

VI.1. Introduction

Les échanges de l'eau et de soluté à travers les membranes biologiques, entre les compartiments intra et extra- cellulaires de l'organisme sont des phénomènes dits de **transport** ou de **transfert**. Ils dépendent de :

- De la nature des particules transportées (taille, charge et la forme) et la nature de la membrane;
- De l'osmolarité des solutions constituant les milieux d'échange;
- Des pressions hydrostatiques ou mécaniques exercées de part et d'autre de la membrane.

VI.2. Différents types de transports

On distingue trois types de transports de molécules, le transport **passif**, le transport **facilité** et le transport **actif**.

1. Le Transport passif :

Le transport passif des molécules se fait par l'agitation thermique des particules sans consommation de l'énergie. Les particules s'agitent et passent d'un compartiment à l'autre. Cette agitation thermique résulte de :

a. La différence de concentrations (Gradient de concentrations).

La différence de concentrations d'une substance entre deux milieux (compartiments liquidiens) appelée **gradient de concentration**, fait déplacer les molécules du milieu le plus concentré (**milieu hypertonique**) vers le milieu le moins concentré (**milieu hypotonique**) pour être à l'aise. Ce déplacement est indépendant de la **charge** des molécules et appelé mouvement de **diffusion**.

b. Différence de pressions (Gradient de pressions) :

La différence de pressions (hydrostatiques ou mécaniques) de part et d'autre d'une membrane (des deux côtés de la membrane) appelé **gradient de pression** fait déplacer les molécules du solvant du milieu soumis à une grande pression vers le milieu soumis à une faible pression (dans le sens du gradient de pression décroissant). Ce phénomène est appelé mouvement de **convection**.

c. La différence de potentiels électriques (Gradient de potentiels électriques).

La différence de potentiels électriques de la part et d'autre d'une membrane appelé **gradient de potentiel électrique**, engendre un champ, ce champ induit une force électrique qui fait déplacer les charges positives (les cations) dans le même sens du champ et les charges négatives (les anions) dans le sens opposé du champ. Ce phénomène est appelé **migration** des particules chargées.

2. Le transport passif facilité : Le transport passif facilité est dû à de grosses molécules incorporées dans la membrane appelées pompes à ions. Ces grosses molécules sont des **protéines transmembranaires** (**transporteurs membranaires**) qui permettent de forcer la substance à traverser la membrane contre le gradient de concentration sans **dépense de l'énergie**.

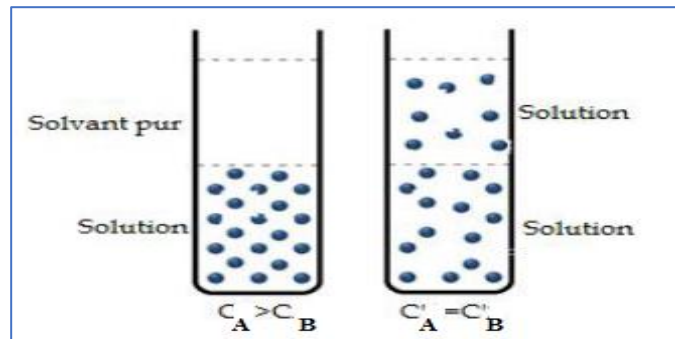
3. Le transport actif : est le troisième type de déplacement des substances au niveau de la membrane cellulaire. Ce déplacement se fait contre le gradient de concentration de la substance comme le transport facilité mais en consommant de **l'énergie chimique générée par la cellule elle-même** et qui provient de **l'hydrolyse de l'ATP** (c'est –à-dire la rupture des liaisons des molécules par l'eau).

VI.3. Diffusion libre

Définition. C'est un phénomène de transport passif de matière (géré par l'agitation thermique), qui dû à une différence de gradient de concentrations entre deux points du milieu .On dit que le système est en **déséquilibre thermodynamique**.

Sous l'effet de l'agitation thermique, les molécules se déplacent ayant tendance d'égaliser les concentrations et les potentiels chimiques pour aboutir à l'équilibre.

On considère un récipient séparé en deux parties (solvant pur : eau) et (solution : **soluté** + solvant) par une interface nette.



La mise en contact des 2 milieux engendre un transport de matière (une diffusion du soluté) du milieu le plus concentré (A) vers le milieu le moins concentré (B), jusqu'à l'équilibre. Ce transport a pour objectif :

1. D'égaliser les concentrations : $C'_A = C'_B$
2. D'égaliser les potentiels chimiques : $\mu'_A = \mu'_B$

VI.3.1. Première loi de Fick (en une seule dimension)

L'équation fondamentale de la diffusion dite **première loi de Fick** permet de calculer le **débit molaire diffusif**, Φ du soluté transporté du milieu **A** vers le milieu **B** selon la direction (OX):

$$\Phi = \frac{dn}{dt} = -D_{\text{libre}} \times S \times \frac{dC_M}{dx} \Rightarrow 1^{\text{ère}} \text{ loi de Fick en une seule dimension } x$$

$$\Phi = J \times S \Rightarrow J = -D_{\text{libre}} \times \frac{dC_M}{dx} \Rightarrow \text{la densité du flux}$$

Où : dn est le nombre de moles du soluté diffusés en (mol) ;

dt est le temps de diffusion en (s) ;

D_{libre} est le coefficient de diffusion libre en (m²/s) ;

S est la surface d'échange en (m²) ;

$\frac{dC_M}{dx}$ est le gradient de concentration molaire du soluté entre les deux milieux en (mol/L×m);

dx est la distance parcourue par les molécules diffusées du soluté, généralement l'épaisseur de la membrane en (m) ;

$\Phi = \frac{dn}{dt}$ est le débit molaire diffusif du soluté qui s'est déplacée pendant le temps dt du point x_A de concentration pondérale C_A au point x_B de concentration pondérale C_B en (mol/s) ;

J est la densité du flux en (mol/s.m²).

Remarque 1.

On peut calculer le débit diffusif du soluté Φ en masse du soluté : $\Phi = \frac{dm}{dt} = -D_{\text{libre}} \times S \times \frac{dC_p}{dx}$

Où m est la masse du soluté en (g), C_p est la concentration pondérale en (g/L) et Φ est mesuré dans ce cas en (g/s).

Remarque 2.

Le signe (-) dans la 1^{ère} loi de Fick, indique que la diffusion s'effectue dans le sens des concentrations décroissantes (dC diminue quand dx augmente).

Remarque 3.

Le gradient de concentration en trois dimensions (l'espace) est : $\vec{\text{grad}}C = \frac{\partial C}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial C}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial C}{\partial z} \vec{k}$

VI.3.2. Le coefficient de diffusion (**D**)

On considère que les particules en solution sont sphériques de rayon **r**, le coefficient de diffusion est donné par la relation d'Einstein :

$$D_{\text{libre}} = \frac{K_B \times T}{f} = \frac{K_B \times T}{6\pi\eta r} \text{ en (m}^2/\text{s)}$$

K_B : constante de Boltzmann ($K_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K); **r** : rayon de la particule considéré comme sphérique (m)

T : température absolue (en °K); **η** : viscosité de la solution à la température T en **poiseuille** (kg /m .s)

f = **6π η r** est le coefficient de friction de Stokes en (Kg/s).

La relation précédente montre que le coefficient de diffusion **D** est proportionnel à la température **T** de la solution. Si la température et le coefficient de diffusion augmentent alors le débit diffusif du soluté ($\frac{\Delta n}{\Delta t}$) augmente.

VI.3.3. Deuxième loi de Fick

Le transfert de matière jusqu'à l'égalisation des concentrations dans tout le compartiment contenant la solution implique une diminution progressive du gradient de concentration, entraînant une diminution du flux net de matière qui s'annule à l'équilibre.

La 2ème loi de Fick donne la relation entre la variation temporelle et la variation spatiale de la concentration du flux diffusé.

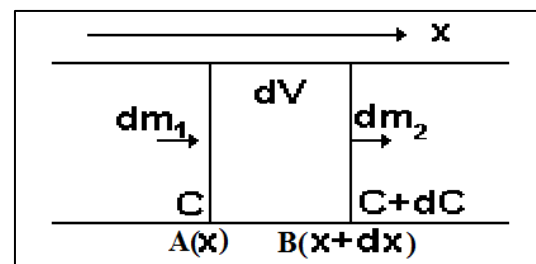
Soit deux points **A** et **B** appartiennent à la solution d'abscisses **x** et **(x + dx)**, respectivement comme le montre la figure ci-suivante.

*La **concentration pondérale** au point A(x) est : **C_A = C**

*La **concentration pondérale** au point B (x+ dx) est **C_B**

où :

$$C_B = C + dC = C + \frac{dC}{dx} \cdot dx$$



*La quantité du soluté en masse au point A(x) et qui entre dans le volume **dV** pendant un temps **dt** est : **dm₁**

Avec : $dm_1 = -D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{dC_A}{dx} \cdot dt = -D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{dC}{dx} \cdot dt$ (1^{ère} loi de Fick selon la direction X)

*La quantité du soluté en masse au point B(x +dx) et qui sort du volume **dV** pendant un temps **dt** est **dm₂**

Avec : $dm_2 = -D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{dC_B}{dx} \cdot dt = -D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{d(C+dC)}{dx} \cdot dt$

$$\Rightarrow dm_2 = -D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{d}{dx} \left(C + dC \cdot \frac{dx}{dx} \right) \cdot dt = -D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{d}{dx} \left(C + \frac{dC}{dx} dx \right) \cdot dt$$

$$\begin{aligned}
 dm_2 &= -D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{dC}{dx} \cdot dt - D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{d^2C}{dx^2} dx \cdot dt \\
 &= \mathbf{dm_1 - dm} \quad \text{où } \mathbf{dm} = D_{\text{libre}} \cdot S \cdot \frac{d^2C}{dx^2} dx \cdot dt = D_{\text{libre}} \cdot \frac{d^2C}{dx^2} (S \cdot dx) \cdot dt \\
 &= D_{\text{libre}} \cdot \frac{d^2C}{dx^2} dV dt
 \end{aligned}$$

$\Rightarrow \mathbf{dm = dm_1 - dm_2 = D_{\text{libre}} \cdot \frac{d^2C}{dx^2} dV dt}$ est la différence de masse transportée ou diffusée du soluté ($dm_1 > dm_2$).

Sachant que : $C = C_p = \frac{m}{V} \Rightarrow m = C \cdot V \Rightarrow \mathbf{dm = dC \cdot dV = \frac{dC}{dt} \cdot dt \cdot dV}$

En remplaçant : $\mathbf{dm = D_{\text{libre}} \cdot \frac{d^2C}{dx^2} dV dt = \frac{dC}{dt} \cdot dt \cdot dV}$

$$\Rightarrow \mathbf{\frac{dC}{dt} = D_{\text{libre}} \cdot \frac{d^2C}{dx^2}} \quad \text{C'est la 2^{ème} loi de Fick}$$

Qui relie entre la variation temporelle ($\frac{dC}{dt}$) et la variation spatiale ($\frac{d^2C}{dx^2}$) de la concentration du flux diffusé par le biais du coefficient de diffusion D.

V.I.4. Diffusion à travers une membrane

VI. 4. 1. Différents types de membranes

Une membrane est une couche mince de matière faisant une interface entre deux compartiments liquidiens. La surface membranaire porte des pores à travers les quels le solvant et les solutés peuvent diffuser si leur taille est inférieure à la taille de ces pores. **La surface efficace** d'une membrane **S_{eff}** est égale à la **surface totale de ses pores**. Elle est donnée par la relation :

$$\mathbf{S_{\text{eff}} = n \times S_p}$$

S_p : la surface d'une seule pore ;

n : le nombre total de pores de la membrane.

On distingue :

- 1- les membranes sélectives spécifiques:** Ce sont des membranes constituées de molécules appelées **transporteurs transmembranaires** qui aident à la diffusion en consommant de l'énergie ou non.
- 2- les membranes sélectives dialysantes :** elles ne laissent passer que les particules de dimensions inférieures à la taille de ces pores comme l'eau et les micromolécules (l'urée). Elles bloquent donc les macromolécules.
- 3- les membranes hémiperméables (= semi-perméables):** elles ne laissent passer que de l'eau.

VI. 4. 2. Perméabilité et porosité membranaire (P et ϵ_0)

La perméabilité membranaire notée P par rapport à un soluté donné, est définie comme le rapport entre le coefficient de diffusion en présence de membrane D_{mem} et l'épaisseur de la membrane Δx .

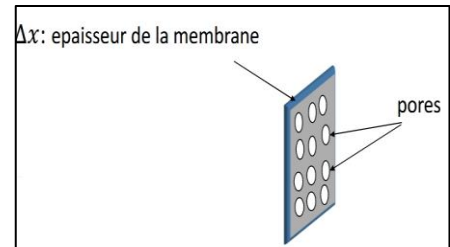
$$P = \frac{D_{mem}}{\Delta x}$$

Où P est la perméabilité de la membrane en (m/s) ;

$$\text{Et : } D_{mem} = D_{libre} \times \frac{S_{eff}}{S_{tot}} = \epsilon_0 \times D_{libre}$$

D_{libre} : est le coefficient de diffusion libre du soluté en l'absence de la membrane.

$$\epsilon_0 = \frac{S_{eff}}{S_{tot}} < 1 : \text{est la porosité de la membrane.}$$



VI. 4. 3. Application de la loi de Fick dans le cas d'une membrane dialysante :

Lorsque deux solutions sont séparées par une **membrane dialysante**, la diffusion (transport passif) des molécules du soluté à travers cette membrane dialysante est dite **dialyse**.

Dans ce cas, la surface S dans la 1^{ière} loi de Fick est remplacée par la surface d'échange qui sera égale à la surface efficace de la membrane S_{eff} :

- La loi de Fick est donnée par la relation:

$$\begin{aligned} \Phi &= J \times S = -D_{libre} \times S \times \frac{dC_M}{dx} \\ &= -D_{libre} \times S_{eff} \times \frac{dC_M}{dx} \end{aligned}$$

Sachant que : $D_{libre} \times S_{eff} = D_{mem} \times S_{tot}$

Diffusion à travers une membrane dialysante.

$$\text{Remplaçons : } \Phi = J \times S = -D_{mem} \times S_{tot} \times \frac{dC_M}{dx}$$

$$\text{Ou } \Phi = J \times S = -D_{mem} \times S_{tot} \times \frac{\Delta C_M}{\Delta x}$$

$$\text{Et puisque : } P = \frac{D_{mem}}{\Delta x} \text{ soit : } \frac{\Phi}{S_{tot}} = -P \times \Delta C_M$$

