

Notions des phénomènes de transfert

Licence -L2 -GP

Chapitre I : Introduction aux phénomènes de transfert

I.1-Définitions

Un phénomène de transfert (ou phénomène de transport) est un *phénomène irréversible* durant lequel une *grandeur physique est transportée* par le biais de molécules et qui a pour origine l'*inhomogénéité d'une grandeur intensive*. C'est la tendance spontanée des systèmes physiques et chimiques à rendre uniformes ces grandeurs qui provoquent le transport.

L'étude de chaque phénomène de transport se réfère à une certaine entité (caractéristique) transférée, par exemple : la quantité de mouvement nécessaire pour augmenter la *vitesse* d'un fluide, la chaleur afin d'augmenter ou diminuer la *température* d'un liquide ou d'un solide et la *masse* du liquide transportée dans une conduite ou la dispersion d'un liquide coloré au sein d'un autre liquide transparent.

Les grandeurs physiques transférées les plus connues sont la température (*transfert thermique*), la matière (*transfert de masse*) et la vitesse (*transfert de quantité de mouvement*).

I.2- Différents phénomènes de transfert

Les phénomènes de transfert les plus connus sont :

a) Transfert thermique (de chaleur) : Pour lequel la grandeur transférée est la chaleur (Température), ce transfert s'effectue entre deux zones où règnent des températures différentes : il se fait toujours de la température la plus élevée vers la température la plus basse (moins élevée). La *différence de température* est appelée : la force motrice du transfert thermique.

b) Transfert de masse (de matière) : Pour lequel la grandeur transférée est la matière (Concentration massique), ce transfert s'effectue entre deux zones où règnent des concentrations massiques différentes, il se fait toujours de la concentration la plus élevée vers la concentration la plus faible. La *différence de concentration* est appelée : la force motrice du transfert de masse.

b) Transfert de quantité de mouvement : Pour lequel la grandeur transférée est la quantité de mouvement (Vitesse), ce transfert s'effectue entre deux entités qui possèdent des vitesses différentes, il se fait toujours de l'entité qui a la vitesse la plus élevée vers celle qui a la vitesse la plus faible. La *différence de vitesse* appelée : la force motrice du transfert de quantité de mouvement.

I.3- Différents modes de transfert

On distingue trois modes de transfert :

a) Transfert par conduction (diffusion moléculaire pour le transfert de matière) : La conduction de chaleur est un mode de transfert d'énergie thermique qui ne nécessite pas de mouvements de matière. La chaleur est transférée de proche en proche par simple agitation des atomes à travers une paroi solide. Plus la différence de température (force motrice) entre les surfaces est importante, plus ce transfert sera efficace. Par contre, il dépend aussi de la conductivité thermique 'k' du matériau.

La conduction de quantité de mouvement se fait par transport visqueux.

Exemples :

- ✓ Conduction de la chaleur à travers une paroi solide
- ✓ Conduction de la quantité de mouvement dans la couche limite (couche de liquide en mouvement au voisinage d'une paroi solide)
- ✓ Diffusion de matière dans la couche limite (couche de contact entre le liquide et le solide à dissoudre).

b) Transfert par convection : l'échange de chaleur entre une surface et un fluide en mouvement à son contact (*convection forcée*), ou le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre (*convection naturelle*). Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones chaudes vers les zones froides.

• un transfert convectif (chaleur, matière ou quantité de mouvement) se fait lors d'un fluide en mouvement.

Exemples :

- ✓ chauffage domestique (transfert de chaleur et de quantité de mouvement par conduction et convection)
- ✓ écoulement dans un échangeur de chaleur (transfert de chaleur et de quantité de mouvement par conduction et convection)

- ✓ mélange dans un réacteur (transfert de chaleur, de matière et de quantité de mouvement par conduction et convection)
- ✓ bassin d'aération dans une station d'épuration des eaux (STEP) (transfert de matière et de quantité de mouvement par convection)

c) Transfert par Rayonnement : le rayonnement constitue un mode original du transfert, spécifique à l'énergie thermique. Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions, lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, ce dernier peut en réfléchir une partie et en absorber une autre sous forme de chaleur qu'il va utiliser pour élever sa température. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et ne nécessite aucun support matériel contrairement aux deux premiers modes de transfert. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques.

Exemples :

- ✓ Le séchage des boues de STEP par rayonnement solaire.
- ✓ Le chauffage dans les serres agricoles par rayonnement solaire
- ✓ Les plats sont chauffés dans un four à micro-ondes grâce à la chaleur transportée par des rayonnements.

I.4- Lois linéaires de transport

Loi de *Newton* de viscosité :

$$\vec{\tau} = -\mu \overrightarrow{\text{grad}} v$$

Exprime que la contrainte tangentielle τ en newton par m^2 ou contrainte de frottement visqueux des filets de fluide les uns sur les autres en écoulement laminaire, est proportionnelle au gradient de la vitesse d'écoulement des filets. La contrainte de frottement visqueux (dimension d'une pression : **Pa**) peut aussi être présentée comme un flux de quantité de mouvement par unité de surface ou densité du flux de quantité de mouvement. La constante de proportionnalité μ est la viscosité dynamique du fluide en (**Pa.s** ou **kg. m⁻¹.s⁻¹**).

Loi de *Fourier* de conduction de chaleur :

$$\vec{q} = -k \overrightarrow{\text{grad}} T$$

Exprime qu'au sein d'un solide homogène et isotrope (*milieu isotrope* c'est-à-dire que les propriétés physiques du matériau sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace) à température non uniforme, la densité du flux de chaleur q exprimée en **J. m⁻².s⁻¹** ou **W. m⁻²** ou **cal.cm⁻².s⁻¹** est proportionnelle au gradient de température. La constante de proportionnalité k est la conductivité thermique du solide exprimée en **cal. cm⁻¹.s⁻¹.°K⁻¹**.

Loi de *Fick* de diffusion de matière :

$$\vec{j}_A = -\rho \mathcal{D}_{AB} \overrightarrow{\text{grad}} \omega_A$$

Exprime qu'au sein d'un système binaire A et B, de composition non homogène, le flux massique j_A de l'espèce A (quantité de matière qui passe à travers une unité de surface et par unité de temps (**g. cm⁻².s⁻¹**)) est proportionnel au gradient de la concentration massique de l'espèce A notée par ρ_A . Par définition, la fraction massique $\omega_A = \frac{\rho_A}{\rho}$ et la fraction molaire $x_A = \frac{c_A}{c}$

La constante de proportionnalité \mathcal{D}_{AB} est le coefficient de diffusion ou diffusivité de matière de l'espèce A dans le milieu B exprimée en **cm². s⁻¹**.

Il existe une analogie entre ces trois lois, qui s'exprime par la même formulation mathématique :

Densité de flux = (diffusivité) · (gradient de potentiel).

$$\tau_{yx} = -\mu \overrightarrow{\text{grad}} v = -\mu \frac{\partial(v_x)}{\partial y} = -\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial y} = -\nu \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial y}$$

$$q_y = -k \overrightarrow{\text{grad}} T = -k \frac{\partial(T)}{\partial y} = -\left(\frac{k}{\rho C_p}\right) \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial y} = -\alpha \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial y}$$

$$j_{Ay} = -\rho \mathcal{D}_{AB} \overrightarrow{\text{grad}} \omega_A = -\rho \mathcal{D}_{AB} \frac{\partial \omega_A}{\partial y} = -\rho \mathcal{D}_{AB} \frac{\partial \left(\frac{\rho_A}{\rho}\right)}{\partial y} = -\mathcal{D}_{AB} \frac{\partial(\rho_A)}{\partial y}$$

Cette formulation n'est valable que pour les problèmes à une seule dimension. Dans la première équation, la masse volumique ρ est constante et la viscosité cinématique ν ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$) s'appelle diffusivité de quantité de mouvement. Dans la deuxième équation, le produit de la masse volumique et de la capacité calorifique ρC_p est constant et α ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$) s'appelle diffusivité thermique. La troisième équation est obtenue aussi pour ρ constante.

Ces trois équations signifient respectivement qu'il y a un transfert de quantité de mouvement parce qu'il y a un gradient de concentration de quantité de mouvement (ρv_x), il y a un transfert de chaleur parce qu'il y a un gradient de concentration d'énergie ($\rho C_p T$), il y a un transfert de matière parce qu'il y a un gradient de concentration massique (ρ_A).

Remarque

Par convention, la densité de flux est comptée positivement dans le sens d'écoulement de la chaleur ou de matière c'est-à-dire vers les températures ou concentrations décroissantes.

Le gradient est un vecteur porté par le même axe mais de sens contraire au flux (de petites valeurs vers les grandes valeurs) d'où le signe négatif dans les lois de transfert.

Table I.1- Viscosity of water and air at 1 atm pressure

Temperature T (°C)	Eau		Air	
	Viscosity μ (cp)	Kinematic Viscosity $\nu \cdot 10^2$ ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)	Viscosity μ (cp)	Kinematic Viscosity $\nu \cdot 10^2$ ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)
0	1.787	1.787	0.01716	13.27
20	1.0019	1.0037	0.01813	15.05
40	0.6530	0.6581	0.01908	16.92
60	0.4665	0.4744	0.01999	18.86
80	0.3548	0.3651	0.02087	20.88

Table I.2- Experimental values of thermal conductivity of some liquids at atmospheric pressure

Substance	Temperature T (°C)	Thermal Conductivity k ($\text{cal. cm}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{°K}^{-1}$)
Ether	30	0.000328
Ethyl alcohol	20	0.000400
Glycerol	20	0.000703
Water	20	0.00143
	60	0.00156
	100	0.00160

Table I.3- Experimental values of thermal conductivities of some solids

Substance	Temperature T (°C)	Thermal Conductivity k ($\text{cal. cm}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{°K}^{-1}$)
Aluminium	100	0.492
Copper (Cuivre)	18	0.918
	100	0.908
Steel (Acier)	18	0.112
	100	0.107

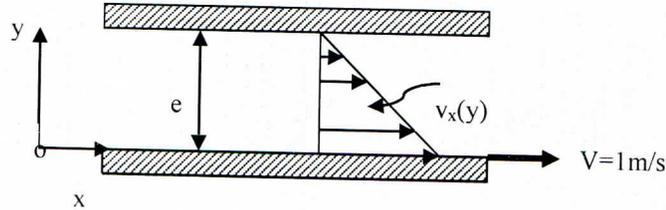
Table I.5- Experimental diffusivities in the liquid state

A	B	Temperature T (°C)	Mol fraction of A x_A	Mass Diffusivity $\mathcal{D}_{AB} \cdot 10^5$ ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)
Ethanol	Water	25	0.05	1.13
			0.275	0.41
			0.50	0.90
			0.70	1.40
			0.95	2.20

Exercice N°1 :

Soit l'écoulement d'un fluide visqueux (eau) entre deux plaques parallèles, la plaque inférieure se déplace suivant l'axe ox à une vitesse constante de 1 m/s tandis que la plaque supérieure est fixe. Calculer le flux de quantité de mouvement (τ_{yx}) si l'épaisseur entre les deux plaques est égale à 1 mm et la température du fluide est égale à 20°C.

Solution :



Sous l'action du frottement, il s'établit dans le fluide un état de mouvement tel que les couches qui se trouvent en contact avec les plaques ont la même vitesse qu'elles (*condition d'adhérence ou de non glissement*) tandis que les couches intermédiaires glissent les unes sur les autres avec des vitesses 'v' proportionnelles à leur distance y à la plaque fixe.

D'après la loi de Newton $\tau_{yx} = -\mu \frac{\partial(v_x)}{\partial y}$

D'après le tableau I.1 : à 20 °C la viscosité dynamique de l'eau est égale à 1.0019 cp.

Dans le système CGS, l'unité de la viscosité c'est $\text{g.cm}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ (1poise= $1 \text{ g.cm}^{-1}.\text{sec}^{-1}$)

En système SI, l'unité de la viscosité c'est Pa .sec ou bien $\text{kg. m}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ (1Pa .sec= 10 poise),

Sachant que $1\text{cp} = 10^{-2} \text{ poise} = 10^{-3} \text{ Pa. sec}$ donc $\mu = 1.0019 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m. sec}$

D'après le schéma ci-dessus, $\frac{d(v_x)}{dy} = \frac{\Delta v_x}{\Delta y} = \frac{0-1}{e} = \frac{-1}{0.001} = -10^3 \text{ s}^{-1}$

Finalement nous obtenons $\tau_{yx} = -\mu \frac{d(v_x)}{dy} = -1.0019 \times 10^{-3} \times (-10^3) = 1.0019 \text{ N/m}^2$

Exercice N°2 :

Une plaque en aluminium d'épaisseur $e = 0.640 \text{ cm}$ est exposée aux températures $T_0 = 110.0 \text{ °C}$ et $T_1 = 90.0 \text{ °C}$. Calculer la densité du flux thermique (q) qui traverse la plaque en W/cm^2 .

Solution :

D'après la loi de Fourier $q_y = -k \frac{\partial(T)}{\partial y} = -k \frac{(T_1 - T_0)}{e}$

D'après le tableau I.3 : à $T_m = \frac{(T_1 + T_0)}{2} = 100 \text{ °C}$, la conductivité thermique de l'Aluminium est : $k = 0.492 \text{ (cal. cm}^{-1} .\text{s}^{-1} \text{ °K}^{-1})$.

$q_y = -0.492 \times \frac{(90 - 110)}{0.640} = -0.492 \times \frac{(-20 \text{ °K})}{0.640} = 15.375 \text{ (cal. cm}^{-2} .\text{s}^{-1})$.

Sachant que $1 \text{ cal} = 4.184 \text{ Joules}$, $q_y = 15.375 \times 4.184 = 64.329 \text{ (Joules. cm}^{-2} .\text{s}^{-1}) = 64.329 \text{ (watts. cm}^{-2})$