



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

OCEANOGRAFIA

Anno Accademico 2019–2020

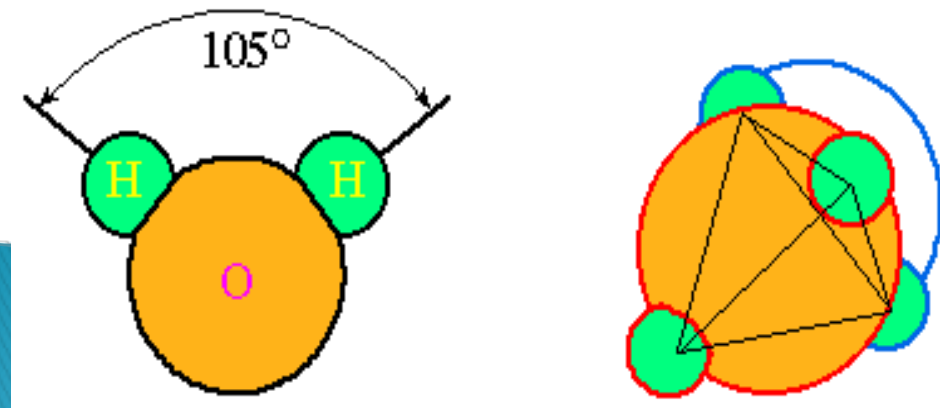
Docente: Renzo Masetti

rmasetti@inogs.it

Proprietà fisiche dell'acqua di mare

L'acqua di mare è una miscela composta per il 96.5% da acqua pura e per il 3.5% da altre sostanze, tra cui sali, gas disciolti, sostanze organiche e particelle non solubili. Le sue proprietà fisiche, che saranno descritte per prime, sono determinate principalmente dalla percentuale di acqua pura.

L'acqua pura presenta molte proprietà insolite, se confrontata con fluidi di analoga composizione. Questo è dovuto alla particolare struttura delle molecole di H₂O. Gli atomi di idrogeno hanno carica elettrica positiva, l'atomo di ossigeno ha due cariche con valenza negativa, ma la disposizione della molecola d'acqua è tale che le sue cariche non sono neutralizzate (si osservi la [Figura](#) le cariche sarebbero neutralizzate se l'angolo raffigurato fosse di 180° invece che di 105°).



Le conseguenze principali della struttura molecolare dell'acqua pura sono:

- **L'acqua ha un insolito potere dissociativo, essendo capace di separare i materiali disciolti in ioni carichi elettricamente. Di conseguenza, il materiale disciolto aumenta notevolmente la conducibilità elettrica dell'acqua. La conducibilità dell'acqua pura è relativamente bassa, ma quella dell'acqua di mare è a metà tra quella dell'acqua pura e quella del rame. La resistenza di cui è dotata l'acqua di mare con un contenuto di sali del 3.5% a 20°C sulla distanza di 13 km è circa uguale a quella dell'acqua pura sulla distanza di 1 mm.**
- **L'angolo di circa 105° è prossimo all'ampiezza degli angoli di un tetraedro, cioè una struttura che ha quattro rami che si sviluppano dal centro con angoli uguali tra loro (109° 28'). Come risultato gli atomi di ossigeno nell'acqua tendono ad avere quattro atomi di idrogeno attaccati con una disposizione di forma tetragonale. Questo è chiamato "Legame idrogeno", diverso dal legame ionico e covalente. Il legame idrogeno necessita di una energia 10-100 volte inferiore a quella che lega le molecole, e questo rende l'acqua estremamente incline a reazioni appena cambiano le condizioni chimiche.**
- **I tetraedri hanno una struttura più dispersa rispetto all'impacchettamento molecolare più denso. Essi formano un aggregato di una, due, quattro o otto molecole. Ad alte temperature prevalgono gli aggregati con una o due molecole. A temperature minori si ha una prevalenza di aggregati più grandi. Questi occupano meno spazio dello stesso numero di molecole organizzate in aggregati più piccoli. Di conseguenza, la densità dell'acqua mostra un valore massimo a 4°C.**

- Quando l'acqua congela tutte le sue molecole formano tetraedri. Questo provoca una espansione volumetrica e una conseguente diminuzione della densità. Dunque, l'acqua allo stato solido è più leggera dell'acqua allo stato liquido, ed è una proprietà alquanto rara per una sostanza. Alcune importanti conseguenze di questo fenomeno sono:
 - Il ghiaccio galleggia. Ciò è importante per la vita nei laghi, perché il ghiaccio agisce da isolante impedendo la perdita di calore e quindi il congelamento dell'acqua dalla superficie fino al fondo.
 - Quando si raggiunge il punto di congelamento, la densità dell'acqua mostra una diminuzione repentina. La successiva espansione durante il congelamento è la maggiore causa di degradazione delle rocce.
 - Il punto di congelamento diminuisce all'aumentare della pressione. Di conseguenza, l'acqua si scongela alla base dei ghiacciai, favorendone lo scorrimento.
 - A determinate pressioni i legami idrogeno spariscono dando al ghiaccio un comportamento plastico. Di conseguenza, il ghiaccio presente sulla terra ferma nelle regioni dell'Artico e dell'Antartico scorre esponendo gli iceberg alle correnti esterne. Senza questo processo tutta l'acqua presente nelle regioni polari si troverebbe allo stato solido.

Pressione e Profondità

Hydrostatic Pressure:

Hydrostatic: Meaning water at rest. However, in many situations, even when water is not at rest, the effect of motion on the pressure can be neglected (this is called the hydrostatic approximation).

Pressure is a force per unit area. So in SI units that is N/m^2 or Pascals.

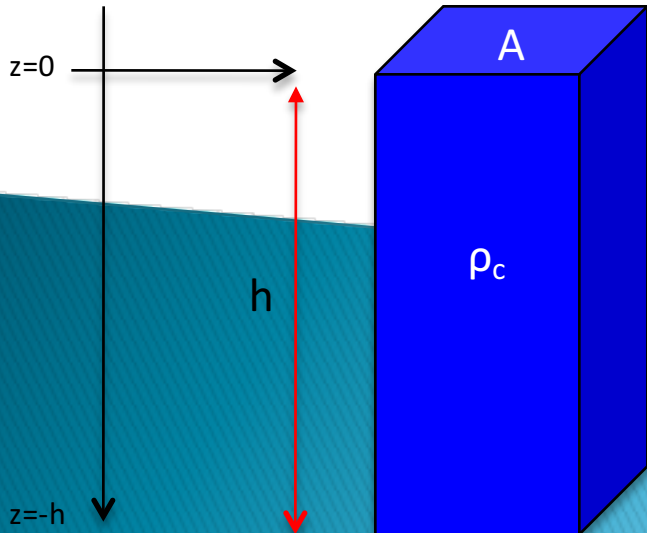
Other common units include:

pounds per square inch (psi); bars or millibars; or atmospheres.

Standard atmospheric pressure at sea level:

1 atmosphere = 1.013 bars = 1013 mbars = 101.3 kPa = 15psi.

Consider a column of water with uniform density (ρ_c):



$F = ma$ $F = \rho_c h A g$

Remember pressure (P) is a force per unit area, so:

$P = \rho_c g h$

So at any height z : $P(z) = -\rho_c g z$

Hydrostatic Pressure (cont.):

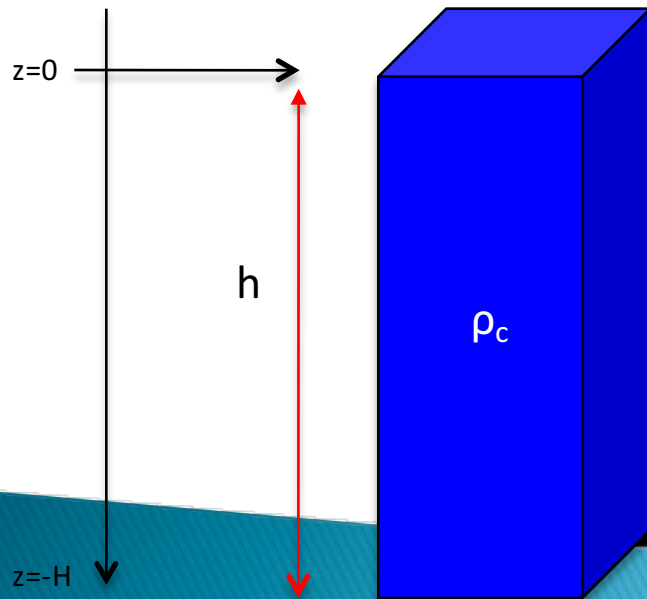
The pressure at any given depth is determined by the weight of the overlying water. This is impacted by the water's density.

Consider the following 3 cases:

1) constant density:

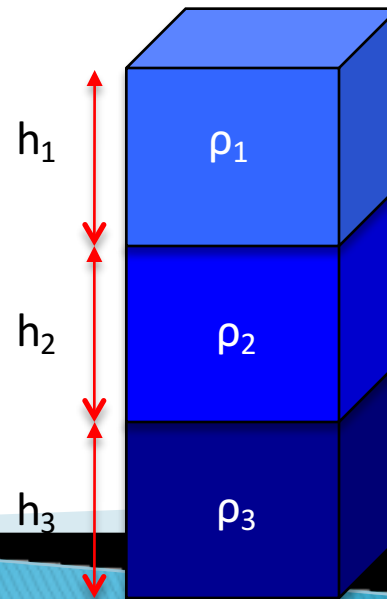
2) 3 different densities

3) continually varying density

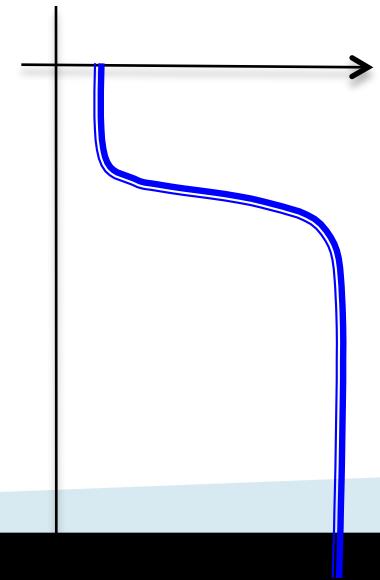


Pressure at $z = -H$

$$P = \rho_c g h$$



$$P = \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 + \rho_3 g h_3$$



$$P = - \int_0^{-H} \rho(z) g dz$$

Il concetto di salinità

L'acqua del mare contiene il 3.5% di sali, gas, sostanze organiche e particolato indissoluto. La presenza di questi elementi non determina, ma condiziona la maggior parte delle proprietà (densità, compressibilità, punto di congelamento, temperatura alla densità massima). Alcune proprietà (viscosità, assorbimento della luce) non sono particolarmente condizionate dalla salinità. La conduttività e la pressione osmotica sono due proprietà determinate dalla quantità di sale negli oceani.

In teoria, la salinità dovrebbe essere la somma delle concentrazioni di tutti i sali disciolti nell'acqua di mare (misurata in grammi di sale/chilogrammi d'acqua). Questo però è difficile da misurare nella pratica. Il fatto che i vari componenti contribuiscono alla salinità secondo un rapporto costante (indipendentemente dalla quantità di sale contenuta nel mare) aiuta a superare questa difficoltà. Infatti è possibile determinare il contenuto di sale attraverso la misura di una grandezza differente, e calcolare la totalità del materiale disciolto con una sola misura.

Quindi, la salinità dovrebbe essere determinata dalla misurazione del componente principale: il cloruro. Il contenuto di cloruro fu definito nel 1902 come la somma totale in grammi degli ioni di cloro contenuti in un chilo di acqua di mare quando tutti gli alogeni sono rimpiazzati da cloruri. Questa definizione deriva dal processo chimico chiamato Titolazione, usato per la determinazione del contenuto di cloruri, ed è ancora importante quando si studiano dati storici.

La salinità fu definita come la quantità totale in grammi di sostanze disciolte contenute in un chilogrammo di acqua di mare quando tutti i carbonati sono convertiti in ossidi, tutti i bromuri e gli ioduri in cloruri, e tutte le sostanze organiche ossidate. La relazione tra la salinità e la concentrazione di cloruri è stata determinata attraverso una serie di misure di laboratorio eseguite su campioni dell'acqua di mare provenienti da tutti gli oceani del mondo ed è stata data dalla seguente formula:

$$S \text{ (o/oo)} = 0.03 + 1.805 \text{ Cl (o/oo)} \quad (\text{Knudsen, 1902})$$

Il simbolo o/oo sta per "parti per migliaia" o "per mille"; un contenuto di sale pari a 3.5% è equivalente a 35 o/oo, o 35 grammi di sale per chilogrammo di acqua di mare.

Il fatto che l'equazione del 1902 dia una salinità di 0.03 o/oo per valori di clorinità pari a zero ha causato perplessità. Sta ad indicare un problema nei campioni di acqua usati per le misure di laboratorio. La United Nations Scientific, Education and Cultural Organization (UNESCO) decise di ripetere la determinazione di base della relazione tra la clorinità e la salinità introducendo una nuova definizione, nota come salinità assoluta:

$$S \text{ (o/oo)} = 1.80655 \text{ Cl (o/oo)} \quad (1969)$$

Le definizioni del 1902 e del 1969 danno risultati identici per un valore di salinità del 35‰ e non divergono significativamente per la maggior parte delle applicazioni. La definizione di salinità fu rivista di nuovo quando fu sviluppata una tecnica per poterla determinare dalle misure di conduttività, temperatura e pressione. Dal 1978, la "Scala Pratica della Salinità" la definisce in termini di rapporto della conduttività:

La salinità pratica (S) di un campione di acqua di mare, **è definita in termini del rapporto K** della conduttività elettrica del campione di acqua di mare a 15°C sottoposto alla pressione di una atmosfera, rispetto a quella di una soluzione di cloruro di potassio (KCl) nella quale la frazione della massa di KCl è 0.0324356, alle stesse condizioni di temperatura e pressione. Il valore K esattamente pari a 1 corrisponde, per definizione, ad una salinità pratica pari a 35. La relativa equazione è:

$$S = 0.0080 - 0.1692 K^{1/2} + 25.3853 K + 14.0941 K^{3/2} - 7.0261 K^2 + 2.7081 K^{5/2}$$

Notare che in questa definizione, la salinità è un coefficiente e pertanto il simbolo o/oo non è usato ed al vecchio valore di 35o/oo corrisponde il numero 35. Alcuni oceanografi non sono abituati ad usare numeri senza unità di misura per definire la salinità e quindi scrivono 35 psu che significa "practical salinity unit". Ma siccome è un coefficiente, la **salinità pratica è adimensionale**, quindi l'utilizzo dell'unità psu è insensato e pertanto fortemente sconsigliato. Tra la vecchia e la nuova definizione di salinità esistono dunque piccole differenze, ma ai fini pratici sono trascurabili.

La conducibilità elettrica

La conducibilità dell'acqua di mare dipende dal numero di ioni disciolti per unità di volume (cioè dalla salinità) e dalla mobilità degli stessi (cioè dalla temperatura e dalla pressione). La sua unità di misura è mS/cm (milli-Siemens per centimetro). La conducibilità cresce della stessa quantità con un aumento di salinità di 0.01, un aumento di temperatura di 0.01°C o un aumento di profondità (quindi di pressione) di 20 m.

Densità

La densità è uno dei parametri più importanti nello studio della dinamica degli Oceani. Piccole differenze di densità in direzione orizzontale (causate per esempio da piccole differenze nel riscaldamento di superficie) possono produrre correnti molto forti. La determinazione della densità è stato uno dei compiti più importanti dell'oceanografia. Il simbolo greco per la densità è la lettera ρ (rho).

La densità del mare dipende dalla temperatura T , dalla salinità S e dalla pressione p . Questa dipendenza è conosciuta come Equazione di stato dell'acqua di mare.

L'equazione di stato di un gas ideale è data da:

$$p = \rho R T$$

dove R è la costante universale dei gas. L'acqua di mare non è un gas ideale, ma rispetto a piccole variazioni di temperatura vi si avvicina molto. L'equazione per gli interi intervalli di temperatura, salinità e pressione che si hanno negli oceani

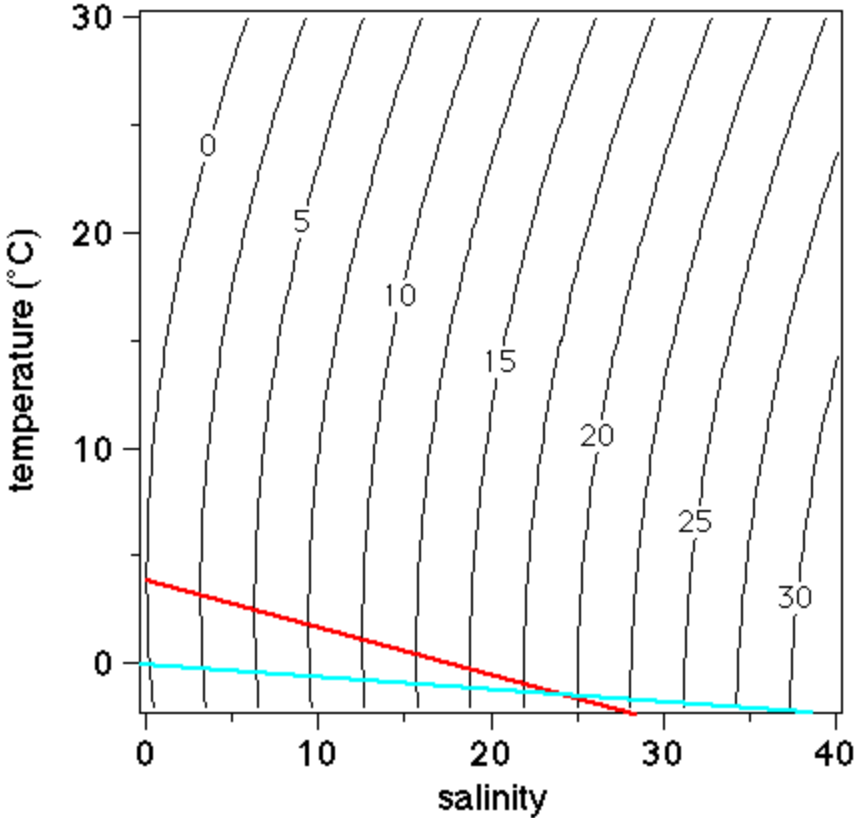
$$\rho = \rho(T, S, p)$$

(dove S è la salinità) è il risultato di molte accurate determinazioni di laboratorio. Le prime determinazioni fondamentali per stabilire l'equazione furono fatte nel 1902 da Knudsen e Ekman. La loro equazione determinò ρ in g/cm³. Nuove determinazioni fondamentali, basate su dati in un intervallo di pressione e salinità più ampio, portarono a una nuova equazione, conosciuta come "Equazione internazionale di Stato (1980)". Questa equazione utilizza la temperatura in °C, la salinità pratica standard, la pressione in dbar (1 dbar = 10.000 pascal = 10.000 N m⁻²) ed esprime la densità in kg/m³. Dunque, ad una densità di 1.025 g/cm³ nella vecchia formula, corrisponde una densità di 1025 kg/m³ nella Equazione internazionale di stato.

La densità aumenta al crescere della salinità e al diminuire della temperatura, tranne che per temperature al di sotto di quella corrispondente al valore massimo di densità.

La densità degli oceani è prossima ai 1025 kg/m³ (quella dell'acqua dolce è prossima a 1000 kg/m³). Gli oceanografi solitamente usano per la densità il simbolo σ_t (la lettera greca sigma con il pedice t), che si pronuncia "sigma-t". Questa grandezza si definisce come $\sigma_t = \rho - 1000$ e solitamente non ha unità di misura (dovrebbe avere le stesse unità di ρ). Una densità di acqua di mare tipica è $\sigma_t = 25$.

Un'utile regola pratica è che σ_t cambia della stessa quantità quando T varia di 1°C, S di 0.1 e p della quantità equivalente a un cambio di 50 m di profondità.



La linea rossa rappresenta la temperatura corrispondente al massimo di densità e quella celeste il punto di congelamento.

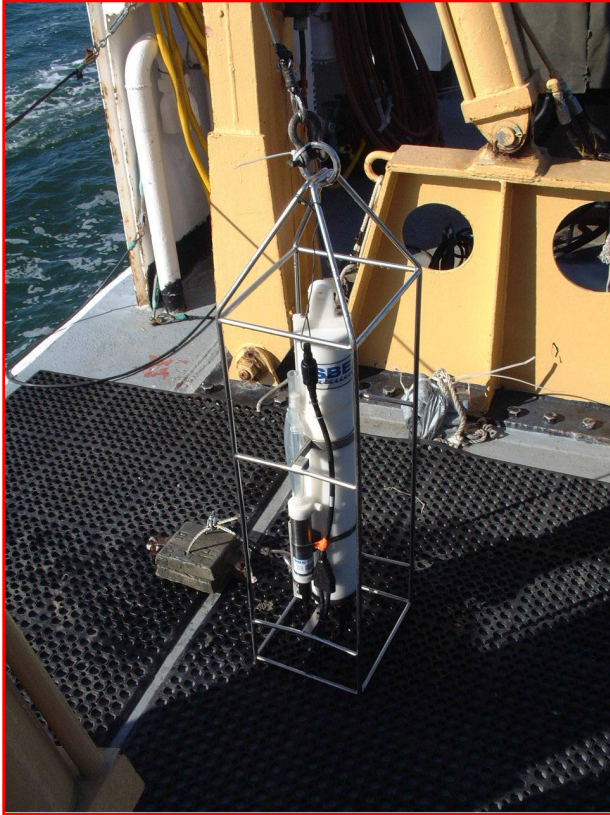


Temperatura e Temperatura Potenziale

- ▶ 6.bis.POTENTIAL

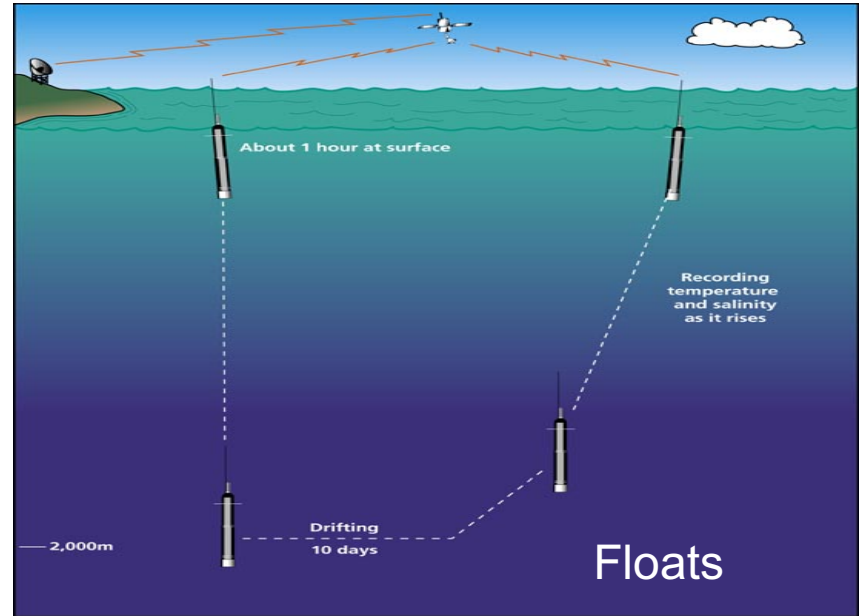
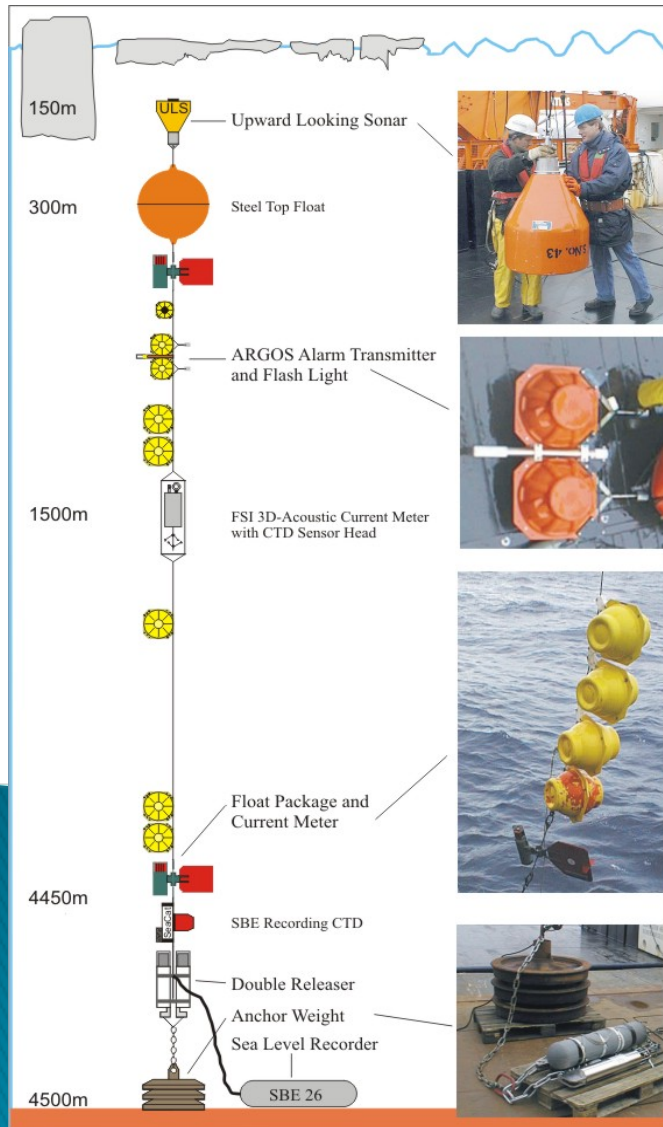
Oceanographic Tools

A CTD — an acronym for Conductivity, Temperature, and Depth — is the primary tool for determining essential physical properties of sea water. It gives scientists a precise and comprehensive charting of the distribution and variation of water temperature, salinity, and density.

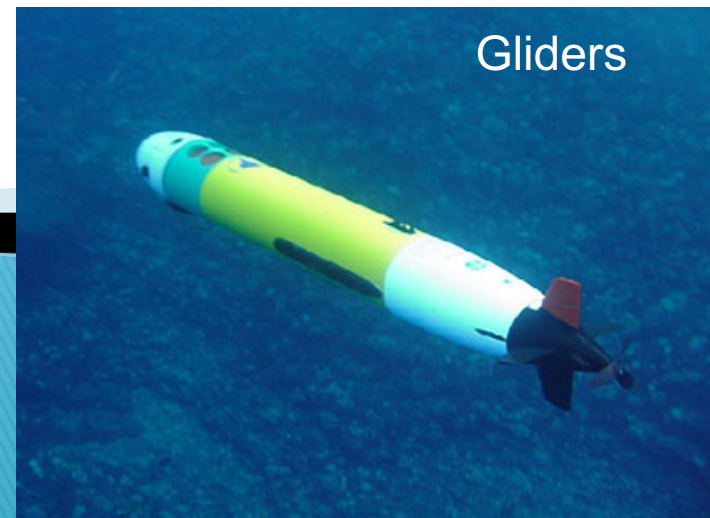


Platforms for CTDs

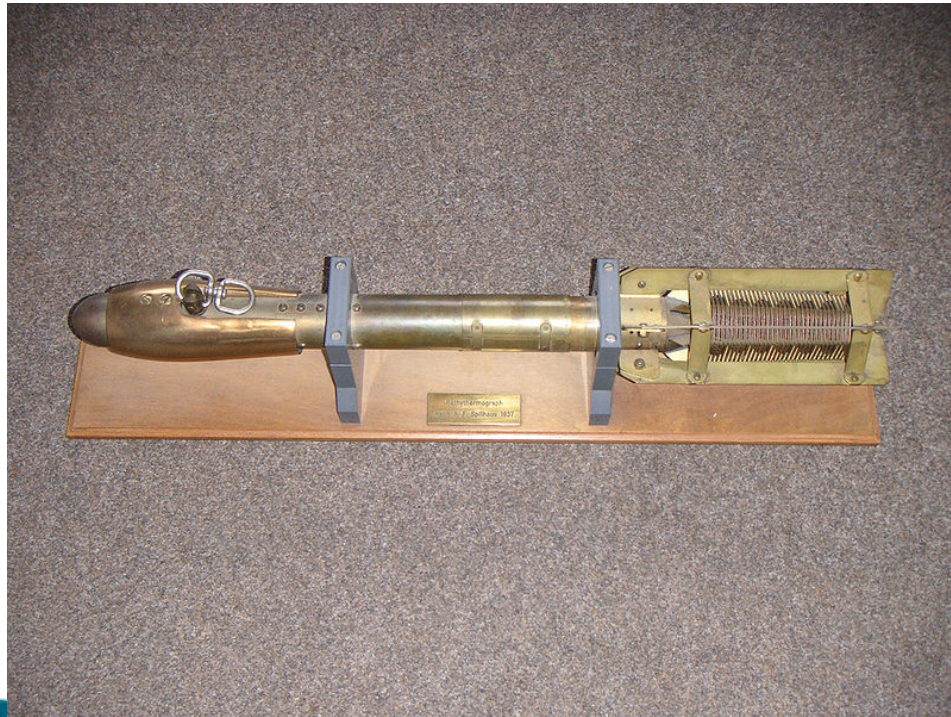
Moorings



Gliders



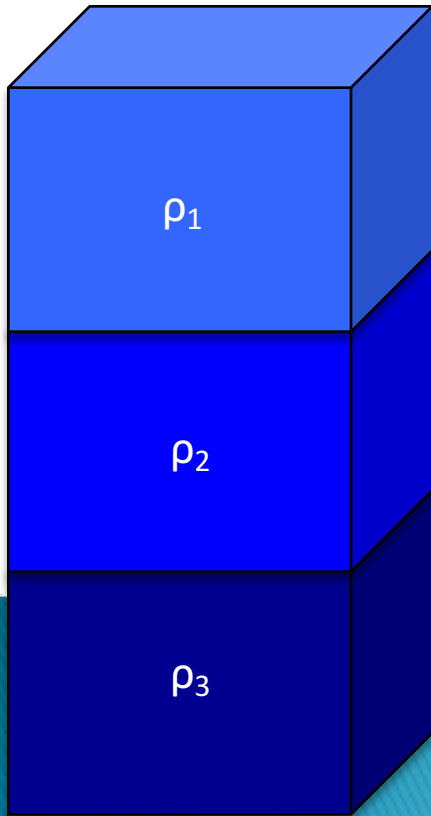
Expendable Bathythermograph (XBT)



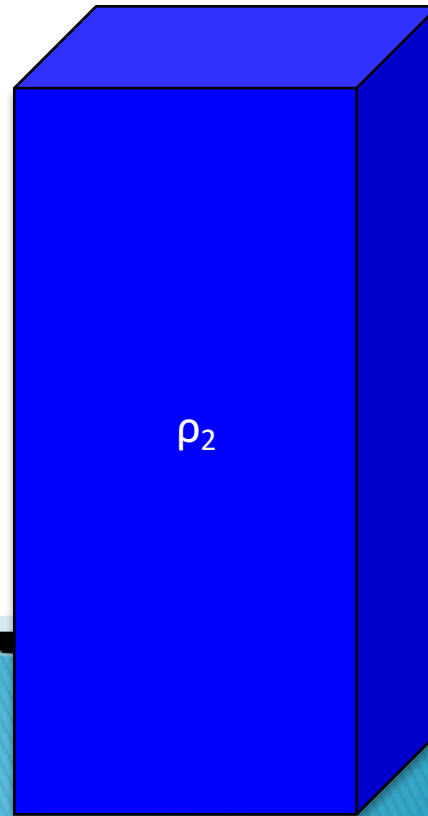
Static Stability

The static stability of the water column is controlled by the vertical distribution of density.

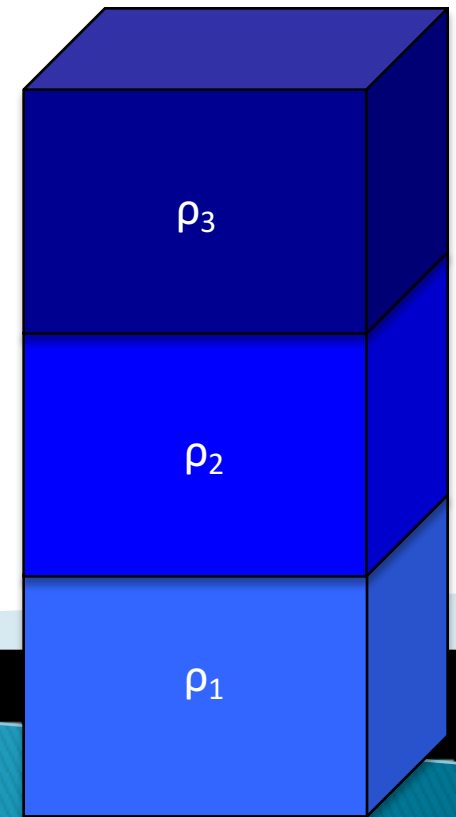
Stable: density resists vertical motion



Neutral: density has no influence on vertical motion



Unstable: density distribution causes vertical motion



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

Stability (S)

Moving a parcel of water out of its equilibrium position requires work. Static stability might be considered as the “unwillingness of water to be moved vertically”

The stronger the density gradient, and the further the excursion, the more work is required

Stability is defined in terms of the rate of change of density with depth and is a measure of the amount of work required to move a particle vertically in the water column

$$S = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

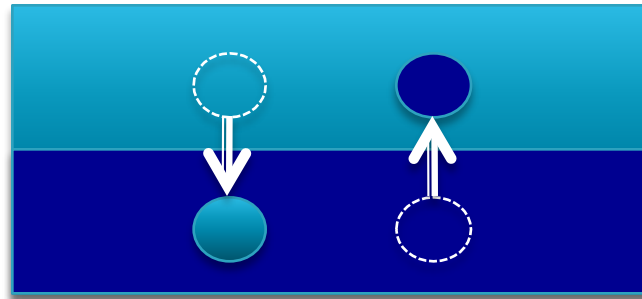
However, water parcel will expand a little less on the way up (and contract a little less on the way down) due to the compressibility of seawater, and the work done will cause the temperature to decrease as it moves upwards (or increase as it moves downwards)

$$S = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_\theta}{\partial z}$$

Brunt Vaisala Frequency (N)

Another way of expressing stability is with the Brunt-Väisälä frequency (sometimes called buoyancy frequency)

This is the oscillation of a water particle about its equilibrium depth.



$$N^2 = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$
$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}} = \text{s}^{-1}$$

Units of frequency

A particle of water forced upward will be heavier and buoyant forces will push it downward and a particle forced downward will be lighter and buoyant forces will push it upward.

Using σ_θ allows oceanographers to:

compare the Potential Density of water parcels in the ocean with the Potential Density of surface waters to look for locations where these deep water parcels may have originated at the sea surface

- one couldn't compare *in situ* densities of water parcels at different depths because the strong pressure dependence of in-situ density

b. determine the *stability* of a column of water, which is independent of pressure effects on temperature and density

c. determine the depth distribution of equal potential density “surfaces” or contours (called *isopycnals*), which often indicate the path of mixing in the ocean.

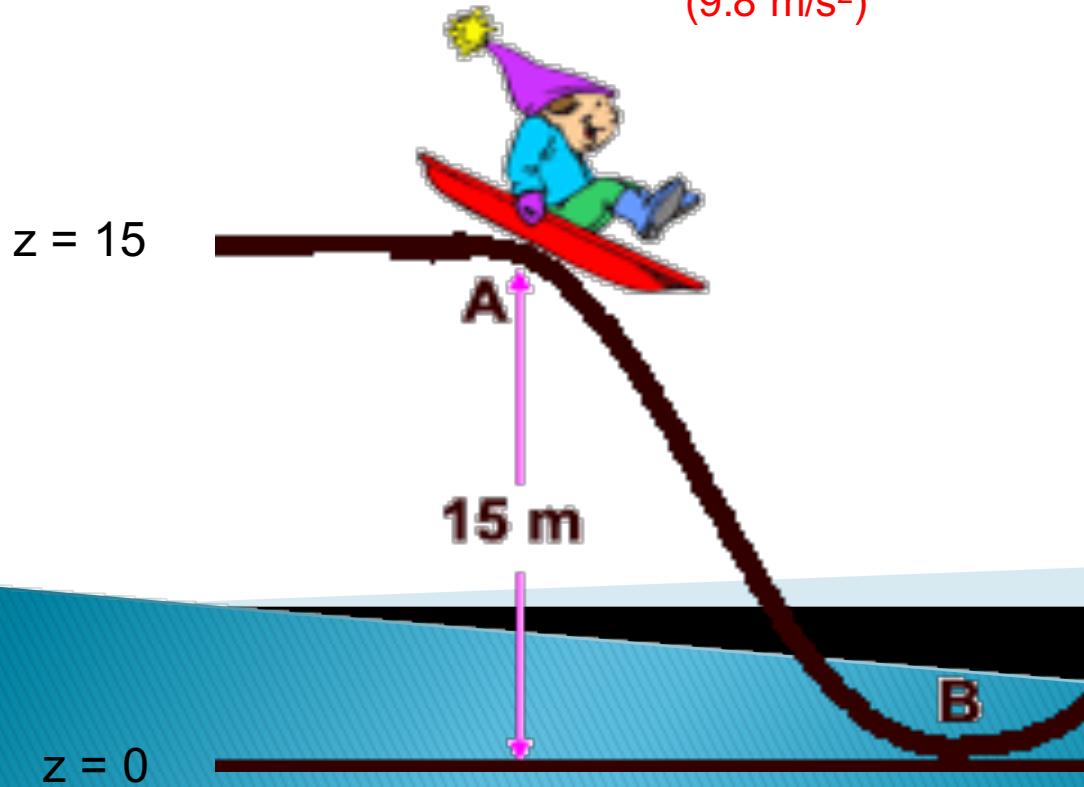
Potential Energy

$$PE = m g z$$

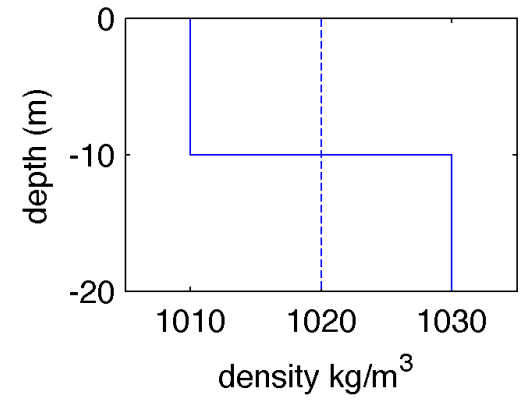
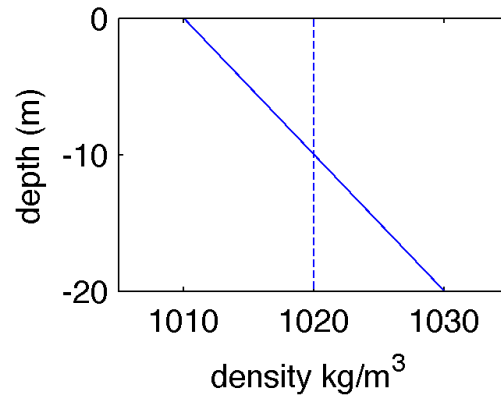
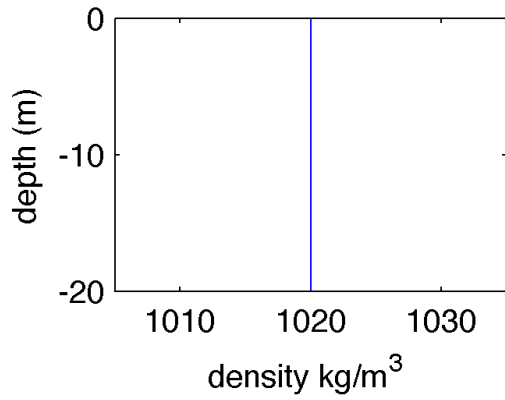
height

mass

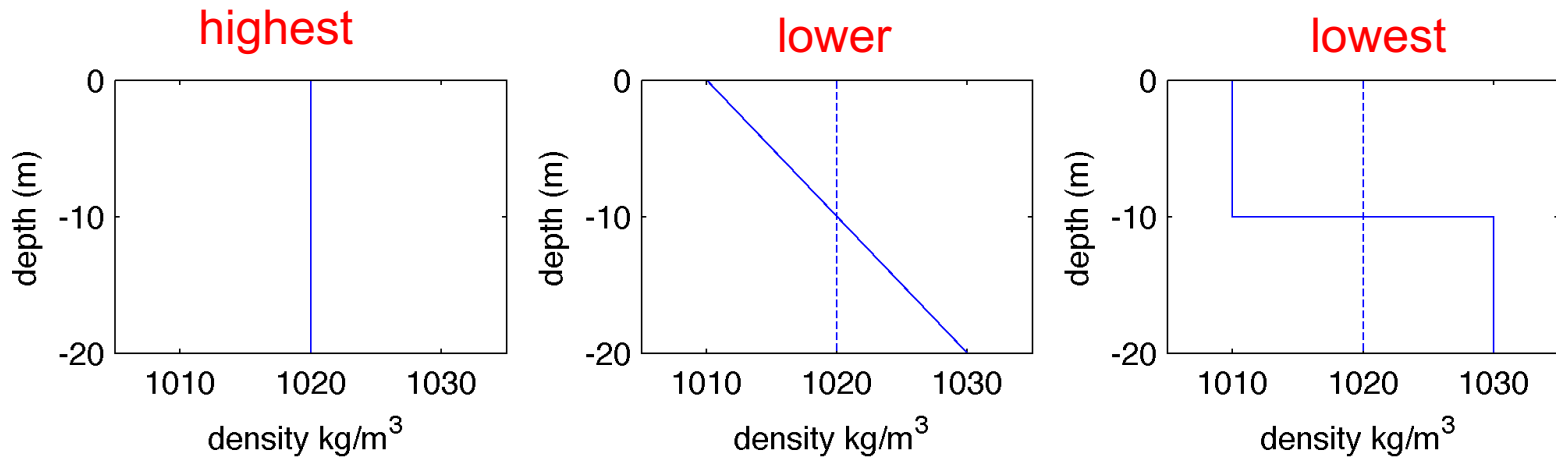
Gravity
(9.8 m/s²)



Which profile has the lowest potential energy?



Which profile has the lowest potential energy

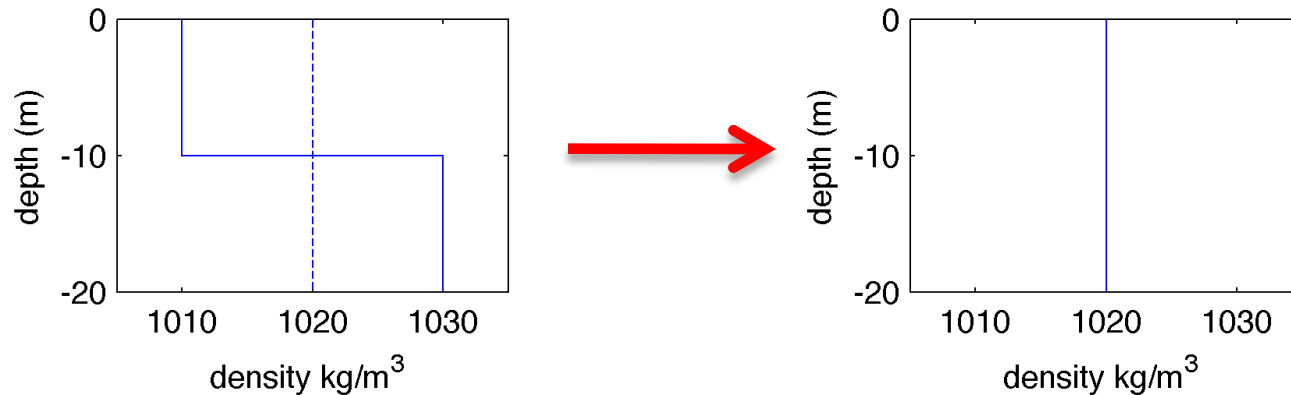


$$\frac{PE}{V} = \rho g z$$

- 1) Since density is simply the mass per volume, the potential energy per volume can be expressed in terms of density.
- 2) While all three profiles have the same average density, the profile on the left has the greatest potential energy and the profile on the right has the lowest potential energy.
- 3) This can be calculated by vertically integrating the equation or simply considering the vertical position of the center of mass.
- 4) The center of mass of the profile on the left is the highest and the center of mass of the profile on the right is the lowest.

Vertical Mixing:

Homogenizing the water column (increasing the potential energy) requires energy/work.

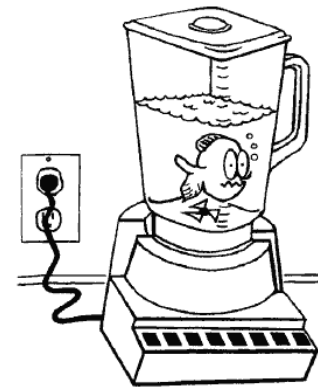
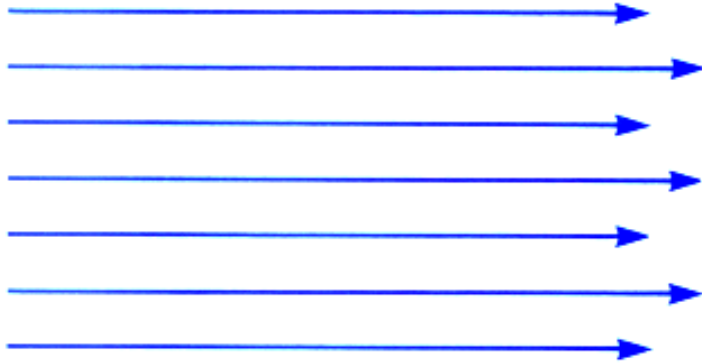


Just like lifting a heavy box, vertical mixing raises the center of mass of a stratified water column. The heavier the box or the greater the distance it is lifted, the more energy is required.

Mixing fluid across density surfaces (isopycnals) requires a lot of energy (100 million times more than isopycnal mixing).

Mixing fluid along lines of constant density (isopycnal mixing) requires little energy (100 million times less than diapycnal mixing).

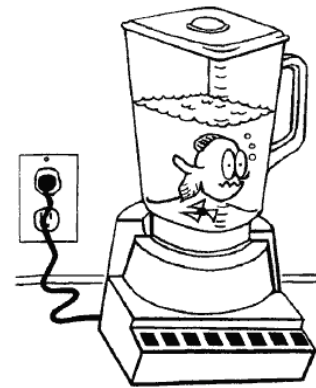
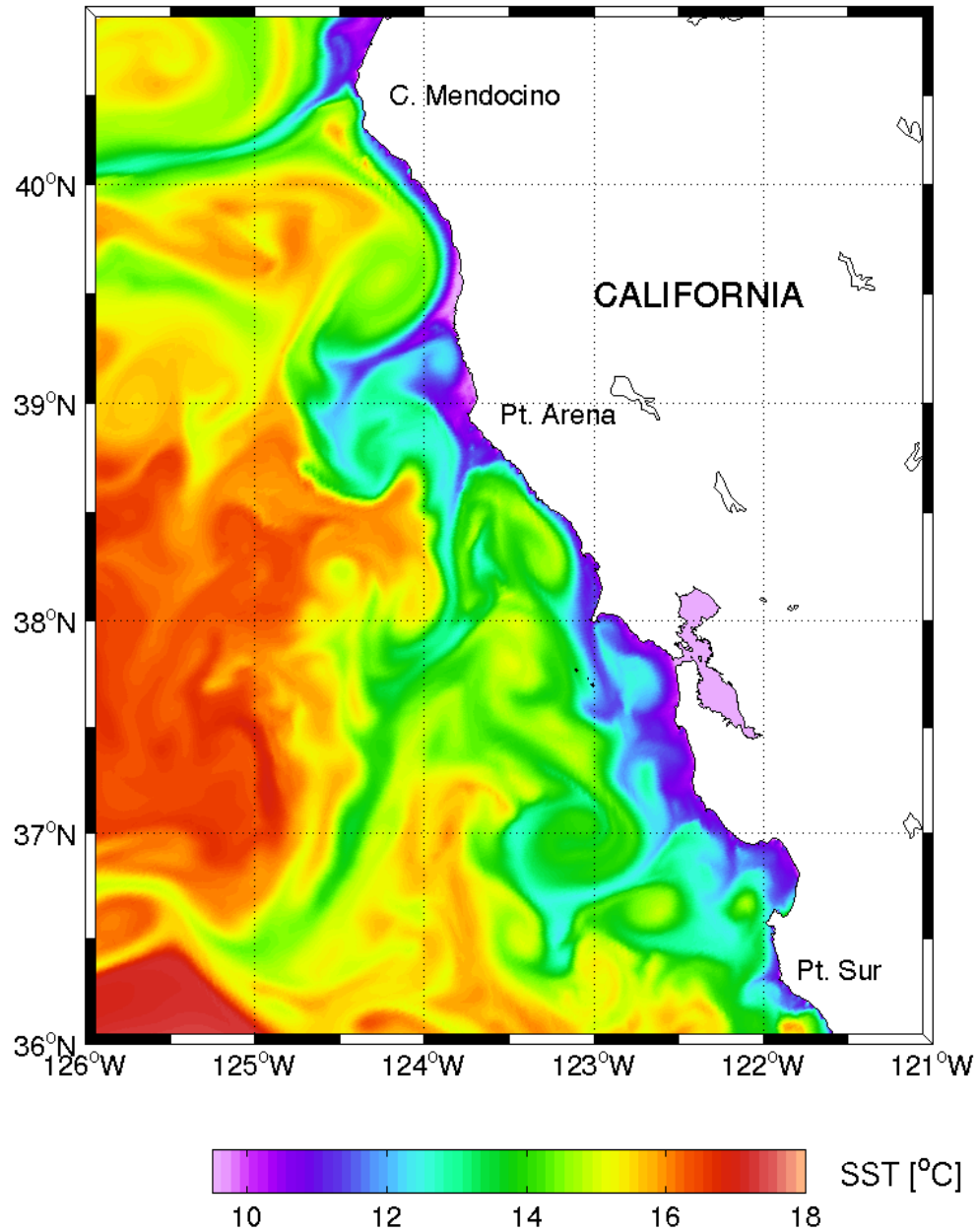
How to mix water masses in the ocean?



And you thought
there was stress
in your life !

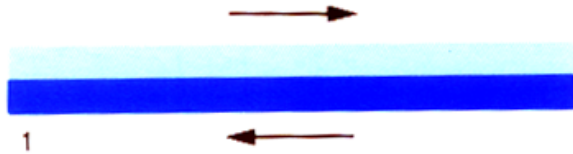
Molecular diffusion

Horizontal Stirring and Mixing



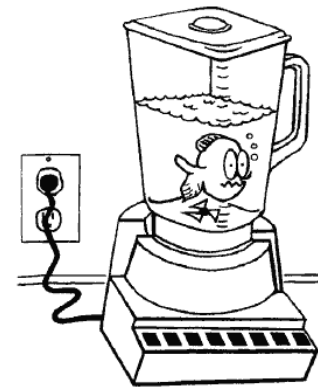
And you thought
there was stress
in your life !

Horizontal Stirring and Mixing

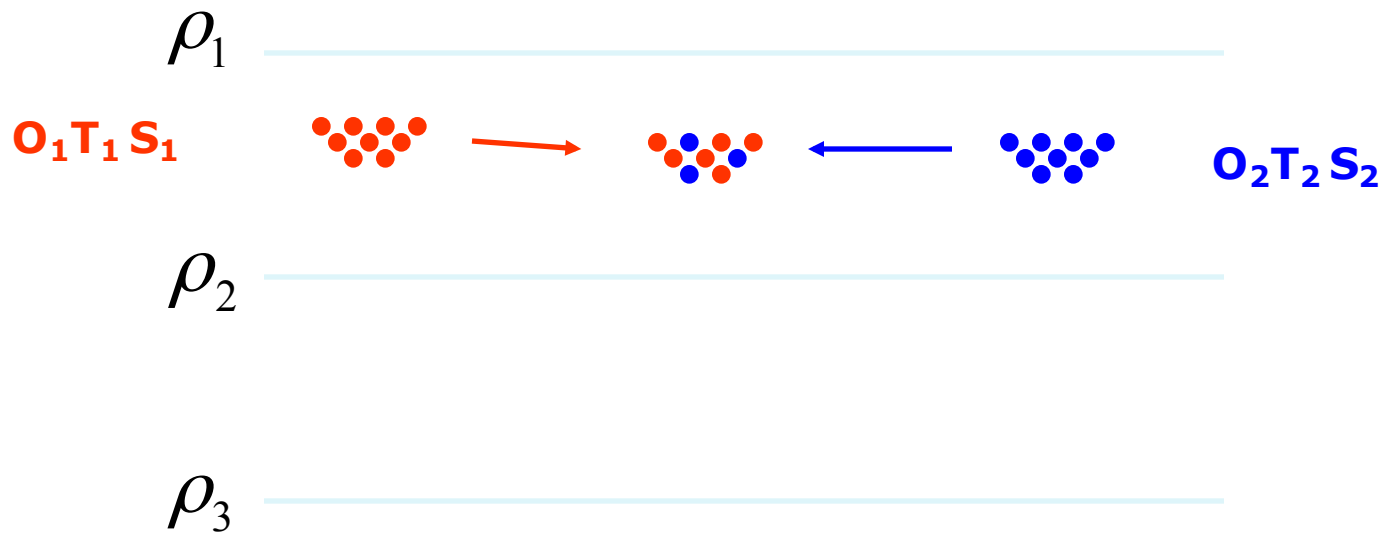


Vertical Stirring and Mixing

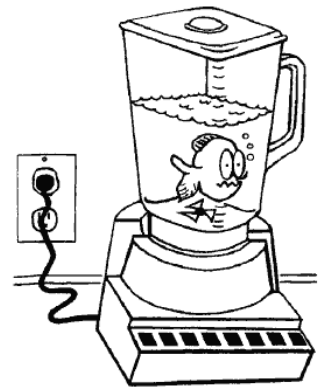
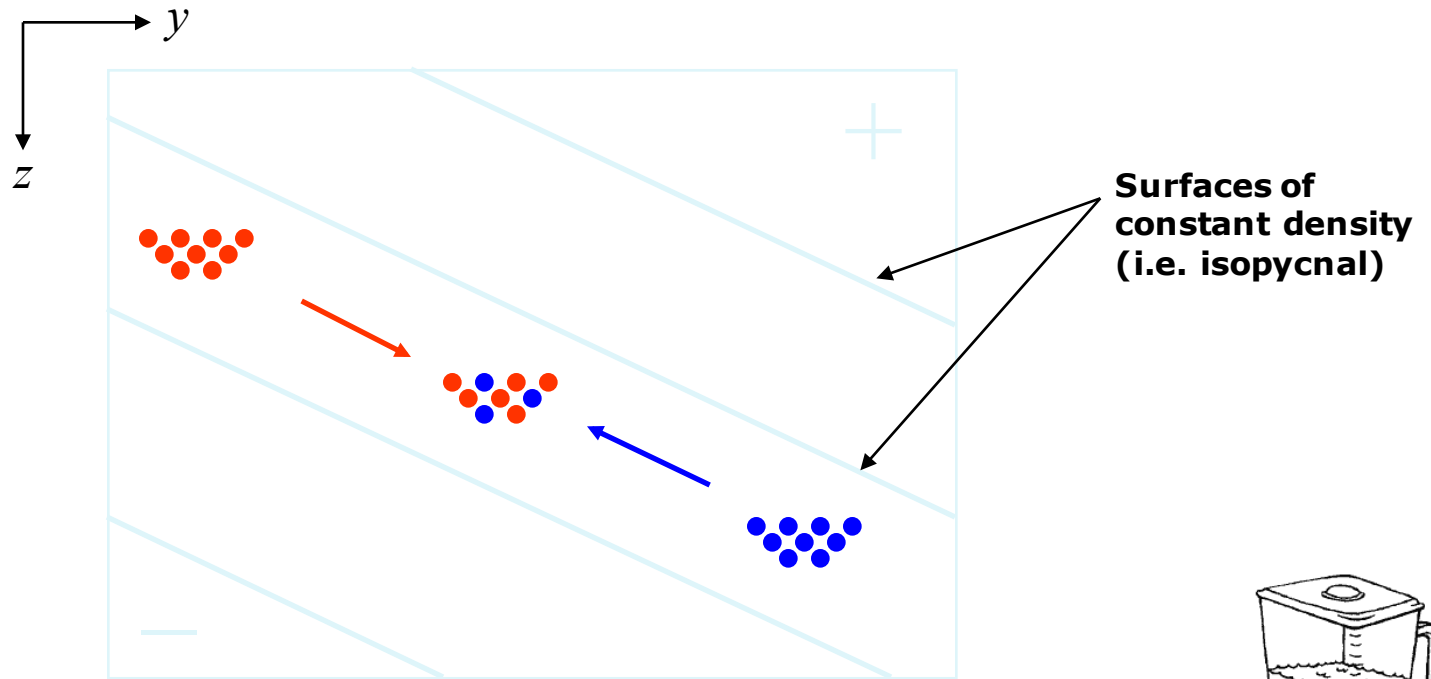
Mixing of two water masses with same Density



And you thought
there was stress
in your life !

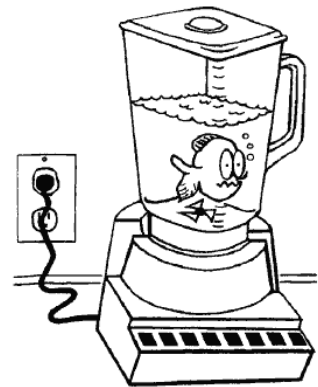
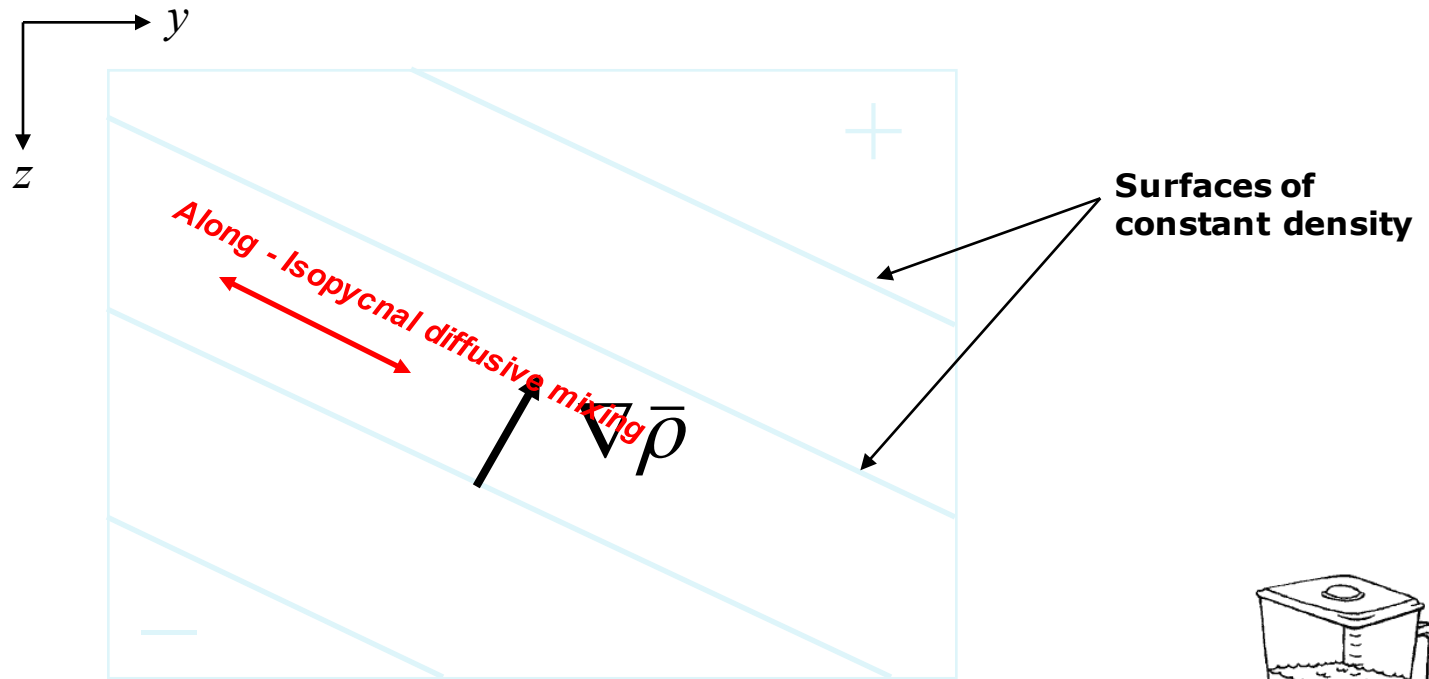


Mixing **along** surfaces of Constant Density



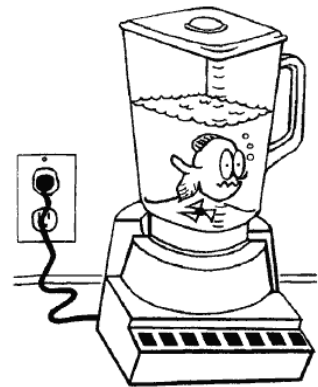
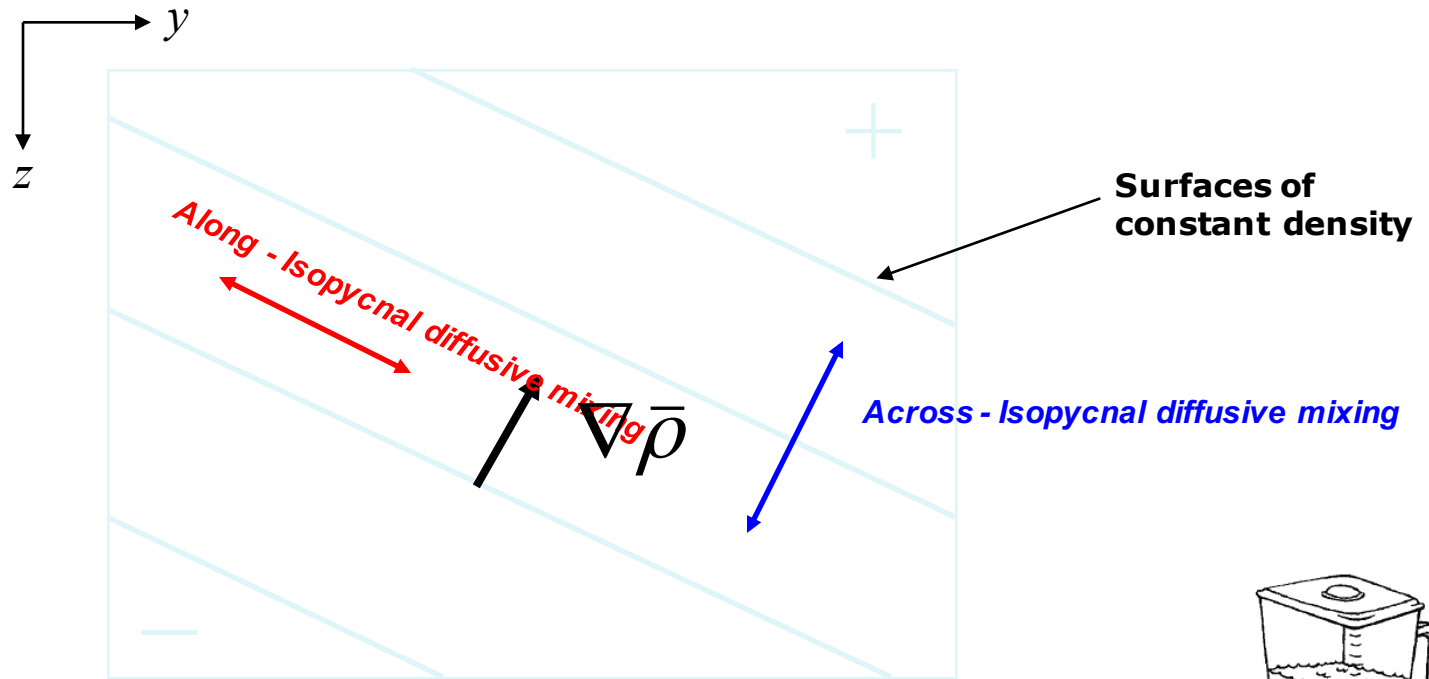
And you thought
there was stress
in your life !

Mixing **along** surfaces of Constant Density



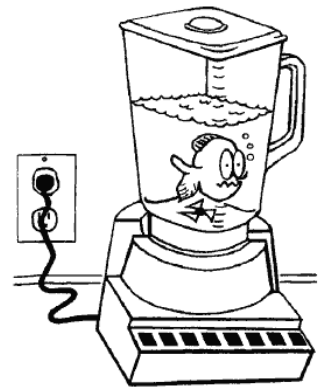
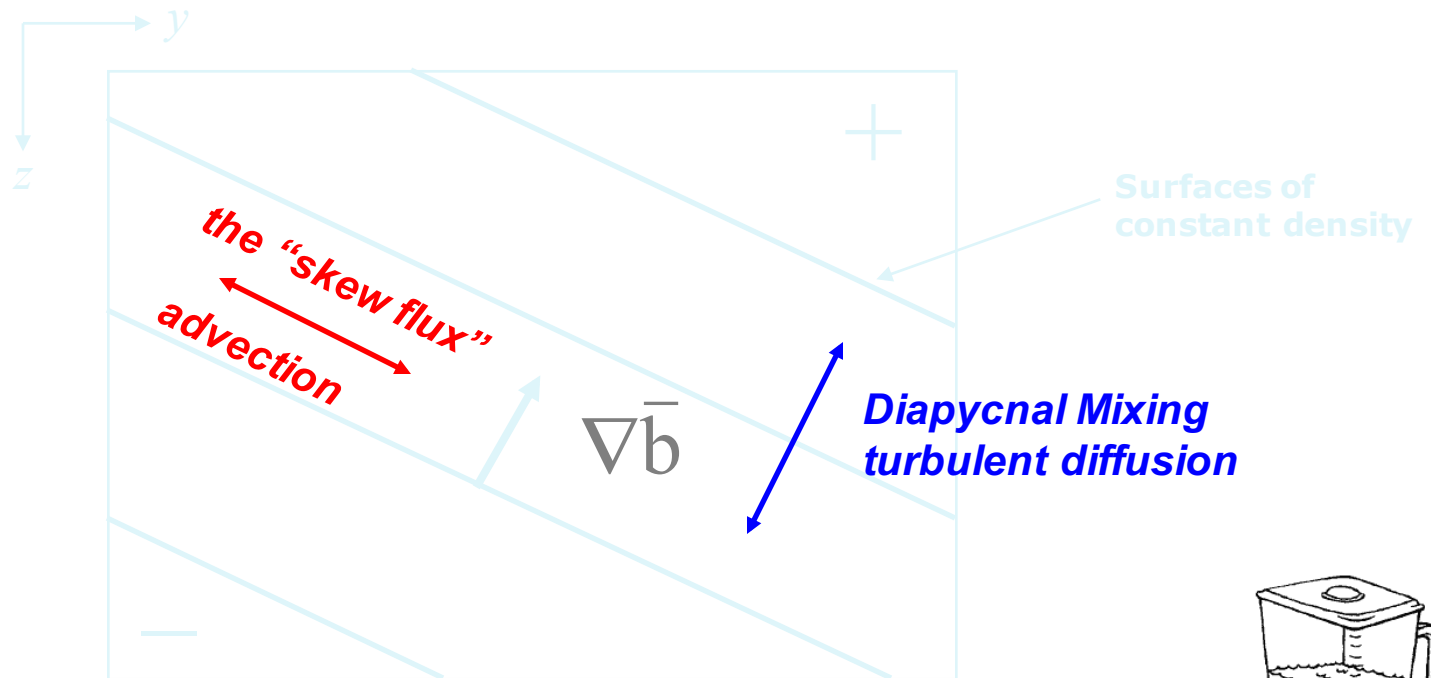
And you thought
there was stress
in your life !

Mixing **across** surfaces of Constant Density



And you thought
there was stress
in your life !

Definitions of Mixing



And you thought
there was stress
in your life !