

Résumé de Biophysique

Partie 1 : Phénomène de diffusion

1. Définition

La diffusion est le phénomène de migration libre de molécules parmi d'autres ; ces molécules se répandent de façon homogène dans tout l'espace qui leur est offert.

Il y a une diffusion de soluté de **milieu le plus concentré** (hypertonique) vers le **milieu moins concentré** en soluté (hypotonique). Le volume totale ne varie pas.

2. Types de membranes

2.1. Membrane hémiperméable (semi-perméable): c'est une membrane qui laisse passer l'eau mais arrête le soluté.

2.2. Membrane dialysante : c'est une membrane qui laisse passer l'eau et les micromolécules et arrête les macromolécules (molécules de masses molaires supérieures à 10000 g/mol).

3. Le débit molaire (le débit de la matière, 1^{ère} loi de Fick)

$$J_M = \frac{dn}{dt} = -D S \frac{dC_M}{e}$$

D'où

D: coefficient de diffusion de soluté dans la membrane (en m²/s).

dC_M: différence de concentration entre les deux compartiments en mol. m⁻³.

h = e : épaisseur de la membrane en m.

S: représente la surface totale des pores perméables au soluté (m²), qui peut être donnée par l'expression suivante:

$$S = N\pi a^2$$

Où

N : est le nombre total de pores.

a : le rayon des pores (en m).

Résumé de Biophysique

4. Flux molaire

Le flux est le débit molaire par unité de surface

$$\phi = \frac{J_M}{S} = \frac{dn}{S \cdot dt} = -D \cdot \frac{dC_M}{e}$$

Avec : ϕ exprime en mol/m².s (le flux).

S : la surface exprime en m².

5. Le débit molaire initial

$$J_M|_0 = \left. \frac{dn}{dt} \right|_0 = -D S \left. \frac{dC_M}{e} \right|_0$$

$\left. \frac{dn}{dt} \right|_0$: Débit molaire initial

Compartiment 1 : $dC_M = (C_{M_2} - C_{M_1}) = (0 - C_{M_1}) = -C_{M_1}$

Compartiment 2 : $dC_M = (C_{M_1} - C_{M_2}) = (0 - C_{M_2}) = -C_{M_2}$

6. Le flux molaire initial

$$\phi_M|_0 = \frac{J_M|_0}{S}$$

7. Coefficient de diffusion (Relation d'Einstein)

$$D = RT \frac{1}{6 N_A \pi \eta r} = RT \frac{1}{N_A f} = \frac{K_B T}{f}$$

La loi de stokes :

$$f = 6 \pi \eta r$$

η : Coefficient de viscosité en Pa.s (1Pa.s = 1N/m²).

r : rayon de la molécule qui diffuse en m.

K_B : Constante de boltzmann, $K_B = R/N_A = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

R : Constante des gaz rares ; $R = 8.31$ J/l.

T : Température absolue en Kelvin.

Résumé de Biophysique

f : Coefficient de friction (frottement) en Kg/s.

b : mobilité mécanique en s.Kg⁻¹.

Avec $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ est le nombre d'Avogadro.

Remarque :

1. le coefficient de diffusion "D", elle dépend de **la taille des molécules** (r) de soluté et de la **viscosité** (η) du solvant ainsi que de **la température**.

2. Considérons deux solutés de rayons r_1 et r_2 qui diffusent dans deux milieux de viscosité η_1 et η_2 et deux températures T_1 et T_2 respectivement. Nous avons :

$$D_1 = \frac{k T_1}{6 \pi \eta_1 r_1}, \quad D_2 = \frac{k T_2}{6 \pi \eta_2 r_2} \quad \text{donc} \quad \frac{D_2}{D_1} = \frac{T_2 \eta_1 r_1}{T_1 \eta_2 r_2}$$

$$D_2 = \frac{T_2 \eta_1 r_1}{T_1 \eta_2 r_2} D_1$$

3. On prend le cas de deux soluté 1 et 2 qui sont différents mais diffusent dans les mêmes conditions expérimentales ($\eta_1 = \eta_2$, $T_1 = T_2$) donc :

$$D_2 = \frac{r_1}{r_2} D_1$$

4. Considérons dans ce cas particulier que la densité volumique des molécules de soluté 1 est égale à celle du 2ème soluté ($\rho_1 \approx \rho_2$).

On a $\rho = \frac{m}{V}$ avec $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ V : volume d'une molécule sphérique

$$\text{Avec } M = N m \quad \Longrightarrow \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3} \pi r^3} \quad \Longrightarrow \quad r = \sqrt[3]{\frac{M}{4 \pi N \rho}}$$

Nous obtenons alors pour les deux solutés $\frac{r_1}{r_2} = \sqrt[3]{\frac{M_1}{M_2}}$ car ($\rho_1 \approx \rho_2$).

Nous avons alors pour deux solutés de masses molaires M_1 et M_2 diffusant dans les mêmes conditions expérimentales, le coefficient de diffusion D_2 est donné par cette formule :

Résumé de Biophysique

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{M_1}{M_2}} D_1$$

D'après la théorie cinétique de diffusion on a :

$$D = \frac{K_B T}{f}$$

Dans le cas d'une particule sphérique :

$$D = A \cdot \frac{T}{\eta} \sqrt[3]{\frac{\rho}{M}}$$

A: constante empirique, T : température en Kelvin. ρ et M sont, respectivement, la masse volumique et la masse molaire du soluté.

η : la viscosité dynamique du solvant.

$$D = \frac{A T}{\sqrt[3]{M}}$$

Exemple 1 :

Démontrer que le coefficient de diffusion d'une molécule sphérique est inversement proportionnel à la racine cubique de sa masse moléculaire.

Le coefficient de diffusion D est :

$$D = \frac{K_B T}{f}$$

Pour une particule sphérique :

$$m = \rho \cdot V = \frac{M}{N_A} \text{ et } V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$\text{Donc : } \frac{M}{N_A} = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \Rightarrow r = \left(\frac{3M}{4\pi\rho N_A} \right)^{1/3}$$

Donc :

$$D \cdot M^{1/3} = A = cte \quad \text{avec } A = \frac{K_B T}{6\pi\eta} \left(\frac{4\pi\rho N_A}{3} \right)^{1/3}$$

Où :

M: masse molaire du soluté.

Résumé de Biophysique

D : coefficient de diffusion.

8. Un coefficient de perméabilité de la membrane

La perméabilité **P** dépend de la diffusibilité d'un soluté particulier, de l'épaisseur de la membrane et de la surface utile des pores rapportée à la surface **S** de la membrane.

$$P = \frac{D}{e}$$

P: coefficient de perméabilité (m/s) ou (cm/min).

e : épaisseur de la membrane (taille des pores) en m.

Avec **D** en m²/s est le coefficient de diffusion des molécules du soluté dans la solution.

Remarque :

Diffusion à travers une membrane dialysante, le flux net de diffusion entre deux compartiments à concentrations C_{M1} , C_{M2} ($C_{M2} > C_{M1}$) à travers une membrane poreuse est donné par,

$$\phi = \frac{J_M}{S} = \frac{dn}{dt} = -D \cdot \frac{dC_M}{e} = -P \cdot dC$$

$\Phi = P (C_{M2} - C_{M1})$ avec $P = D/e$

J_M : débit de matière.

dC_M : différence de concentration entre les deux compartiments en mol. m⁻³.

P : le coefficient de perméabilité en m/s, dépend de la membrane et du soluté.

Résumé de Biophysique

Partie 2 : Phénomène d'Osmose

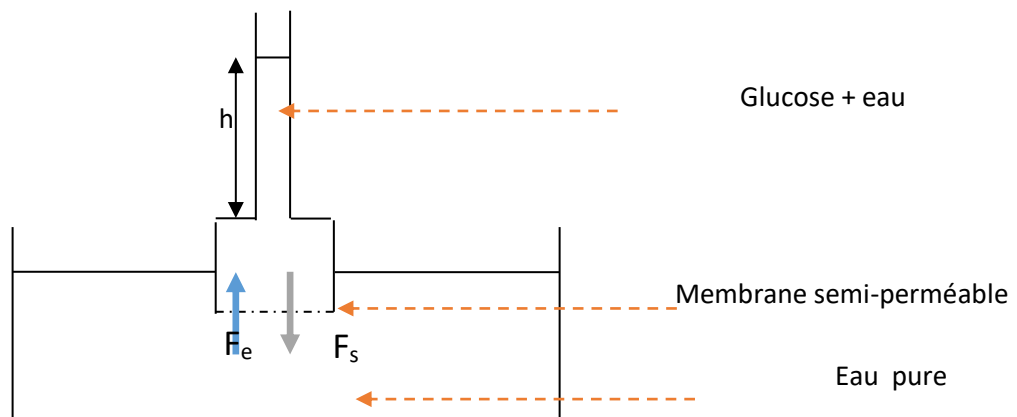
1. Définition

L'osmose est la diffusion du solvant du milieu le moins concentré (**la solution hypotonique**) vers le compartiment le plus concentré (**la solution hypertonique**) à travers une membrane semi-perméable.

2. Pressions osmotiques

La pression osmotique d'une solution est la pression qu'il faut exercer sur la solution pour empêcher le flux du solvant.

3. Osmomètre de Dutrochet



Au départ, le flux de solvant entrant F_e est très supérieur au flux sortant F_s , puis on atteint l'équilibre. A ce moment la pression hydrostatique $p = h g \rho$ est égale à la pression osmotique. Donc la pression osmotique d'une solution est la pression hydrostatique qu'il faudrait exercer sur la solution pour empêcher le solvant pur de traverser la membrane. Elle est établie empiriquement à partir de nombreuses études expérimentales et finalement exprimées sous forme théorique par Van't Hoff .

$$P = \pi = \rho g h = RTw_M = RT \cdot i \cdot C_M = RT \cdot i \cdot \frac{C_p}{M}$$

Où :

π : Pression Osmotique en atm ou Pa ou N/m^2 .

R : Constante des gaz parfaits, $R = 0,082 \text{ l.atm/mol.K}$.

T : la température absolue en Kelvin.

i est le coefficient d'ionisation (sans unité).

C_p : la concentration pondérale en g/l .

M : la masse molaire du soluté en g/mol .

Résumé de Biophysique

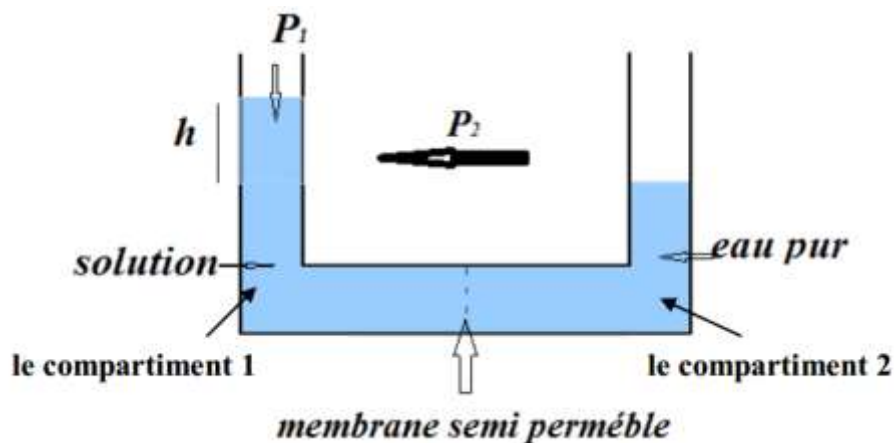
- Pour une **solution neutre** : $\alpha=0 \Rightarrow i=1 \Rightarrow w_M = C_M \Rightarrow \pi = R.T.C_M$
- Pour un **électrolyte fort** : $\alpha=1 \Rightarrow \beta = i \Rightarrow w_M = \beta C_M \Rightarrow \pi = R.T. \beta C_M$
- Pour un **électrolyte faible** : $\alpha < 1 \Rightarrow i = 1 + \alpha (\beta-1) \Rightarrow \pi = R.T.i.C_M$

Remarque :

Lorsque deux solutions d'osmolarité différentes w_{M_1} et w_{M_2} , séparées par une membrane semi-perméable, la pression osmotique de ce système obéit à la relation :

$$\Delta\pi = R.T \Delta w_M = R.T. (w_{M_2} - w_{M_1}) \quad w_{M_2} > w_{M_1}$$

a. Cas d'une solution et une eau pure



Sur ce montage expérimental schématisé en sus, on observe un arrêt du flux de solvant quand la hauteur h est atteinte. L'eau se déplace du compartiment 2 vers le compartiment 1, soit du moins concentré (eau pure) vers le plus concentré. Il en résulte une augmentation du niveau de l'eau dans le compartiment 1.

- La colonne d'eau exerce ainsi une force de pression sur le compartiment 1.
- On comprend alors que deux forces sont en présence :

1. Une force de diffusion : elle correspond au flux de solvant expliqué par le phénomène d'osmose ($P_2 = \pi_2$).
2. Une force de pression hydrostatique : la pression qui est exercée par la colonne d'eau ($P_1 = \pi_1$).

Ces deux forces s'opposent et tendent ainsi vers un état d'équilibre, qui obéit à la loi de Van't Hoff :

$$\Delta\pi = \rho g h = R.T \Delta w_M = R.T. (w_{M_2} - w_{M_1})$$

$\Delta\pi$: la pression osmotique en Pascal (Pa).

ρ : masse volumique en Kg/m^3 .

Résumé de Biophysique

h : hauteur d'eau dans la colonne lorsque l'équilibre est atteint, en m.

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2.$$

T : Température en Kelvin.

$$R = 8.32 \text{ J.osmol}^{-1}.\text{K}^{-1}.$$

Δw_M : la différence d'osmolarité entre les compartiments 1 et 2.

Dans cet exemple: $\Delta w_M = w_{M_1}$ car $w_{M_2} = 0$.

Δw_M S'exprime en osmol/m³.

Exemple :

Deux compartiments séparés par une membrane semi perméable parfaite contiennent :

- Compartiment 1 : une eau pure.
- Compartiment 2 : une solution aqueuse de glucose à 54 g/l.

Calculer la pression osmotique à 27°C.

On donne : 1atm = 10⁵Pa, R= 8,32 J.osmol⁻¹.°K⁻¹, T= 27°C, M= 180 g/mol.

Réponse :

La pression osmotique à 27 °C est :

$$\Delta\pi = R. T \Delta w_M = R. T. (w_{M_2} - w_{M_1})$$

$$\Delta w_M = w_{M_2} \text{ car } w_{M_1} = 0 \Rightarrow \Delta\pi = R. T. w_{M_2}$$

$$\Delta\pi = 8,32.300. \frac{54}{180} 10^3 = \mathbf{748,8.10^3 Pa = 748,8 kPa}.$$

b. Cas de deux solutions (Notion d'osmolarité efficace ou tonicité)

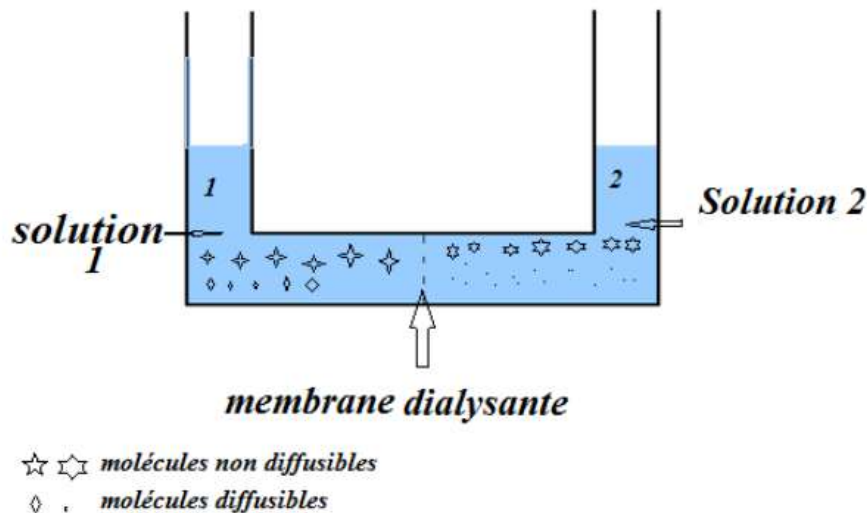
Considérons deux compartiment 1 et 2 séparés par une membrane dialysante, laissant passer les petites molécules et ions et étant imperméable aux macromolécules (protéines).

Dans ce cas de figure, nous avons choisi l'osmolarité w_{M_1} supérieure à l'osmolarité w_{M_2} .

On observe :

1. un flux de petites molécules (diffusibles) du compartiment 1 vers le compartiment 2.
2. les macromolécules ne subissent pas ces phénomènes de diffusion : elles restent dans leur compartiment initial (ceci est du à la perméabilité sélective de la membrane).
3. un flux de solvant du compartiment 2 vers le compartiment 1. Le flux d'eau et donc opposé au flux de soluté.

Résumé de Biophysique



Envisageons chacun des phénomènes séparément :

- ❖ Initialement $w_{M_1} > w_{M_2}$: la différence va engendrer un flux de soluté, c'est-à-dire un déplacement de petites molécules vers le compartiment 2. Ce déplacement a tendance à rétablir les concentrations.
- ❖ Pour expliquer l'origine du flux de solvant, il est nécessaire de revenir sur la définition de l'osmose. Il est en effet d'usage de définir l'osmose comme un flux d'eau du milieu le moins concentré vers le milieu le plus concentré. Cependant, il faut bien comprendre qu'une solution se définit selon deux critères :

a. Son osmolarité totale (w_{tot}), c'est-à-dire le nombre d'osmol du soluté présent dans la solution à un instant donné.

Par exemple une solution contient 0.2 osmol/l Urée et 0.3 osmol/l glucose.

$$w_{tot} = w_{urée} + w_{glucose}$$

$$w_{tot} = 0.2 + 0.3 = 0.5 \text{ osmol/l}$$

b. Sa Tonicité ou l'osmolarité efficace (w_{eff})

L'osmolarité efficace : c'est l'osmolarité totale des solutés qui ne traversent pas la membrane.

Par exemple, les globules rouges, l'osmolarité GR est 300 mosml/l.

- ❖ Membrane semi-perméable : $w_{efficace} = w_{totale}$
- ❖ Membrane dialysante : imperméable aux grosses molécules donc :

$$w_{efficace} = w_{macromolécules}$$

- ❖ Membrane sélective : $w_{efficace} = w_{totale} - w_{espèces\ diffusibles}$
- ❖ Membrane du GR : $w_{efficace} = w_{totale} - w_{urée}$.

Résumé de Biophysique

c. Pression osmotique efficace (π_{eff})

Dans ce cas $w_{\text{eff}_1} > w_{\text{eff}_2}$: implique un flux de solvant vers le milieu 1 (hypertonique par rapport au milieu 2). En effet, le nombre de macromolécules non diffusibles, est plus important en 1 qu'en 2.

Schématiquement : le phénomène de diffusion concerne les molécules diffusibles et le phénomène d'osmose concerne les molécules non diffusibles.

Soit la pression osmotique exercée du compartiment 2 vers le compartiment 1.

$$\pi_{\text{eff}} = R.T w_{\text{eff}}$$

À l'état d'équilibre : $w_{\text{eff}_1} = w_{\text{eff}_2}$, soit $\pi = 0 \Rightarrow$ les phénomènes d'osmose et de diffusion cessent.

Exemple :

Deux compartiments séparés par une membrane semi perméable parfaite contiennent :

- Compartiment 1 : une solution aqueuse de 2,9 g/l de NaCl.
- Compartiment 2 : une solution aqueuse de glucose à 9 g/l.

Calculer la pression osmotique à 27°C.

On donne : $R = 8,32 \text{ J.osmol}^{-1}.\text{°K}^{-1}$, $M_{\text{glucose}} = 180 \text{ g/mol}$, $M_{\text{NaCl}} = 58,5 \text{ g/mol}$.

Réponse :

La pression osmotique à 27 °C est :

$$\Delta\pi = R.T \Delta w_M$$
$$w_{M_1} = \beta C_M = \beta \cdot \frac{C_p}{M} = 2 \cdot \frac{2,9}{58,5} = 0,1 \text{ osmol/l}$$
$$w_{M_2} = C_M = \frac{C_p}{M} = \frac{9}{180} = 0,05 \text{ osmol/l}$$

Donc :

$$\Delta\pi = R.T. (w_{M_1} - w_{M_2}) = 8,32.300. (0,1 - 0,05). 10^3 = 124,8 \text{ kPa.}$$

Remarque :

- Deux solutions dont les pressions osmotiques sont égales sont dites " *isotoniques* "
- La solution la plus concentrée en soluté est dite hypertonique par rapport à l'autre.
- La solution la moins concentrée en soluté (solution diluée) est dite hypotonique par rapport à l'autre.

Résumé de Biophysique

Abaissement cryoscopique

C'est à l'air libre, l'eau pure se solidifie à 0°C, on atteint alors l'égalité entre le flux liquéfaction et le flux de solidification. Pour une solution aqueuse à 0°C, le flux de solidification devient plus faible car les molécules du solvant sont devenues moins libres en présence du soluté. Il faut donc abaisser la température si l'on veut rétablir l'égalité des flux permettant d'atteindre la solidification.

Lors de l'ajout d'un solvant dans un soluté, on observe un abaissement de la température de congélation de la solution : C'est l'abaissement cryoscopique, noté ΔT_c . Ce phénomène a été découvert par le chimiste Raoult qui a établi une loi de proportionnalité et il permet de déterminer la masse molaire d'un composé inconnu. Cette technique s'appelle la **cryoscopie**.

$$\Delta T = T_{\text{cong. Solution}} - T_{\text{cong. solvant.}}$$

$$\Delta T_{\text{criyoscopique}} = \Delta T_c = k_c \cdot w_m$$

w_m est l'osmolale

k_c est appelé constante cryoscopique du solvant, elle ne dépend du solvant.

$k_c = -1.86^\circ\text{C} \cdot \text{Osmol}^{-1} \cdot \text{Kg}^{-1}$ pour l'eau.

Exemple :

Déterminer la salinité c.-à-d. la concentration pondérale massique, et la molarité NaCl dans l'eau dont l'abaissement cryoscopique $\Delta T_c = -3^\circ\text{C}$ et la densité $d=1,033$

On donne : la masse molaire $M=58,5\text{g/mol}$, $k_c = -1,86^\circ\text{C} \cdot \text{Osmol}^{-1} \cdot \text{Kg}^{-1}$ pour l'eau.

Réponse :

1. Calcul l'osmolale :

$$\Delta T_c = k_c \cdot w_m \Rightarrow w_m = \frac{\Delta T_c}{k_c} = \frac{3}{1,86} = 1,6 \text{ osmol/kg.}$$

2. Calcul la concentration molale :

$$w_m = i \cdot C_m \Rightarrow C_m = \frac{w_m}{i} = \frac{1,6}{2} = 0,8 \text{ mol/kg.}$$

3. Calcul la concentration molaire :

$$C_M = d \cdot C_m = 1,033 \cdot 0,8 = 0,83 \text{ mol/l.}$$

4. Calcul la concentration pondérale :

$$C_p = M \cdot C_M = 58,5 \cdot 0,83 = 48,55 \text{ g/l}$$

Résumé de Biophysique

Différence entre diffusion et l'osmose :

| Le type de la membrane | Membrane est perméable | Membrane est semi-perméable |
|---|--|---|
| Phénomène | Diffusion | Osmose |
| La nature des molécules migrantes | Soluté | Solvant |
| Le sens du déplacement | Passage le soluté de milieu plus concentré vers le moins concentré | Passage le solvant de milieu moins concentré vers le plus concentré |
| La loi physique qui régit le phénomène | $\frac{dn}{dt} = -D S \frac{dC_M}{e}$ | $\Delta\pi = RT\Delta w_M$ |
| Cause des phénomènes | Différence de concentration | Différence d'osmolarité |
| Etat vers lequel aboutissent les phénomènes | Equilibre entre concentration | Equilibre entre pression osmotique et pression hydrostatique |

Résumé de Biophysique