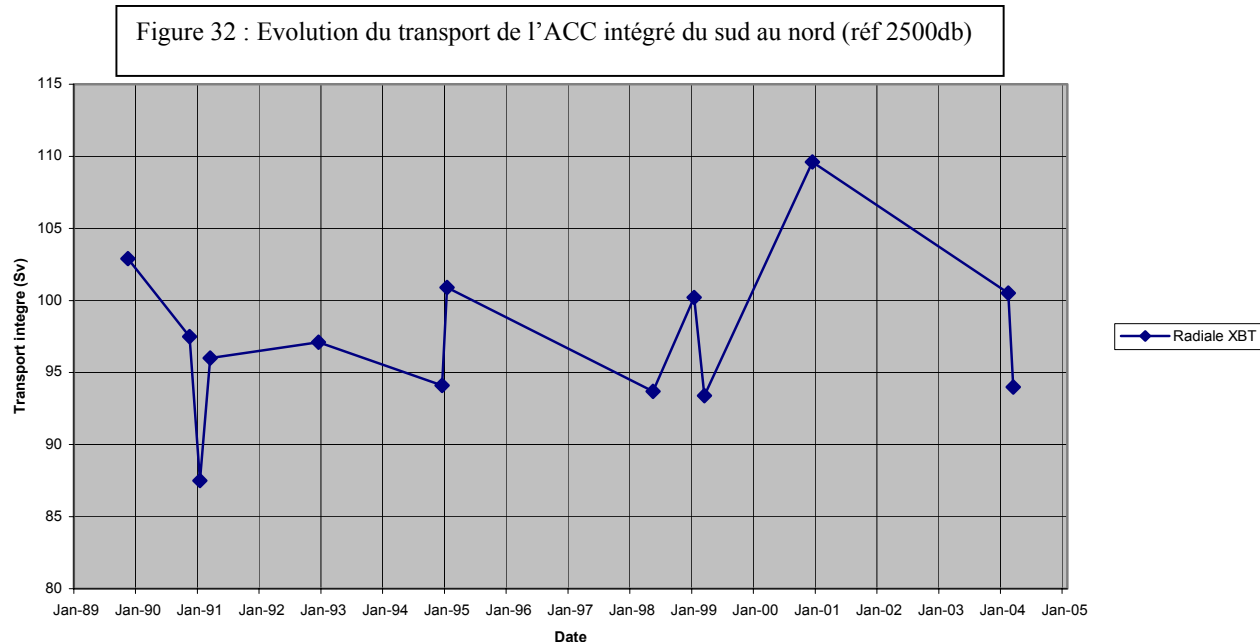
Différents paramètres apportent des incertitudes sur ces estimations. D'une part, la comparaison des deux méthodes de calcul du transport barocline a montré que l'utilisation de la relation empirique donnait en moyenne une estimation du transport supérieure de 3.9 Sv à celle donnée par les données CTD (cf tableau 7) (avec un écart-type de 3.8 Sv), ce qui réduit



Carte 2 : position des radiales XBT utilisées (GoodHope : carrés; Russe : étoiles; radiales allemandes : points). Pour chaque radiale est montré l'emplacement des fronts : STF (ronds rouges); SAF (ronds blancs); PF (carrés rouges); SACCF (carrés blancs) et Sby (étoiles rouges).

l'estimation du transport barocline référencé à 2500db à 93.6 Sv. D'autre part, lors de l'établissement de la relation empirique, seules les stations au sein de l'ACC ont été utilisées si bien que l'intervalle de  $T_{650}$  pour lequel la relation est exploitable s'étend de 0.8°C à 4.55°C (voir figure 29). Au delà, le polymôme ajusté au nuage de points donne des valeurs de  $\chi_{2500}$  absurdes conduisant à des estimations du transport totalement erronées. Or pour 11 des 14 radiales XBT étudiées, les valeurs de  $T_{650}$  de certaines stations ne rentrent pas dans cet intervalle et ces stations n'ont donc pas été utilisées. Parmi ces 11 radiales, 10 d'entre elles ont eu l'extrémité nord (STF) réduite d'en moyenne 2 stations XBT, 7 ont eu l'extrémité sud (Sby) réduite de 1 à 2 stations et 6 ont eu les deux extrémités tronquées. La distance perdue en supprimant 4 stations XBT au total correspond approximativement à la distance entre 2 stations CTD consécutives le long des radiales hydrologiques utilisées précédemment (ces radiales ont été échantillonnées en moyenne avec 1 station CTD tous les 5/6 de degré de latitude). En étudiant l'échantillonnage latéral, on a vu que selon le choix des stations extrêmes, le transport barocline référencé à 2500db pouvait varier en moyenne de 7.5 Sv (cf tableau 5). Six des 14 radiales ayant été réduites de la sorte, on peut dire que l'estimation du transport barocline peut être augmentée d'environ 3.5 Sv. Soit en corrigeant la première estimation de ces deux dernières sources d'incertitude, on trouve une valeur du transport barocline de l'ACC au-dessus et référencé à 2500db de 97.1 Sv ( $97.5 - 3.9 + 3.5$ ) avec un écart-type de 9.1 Sv (l'écart-type a été calculé par  $\sqrt{5.5^2 + 3.8^2 + 6.2^2}$  ).

L'évolution temporelle du transport barocline de l'ACC estimée à l'aide de la série de radiales XBT est montrée sur la figure 32. Mis à part les estimations de Janvier 1991 (87.5 Sv)



et Décembre 2000 (109.6 Sv), les valeurs de transport restent proches de la valeur moyenne de 97.5 Sv (entre 93.4 et 102.9). Néanmoins on peut observer de fortes variations de l'intensité du transport de l'ACC sur des intervalles de temps très courts : écart de 8.5 Sv entre Janvier et Mars 1991, 6.8 Sv entre Décembre 1994 et Janvier 1995, 6.8 Sv entre Janvier et Mars 1999 et

6.5 Sv entre Février et Mars 2004. Or on sait que  $\chi_{2500}$  est une fonction croissante de la température donc si le transport augmente, la différence de température entre le nord et le sud de la radiale sera plus importante. La température à l'extrémité sud variant très peu avec le temps, cela signifie qu'un transport plus important correspond à une température plus élevée au nord soit une thermocline plus profonde. Néanmoins, en observant les contours de température on ne distingue pas d'approfondissement significatif des isothermes. De plus l'écart-type de l'estimation du transport est de 5.5 Sv donc s'il y a une réelle différence du transport de 8 Sv à 2 mois d'intervalle, cela provient probablement plus d'une variation du resserrement des isothermes au niveau des principaux fronts.

L'exploitation des radiales hydrologiques avait permis d'estimer la part du transport barocline de l'ACC au-dessus et référencé à 2500db à 59.1% du transport barocline total de l'ACC entre la surface et la profondeur commune la plus grande pour chaque paire de station. L'estimation corrigée de 97.1 Sv du transport au-dessus de 2500db conduit alors à une valeur du transport barocline total de l'ACC entre la surface et le fond le long du méridien de Greenwich de 164.3 Sv avec un écart-type de 11.9 Sv ( $\sqrt{9.1^2 + 7.7^2}$ ). Cette estimation s'accorde bien avec les valeurs de 162 Sv obtenue avec la radiale hydrologique AJAX (Whitworth and Nowlin, 1987) et 160 Sv obtenue avec la radiale I6 (Civa 2) (Park, 2001). En revanche, elle apparaît supérieure à l'estimation de 146.9±10.5 Sv obtenue précédemment par l'exploitation des données CTD (cf tableau 5).

## 2.2.2 Variabilité des fronts de l'ACC par les données XBT

Pour chacune des radiales XBT, les critères de Orsi et al. 1995 (cf tableau 1) ont permis de déterminer la position des limites nord (STF) et sud (Sby) de l'ACC mais aussi des fronts océaniques qui lui sont associés. Bien que les deux critères du SACCF ( $\theta=1,8^\circ\text{C}$  le long de  $\theta_{\max}$  à  $z > 500\text{m}$  et  $\theta=0^\circ\text{C}$  le long de  $\theta_{\min}$  à  $z < 150\text{m}$ ) donnent souvent des positions très proches, il peut exister parfois une différence importante. Pour l'ensemble des radiales, le critère de détermination du SACCF a été ce second critère (isotherme  $\theta=0^\circ\text{C}$ ) sauf pour deux d'entre elles pour lesquelles le premier critère a été utilisé (isotherme  $\theta=1,8^\circ\text{C}$ ).

Le tableau 8 résume l'exploitation des séries d'XBT et montre pour chaque front de l'ACC sa position moyenne, la moyenne du transport au-dessus et référencé à 2500db qui lui est associé et sa contribution au transport total de l'ACC.

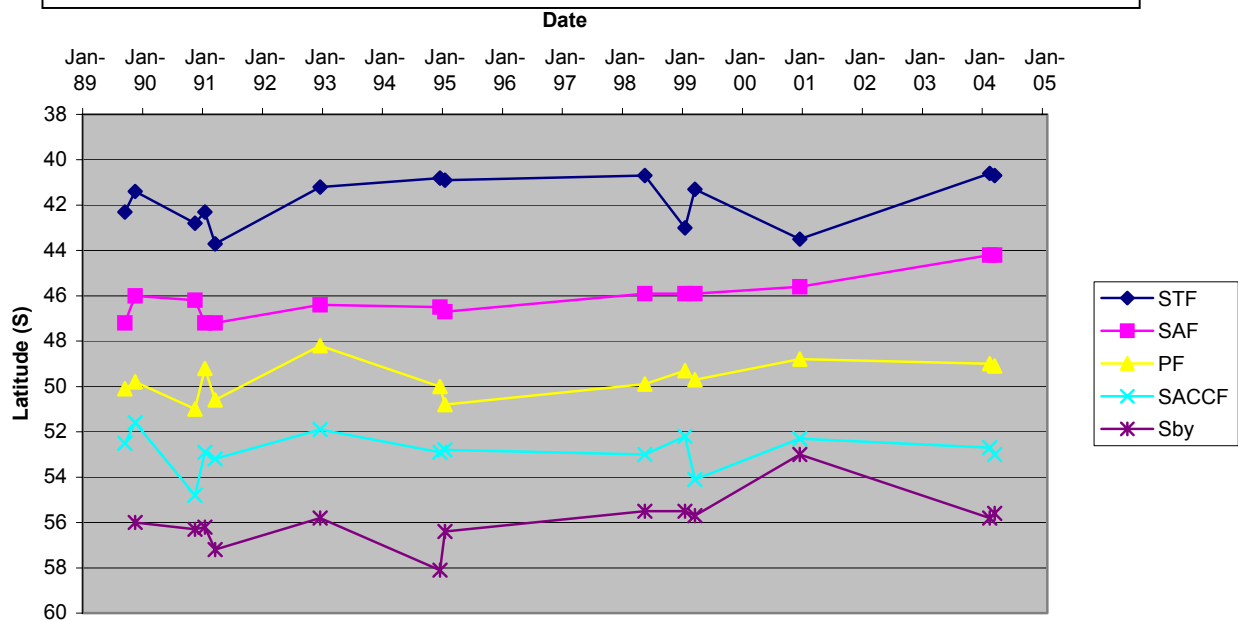
moy ± écart-type	Position (°S)	Transport (Sv)	% du transport de l'ACC
STF	41.8 ± 1.1	9.9 ± 8.3	9.8 ± 7.7
SAF	46.1 ± 1.0	28.3 ± 13.4	29.7 ± 13.9
PF	49.7 ± 0.8	31.4 ± 12.4	33.9 ± 11.3
SACCF	52.9 ± 0.8	20.3 ± 9.8	20.8 ± 10.8
Sby	55.9 ± 1.2	5.1 ± 3.0	5.3 ± 3.0

Tableau 8 : position des fronts de l'ACC, transports associés (au-dessus et référencé à 2500db) et % du transport total de l'ACC issus de l'exploitation des radiales XBT (moyenne ± écart-type)

Les positions moyennes des fronts sont très proches de celles obtenues avec les radiales hydrologiques côté Atlantique A12, A21 et AJAX (cf tableau 2, positions moyennes des fronts pour ces 3 radiales non montrées) : la frontière nord (STF) était donné en moyenne à 40.3°S, le SAF à 45.4°S, le PF à 49.2°S, le SACCF à 52.4°S et la frontière sud (Sby) à 55.3°S. On

retrouve également des positions très proches de celles fournies par Orsi et al. sur la figure 3. Les données CTD donnent une largeur moyenne de l'ACC côté Atlantique de 14.7° de latitude alors que les données XBT donnent une largeur de 14.1°. Cela montre que depuis 20 ans (radiale AJAX en 1984), la structure spatiale des fronts océaniques de l'ACC le long du méridien de Greenwich a très peu varié.

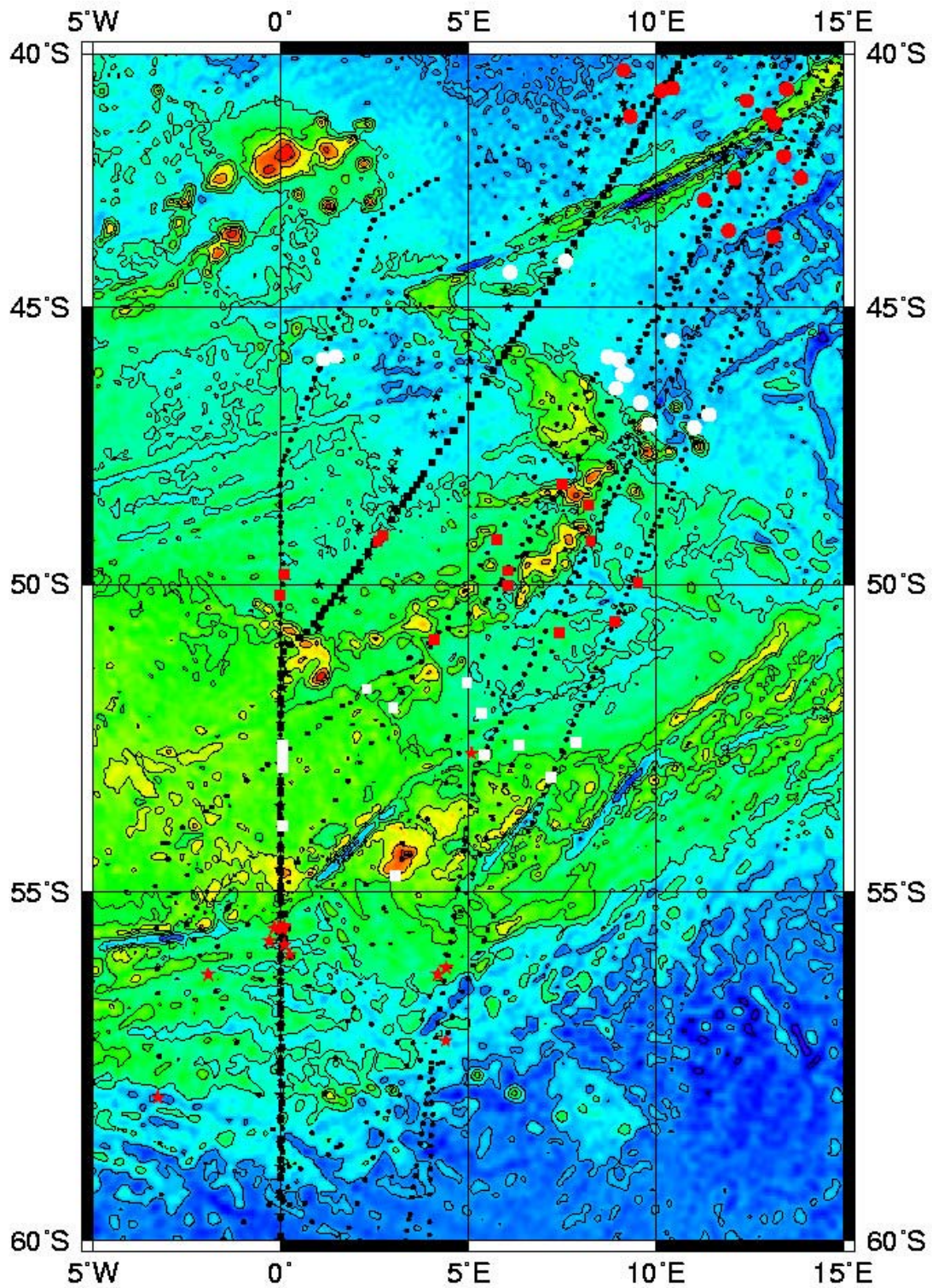
Figure 33 : évolution temporelle de la position des fronts océaniques de l'ACC estimée à partir des radiales XBT



La figure 33 montre l'évolution temporelle de la position des fronts océaniques de l'ACC estimée à partir de la série de radiales XBT. D'une manière générale, pour de faibles intervalles de temps, la position des fronts ne varie que très peu (voir les positions de Février et Mars 2004 qui sont quasiment confondues). Sur la carte 2, on peut voir les positions des différents fronts le long de chaque radiale étudiée. La dispersion en longitude des radiales montre que le front subtropical au alentour de 10°E est orienté NW-SE. Cela confirme le schéma de circulation océanique montré sur la figure 1 : la rétroflexion du courant des Aiguilles occupe la partie nord de cette zone le long du continent africain et oblige l'ACC (et en particulier le STF) à se décaler vers le sud.

Par ailleurs, l'ensemble des radiales utilisées intersectent la dorsale médio océanique. Sur la carte 3 (zoom de la carte 2), le front subantarctique (ronds blancs) semble s'appuyer contre la pente orientée NW / SE vers 47°S-9°E. Cette disposition du front peut être due au forçage bathymétrique, mais la présence du courant de rétroflexion des Aiguilles peut également avoir une influence tel que pour le front subtropical plus au nord. Plus au sud (vers 49°S-7.5°E), on distingue une chaîne de monts sous-marins. Le front polaire (carrés rouges) semble contourner ce relief mais les données utilisées ne sont pas assez précises pour déterminer exactement l'influence du forçage bathymétrique sur ce front. Le SACCF quant à

Carte 3 : zoom de la carte 2 montrant l'influence de la bathymétrie sur la position des fronts océaniques : STF (ronds rouges); SAF (ronds blancs); PF (carrés rouges); SACCF (carrés blancs) et Sby (étoiles rouges). La bathymétrie varie de 5000m (bleu) à 3000m (jaune).



lui paraît être confiné au-dessus d'une sorte de plaine située entre deux chaînes de monts sous-marins (vers 51°S et 54°S). Enfin, la frontière sud (étoiles rouges) paraît s'appuyer contre la face sud de la dorsale. L'effet bathymétrique semble donc avoir un rôle non négligeable quant à la position des fronts, même si leur signature n'est visible qu'en surface. Cependant on peut remarquer qu'à la sortie du passage de Drake, le front polaire est divisé en deux branches. Et après avoir étudié l'influence du relief, Cunningham et al. ont conclu qu'à l'échelle spatiale de cette séparation, les variations méridionales de la bathymétrie ne semblent pas contrôler la position du front polaire dans cette région (Cunningham et al., 2003). Une étude plus approfondie, notamment l'analyse des lignes de vorticité ( $f/h$ ) permettrait donc de mieux préciser le rôle de la bathymétrie dans la région au sud de l'Afrique.



Figure 34 : Evolution temporelle des transports associés aux SAF (bleu), PF (rouge) et SACCF (jaune).

A partir de la position de chaque front et des valeurs du transport cumulé intégré du sud au nord, il est possible d'estimer le transport au-dessus de 2500db associé à chaque front et sa contribution au transport barocline total de l'ACC tels que montré dans le tableau 8. On constate que le transport de l'ACC le long du méridien de Greenwich est dû à plus de 80% à trois jets associés aux SAF ( $29.7 \pm 13.9$  % du transport moyen de l'ACC), PF ( $33.9 \pm 11.3$  %) et SACCF ( $20.8 \pm 10.8$  %). En 1987, Whitworth et Nowlin estimaient le long de la radiale hydrologique AJAX que plus des deux-tiers du transport de l'ACC était directement associé à ces trois fronts (Whitworth and Nowlin, 1987). Les estimations des transports associés aux STF et Sby sont en moyenne nettement plus faibles mais on a vu que ces valeurs étaient à prendre avec prudence puisque des stations aux extrémités nord et sud de certaines radiales n'ont pu être utilisées. L'exploitation des trois radiales hydrologiques à 0°E avait donné des

résultats relativement similaires (cf tableau 4): le transport barocline moyen au-dessus de 2500db associé au STF était de 3.9 Sv, 31.6 Sv pour le SAF, 29.0 Sv pour le PF, 17.7 Sv pour le SACCF et 7.3 Sv pour la Sby. A moins de 3 Sv près, les estimations issues de la relation empirique coïncident avec les valeurs obtenues par les données CTD excepté pour le STF où les valeurs moyennes diffèrent de 6 Sv. Mais on peut noter que les écarts-types associés aux transports sont assez élevés (de 3 Sv pour Sby à 13.4 Sv pour le SAF). La figure 34 montre l'évolution temporelle du transport barocline au-dessus de 2500db associée au SAF, PF et SACCF estimée à partir de la série d'XBT. La moyenne des transports au-dessus de 2500db associés à ces trois fronts est de 26.7 Sv (cf tableau 8 :  $(=28.3+31.4+20.3)/3$ ). On a vu que ces trois fronts contribuent à plus de 80% du transport total de l'ACC et on s'aperçoit sur la figure 34 que les transports de ces trois fronts ont tendance à se compenser (voir en 1999 l'augmentation du transport du SAF et du PF et la diminution du transport du SACCF sur la figure 34). Pour expliquer cette compensation, il serait intéressant d'étudier l'influence éventuelle de la bathymétrie en amont de cette zone. On peut voir notamment sur la figure 3 que vers 35°W, le SAF, le PF et le SACCF sont très proches l'un de l'autre, ce qui est probablement dû à la bathymétrie. Il se peut qu'il y ait un « échange » des transports associés à ces fronts dans cette région.

De même que précédemment pour le transport total de l'ACC, on peut estimer le transport associé à chaque front entre la surface et le fond. L'exploitation des radiales hydrologiques donnait une valeur du transport au-dessus et référencé à 2500db de 59.1% du transport surface / fond. Ainsi, le long du méridien de Greenwich, l'utilisation des données XBT donne une valeur du transport barocline surface / fond associé au STF de  $16.8 \pm 11.3$  Sv,  $47.9 \pm 15.5$  Sv pour le SAF,  $53.1 \pm 14.6$  Sv pour le PF,  $34.4 \pm 12.5$  Sv pour le SACCF et  $8.6 \pm 8.3$  Sv pour la Sby.

## **3 Discussion et perspectives**

### **3.1 Comparaison avec le sud de l'Australie et le passage de Drake**

L'idée d'utiliser la relation empirique entre l'anomalie d'énergie potentielle  $\chi$  et la température de subsurface pour étudier la variabilité du transport du Courant Circumpolaire Antarctique a déjà été exploitée au sud de l'Australie (Rintoul et al. 2002) et dans le passage de Drake (Sokolov et al. 2004). Au sud de l'Australie (140°E), six radiales hydrologiques WOCE réalisées entre 1991 et 1996 le long de la section SR3 ont été utilisées pour déterminer la relation empirique et le niveau de référence a été pris à 2500db. Au sud de l'Amérique (65°W), 4 radiales hydrologiques WOCE effectuées entre 1993 et 1997 le long de la section SR1 ont été utilisées et le rapport entre le transport barocline au-dessus et référencé à 2500db et le transport total entre la surface et la profondeur commune la plus grande a été estimé à 65.8±2.1 % au sud de l'Australie et 67.6±1.3 % dans le passage de Drake. Les résultats trouvés dans ces régions sont donc comparables avec ce qui a été trouvé au sud de l'Afrique. A 140°E, la section s'étend dans les eaux subtropicales, avec une relation T-S différente ce qui nécessite de séparer les approximations  $\chi / T$  au nord et au sud du STF. A 65°W, le STF est interrompu et n'est pas traversé par la section SR1. La courbe  $\chi_{2500} / T_{650}$  n'est donc pas séparée en deux. Au sud de l'Afrique, on ne s'est intéressé qu'à l'ACC et les eaux au nord du STF n'ont donc pas été utilisées pour déterminer la courbe. Cependant, on a vu que selon qu'on se place à l'ouest ou à l'est de 20°E, l'allure de la courbe diverge légèrement (cf figure 29). Ces deux exemples montrent, comme l'a conclu Sokolov et al. que dans les régions où les propriétés des masses d'eau changent (e.g. la transition entre les régimes subantarctique et subtropical ou entre les eaux antarctiques intermédiaires indienne et atlantique), la relation entre  $\chi_{2500}$  et  $T_{650}$  peut également changer.

Une des principales différences concernant l'ACC entre les trois étranglements de l'océan austral est que dans le passage de Drake, l'ACC s'étend le long de toute la section jusqu'au talus américain alors que ce n'est pas le cas au niveau de l'Afrique et de l'Australie. En ces deux derniers endroits existent des courants provenant des bords Est des continents (l'Agulhas au sud de l'Afrique et le courant Est australien puis son prolongement profond vers 700m, le flux de Tasmanie). Ceux-ci s'appuient sur le talus avant de rétrofléchir et occuper ainsi l'espace au nord de ces passages. La proximité du flux intense associé au SAF et du talus continental dans le passage de Drake peut introduire une erreur significative dans l'estimation du transport net et sa variabilité si le flux au-dessus du talus continental n'est pas ou mal pris en compte. Ce transport pourrait être estimé en utilisant différentes relations  $\chi_z / T$  où  $\chi_z$  serait intégré à partir de plusieurs profondeurs  $z$  inférieures à 2500m. Le transport observé pour des profondeurs inférieures à 2500m pourrait alors être estimé comme pour le reste de la radiale. Cependant, la plus grande incertitude observée aux limites de l'intervalle de température rend l'application de cette méthode difficile.

Le long de 140°E, Rintoul et Sokolov (2001) ont estimé le transport moyen surface / fond le long de la section SR3 à 147±10 Sv et 107±7.2 Sv au-dessus et référencé à 2500db. En retranchant le courant de Tasmanie (8±13 Sv) et du talus continental antarctique (1.5±1 Sv) on

obtient un transport de l'ACC surface / fond de 137.5 Sv et 97.5 Sv au-dessus de 2500db. L'exploitation de 31 sections XBT sur une période de 6 ans proches de la ligne SR3 a permis de donner une valeur du transport au-dessus de 2500db entre les deux continents de  $109 \pm 4.9$  Sv soit un transport de l'ACC au-dessus de 2500db de 99.5 Sv (Rintoul et al. 2002). Les six sections SR3 ont permis d'associer au SAF un transport surface / fond de  $105 \pm 7$  Sv à une latitude moyenne entre 51 et 52°S;  $5 \pm 5$  Sv pour la branche nord du PF située entre 53 et 54°S;  $24 \pm 3$  Sv pour le PF sud à 59°S; et deux noyaux du SACCF à 62 et 64°S transportent  $18 \pm 3$  et  $11 \pm 3$  Sv respectivement.

Dans le passage de Drake, pour six sections hydrologiques (1993 – 2000) le long de la ligne WOCE SR1b, Cunningham et al. (2003) ont estimé le transport barocline total de l'ACC référencé à la profondeur commune la plus grande à  $136.7 \pm 7.8$  Sv. En considérant le rapport entre le transport au-dessus de 2500db et le transport surface / fond de 67.6 %, on obtient un transport de l'ACC au-dessus et référencé à 2500db de 92.4 Sv. Les six sections WOCE SR1 utilisées ont montré que le transport de l'ACC est dû à deux jets principaux :  $53 \pm 10$  Sv liés au SAF à 56°S et  $57.5 \pm 5.7$  Sv liés au PF séparé en deux branches espacées de 90km autour de 57.5°S. Ces deux fronts contribuent majoritairement au transport total de l'ACC : ils s'étendent sur environ 3° de latitude et occupent environ la moitié de la largeur du passage de Drake. La partie sud de l'ACC transporte  $9.3 \pm 2.4$  Sv à 60.8°S.

Le tableau 9 résume les valeurs de transports de l'ACC obtenus par les données CTD et en utilisant la relation empirique (XBT) dans différents endroits de l'océan austral.

Tableau 9 : transports baroclines de l'ACC (Sv) dans les 3 zones d'étranglement de l'océan austral obtenus par les radiales hydrologiques (CTD) et par la relation empirique (XBT).

	CTD		XBT	
	réf fond	réf 2500db	réf 2500db	réf fond
Afrique	146,9±10,5	87,5±3,1	97,1±9,1	164,3
Australie	137,5±10	97,5±7,2	99,5±4,9	151,2
Drake	136,7±7,8	92,4		

Alors que les transports de l'ACC surface / fond issus des données CTD sont similaires au sud de l'Australie et de l'Amérique ( $137.5 \pm 10$  Sv et  $136.7 \pm 7.8$  Sv respectivement), celui au sud de l'Afrique semble plus élevé ( $146.9 \pm 10.5$  Sv, cf tableau 5). En revanche, le transport au-dessus de 2500db de 97.1 Sv obtenu par l'exploitation des données XBT au sud de l'Afrique est très proche des valeurs aux deux autres zones d'étranglement de l'ACC (97.5 et 92.4 Sv) (voir tableau 9). Cela signifie donc que le transport barocline entre 2500db et le fond au sud de l'Afrique est plus important (d'une dizaine de Sv) qu'en ces deux autres lieux de référence. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cette différence. D'une part, l'eau profonde nord Atlantique (NADW) s'écoule vers l'Atlantique sud puis est transportée en profondeur par l'ACC vers les océans Indien et Pacifique. D'autre part le gyre de la mer de Weddell situé au sud de l'ACC n'est pas complètement « fermé » : un volume d'eau peut-être non négligeable peut s'en échapper et alimenter l'ACC en profondeur. Par ailleurs le long de la côte sud africaine se trouve un courant de retour de la circulation thermohaline qui ramène des masses d'eau vers l'Atlantique et qui peuvent également venir alimenter l'ACC en profondeur.

Concernant les contributions des fronts au transport total de l'ACC, le transport associé au SAF apparaît largement majoritaire au sud de l'Australie alors que dans le passage de Drake, le transport de l'ACC est partagé de façon quasi égale au niveau du SAF et du PF. En revanche, au sud de l'Afrique, le transport total de l'ACC est dû à trois jets principaux : le SAF et le PF pour environ 1/3 et le SACCF pour 20% (voir tableau 8).

Dans cette étude, nous n'avons discuté que du transport barocline. Cela ne doit pas laisser penser qu'il n'y a pas de flux barotrope. Il a été montré dans certaines publications qu'il existe un transport barotrope significatif dans l'océan austral en particulier près du talus continental et au sein des fronts de l'ACC (Fahrbach et al, 1994 ; Heywood et al, 1999 ; Donohue et al, 2001 ; Phillips and Rintoul, 2002). Les courants barotropiques joueraient également un rôle important dans la dynamique des fronts (i.e. interaction des tourbillons avec les flux principaux) et dans l'interaction des fronts avec la topographie. L'utilisation de jauges de pression aux extrémités des étranglements de l'océan austral suggère que la variabilité du transport absolu est principalement barotrope. Cependant, des mesures dans le passage de Drake indiquent que la variabilité barocline, bien que plus faible que la variabilité barotrope, n'est pas négligeable. En 2003, Cunningham et al. concluent que dans le passage de Drake, la variabilité barocline est une importante contribution à la variabilité totale et que la différence de pression à travers le passage n'est pas un indicateur approprié de la variabilité du transport net. Néanmoins, l'utilisation de la température de subsurface pour étudier le transport barocline au-dessus et référencé à 2500db suggère que la variabilité barocline pour des profondeurs supérieures à 2500db est très faible devant celle de la couche 0 / 2500db.

### **3.2 Transport barocline issu de données altimétriques**

Pour comparer les données de plusieurs sections avec pertinence, il faut non seulement que celles-ci proviennent de la même zone mais qu'elles aient été réalisées au même moment de l'année. On pourra par exemple trouver des différences dans l'épaisseur et les propriétés de la couche de mélange entre le début et la fin de l'été austral. Il paraît alors intéressant pour une étude complète d'avoir plusieurs radiales pour chaque saison de l'année. Or les données XBT utilisées ici pour l'étude de la variabilité du transport de l'ACC ont été acquises seulement entre les mois de novembre et mai. Il y a donc un risque de biaiser les variabilités hautes et basses fréquences (y compris la variabilité saisonnière). Pour pallier à ce défaut, Rintoul et al. (2002) ont cherché à savoir si au sud de l'Australie, les séries temporelles plus continues de hauteur de surface de la mer par altimétrie satellitaire peuvent être utilisées pour estimer le transport barocline (Rintoul et al, 2002). En comparant les anomalies de niveau de la mer issues des données in situ des radiales hydrologiques (SR3) aux données altimétriques interpolées au moment et au lieu des radiales CTD, ils trouvent une correspondance raisonnable avec une erreur rms de 0.05m.

Les estimations CTD de l'anomalie de hauteur de surface de la mer référencée à 2500m rendent compte des changements du champ de densité uniquement dans la couche au-dessus de ce niveau. Et les mesures altimétriques reflètent les changements du champ de densité dans toute la colonne d'eau ainsi que des variations du flux barotrope. Les différences entre les anomalies de hauteur de surface de la mer données par les CTD et par l'altimétrie reflètent donc en partie l'anomalie barocline de la couche inférieure à 2500m et l'anomalie barotrope.

D'autres facteurs sont aussi à l'origine des différences telles que les différences entre les échantillonnages temporel et spatial, les erreurs de cartographie et les erreurs de réduction de la marée. Malgré ces facteurs, Rintoul et al. considèrent que les estimations de l'anomalie de hauteur de surface de la mer issues des données CTD et des mesures altimétriques sont similaires, suggérant que le signal altimétrique reflète largement les changements baroclines de la colonne d'eau au-dessus de 2500m.

Il est alors possible d'estimer le transport barocline au-dessus et référencé à 2500m à partir de données altimétriques : les données CTD de la radiale SR3 ont été utilisées pour déterminer une relation empirique entre la hauteur dynamique de surface référencée à 2500db et le transport cumulé intégré du sud au nord. La relation obtenue étant parfaitement bijective (voir figure 10 de Rintoul et al, 2002), cela suggère que le transport barocline peut être estimé à partir de la hauteur dynamique de surface issue de données altimétriques. En comparant alors les transports baroclines issus de l'altimétrie et des données CTD, ils trouvent une allure des courbes de transport cumulé très similaires. Les différences entre paires de stations sont plus faibles au sud de la section qu'au nord et inférieures à 5 Sv et les résidus les plus élevés sont inférieurs à 10 Sv. La différence rms entre les transports nets est de 4 Sv. Les faibles résidus obtenus suggèrent que les variations du niveau de la mer reflètent en première approche les changements du flux baroclines au-dessus de 2500m. Si la trace au sol du satellite et les lignes XBT se superposent, il est possible de comparer les estimations du transport barocline par les deux méthodes. Au sud de l'Australie, l'erreur rms entre les estimations simultanées du transport par les données XBT et par l'altimétrie est d'environ 4 Sv (Rintoul et al, 2002).

Ainsi, il semble intéressant d'essayer d'appliquer la même méthode au sud de l'Afrique. Pour cela, il faut que la zone de survol du satellite corresponde aux radiales XBT. Dans cet objectif, le choix de l'emplacement de la radiale du projet GOODHOPE a été en partie du au fait qu'elle suit la trace au sol du satellite altimétrique Topex/Poseidon – Jason1. Cela permettra donc d'améliorer efficacement l'échantillonnage temporel des observations. Au sud de l'Australie, les estimations du transport déduites de l'altimétrie ont montré que les radiales XBT réalisées durant l'été austral (entre Octobre et Mars) ne rendent pas compte d'une portion significative de la variabilité du transport. Si l'altimétrie semble efficace pour étudier l'ACC, de nombreux facteurs réduisent néanmoins la qualité de l'information altimétrique si l'on souhaite suivre le transport le long de toute la radiale, d'un continent à l'autre. En effet, les modèles de marée utilisés pour réduire la marée des données altimétriques sont moins efficaces au-dessus des talus continentaux (Shum et al, 1997). Cartographier les données altimétriques est également plus difficile près des côtes si bien que la variabilité du courant peut être sous-estimée en haut de la pente continentale (Ducet et al, 2000).

### **3.3 Intérêt du projet GOODHOPE au sud de l'Afrique**

Une meilleure compréhension des processus océano-météo-climatologiques entre les bassins atlantique et indien nécessite un projet tel que GOODHOPE récemment débuté. Il est clair qu'une période de grand nombre d'observations est nécessaire pour capturer la variabilité saisonnière. En raison de la grande extension de la section Goodhope (qui est à la dimension d'un véritable océan et pas seulement d'un rétrécissement), réaliser une radiale CTD durant les quatre saisons est utopique, même sur une courte période d'un ou deux ans. En revanche, il est

prévu une période d'observation intense par XBT et il est également en projet durant cette période d'utiliser des XBT plus profondes dans la partie nord en raison de l'approfondissement des isothermes dans la région subtropicale et des XCTD (eXpendable Conductivity Temperature Depth) pour obtenir des données de salinités, fondamentales dans cette région de l'océan.

Par ailleurs, l'utilisation de la température de subsurface pour étudier la variabilité du transport barocline d'un continent à l'autre permettrait de comparer le transport total au sein de l'océan austral (et pas seulement celui de l'ACC) avec les deux autres zones d'étranglement au sud de l'Amérique et de l'Australie. Cela rendrait possible de meilleures estimations des flux inter – bassins océaniques tels qu'à travers l'Indonésie et le détroit de Béring. Dans cette perspective, il pourrait être intéressant d'appliquer la même méthode que dans cette étude pour une radiale dans la région subtropicale, par exemple entre Cape Town et Gough Island, ce qui donnerait a priori une estimation du flux entrant dans l'Atlantique sud. Néanmoins, plusieurs points rendraient cette étude difficile : l'utilisation de la relation empirique  $\chi / T_{650}$  ne rend compte que du signal barocline or dans la région subtropicale ce signal est moins important. De plus il s'agit d'une zone fortement énergétique en raison du courant de retour des Aiguilles. La contribution des tourbillons rendrait alors difficile l'estimation du transport à travers la section. Il faudrait également s'assurer que la relation  $\chi / T$  est de qualité suffisante pour être exploitée dans cette région où les masses d'eau sont fortement mélangées.

Pour mieux comprendre la variabilité interannuelle de l'océan austral, il serait également intéressant d'étudier les conditions de forçage de surface au sud de l'Afrique car la variabilité intervient principalement dans la couche de mélange. Plusieurs études ont notamment été réalisées sur les connections entre le vent et les variations du transport dans le passage de Drake et au sud de l'Australie. En ce dernier lieu, Rintoul et al. considèrent que dans la bande de fréquence interannuelle, les variations du transport barocline net sont corrélées avec le forçage du vent et le rotationnel du forçage du vent sur une large bande de latitude (Rintoul et al, 2002).



## **4 Résumé et conclusions**

Notre connaissance de la variabilité du Courant Circumpolaire Antarctique (ACC) au sud de l’Afrique est pauvre à cause d’un manque d’observations. Le projet international GOODHOPE venant de commencer a pour but de combler cette lacune et de mieux connaître les échanges entre les océans Indien et Atlantique. L’étude menée ici qui contribue à ce projet, vise à appliquer une méthode au sud de l’Afrique, déjà utilisée au sud de l’Australie qui utilise des radiales XBT (*eXpandable BathyThermograph*), plus rapides et moins onéreuses que des radiales hydrologiques CTD (*Conductivity Temperature Depth*), pour obtenir des estimations fréquentes et précises du transport barocline du Courant Circumpolaire Antarctique avec une résolution spatiale élevée.

Après avoir vérifié que les propriétés hydrologiques des masses d’eau au sud de l’Afrique permettaient la même étude qu’au sud de l’Australie, j’ai exploité les données CTD de cinq radiales hydrologiques, 3 situées côté Atlantique (0°E) et 2 côté Indien (30°E) pour obtenir d’une part la structure de l’ACC et de ses fronts océaniques (selon les définitions d’Orsi et al, 1995). Côté Atlantique, le front subtropical (STF), pris comme frontière nord de l’ACC, est trouvé en moyenne à 40.3°S, le front subantarctique (SAF) à 45.4°S, le front polaire (PF) à 49.2°S, le front sud de l’ACC (SACCF) à 52.4°S et la frontière sud (Sby) à 55.3°S. La largeur moyenne de l’ACC côté Atlantique est de 14.7° de latitude alors qu’elle est de 18.5° de latitude côté Indien (30°E). Cette différence est expliquée par la présence au sud de l’ACC du gyre cyclonique de la mer de Weddell qui s’étend vers l’Est jusqu’à environ 30°E. D’autre part, les données CTD donnent un transport moyen de l’ACC au-dessus et référencé au fond de  $146.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  (146.9 Sv)  $\pm 10.5$  Sv (moyenne  $\pm$  écart-type) et un transport au-dessus et référencé à 2500db de  $87.5 \pm 3.1$  Sv soit 59.1% du transport total.

Par la suite, j’ai montré que l’étroite relation entre la température de subsurface (entre 600 et 700m), donnée par les XBT et l’anomalie d’énergie potentielle  $\chi$ , qui est une fonction courant pour le transport barocline, peut être exploitée pour estimer le transport de l’ACC au-dessus et référencé à 2500db avec une erreur de quelques pourcents. Quatorze radiales méridiennes XBT réalisées entre Septembre 1989 et Mars 2004 ont été exploitées pour étudier le transport et la position de l’ACC et de ses fronts océaniques. En tenant compte des sources d’erreurs, on obtient une estimation du transport barocline de l’ACC au-dessus et référencé à 2500db de  $97.1 \pm 9.1$  Sv. En utilisant le fait que le transport au-dessus et référencé à 2500db est une fraction presque constante du transport surface–fond le long du méridien de Greenwich, cela correspond à un transport barocline total de  $164.3 \pm 11.9$  Sv. La principale source d’incertitude intervient aux extrémités des radiales : l’utilisation de la relation empirique  $\chi / T$  n’est valable que pour un intervalle de température limité. Or la température de subsurface ( $T_{650}$ ) de certaines stations situées aux extrémités des radiales (principalement au nord, côté subtropical où les variations de température sont plus rapides qu’au sud de l’ACC) ne rentrent pas dans cet intervalle et ces stations n’ont donc pas été utilisées. Ces radiales ont donc été « tronquées », ce qui fausse les estimations du transport total de l’ACC et en particulier des transports associés aux frontières nord et sud (STF et Sby). Le transport barocline de l’ACC au-dessus de 2500db le long du méridien de Greenwich est dû à plus de 80% à trois jets dirigés vers l’Est associés au SAF (28.3Sv soit  $29.7 \pm 13.9$  % du transport

moyen de l'ACC), au PF (31.4Sv soit  $33.9 \pm 11.3$  %) et au SACCF (20.3Sv soit  $20.8 \pm 10.8$  %). La valeur du transport barocline de l'ACC au sud de l'Afrique entre 0 et 2500db est très proche des valeurs au sud de l'Australie et dans le passage de Drake (sud de l'Amérique) mais la partie du transport barocline entre 2500db et le fond est plus importante d'une dizaine de Sv. Cette différence est peut être due à l'arrivée de l'eau profonde nord Atlantique, à l'influence du gyre de la mer de Weddell et/ou au retour de la circulation thermohaline qui ramène des masses d'eau vers l'Atlantique le long de la côte sud africaine.

La série temporelle de radiales XBT donne des estimations des positions des fronts océaniques de l'ACC très proches de celles issues des radiales hydrologiques CTD. En observant la bathymétrie dans cette région, il semble que le SAF, le PF, le SACCF et la Sby s'appuient le long du relief de la dorsale médio océanique. Une analyse plus approfondie, notamment des lignes de vorticité ( $f/h$ ), permettrait peut-être de préciser le rôle du forçage bathymétrique.

Malgré des écarts-type élevés (jusqu'à 13.4 Sv pour le SAF), les valeurs moyennes des transports associés aux différents fronts issues de la relation empirique coïncident à moins de 3 Sv près avec les valeurs obtenues par les données CTD, excepté pour le STF où les valeurs moyennes diffèrent de 6 Sv. Cela montre que depuis 20 ans (radiale AJAX en 1984), la structure spatiale des fronts océaniques de l'ACC le long du méridien de Greenwich a très peu varié. On constate également que les transports associés aux principaux fronts dans cette région (SAF, PF et SACCF) ont tendance à se compenser. Pour confirmer ce fait, il serait intéressant de voir s'il n'y a pas un « échange » de transport lors d'un rapprochement de ces fronts en amont, éventuellement dû à la bathymétrie.

Cette étude ne s'est attachée qu'aux estimations des transports baroclines de l'ACC, ce qui ne signifie en rien que le transport barotrope est négligeable dans cette partie de l'océan austral. Le problème majeur lié à l'utilisation de radiales XBT (comme des radiales CTD) provient de la sensibilité du traitement des stations aux extrémités des radiales. Une seconde limitation des lignes répétées d'XBT pour le suivi de la variabilité du transport est leur échantillonnage temporel. Réalisées uniquement durant l'été austral en raison des conditions climatiques, elles ne permettent pas de capturer une portion significative de la variabilité du transport. Pour remédier à cela, une alternative efficace consisterait à utiliser des mesures continues de l'altimétrie satellitaire qui permettent d'estimer le transport barocline à partir de l'anomalie de hauteur dynamique de surface de la mer. Il faut néanmoins pour cela que la zone de survol coïncide avec les radiales hydrologiques. Dans cet objectif, la section du projet « Goodhope » a été choisie le long de la trace au sol du satellite altimétrique Topex/Poseidon – Jason1. Néanmoins, on a vu que des séries de lignes XBT peuvent révéler les variations de la position des fronts océaniques de l'ACC et de l'intensité des transports associés entre l'Afrique du sud et l'Antarctique. Les sections répétées de CTD et d'XBT restent donc un moyen essentiel pour surveiller l'Océan Austral. Les relevés hydrologiques surface-fond d'un continent à l'autre apparaissent comme l'outil standard « en or » dans la mesure où ils permettent d'obtenir également d'autres propriétés telles que la distribution des traceurs, les changements en température et salinité dans l'océan intérieur, la variabilité du transport de chaleur, carbone, sel, oxygène et autres propriétés. Les mesures de température de la couche supérieure de l'océan par des sections répétées d'XBT fournissent de même une information sur la distribution verticale des changements dans la structure thermique qui ne peut être obtenue par aucun autre moyen.

## Page personnelle

Au cours de ma formation, j'ai pu m'orienter progressivement vers l'étude de l'environnement et en particulier de l'océan, domaine qui m'intéresse depuis plusieurs années. Cette période de cinq mois qui vient de s'écouler a représenté pour moi une étape importante dans mon cursus dans la mesure où il constituait mon projet de fin d'études d'ingénieur et un stage de D.E.A.. Je souhaitais pour cette occasion trouver un sujet d'étude qui me permette d'une part d'élargir et d'approfondir mes connaissances en océanographie physique et d'autre part qui puisse se dérouler à l'étranger afin de vivre une expérience qui j'étais sûr, allait être enrichissante. Cette étude de l'océan austral a commencé au Laboratoire de Physique des Océans à Brest, où je souhaite effectuer un doctorat, et s'est poursuivie au *Department of Oceanography* à l'université de Cape Town en Afrique du sud. Cette opportunité de stage qui se présentait à moi était donc parfaite.

Bien que j'en étais déjà convaincu, ces stages de longue durée me paraissent indispensables dans la mesure où une formation théorique seule est insuffisante pour se préparer à la vie active. D'un point de vue professionnel, j'ai pu appliquer certaines connaissances acquises précédemment mais j'ai surtout pu « vivre » une étude scientifique complète à partir de données brutes avec exploitation, interprétation, comparaison et discussion, ce que l'on n'a jamais eu l'occasion de faire à cette ampleur dans notre cursus scolaire. Cette étude s'insérant elle-même dans un projet de recherche international, cela m'a permis d'avoir un aperçu de la manière dont se monte un projet dans le domaine de la recherche océanographique. La lecture de publications scientifiques permet également de bien se rendre compte de la façon dont les chercheurs abordent un problème et travaillent en général dans ce milieu. Ce stage a donc été la continuation directe de ma formation théorique mais constitue aussi une très bonne étape dans la mesure où je souhaite par la suite effectuer un doctorat en océanographie physique.

Au-delà de cet aspect, cette période a aussi été une formidable expérience d'un point de vue humain. Dans le cadre de mon projet, j'ai pu d'une part rencontrer et discuter avec des personnes ayant les mêmes centres d'intérêt que moi, que ce soit au laboratoire à Brest, au *Department of Oceanography* en Afrique du sud ou simplement interagir par mail avec des chercheurs d'autres laboratoires à l'étranger dans le cadre du projet international. D'autre part, j'ai eu l'occasion de participer à une courte campagne en mer sur un navire de recherche sud-africain, ce qui m'a permis de renforcer mon expérience sur l'acquisition de données océanographiques à la mer, chose qui me paraît indispensable si je souhaite continuer à travailler dans ce domaine. De plus, les trois mois pendant lesquels j'ai vécu en Afrique du sud ont été pour moi d'un apport culturel intense. Séjourner dans un pays célébrant 10 ans de démocratie avec un étonnant panel de gens tellement différents et intéressants a été pour moi l'occasion de porter un regard critique sur notre monde « occidental » qui selon moi, ne peut être que bénéfique.



## **Bibliographie**

- Belkin I. M. and Gordon A.L. Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania, *J. Geophys. Res.*, 101, 3675-3696, 1996.
- 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.
- Deacon, G.E.R., A general account of the hydrology of the South Atlantic Ocean, *Discovery rep* .7, 171-238, 1933.
- Deacon, G.E.R. (1937), The Hydrology of the Southern Ocean. *Discovery rep*, 15 1-124.
- Donohue, K. A., E. Firing, and S. Chen, Absolute geostrophic velocity within the Subantarctic front in the Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 106, 19, 869-882, 2001.
- Fahrbach, E., G. Rohardt, M. Schroderr, and V. Strass, Transport and Structure of the Weddell Gyre, *Ann. Geophys.*, 12, 840-855, 1994.
- Gordon, A.L., Structure of Antarctic waters between 20°W and 170°W, *Antarct. Map Folio Ser.*, folio 6, edited by V.C.Bushnell, 10pp. with maps, Am. Geogr. Soc., New York, 1967.
- 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., 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.
- Lutjeharms, J. R. E., and H. R. Valentine, Southern Ocean thermal fronts south of Africa, *Deep Sea Res.*, 31, 1461-1475, 1984.
- McCarthy, M.S. 1977. Subantarctic mode water. *In a voyage of Discovery*, ed. M.V. Angel, Pergamon, New York, pp. 103-119.
- 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., 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.
- Park Y-H, Charriaud E. and Craneguy P., Fronts, transports and Weddell gyre at 30°E between Africa and Antarctica, *J Geophys Res*, 106, C2, 2857-2879, 2001.
- 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.
- Piola, A.R. & Georgi, D.T. 1982. Circumpolar properties of Antarctic Intermediate Water and Subantarctic Mode Water. *Deep-Sea Research*, 29, 687-711.
- Pond S. and G.L. Pickard, *Introductory dynamic oceanography*, 1978.
- 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 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.
- 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.
- Sverdrup, H.U., Hydrology, 2, Discussion, B.A.N.F. *Antarct. Res. Exped.*, 1921-1931, Ser. A, 3, *Oceanography*, 89-125, 1940.
- 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.
- Yuan X. and D.G. Martinson, Zhaoqian Dong, Polar research Institute of China, Shangaï, China, Upper ocean thermohaline structure and its temporal variability in the southeast Indian Ocean. Report on the first Good Hope meeting, Bremerhaven, Germany, September 5 and 6 2003.



## **Annexe**

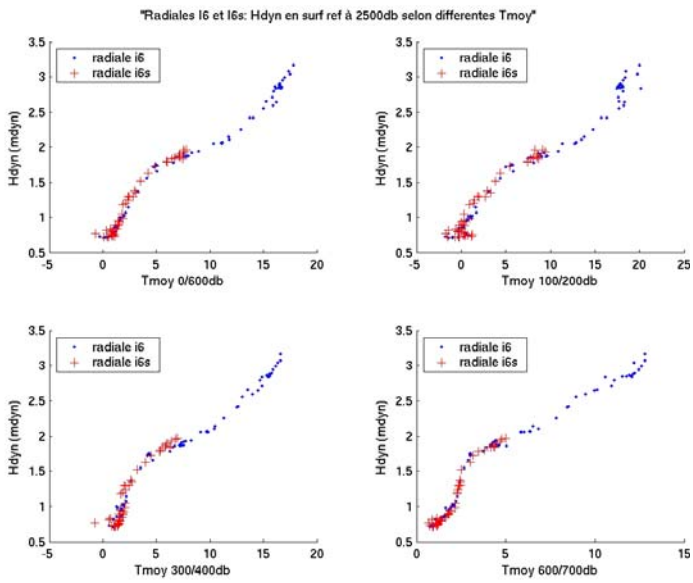


Figure 7

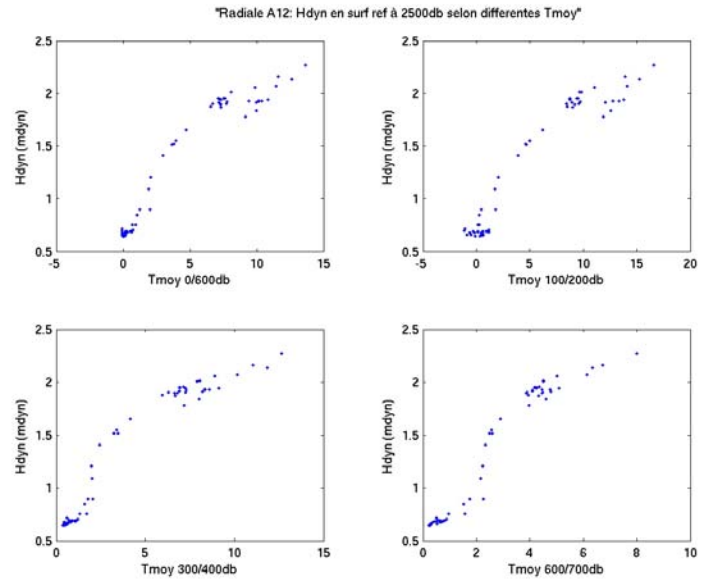


Figure 8

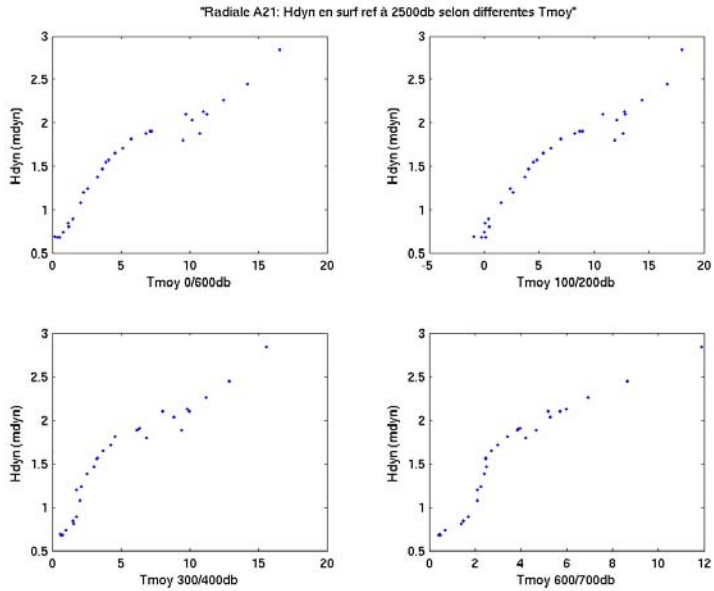


Figure 9

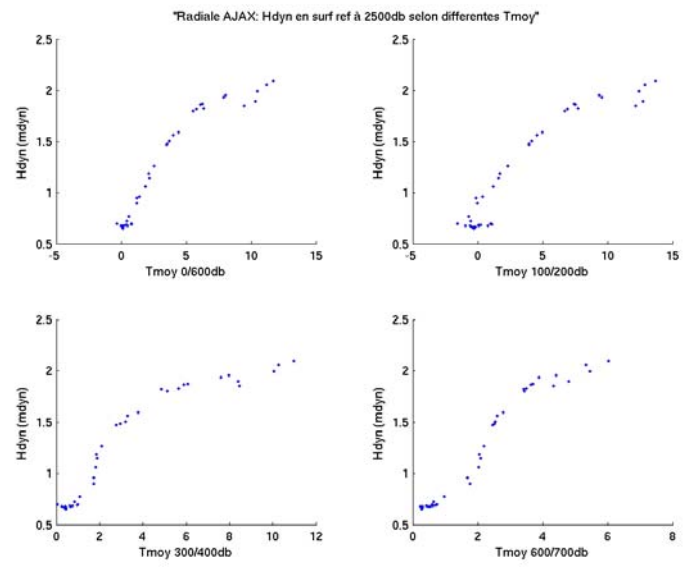


Figure 10

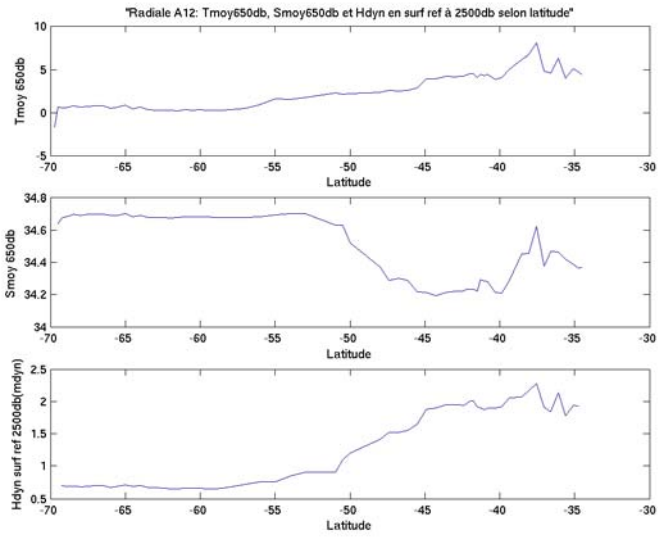


Figure 13

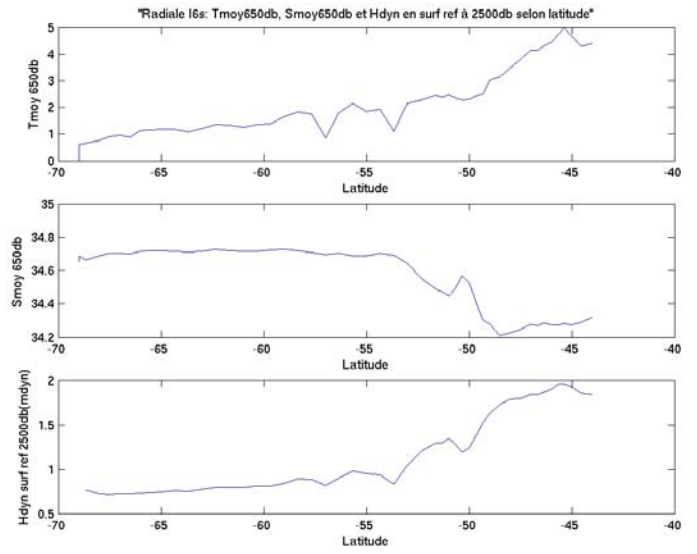


Figure 14

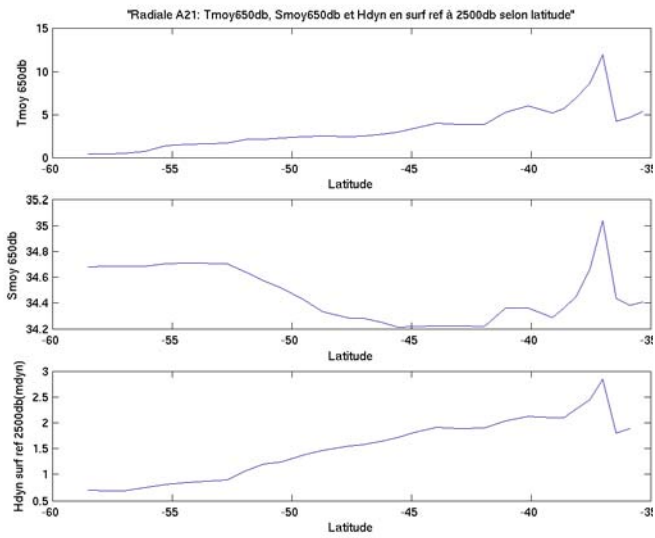


Figure 15

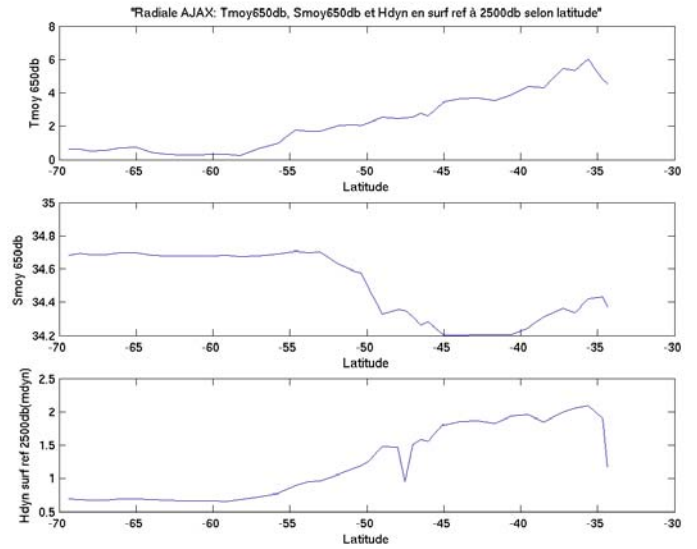


Figure 16

**Radiale I6:**  
 Temperature potentielle, Salinité et Sigma (0 et 1)

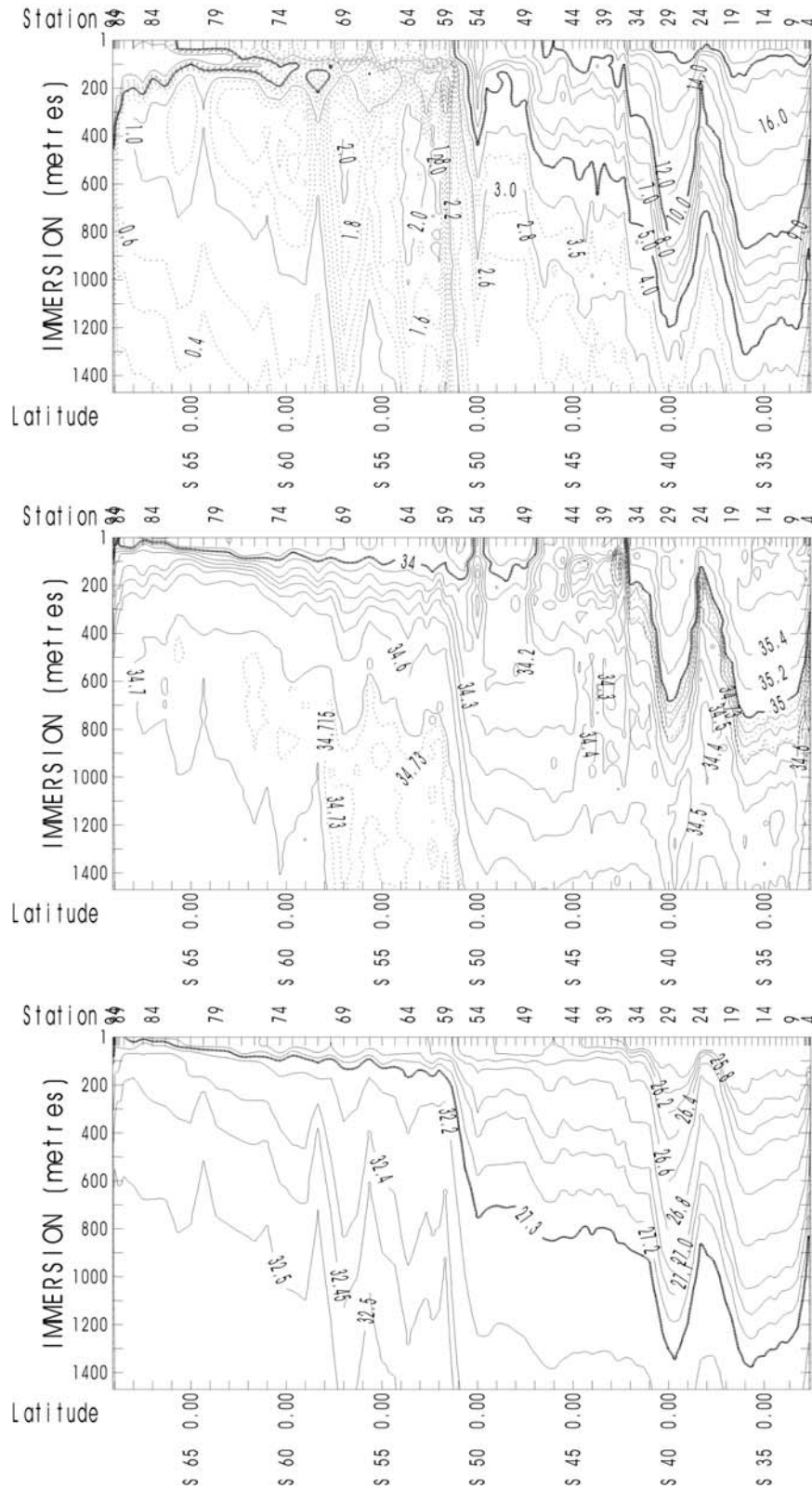


Figure 17

### Radiale I6s

Température potentielle, Salinité et Sigma (0 et 1)

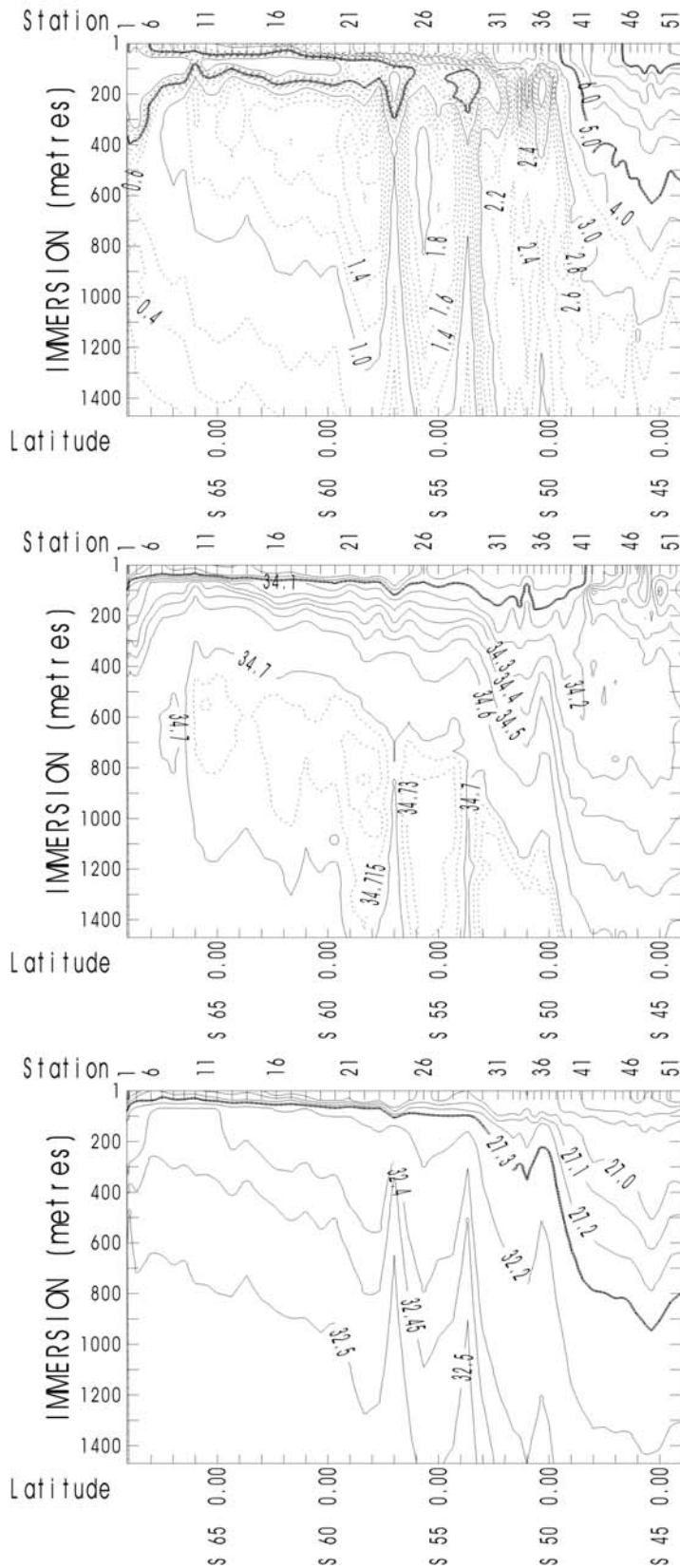


Figure 18

**Radiale A12:**  
Température potentielle, Salinité et Sigma (0 et 1)

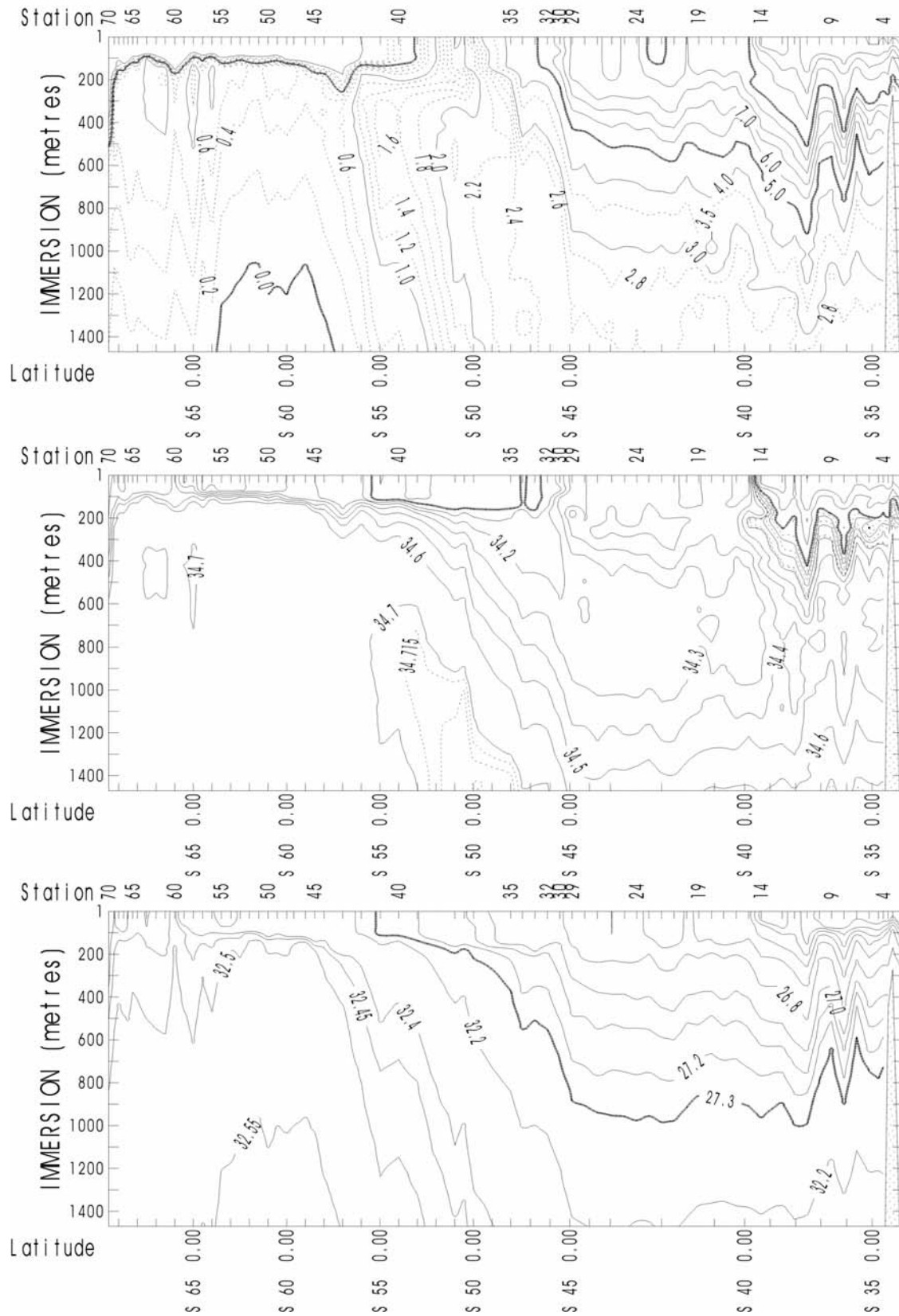


Figure 19

### Radiale A21 - Sr2

Température potentielle, Salinité et Sigma (0 et 1)

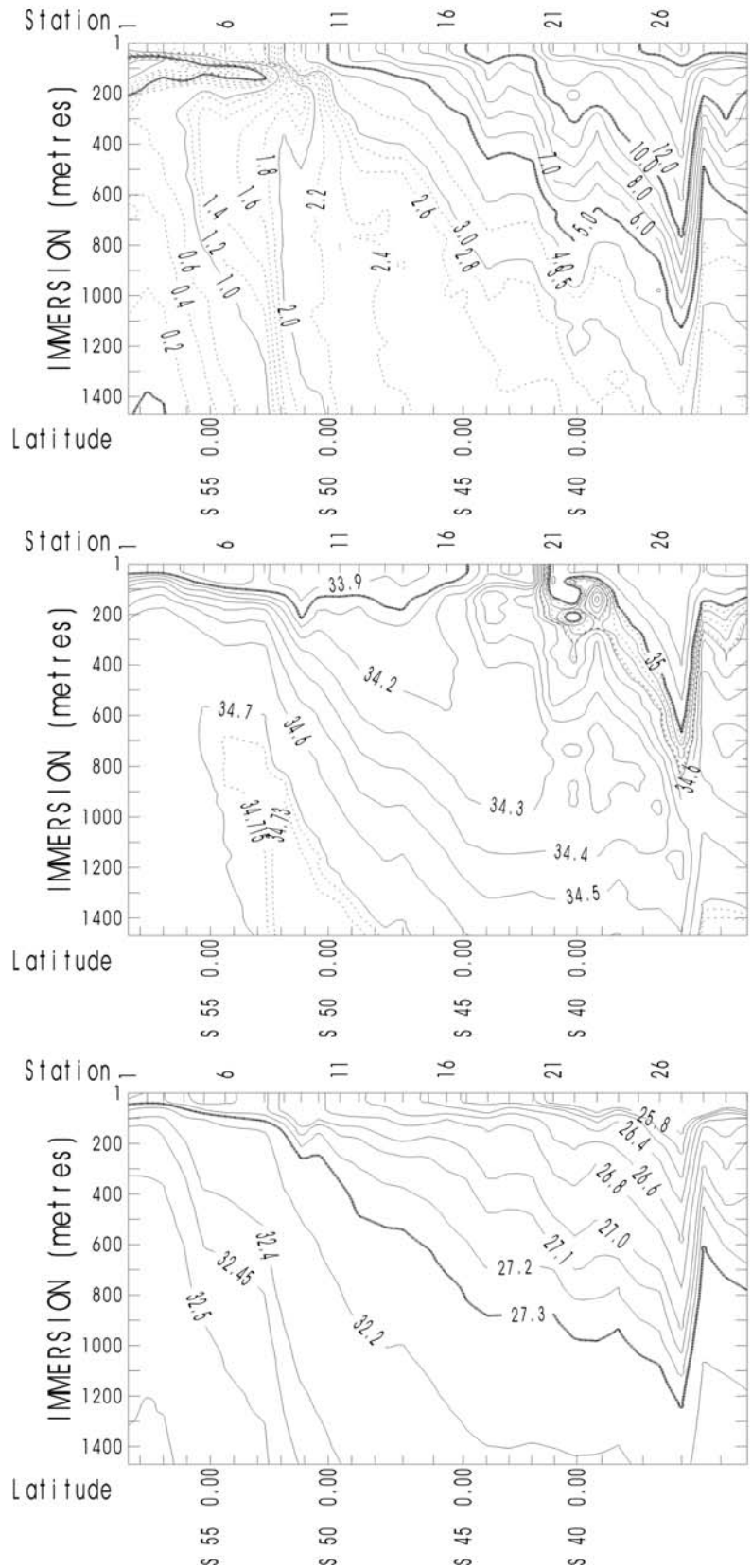


Figure 20

**Radiale AJAX:**  
Température potentielle, Salinité et Sigma (0 et 1)

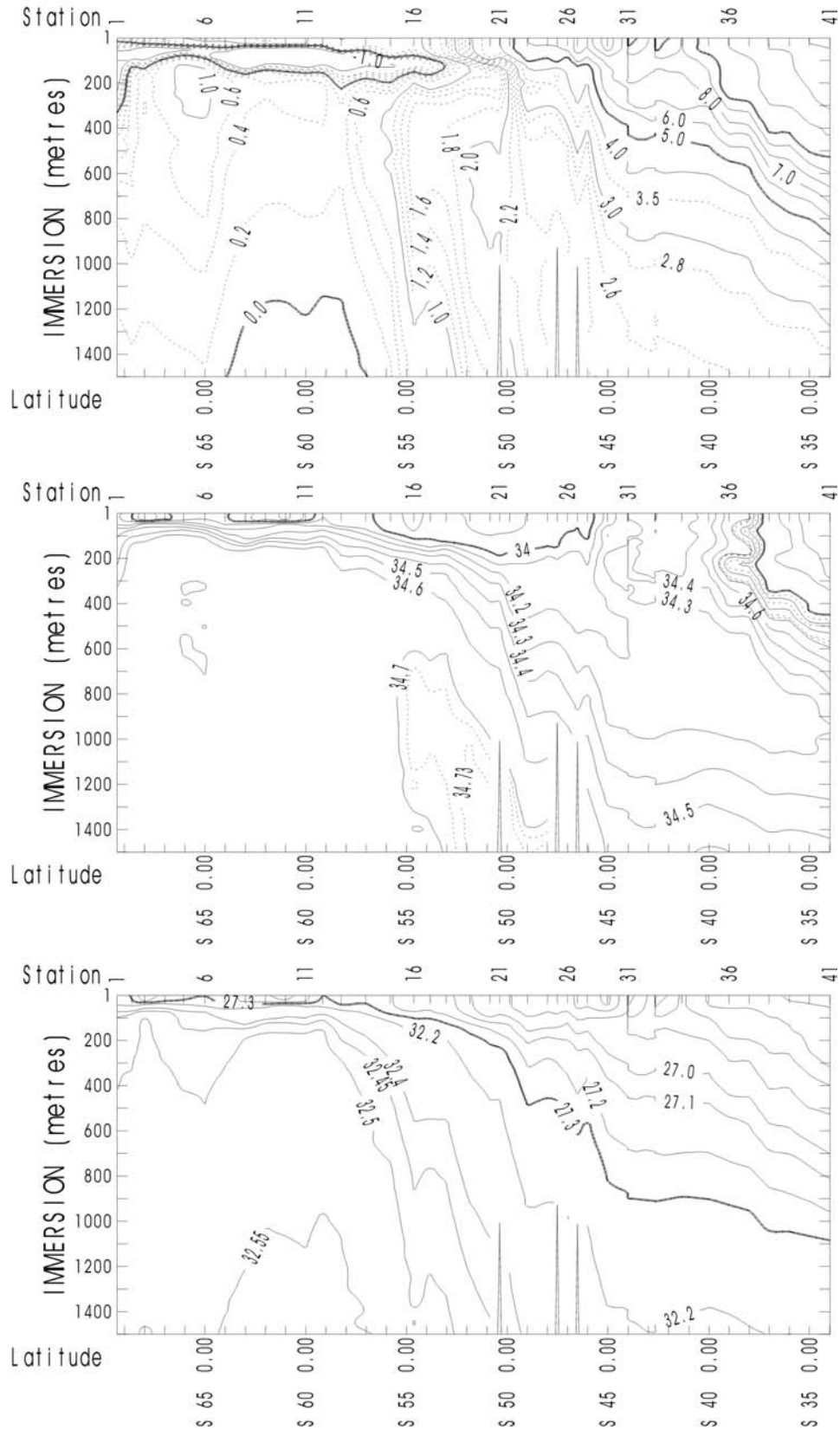


Figure 21

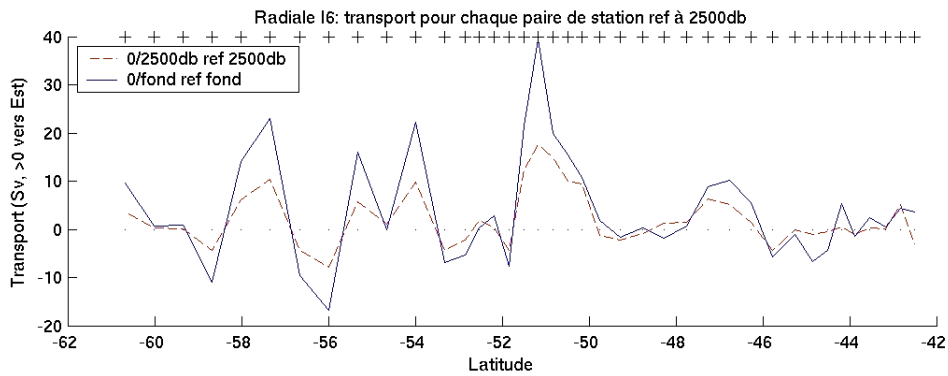


Figure 22

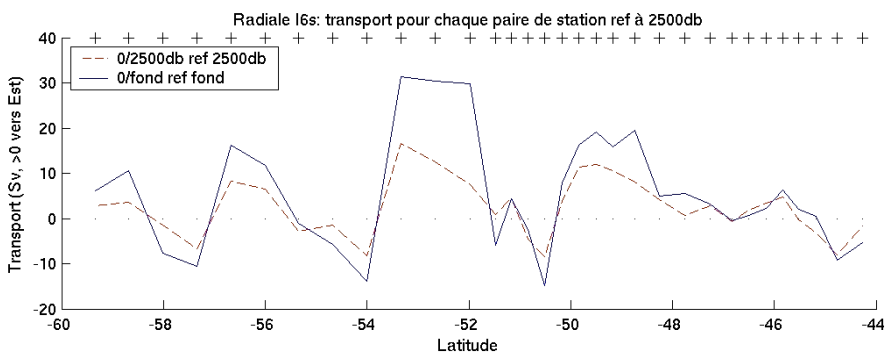
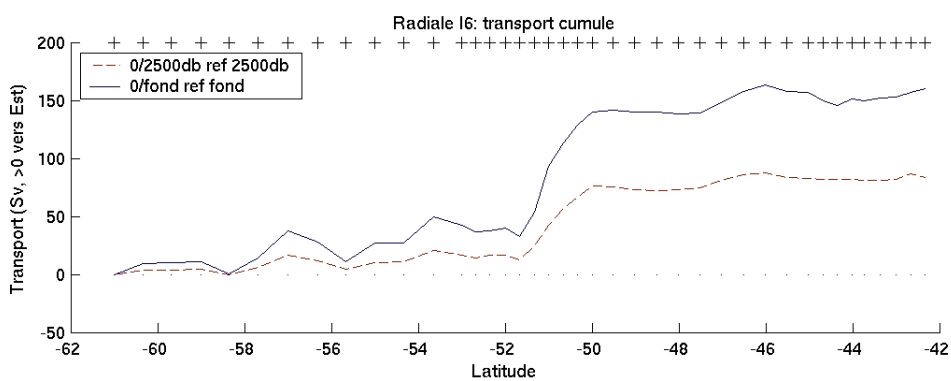
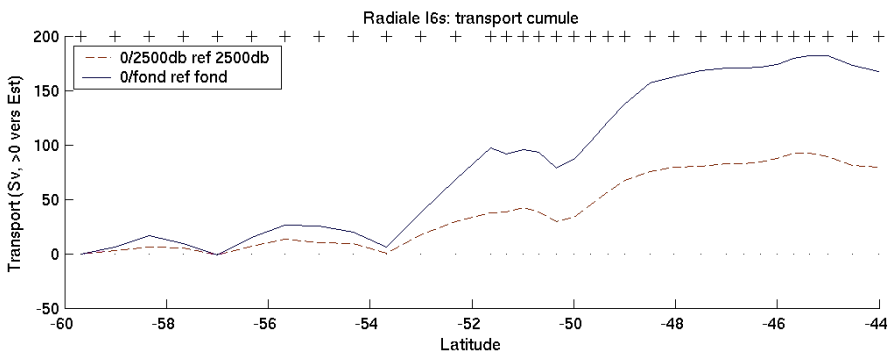


Figure 23



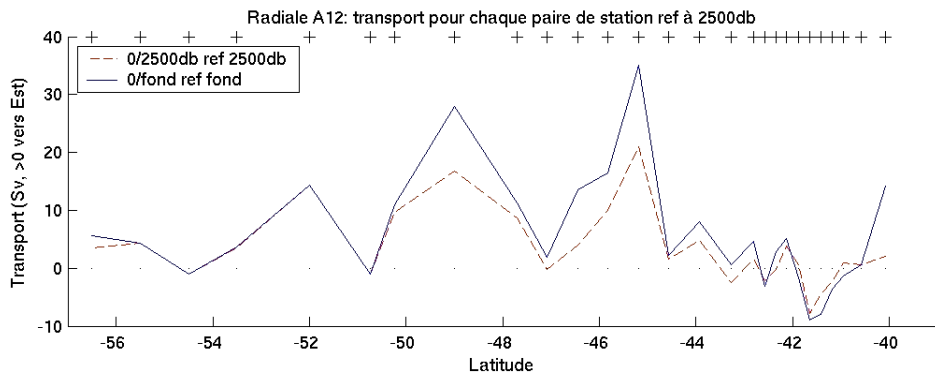


Figure 24

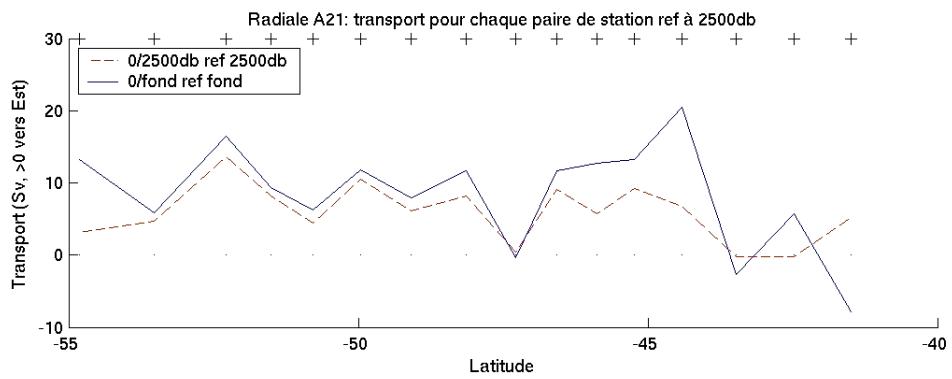
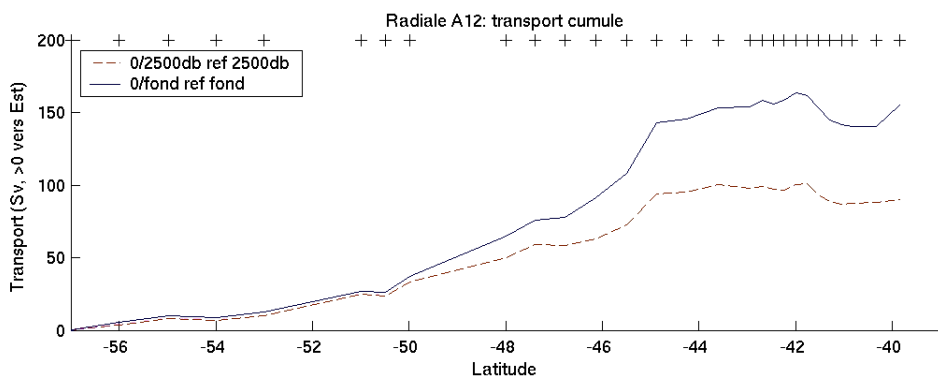
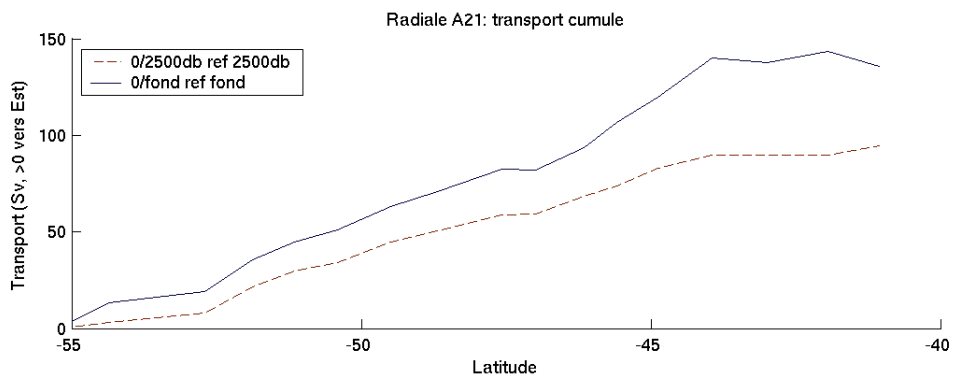


Figure 25



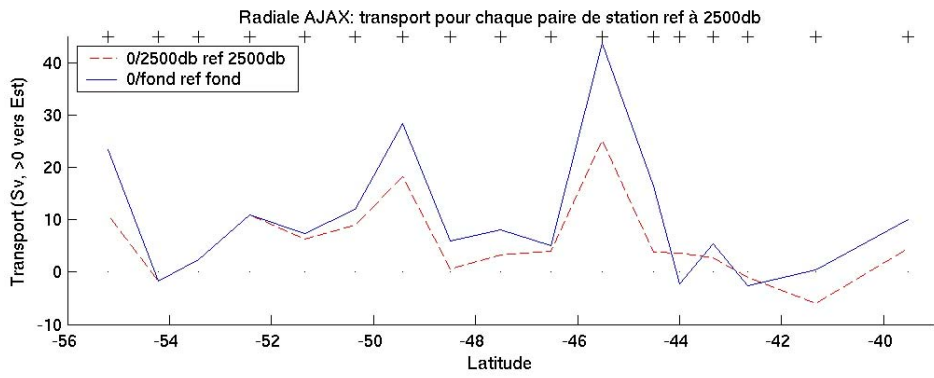


Figure 26

