



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي
Université Echahid Hamma Lakhdar-d'El Oued-



Faculté de la Technologie
Département de génie des procédés et pétrochimie
(GP) 2ème année LMD

كلية التكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق والبتروكيمياء

Cour Notions Des Phénomènes De Transfert

2019/2020

Fait par : **Dr. A. TABET**

I. Introduction aux phénomènes de transfert

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 de vaporiser un liquide 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 chaleur (transfert thermique), la matière (transfert de masse) et la quantité de mouvement.

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

I.1 Différents phénomènes de transfert

Les phénomènes de transfert les plus connus sont :

- a) **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.
- 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 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.2 Différents modes de transfert

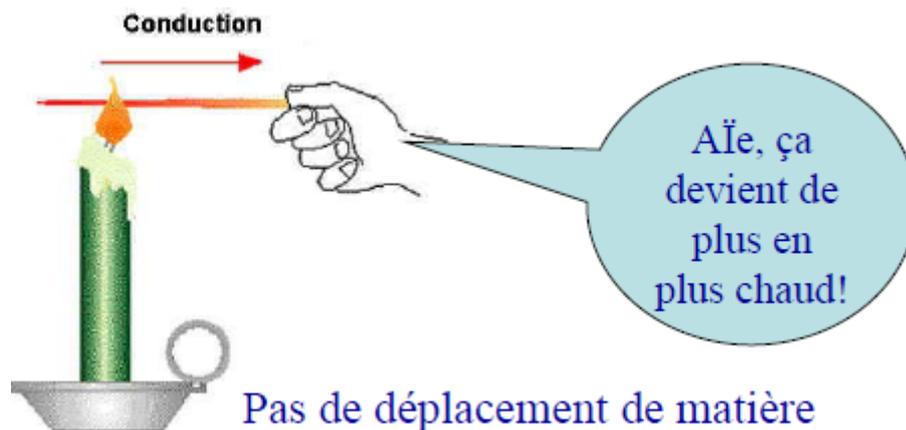
On distingue trois modes de transfert

- 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



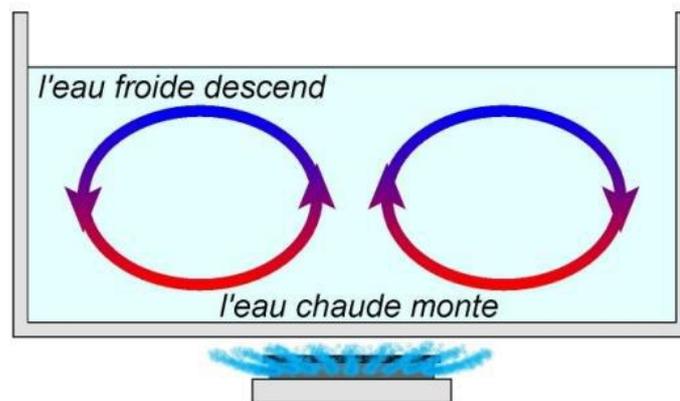
- b) **Transfert par convection** : l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact, ou le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre. Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des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

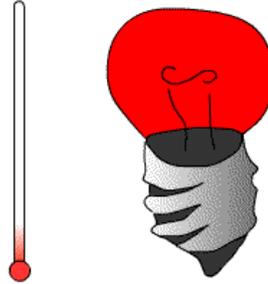
- ✓ C'est par convection que la chaleur, transmise à de l'eau à l'intérieur d'une chaudière, est transportée jusqu'aux différentes pièces d'un appartement.
- ✓ C'est par convection qu'un produit chimique est transporté du réservoir dans lequel il est stocké jusqu'à l'appareil dans lequel il est utilisé.



- 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.

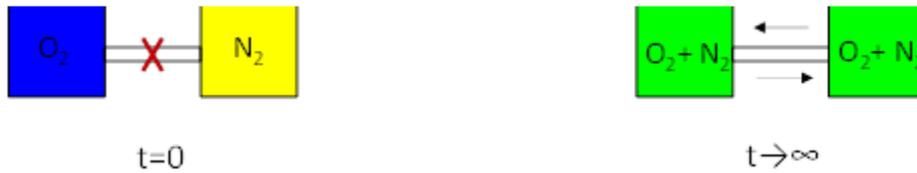


A distance qu'il y ait ou non de la matière

II. Transfert de masse

Introduction

- Le transfert de matière (ou transfert de masse) joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base mises en œuvre au cours de la **transformation des aliments ou de produits biologiques** (séchage, salage, sucrage, absorption, adsorption, cristallisation, extraction, distillation, ...).
- Au cours de ces opérations, le transfert de matière est classiquement **le facteur limitant la vitesse du procédé**, même si le transfert de chaleur et le flux du produit peuvent aussi être en cause.
- Le transfert de matière a aussi un rôle très important **lors de l'emballage des produits** et de leur **entreposage** : transfert d'humidité, de gaz, de composés de saveur à travers le matériau d'emballage.
- Le transfert de matière consiste en la migration de composés à l'intérieur d'une phase ou entre des phases. Cette migration résulte d'un changement dans l'équilibre d'un système causé par une/des différences de potentiel(s) : différence de concentration d'une espèce d'un point à un autre, différence de température et/ou différence de pression.
- Toute différence de potentiel entraîne une évolution spontanée vers l'uniformité : une différence de concentration d'un composé entre deux points d'un système entraîne donc un transfert de matière jusqu'à atteindre l'uniformité de concentration.



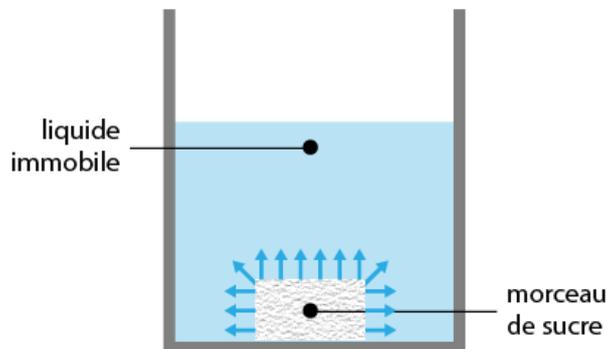
Lorsqu'on s'intéresse au transfert de matière, on doit distinguer deux cas, selon que le transfert se fait au sein d'une phase ou entre deux phases partiellement ou totalement immiscibles. En outre, chacune des phases peut être mobile ou immobile



a) Diffusion

La diffusion est un processus lent : les molécules migrent dans un solide ou dans un fluide considéré comme immobile (écoulement laminaire).

Exemple : diffusion des molécules de sucre, dispersion par agitation moléculaire suivant des trajectoires aléatoires entre les molécules d'eau.



Un morceau de sucre dans une tasse de café. Celui-ci commence à fondre et se répand dans la tasse par diffusion. Les molécules de sucre plongées dans du café essayent de se frayer un chemin à travers les molécules de liquide. La diffusion résulte d'une différence de concentration : quand le sucre fond, la concentration en sucre, qui était maximum au fond de la tasse et nulle à la surface, va changer plus ou moins rapidement, et tout le café sera finalement.

❖ **Lois de la diffusion**

L'objectif est de déterminer l'équation différentielle d'évolution de la concentration en particules. Sa résolution permet alors de comprendre le processus de diffusion.

Pour cela, on va se doter de deux lois :

La première est *fondamentale* car elle est générale : c'est la **loi de conservation de la matière**.

La seconde est : c'est la **loi de Fick**.

a1. Équation de conservation

Dans un premier temps, on considère la diffusion unidimensionnelle et unidirectionnelle de particules le long d'un cylindre rectiligne reliant deux réservoirs. Le type de particules et le type de support matériel à l'intérieur duquel les particules diffusent ne sont pas précisés. Le réservoir de gauche est plus concentré en particules que celui de droite.

➤ Les particules diffusent entre les deux réservoirs du fait de la différence de concentration. Dans quel sens est orienté le flux de particules ?

➤ En considérant une tranche élémentaire du cylindre, faire un bilan de particules,

Le nombre de particules se conserve : « *l'augmentation à l'intérieur est égale à ce qui entre moins ce qui sort* ».

➤ Dans ce bilan, faire apparaître la densité volumique $n(\mathbf{x};t)$ et le vecteur densité de flux $\rho(\mathbf{x};t)$, et en déduire l'équation locale de conservation.

$$\partial n / \partial t + \text{div } \rho = 0$$

a2. Loi phénoménologique de Fick

Les observations expérimentales montrent que :

- ✓ le flux de particules croît avec la non-uniformité de la concentration
- ✓ le flux de particules va des zones les plus concentrées vers les zones les moins concentrées

$$N = -D \, dc/dt$$

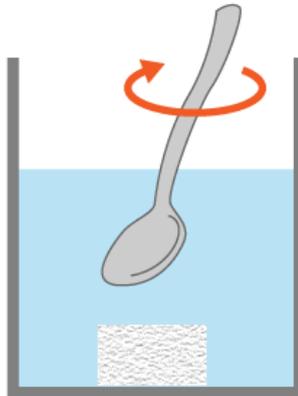
Dans cette équation, le signe moins traduit le fait que le transfert se réalise dans le transfert s'effectue des zones concentrées aux zones diluées

D : est le coefficient de diffusion (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Il dépend du matériau support et du type de particules.

N : flux de matière

b) **Convection** : La convection est un processus rapide : les molécules sont entraînées dans un courant de fluide naturel ou forcé (convection naturelle ou forcée).

Exemple : l'agitation avec une cuillère est une convection forcée.



✓ **Ordre de grandeur de la diffusion :**

La vitesse du phénomène de diffusion est quantifiée par la diffusivité ou le coefficient de diffusion. Généralement la diffusivité augmente avec la température. Cependant, alors que la diffusivité des gaz est pratiquement indépendante de la composition mais varie avec la pression, la diffusivité des liquides et des solides est essentiellement dépendante de la concentration

❖ **Transfert diffusif en régime permanent :**

Un transfert diffusif en régime permanent en absence de terme source et en coordonnées rectilignes. Dans ce cas particulier, l'équation de continuité s'écrit :

$$dj/dx=0$$

Ceci correspond à un flux de matière constant et donc pour un transfert diffusif à **dc/dx=constante** : le profil de concentration de concentration est donc linéaire.

❖ **Transfert diffusif en régime transitoire :**

Si l'on considère un transfert en coordonnées rectilignes, en régime transitoire, en l'absence de terme source, l'équation de continuité s'écrit :

$$dc/dt= -dj/dx$$

Si le transfert est diffusif, ceci conduit à l'équation différentielle partielle :

$$dc/dt= d^2c/dx^2$$

II/ TRANSFERT DE CHALEUR :

Lorsque deux points dans l'espace sont à des températures différentes ($T_2 > T_1$), il y a systématiquement transfert de chaleur de T_2 vers T_1 (c'est le deuxième principe de la thermodynamique).

a-La chaleur:

Pour le cour "Phénomènes de transfert" nous disons simplement que c'est une forme de l'énergie. Disons aussi que, Lorsqu'on introduit une quantité de chaleur dans un corps, la température de ce dernier augmente. Dans le cas d'un changement de phase, une partie de cette chaleur est utilisée pour satisfaire les besoins thermiques liés à ce phénomène (fusion, évaporation, etc...).

b-La température:

C'est la manifestation mesurable de la chaleur stockée. On dit aussi que la température est liée a la moyenne d'énergie cinétique due au mouvement des atomes et molécules du corps par la relation:

$$1/2 mv^2 = 3/2 k T$$

c-La conservation de la chaleur:

Une fois que l'énergie a été transformée en chaleur, cette dernière se "conserve" lors des différents transferts qu'elle subit.

$$Q + \Delta Q = Q'$$

d-La chaleur spécifique:

La relation fondamentale est

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

si un corps de masse m stocke ΔQ joules, sa température s'élèvera de ΔT .
 C_p , la chaleur spécifique (en $J/(kg K)$) est une propriété physique des matériaux et elle dépend généralement de la température. Elle caractérise sa capacité a emmagasiner de la chaleur. La chaleur spécifique d'une substance est fonction de sa structure moléculaire et

de sa phase.

e-L'enthalpie:

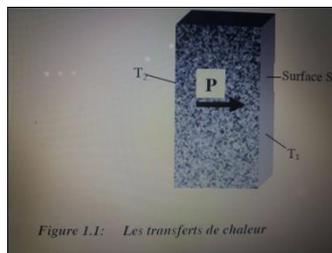
On appelle "enthalpie" la quantité d'énergie contenue dans l'unité de masse d'un corps porté d'une température de référence **T₀** à la température **T**.

$$\Delta H = \Delta Q/m \text{ [J/kg]}$$

f-La chaleur latente de changement d'état:

La chaleur latente spécifique d'une substance est la quantité de chaleur nécessaire pour entraîner le changement de phase d'une unité de masse de la substance.

1-1/-Les modes de transfert de chaleur:



Il s'agit d'étudier **h** dans les cas distincts suivants:

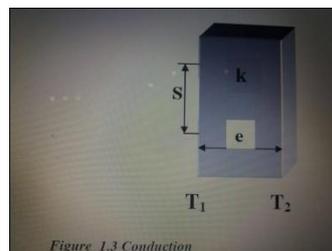
a/La conduction:

Echange de chaleur entre deux points d'un solide, ou encore d'un liquide (ou d'un gaz) immobile et opaque.

$$P = k / e . S \Delta T \quad / h \cong k / e$$

k : est la conductivité du matériau(une constante).

e : est la distance (en mètre) entre les points considérés.



b/La convection:

Echange de chaleur entre une paroi et un fluide avec transport de la chaleur par le fluide en mouvement.

$$P = h . S (T1 - T2)$$

h: coefficient d'échange par convection

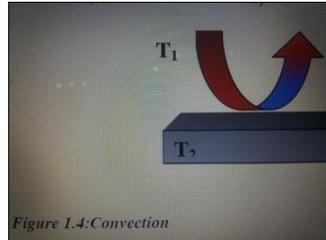


Figure 1.4: Convection

C /Le rayonnement:

Echange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent.

$$P = \epsilon_{12} k_B S(T_1 - T_2)$$

ϵ_{12} :facteur d'émission équivalente de l'ensemble paroi 1 - paroi 2

k_B : constante de Boltzmann

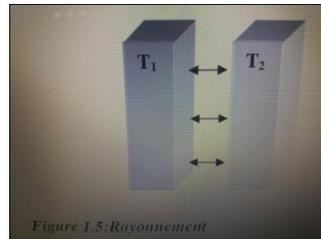


Figure 1.5: Rayonnement

III/TRANFERT DE QUANTITE DE MOUVEMENT

1-Propriétés physiques des fluides

Qu'est-ce qu'un fluide ?

Continu: ses propriétés varient d'une façon continue, propriétés considérées comme caractéristiques non d'un point sans volume mais d'une particule, volume de fluide extrêmement petit autour d'un point

Déformable (il n'a pas de forme propre) ; les molécules peuvent facilement glisser les unes sur les autres ; cette mobilité fait que le fluide prendra la forme du récipient qui le contient.

Qui peut s'écouler ; mais tout fluide peut s'écouler plus ou moins facilement d'un

réceptif à un autre ou dans une conduite : des forces de frottements qui s'opposent au glissement des particules de fluide les unes contre les autres peuvent apparaître car tout fluide réel a une viscosité.

A -Masse volumique :

Définition :

Considérons un milieu continu fluide à l'intérieur d'un volume V , et soit dV un volume élémentaire défini autour d'un point M du volume V . Désignons par dm la masse de fluide contenue dans le volume dV .

Le rapport $\rho = dm / dV$ représente la masse volumique moyenne du fluide contenu dans le volume dV .

b-Compressibilité :

Définition de la compressibilité :

La compressibilité traduit la diminution de volume en réponse à un accroissement de pression.

La propriété physique qui permet de faire la différence entre un liquide et un gaz est la compressibilité.

Un liquide est un fluide occupant un volume déterminé, ou du moins ce volume ne peut varier que très peu, et seulement sous l'action de fortes variations de pression ou de température.

Un gaz, au contraire, occupe toujours le volume maximal qui lui est offert : c'est un fluide essentiellement compressible (ou expansible).

c-Viscosité :

Définition :

L'agitation des molécules est responsable d'un transfert microscopique de quantité de mouvement d'une particule à sa voisine s'il existe entre elles une différence de vitesse. Ce transfert est traduit par la propriété appelée viscosité.

2-Statique des fluides :

La statique des fluides est la science qui étudie les conditions d'équilibre des fluides au repos. Plus précisément, elle concerne toutes les situations dans lesquelles il n'y a pas de mouvement relatif entre les particules fluides :

- fluides au repos
- fluides uniformément accélérés

Il n'y a pas de contraintes dues aux frottements entre particules.

Les forces en jeu sont uniquement des forces de volume dues au poids et de forces de surface dues à la pression.

3-Conservation de la quantité de mouvement :

Considérons deux corps qui effectuent un choc :

a) la quantité de mouvement totale vaut $\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$

Supposons que la collision dure δt .

La force que **1** exerce sur **2** est égale et opposée à celle que **2** exerce sur **1**

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$$

L'impulsion sur **1** : $\mathbf{F}_2 \delta t = \mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}_1 \Rightarrow \mathbf{p}'_1 = \mathbf{p}_1 + \mathbf{F}_2 \delta t = \mathbf{p}_1 - \mathbf{F}_1 \delta t$

pour l'objet **2** : $\mathbf{p}'_2 = \mathbf{p}_2 + \mathbf{F}_1 \delta t$

b) la quantité de mvt totale est

$$\mathbf{p}_f = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 = \mathbf{p}_1 - \mathbf{F}_1 \delta t + \mathbf{p}_2 + \mathbf{F}_1 \delta t = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_i$$

Bon courage