

Mme Pr N Ben Raïs Aouad

- **Directeur de la Formation et la recherche en biophysique et médecine nucléaire**

Faculté de médecine et de pharmacie Rabat

- **Chef de service de médecine nucléaire**

Hôpital Ibn SINA Rabat

- **Equipe de médecine nucléaire Ibn Sina**

Pr N Ben Raïs, Pr As I Ghfir, Pr As H Guerrouj

Facteurs de déplacement de la matière

Equipe de médecine nucléaire Ibn Sina

Pr N Ben Raïs Aouad

**Directeur de la Formation et la recherche en biophysique
et médecine nucléaire**

Faculté de médecine et de pharmacie Rabat

Plan

1^{ère} partie: Travail et Energie

- A .Travail d'une force
- B. Energies potentielles et potentiels
- C. Exemples

2^{ème} partie: Déplacements libres de la matière

- A. Viscosité: Définition et Relation fondamentale: Force de frottement
- B. Facteurs modifiant le coefficient de viscosité
- C. Application: viscosité du sang
- D. Fluides newtoniens et non newtoniens

1^{ère} partie: Travail et Energie

A. Travail d'une force

- $\vec{F}$: force qui se déplace sur une distance dl ,
- $\vec{F} = X \cdot \vec{Z}$ X : Quantité de matière
 $\vec{Z}$: champ de force Z
 Z : Intensité du champ
- $dW = \vec{F} \cdot \vec{dl} = F \cdot dl \cdot \cos \alpha$
- α étant l'angle entre le vecteur force et le sens du déplacement.

Travail: Grandeur scalaire sans direction mais avec **un signe et intensité.**

- La dimension du travail:

$$\text{Dim } W = F \cdot l = \text{MLT}^{-2} \cdot L = \text{ML}^2\text{T}^{-2}$$

- Unité SI: Joule: **J**
- **Travail moteur**: est un phénomène spontané produit par le système lui-même qui perd de l'énergie: **$W > 0$ et $E < 0$**
- **Travail résistant**: est un phénomène non spontané et le système reçoit de l'énergie de l'extérieur : **$W < 0$ et $E > 0$**

Travail est dit **moteur** : s'il est positif

$$W > 0 \text{ et } E < 0$$

Travail est dit **résistant** : s'il est négatif

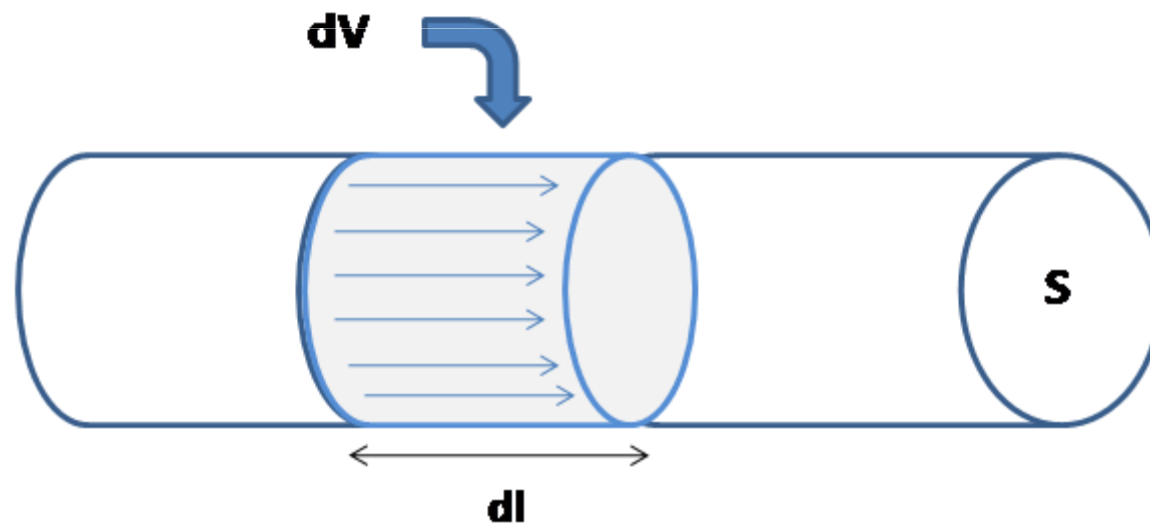
$$W < 0 \text{ et } E > 0$$

$$W = - \Delta E$$

$$dW = - dE$$

- **Cas d'un fluide** : un corps (liquide ou gazeux) dont les molécules sont faiblement liées, et qui peut ainsi prendre la forme du récipient qui le contient
- Considérons le cas du fluide qui se déplace dans une canalisation de section circulaire **S**, **dV** est le volume déplacé sur la distance **dl**.

Cas d'un fluide



- $dW = F \cdot dl$ ($\alpha=0$ et $\cos\alpha=1$)
- Pour le fluide : la force s'exerce sur une surface: $P=F/S$
 $F = P \cdot S$ (P est la pression)
- $dW = P \cdot S \cdot dl$ ($S \cdot dl=dV$)

$$dW = P \cdot dV$$

- La relation entre travail et énergie a été établie par la convention suivante :

$$W = - \Delta E$$

$$dW = - dE$$

- Si le système reçoit de l'énergie**E est +**
- Si le système fournit de l'énergie..... **E est –**

Pour un fluide :

Energie de pression:

$$dE = - P . dV$$

$$dW = P . dV$$

Energie cinétique: $E_c = \frac{1}{2} m v^2$

B. Energies potentielles et potentiels

I. Différence d'énergie potentielle:

- Un travail étant une différence d'énergie entre deux points A et B, lorsque le travail d'une **quantité X** varie de W_A à W_B , son énergie a varié de:

$$\Delta E = -W = - \int_A^B \vec{F} \cdot \overset{\rightarrow}{dl} = - \int_A^B \vec{X} \cdot \vec{Z} \cdot dl$$

- ΔE est appelée **différence d'énergie potentielle**, sa valeur dépend de la **quantité X** et des positions de A et B dans le champ

II. Différence de potentiel

- La valeur de la **quantité X** qui se déplace étant indépendante de sa position dans le champ,
- ΔE peut se mettre sous la forme=

$$\Delta E = X \left(-\int_A^B \vec{Z} d\vec{l} \right)$$

$$\bullet \quad \Delta Y = -\int_A^B \vec{Z} d\vec{l} = Y_A - Y_B \qquad \Delta Y = \Delta E / X$$

ΔY est appelée **différence de potentiel** (ddp) entre A et B qui est égale à $Y_A - Y_B$

- La différence de potentiel est la différence d'énergie potentielle pour l'unité de quantité ($X=1$) $\Delta E = X \cdot \Delta Y$

$$\Delta Y = \Delta E / X$$

Relation entre intensité du champ et potentiel:

- ΔY = différence de potentiel : ddp
- $\Delta Y = -\int \vec{Z} d\vec{l}$ $dY = -\vec{Z} d\vec{l}$ (dl infiniment petit)
 $\vec{Z}$ et $d\vec{l}$ sont colinéaires: même sens et même direction
- $dY = -Z dl$ $\longrightarrow$ $Z = -dY/dl$

- L'intensité du champ Z est l'opposée de la dérivée du potentiel par rapport à la distance

$$Z = -dY/dl$$

- Le signe – signifie que le champ est dirigé dans le sens des potentiels **décroissants**.

C. Exemples de potentiels et d'énergies potentielles

I. Potentiel de pesanteur:

- $X = \text{masse}$ $\vec{Z} = \vec{g}$ $l = \text{hauteur } h$
- $\vec{g}$ et l sont dirigés vers le bas alors que la convention des hauteurs prend comme sens positif du bas vers le haut.
- $dh = - dl$ $dY = -Z \cdot dl$ $dY = gdh$

Potentiel de pesanteur : $Y = gh + cte$

- Si on prend comme origine des potentiels de pesanteur l'origine des hauteurs : $Y = gh$
- Le potentiel de pesanteur est l'énergie potentielle de pesanteur (en joules) portée par l'unité de masse (Kg); il s'exprime en **Joules/Kg**

L'énergie potentielle de pesanteur:

$$E_p = mgh$$

II. Potentiel électrique:

- **X=** quantité d'électricité: **q**
- **VA-VB=** différence de potentiel électrique entre les points A et B
- La différence d'énergie potentielle électrique q lorsque celle-ci se déplace de A à B est

$$\Delta E = q(VA - VB)$$

- Unité de potentiel électrique(en SI)

$$VA - VB = \Delta E / q = \text{Energie} / \text{charge}$$

Unité: **J/Coulomb=volt**

Potentiel électrique produit par une charge ponctuelle q:

- La charge ponctuelle q produit un champ électrique dont l'intensité en un point P situé à une distance d:

$$V_p = Kq/\epsilon d$$

Potentiel électrique produit par un dipôle

$$V_p = Kql.\cos\theta/\epsilon d^2$$

- l est la distance entre les deux charges
- d est la distance entre le point P et le milieu de la distance entre les deux charges.
- θ :angle entre l et d

III. Energie et Potentiel chimiques d'un gaz parfait:

- Énergie de compression ou de détente d'un gaz parfait est :

$$dE = - P. dV$$

- Lorsque la pression varie de P1 à P2, l'énergie de compression ou de détente est:

$$\Delta E = \int_1^2 - P dV$$

- **$P.V = n.R.T$**

(loi des gaz parfaits, n= nombre de moles du gaz parfait)

- **$V = n.R.T/P$**

- $V = n.R.T/P$
- $dV = - n.R.T.dP / P^2$ $dE = - P. dV$
- $dE = -PdV = nRT(dP/p)$ et $\Delta E: \int_1^2 -P dV$
- $\Delta E: \int n.R.T dP/P = n.R.T \int_1^2 dP/P$
 $\Delta E = n.R.T (\ln P_2 - \ln P_1)$
 $\Delta E = E_2 - E_1 = nRT \ln P_2 - nRT \ln P_1$
 $\Delta E = n RT \ln (P_2/P_1)$

L'énergie de pression d'un gaz parfait:

$$E = n.R.T \ln P + cte$$

- Cette relation peut s'écrire:

$$E = n.R.T \ln P + E_o$$

Potentiel chimique d'un gaz parfait:

est le rapport de l'énergie par la **quantité** matière (nombre de **moles**), et s'exprime en joule par mole:

$$\underline{U} = E/n$$

$$\underline{U} = \underline{U}_o + RT \ln P \quad \underline{J/mol}$$

IV. Potentiel chimique d'un gaz dans un mélange:

- Chaque gaz i du mélange a une pression P_i et un potentiel chimique ζ_i
- $\zeta_i = \zeta_{oi} + RT \ln P_i$ **et** $P_i = x_i P$
- Donc $\zeta_i = \zeta_{oi} + RT \ln x_i P$
 $= \zeta_{oi} + RT \ln P + RT \ln x_i$

Avec $\zeta_{oi} + RT \ln P = \text{cte}$

$$\zeta_i = \zeta_{oi} + R.T. \ln x_i$$

V. Potentiels chimiques en solution :

- La relation établie pour un gaz dans un mélange est valable dans les solutions, que ce soit pour le **solvant**(o) ou un des **solutés**(i).
- Pour un soluté i en solution:
$$\mu_i = \mu_{oi} + R.T. \ln X_i$$
 avec $X_i = n_i/n = n_i/n_o + \sum n_i$
- La concentration du soluté est $C_i = n_i/V$
- Lorsque la solution est très diluée, le nombre de moles des solutés est très inférieur au nombre de moles du solvant donc $X_i = n_i/n_o$ et $\sum n_i = 0$

- Le volume V de la solution est dû en quasi-totalité au solvant de volume molaire V_0
- le nombre de moles du solvant est $n_0 \longrightarrow V = n_0 V_0$

- Dans ces conditions: $C_i = n_i/V = n_i/n_0 V_0 = X_i/V_0$

$$\underline{X_i = C_i \cdot V_0}$$

- Le potentiel chimique μ_i d'un soluté i :

$$\begin{aligned} \mu_i &= \mu_{0i} + R.T. \ln X_i = \mu_{0i} + R.T. \ln C_i \cdot V_0 \\ &= \mu_{0i} + RT \ln V_0 + RT \ln C_i \end{aligned}$$

avec : $\mu_{0i} + RT \ln V_0 = \text{cte}$

$$\mu_i = \mu_{0i} + RT \ln C_i$$

VI. Potentiel électrochimique:

- **Ions**(i) de même nature en solution ont un potentiel chimique(J/mol) et électrique(J/c)
- L'ensemble fait le potentiel électrochimique
- Du fait de la différence des unités ,on passe à la seule grandeur commune : l'énergie.
- Pour cela, on utilisera l'énergie de concentration et l'énergie de potentiel électrique

- n_i : nombre de moles de l'ion i
- z_i : valence de l'ion i
- n_i portent une énergie totale E_T
 - chimique = $E_{ch} = \zeta_i . n_i$
 - électrique = $E_{el} = V . Q$
- $Q = z_i . q_0 . n_i$
 - q_0 : charge élémentaire = 96.500C
 - V : potentiel électrique
- Si n_i petit:
 - $dE_{ch} = \zeta_i . dn_i$
 - $dE_{el} = V . z_i . q_0 . dn_i$
 - $dE_T = dE_{ch} + dE_{el}$

$$dE_T = \zeta_i . dn_i + V . z_i . q_0 . dn_i$$

Le potentiel électrochimique: P.E.C

- P.E.C= Energie portée par l'unité de quantité
= $\frac{dE_T}{X}$ et **X** peut être **Q** ou **dni**

- Si **X** est la quantité d'électricité **Q** : Coulomb

$$\text{P.E.C} = V + \frac{\sum \zeta_i}{z_i q_0}$$

$$\text{P.E.C (J/c=volt)}$$

- Si **X** est la quantité de matière **dni** : mole

$$\text{P.E.C} = \sum \zeta_i + V \cdot z_i \cdot q_0$$

$$\text{P.E.C (J/mole)}$$

Tableau récapitulatif

	Potentiel	Energie
Pesanteur	gh	mgh
Électrique	V	qV
Energie d'un gaz dans un mélange	$\zeta_i = \zeta_{oi} + RT \ln P_i$ $\zeta_i = \zeta'_{oi} + RT \ln X_i$	$n_i \cdot R \cdot T \ln P_i + \text{cte}$
Energie de concentration	$\zeta_i = \zeta''_{oi} + RT \ln C_i$ Pot. chimique	
Energie électrochimique	$V_{\text{pot}} + \zeta_i / z_i q_0$	

2^{ème} partie: Déplacements libres de la matière

A. Viscosité

Faits expérimentaux :

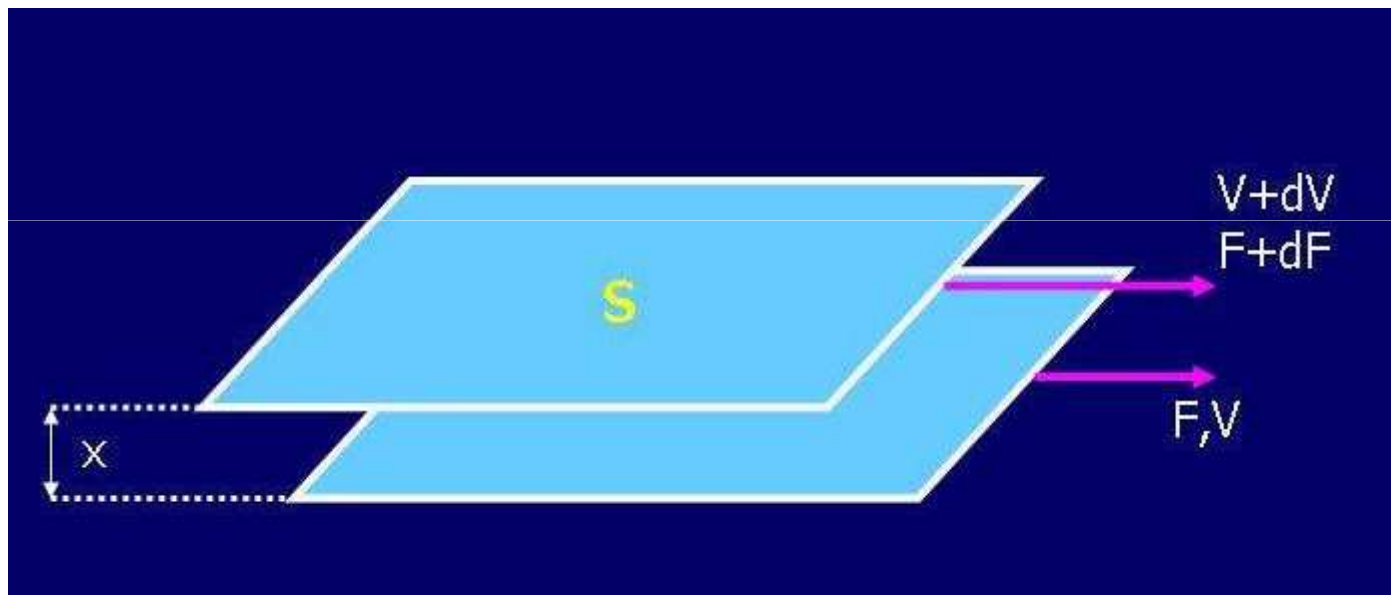
- A volume égal, sous une même pression et à T constante, une solution huileuse s'écoule plus lentement qu'une solution aqueuse.
- La lenteur d'écoulement est due **aux frottements plus ou moins** importants entre les molécules de fluide. A cette propriété des fluides on donne le nom **de viscosité**.

I. Définition

- La viscosité est la grande facilité avec laquelle les différentes couches d'un fluide se déplacent les unes par rapport aux autres.
- Elle est l'expression des forces mécaniques de frottement à l'intérieur du fluide et des forces de liaisons intermoléculaires qu'il faut rompre pour mobiliser les unes par rapport aux autres les molécules d'un fluide en écoulement.
- **La fluidité= l'inverse de la viscosité**

II. Relation fondamentale

- Le fluide est assimilé à un empilement de couches mobiles les unes par rapport aux autres.
- S'il faut une force $\mathbf{F}$ pour déplacer la couche « inférieure » de surface $\mathbf{S}$ avec la vitesse $\mathbf{v}$, il faut une autre force $\mathbf{F} + d\mathbf{F}$ pour mobiliser la couche supérieure de même surface $\mathbf{S}$, distante de la première de dx , avec la vitesse $\mathbf{v} + d\mathbf{v}$ (voir schéma ci-dessous).



La force F de frottement, donc de viscosité qui existe entre ces deux lames est :

- Proportionnelle à la surface **S** des lames
- Proportionnelle à la différence de vitesse **dv** entre les deux lames
- Inversement proportionnelle à la distance **dx** qui sépare les deux lames
- Proportionnelle au **gradient de vitesse: dv/dx**
- F dépend aussi du **fluide** par l'intermédiaire du **coefficient de viscosité η** de celui-ci

$$**F = \eta S dv/dx**$$

Dimension et Unités du coefficient de viscosité:

$$\eta = F \cdot dx / S \cdot dv$$

$$\text{Dim } \eta = \text{MLT}^{-2} \text{ L} / \text{L}^2 \text{ L T}^{-1} = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$$

L'unité : S.I est le Kg/m.s ou **POISEUILLE**

$$1 \text{ Poiseuille} = 10 \text{ Poise}$$

Coefficient de viscosité relatif η_r :

$$\eta_r = \eta / \eta_{\text{eau}}$$

η_r est un rapport de viscosité : n'a ni dimension ni unité.

Utilité pratique: Facile à mesurer

B. Facteurs modifiant le coefficient de viscosité

I. Pour un gaz ou liquide pur:

- Nature du fluide
- Température

Exemple: η dans eau à 20°C est de 10^{-3} Poiseuille

II. Pour des solutions et suspensions:

- Il faut distinguer les solutions micromoléculaires et macromoléculaires des suspensions :

1-Solutions micromoléculaires:

Le coefficient de viscosité dépend de :

- ❖ la nature du solvant
- ❖ la nature du ou des solutés
- ❖ la concentration du ou des solutés.
- ❖ la température

2-Solutions macromoléculaires et suspensions:

Particule: taille $> 10^{-7} \text{ m}$ (visible au $\mu.o$)

Exemple de particules en suspension:

Globules rouges, globules blancs.....

Solvant: plasma

Macromolécule : taille $< 10^{-8} \text{ m}$ (invisible au $\mu.o$)

Exemple de macromolécules protéiques:

Albumine

Globulines(alpha1,alpha2,Béta1,Béta2)

Fibrinogène

Le coefficient de viscosité dépend de :

- ❖ la viscosité du solvant,
- ❖ la forme de la suspension ou de la macromolécule
- ❖ du volume relatif.

Tous ces paramètres sont réunis dans la relation

$$\eta = \eta_0 (1 + K\Phi) \quad \text{Loi d'EINSTEIN}$$

- η : coefficient de viscosité de la **solution** ou de la suspension
- η_0 : coefficient de viscosité du **solvant**
- K : facteur dépendant de la **forme** de la **macromolécule** :
 - ✓ $K = 2,6$ pour les macromolécules de forme sphérique
 - ✓ $K > 1000$ pour les macromolécules de forme linéaire

- Φ : volume relatif

C'est le rapport du volume des macromolécules sur le volume total de la solution ou suspension

$$\Phi = \frac{\text{Volume des macromolécules(ou particules)}}{\text{Volume total de la solution (ou de la suspension)}}$$

C. Application: Viscosité du sang

Le sang est considéré comme une suspension de globules, essentiellement rouges (GR) dans du plasma(solvant):

GR sont symétriques: **K=2,6**

Solvant:**Plasma**

Φ =Volume GR/Volume Sang
= Hématocrite=**Ht**

$$\eta_{\text{sang}} = \eta_{\text{plasma}} (1 + K\Phi)$$

$$\eta_{\text{sang}} = \eta_{\text{plasma}} (1 + 2,6Ht)$$

η_{sang} augmente:

- η_{plasma} augmente

- Ht augmente : polyglobulie
(Nbre GR augmente: Polyglobulie)

NB: Ht diminue en cas d'anémie

η_{sang} augmente:

Lors d'une baisse de température: η augmente

Cette augmentation de viscosité entraîne une mauvaise circulation au niveau des extrémités responsable d'engelures

η_{plasma} : $\eta_{\text{plasma}} = \eta_{\text{eau}}(1 + K\Phi)$

Plasma = solution de macromolécules protéiques:

- Albumine
- Globulines(alpha1,alpha2,Béta1,Béta2)
- Fibrinogène

Φ = Volume relatif des macromolécules

La viscosité du plasma augmente en cas d'inflammation où il y 'a surproduction des macromolécules **linéaires :fibrinogène, alpha 2 globulines**, ou encas d'injection de macromolécules linéaires :les Dextranes

D-Fluides Newtoniens et non Newtoniens:

Fluide newtonien: η est indépendant de la vitesse d'écoulement du fluide.

Si la vitesse modifie η , le fluide est dit **NON NEWTONIEN**.

la structure du fluide varie avec la vitesse d'écoulement et donc la viscosité.

- Vitesse d'écoulement du sang:
 - **A faible vitesse** on assiste au phénomène d'agglomération réversible des GR. Ces derniers ne sont plus séparés mais s'agglomèrent en **rouleaux** (influence du paramètre K qui augmente fortement avec la dissymétrie).
 - A plus forte vitesse le phénomène s'inverse. Le mouvement détruit les agglomérats.
- Le sang est un fluide non Newtonien.**