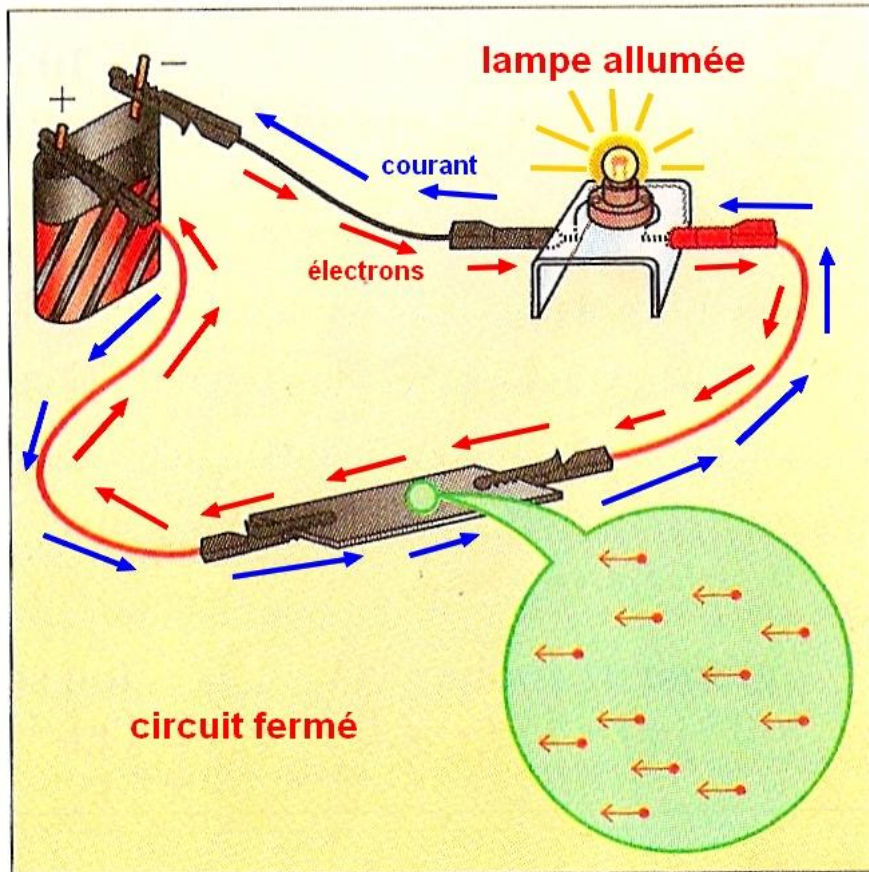


- Transport de matière par diffusion -

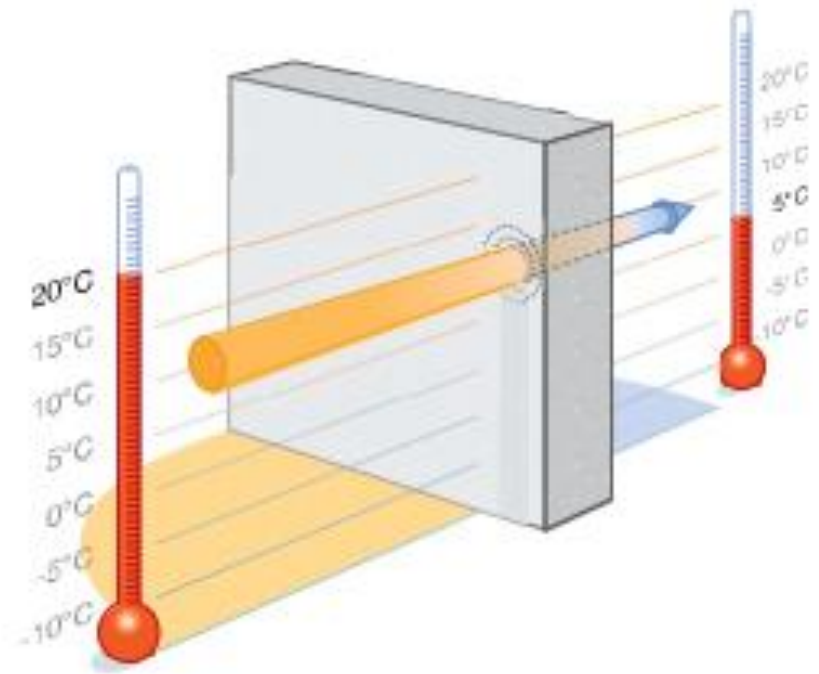
Notions et contenus	Capacités exigibles
<i>- Flux convectif et flux diffusif de particules.</i>	<i>- Distinguer un transport de matière diffusif d'un transport convectif.</i>
<i>- Loi phénoménologique de Fick donnant le flux diffusif en fonction de la dérivée de la densité volumique de particules par rapport à une seule coordonnée spatiale, à travers une surface plane, cylindrique ou sphérique, adaptée à la géométrie considérée.</i>	<i>- Discuter des dépendances du flux de particules à travers une membrane en fonction de ses paramètres géométriques (épaisseur et surface de la membrane) et physiques (nature du milieu) en lien avec des applications biologiques.</i>
<i>- Coefficient de diffusion. - Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.</i>	<i>- Citer l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion dans un gaz ou d'une espèce dissoute en solution aqueuse dans les conditions usuelles. - Exploiter la loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.</i>
<i>- Bilan de particules en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.</i>	<i>- Établir un bilan de particules, éventuellement en présence de sources internes. - Exploiter la conservation du flux de particules en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.</i>

- *Transport de matière par diffusion* -

Transport de CHARGES



Transport (Transfert) d'ENERGIE THERMIQUE



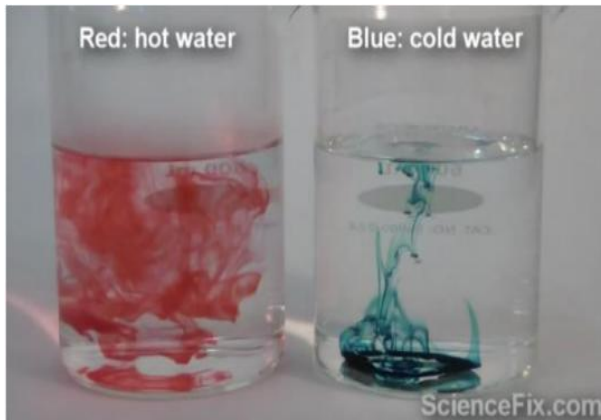
Et le transport de MATIERE ?

I- Les deux types de transport de matière

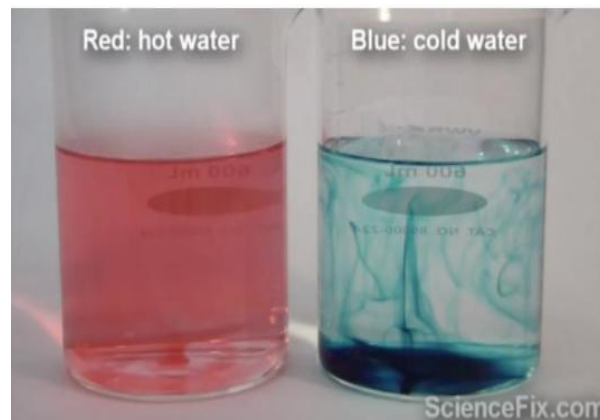
1) Transport DIFFUSIF

Que se passe-t-il si on dépose une goutte d'encre à la surface de l'eau froide ?

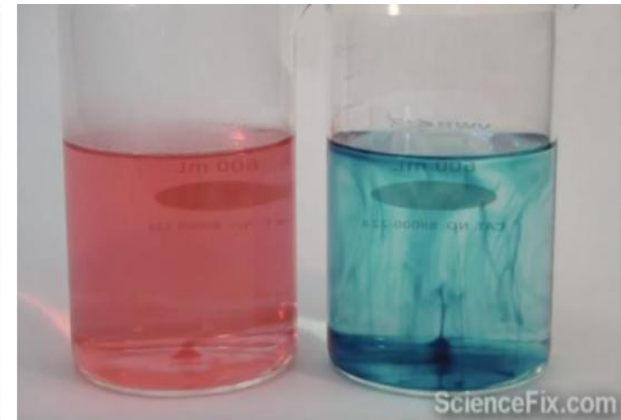
t = 1 s



t = 9 s



t = 18 s



☛ **Observation** : L'encre, initialement **répartie de façon inégale** (milieu **hétérogène**) **tend à se répartir uniformément** (milieu **homogène**).

☛ **Définition** : On appelle **transport DIFFUSIF** le **déplacement des particules SANS MOUVEMENT D'ENSEMBLE**, **des régions où leur concentration est élevée vers celles où elle l'est moins**.

Le comportement est-il le même dans l'eau chaude ?

I- Les deux types de transport de matière

1) Transport DIFFUSIF

- ☛ Observation : L'encre, initialement *répartie de façon inégale* (milieu **hétérogène**) tend à se répartir uniformément (milieu **homogène**).
- ☛ Définition : On appelle transport DIFFUSIF le **déplacement des particules SANS MOUVEMENT D'ENSEMBLE**, des régions où leur concentration est élevée vers celles où elle l'est moins.

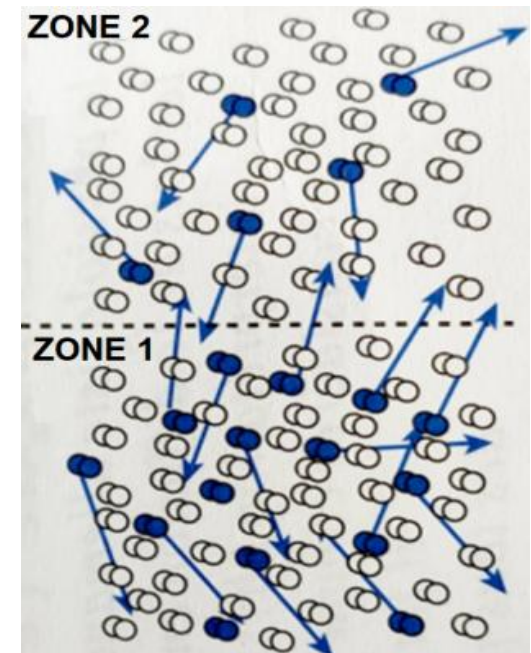
Le comportement est-il le même dans l'eau chaude ?

- ☛ Observation :

L'homogénéisation de la solution est plus **rapide** dans le bécher d'eau chaude que dans celui d'eau froide car il y a **plus** d'agitation thermique.

- ☛ Interprétation microscopique :

Le *moteur du transport diffusif* de matière est l'AGITATION THERMIQUE des particules : son caractère **aléatoire** justifie l'absence de mouvement d'ensemble lors du transport diffusif.

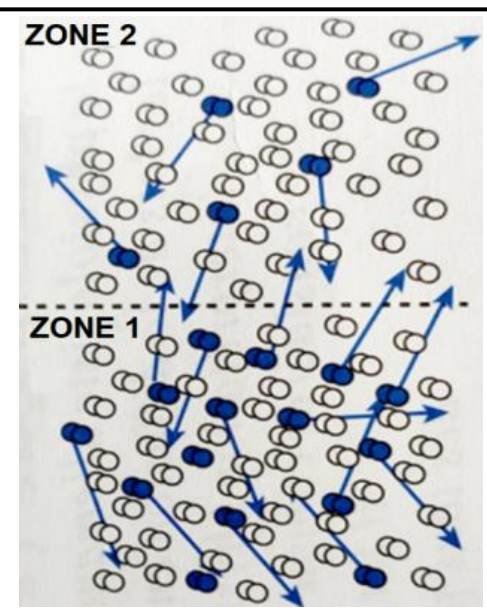


☛ Observation :

L'homogénéisation de la solution est plus **rapide** dans le bécher d'eau chaude que dans celui d'eau froide car il y a **plus** d'agitation thermique.

☛ Interprétation microscopique :

Le **moteur du transport diffusif** de matière est **l'AGITATION THERMIQUE** des particules : son caractère **aléatoire** justifie l'absence de mouvement d'ensemble lors du transport diffusif.



2) Transport CONVECTIF

☛ Observation : L'eau colorée chaude s'échappe de l'erlenmeyer avec un **mouvement uniquement orienté vers le haut**

☛ Interprétation : L'eau colorée chaude est moins dense que l'eau froide qui l'entoure donc elle remonte car elle a une **flottabilité positive**.



☛ Définition : On appelle transport CONVECTIF le **déplacement des particules AVEC UN MOUVEMENT D'ENSEMBLE**, à cause d'une différence de densité dans le fluide.

2) Transport CONVECTIF

- ☛ Observation : L'eau colorée chaude s'échappe de l'erenmeyer avec un **mouvement uniquement orienté vers le haut**
- ☛ Interprétation : L'eau colorée chaude est moins dense que l'eau froide qui l'entoure donc elle remonte car elle a une **flottabilité positive**.
- ☛ Définition : On appelle transport CONVECTIF le **déplacement des particules AVEC UN MOUVEMENT D'ENSEMBLE**, à cause d'une différence de densité dans le fluide.



- Transport CONVECTIF **plus rapide** que le transport DIFFUSIF ;
- Autre cause de la différence de densité : la **différence de concentration** ;
- Phénomènes de convection très courants dans la nature ;

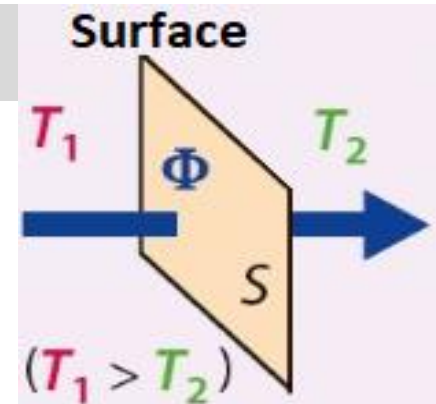
II- Loi phénoménologique de Fick

1) Le flux de particules

Souvenirs PHYSIQUE 07 !

Transfert d'énergie – Notion de FLUX THERMIQUE

- ☛ Définition : Le **flux thermique** à travers une surface S représente la **quantité d'énergie thermique qui traverse cette surface par unité de temps** dans un sens donné.



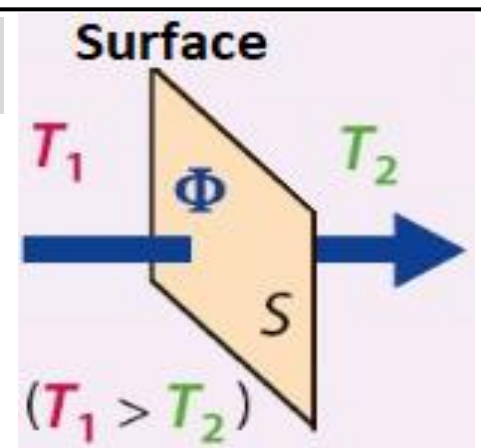
Transfert d'énergie - Notion de FLUX THERMIQUE

☛ Définition : Le **flux thermique** à travers une surface S représente la **quantité d'énergie thermique qui traverse cette surface par unité de temps** dans un sens donné.

☛ Formule : pendant une durée infinitésimale dt :

$$\text{Flux (en W)} \quad \Phi_{\text{thermique}} = \frac{\delta Q}{dt}$$

δQ — Petite quantité d'énergie thermique échangée (en J)
 dt — Petite durée (en s)



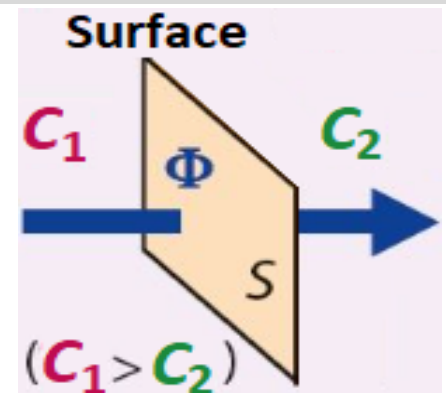
Transport de matière - Notion de FLUX DE PARTICULES

☛ Définition : Le **flux de particules** à travers une surface S représente le **nombre de particules traversant cette surface par unité de temps** dans un sens donné.

☛ Formule : pendant une durée infinitésimale dt :

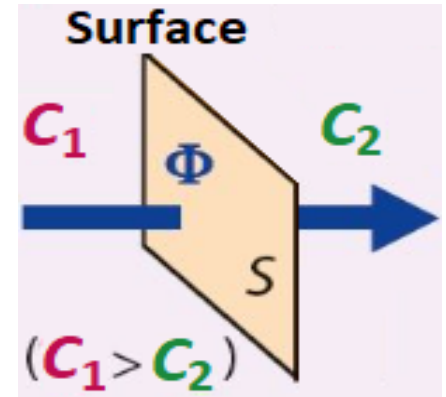
$$\text{Flux (en s}^{-1}\text{)} \quad \Phi_{\text{particules}} = \frac{\delta N}{dt}$$

δN — Petit nombre de particules traversant S (sans unité)
 dt — Petite durée (en s)



Transport de matière - Notion de FLUX DE PARTICULES

☛ Définition : Le **flux de particules** à travers une surface S représente le **nombre de particules traversant cette surface par unité de temps** dans un sens donné.



☛ Formule : pendant une durée infinitésimale dt :

Flux (en s^{-1})

$$\Phi_{\text{particules}} = \frac{\delta N}{dt}$$

Petit nombre de particules traversant S (sans unité)

Petite durée (en s)

2) La densité volumique de particules

☛ Définition : C'est le **nombre de particules par unité de volume** dans le milieu. On la note n^* et elle s'exprime en m^{-3} .



La densité volumique de particules est aussi appelée « **concentration particulaire** », à ne pas confondre avec la concentration molaire ...

☞ Application 1 : Quel lien existe-t-il entre la densité volumique de particules n^* , la concentration molaire C et la constante d'Avogadro N_A ?

$$n^* = C \times N_A$$

m^{-3} $mol.m^{-3}$ mol^{-1}

2) La densité volumique de particules

☛ Définition : C'est le nombre de particules par unité de volume dans le milieu. On la note n^* et elle s'exprime en m^{-3} .



La densité volumique de particules est aussi appelée « **concentration particulaire** », à ne pas confondre avec la concentration molaire ...

☞ Application 1 : Quel lien existe-t-il entre la densité volumique de particules n^* , la concentration molaire C et la constante d'Avogadro N_A ?

$$n^* = C \times N_A$$

Diagram showing the equation $n^* = C \times N_A$ with units: n^* is m^{-3} , C is $mol.m^{-3}$, and N_A is mol^{-1} .

☞ Application 2 : En supposant la densité volumique de particules n^* uniforme dans tout le système de volume V , comment calculer le nombre N de particules présentes dans ce système ?

$$N = n^* \times V$$

Diagram showing the equation $N = n^* \times V$ with units: N is "Sans unité", n^* is m^{-3} , and V is m^3 .

3) Relation entre flux et densité volumique de particules

Hypothèse de travail :

n^* ne dépend que d'une seule coordonnée spatiale, notée x

🔗 **Application 2** : En supposant la densité volumique de particules n^* uniforme dans tout le système de volume V , comment calculer le nombre N de particules présentes dans ce système ?

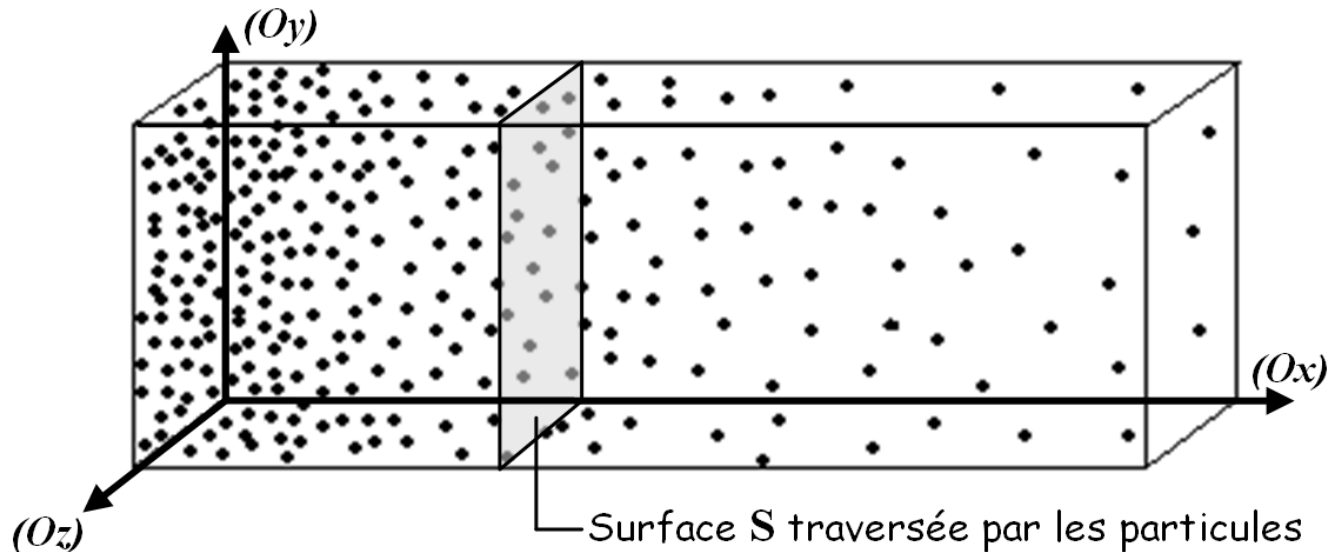
$$N = n^* \times V$$

Sans unité m^{-3} m^3

3) Relation entre flux et densité volumique de particules

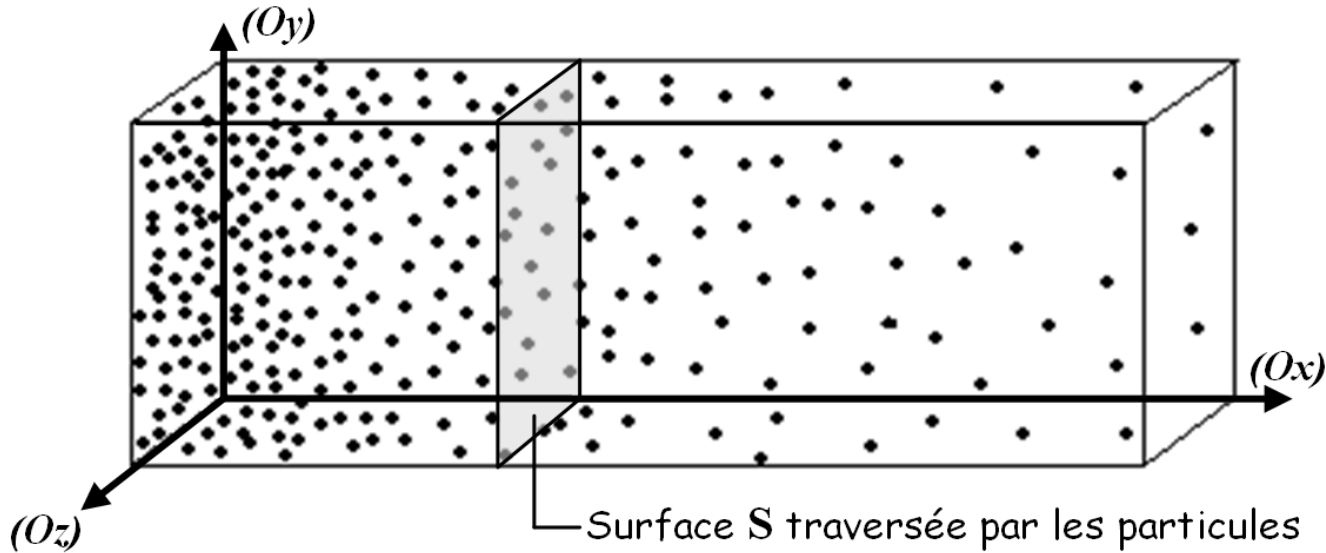
Hypothèse de travail :

n^* ne dépend que d'une seule coordonnée spatiale, notée x



Expression du flux de particules ?

3) Relation entre flux et densité volumique de particules



☛ Loi de FICK :

Flux de particules dans le sens des x croissants (s^{-1})

$$\Phi = -D \times S \times \frac{dn^*}{dx}$$

Densité volumique de particules (m^{-3})

(m)

Surface traversée (m^2)

Coefficient de diffusion de l'espèce M dans le milieu Y ($m^2.s^{-1}$)

☒ Application 3 : Justifier la nécessité du signe « - » dans la loi de FICK.

Sur la figure, n^* diminue quand x augmente. Donc $\frac{dn^*}{dx} < 0$

Grâce au signe « - », $\Phi > 0$, ce qui signifie que **le flux de particules a réellement lieu dans le sens des x croissants** (du + vers le - concentré)

3) Relation entre flux et densité volumique de particules

Loi de FICK :

Flux de particules dans le sens des x croissants (s^{-1})

$$\Phi = -D \times S \times \frac{dn^*}{dx}$$

Densité volumique de particules (m^{-3})

(m)

Surface traversée (m^2)

Coefficient de diffusion de l'espèce M dans le milieu Y ($m^2.s^{-1}$)

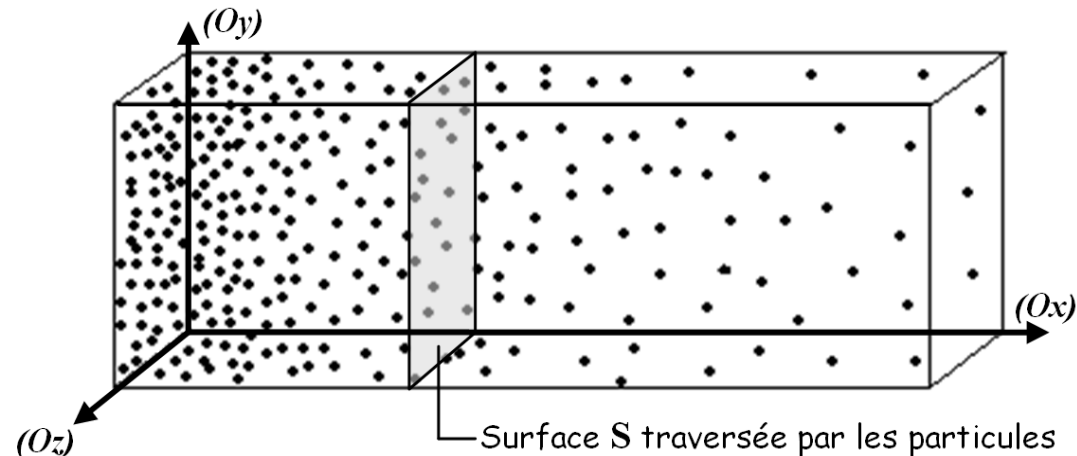
Application 3 : Justifier la nécessité du signe « - » dans la loi de FICK.

Sur la figure, n^* diminue quand x augmente. Donc $\frac{dn^*}{dx} < 0$

Grâce au signe « - », $\Phi > 0$, ce qui signifie que le flux de particules a réellement lieu dans le sens des x croissants (du + vers le - concentré)

Choix de la coordonnée spatiale « x » et de la surface « S » :

- pour une surface PLANE :
 x = coordonnée cartésienne ;



3) Relation entre flux et densité volumique de particules

☞ Application 3 : Justifier la nécessité du signe « - » dans la loi de FICK.

Sur la figure, n^* diminue quand x augmente. Donc $\frac{dn^*}{dx} < 0$

Grâce au signe « - », $\Phi > 0$, ce qui signifie que le flux de particules a réellement lieu dans le sens des x croissants (du + vers le - concentré)

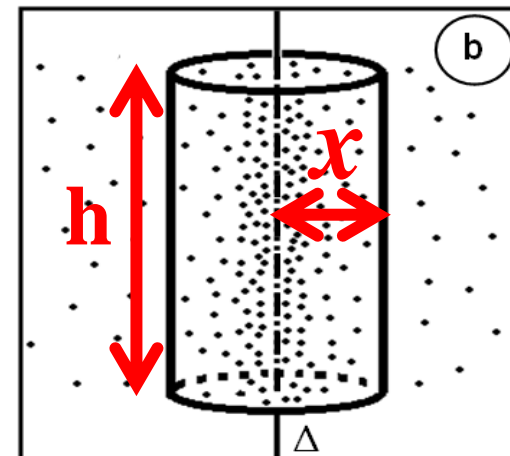
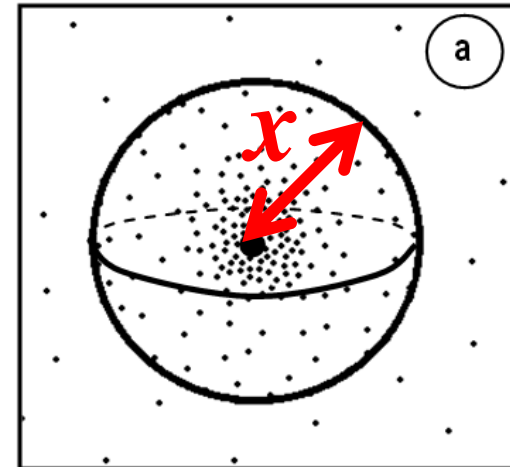
☛ Choix de la coordonnée spatiale « x » et de la surface « S » :

- pour une surface SPHERIQUE (voir photo a) :
 x = distance entre le centre O de la sphère et la surface S de la sphère
(x est dans ce cas parfois noté « r »)

$$\text{Surface sphérique : } S = 4 \pi x^2$$

- pour une surface CYLINDRIQUE (voir photo b) :
 x = distance entre l'axe Δ du cylindre et la surface S du cylindre
(x est dans ce cas parfois noté « r »)

$$\text{Surface cylindrique : } S = 2 \pi x h$$



☛ Choix de la coordonnée spatiale «x» et de la surface «S» :

Surface sphérique : $S = 4 \pi x^2$

Surface cylindrique : $S = 2 \pi x h$

☛ Ordres de grandeurs des coefficients de diffusion :

Milieu γ	Particules M	Coefficient D
Air (à 298 K, 1 bar)	Molécules H_2O	$2,8 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$
	Molécules CO_2	$1,6 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$
Eau liquide (à 298 K)	Ions Na^+	$1,9 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$
	Molécules CO_2	$1,9 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$
	Molécules d'éthanol C_2H_5OH	$0,84 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$
	Molécules de glucose $C_6H_{12}O_6$	$0,67 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$
	Molécules d'ADN	$1,3 \cdot 10^{-12} m^2 \cdot s^{-1}$
Ethanol liquide (à 298 K)	Molécules H_2O	$1,2 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$
Silicium solide (à 298 K)	Atomes d'arsenic As	$2,0 \cdot 10^{-30} m^2 \cdot s^{-1}$
Cuivre solide (à 298 K)	Atomes d'aluminium Al	$1,3 \cdot 10^{-30} m^2 \cdot s^{-1}$

Pour des espèces chimiques de petite taille :

- dans les **gaz**, $D \approx 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$

- dans les **liquides**, $D \approx 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$

• Ordres de grandeurs des coefficients de diffusion :

Pour des espèces chimiques de petite taille :

- dans les **gaz**, $D \approx 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- dans les **liquides**, $D \approx 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

• Temps caractéristique τ de la diffusion :

Notations

- D = coefficient de diffusion d'une espèce M diffusant dans un milieu Y ;
- L = distance sur laquelle elle diffuse.

On pose : $\tau = L^\alpha \times D^\beta$

Cette relation sera homogène si : $[\tau] = [L^\alpha \times D^\beta]$

$$\Leftrightarrow T = (L)^\alpha \times (L^2 \cdot T^{-1})^\beta$$

$$\Leftrightarrow T = (L)^{\alpha+2\beta} \times (T)^{-\beta}$$

Par identification :

pour T : $1 = -\beta \quad \Leftrightarrow \beta = -1$

pour L : $0 = \alpha + 2\beta \quad \Leftrightarrow \alpha = -2\beta = 2$

$$\tau = \frac{L^2}{D}$$

☛ Temps caractéristique τ de la diffusion :

On pose : $\tau = L^\alpha \times D^\beta$

Cette relation sera homogène si : $[\tau] = [L^\alpha \times D^\beta]$

$\Leftrightarrow T = (L)^\alpha \times (L^2 \cdot T^{-1})^\beta$

$\Leftrightarrow T = (L)^{\alpha+2\beta} \times (T)^{-\beta}$

Par identification :

pour T : $1 = -\beta \Leftrightarrow \beta = -1$

pour L : $0 = \alpha + 2\beta \Leftrightarrow \alpha = -2\beta = 2$

$\tau = \frac{L^2}{D}$

☛ Application 4 : On laisse une bouteille de parfum ouverte dans la salle de classe. Au bout de combien de temps sentira-t-on le parfum dans la totalité de la salle de classe selon un processus uniquement diffusif ? Commenter.

On a $L \approx 10 \text{ m}$ et $D \approx 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ donc $\tau \approx 10^2 / 10^{-5} = 10^7 \text{ s}$

$\tau \approx \underline{10^3 \text{ heures}} !!!$

En réalité, *il ne faut que quelques minutes pour que les molécules de parfum se fassent sentir* dans toute la pièce ...

➔ Le transport DIFFUSIF de matière est minoritaire par rapport au transport CONVECTIF beaucoup plus rapide (ouverture/fermeture de portes, mouvement des personnes, convection thermique ...)

En réalité, *il ne faut que quelques minutes pour que les molécules de parfum se fassent sentir* dans toute la pièce ...

➔ Le transport DIFFUSIF de matière est minoritaire par rapport au transport CONVECTIF beaucoup plus rapide (ouverture/fermeture de portes, mouvement des personnes, convection thermique ...)

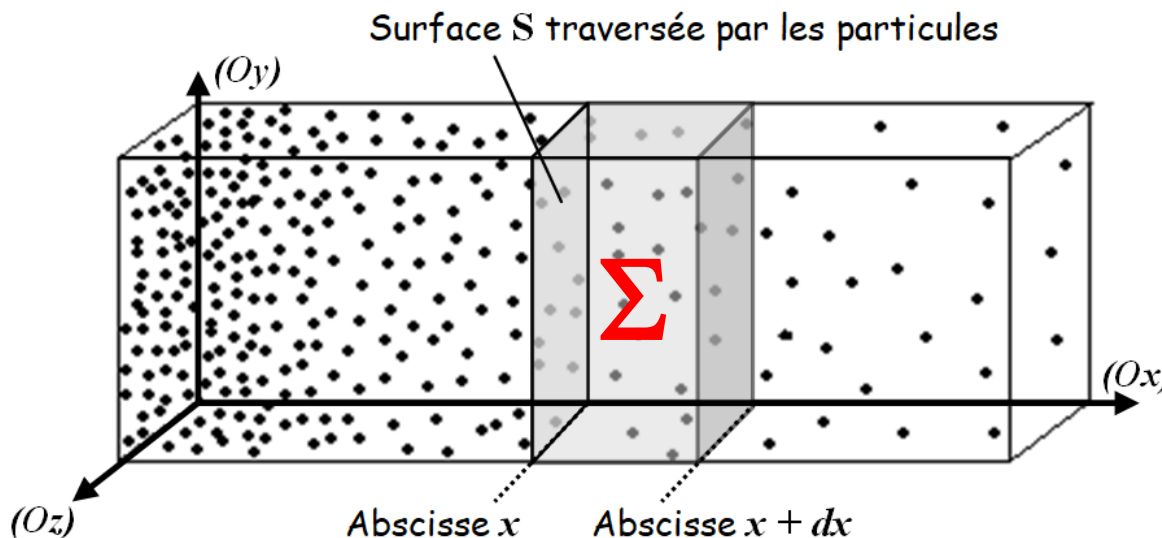
III- Bilan de particules

1) Notion générale de bilan

Hypothèses de travail :

n^* ne dépend que d'une seule coordonnée spatiale, notée x

Systeme étudié = une tranche du milieu située entre les abscisses x et $x + dx$



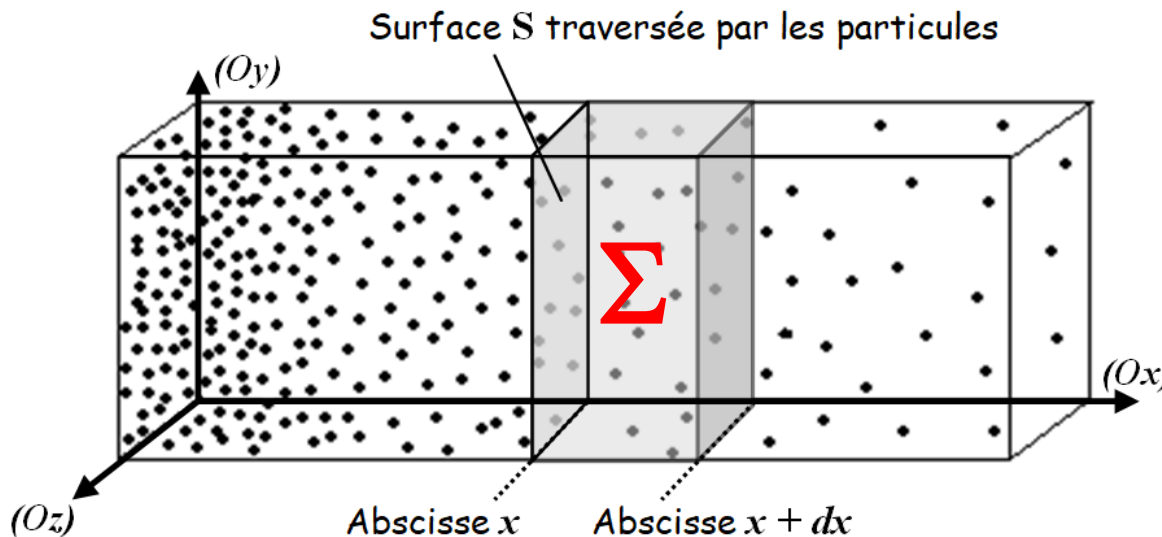
III- Bilan de particules

1) Notion générale de bilan

Hypothèses de travail :

n^* ne dépend que d'une seule coordonnée spatiale, notée x

Systeme étudié = une tranche du milieu située entre les abscisses x et $x + dx$



REALISER UN BILAN DE PARTICULES sur le système Σ consiste à **déterminer la VARIATION du nombre de particules présentes dans ce système Σ entre deux instants.**

Causes possibles de cette variation ?

La variation du nombre de particules dans Σ peut avoir **2 causes** :

- Des particules **rentrent** et/ou **sortent** du système ;
- Des particules sont **créées** et/ou **détruites** par des réactions chimiques ou par des réactions nucléaires.

☛ Notations utilisées : Grandeurs toutes **positives**

• $N(t)$
• $N(t + dt)$

} Nombre de particules dans le système Σ
aux instants de dates t et $t + dt$

• $\delta N_{\text{Entrant}}$
• $\delta N_{\text{Sortant}}$
• $\delta N_{\text{Créées}}$
• $\delta N_{\text{Détruites}}$

} Nombre de particules Rentrant, Sortant, Créées ou Détruites dans le système Σ
entre les instants de date t et $t + dt$

☛ Bilan de particules entre les instants de date t et $t + dt$:

$$\underbrace{N(t + dt) - N(t)} = \delta N_{\text{Entrant}} - \delta N_{\text{Sortant}} + \delta N_{\text{Créées}} - \delta N_{\text{Détruites}}$$

Variation élémentaire du nombre de particules dans Σ

☛ Bilan de particules entre les instants de date t et t + dt :

$$\underbrace{N(t + dt) - N(t)} = \delta N_{\text{Entrant}} - \delta N_{\text{Sortant}} + \delta N_{\text{Créées}} - \delta N_{\text{Détruites}}$$

Variation élémentaire du nombre de particules dans Σ

2) Cas particulier du régime stationnaire en absence de processus internes

☛ Régime STATIONNAIRE : Régime au cours duquel **les conditions aux frontières du système sont constantes**, ce qui a pour conséquence que **le nombre de particules dans le système est constant**.

☛ Pas de PROCESSUS INTERNES : il n'y a ni **création**, ni **destruction** de molécules.



☛ Conséquence sur le bilan de particules :

$$\underbrace{N(t + dt) - N(t)} = \delta N_{\text{Entrant}} - \delta N_{\text{Sortant}} + \underbrace{\delta N_{\text{Créées}}}_{= 0} - \underbrace{\delta N_{\text{Détruites}}}_{= 0}$$

= 0 car $N(t) = N(t+dt)$ en régime stationnaire

= 0 car pas de processus internes

☛ Conséquence sur le bilan de particules :

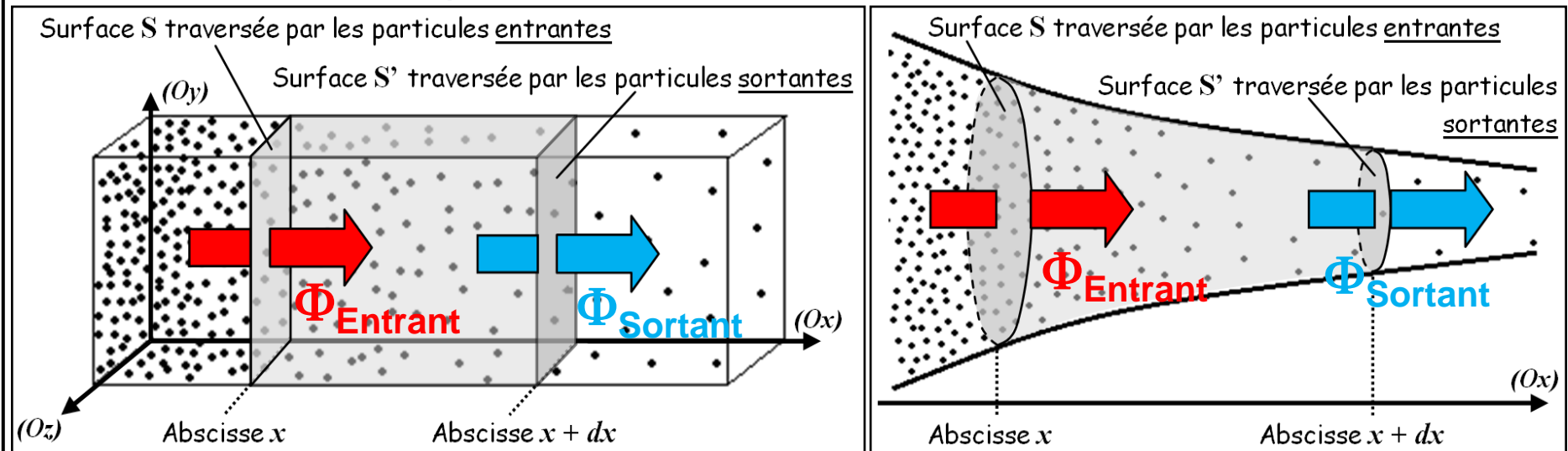
$$\underbrace{N(t + dt) - N(t)}_{= 0 \text{ car } N(t) = N(t+dt) \text{ en régime stationnaire}} = \delta N_{\text{Entrant}} - \delta N_{\text{Sortant}} + \underbrace{\delta N_{\text{Créées}}}_{= 0 \text{ car pas de processus internes}} - \underbrace{\delta N_{\text{Détruites}}}_{= 0 \text{ car pas de processus internes}}$$

Donc $\delta N_{\text{entrant}}(x) = \delta N_{\text{Sortant}}(x + dx)$

$\Leftrightarrow \Phi_{\text{Entrant}}(x) \cdot dt = \Phi_{\text{Sortant}}(x + dx) \cdot dt \Leftrightarrow \Phi_{\text{Entrant}}(x) = \Phi_{\text{Sortant}}(x + dx)$

☛ Conclusion : Pour une *diffusion unidirectionnelle* en *régime stationnaire* et en l'absence de processus internes, le flux de particules conserve la même valeur, que la section traversée soit constante ou variable.

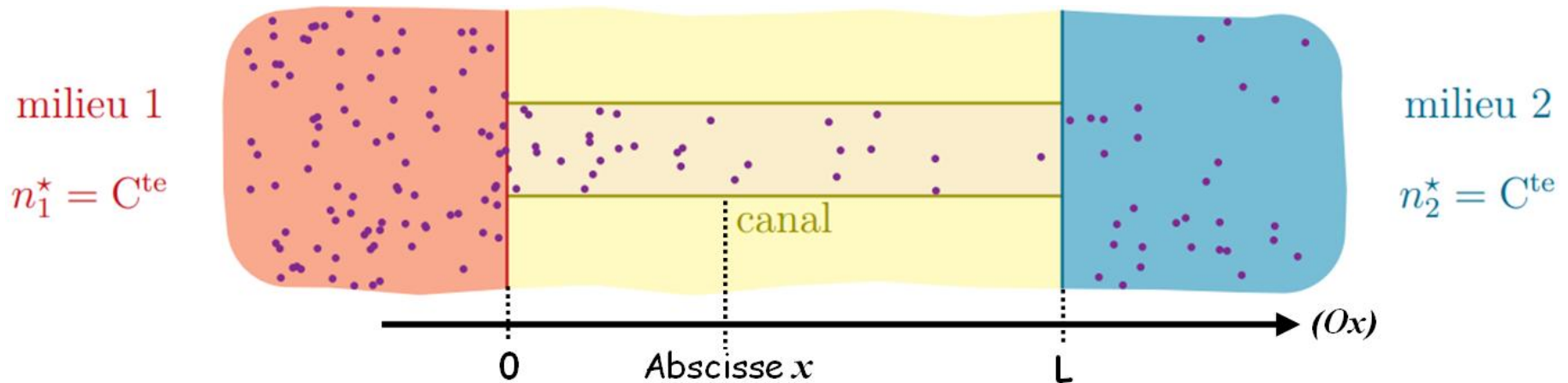
➔ On parle de CONSERVATION du flux.



☛ **Conclusion** : Pour une **diffusion unidirectionnelle** en **régime stationnaire** et en l'absence de processus internes, **le flux de particules conserve la même valeur**, que la section traversée soit constante ou variable

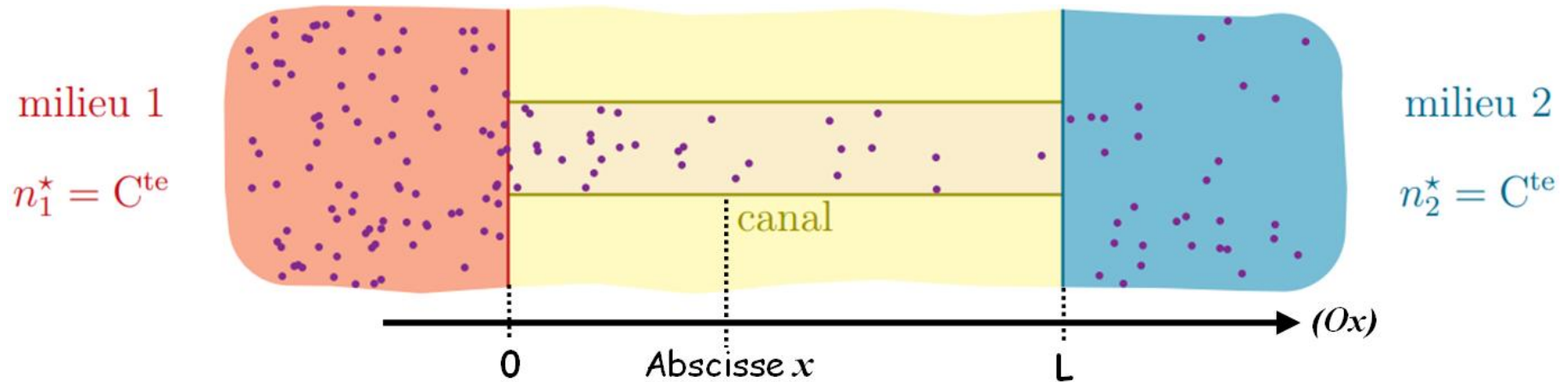
➔ On parle de **CONSERVATION du flux**.

✂ **Application 5** : On modélise la paroi d'une cellule par un milieu imperméable à certains ions sauf au niveau de « canaux » dans lesquels ils diffusent. Le milieu extérieur (1) et le milieu intérieur (2) de la cellule sont si grands qu'on les considère comme des réservoirs où la densité volumique en ions est constante. On considère de plus que le canal a une longueur L et une section S constante et on note D le coefficient de diffusion des ions dans le canal.



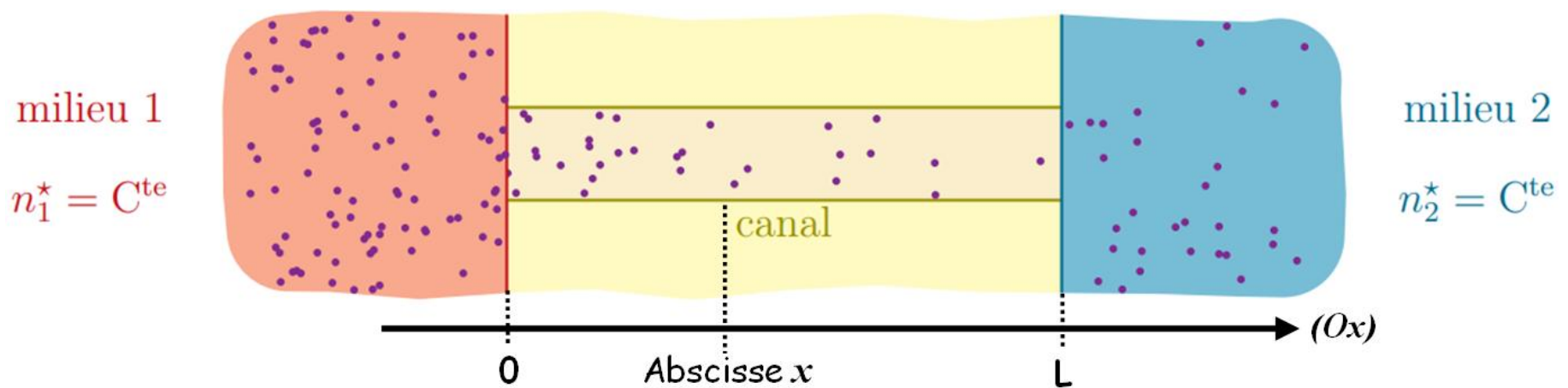
➔ Déterminer l'évolution de la densité volumique de particules $n^*(x)$ dans le canal en fonction de D , S , L , n_1^* , n_2^* et x .

🔗 **Application 5** : On modélise la paroi d'une cellule par un milieu imperméable à certains ions sauf au niveau de « canaux » dans lesquels ils diffusent. Le milieu extérieur (1) et le milieu intérieur (2) de la cellule sont si grands qu'on les considère comme des réservoirs où la densité volumique en ions est constante. On considère de plus que le canal a une longueur L et une section S constante et on note D le coefficient de diffusion des ions dans le canal.



➔ Déterminer l'évolution de la densité volumique de particules $n^*(x)$ dans le canal en fonction de D , S , L , n_1^* , n_2^* et x .

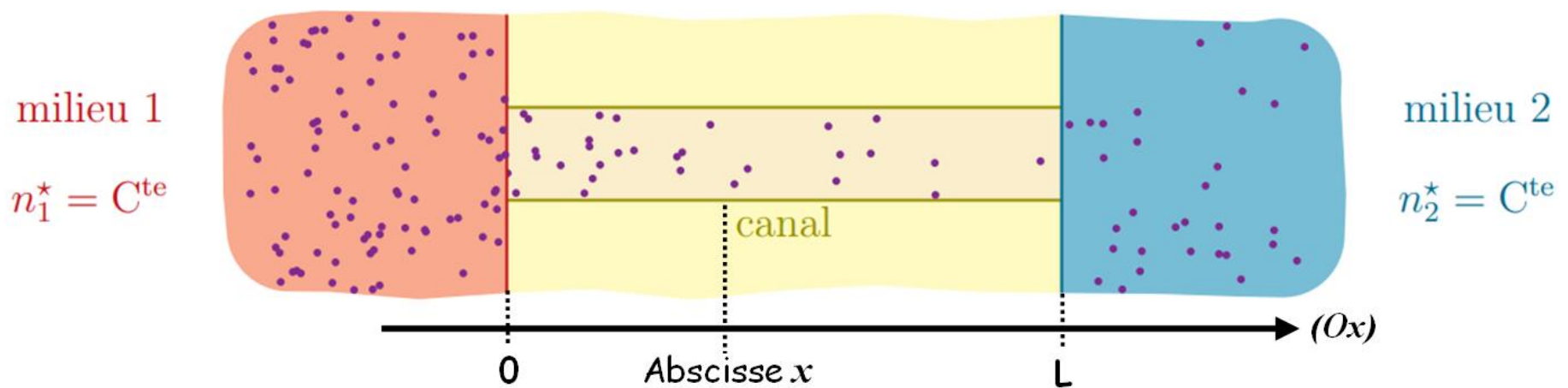
- Système = **. canal situé entre les abscisses 0 et L .**
- Les densités volumiques en ions étant constantes en amont et en aval du canal, la diffusion des ions au travers du canal est .STATIONNAIRE.
- Pour cette diffusion **UNIDIRECTIONNELLE** (elle a uniquement lieu selon l'axe (Ox)) **SANS PROCESSUS INTERNE**, le flux de particules .SE CONSERVE.



- Système = canal situé entre les abscisses 0 et L .
- Les densités volumiques en ions étant constantes en amont et en aval du canal, **la diffusion des ions au travers du canal est STATIONNAIRE**
- Pour cette diffusion **UNIDIRECTIONNELLE** (elle a uniquement lieu selon l'axe (Ox)) **SANS PROCESSUS INTERNE**, **le flux de particules SE CONSERVE**.
- Cela signifie que $\Phi = \text{Constante}$ qu'on peut noter $a \Leftrightarrow \Phi = a$
- Or, d'après la loi de Fick :

$$\Phi = -D \times S \times \frac{dn^*}{dx} \Leftrightarrow -D \times S \times \frac{dn^*}{dx} = a$$

$$\Leftrightarrow \frac{dn^*}{dx} = -\frac{a}{D \times S}$$



- Cela signifie que $\Phi = \text{Constante}$ qu'on peut noter $a \Leftrightarrow \Phi = a$

- Or, d'après la loi de Fick :

$$\Phi = -D \times S \times \frac{dn^*}{dx} \Leftrightarrow -D \times S \times \frac{dn^*}{dx} = a$$

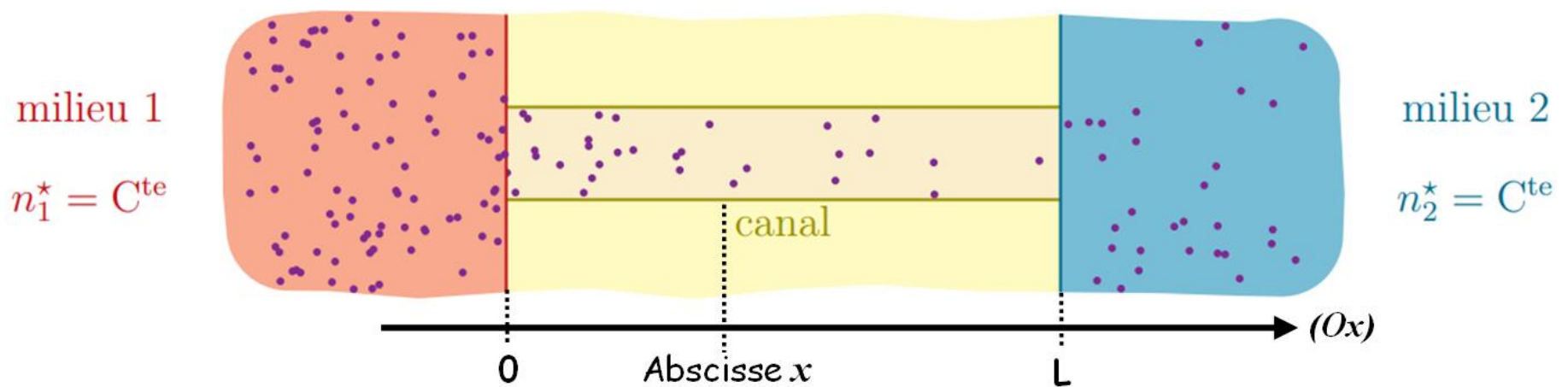
$$\Leftrightarrow \frac{dn^*}{dx} = -\frac{a}{D \times S}$$

$$\Leftrightarrow n^* = -\frac{a}{D \times S} \times x + b$$

avec b une constante

- 1^{ère} condition aux limites :

$$\underline{n^*(x=0)} = n_1^* \text{ donc } \boxed{b = n_1^*}$$



$$\frac{dn^*}{dx} = - \frac{a}{D \times S}$$

\Leftrightarrow

$$n^* = - \frac{a}{D \times S} \times x + b$$

avec b une constante

- 1^{ère} condition aux limites :

$$\underline{n^*(x = 0) = n_1^*} \text{ donc } \boxed{b = n_1^*}$$

- 2^{ème} condition aux limites :

$$\underline{n^*(x = L) = n_2^*} \Leftrightarrow n_2^* = - \frac{a}{D \times S} \times L + n_1^*$$

$$\boxed{a = \frac{n_1^* - n_2^*}{L} \times D \times S}$$

- 2^{ème} condition aux limites :

$$\underline{n^*(x = L) = n_2^*}$$

$$\Leftrightarrow n_2^* = - \frac{a}{D \times S} \times L + n_1^*$$

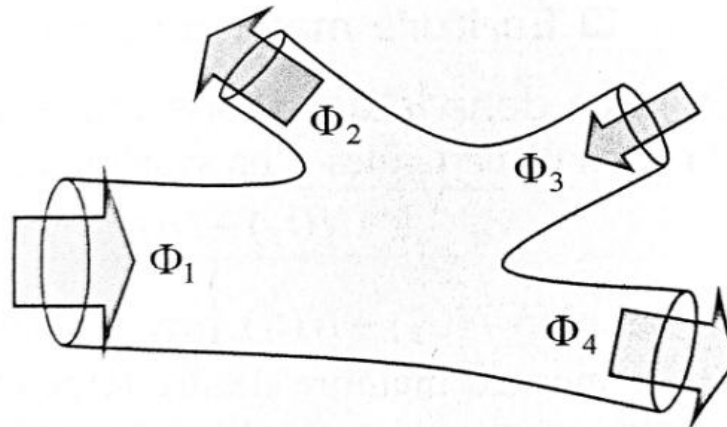
$$\Leftrightarrow a = \frac{n_1^* - n_2^*}{L} \times D \times S$$

- Finalement,

$$n^* = \frac{n_2^* - n_1^*}{L} \times x + n_1^*$$

☛ Remarque : Généralisation à un *systeme presentant un NŒUD*.

On montre alors que la somme des flux entrants est égale à la somme des flux sortants (équivalent de la loi des nœuds en électricité).



Dans cet exemple :

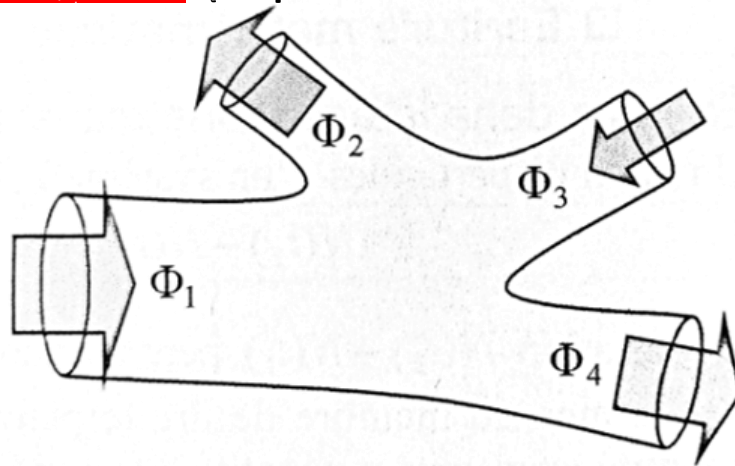
$$\Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_4$$

- Finalement,

$$n^* = \frac{n_2^* - n_1^*}{L} \times x + n_1^*$$

☛ Remarque : Généralisation à un **systeme presentant un NŒUD**.

On montre alors que **la somme des flux entrants est égale à la somme des flux sortants** (équivalent de la loi des nœuds en électricité).



Dans cet exemple :

$$\Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_4$$

3) Cas particulier du régime QUASI-stationnaire

☛ Définition : On est en **régime QUASI-STATIONNAIRE** lorsque **les conditions imposées aux frontières du milieu de diffusion varient très lentement**, sur une durée caractéristique T beaucoup plus longue que la durée τ caractéristique de la diffusion ($T \gg \tau$).

Les résultats du régime **STATIONNAIRE** sont **utilisables**