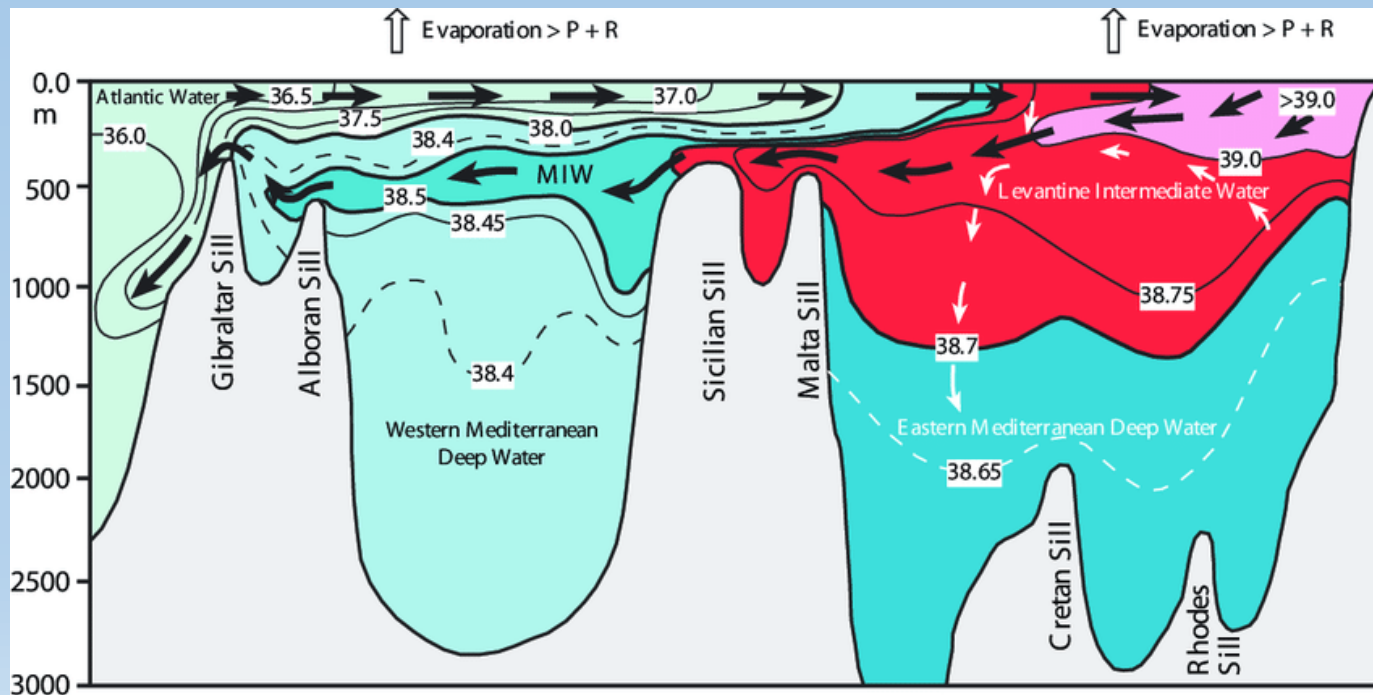


# Mixing oceanico ed Equazioni di bilancio nei bacini oceanici



Lezione 2: Corso di  
oceanografia

Anno Accademico 2025-2026

Milena Menna



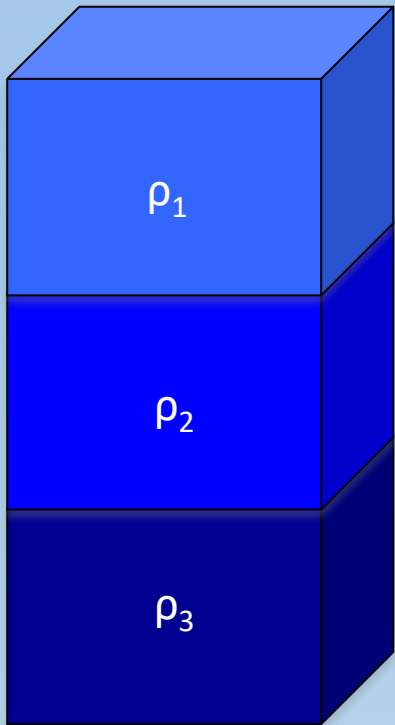
**OGS**

National Institute  
of Oceanography  
and Applied  
Geophysics

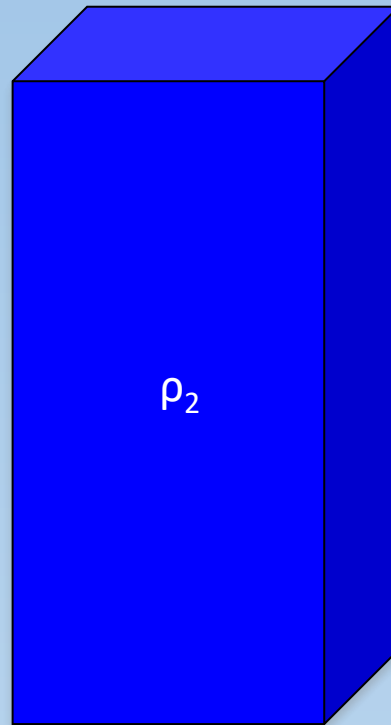
# Stabilità statica ed instabilità

La stabilità della colonna d'acqua è controllata dalla distribuzione verticale di densità

Stable: density resists vertical motion

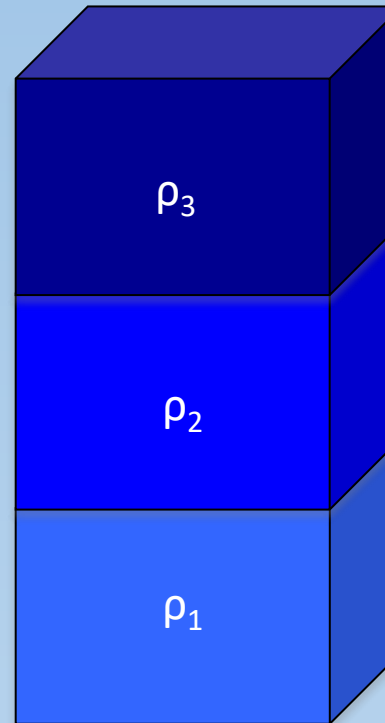


Neutral: density has no influence on vertical motion



$$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$$

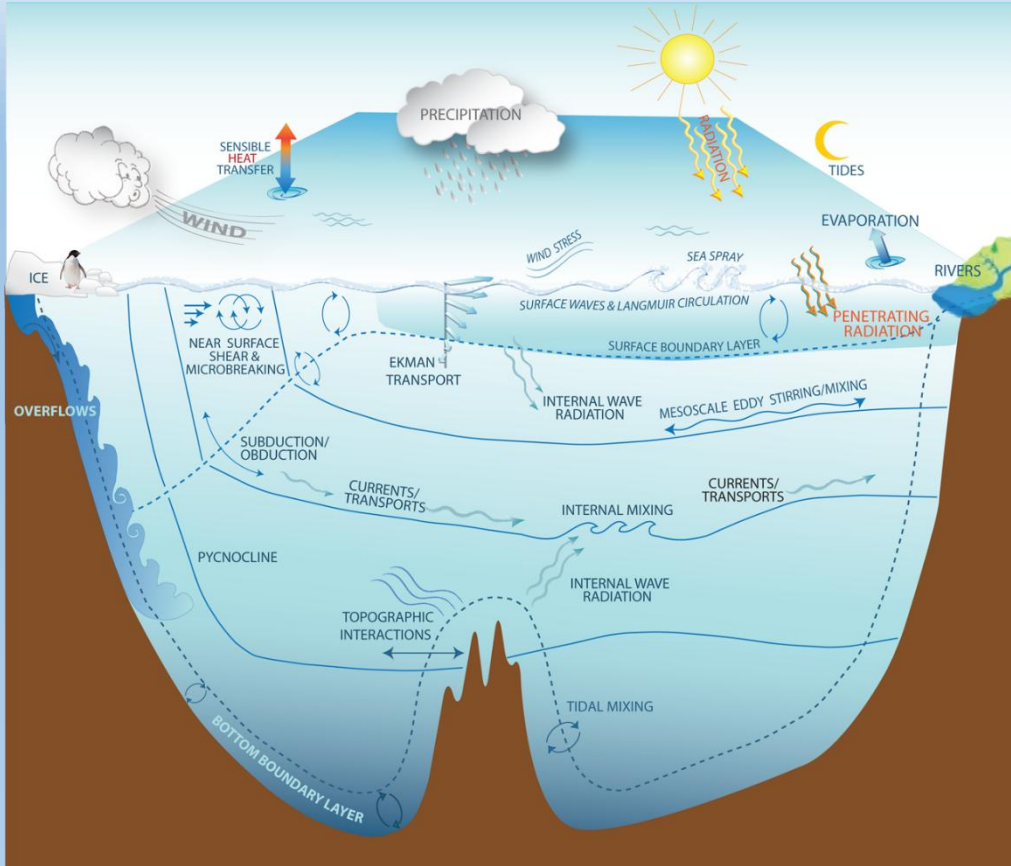
Unstable: density distribution causes vertical motion



- La colonna d'acqua è stabile quando la densità aumenta con la profondità; diventa instabile quando la densità diminuisce con la profondità;
- Spostare una particella d'acqua dalla sua posizione di equilibrio richiede lavoro. Quanto più forte è il gradiente di densità, tanto più lavoro è richiesto.
- La stabilità è definita in termini di **tasso di variazione della densità con la profondità** ed è una misura della quantità di lavoro necessaria per spostare una particella in verticale nella colonna d'acqua

$$(\text{Stability}) E = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

# Ocean Mixing



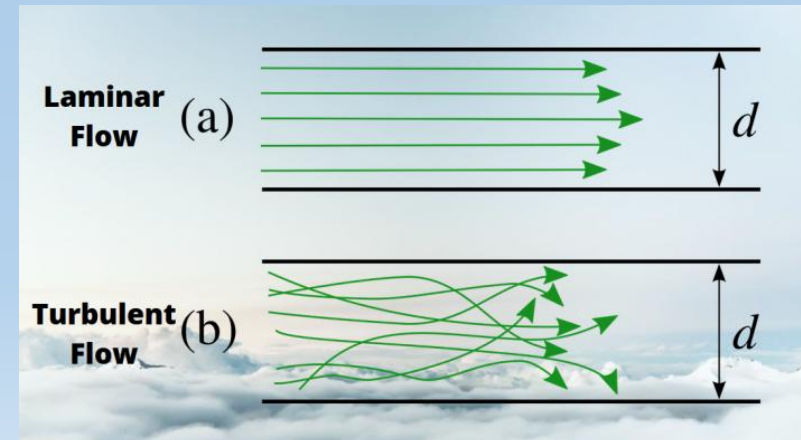
➤ Il **Mixing** oceanico è il **cambiamento delle proprietà dell'acqua** (T, S, gas e nutrienti), che risulta dal **rimescolamento** dovuto o a forze meccaniche (vento, maree) o a **variazioni di densità** (raffreddamento ed evaporazione).

**Il mixing oceanico avviene su varie scale spaziali:**

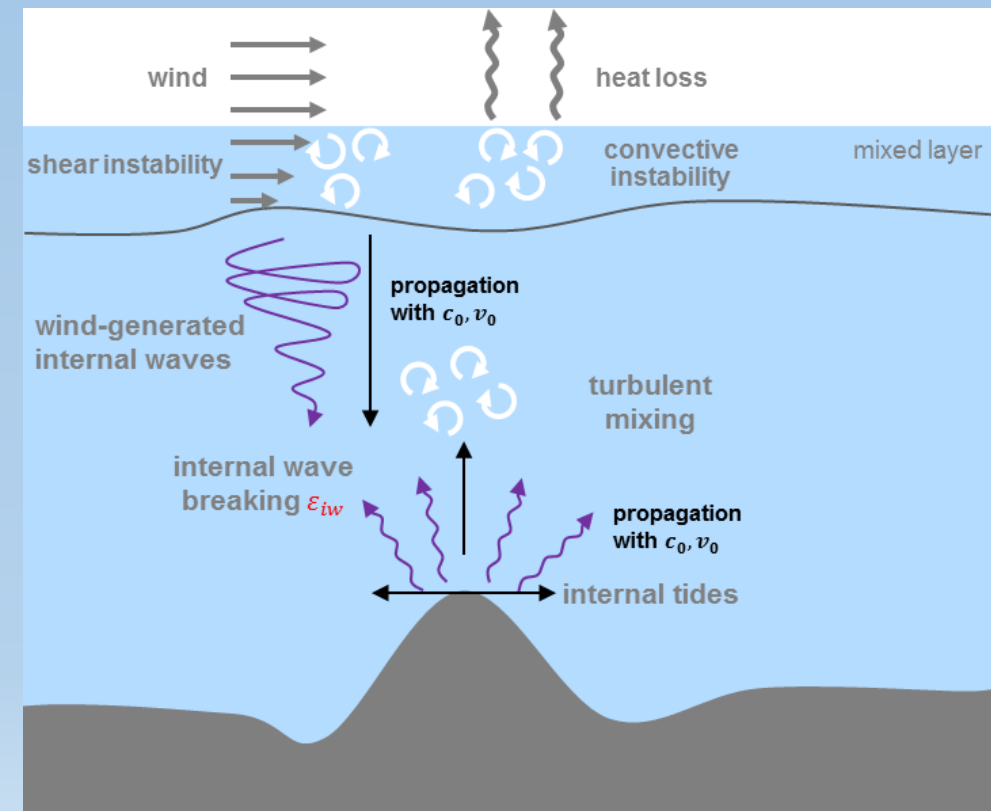
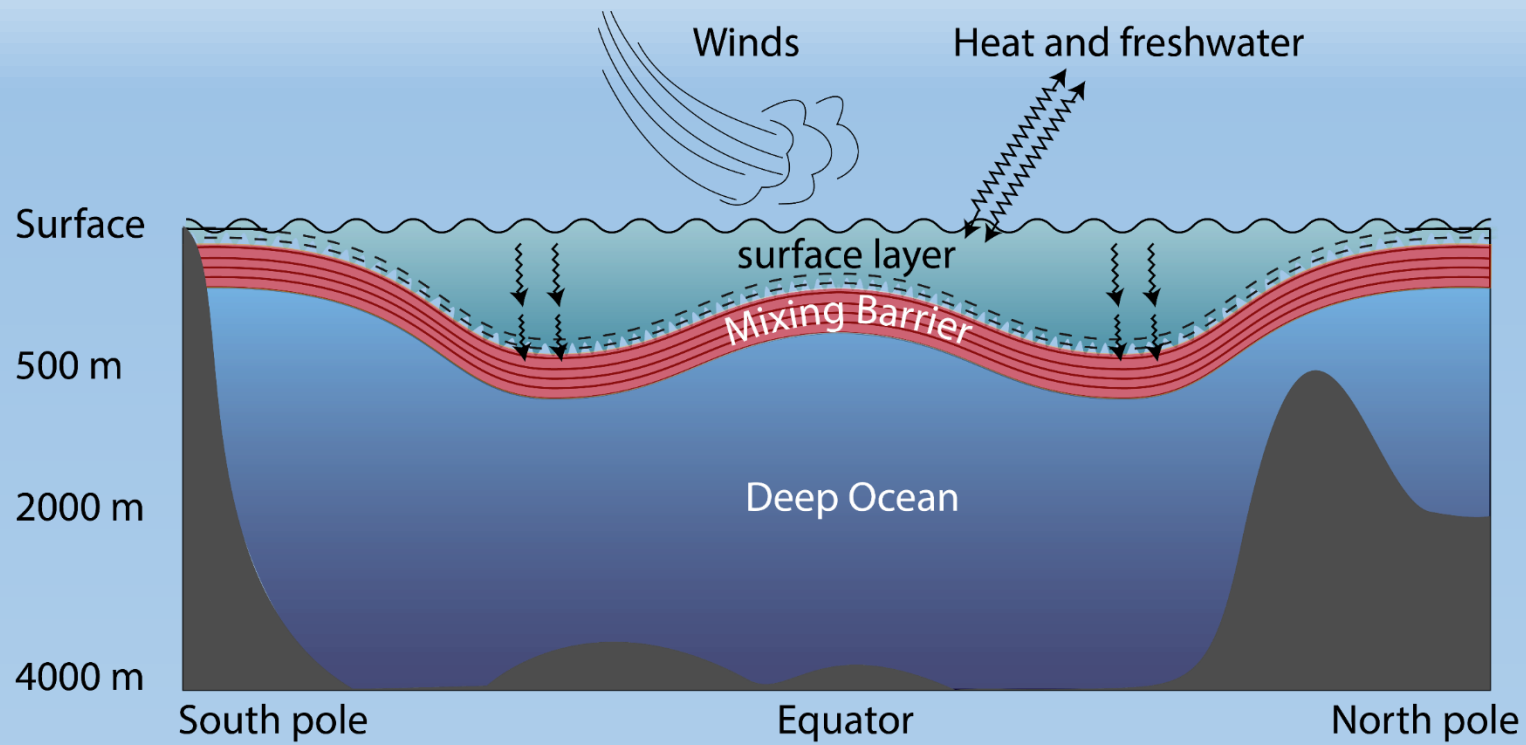
- **Grande scala:** in risposta all'azione del vento, delle maree, delle correnti;
  - **Piccola scala:** instabilità dovute ai moti a grande scala, onde interne, doppia-diffusione, attrito con il fondo; sono una componente importante del clima oceanico su larga scala;
- **Il mixing gioca un ruolo fondamentale nella variabilità climatica;**
- Flusso laminare: Diffusione molecolare (movimento delle singole molecole) del sale e del calore;
  - Il flusso nell'oceano non è mai laminare ma turbolento (movimento caotico)

## Spatial scales in the ocean:

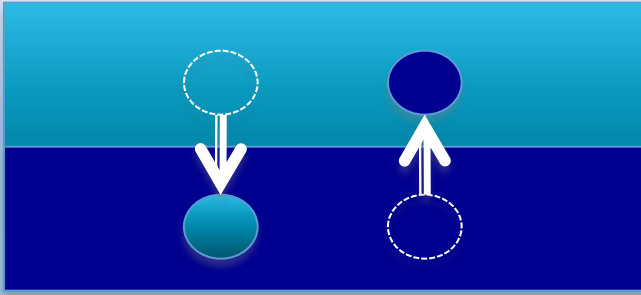
- **Small-scale** motion 0.1 mm - 100 m (onde interne);
- **Mesoscale** motions 100 m - 10 km (onde interne, oscillazioni inerziali, maree);
- **Synoptic scale** motion (**sub-basin scale**) 10 km – 1000 km;
- **Basin-scale** motion from 1000 km to basin dimensions.



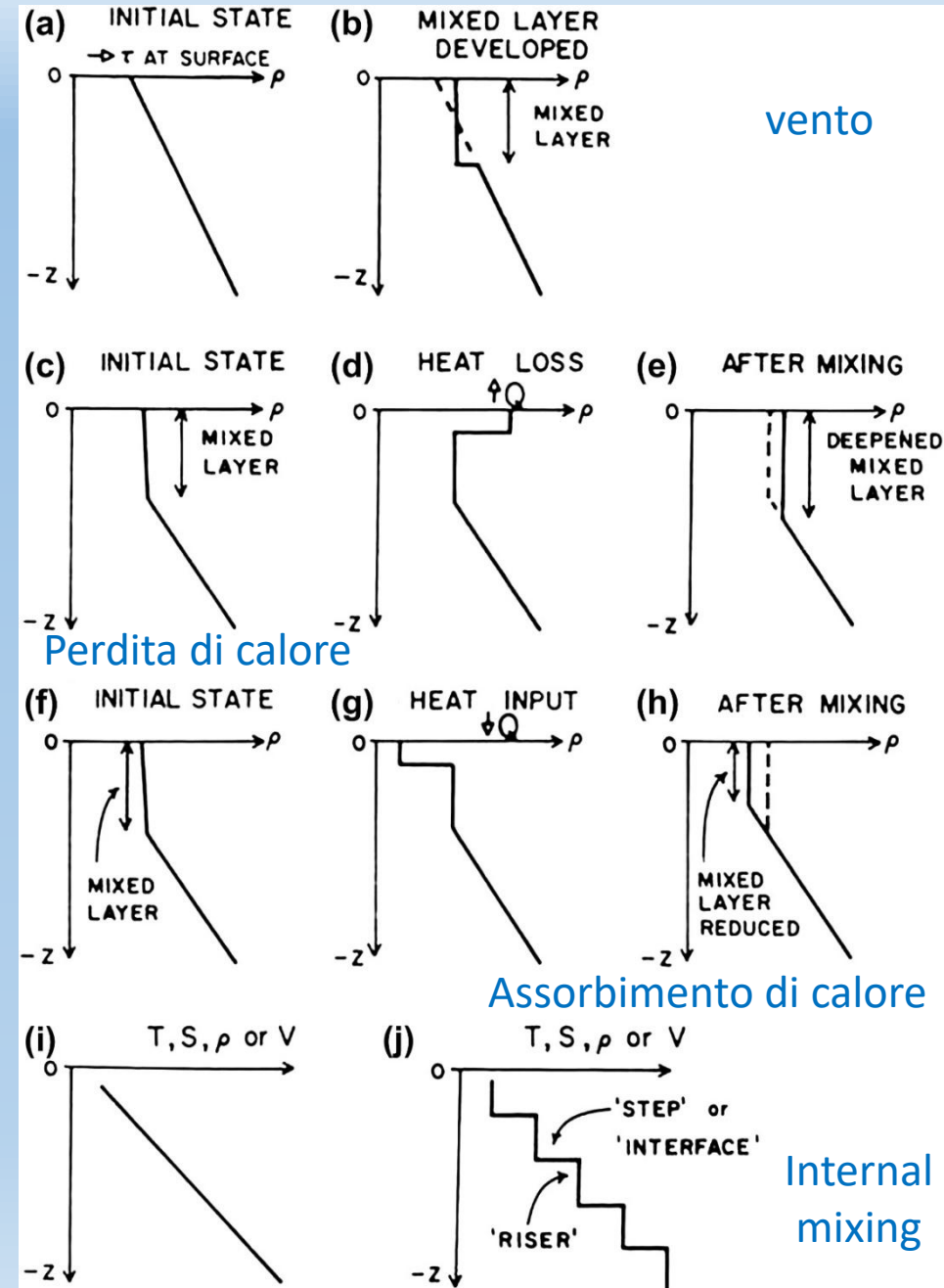
# Ocean Mixing



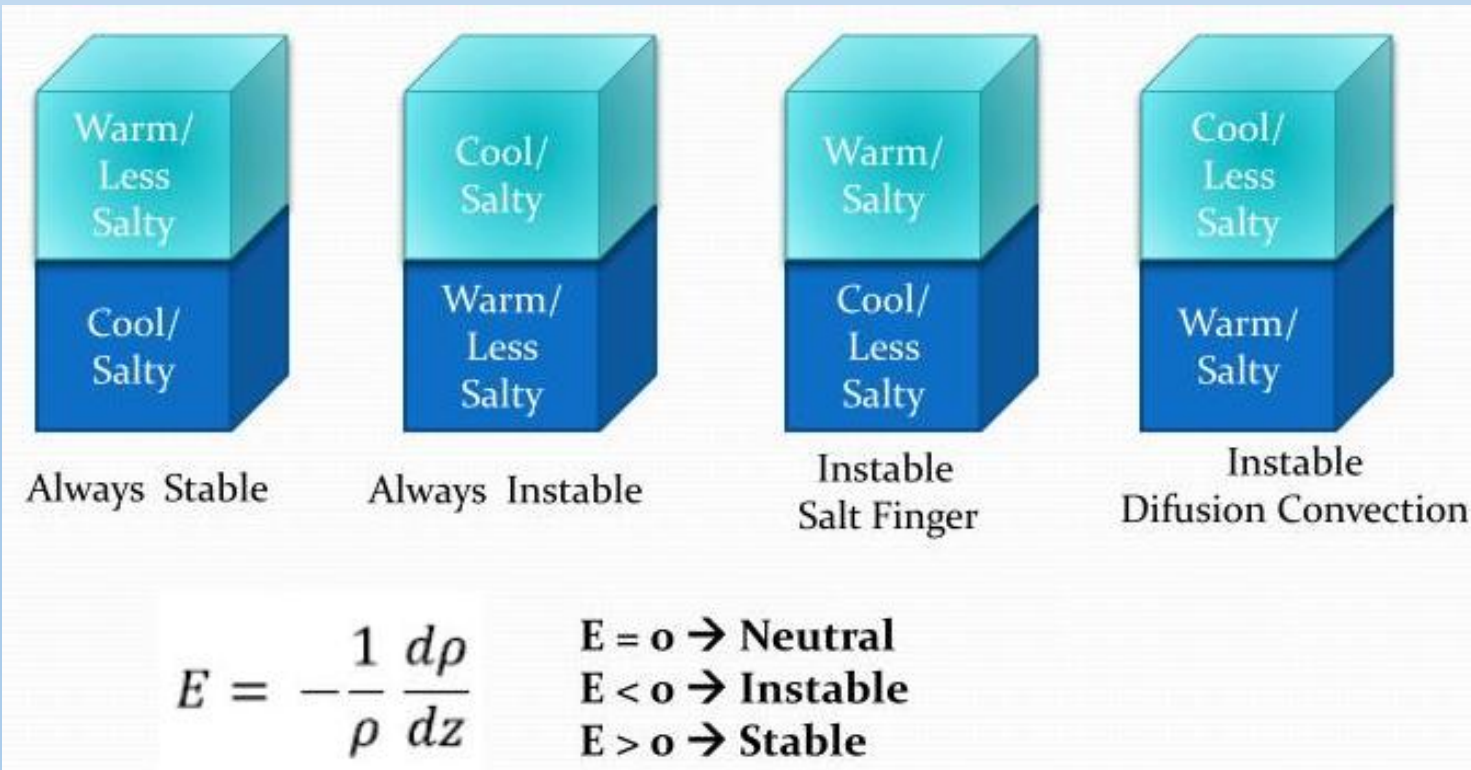
# Mixing verticale



- una particella d'acqua spinta verso il basso sarà più leggera dell'acqua circostante e le forze di galleggiamento la spingeranno verso l'alto;
- una particella d'acqua spinta verso l'alto sarà più pesante dell'acqua circostante e le forze di galleggiamento la spingeranno verso il basso;
- Il processo che maggiormente causa instabilità nella colonna d'acqua è il **raffreddamento dell'acqua superficiale** che diventa più densa (perdita di calore);
- Anche l'evaporazione causa un aumento di salinità con conseguente incremento di densità nelle acque superficiali;
- Quando la colonna d'acqua diventa instabile l'acqua più densa affonda e quella meno densa risale dagli strati più profondi, creando turbolenza e mixing verticale.



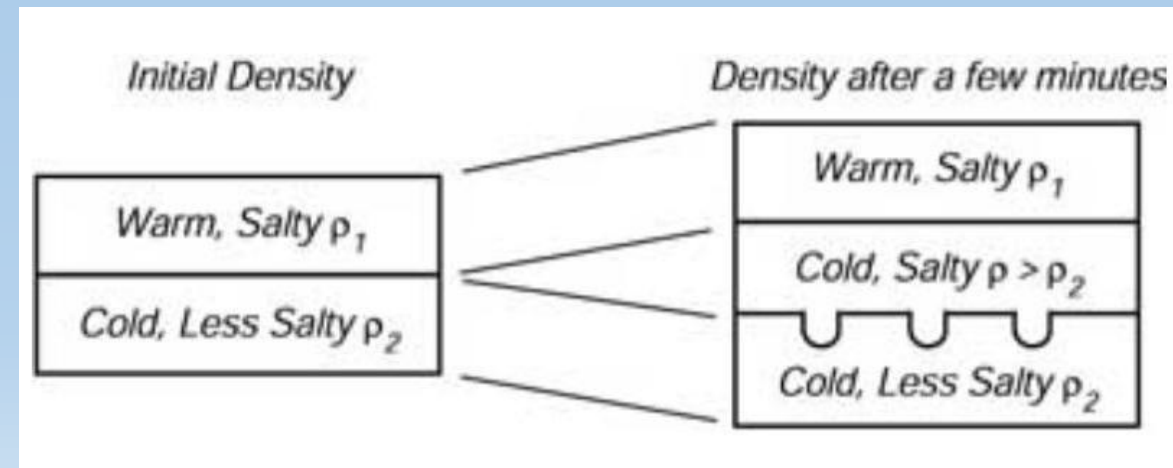
# Stabilità della Colonna d'acqua



La colonna d'acqua può essere:

- **Stabile;**
- **Instabile;**
- **Instabile per salinità;**
- **Instabile per temperatura;**

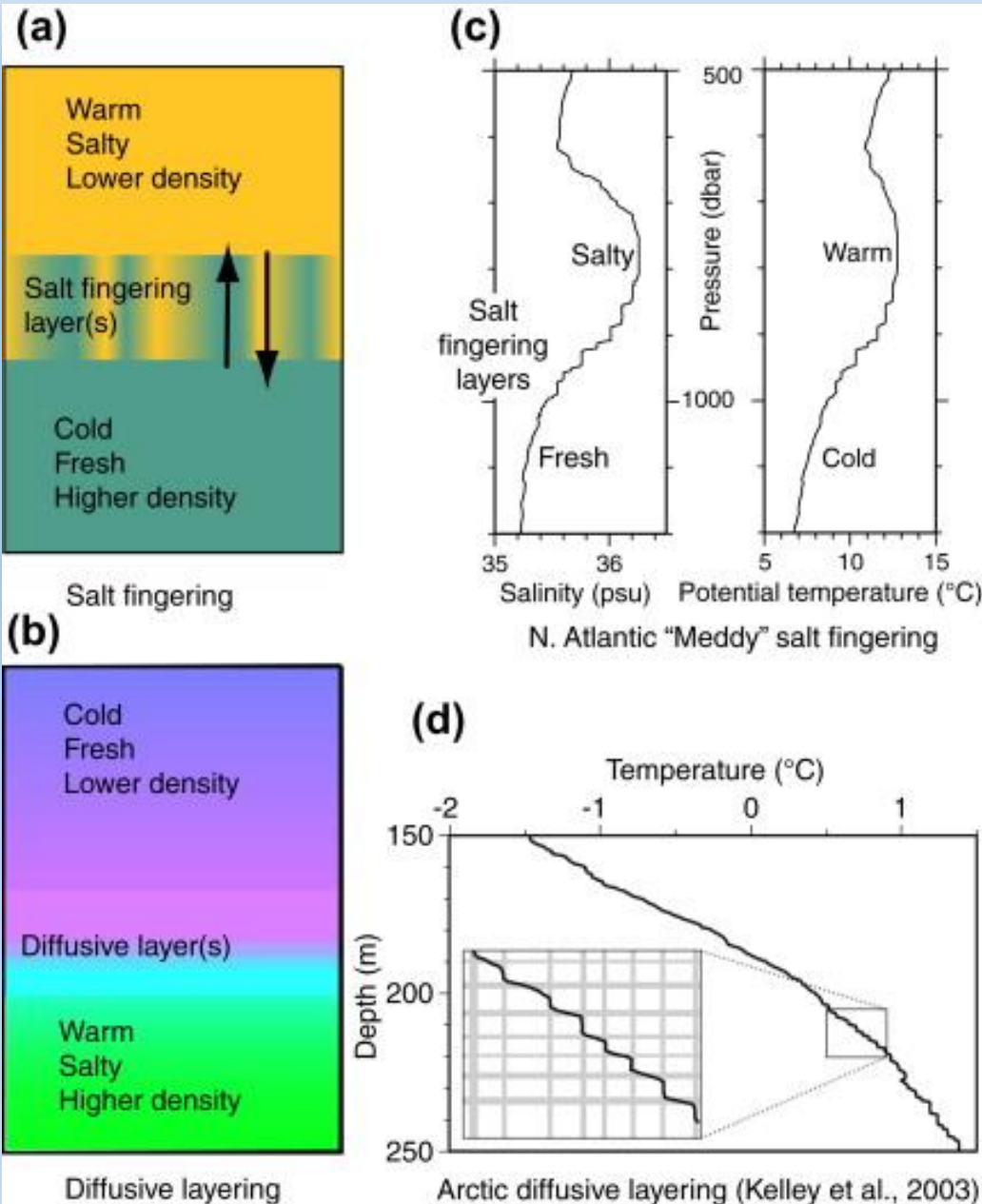
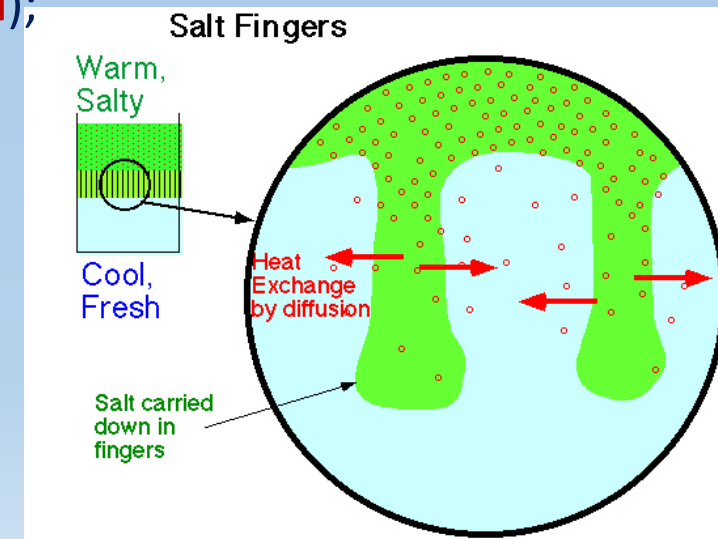
## Doppia Diffusione



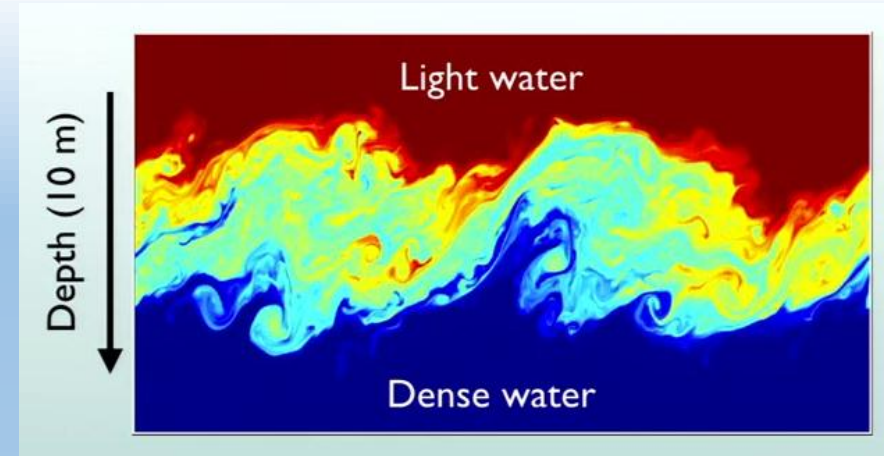
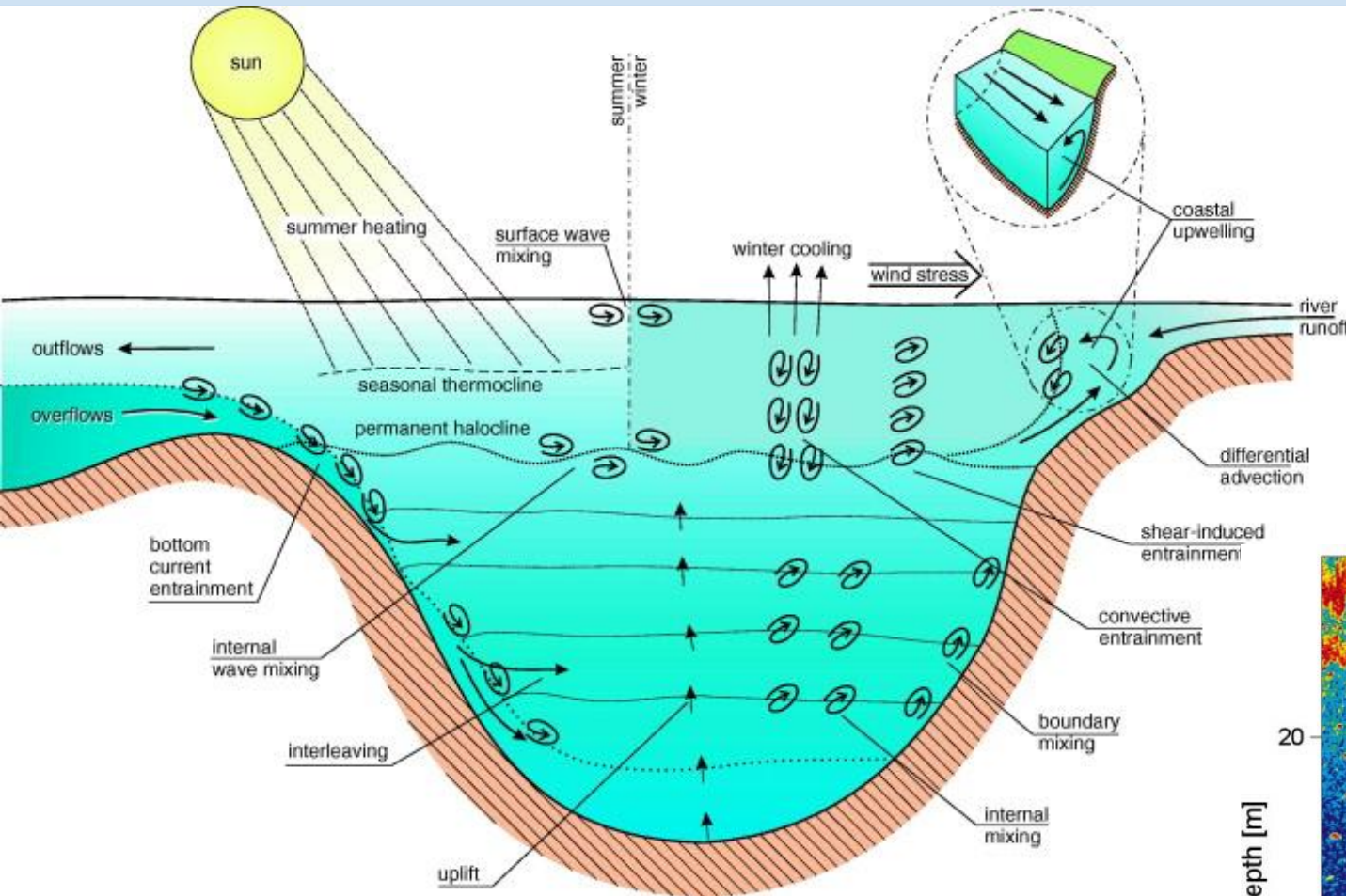
# Doppia diffusione (mixing a piccola scala)

- La diffusione molecolare del calore è 100 volte più rapida di quella del sale;
- Se abbiamo un sistema a due strati con una massa d'acqua + T e + S su una massa d'acqua - T e - S, il calore diffonde verso il basso più velocemente del sale; si forma uno strato intermedio instabile più denso (- T e + S) in cui il sale diffonde formando delle colonne di pochi centimetri chiamate **salt fingers**;
- Quando T ed S aumentano con la profondità, quindi la colonna d'acqua è stabile dal punto di vista della salinità e non dal punto di vista della temperatura, si forma uno strato intermedio più freddo e denso che affonda e si hanno processi di diffusione solo del calore (**processi diffusivi**);
- La doppia diffusione può interessare strati di pochi metri o di decine di metri.

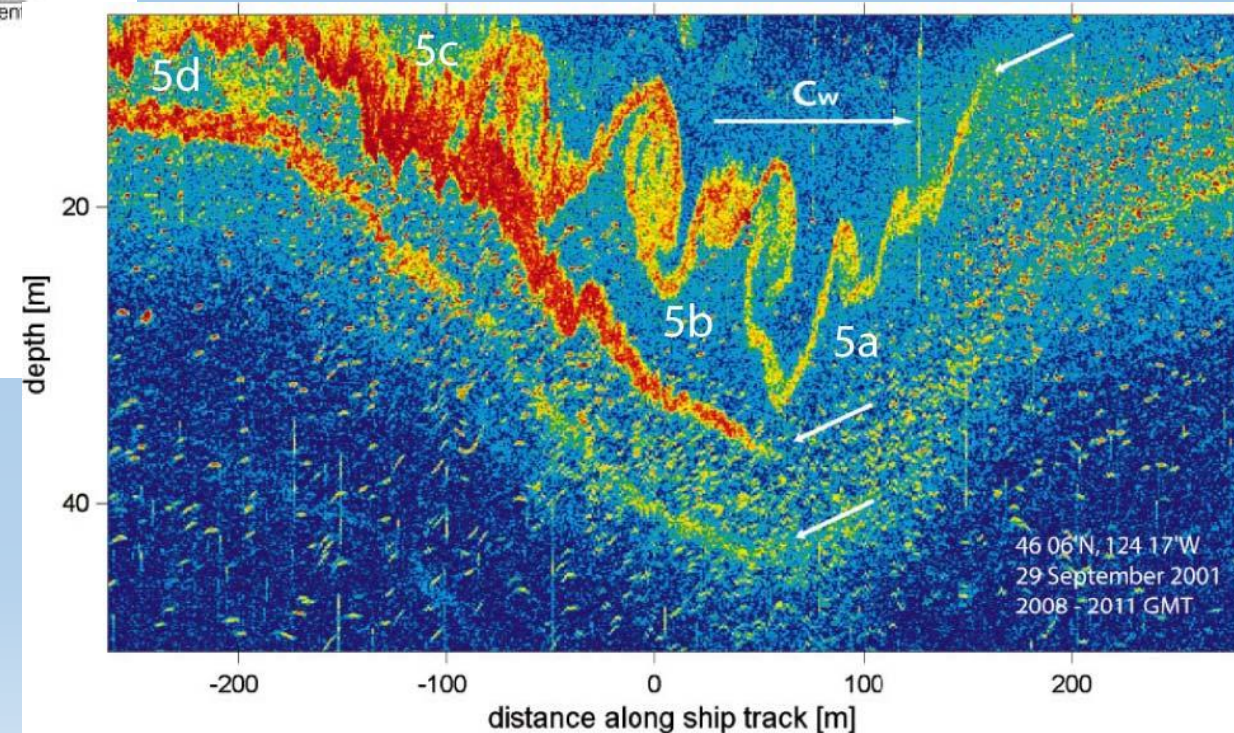
<https://fleetmonitoring.euro-argo.eu/float/2904024>



# Mixing verticale

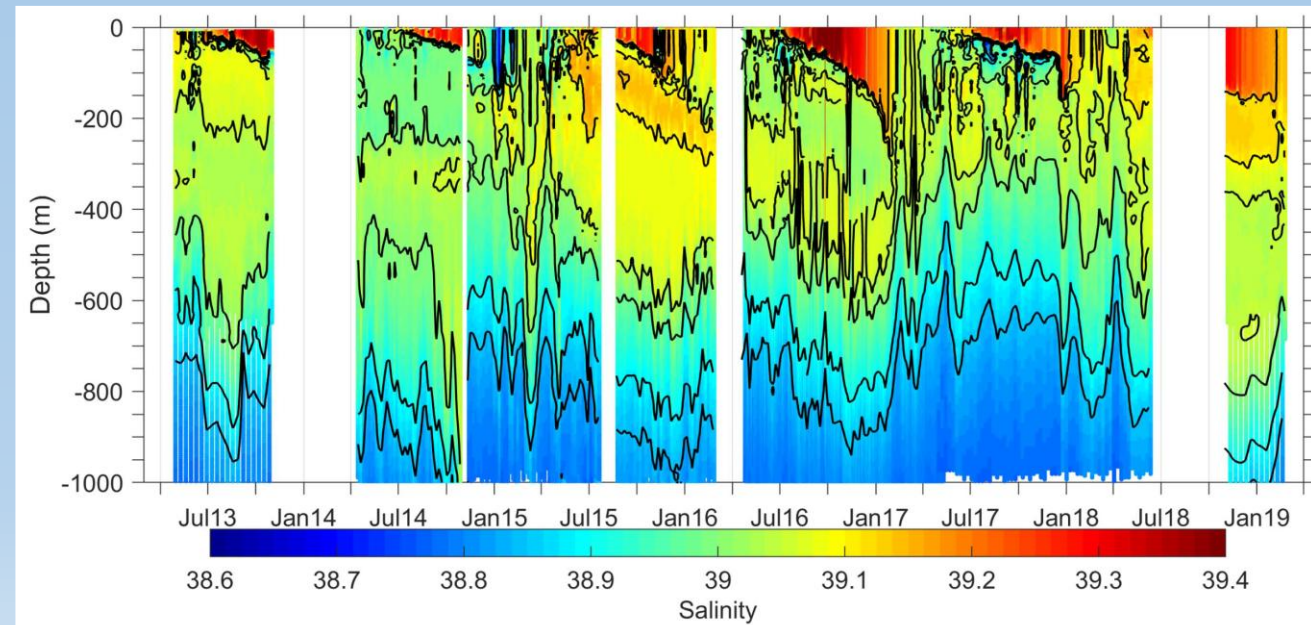
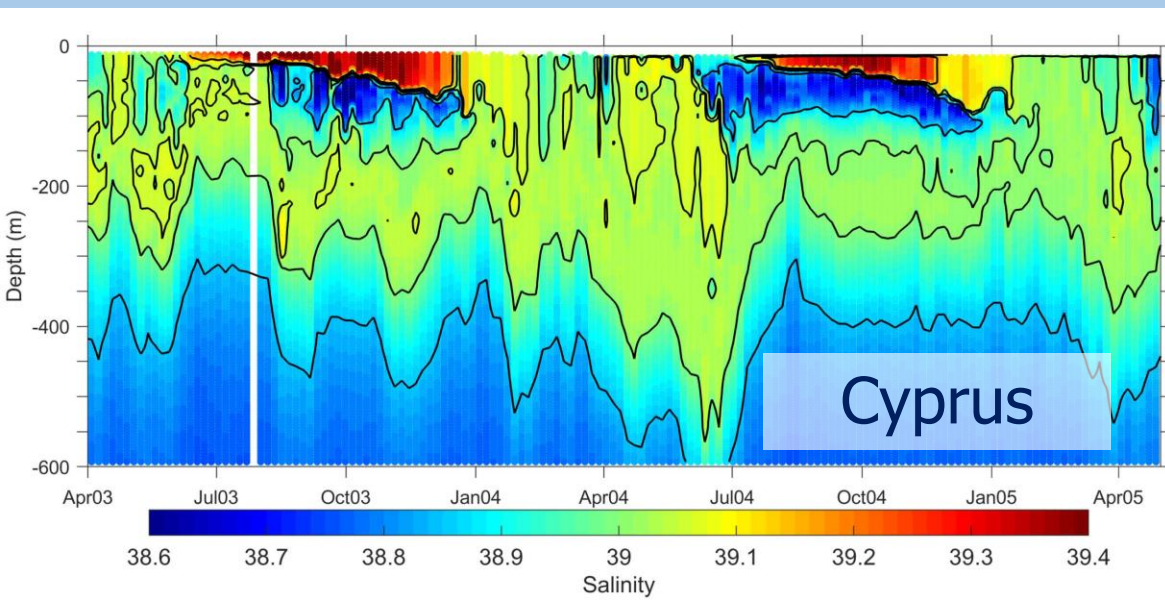
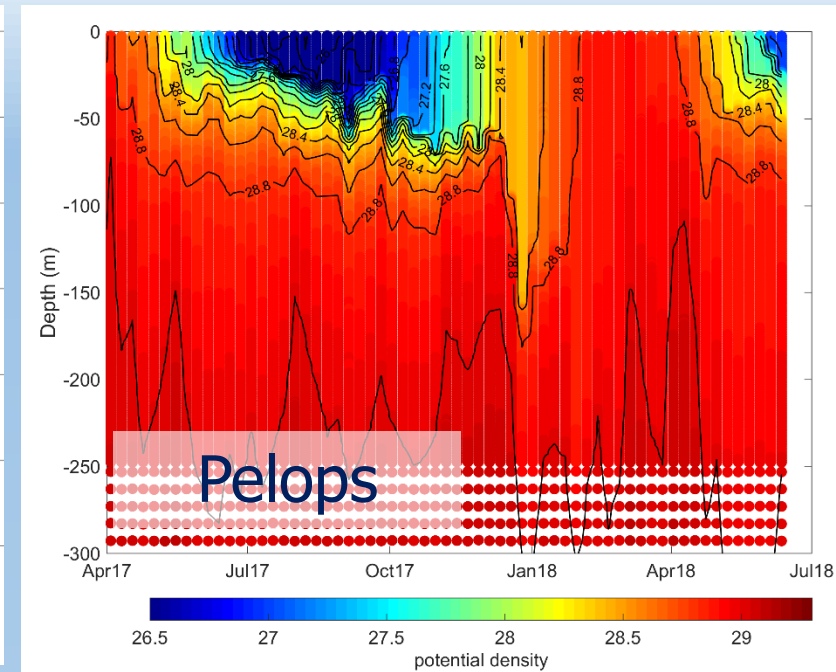
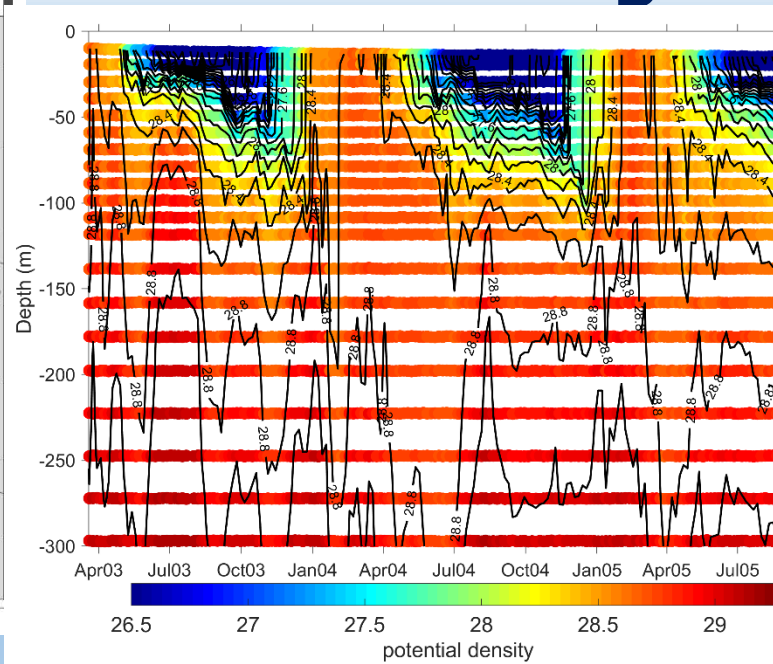
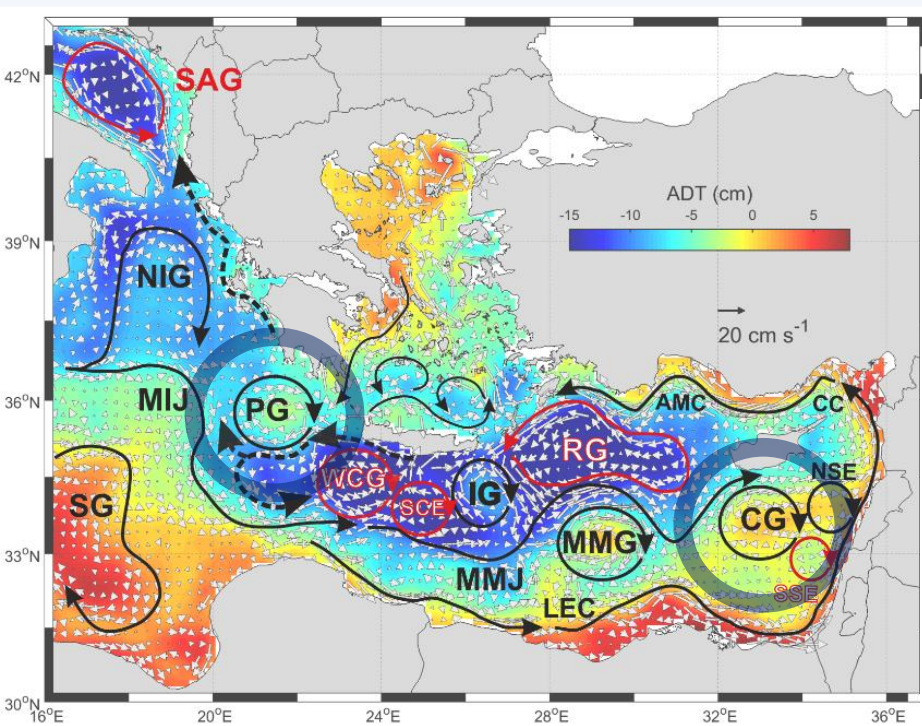


Acoustical snapshot of a nonlinear internal gravity wave approaching the Oregon coast. (Jim Moum et al. 2003)

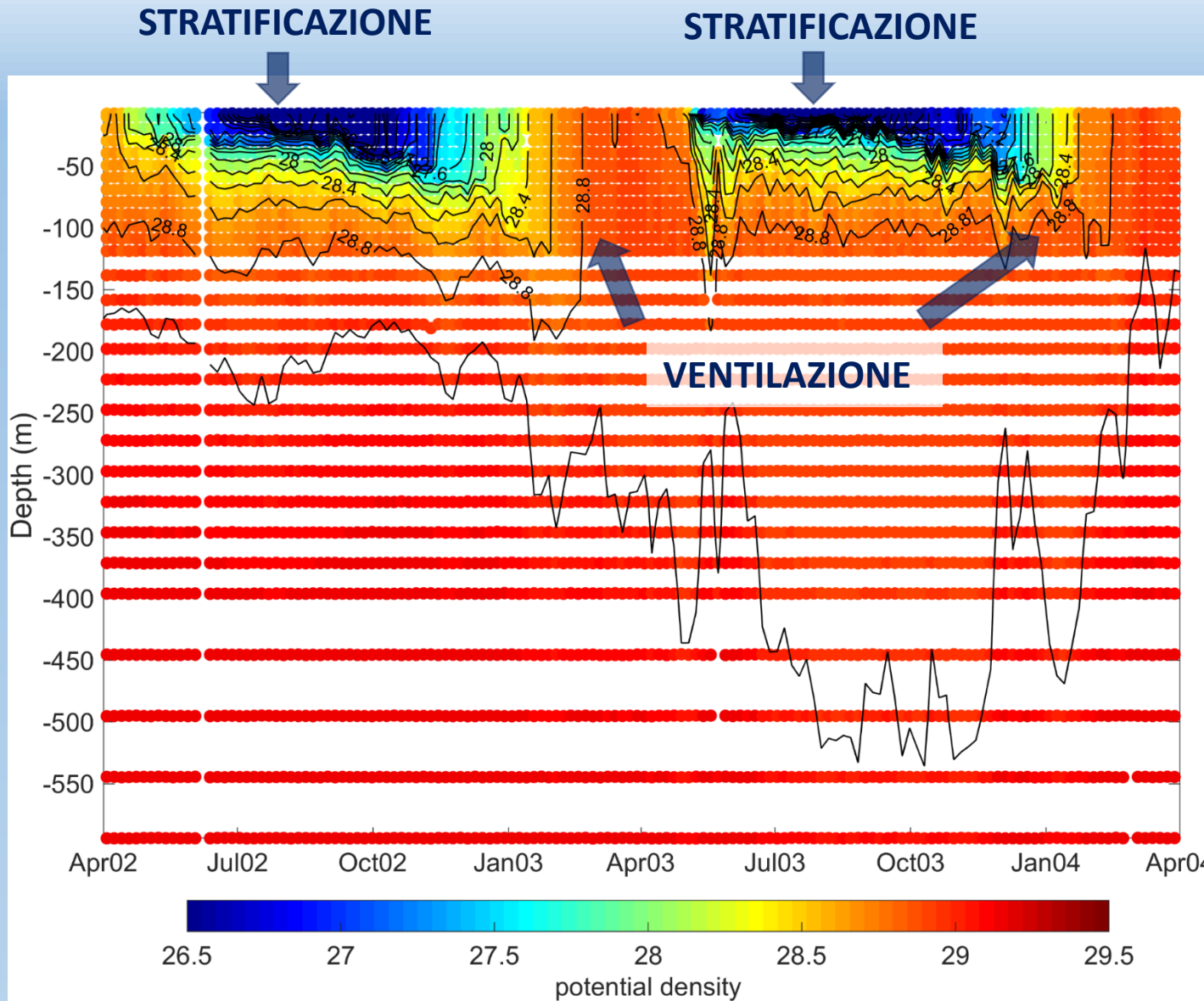


Le onde interne si propagano lungo superfici di discontinuità dette fronti

# Mixing verticale



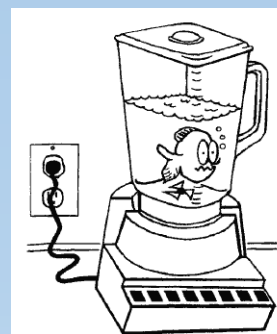
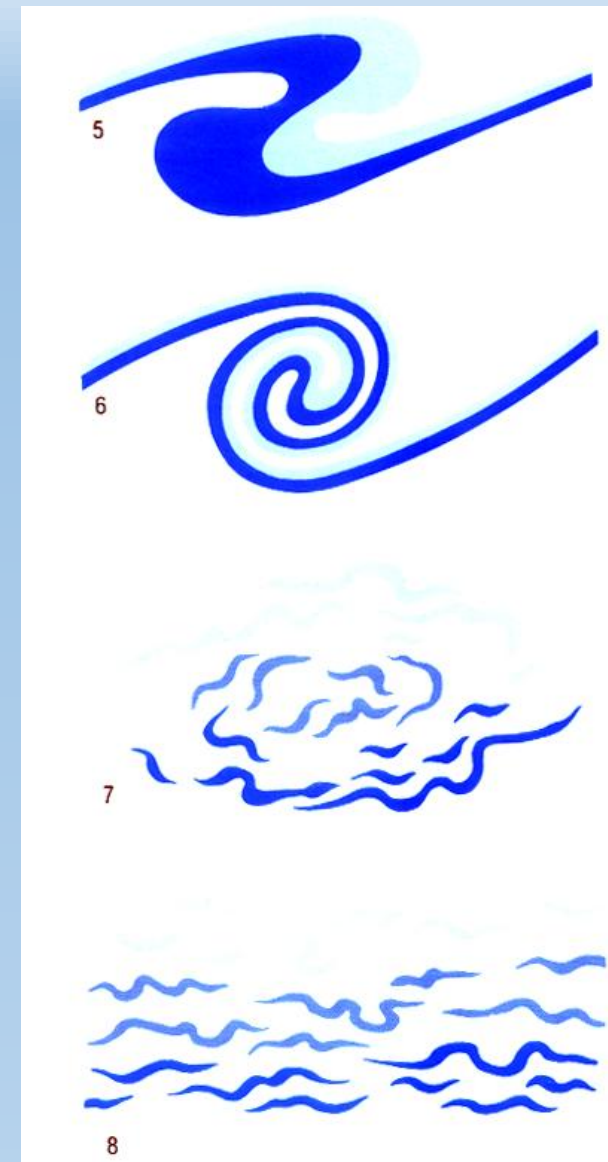
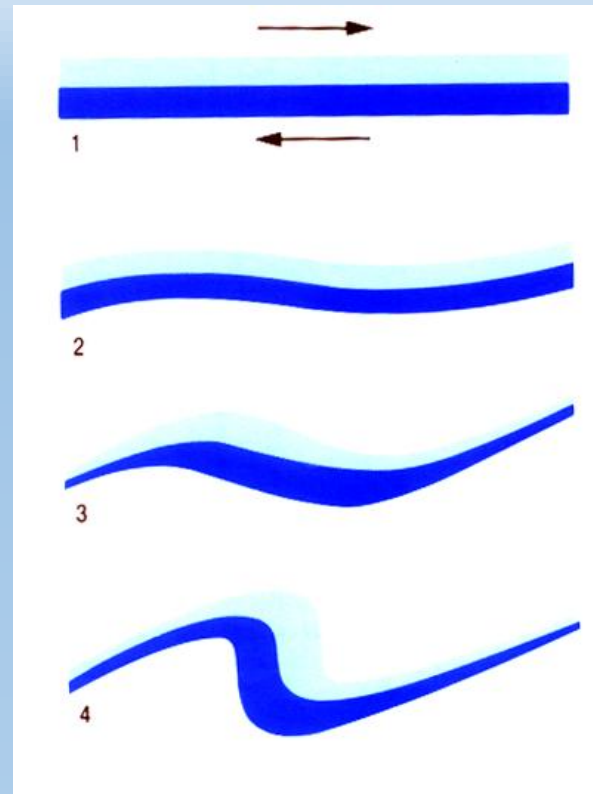
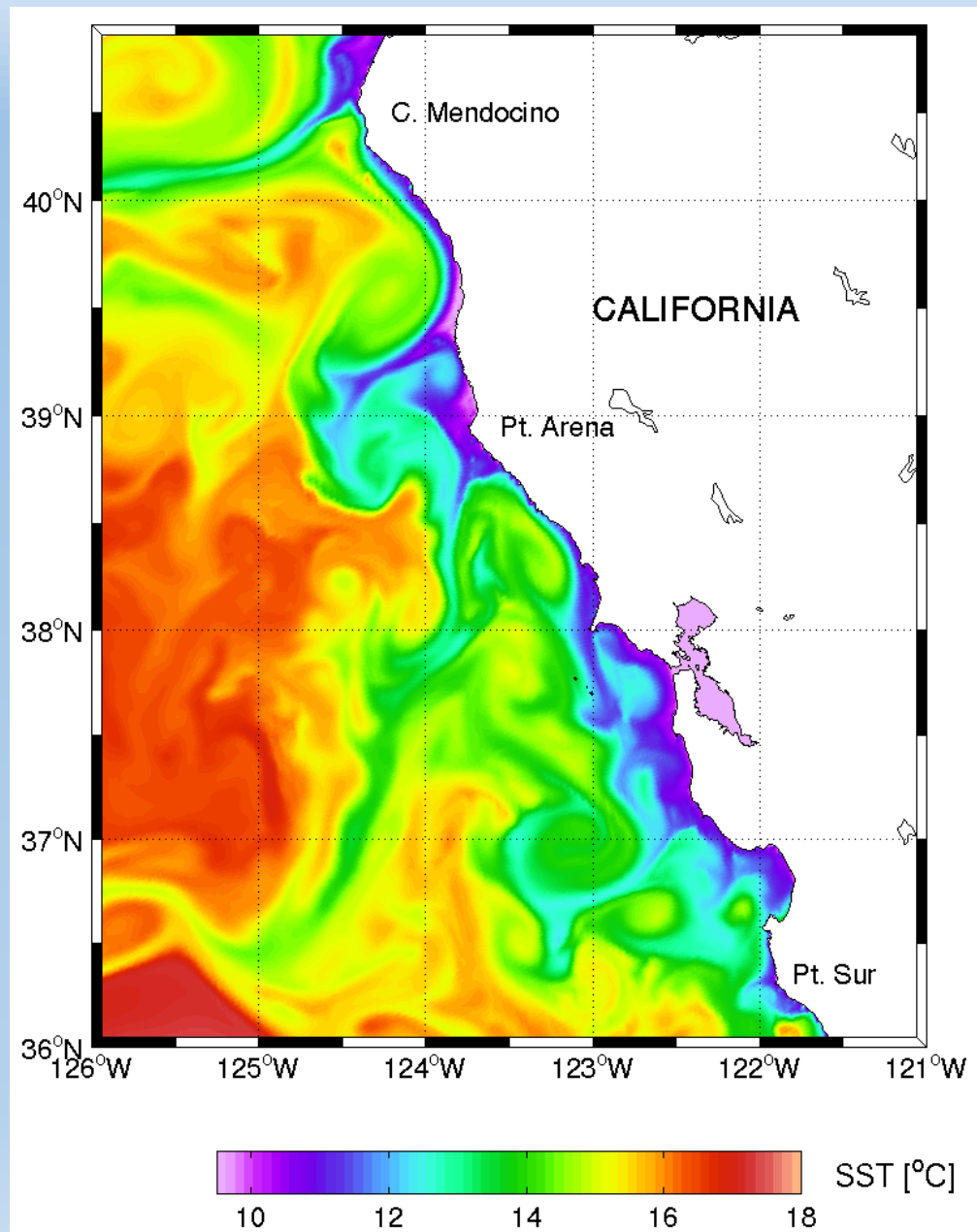
# Stratificazione e Ventilazione



Alle medie latitudini:

- la colonna d'acqua nel periodo estivo è **Stratificata**, cioè il mixed layer è poco profondo, il pycnocline è molto ben sviluppato (il forte gradiente di densità impedisce la comunicazione tra gli strati più profondi e quelli superficiali);
- Con l'arrivo dell'autunno il mixed layer si approfondisce, il pycnocline diventa meno sviluppato (minore gradiente di densità);
- In inverno la colonna d'acqua è rimescolata, il termocline è quasi inesistente;
- La **ventilazione** oceanica è il processo attraverso il quale le acque superficiali "giovani", che sono state recentemente in contatto con l'atmosfera, vengono trasportate all'interno dell'oceano lontano dalle loro aree di formazione.

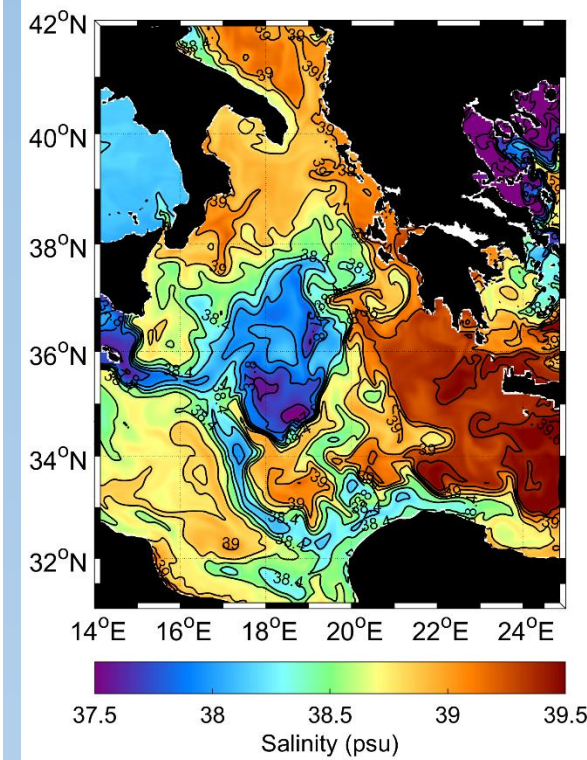
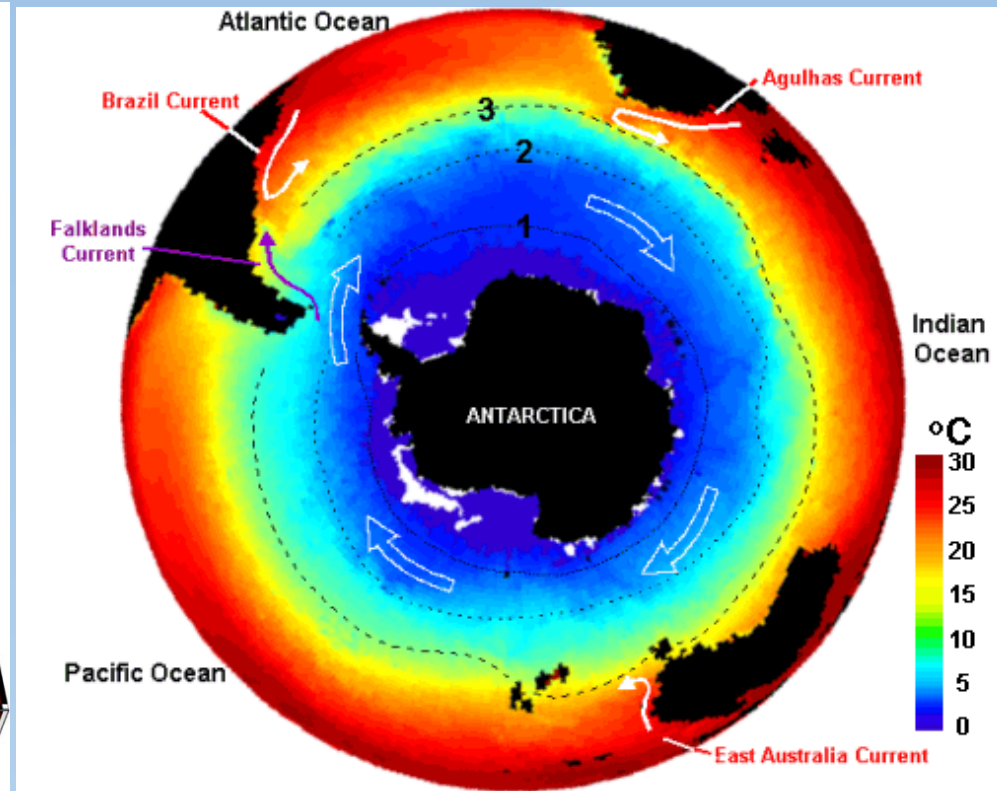
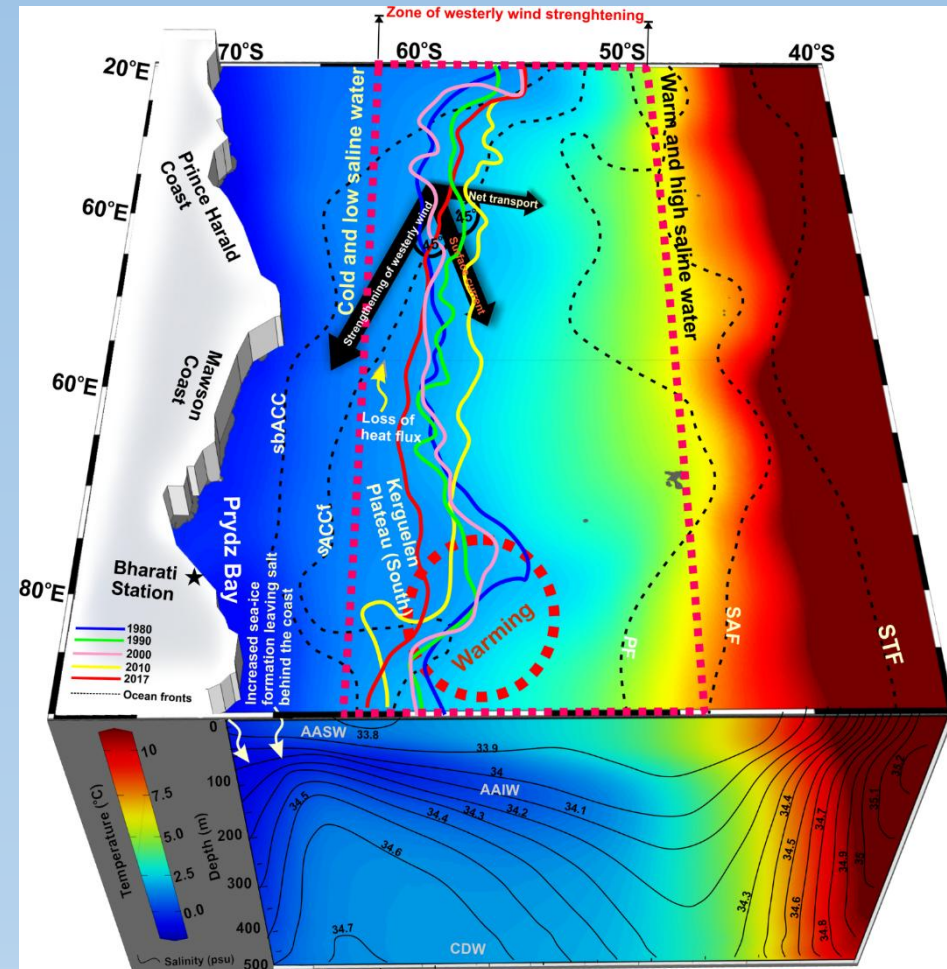
# Mixing orizzontale Stirring and Mixing



And you thought  
there was stress  
in your life !

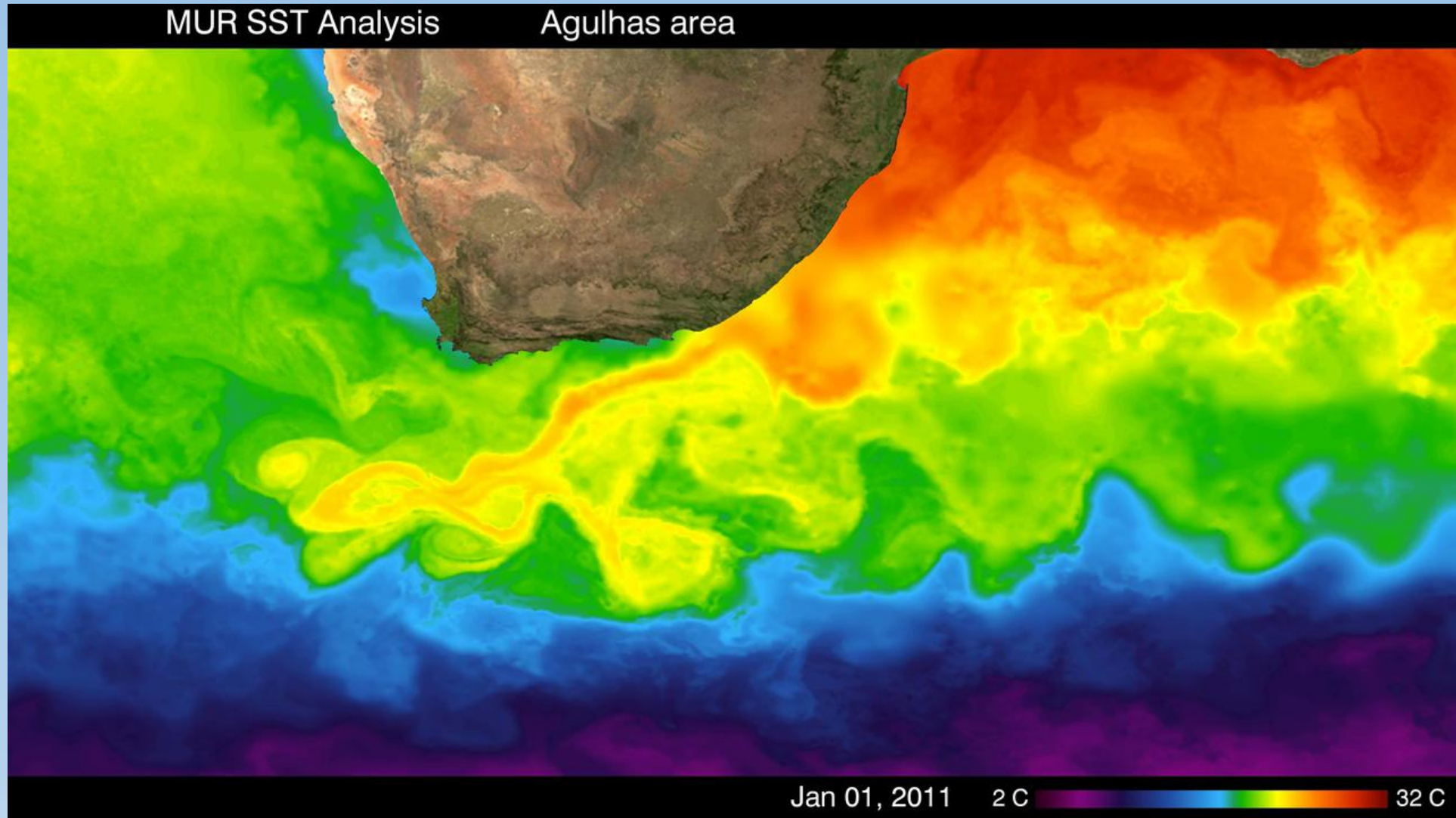
# Fronti

- ✓ Nell'oceano i fronti sono le aree che delimitano diverse masse d'acqua e sono caratterizzati da forti gradienti di temperatura e salinità;
- ✓ I fronti sono aree di forte instabilità del flusso (turbolenza), caratterizzati anche da correnti molto intense.



1) The polar front 2) The subantarctic front, 3) The subtropical front - the northern boundary of the Southern Ocean. White outline arrows indicate the flow of the Antarctic Circumpolar Current. Source: NOC from SST climatology data

# Fronti: esempio di fronte termoclinico



# Fronti: esempio di fronte termoalino

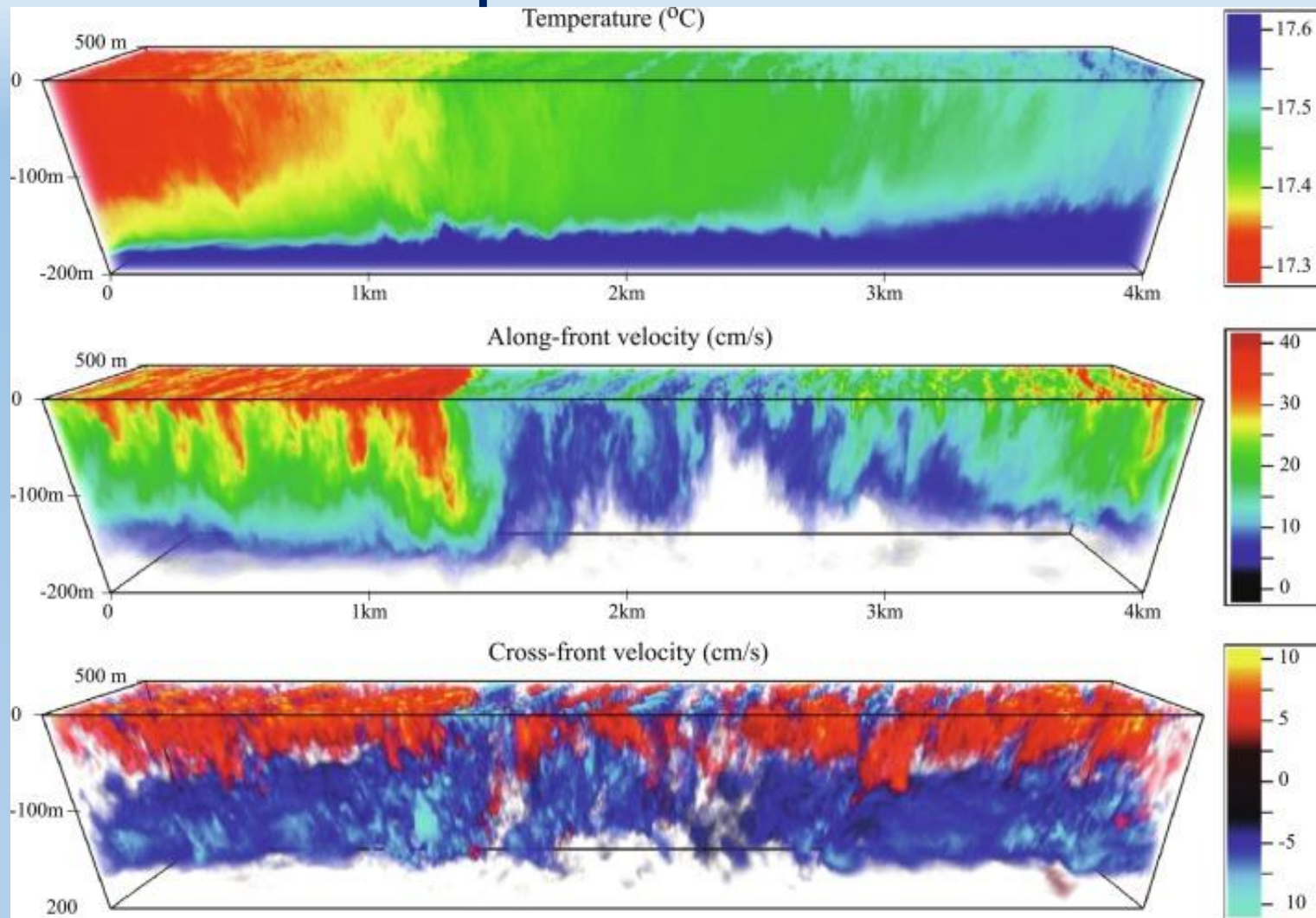


Fig. 4. Visualization of the slantwise turbulent flows induced by the symmetric instability for (top) temperature, (middle) along-front velocity and (bottom) cross-frontal velocity computed by the LES ( $\text{cm s}^{-1}$ ). The velocity magnitude smaller than  $2.5 \text{ cm s}^{-1}$  are made transparent.

(From Thomas, L. N., Taylor, J. R., Ferrari, R. and Joyce, T. M. (2013). Symmetric instability in the Gulf Stream. *Deep-Sea Research* // **91**, 96–110. Copyright © 2013 Elsevier Ltd. Used with permission.)

# Conservazione della massa e del sale

- La conservazione della massa e del sale può essere utilizzata per ottenere informazioni molto utili sui **flussi** nell'oceano.
- Per esempio, supponiamo di voler conoscere il **bilancio netto del Mar Mediterraneo**.

$$M_i = M_o$$

Massa inflow = Massa outflow

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V \Rightarrow \rho_i V_i = \rho_o V_o$$

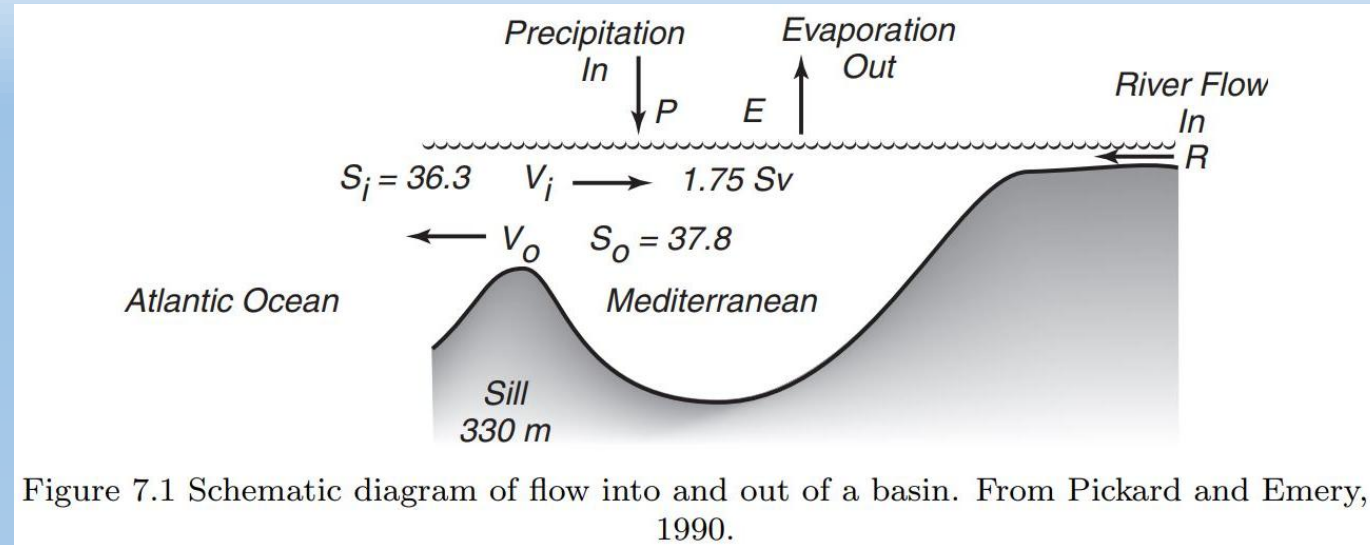
- Introducendo un piccolo errore possiamo dire che  $\rho_i = \rho_o$
- Se consideriamo la presenza di precipitazioni (**P**), evaporazioni (**E**) e Runoff (**R**):

$$V_i + R + P = V_o + E$$

- Risolviendo per  $V_o - V_i$ :

$$V_o - V_i = (R + P) - E$$

Questa equazione afferma che il flusso d'acqua netto in un bacino deve bilanciare  $(R+P)-E$  quando mediato su lunghi periodi.



- Grazie al principio di conservazione del sale possiamo scrivere che:

$$\rho_i V_i S_i = \rho_o V_o S_o$$

Introducendo un piccolo errore possiamo dire che  $\rho_i = \rho_o$

# Conservazione della massa e del sale: Esempio

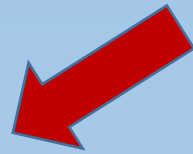
$$V_i = 1.75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} = 1.75 \text{ Sv};$$

$$V_o = 1.68 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} = 1.68 \text{ Sv};$$

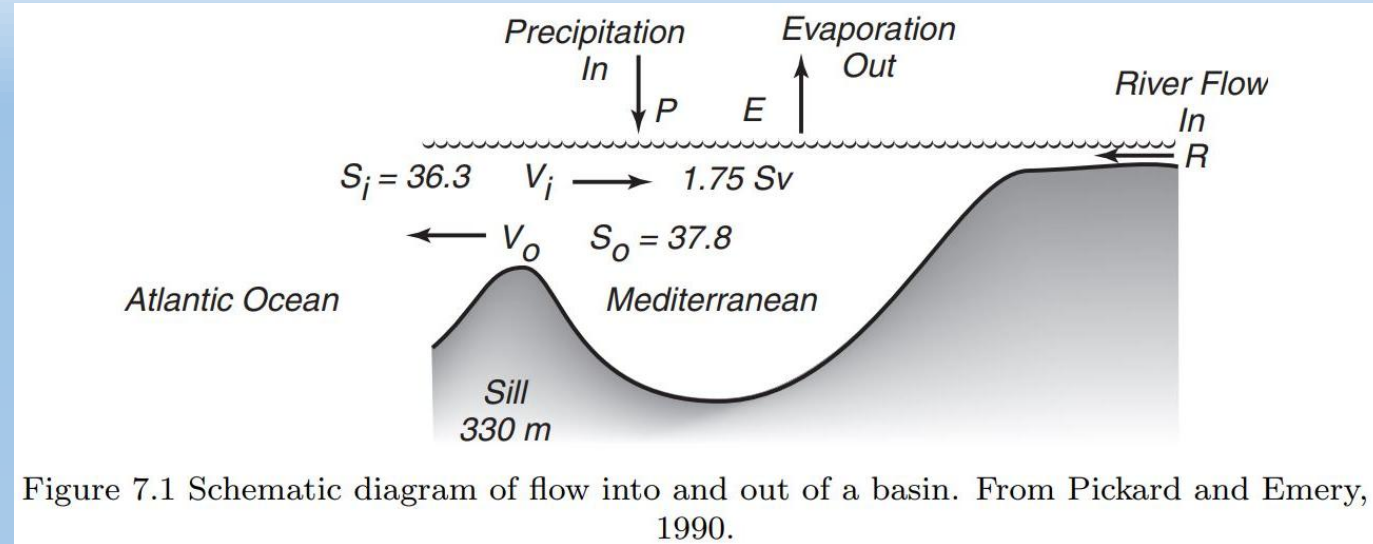
$$V_o - V_i = (R + P) - E$$

$$V_o - V_i = 1.68 \times 10^6 - 1.75 \times 10^6 = -7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$E > (R + P)$$



Il Mediterraneo è un **Bacino di Condensazione**, dove le Evaporazioni eccedono l'input di acqua dolce (Precipitazioni e Runoff)



$$\text{Sv} = \text{Sverdrup} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Unità di misura del trasporto usata in oceanografia

- Il **Residence Time** delle acque nel Mediterraneo (tempo medio richiesto per ricambiare tutte le acque del Mediterraneo) è dato dal volume totale fratto il volume dell'acqua entrante;
- Il residence time per il Mediterraneo è di  $\sim 70$  anni.

# Conservazione del calore

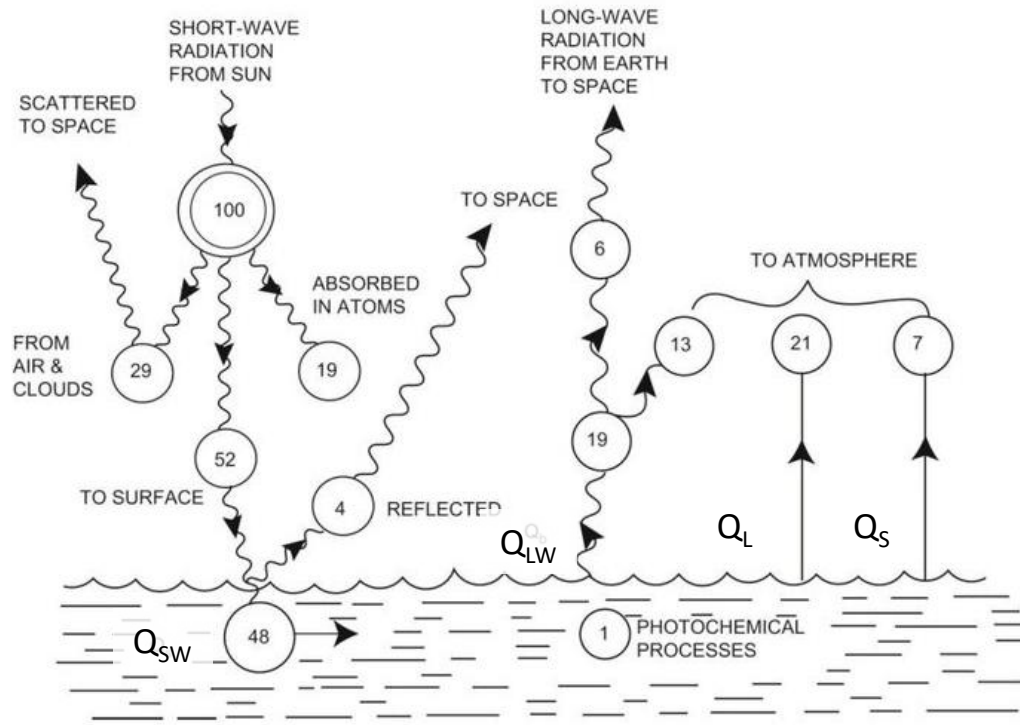


Fig. 5.5. Distribution of 100 units of incoming short-wave radiation from the sun to the earth's atmosphere and surface long-term world averages

- ✓ Circa la metà della luce solare che raggiunge la Terra viene assorbita dagli oceani, dove viene temporaneamente immagazzinata vicino alla superficie;
- ✓ Del calore immagazzinato dagli oceani, una parte viene rilasciata nell'atmosfera, soprattutto attraverso l'evaporazione e la radiazione infrarossa. Il resto viene trasportato dalle correnti in altre aree;
- ✓ A livello globale, la somma di tutti i flussi di calore in entrata e in uscita dall'oceano (**Heat budget**) dovrebbe essere pari a zero, altrimenti gli oceani nel loro complesso si riscalderebbero o si raffredderebbero.

## Equazione di conservazione del calore

$$Q_T = Q_{SW} + Q_{LW} + Q_S + Q_L + Q_V$$

$Q_T$  rappresenta il guadagno o perdita di calore netto da/verso l'atmosfera – **Flusso di calore ( $W \cdot m^2$ )**

$Q_{SW}$  Insolazione; flusso netto della radiazione solare nell'oceano

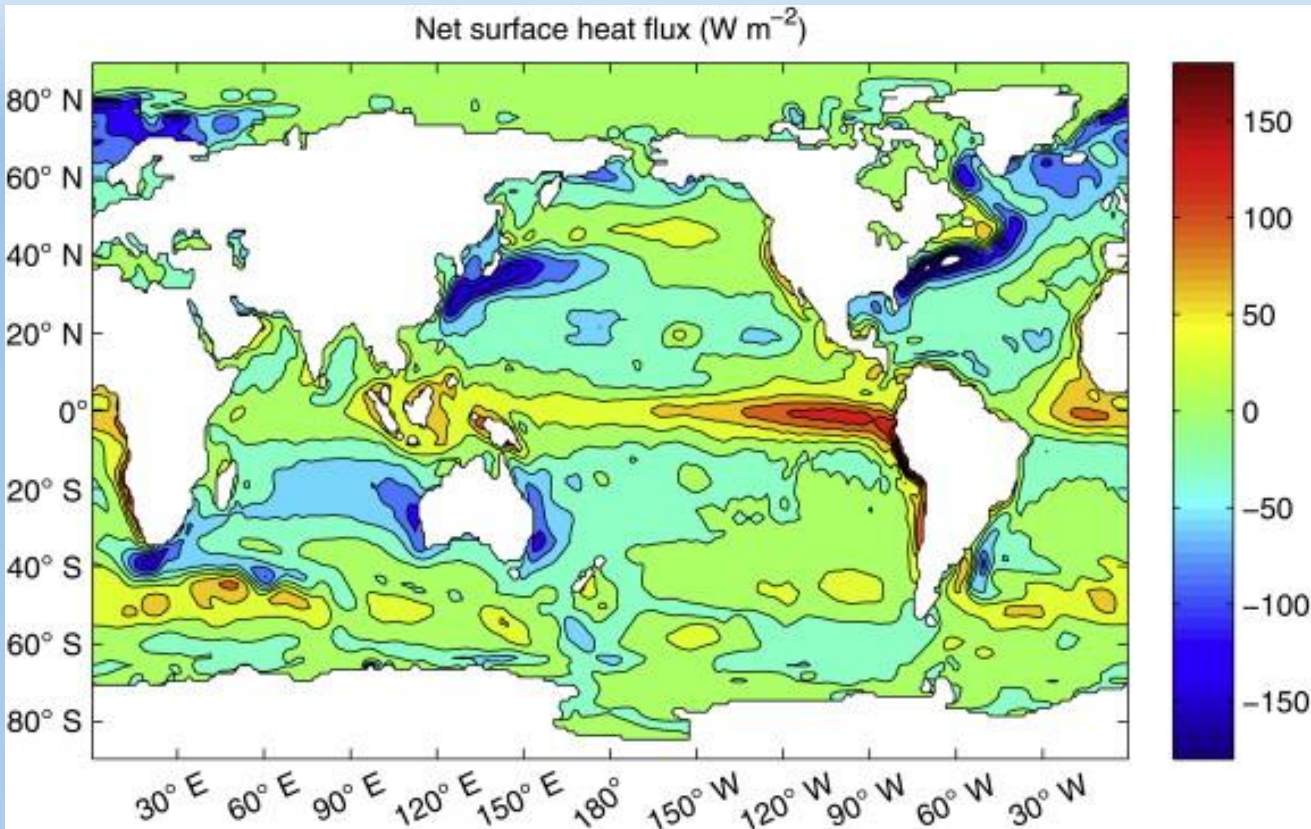
$Q_{LW}$  Radiazione infrarossa netta; radiazione emessa dall'oceano

$Q_S$  Flusso di calore sensibile; flusso di calore in uscita/entrata dall'oceano dovuto alla conduzione;

$Q_L$  Flusso di calore latente; flusso di calore in uscita/entrata dall'oceano dovuto all'evaporazione/condensazione;

$Q_V$  Avvezione; calore trasportato dalle correnti

# Flusso di calore



- Il flusso di calore superficiale è una delle principali forzanti della circolazione termoalina;
- C'è un guadagno di calore da parte dell'oceano lungo la fascia equatoriale;
- Le forti correnti lungo i margini occidentali degli oceani (es. Corrente del Golfo) sono i principali siti di perdita di calore verso l'atmosfera;
- Le aree polari restano in equilibrio (con valori intorno allo zero).

