

Bilancio dinamico e contributo
del campo *eddy* nell'Oceano
Meridionale

Masse d'acqua a differenti latitudini

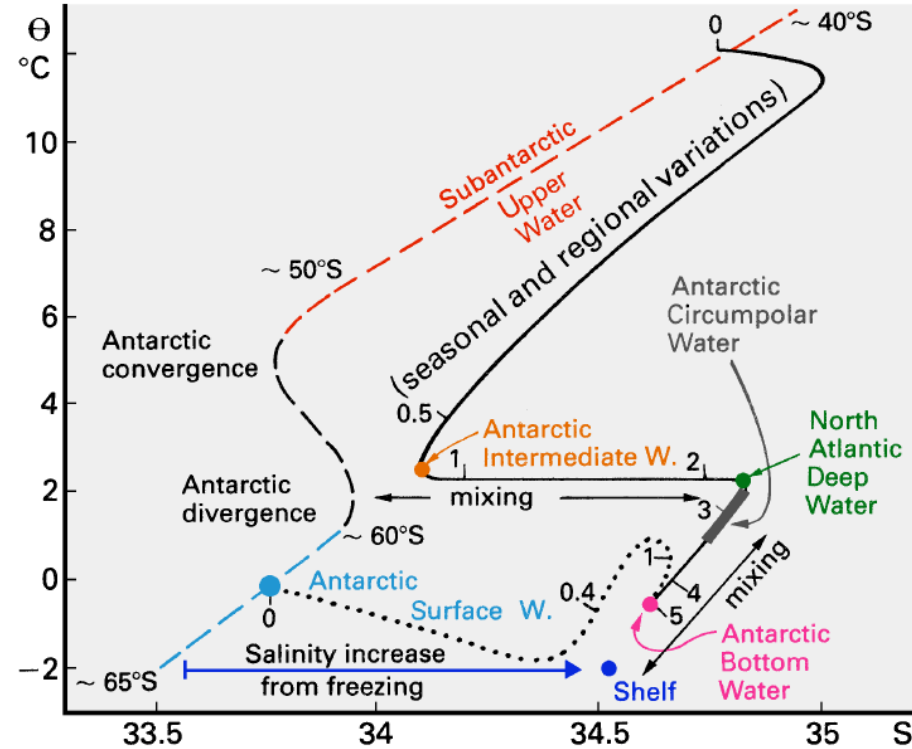


Fig. 6.13. A T-S diagram for a station in the Subantarctic (full line) and in the Antarctic zone (dotted line), and a T-S diagram from surface observations along crossings of the Antarctic Polar Front and Divergence (dashed line). Depth on the vertical T-S profiles is indicated in km.

Analisi del trasporto della ACC

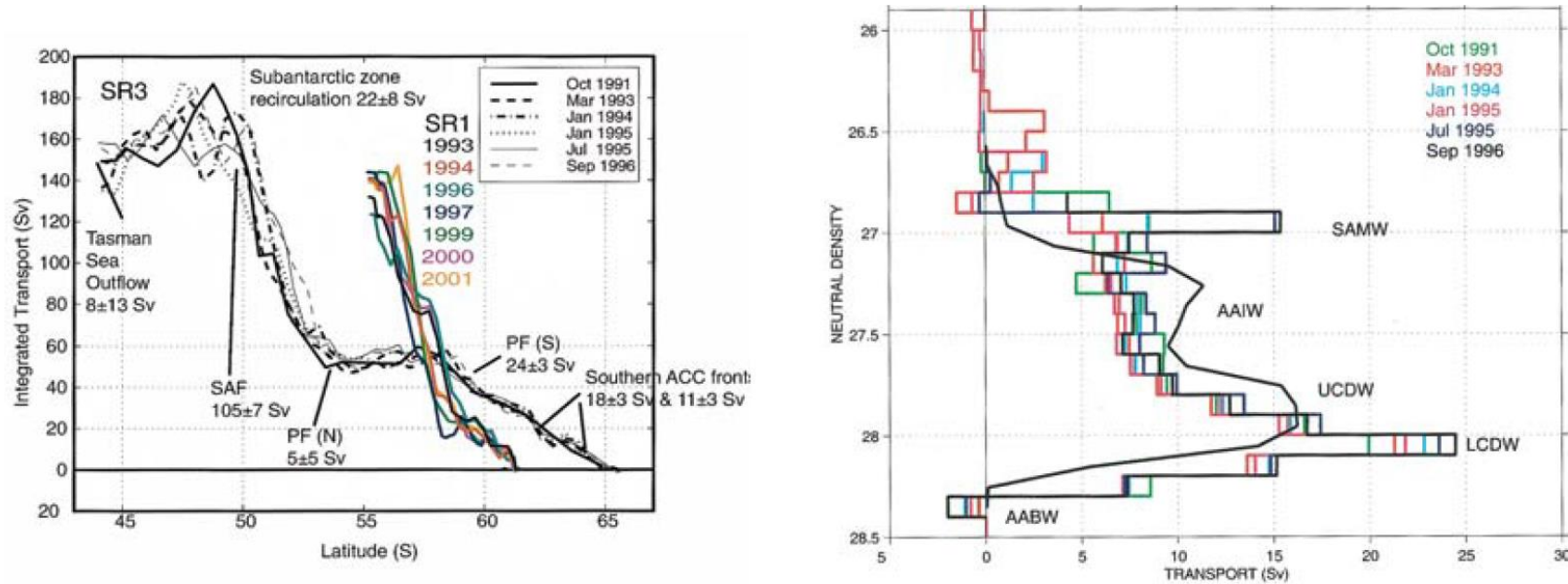
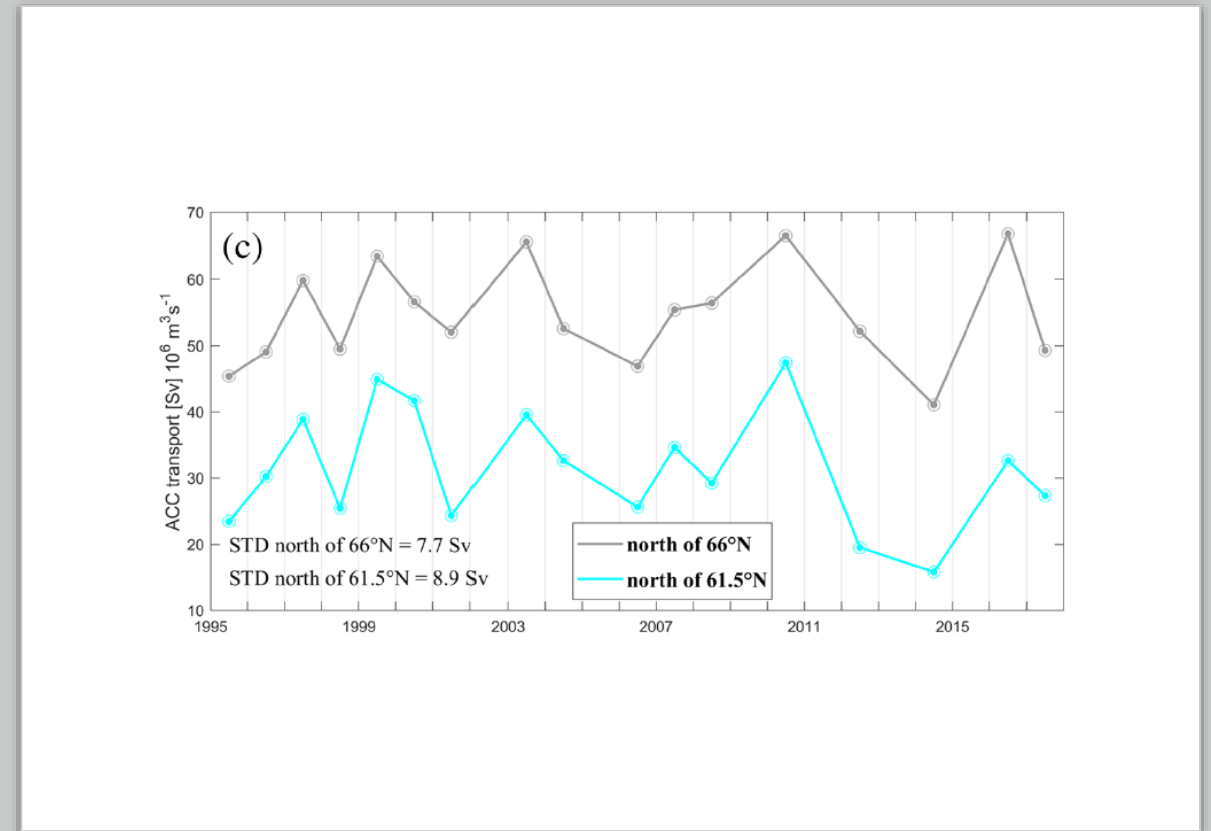
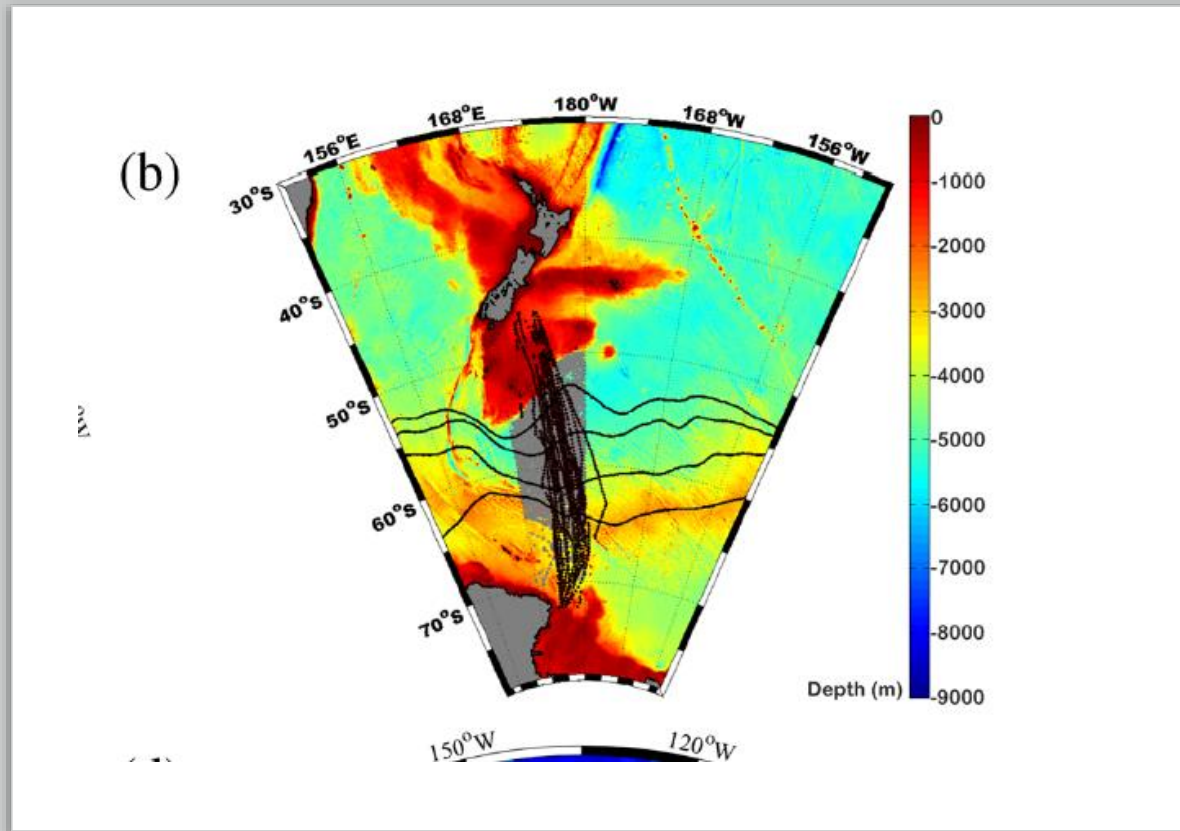


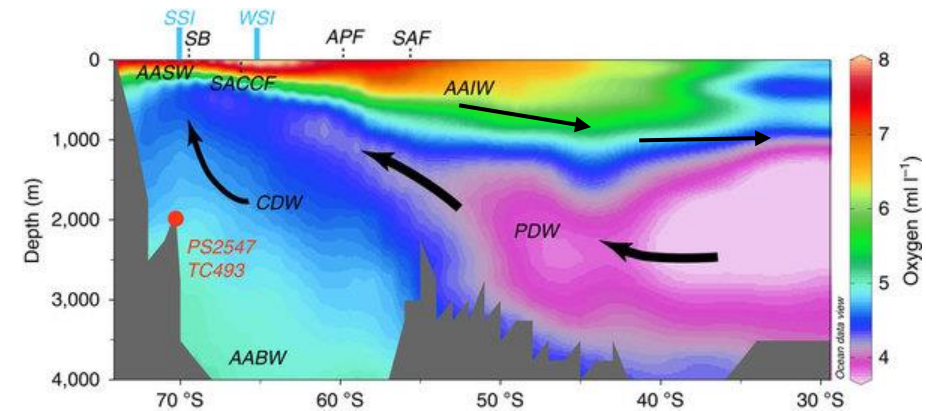
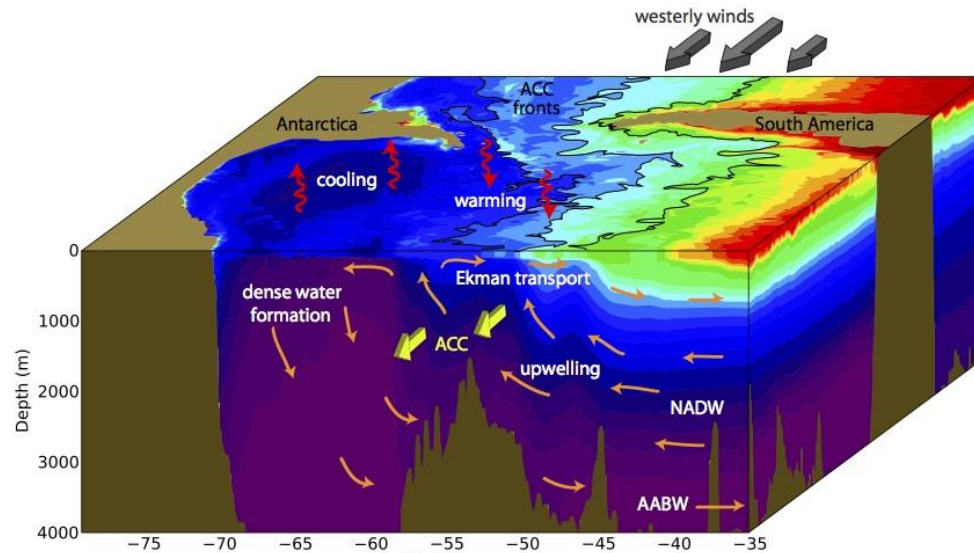
Fig. 5. Left: section integrated (south to north) baroclinic transport relative to the deepest common level for SR1 (Drake Passage) and SR3 (Australia to Antarctica) from various hydrographic section along SR1 and SR3 between 1991 and 2001. The location and names for the fronts are according to Orsi *et al.* (1995). Right: transport in neutral density classes. For SR3 the data of the various surveys are shown as bins, for SR1 only the mean transport profile of the cruises is given (full line). From Cunningham *et al.* (2003) and Rintoul & Sokolov (2001).

Da Cunningham *et al.*, 2003

Trasporto ACC da dati oceanografici (XBT, float ...)



Meridional overturning circulation



Il trasporto verso nord e verso sud si devono bilanciare

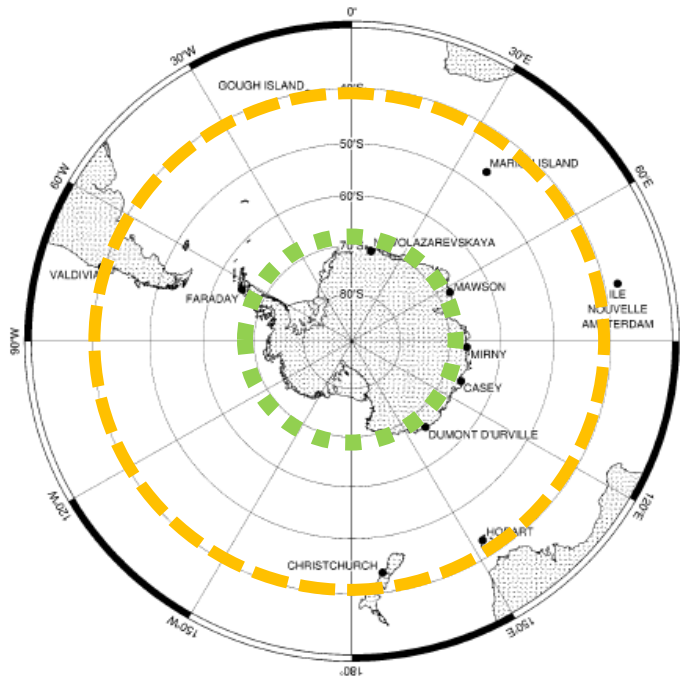
Verso Nord

il trasporto di Ekman verso nord attraverso il SAF e' stimato tra 20-30 Sv
la produzione di AABW e' stimato in 21 Sv (Orsi et al., 2002). stime del trasporto verso nord di LCDW + AABW variano tra 22-50 Sv. in prima approssimazione il tasso di formazione di LCDW deve essere simile al quello di AABW

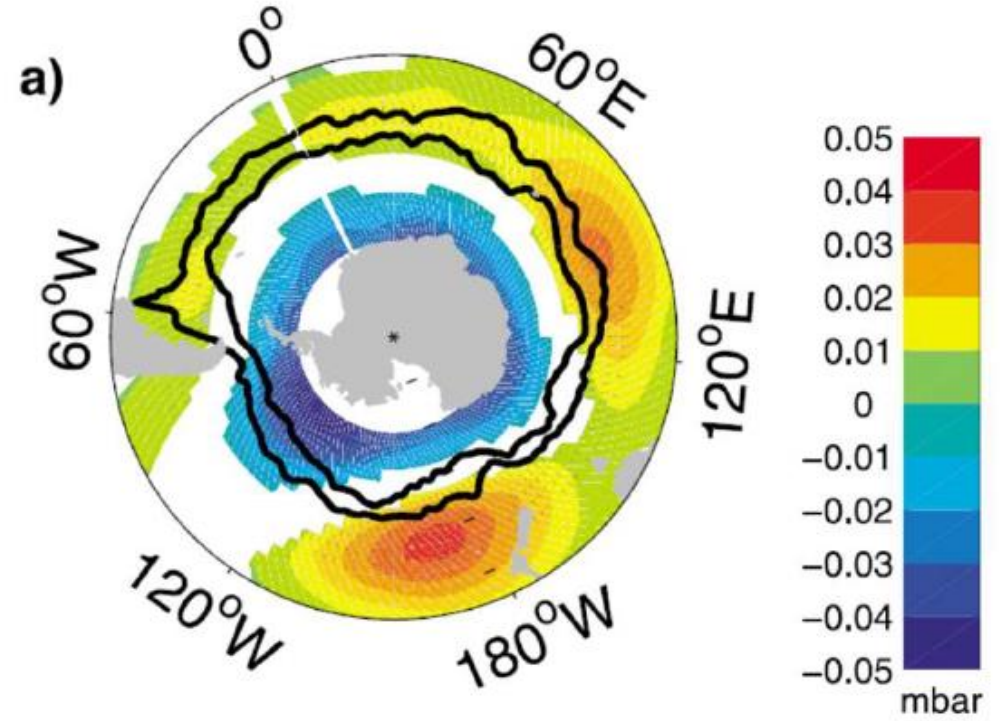
Verso Sud

il trasporto verso Sud di UCDW ed in parte anche di LCDW devono bilanciare la somma del trasporto di Ekman e quello di acqua profonda. Come avviene ?

Southern Annular Mode (SAM) e SAM INDEX *Marshall (2003)*

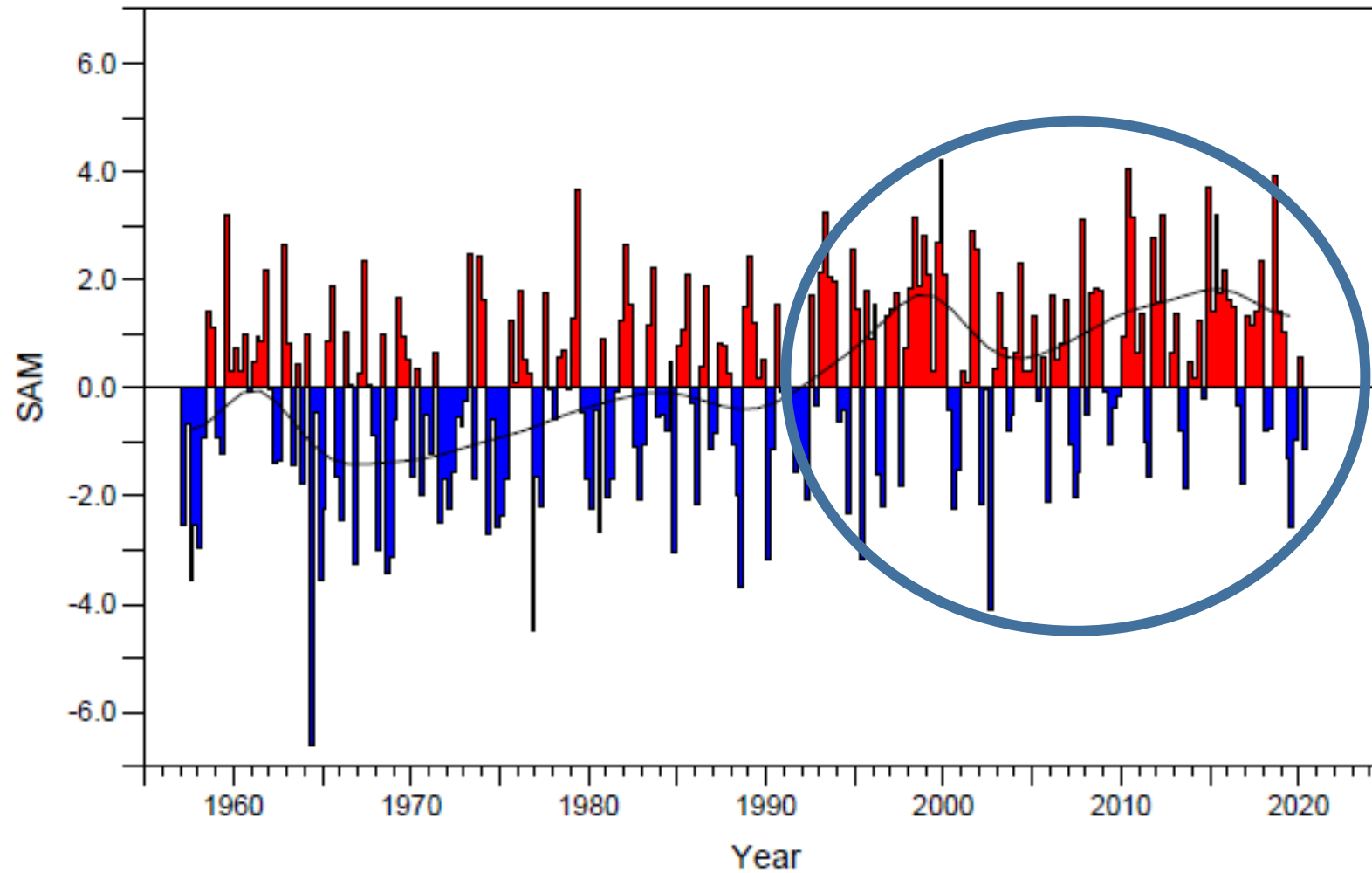


$$\text{MSLP}_{40^{\circ}\text{S}} - \text{MSLP}_{70^{\circ}\text{S}}$$



Da Sallè et al., (2008)

Andamento del SAMI

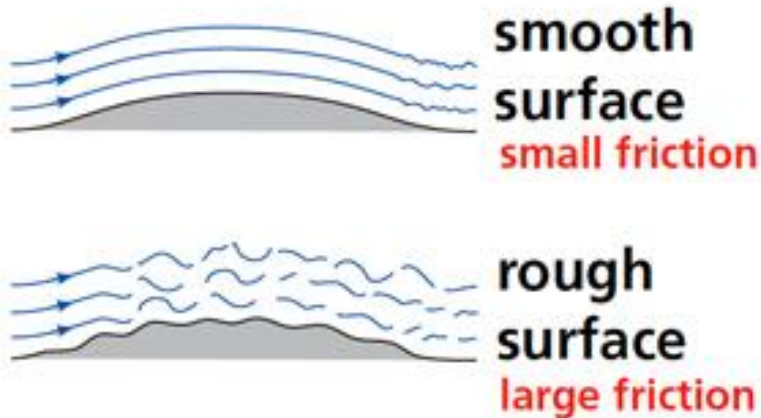
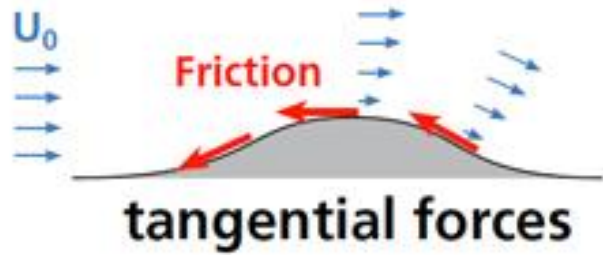


Quale meccanismo sono alla base del bilancio dinamico della ACC che esercita un blocco agli scambi meridionali ?

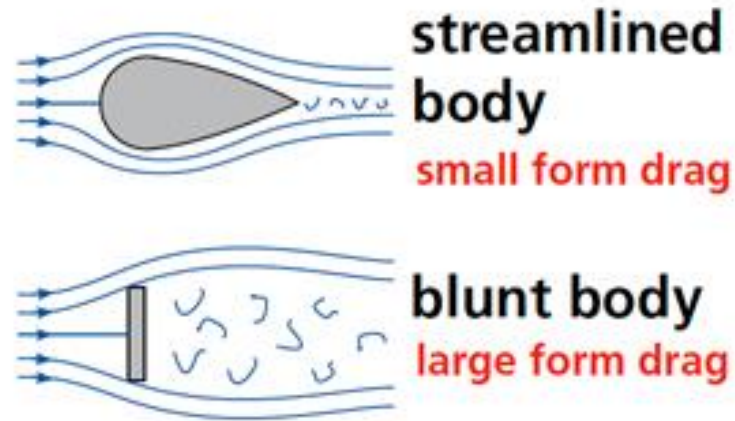
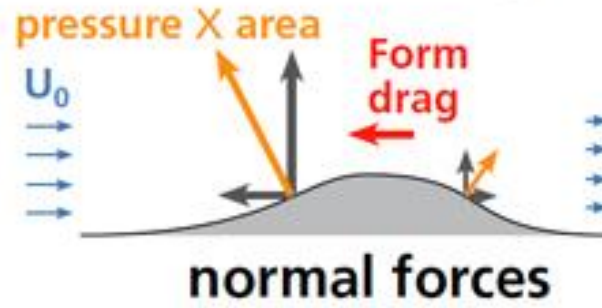
- La fascia latitudinale dove scorre la ACC è caratterizzata dai venti occidentali con trasporto di Ekman verso nord.
- Quali sono le forze che determinano il flusso zonale della ACC ?
- Come si determina il bilancio dinamico della ACC ?
- Come si genera il flusso di ritorno verso S ?
- A queste domande Munk e Palmen (1951) diedero una prima risposta non definitiva :
 - gli stress di Reynolds e i termini viscosi sono entrambi insufficienti e il meccanismo che consente il bilancio del vento è associato allo stress di forma sul fondo (*bottom form stress*) dovuto alla differenza di pressione attraverso i maggiori rilievi del fondo oceanico.



Frictional drag:



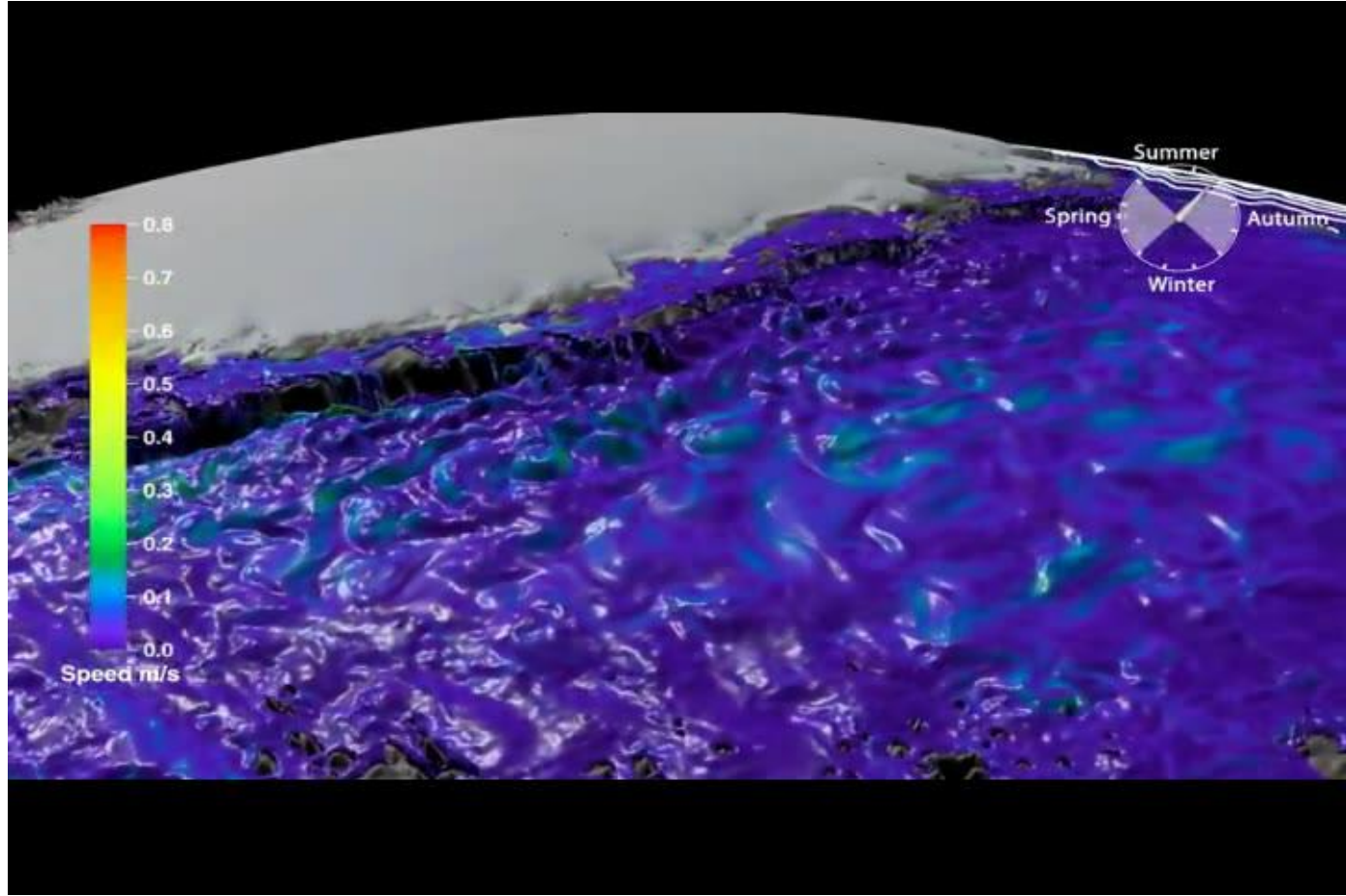
Form drag:



- Definizione di **form drag** : quando le interfacce di due strati variano nello spazio (tipo onde) ogni strato esercita una forza di pressione sull'altro (**interfacial form stress**). Allo stesso modo un fondo non piatto esercita una forza sullo strato di fondo che fa lo stesso ! Il form drag è un meccanismo importante attraverso il quale quantità di moto può essere ceduta o sottratta al flusso.

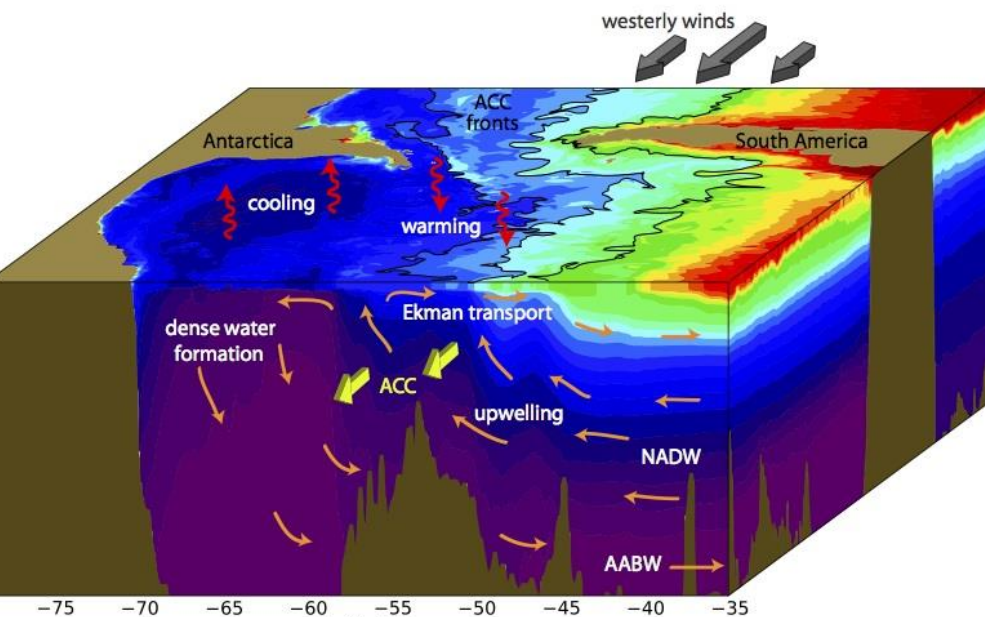
- IL form drag è uno stress !**
- Il form drag si calcola integrando su tutta superficie dell'ostacolo la pressione moltiplicata per pendenza**

$$\mathcal{F}_b = \mathcal{F}(-h) = \frac{1}{X} \oint P \frac{\partial h}{\partial x} dx = \overline{P \frac{\partial h}{\partial x}} = -\overline{h \frac{\partial P}{\partial x}}$$



Circolazione meridionale del Southern Ocean

- Quantità di moto attraverso interfacial form stress è trasmessa verticalmente e rimossa attraverso il form drag al fondo
- Cosa determina il flusso in profondità verso S se la ACC raggiunge "quasi" il fondo dell'oceano ?
- Alla latitudine del Drake passage la prof min è ~ 2000m per cui i gradienti di press favorevoli ad un flusso di ritorno verso S si formano a partire da questa profondità



$$\mathcal{F}_b = \mathcal{F}(-h) = \frac{1}{X} \oint P \frac{\partial h}{\partial x} dx = \overline{P \frac{\partial h}{\partial x}} = -\overline{h \frac{\partial P}{\partial x}}$$

$P_E > P_W$ momento ceduto al fondo,
corrente verso S.

- Quindi il trasporto di Ekman verso nord è bilanciato da un flusso verso sud sostenuto dai gradienti di pressione che si formano in corrispondenza della topografia.
- Ma l'Oceano Meridionale è zonalmente illimitato pertanto, affinché possa esistere un gradiente di pressione zonale, la barriera laterale (che sostituisce le coste degli altri bacini oceanici) è rappresentata dal fondo.
- Alla latitudine del passaggio di Drake, non ci sono rilievi topografici a quote inferiori ai 2000 m, pertanto il flusso verso sud deve avvenire a partire da questa profondità

448

D. OLBERS *et al.*

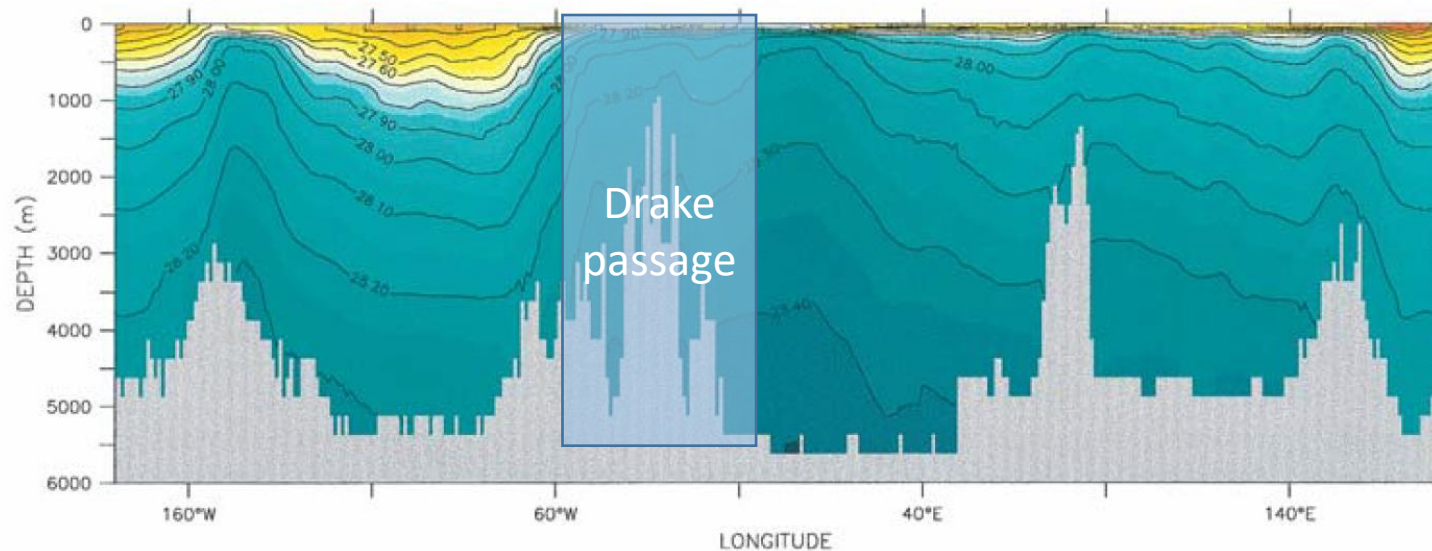


Fig. 11. Zonal section of the observed potential density at 60°S, taken from the gridded data of the WOCE Hydrographic Special Analysis Center (SAC, see <http://www.dkrz.de/~u241046/SACserver/SACHome.htni>). The section is viewed from the south.

Perché è importante il form drag ?

- Perché è un meccanismo attraverso il quale la quantità di moto è trasferita verticalmente
- Perché è un meccanismo attraverso il quale quantità di moto è sottratta in un fluido turbolento
- In questo modo, lo stress del vento è in comunicazione con il fondo dell'oceano (ma non bisogna essere categorici ...)
- **Il bottom form drag è il meccanismo che bilancia dinamicamente la ACC ovvero è il meccanismo attraverso il quale lo stress del vento è bilanciato (una delle domande precedenti)**
- Se il fondo è piatto, in un oceano a due strati, l'unico form drag che si verifica è all'interfaccia degli strati (interfacial form stress)*

Oceano Meridionale – Topografia

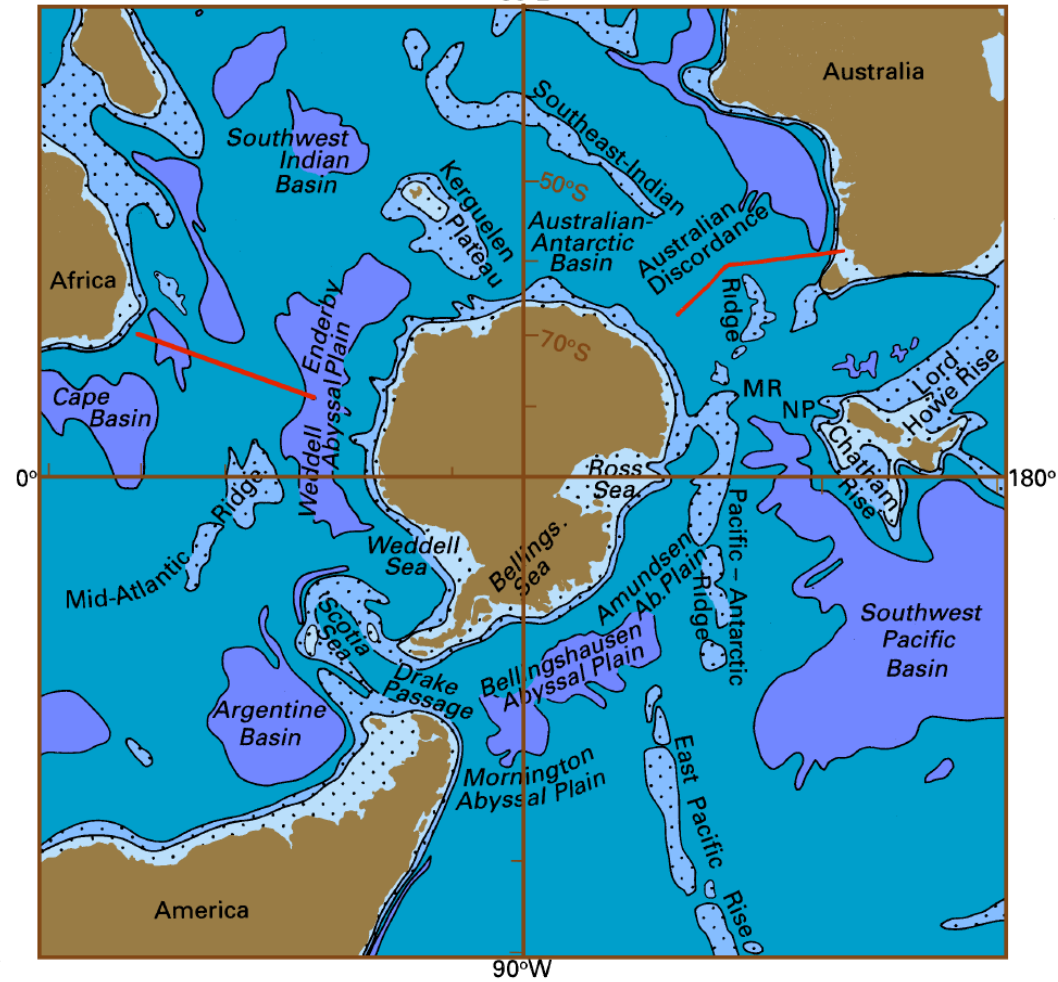
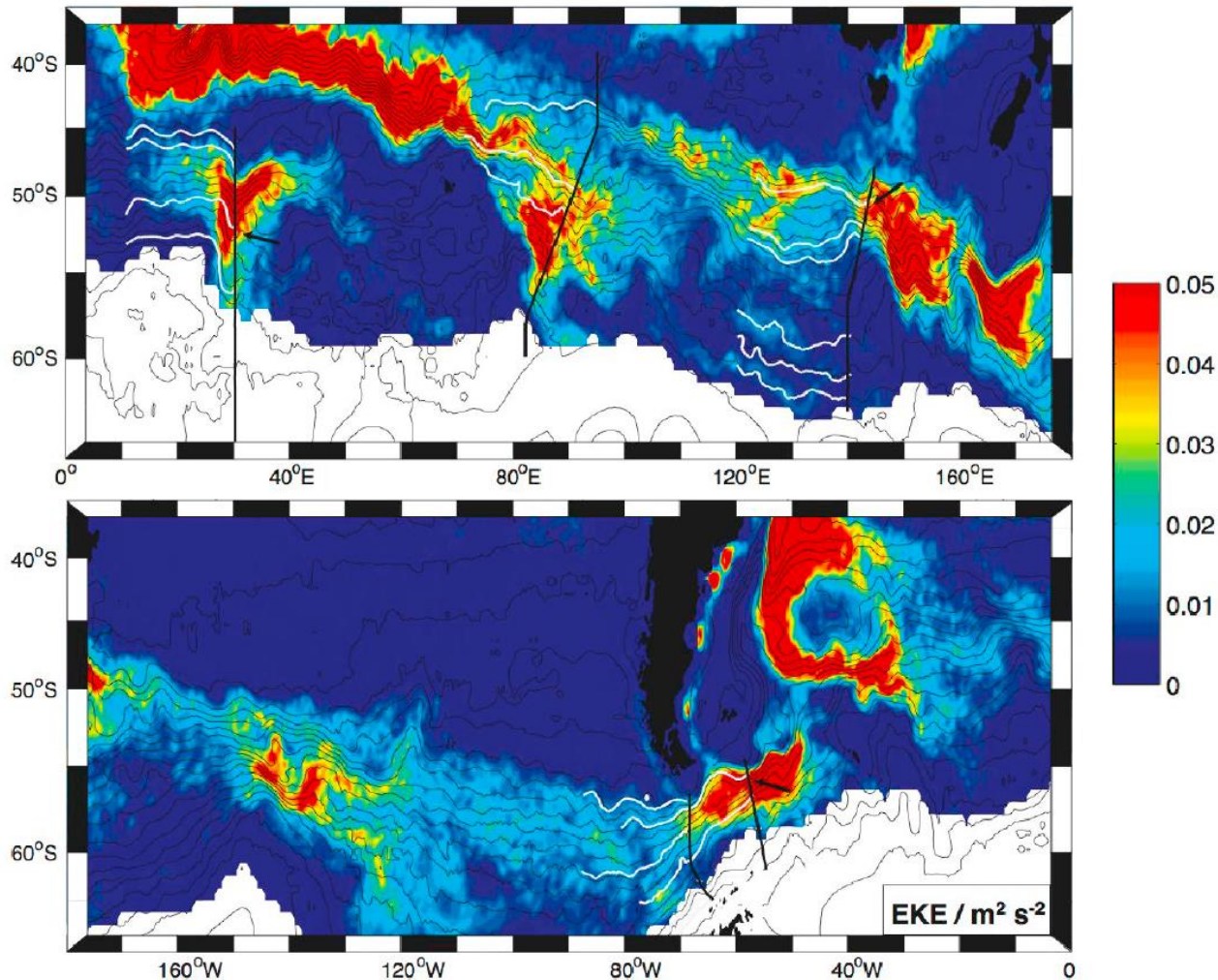


Fig. 6.2. Bottom topography of the Southern Ocean. The 1000, 3000, and 5000 m isobaths are shown, and regions less than 3000 m deep are shaded. Heavy lines near 20°E and 140°E indicate the location of the sections shown in Fig. 6.8. MR: Macquarie Ridge, NP: New Zealand Plateau.

Scambi meridionali in superficie

- Le perdite di calore nell'area a sud del PF e nella zona antartica come vengono bilanciate se la ACC esercita un blocco ai trasporti meridionali ?
- Strutture a scala più piccola, anche della mesoscala locale, danno un contributo fondamentale in questo processo
- Campo eddy di mesoscala
- Gli il campo eddy è generato principalmente per instabilità della ACC e per interazione con la topografia
- Il campo eddy non solo trasporta calore in media ma contribuisce anche allo scambio di momento sia orizzontale **che verticale**

Campo eddy da misure altimetriche



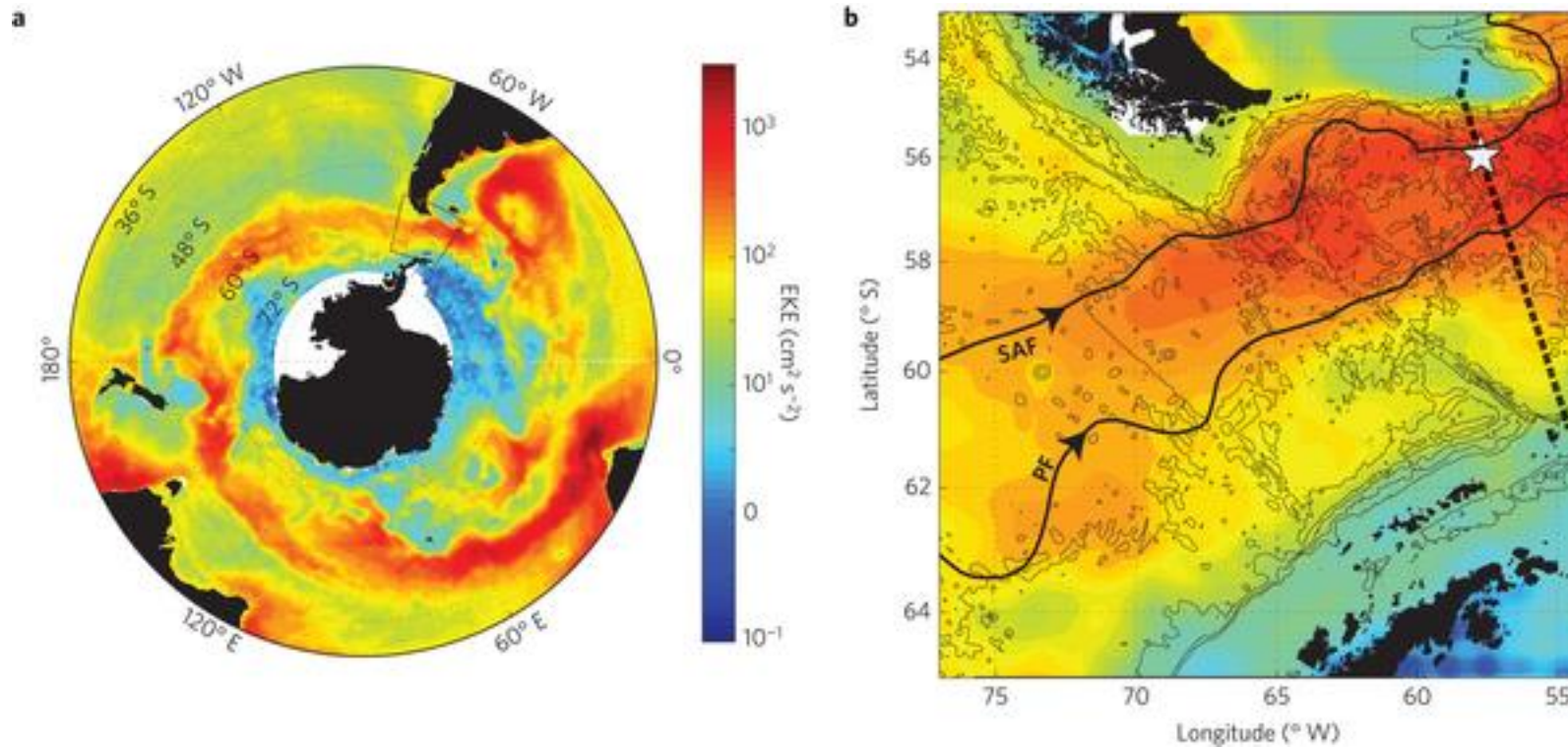
...The Southern Ocean is one of the most eddy-rich areas of the global ocean, containing regions with the largest eddy amplitude.

Eddies in the Southern Ocean act to moderate the response of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) to changes in forcing

Ruolo degli eddy nell'Oceano Meridionale

1. Determinano il trasporto verticale di momento contribuendo al bilancio dinamico (Olbers et al., 2004)
2. Fornire/sottrarre quantità di moto alla ACC (Hughes and Ash., 2001)
3. Rispondono alla variabilità dell'Oceano Meridionale (Rintoul et al., 2013)
4. Permettono il trasporto di calore verso S (Jayne e Marotzke, 2002)

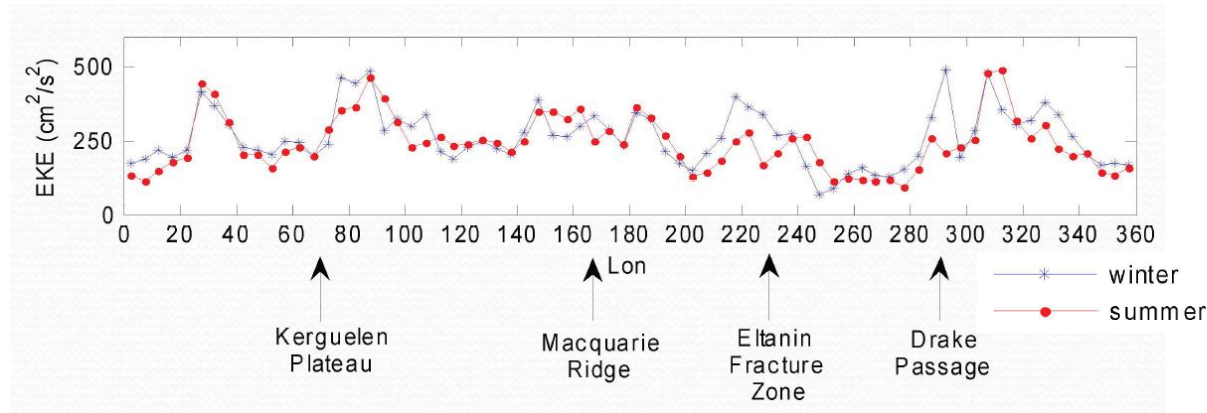
Campo eddy da misure altimetriche



Altimetric surface eddy kinetic energy (EKE) across the Antarctic Circumpolar Current (ACC) between 1993 and 2013. The outlined area indicates the region considered in this study, shown in **b**. **b**, Surface EKE in Drake Passage (da Sheen et al., 2014 Nat. Geosci.)

Per il bilancio dinamico della ACC leggere Olbers et al., 2004 Ant. Scien.

Campo di Eddy Kinetic Energy (EKE)



$$u' = u - \langle u^k \rangle$$

$$v' = v - \langle v^k \rangle$$

$$\langle EKE_k \rangle = \frac{\langle u' \rangle^2 + \langle v' \rangle^2}{2}$$

Near-surface eddy dynamics in the Southern Ocean

M. Trani et al.

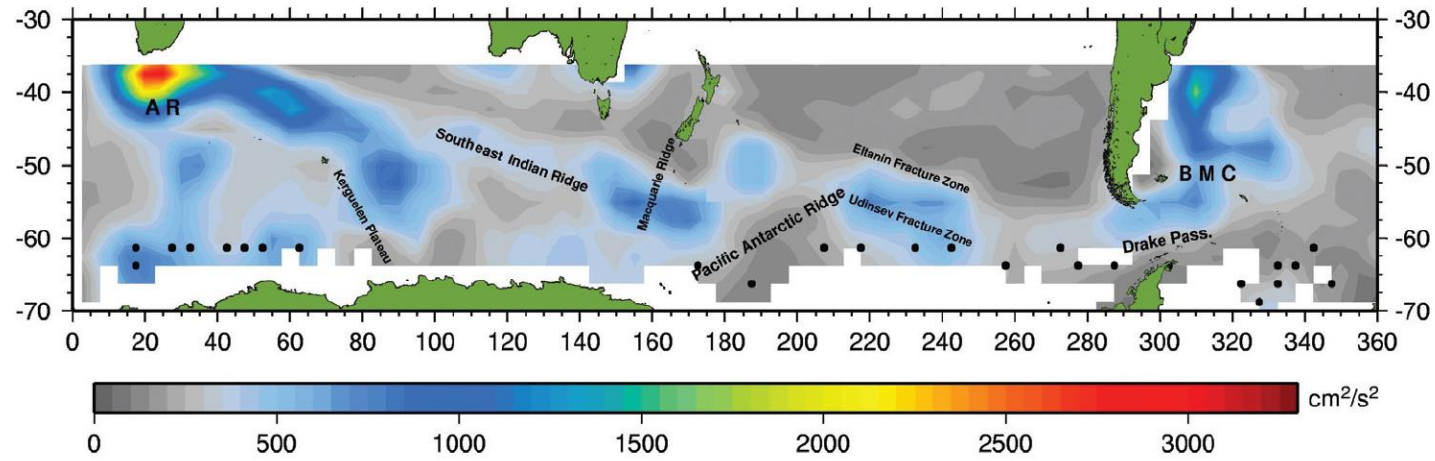
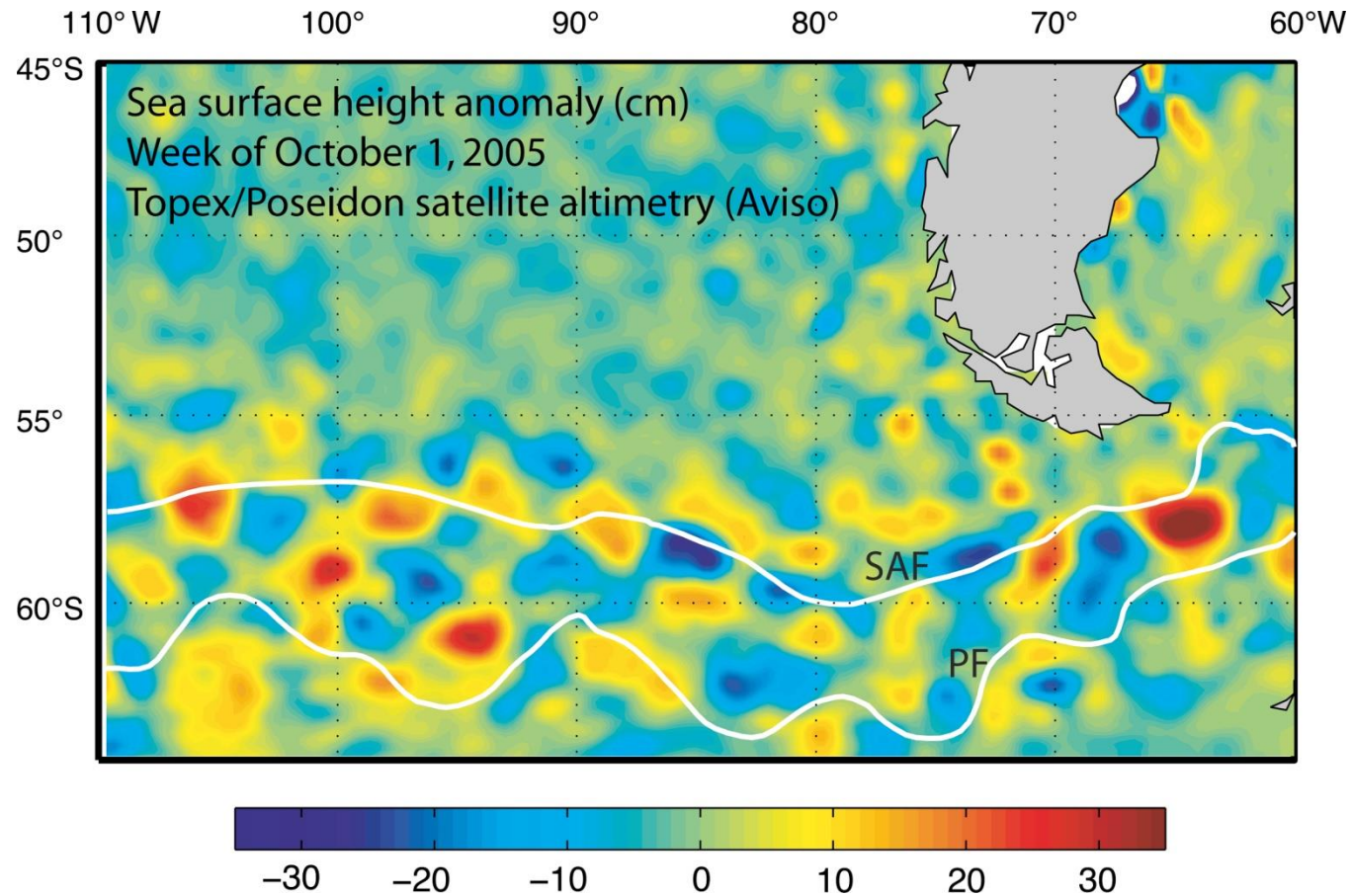


Fig. 6 Eddy kinetic energy with the main topographic features superimposed. Black circles point out bins with less than 100 observations; blanks south of 35°S are areas with only one independent observation or no data. The two major current systems of the Agulhas Retroflection (AR) and the Brazil–Malvinas Confluence (BMC) are also indicated.



Snapshot of eddies in the southeast Pacific and Drake Passage: sea surface height anomalies (cm) **for the week of October 1, 2005** from Topex/Poseidon altimetry (Aviso product). The climatological Subantarctic Front (SAF) and Polar Front (PF) are marked.

Componente del moto eddy ed eddy heat flux

- Consideriamo la componente zonale della ACC e u e scriviamola come :

$$u = \overline{\langle u \rangle} + u' \quad (1)$$

$$u' = u^* + u^{\sim} \quad u = \overline{\langle u \rangle} + u^* + u^{\sim} \quad (2)$$

questa separazione è teorica ... le scale sono sovrapposte.

- Se θ è la temp. pot.

$\langle v\theta \rangle \equiv$ *media nel tempo del flusso di temp.*

$$\overline{\langle v\theta \rangle} = \overline{\langle v \rangle} \overline{\langle \theta \rangle} + \overline{v^{\sim} \theta^{\sim}} + \overline{\langle v^* \theta^* \rangle} \quad (3)$$

- Dividendo (3) per ρc_p si ottiene il flusso di calore dovuto alla componente media e quella turbolenta

Data set utilizzato

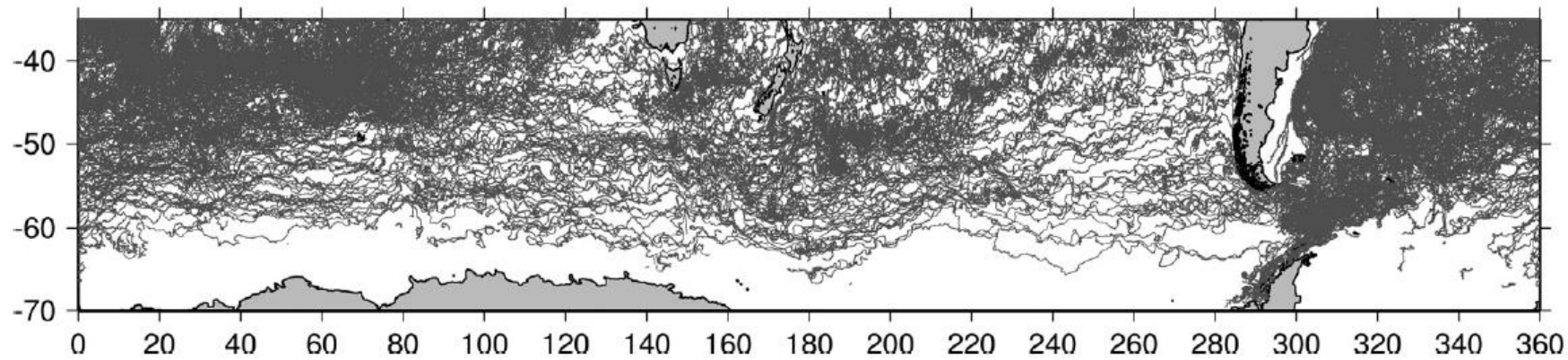


Fig. 1 World Ocean Circulation Experiment Surface Velocity Program drifters trajectories from 1995 to 2006 in the selected area from 70°S to 35°S around the globe.

Lettura di riferimento :
Near-surface eddy dynamics in the Southern Ocean
Trani et al., 2011, *Polar Research*

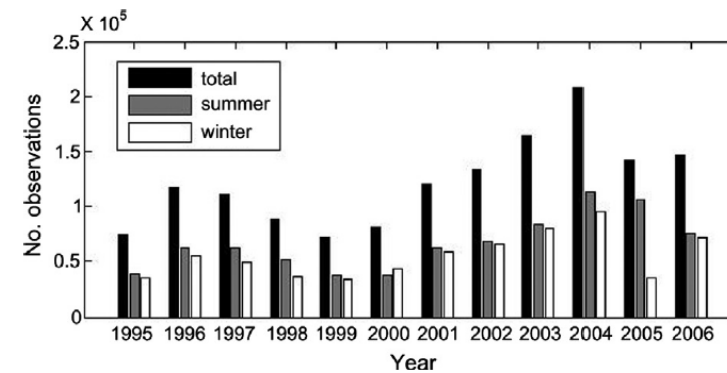
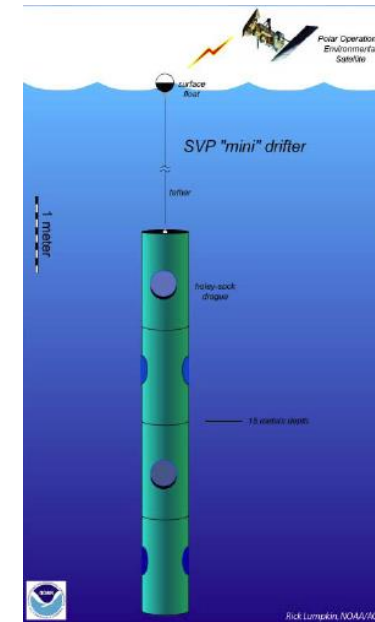
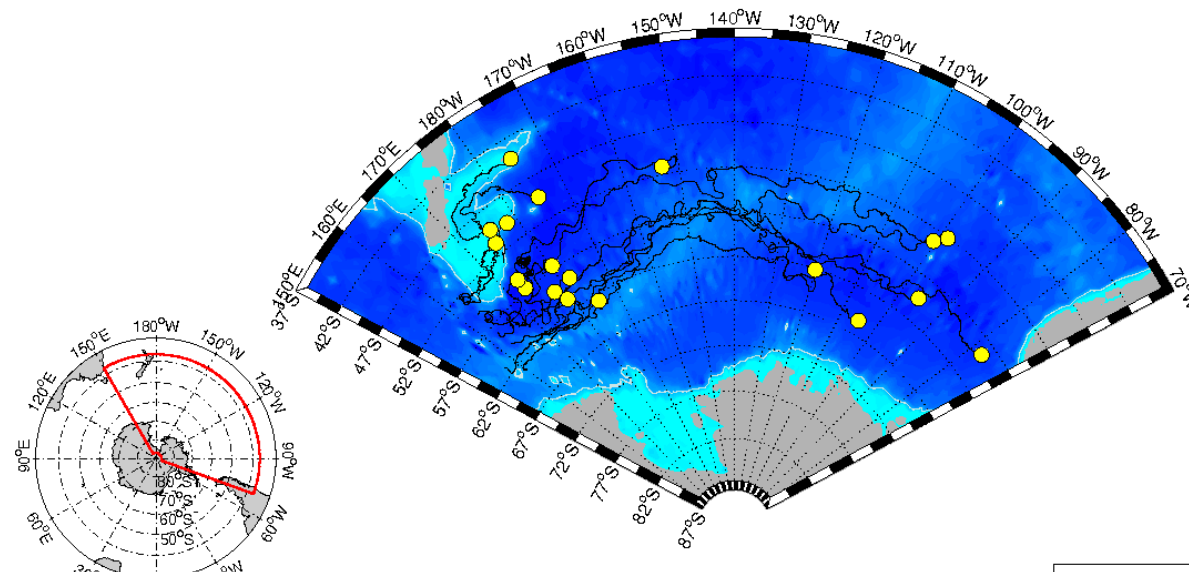


Fig. 2 Yearly and seasonal overall data distributions on the domain. Summer includes months from October to March and winter from April to September.

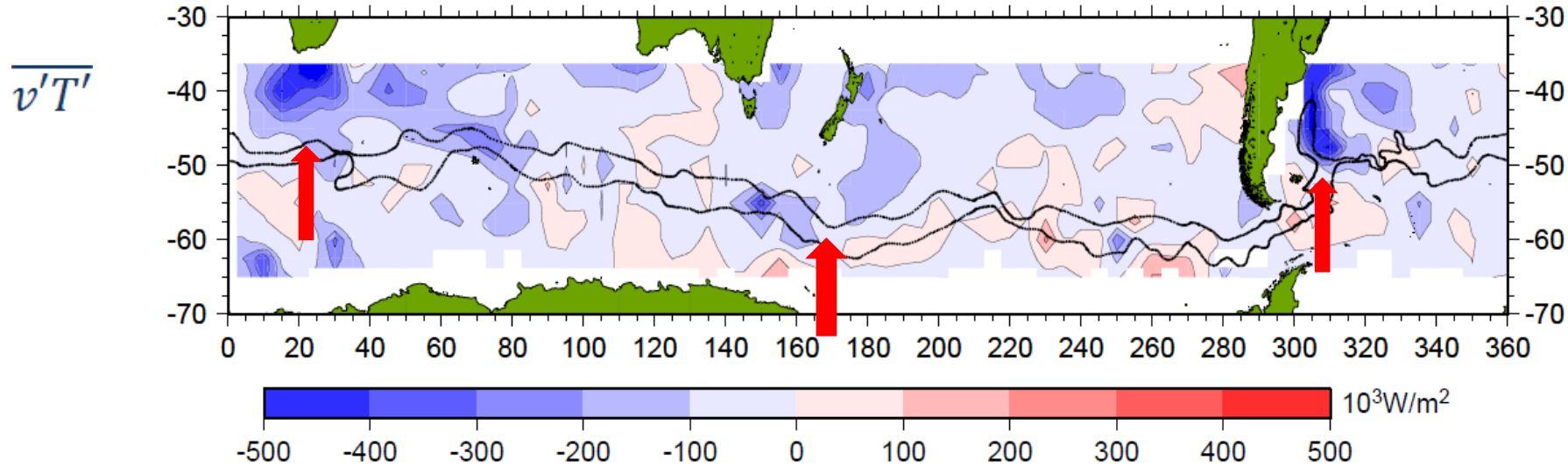
ACC surface current measurement



LAST UPDATE 18-Feb-2016



RUOLO DEI FLUSSI TURBOLENTI DI CALORE NELLA CIRCOLAZIONE DELL'OCEANO MERIDIONALE



$$u' = u - \langle u^k \rangle$$
$$v' = v - \langle v^k \rangle$$
$$T' = T - \langle T^k \rangle$$

FLUSSI TURBOLENTI DI CALORE

Stime della covarianza con sovrapposti il Fronte Subantartico e il Fronte Polare.



Ruolo degli Eddy Heat Fluxes (EHF)

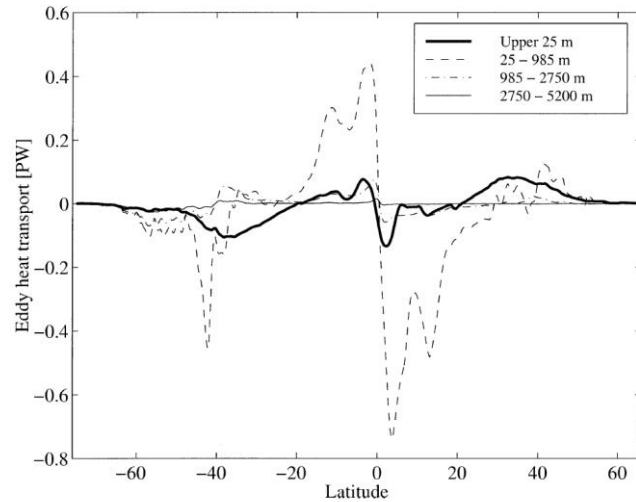


FIG. 3. Zonally integrated northward eddy heat transport broken down by depth bin for surface–25 m (heavy solid line), 25–985 m (dashed line), 985–2750 m (dashed–dotted line), and 2750–5200 m (light solid line).

Da Jayne e Marotzke, 2002

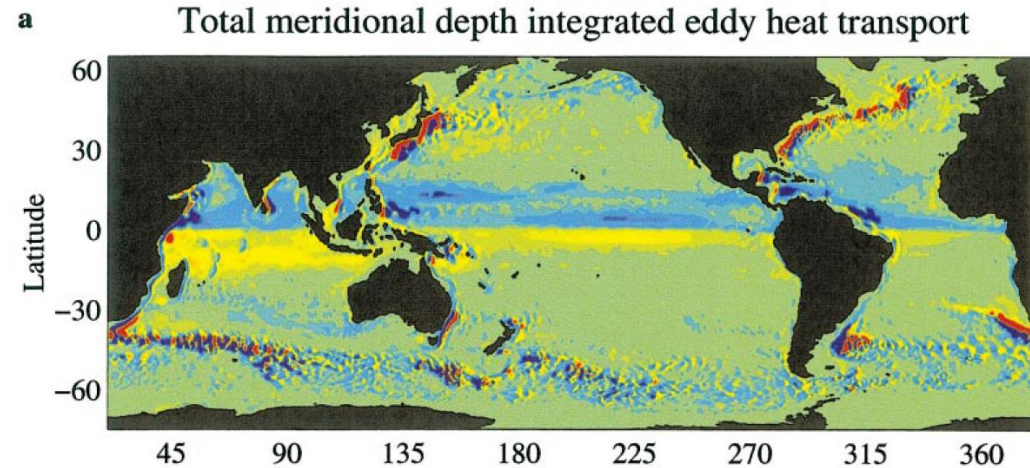


TABLE 1. Selected estimates of cross-ACC eddy heat flux. Negative values reported here reflect poleward eddy heat flux across the identified location.

Reference	Location	Local flux (kW m ²)	Integrated transport (10 ¹⁵ W = PW)
Current meters			
Bryden (1979)*	Drake Passage (2700 m)	-6.7	-0.5
Sciremammano et al. (1980)	Drake Passage (1000–2500 m)	-17	
Nowlin et al. (1985)	Drake Passage (500–2700 m)	-3.7*	
Johnson and Bryden (1989)	Drake Passage (580–3560 m)	-12	
Phillips and Rintoul (2000)	51°S, 143°E (400–3300 m)	-11.3 ^b , -40.6 ^c	
Hydrography			
deSzoek and Levine (1981)	ACC		-0.45
Macdonald and Wunsch (1996)	30°S		-0.9 ± 0.3
Sloyan and Rintoul (2000)	30–40°S		-0.36 ± 0.08
Ganachaud and Wunsch (2000)	20–30°S		-0.7 ± 0.3
Altimetry			
Keffer and Holloway (1988)	ACC (~53°S)		-0.70
Stammer (1998)	40°S		-0.3
	53°S		-0.05
Global energy balance			
Gordon and Owens (1987)	ACC		-0.31

Da Gille, 2003b

Eddy saturation

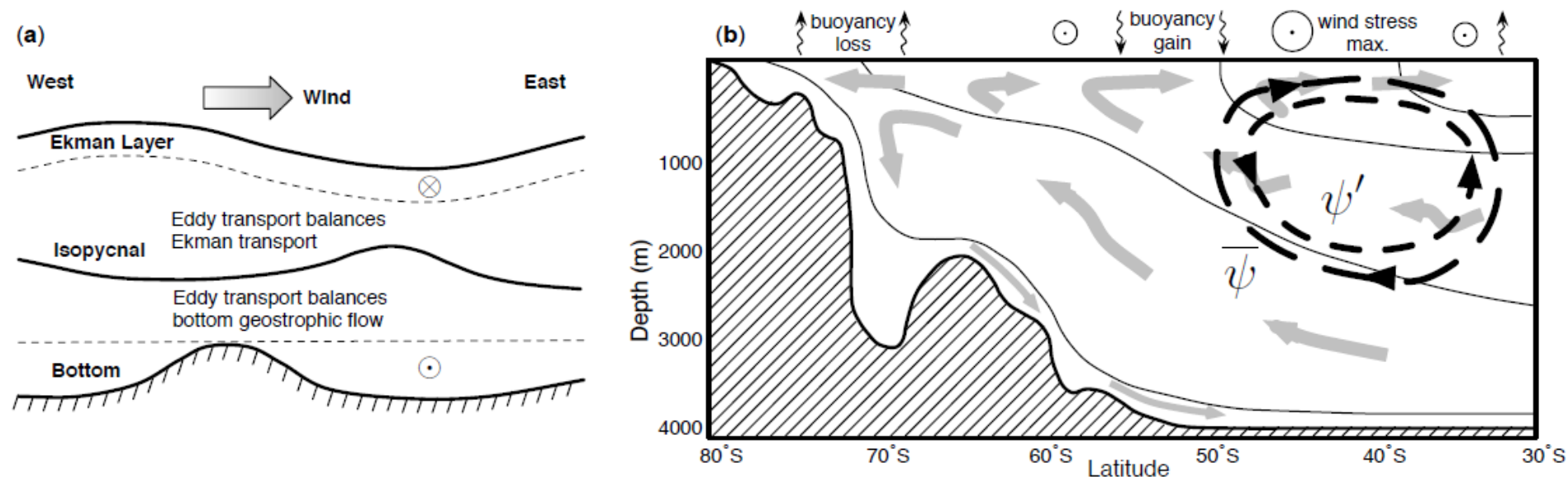
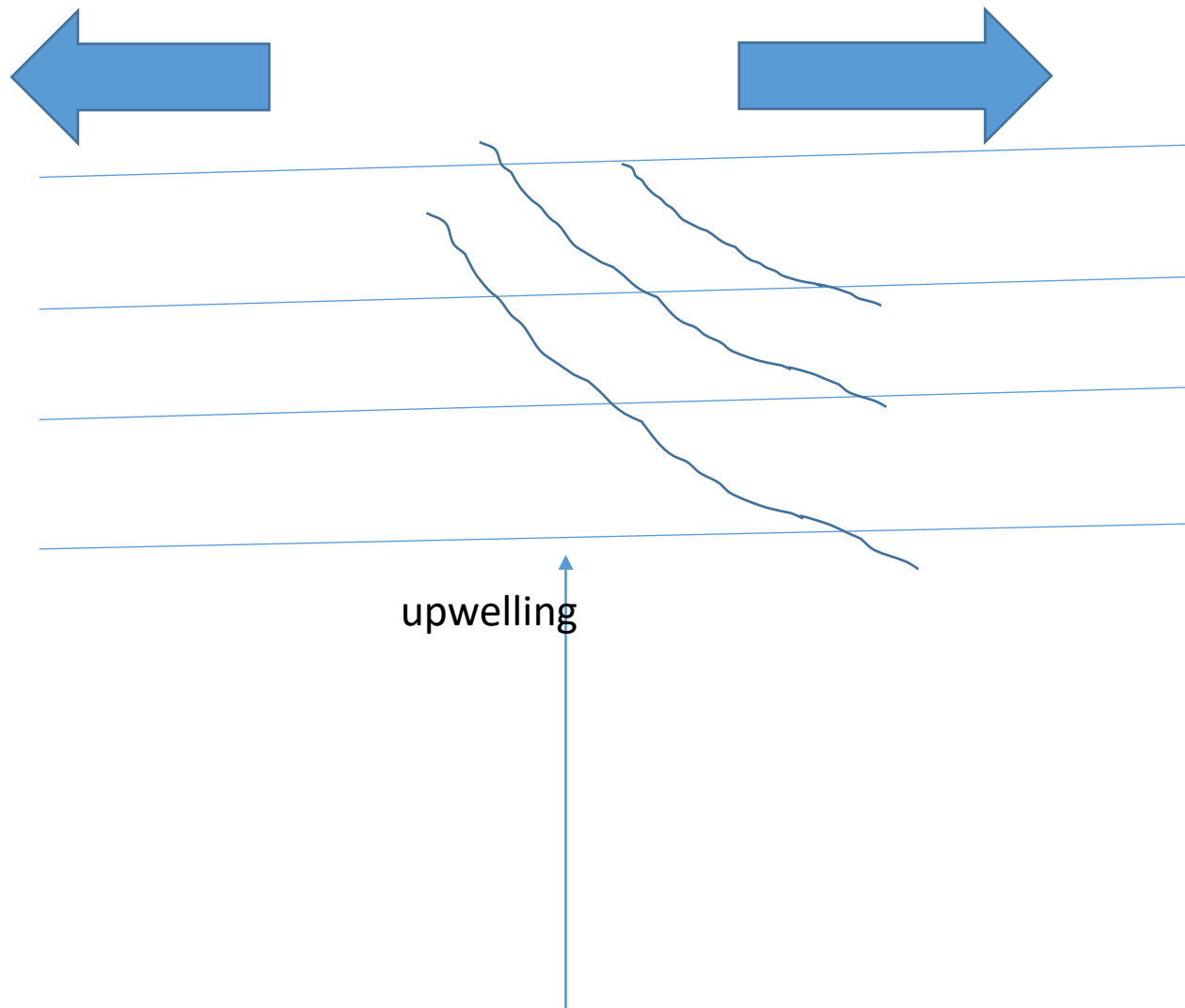
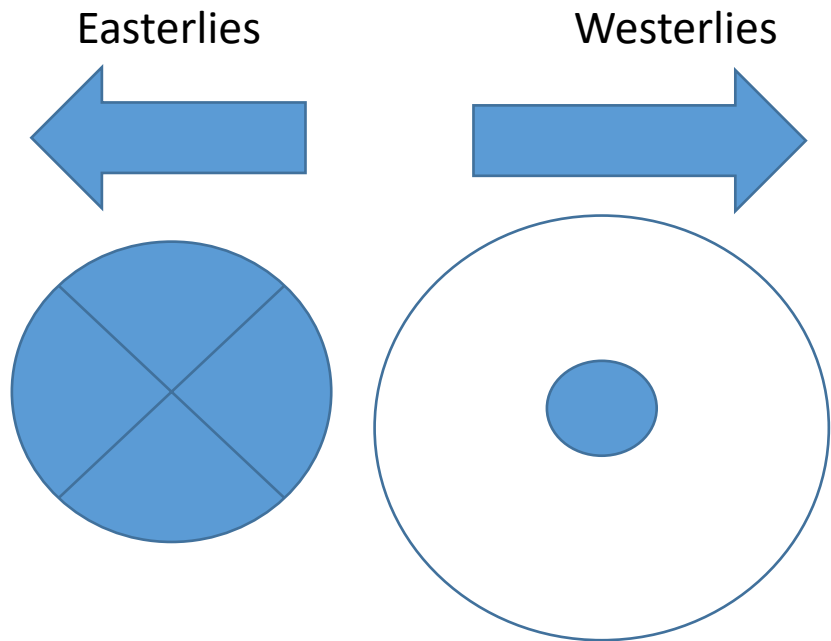


Figure 2. (a) Schematic of a zonal (east-west) section along the ACC (adapted from Olbers *et al.* 2004). Mesoscale eddies generate isopycnal displacements that transport momentum vertically and balance the meridional (north-south) transport. (b) Schematic of a meridional section of the ACC (adapted from Speer *et al.* 2000). The grey arrows indicate transport and the thin black lines are levels of constant density. The circular curves represent the sense of the Eulerian $\bar{\psi}$ and eddy ψ' overturning cells in residual-mean theories. Patterns of wind and buoyancy forcing at the surface are also shown.



Riassumendo

- ❖ Quali sono le forze che determinano il flusso zonale della ACC
 - ❖ Principalmente stress del vento, gradienti di pressione e contributo topografico
- ❖ Come si determina il bilancio dinamico della ACC ?
 - ❖ La quantità di moto ceduta dal vento accelera la ACC; in assenza di margini continentali è l'interazione con il fondo dell'oceano (*form drag*) che rimuove la quantità di moto in eccesso; la quantità di moto fornita dal vento è trasmessa verticalmente fino al fondo attraverso gli *Interfacial form stress* che a loro volta sono determinate dagli eddy di mesoscala
- ❖ Come si genera il flusso di ritorno verso S ?
 - ❖ Considerando che alla lat e long dello stretto di Drake la profondità minima è intorno ai 2000 metri, è proprio a questa profondità che si possono formare i gradienti di pressione favorevoli ad un flusso di ritorno verso S

Riassumendo ...

- L'Oceano Meridionale svolge molti ruoli chiave nella circolazione termoalina globale
- Il percorso circumpolare della ACC consente le connessioni tra bacini oceanici **permettendo quindi l'esistenza di una circolazione globale tridimensionale**
- Nell'Oceano Meridionale inoltre si realizza la connessione e gli scambi tra le masse d'acque di fondo con l'atmosfera
- In questi processi, che hanno profonda influenza sul clima del nostro pianeta, la componente eddy del moto gioca un ruolo determinante