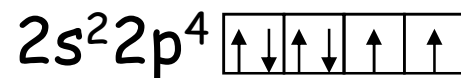
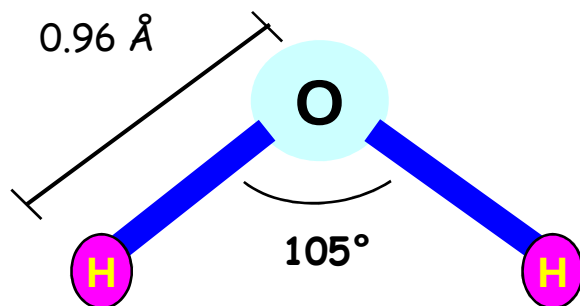
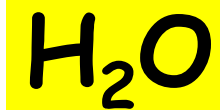
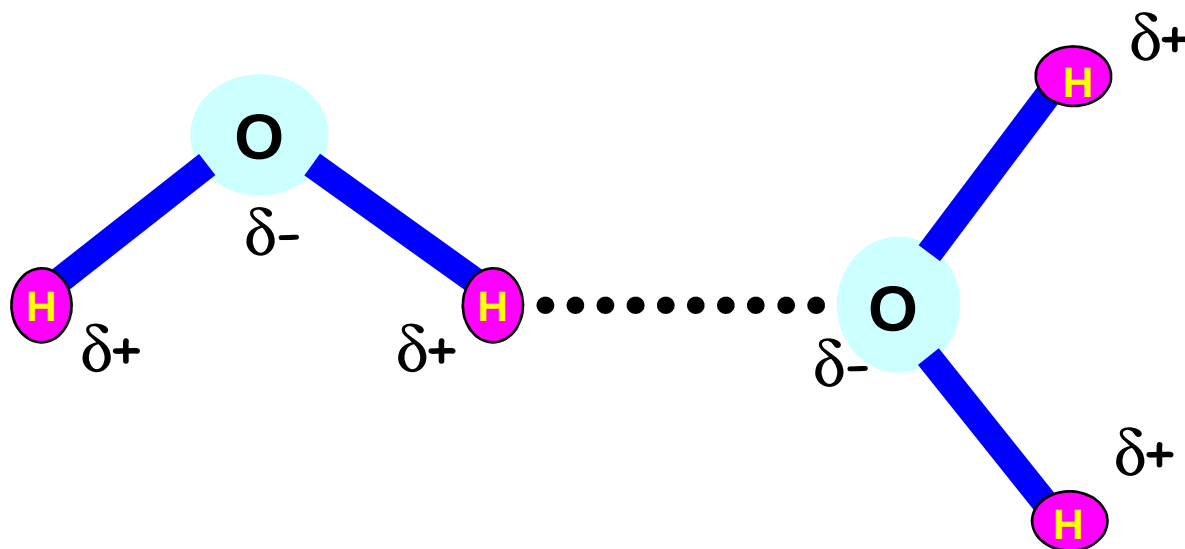


L'H₂O nelle cellule vegetali e
il suo trasporto nella pianta



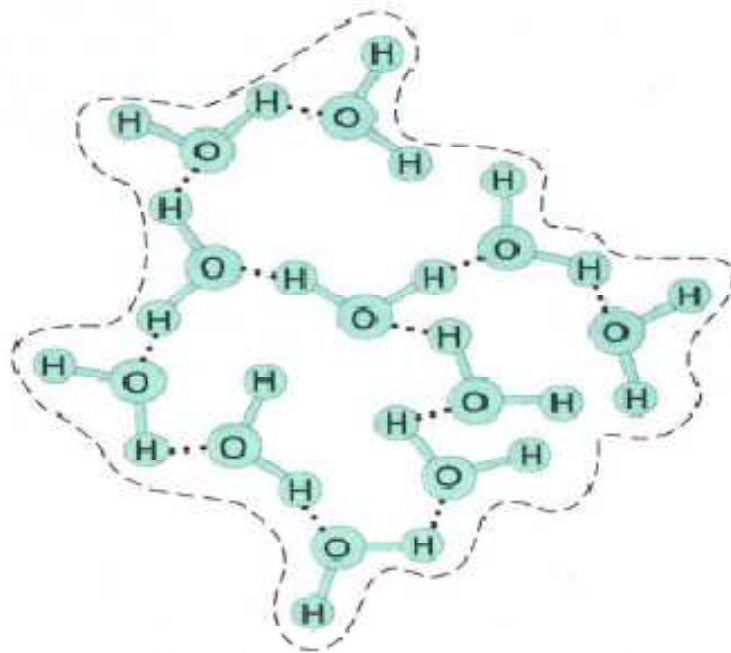
tendenza
all'ibridizzazione sp^3



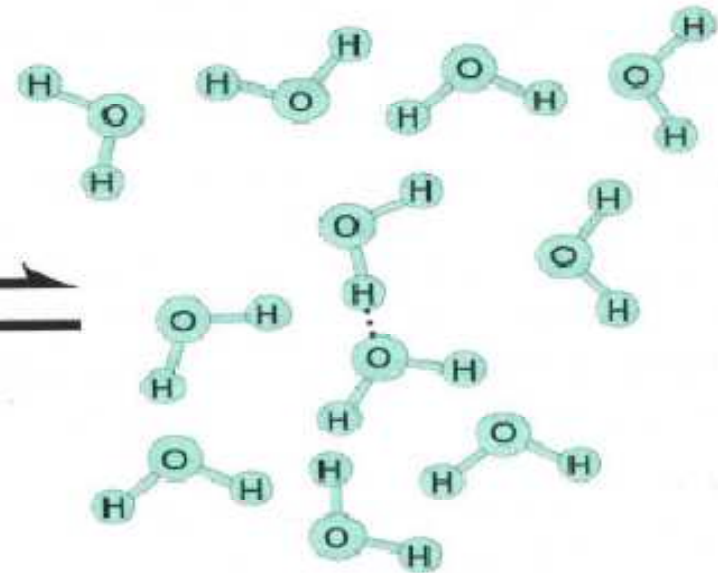
energia del legame idrogeno
tra due molecole di H_2O
4.5 kCal/mol

La formazione di **legami H** porta ad una struttura ordinata

(A) Acqua quasi cristallina



(B) Configurazione casuale



Il **CALORE SPECIFICO** è definito come la quantità di calore (energia) necessaria ad innalzare la temperatura di un °K per unità di massa

acqua $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

etanolo $2,46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

olio $\approx 2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Il **CALORE LATENTE DI EVAPORAZIONE** è definito come la quantità di calore (energia) necessaria per separare le molecole dalla fase liquida e spostarle nella fase gassosa a temperatura costante per unità di massa

l'acqua ha il più alto valore conosciuto per un liquido $2,26 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$

L'elevato calore latente di evaporazione permette alle piante di raffreddarsi: l'evaporazione dell'acqua durante la traspirazione sottrae infatti calore alla foglia

Coesione attrazione tra molecole di H_2O

Adesione attrazione delle molecole di H_2O da parte di una fase solida

Le molecole di H_2O all'interfaccia con l'aria sono maggiormente attratte dalle altre molecole di H_2O che non dalla fase gassosa



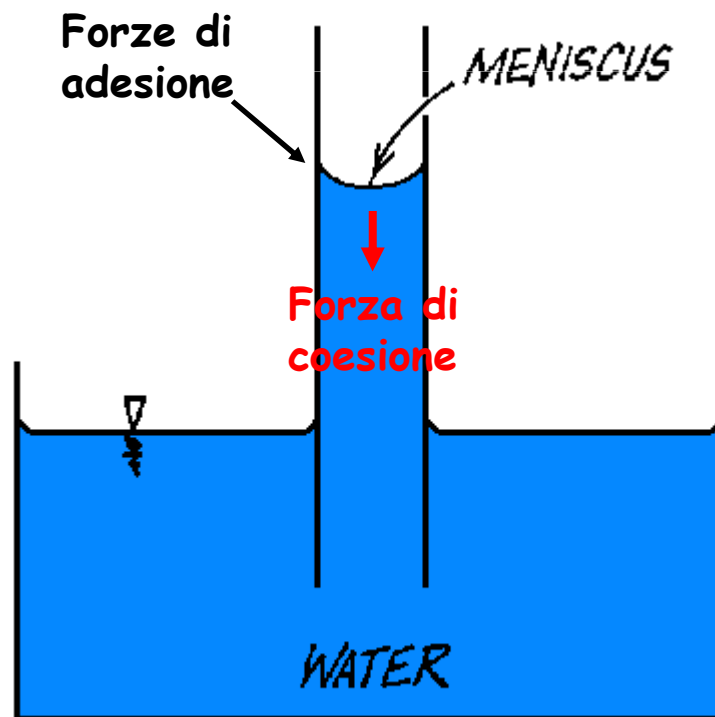
tendenza a ridurre l'area superficiale

la condizione che esiste
all'interfaccia è detta

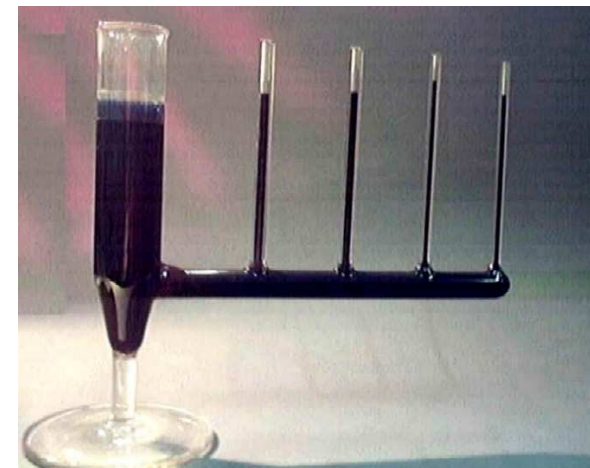
TENSIONE SUPERFICIALE

CAPILLARITA'

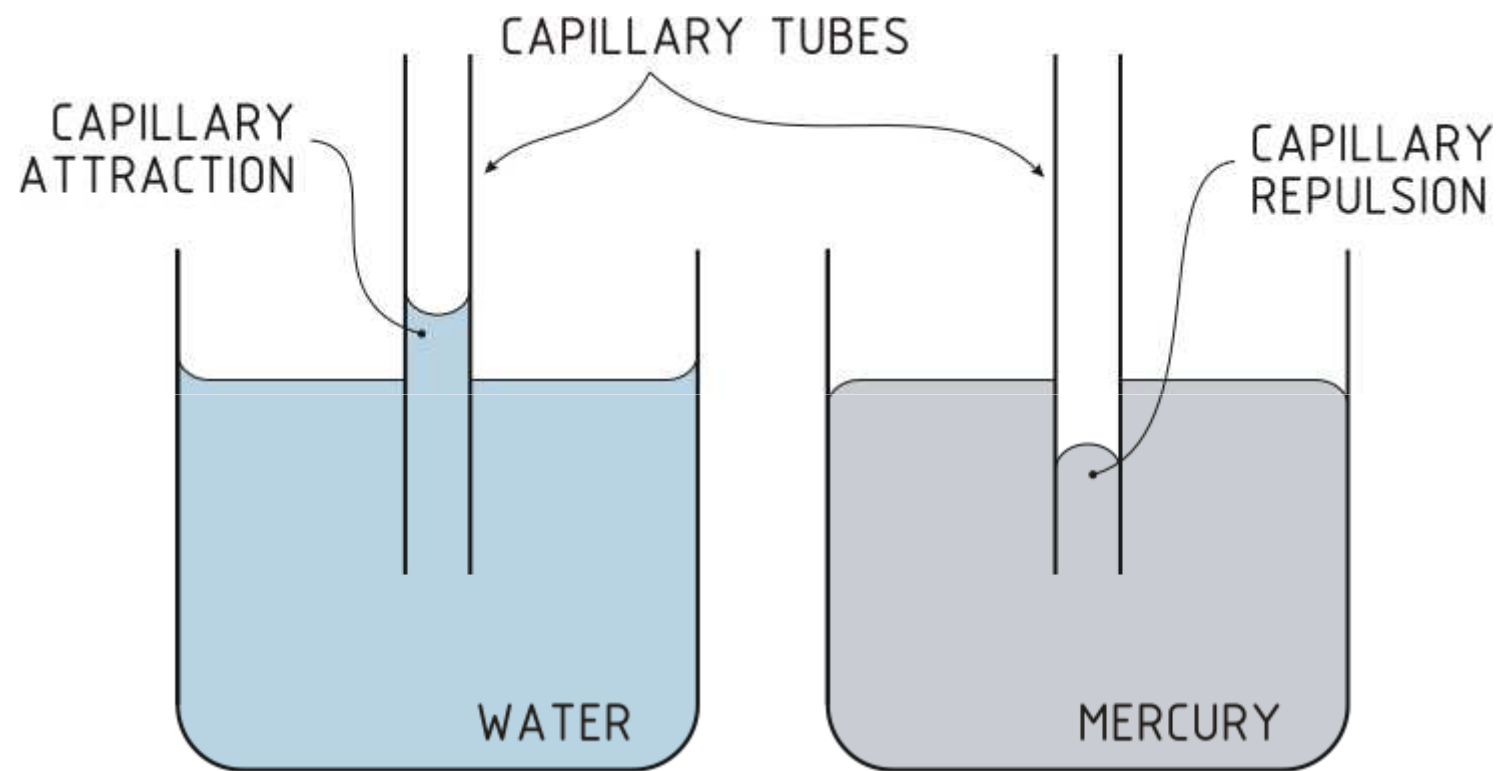
la **coesione**, l'**adesione** e la **tensione superficiale** esercitano una tensione sulle molecole di H_2O appena sotto la superficie causandone un movimento in salita per il tubo che dura fino a quando la forza di adesione è bilanciata dal peso della colonna di H_2O



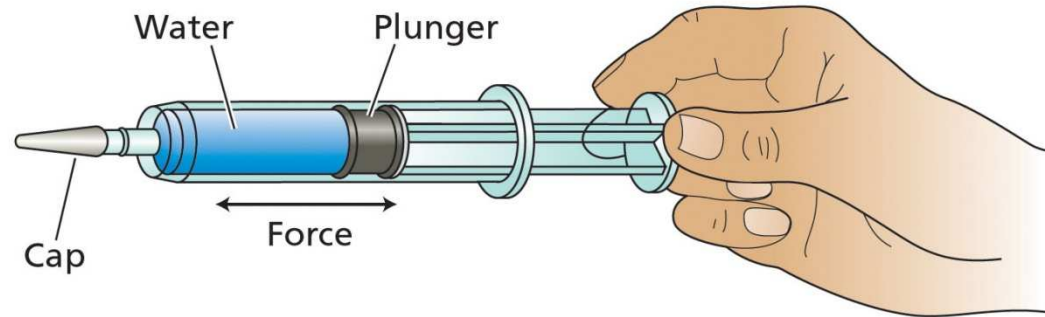
Capillary rise of water in a small glass tube.



L'altezza della colonna di liquido è inversamente proporzionale al raggio



La **coesione** è responsabile della
forza di tensione
capacità di resistere a forze di trazione



PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 3.5 © 2002 Sinauer Associates, Inc.

IL MOVIMENTO DELL'H₂O

Lo studio del movimento di una qualsiasi sostanza include la valutazione di:

ENERGIA

variazioni di energia libera

VELOCITA'

dipende dalla forza guida e dalle caratteristiche del mezzo

Energia libera energia disponibile per
compiere un lavoro [joule]

L'**energia libera per mole** di una data sostanza è
indicata come **potenziale elettrochimico**
[joule/mol]

POTENZIALE ELETTROCHIMICO

$$\mu = \mu_0 + RT \ln a + P\bar{V} + zEF + mgh$$

μ_0 = potenziale in condizioni standard

R = costante dei gas

T = T assoluta in °K

a = attività (per soluzioni diluite corrisponde alla concentrazione)

P = pressione idrostatica

V = volume parziale molare della sostanza

z = carica elettrica della sostanza

E = potenziale elettrico

F = costante di Faraday

m = massa della sostanza

g = accelerazione di gravità

h = altezza alla quale si trova la sostanza

$$\mu = \mu_0 + RT \ln a + P\bar{V} + \cancel{zEF} + mgh$$

Riferito all'acqua



POTENZIALE CHIMICO

$$\mu = \mu_0 + RT \ln a + P\bar{V} + mgh$$

μ_0 = potenziale standard (per convenzione = 0) riferito all'acqua pura a P atmosferica e T costante

a = attività dell'acqua (= 1 per l'acqua pura)

$\bar{V}$ = volume di una mole di acqua = $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$

m = massa dell'acqua = 18

Potenziale idrico (Ψ_w)

Potenziale chimico dell'acqua diviso il volume parziale molare dell'acqua

$$\frac{\mu - \mu_o}{\bar{V}} = \frac{RT \ln a}{\bar{V}} + \frac{P\bar{V}}{\bar{V}} + \frac{mgh}{\bar{V}} = \Psi_w$$

Il potenziale idrico è l'energia per unità di volume necessaria per trasportare l'acqua a T costante da un punto del sistema al punto di riferimento

E' una misura dell'energia libera dell'acqua rispetto all'energia libera dell'acqua pura

$$\psi_w = \frac{\mu_w - \mu_w^*}{\bar{V}_w}$$

Potenziale idrico [J/m³]

si misura in unità di pressione **[MPa]**

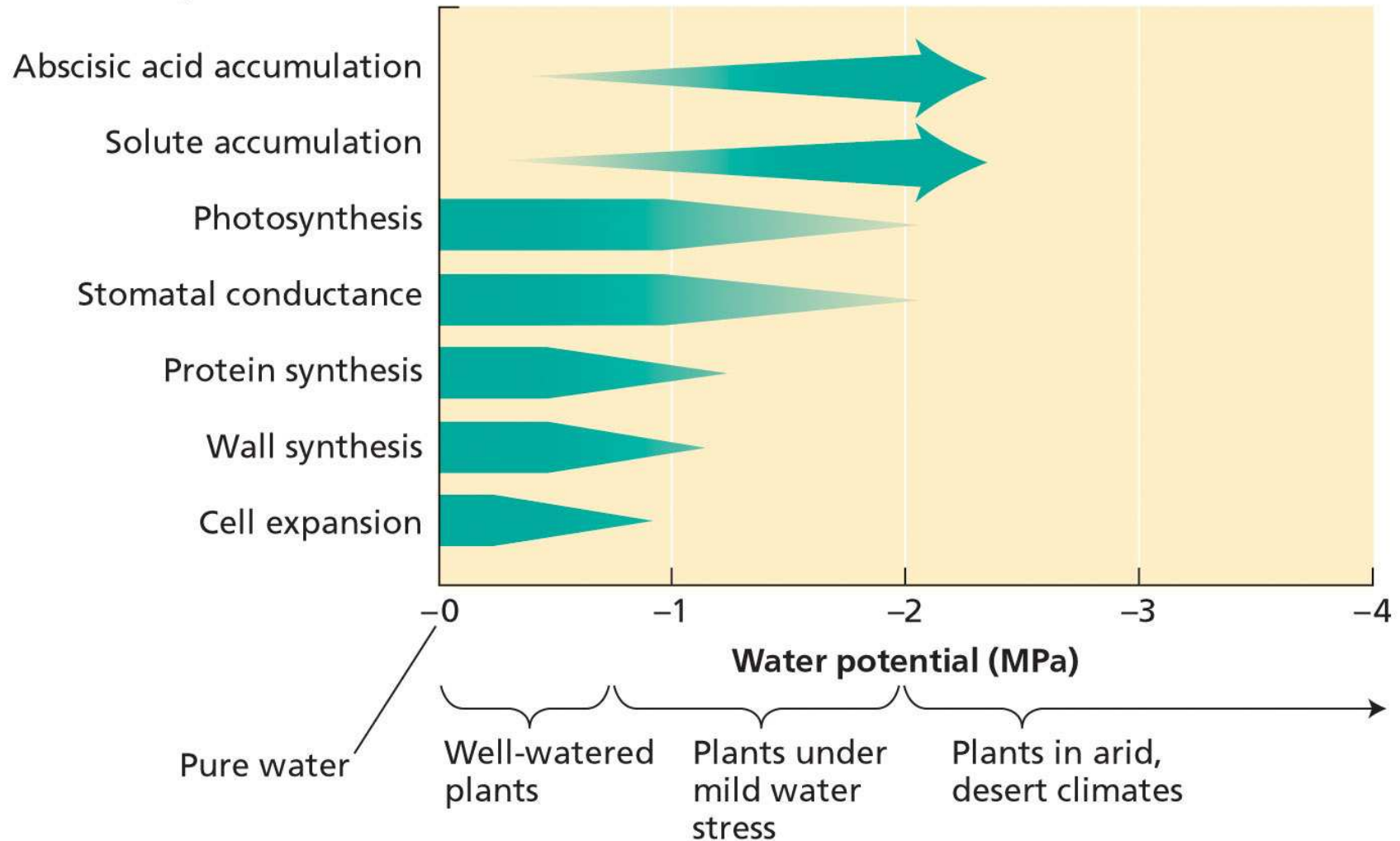
0,1 MPa = 1 bar = 0,987 Atmosfere

1 atm = 760 mm Hg
= 1.013 bar
= 1.013×10^5 Pa
= 0.1013 MPa

A cosa serve la misura del Ψ_w ?

- valutare lo **stato idrico** della pianta
- serve a definire la **direzione del flusso idrico** attraverso le membrane cellulari, i tessuti e gli organi della pianta

**Physiological changes
due to dehydration:**



$$\frac{\mu - \mu_o}{\bar{V}} = \frac{RT \ln a}{\bar{V}} + \frac{P\bar{V}}{\bar{V}} + \frac{mgh}{\bar{V}} = \Psi_w$$

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g$$

Ψ_w dipende dalla **concentrazione**, dalla **pressione** e dalla **gravità**

$$\frac{RT \ln a}{\bar{V}}$$

Ψ_s Potenziale di soluto
o Potenziale osmotico

Rappresenta l'effetto sul Ψ_w dei soluti disciolti

In una soluzione l'attività dell'acqua è sempre < 1

Ψ_s è quindi sempre < 0

I soluti **RIDUCONO IL POTENZIALE IDRICO** poichè diminuiscono l'energia libera dell'acqua, cioè la sua capacità a compiere un lavoro

L'attrazione tra soluti e acqua determina un abbassamento dell'attività dell'acqua e un aumento dell'entropia



diminuzione dell'energia libera rispetto a quella dell'acqua nello stato standard (acqua pura)

In base all'equazione di van't Hoff

$$\pi = RTC_s = -\frac{RT \ln a_w}{\bar{V}_w} \Rightarrow$$
$$-RTC_s = \frac{RT \ln a_w}{\bar{V}_w} = -\pi = \Psi_s$$

$$\pi = RTC_s$$

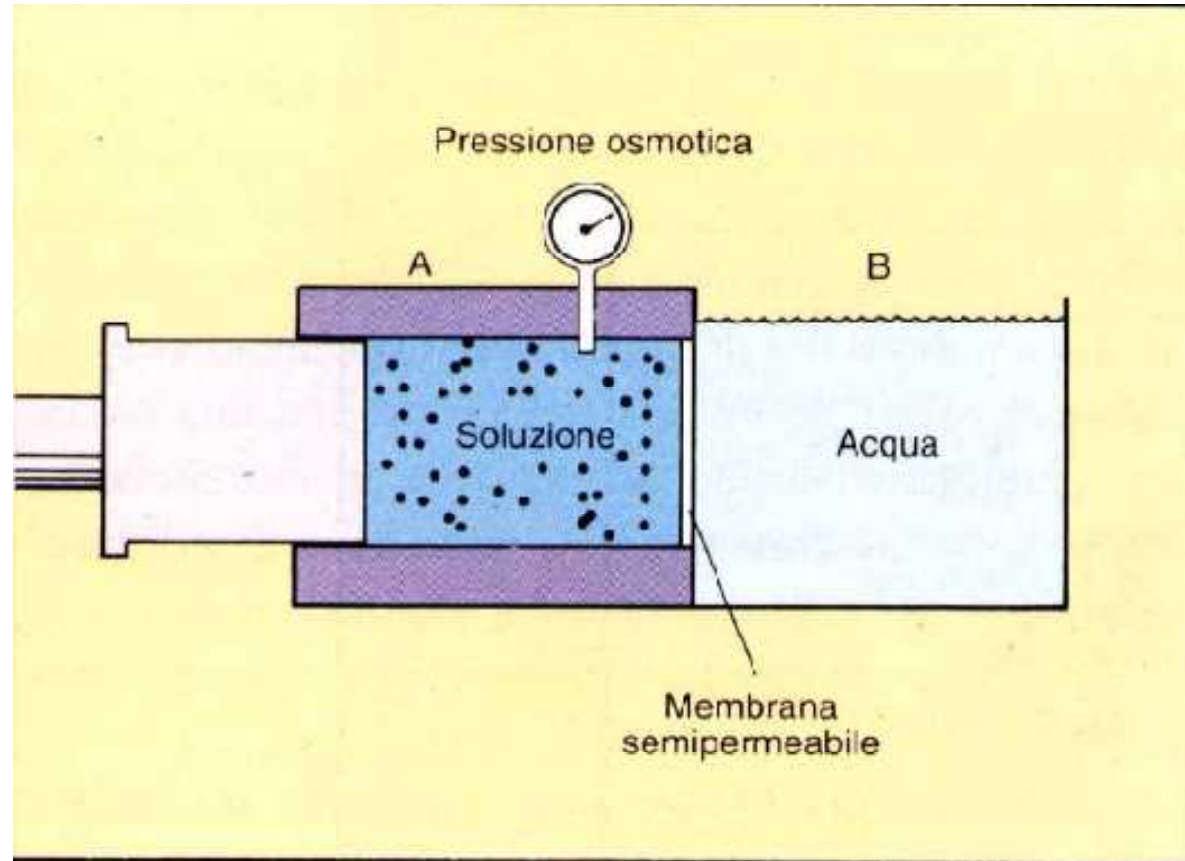
$$\Psi_s = -RTC_s$$

pressione osmotica

R = costante dei gas

T = temperatura assoluta

C_s = concentrazione di soluti espressa come osmolalità
(moli di soluti totali disciolti in 1 L di acqua)



π

Pressione che deve essere applicata ad una soluzione per controbilanciare la diffusione dell'acqua nella soluzione più concentrata

$$\Psi_s = - \pi = - RTC_s$$

Il segno negativo indica che i soluti disciolti riducono il potenziale idrico della soluzione

$$\frac{P\bar{V}}{\bar{V}} = P$$

Ψ_p Potenziale di pressione

PRESSIONE IDROSTATICA

$$P = P_{\text{assoluta}} - P_{\text{atmosferica}}$$

Quindi l'acqua a pressione ambientale $\Psi_p = 0$

Ψ_p può essere positivo, uguale a zero o negativo

Pressione idrostatica **positiva** = **pressione di turgore**
(all'interno delle cellule, 0.5-1 MPa)

Pressione idrostatica **negativa** = **tensione** (nello xilema, nel suolo)

$$\frac{mgh}{\bar{V}} = \rho_w gh$$

Ψ_g Potenziale gravitazionale

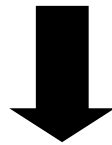
Rappresenta l'effetto della gravità sul Ψ_w

la componente del potenziale idrico funzione della gravità dipende dalla densità dell'acqua (ρ_w), dall'accelerazione di gravità (g) e dall'altezza (h) dell'acqua rispetto allo stato di riferimento

$$\rho_w g = 0,01 \text{ MPa m}^{-1}$$

per piccole altezze è trascurabile

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g$$



$$\Psi_w = P - \pi + \rho_w g h$$

se $h < 5-10 \text{ m}$ →
a livello cellulare

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p$$



$$\Psi_w = P - \pi$$

L'ACQUA SI MUOVE SECONDO IL GRADIENTE
DI POTENZIALE IDRICO

ABBASSANDO LA PROPRIA ENERGIA LIBERA

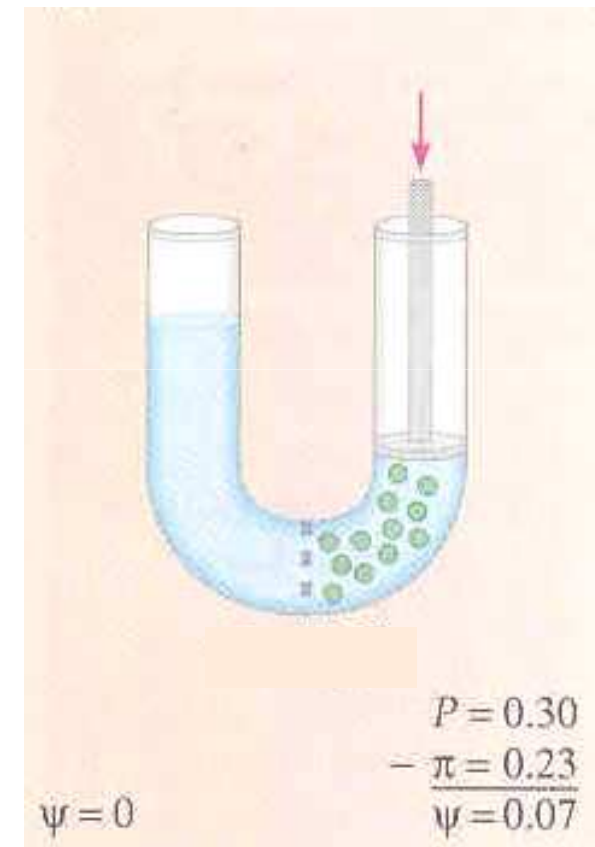
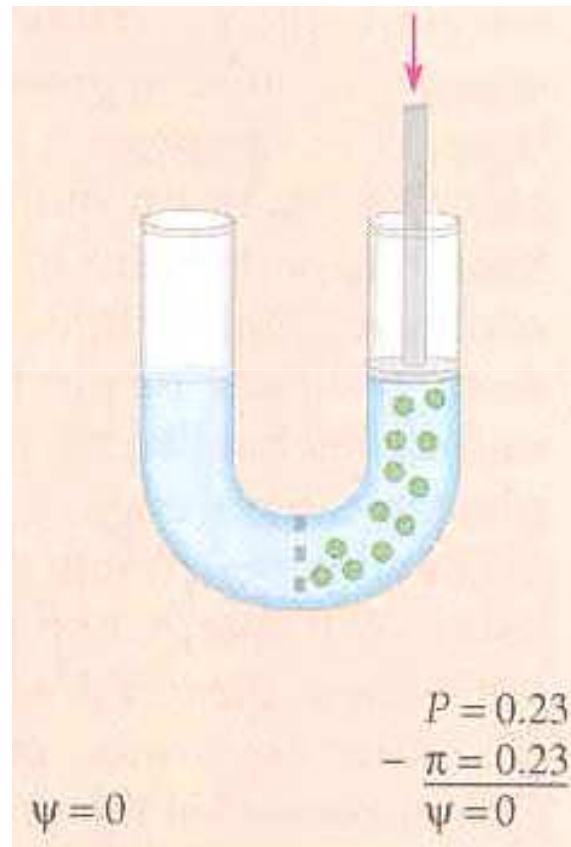
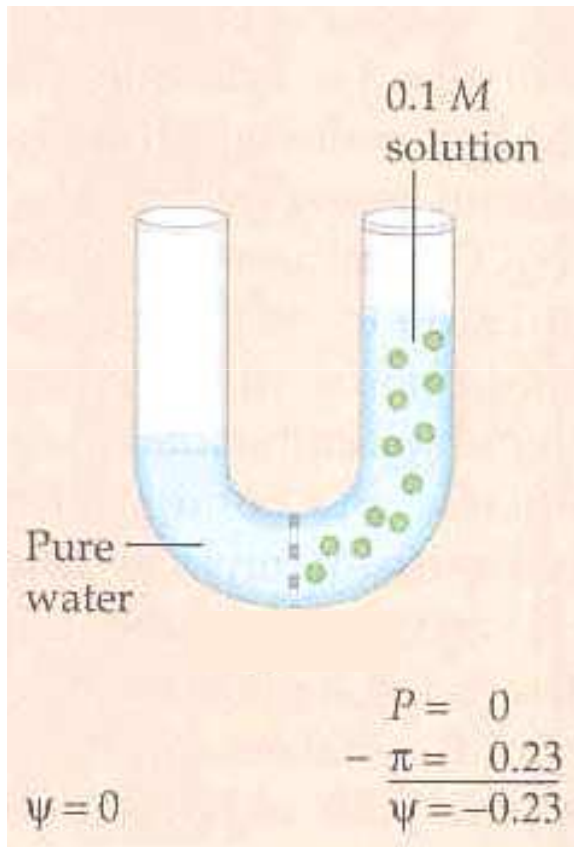
$$\psi_{\text{iniziale}} > \psi_{\text{finale}}$$

il movimento dell'acqua è un processo attivo o passivo?

$$-\pi = \psi_s$$

$$P = \psi_p$$

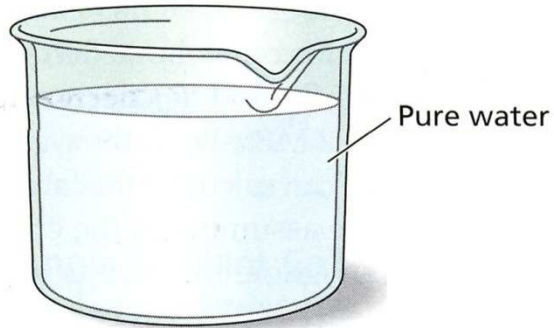
$$\psi = P - \pi$$



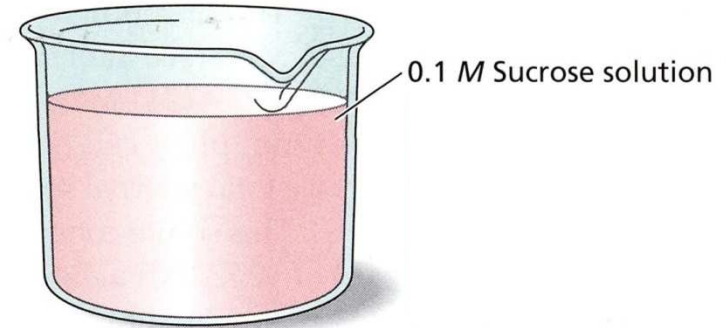
$$\Psi_s = -\pi$$

$$\Psi_p = P$$

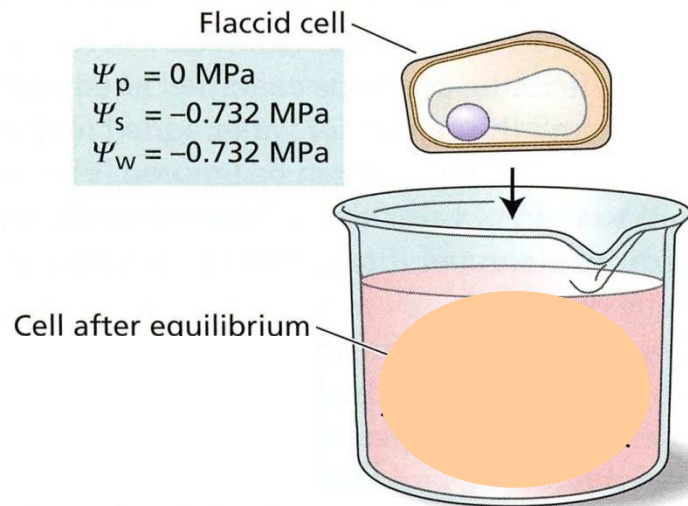
(A) Pure water



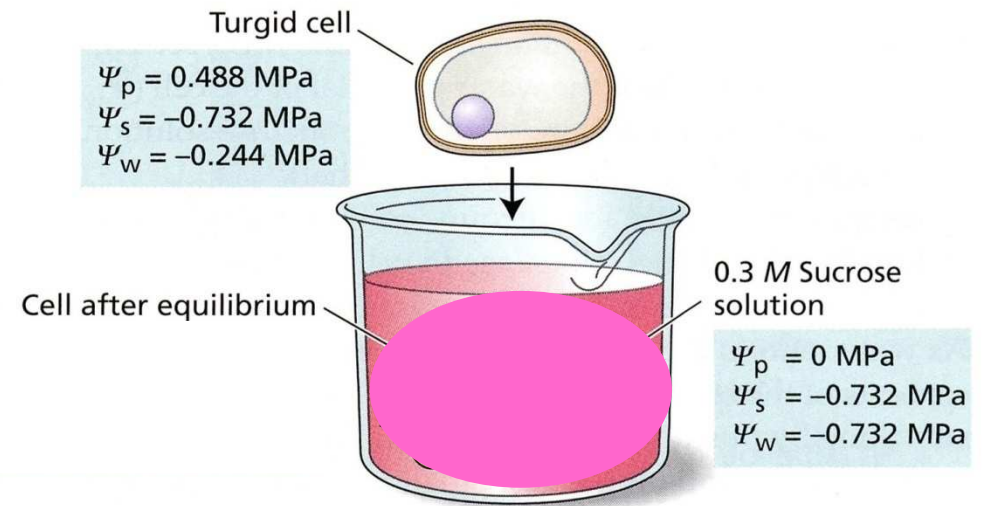
(B) Solution containing 0.1 M sucrose

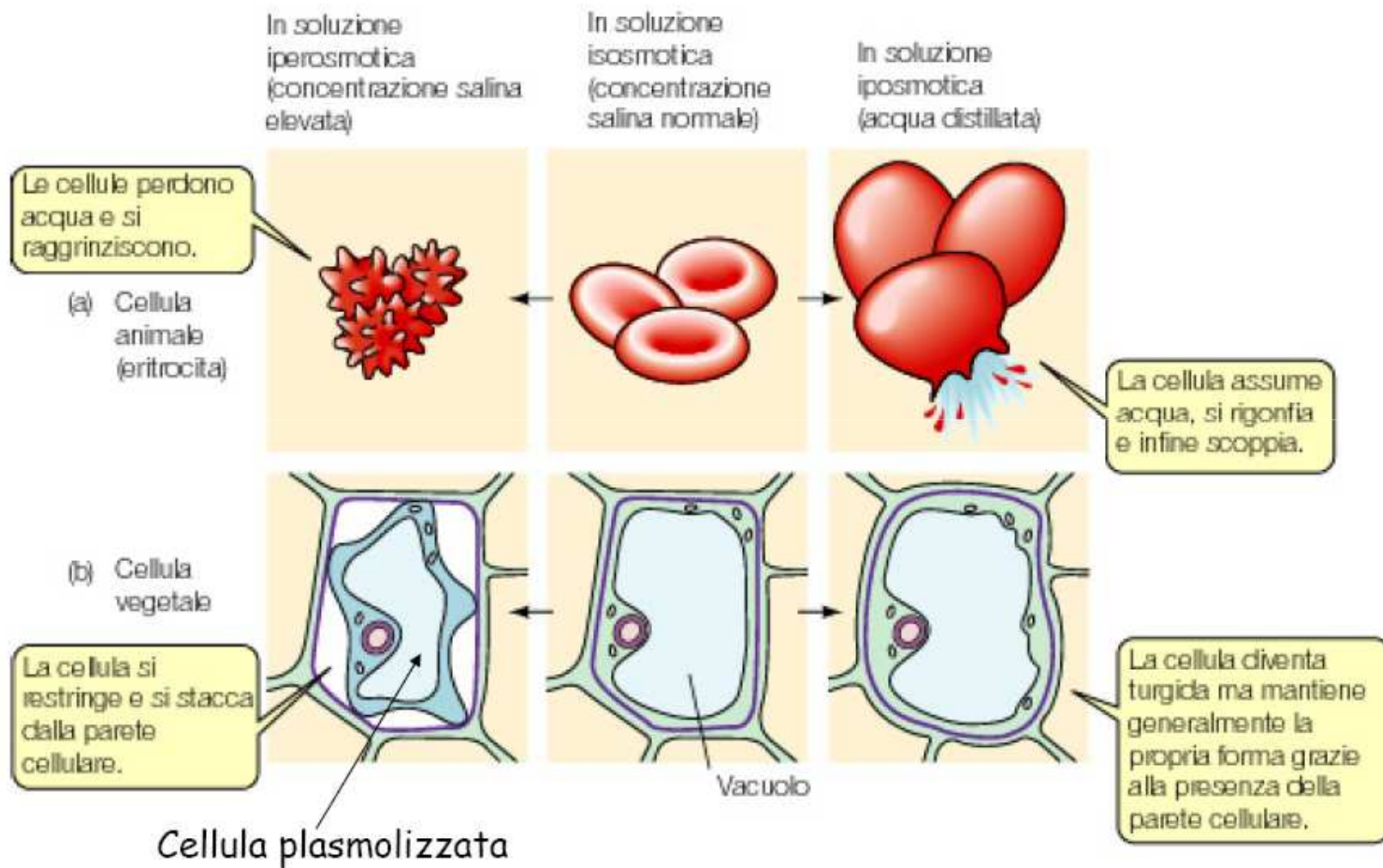


(C) Flaccid cell dropped into sucrose solution



(D) Concentration of sucrose increased



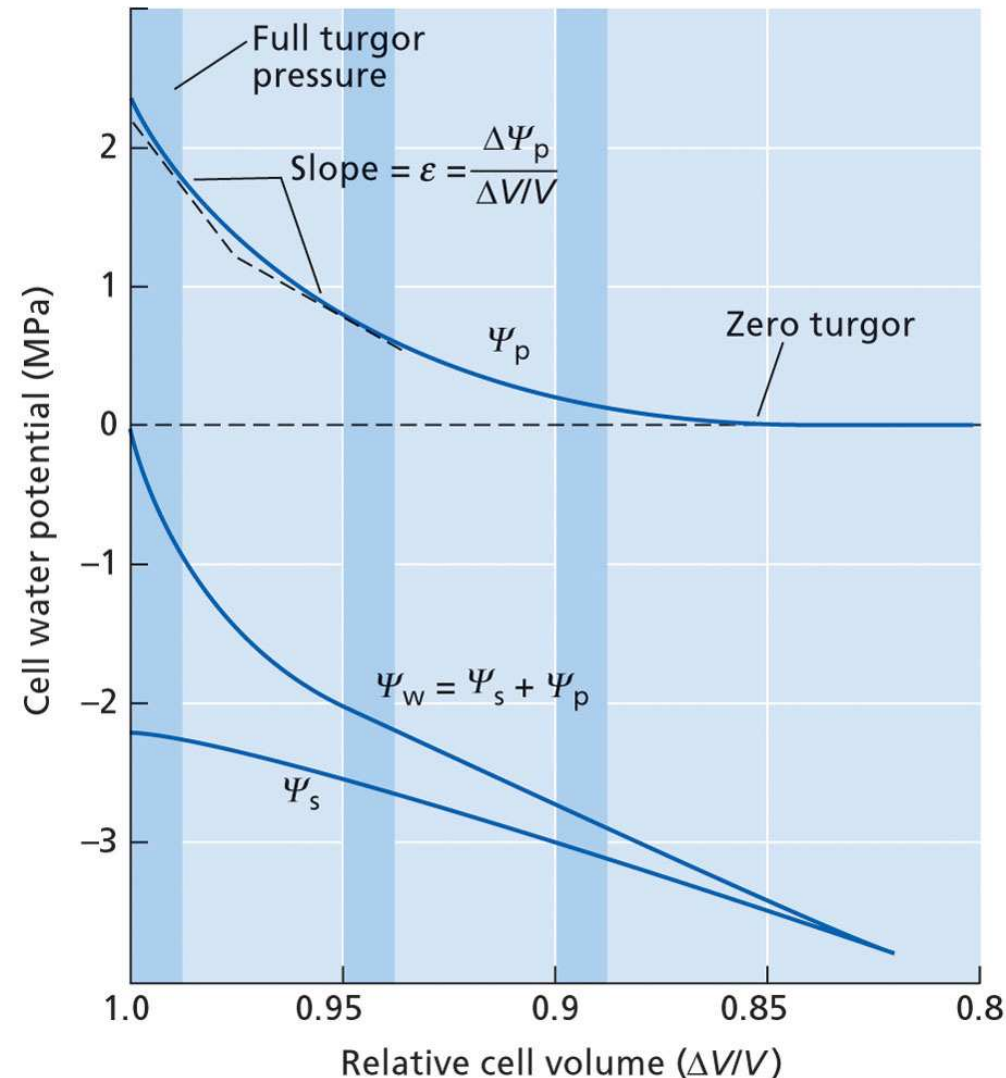




Plasmolisi di una cellula di *Allium cepa* in seguito all'aggiunta di nitrato di calcio

piccole variazioni del volume cellulare
determinano grandi variazioni del potenziale
di pressione (pressione di turgore)

ϵ , modulo
di elasticità
volumetrico,
è una misura
della rigidità
della parete



Ψ_p si avvicina a
zero con
perdite di
volume di
appena il 10-
15%

Perché la pressione di turgore è importante?

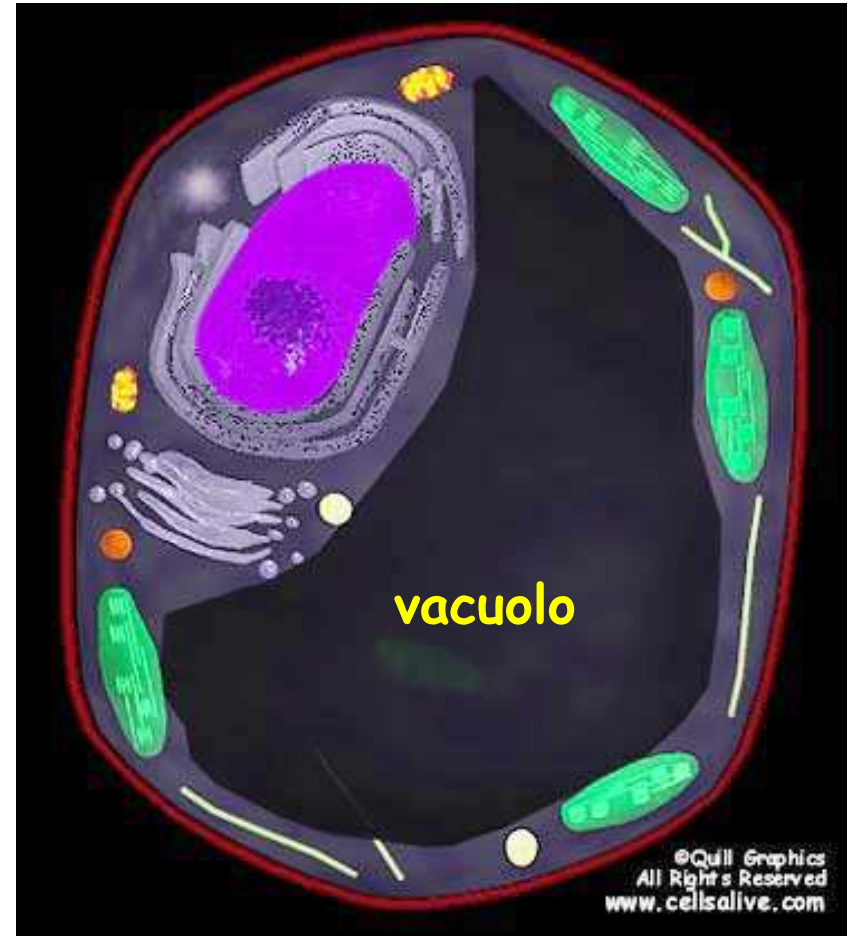
**Permette che avvenga la crescita della
cellule mediante distensione della parete
cellulare**

CRESCITA PER DISTENSIONE

La pressione di turgore si sviluppa a causa della **presenza della parete**

Se $\Psi_{Int} < \Psi_{ex}$ l'acqua entra nella cellula (principalmente nel vacuolo)

Se la parete si rilassa, la P di turgore diminuisce mantenendo il gradiente di Ψ



In una cellula matura la parete non si rilassa.
L'entrata di acqua determina un aumento di P immediato che annulla il gradiente di Ψ tra interno ed esterno della cellula

Lo studio del movimento di una qualsiasi sostanza include la valutazione di:

ENERGIA

variazioni di energia libera

VELOCITA'

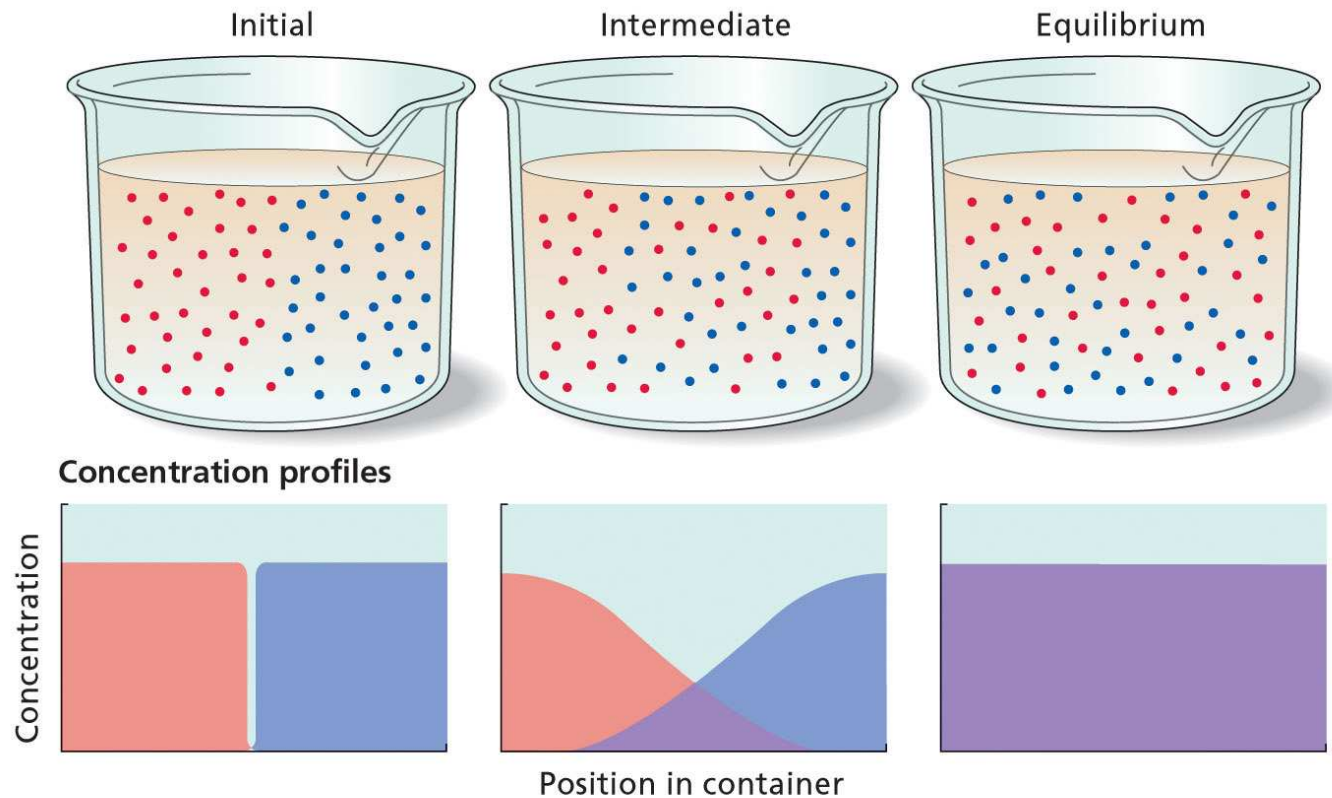
dipende dalla forza guida e dalle caratteristiche del mezzo

Il movimento spontaneo dell'acqua può avvenire per:

➤ DIFFUSIONE MOLECOLARE (gradiente di C)

➤ FLUSSO DI MASSA (gradiente di P)

➤ OSMOSI (gradiente di Ψ)



PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 3.7 © 2002 Sinauer Associates, Inc.

Diffusione

processo attraverso il quale le molecole in soluzione tendono, a seguito della loro agitazione termica, ad occupare tutto il volume di solvente.

La diffusione determina lo spostamento di molecole **da regioni ad alta concentrazione a regioni a bassa concentrazione**

La velocità con cui avviene la diffusione è descritta dalla

LEGGE DI FICK

$$J_s = -D_s \cdot (dc/dx)$$

Densità di flusso
[mol m⁻² s⁻¹]

La velocità del movimento di diffusione è direttamente proporzionale al **gradiente di concentrazione**

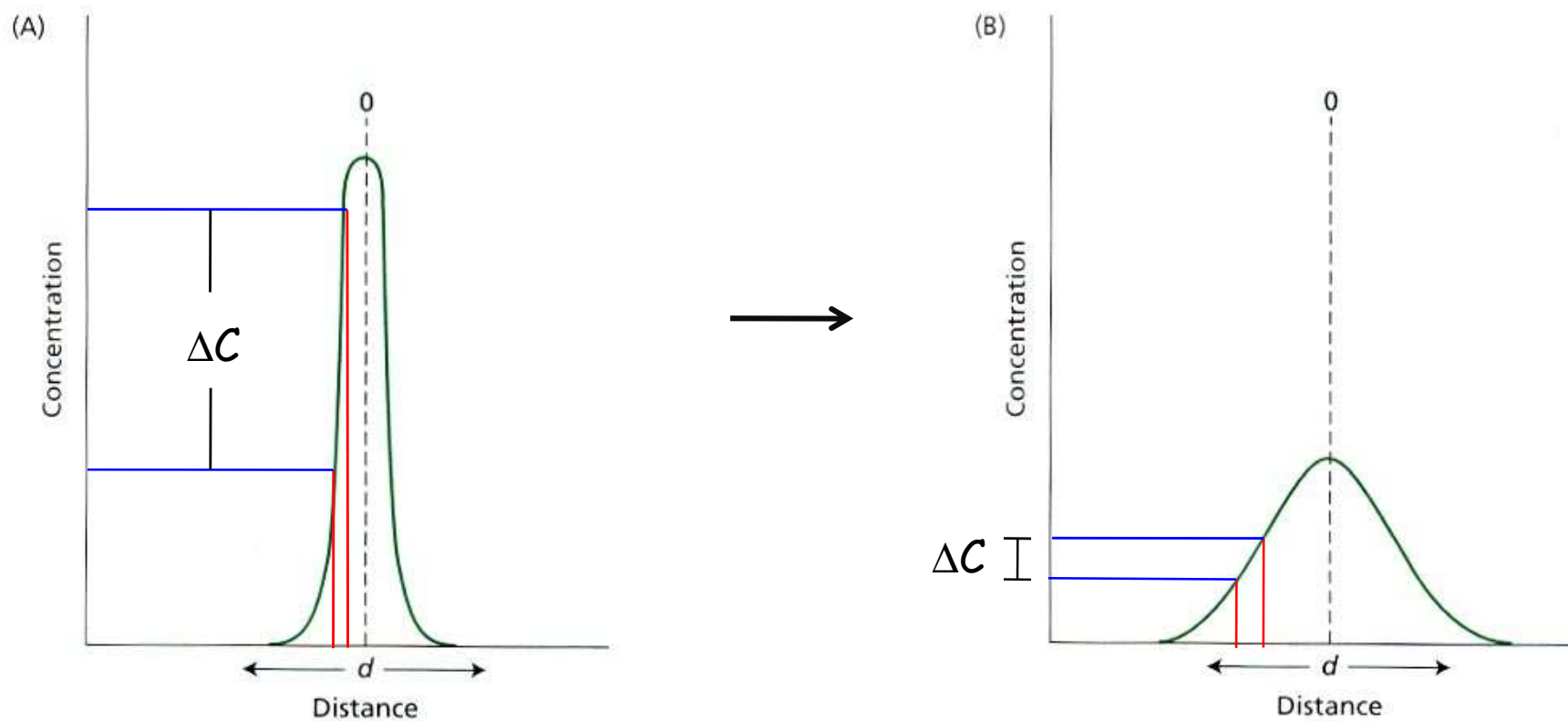
D_s = coefficiente di diffusione

[m² s⁻¹]

misura quanto facilmente una sostanza s si muove attraverso un mezzo

**Il segno meno indica che la direzione del flusso è
[C] alta → [C] bassa**

diffusione



Man mano che la sostanza diffonde dal punto di partenza si riduce il gradiente di concentrazione

dalla legge di Fick si ricava



$$t_{c=1/2} = \frac{d^2}{D_s} K$$

$$K = 1$$

glucosio in acqua
 $D = 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

tempo necessario ad una sostanza s per raggiungere un punto, situato ad una distanza d dal punto di partenza, tale che la concentrazione sia metà di quella iniziale

Diffusione ➡ trasporto a breve distanza

Non contribuisce al trasporto a lunga distanza nella pianta

Flusso di massa

movimento di gruppi di molecole in risposta a **gradienti di pressione**
(correnti di convezione, flusso di un fiume, caduta della pioggia)

Equazione di Poiseuille

$$\text{Velocità di flusso} = \frac{\pi r^4}{8 \eta} \frac{dP}{dx} \quad [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$$

r raggio della tubatura

η viscosità del liquido (per H_2O $\eta = 10^{-9} \text{ MPa s}$)

$\frac{dP}{dx}$ **gradiente di pressione**

Flusso di massa $\longrightarrow$ trasporto a lunga distanza

OSMOSI

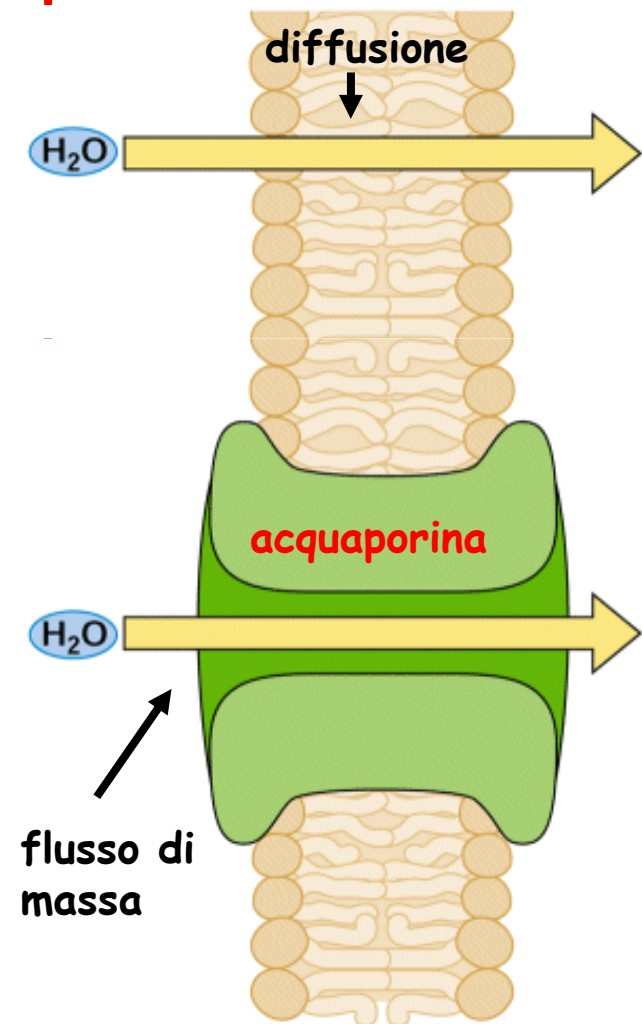
movimento di un solvente attraverso una membrana.

Le membrane cellulari sono selettivamente permeabili.

L'osmosi avviene in risposta ad una forza motrice.

Alla **forza motrice** per il movimento contribuiscono sia il gradiente di **concentrazione**

sia il gradiente di **pressione** che determinano la direzione e la velocità del flusso



osmosi

La velocità di trasporto dipende dalla forza motrice (**gradiente di Ψ**) e dalle caratteristiche fisiche del mezzo

$$\text{Velocità di flusso} = \frac{\text{forza motrice}}{\text{resistenza}}$$

$$\text{Velocità di flusso} = \text{forza motrice} \times \text{conduttanza}$$



$$\text{velocità di flusso del volume} = A \times L_p (\Delta\Psi) = L (\Delta\Psi)$$

L_p conduttività idraulica

$\text{MPa}^{-1} \text{ m s}^{-1}$

A area della membrana

m^2

$A \times L_p = L$ conduttanza idraulica totale

$\text{MPa}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$