

# Notions des phénomènes de transfert

## Programme:

### Chapitre 1 : Introduction aux modes de transfert

Bilans de matière, d'énergie et de quantité de mouvement

### Chapitre 2 : Transfert de chaleur

Conduction, Convection, Rayonnement

### Chapitre 3 : Transfert de matière

Transfert de matière par diffusion moléculaire, Transfert de matière par convection

### Chapitre 4 : Transfert de quantité de mouvement

Propriétés des fluides, Statiques des fluides, Equations de conservation générales.

# **Chapitre I**

## **Introduction aux modes de transfert**

# Chapitre I : Introduction aux modes de transfert

## I.1. Introduction

Dans ce cours, trois disciplines scientifiques seront abordées :

- *Le transfert de chaleur* : l'étude du transfert de la quantité de chaleur décrivant la variation de la température dans un milieu.
- *Le transfert de matière* : l'étude du transfert de quantité de matière décrivant l'évolution de la concentration en une espèce dans un milieu.
- *Le transfert de quantité de mouvement* : l'étude du transfert de quantité de mouvement dans un fluide visant à décrire l'évolution de la vitesse d'un fluide.

## I.2. 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 physico-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 qui sont la chaleur, la matière et la quantité de mouvement.

Les corps qui assurent le transfert de ces grandeurs physiques sont appelés porteurs de charge.

## I.3 Différents phénomènes de transfert

Les phénomènes de transfert les plus connus sont :

- Transfert de chaleur (thermique)** : 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.
- 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 plus élevée

vers la concentration la plus faible. La différence de concentration est appelée: **la force motrice** du transfert de masse.

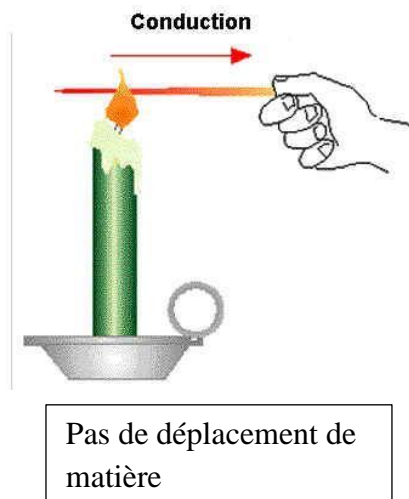
c) **Transfert de quantité de mouvement**: Pour lequel la grandeur transférée est la quantité de mouvement (Vitesse), ce transfert s'effectue entre deux entités qui possèdent des vitesses différentes, il se fait toujours de l'entité qui a la vitesse la plus élevée vers celle qui a la vitesse la plus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

#### I.4 Différents modes de transfert

On distingue trois modes de transfert :

a. **Transfert par conduction (diffusion moléculaire pour le TM)** : La conduction 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. Plus la différence de température (**force motrice**) entre deux matériaux est importante, plus ce transfert sera efficace. Par contre, il dépend aussi de la conductivité thermique des matériaux.

Donc **le transfert de chaleur**, il se fait à partir d'un contact direct entre **deux solides immobiles** portés à **deux températures différentes**.



#### Exemples:

➤ Un enfant qui touche une tige métallique chaude, la chaleur passe directement de la tige à la main de l'enfant car il y'a un gradient de température entre la tige métallique et la main de l'enfant

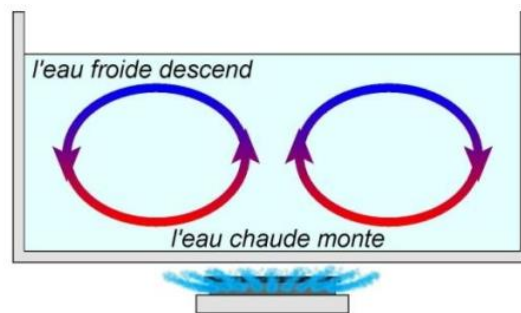
b. **Transfert par convection** : l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact, ou le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre. Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones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

- La convection = transfert de chaleur avec transfert de matière.
- Phénomène très usuel (météo, chauffage domestique...)

- Ils sont à l'origine de certains phénomènes océanographiques (courants marins), météorologiques (orages), géologiques (remontées de magma).

### Exemples:

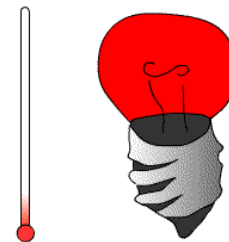
C'est par convection que la chaleur, transmise à de l'eau à l'intérieur d'une chaudière, est transportée jusqu' aux différentes pièces d'un appartement. C'est par convection qu'un produit chimique est transporté du réservoir dans lequel il est stocké jusqu'à l'appareil dans lequel il est utilisé



- 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:

- La chaleur que reçoit la terre à partir du soleil se fait grâce aux rayonnements.
- Les plats sont chauffés dans un four à micro-ondes grâce à la chaleur transportée par des rayonnements micro-ondes.



A distance qu'il y ait ou non de la matière

### I.5 Définition d'un système.

**1. Système :** On appelle système l'ensemble de la matière située à l'intérieur d'un volume  $V$  délimité par une enveloppe fermée de surface externe  $S$ . La matière située à l'extérieur de cette surface constitue le milieu extérieur.

**2. Système fermé :** Si, durant le temps d'observation, le système n'échange pas de matière avec le milieu extérieur, on dit qu'il est fermé. Dans le cas contraire, on dit qu'il est **ouvert**. Suivant les circonstances, il pourra éventuellement être semi-ouvert, ou semi-fermé. Seul le système ouvert peut fonctionner en régime stationnaire ou permanent.

**3. Système isolé :** De manière analogue, un système sera qualifié d'isolé s'il n'a pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur. Il sera non-isolé, s'il y a échange de chaleur.

#### 4. Un système est caractérisé par deux catégories de paramètres :

- **des grandeurs extensives :** si elles sont proportionnelles à la quantité du caractère du système: masse, nombre de moles, volume, entropie, quantité de chaleur.....etc.
- **des grandeurs intensives :** indépendantes de la quantité du système (en particulier, si sa valeur est la même en tout point d'un système homogène) : densité, concentration, Pression, Température, PH...etc.

**5. Un système en équilibre :** on dit un système est en équilibre si aucune de ses propriétés macroscopiques n'évolue dans le temps. Mais un système ouvert en régime permanent n'est pas en équilibre !

**6. Un système évolue,** spontanément ou pas, pour atteindre un état d'équilibre.

#### I.5.1 Les contraintes d'un système.

Le régime de fonctionnement d'un appareil physico-chimique quelconque résulte de la combinaison d'un très grand nombre de facteurs caractérisant soit la transformation chimique elle-même, soit les processus de transport de matière, de chaleur et de quantité de mouvement, etc. On appelle contraintes du système toutes les relations mathématiques entre ces différents facteurs.

Quand on décrit mathématiquement le fonctionnement d'un tel système, il est parfois difficile d'être certain d'avoir tenu compte de toutes les contraintes, et inversement, il est difficile de s'assurer que les nombreuses relations mathématiques que l'on est tenté d'écrire sont réellement indépendantes les unes des autres. En dénombrant toutes ces relations, on admet généralement qu'elles appartiennent aux 5 groupes suivants :

**a) Principes de conservation de grandeurs extensives.**

- Conservation de la matière
- Conservation de l'énergie
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation de la charge électrique

**b) Les lois d'équilibre statique, exprimant un équilibre mécanique, physique ou chimique.**

Ces lois constituent des applications sous diverses formes du premier principe de la thermodynamique.

$$dU = dQ + dW$$

**Tableau 1 : Les applications sous diverses formes du premier principe de la Thermodynamique**

Propriété	Définition	Symbole	Unité S.I.
Volume	Volume d'une substance	V	m <sup>3</sup>
Énergie interne	Energie cinétique de translation, de rotation et vibratoire d'une substance	E	Joules (J)
Enthalpie	Est l'énergie totale d'un système soit la somme de tous les types d'énergie qu'il contient à pression constante. $H = E + P \cdot V$	H	Joules (J)
Entropie	L'entropie est une mesure du défaut de structure ou de la quantité de désordre dans un système.	S	Joules (J/K)
Énergie libre de Gibbs	Est une fonction d'état extensive $G = H - T \cdot S$	G	Joules (J)

**c) Les lois cinétiques exprimant le sens et la vitesse d'évolution d'un système.**

En fait, le sens de l'évolution d'un système isolé quelconque est fixé par une loi unique :

Le second principe de la thermodynamique, qui énonce que l'entropie de ce système ne peut qu'augmenter.

L'expression de la vitesse de création d'entropie dans le système constituerait un moyen unique et très général de mesure de la vitesse d'évolution du système, mais cette méthode est trop abstraite pour être utilisée pratiquement, surtout à l'échelle industrielle. En outre, cette loi cinétique générale ne nous renseignerait que sur l'évolution du contenu énergétique global du système, alors que nous sommes au contraire intéressés par l'évolution et la conversion, les unes dans les autres, des divers constituants et des diverses formes d'énergie d'un système.

**C'est ce qui justifie l'importance pratique des nombreuses lois** qui régissent les vitesses des divers processus élémentaires : vitesses des réactions chimiques, vitesses des transports de matière (loi de Fick), de chaleur (loi de Fourier), de quantité de mouvement (loi de Newton), d'électricité (loi d'Ohm), etc.

#### **d) Les relations capacitives.**

Ce sont celles qui expriment la quantité, par unité de volume, de chacune des grandeurs extensives (matière, chaleur, électricité et quantité de mouvement).

#### **e) Les relations de texture géométrique.**

Ces relations sont toutes celles qui donnent la forme et les dimensions d'un appareil ou d'un domaine de phase : par exemple la distribution des diamètres de pores dans un catalyseur solide, la distribution des diamètres de gouttes dans une émulsion, etc. Ce sont également les relations qui donnent la distribution des temps de séjour d'un fluide s'écoulant à travers le système, etc.

### **I.5.2 Les actions sur les grandeurs extensives**

Toutes les opérations physiques ou chimiques de l'ingénierie chimique impliquent une ou plusieurs actions des trois grandeurs suivant :

-Transport ; Transfert ; Transformation



## I.2 Les lois linéaires de transport et de capacité.

### I.2.1 Bilans de matière, d'énergie et de quantité de mouvement

Le génie des procédés, et en particulier le mouvement des fluides, est régi par des principes dits “de conservation” ou encore de “bilan” (terminologie chère au génie chimique). Un bilan décrit les variations temporelles d'une grandeur au sein d'un système, que l'on considérera ouvert (au sens de la thermodynamique), c'est-à-dire que la grandeur peut rentrer ou sortir du système.

### I.2.2 Les lois linéaires de transport moléculaire.

Considérons un milieu qui est à la fois immobile (aucun écoulement d'ensemble) et tranquille (aucun remous ni tourbillon). Les seuls mouvements possibles se font à l'échelle moléculaire.

L'agitation thermique des molécules, des ions ou des électrons libres au sein de la matière, entraîne des évolutions macroscopiques de systèmes, que nous décrivons par des lois à notre échelle, dont les plus simples sont les lois linéaires suivantes :

➤ **La loi de Fick :**

$$\varphi_M = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

Exprime qu'au sein d'un mélange A+B, de composition non homogène, le flux M du constituant A (nombre de moles traversant par diffusion un m<sup>2</sup> par seconde) est proportionnel au gradient de concentration de ce constituant, dans la direction du flux. D est le coefficient de diffusion de A dans B (qu'on appellera plus loin : diffusivité).

➤ **La loi de Fourier :**

$$\varphi_T = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

Exprime qu'au sein d'un milieu tranquille à température non uniforme, le flux de chaleur (joules par m<sup>2</sup> et par seconde) est proportionnel au gradient de température dans la direction du flux.

$\lambda$  est la conductivité thermique du milieu.

➤ **La Loi de Newton :**

$$\tau = -\mu \cdot \frac{\partial v}{\partial x}$$

Énonce que la contrainte tangentielle de frottement visqueux des filets les uns sur les autres, en newton par m<sup>2</sup>, est proportionnelle au gradient de la vitesse d'écoulement des

filets, normalement à cet écoulement ( $x$  est le sens de l'écoulement,  $y$  la normale à  $x$ ). Or la contrainte (dimension d'une pression :  $MLT^{-2}$ ,  $L^{-2} ML^{-1}T^{-2}$ ) peut aussi être présentée comme un flux de quantité de mouvement en  $kg.m.s^{-1}$  par  $m^2$  et par seconde, (dimension :  $MLT^{-1} \cdot L^{-2} \cdot T^{-1} ML^{-1}T^2$ ) est la viscosité dynamique du fluide.

En adoptant le langage de la thermodynamique des phénomènes irréversibles, nous exprimerons ces trois lois cinétiques par la même formulation mathématique, en introduisant les notions d extensité (grandeur de position) et de potentiel (grandeur de tension) : (flux d'extensité) = (conductivité) · (gradient de potentiel).

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} V$$

**Tableau 2 : Les principales lois linéaires de transport moléculaire.**

Loi	Extensité	Potentiel	Conductivité	Equation
<b>Fick</b>	Nombre de mole d'un constituant d'un mélange	Concentration molaire du constituant	$D$ : Le coefficient de diffusion	$\varphi_M = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial X}$
<b>Fourier</b>	Quantité de chaleur	Température	$\lambda$ : est la conductivité thermique du milieu	$\varphi_T = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial X}$
<b>Newton</b>	Quantité de mouvement	Vitesse d'écoulement	$\mu$ : la viscosité dynamique	$\tau = -\mu \cdot \frac{\partial T}{\partial X}$