PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT

Niveau : CPGE/L2

Pré-requis :

Premier et second principe de la thermodynamique

Mécanique des fluides / Navier Stokes

Libre parcours moyen, notion d’agitation thermique

Echelle mésoscopique / macroscopique / microscopique

Opérateurs vectoriels

Quantité transportée	Mode de transport
Particules	Diffusion Convection libre ou forcée
Energie thermique	Diffusion Convection Rayonnement
Quantité de mouvement	Diffusion Convection Rayonnement
Charge	Diffusion Convection

I) 3) CADRE D'ÉTUDE

Equilibre thermodynamique local :

Les échanges entre systèmes et sous-systèmes sont suffisamment lents pour qu'on puisses définir des échelles de temps et d'espace sur lesquelles les variables ont localement une valeur d'équilibre.
En pratique :

$$\tau_{éq} \sim \tau_{coll} \ll \Delta t \ll \tau_{évol}$$
$$l \ll \Delta x \ll L$$

I) 3) CADRE D'ÉTUDE

Equilibre thermodynamique local :

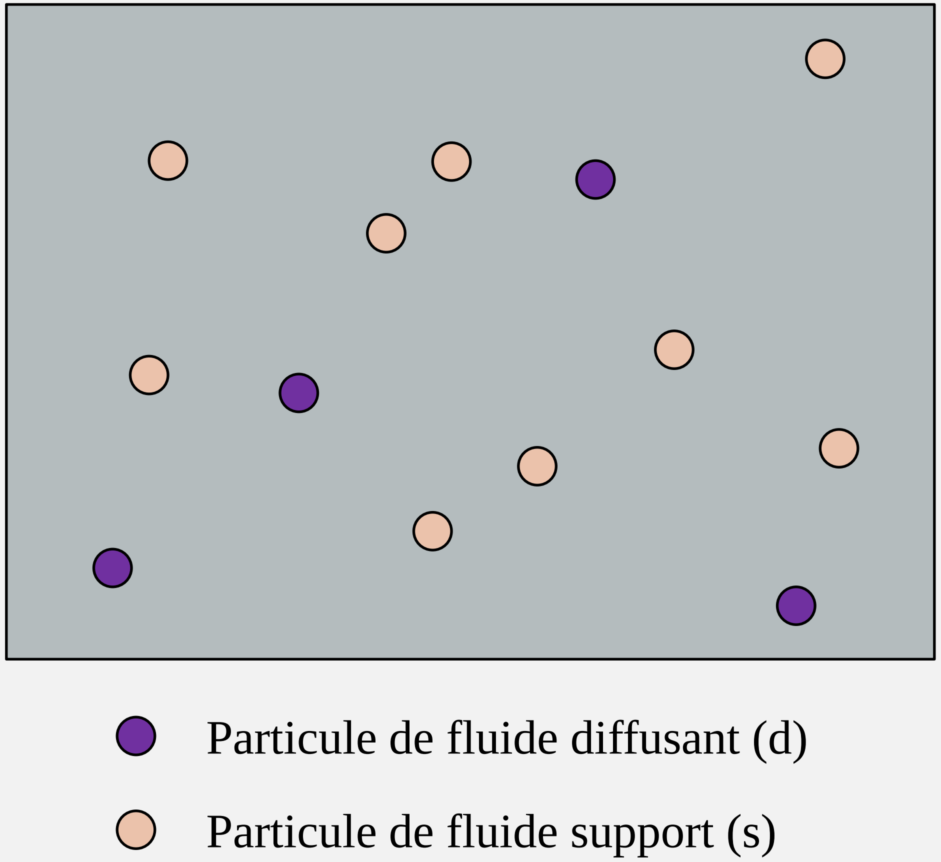
Les échanges entre systèmes et sous-systèmes sont suffisamment lents pour qu'on puisses définir des échelles de temps et d'espace sur lesquelles les variables ont localement une valeur d'équilibre.
En pratique :

$$\tau_{éq} \sim \tau_{coll} \ll \Delta t \ll \tau_{évol}$$
$$l \ll \Delta x \ll L$$

Approximation linéaire :

Les écarts à l'équilibre sont suffisamment faibles pour pouvoir être traités au premier ordre.

II) 1) LOI DE CONSERVATION



II) 1) LOIS DE CONSERVATION

Flux de particules ϕ *(*s^{-1}*) :* Nombre de particules qui traversent une surface Σ par unité de temps

Vecteur densité de courant de particules $\overrightarrow{j_N}$ $(m^{-2}s^{-1})$:

$$\phi = \iint_{\Sigma} \overrightarrow{j_N}.\overrightarrow{dS}$$

Nombre de particules d^2N qui traversent une surface $\overrightarrow{dS}$ pendant dt :

$$d^2N = \overrightarrow{j_N}.\overrightarrow{dS}\,dt$$

II) 1) LOIS DE CONSERVATION

Quantité conservée	**Flux/densité de flux**	**Equation de conservation**
Particules *n : densité locale de particule*	$d^2N = \overrightarrow{j_N}.\overrightarrow{dS}\,dt$	$\frac{\partial n}{\partial t} + div\left(\overrightarrow{j_N}\right) = 0$
Energie thermique *e : énergie thermique volumique*	$d^2Q = \overrightarrow{j_Q}.\overrightarrow{dS}\,dt$	$\frac{\partial e}{\partial t} + div\left(\overrightarrow{j_Q}\right) = 0$
Quantité de mouvement p_x *: densité volumique de quantité de mouvement*	$d^2P_x = \overrightarrow{j_{P_x}}.\overrightarrow{dS}\,dt$	$\frac{\partial p_x}{\partial t} + div\left(\overrightarrow{j_{P_x}}\right) = 0$
Charge ρ *: densité volumique de charge*	$d^2q = \overrightarrow{j_e}.\overrightarrow{dS}\,dt$	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\left(\overrightarrow{j_e}\right) = 0$

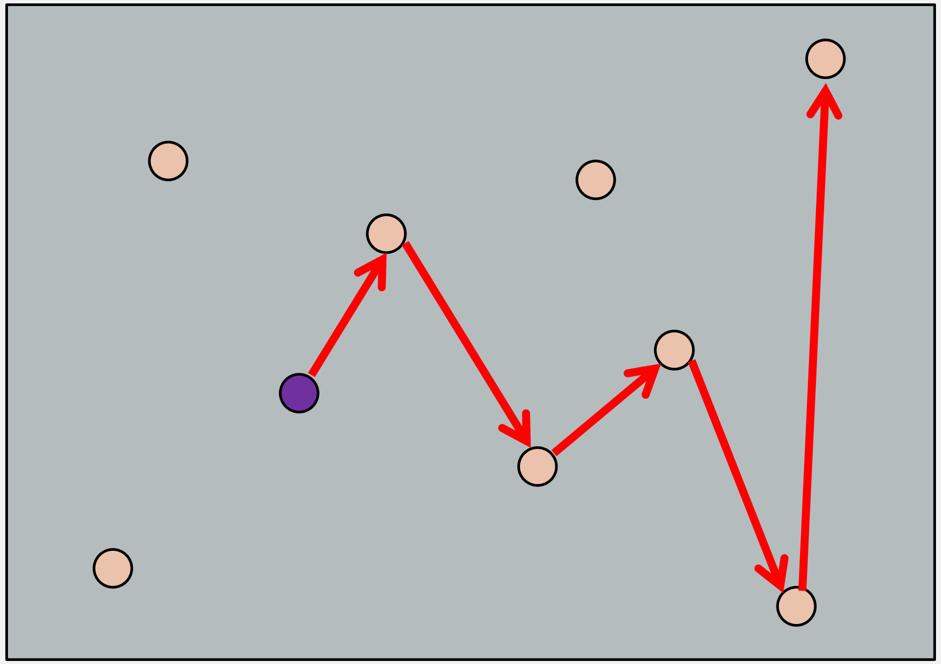
II) 2) LOIS PHÉNOMÉNOLOGIQUES

Quantité conservée	Loi phénoménologique	Coefficient cinétique
Particules	Loi de Fick : $\overrightarrow{j_N} = -D\ \overrightarrow{grad}(n)$	D diffusivité en $m^2.s^{-1}$
Energie thermique	Loi de Fourier : $\overrightarrow{j_Q} = -\lambda\ \overrightarrow{grad}(T)$	λ conductivité thermique en $Wm^{-1}K^{-1}$
Quantité de mouvement	Loi de Newton : $j_{P_x}^z = -\eta \frac{\partial v_x}{\partial z}$	η viscosité dynamique en Pa.s
Charge	Loi d'Ohm : $\overrightarrow{j_e} = -\sigma\ \overrightarrow{grad}(V)$	σ conductivité électrique en $\Omega^{-1}.m^{-1}$

II) 3) ÉQUATION DE DIFFUSION

Quantité conservée	Loi phénoménologique
Particules	$\frac{\partial n}{\partial t} = D\ \Delta n$
Energie thermique	$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{th}\ \Delta T$ avec $D_{th} = \frac{\lambda}{\rho c}$
Quantité de mouvement	$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \nu \Delta \vec{v}$
Charge	$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \sigma \mu_0 \Delta \vec{E}$

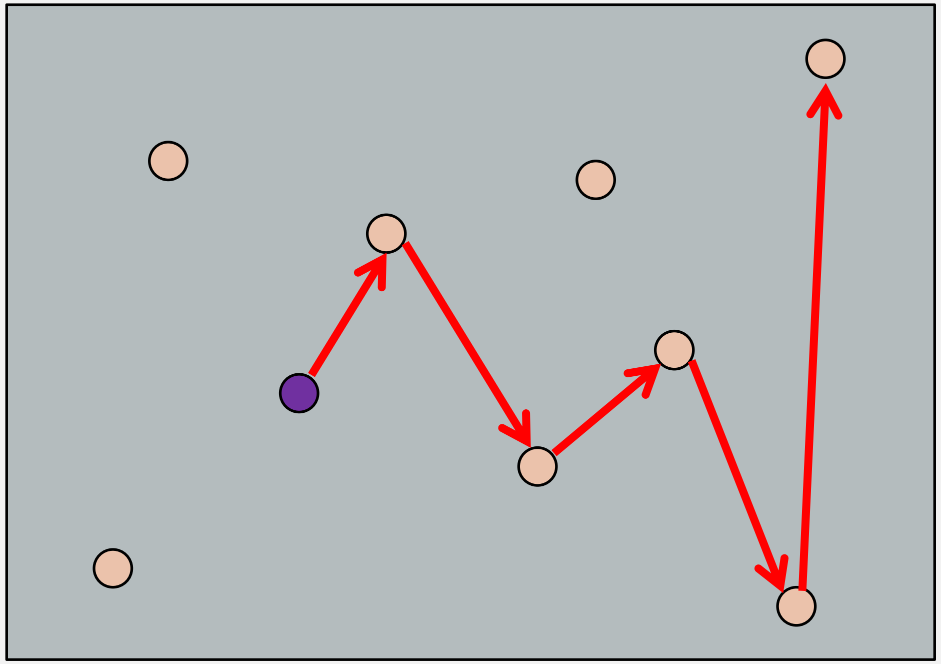
II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE



Particule de fluide diffusant (d)

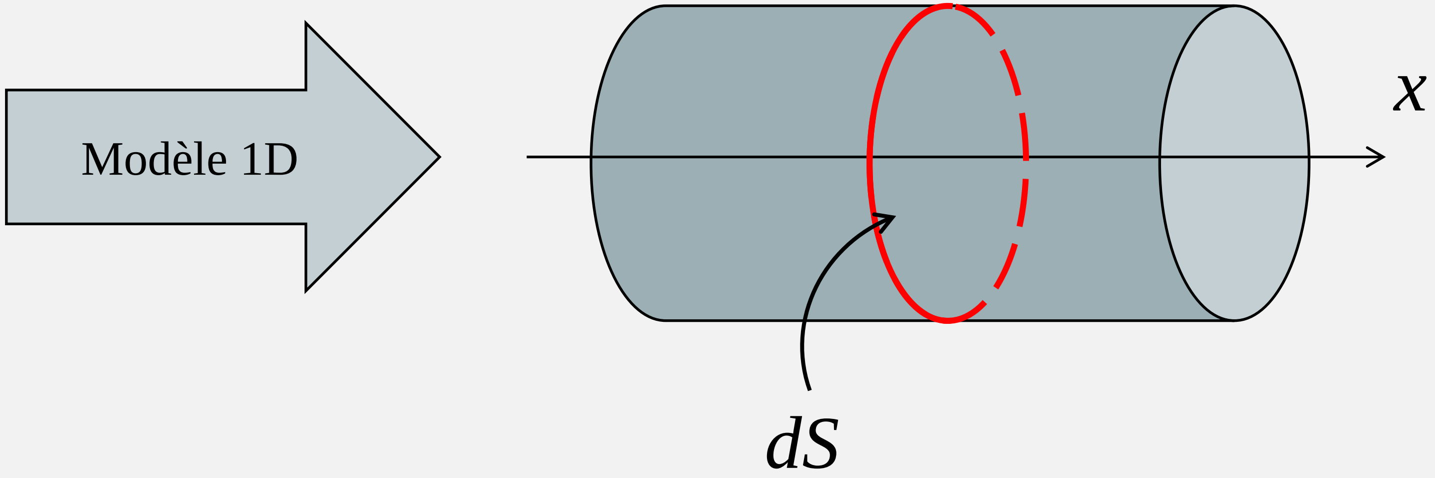
Particule de fluide support (s)

II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE



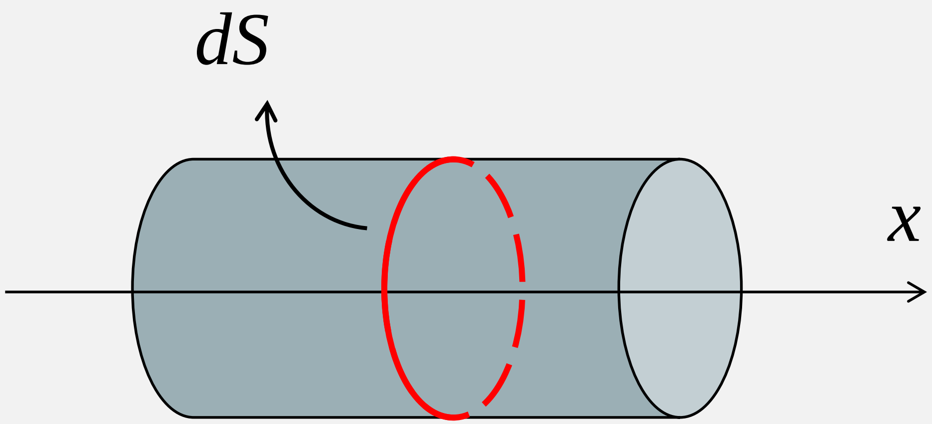
Particule de fluide diffusant (d)

Particule de fluide support (s)



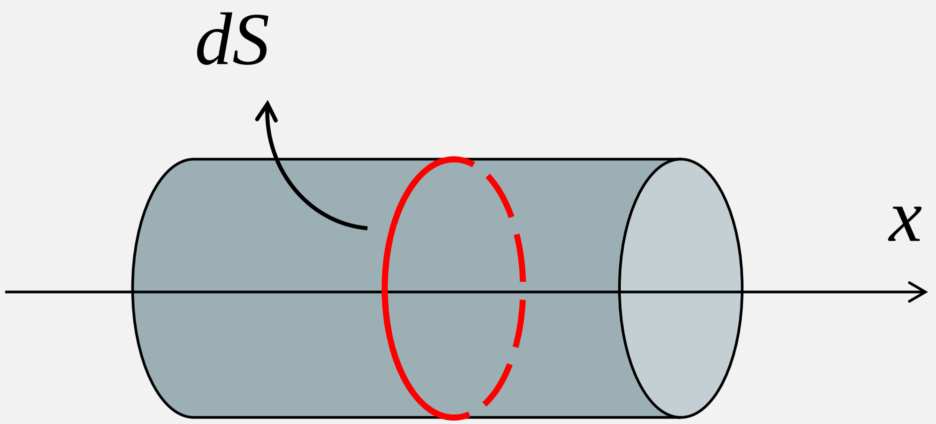
δN : Nombre de particules traversant la section d'abscisse x entre t et t+dt

II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE



l^* : libre parcours moyen
v^* : vitesse quadratique moyenne

II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE

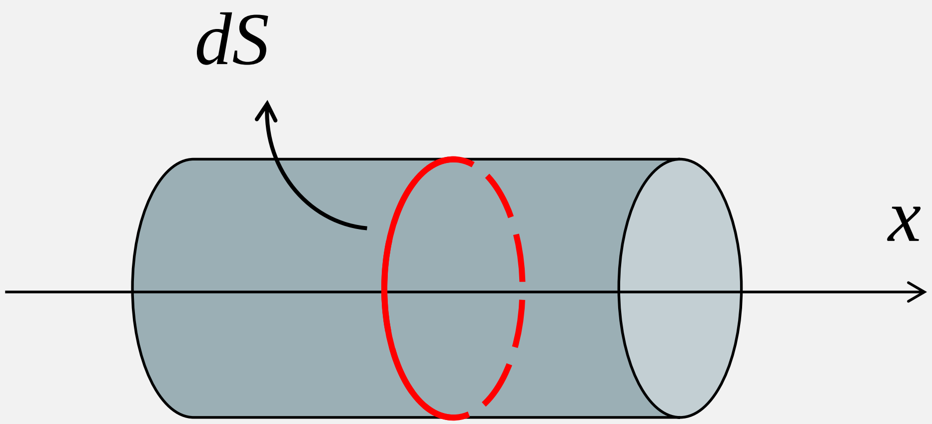


Hypothèses :

- $\forall i \; \|\vec{v_i}\| = v^*$ la vitesse quadratique moyenne

l^* : libre parcours moyen
v^* : vitesse quadratique moyenne

II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE

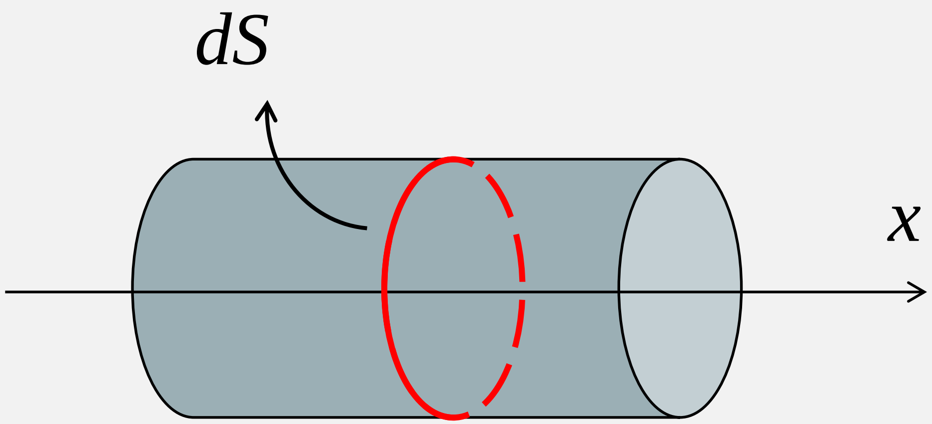


Hypothèses :

- $\forall i \ \|\overrightarrow{v_i}\| = v^*$ la vitesse quadratique moyenne
- Isotropie de la distribution des vitesse : équiprobabilité des directions $\pm\overrightarrow{u_x}, \pm\overrightarrow{u_y}, \pm\overrightarrow{u_z}$

l^* : libre parcours moyen
v^* : vitesse quadratique moyenne

II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE

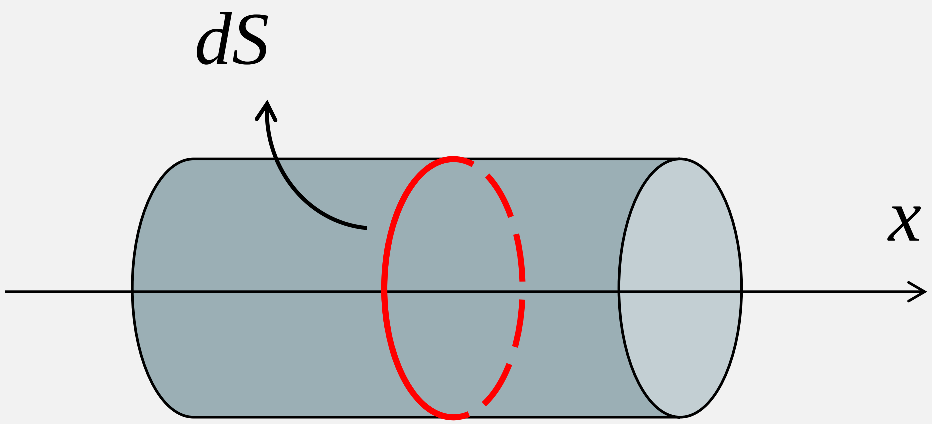


l^* : libre parcours moyen
v^* : vitesse quadratique moyenne

Hypothèses :

- $\forall i \ \|\overrightarrow{v_i}\| = v^*$ la vitesse quadratique moyenne
- Isotropie de la distribution des vitesse : équiprobabilité des directions $\pm\overrightarrow{u_x}$, $\pm\overrightarrow{u_y}$, $\pm\overrightarrow{u_z}$
- Aucune interaction entre deux chocs des molécules diffusantes sur les molécules support → mouvement rectiligne uniforme

II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE

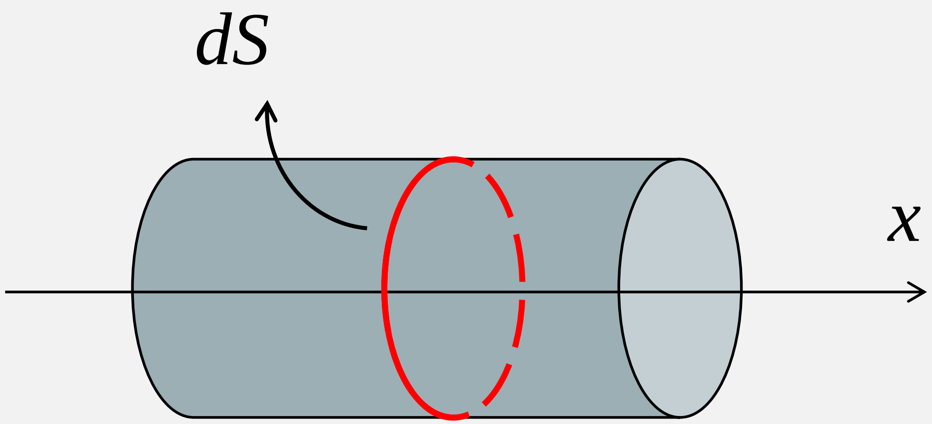


l^* : libre parcours moyen
v^* : vitesse quadratique moyenne

Hypothèses :

- $\forall i \ \|\overrightarrow{v_i}\| = v^*$ la vitesse quadratique moyenne
- Isotropie de la distribution des vitesse : équiprobabilité des directions $\pm\overrightarrow{u_x}, \pm\overrightarrow{u_y}, \pm\overrightarrow{u_z}$
- Aucune interaction entre deux chocs des molécules diffusantes sur les molécules support → mouvement rectiligne uniforme
- Les chocs ont lieu tous les $t^* = \frac{v^*}{l^*}$ au même instant pour toutes les molécules

II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE

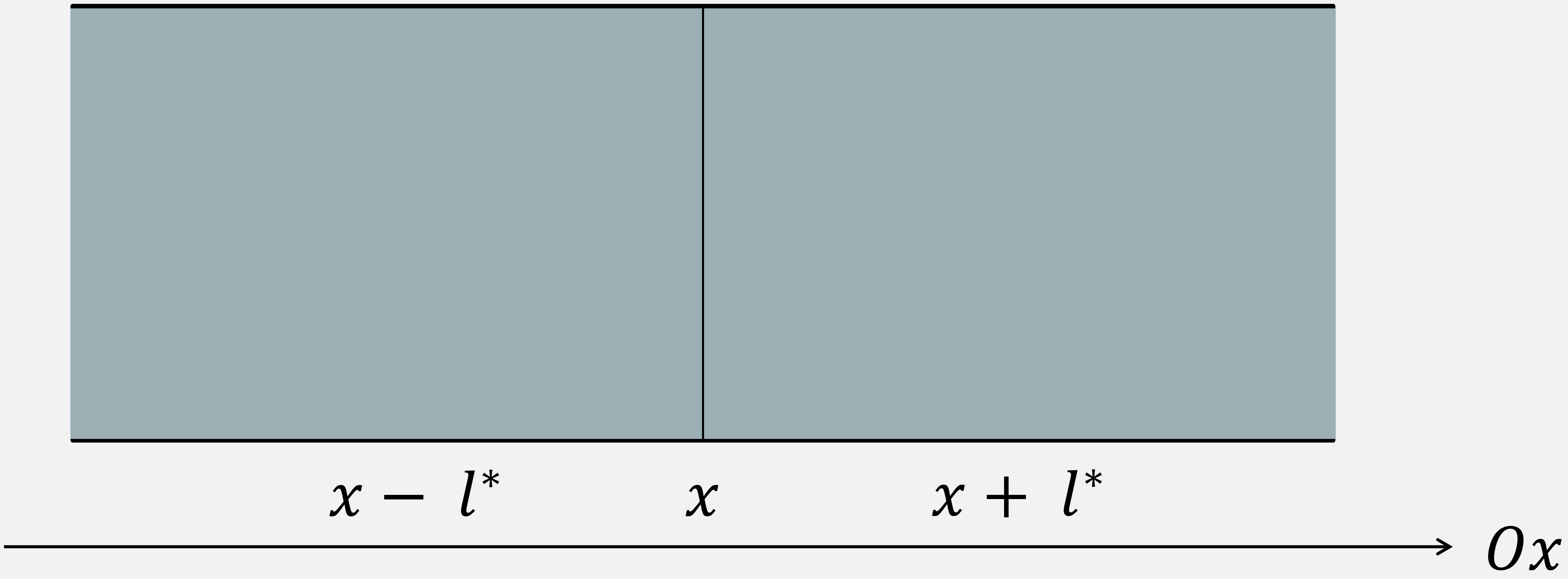


l^* : libre parcours moyen
v^* : vitesse quadratique moyenne

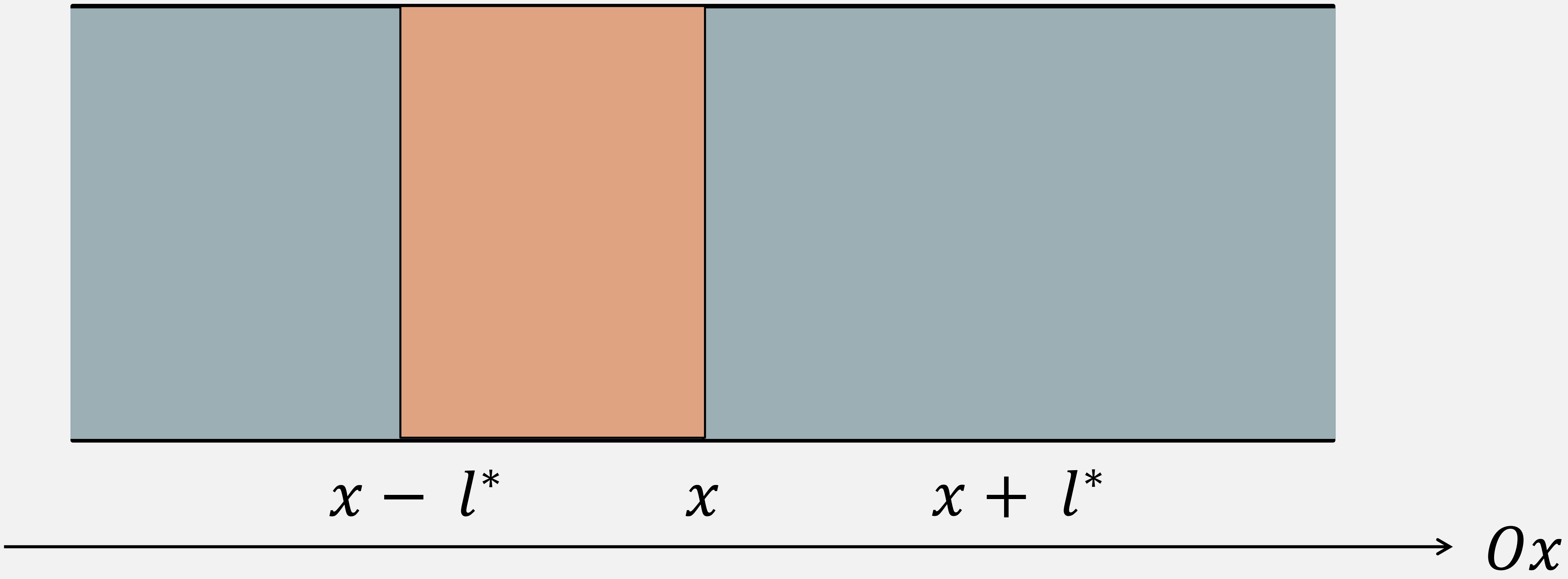
Hypothèses :

- $\forall i \ \|\overrightarrow{v_i}\| = v^*$ la vitesse quadratique moyenne
- Isotropie de la distribution des vitesse : équiprobabilité des directions $\pm\overrightarrow{u_x}, \pm\overrightarrow{u_y}, \pm\overrightarrow{u_z}$
- Aucune interaction entre deux chocs des molécules diffusantes sur les molécules support → mouvement rectiligne uniforme
- Les chocs ont lieu tous les $t^* = \frac{v^*}{l^*}$ au même instant pour toutes les molécules
- ETL : $t^* \ll dt \ll \tau$

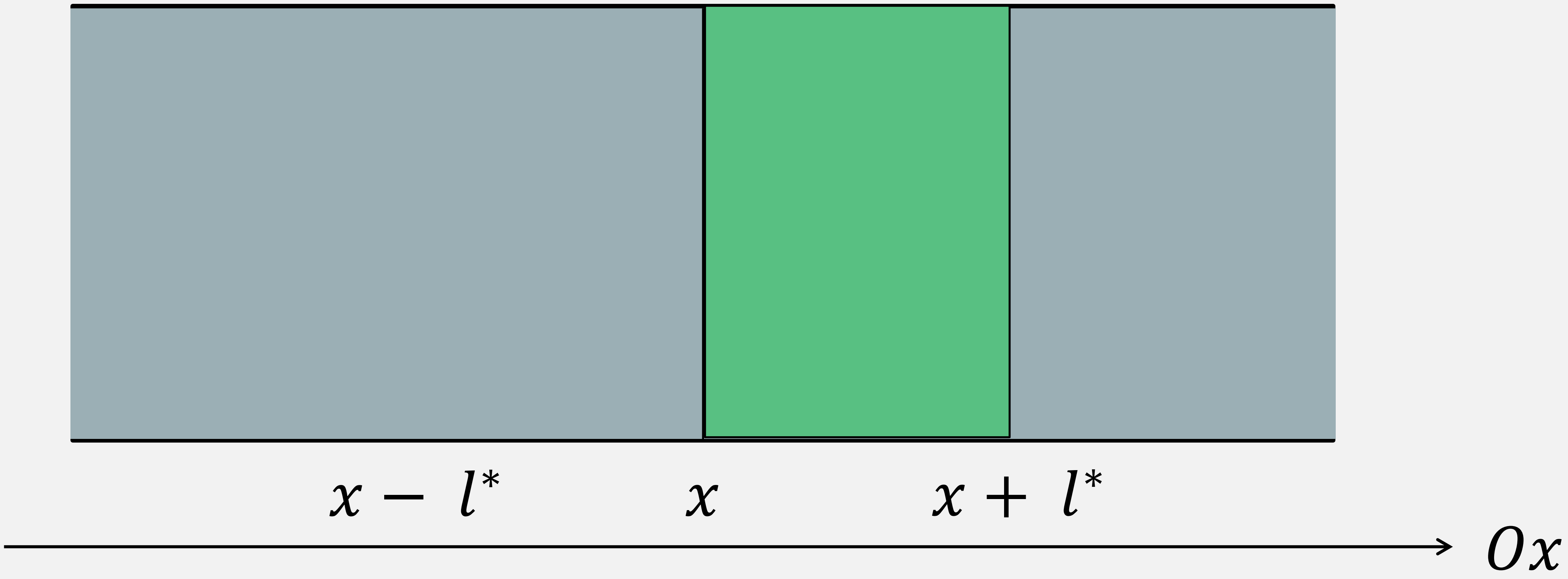
II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE



II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE



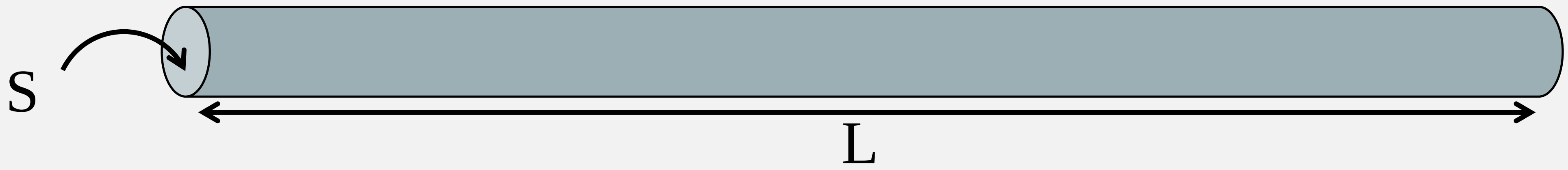
II) 4) ASPECT MICROSCOPIQUE

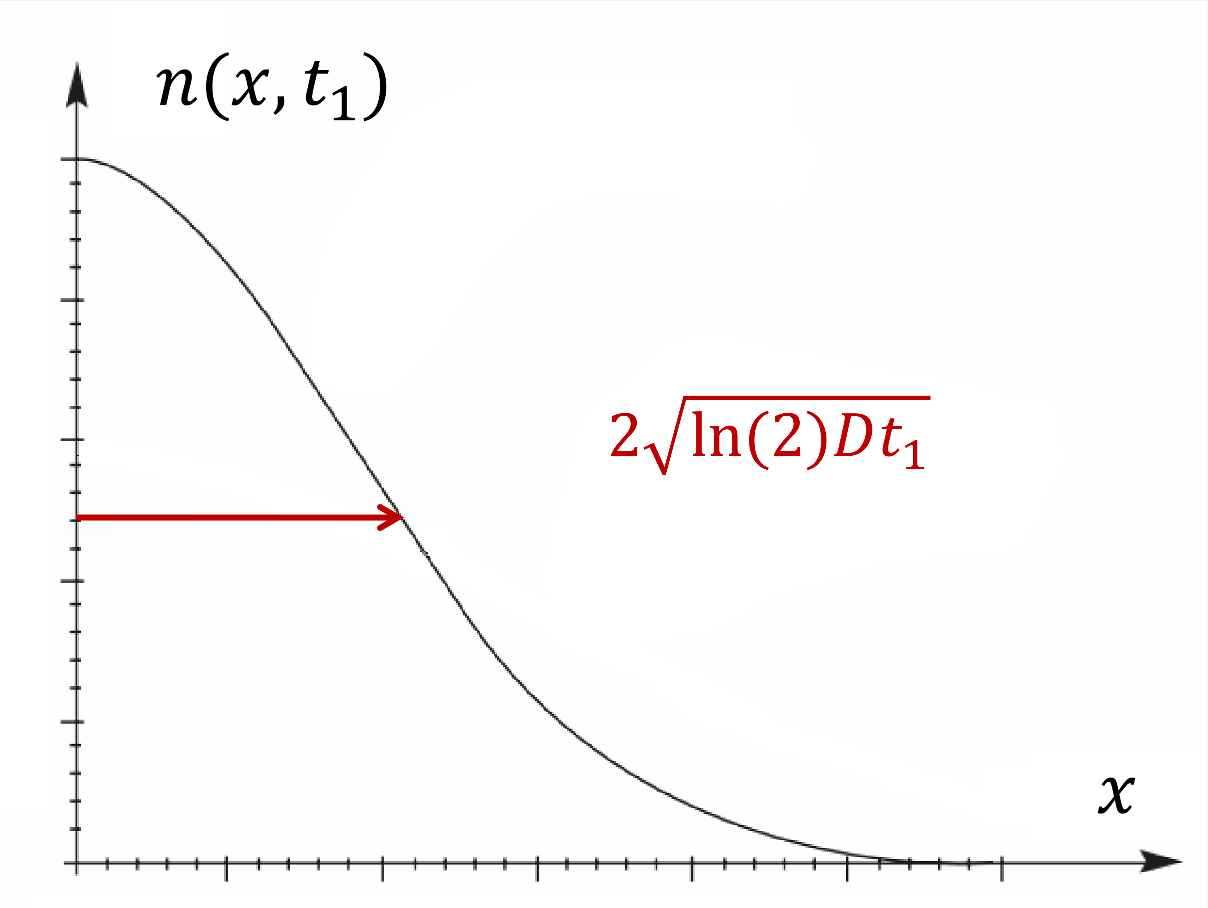


ORDRES DE GRANDEUR POUR LA DIFFUSION DE PARTICULES

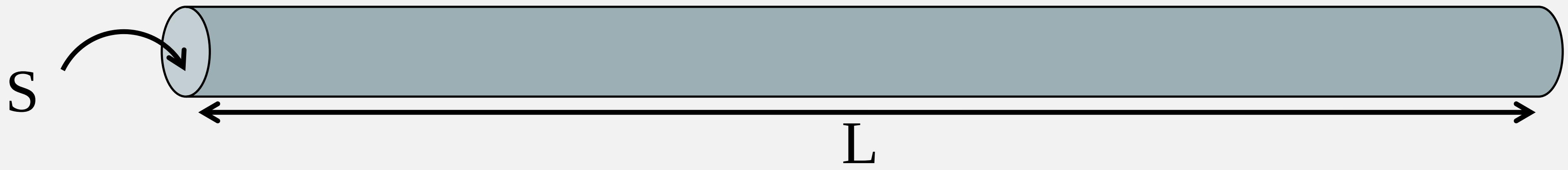
Phase	**Gaz**		**Liquide**		**Solide**
Support	air	air	eau	eau	cuivre
Particules	H_2	O_2	H_2O	sucre	Al
D (m²/s)	7.10^{-5}	2.10^{-5}	3.10^{-4}	6.10^{-10}	$1{,}3.10^{-30}$
Distance caractéristique de diffusion en 1 seconde	1 mm à 1 cm		1 µm à 0,1 cm		1 fm à 10 nm

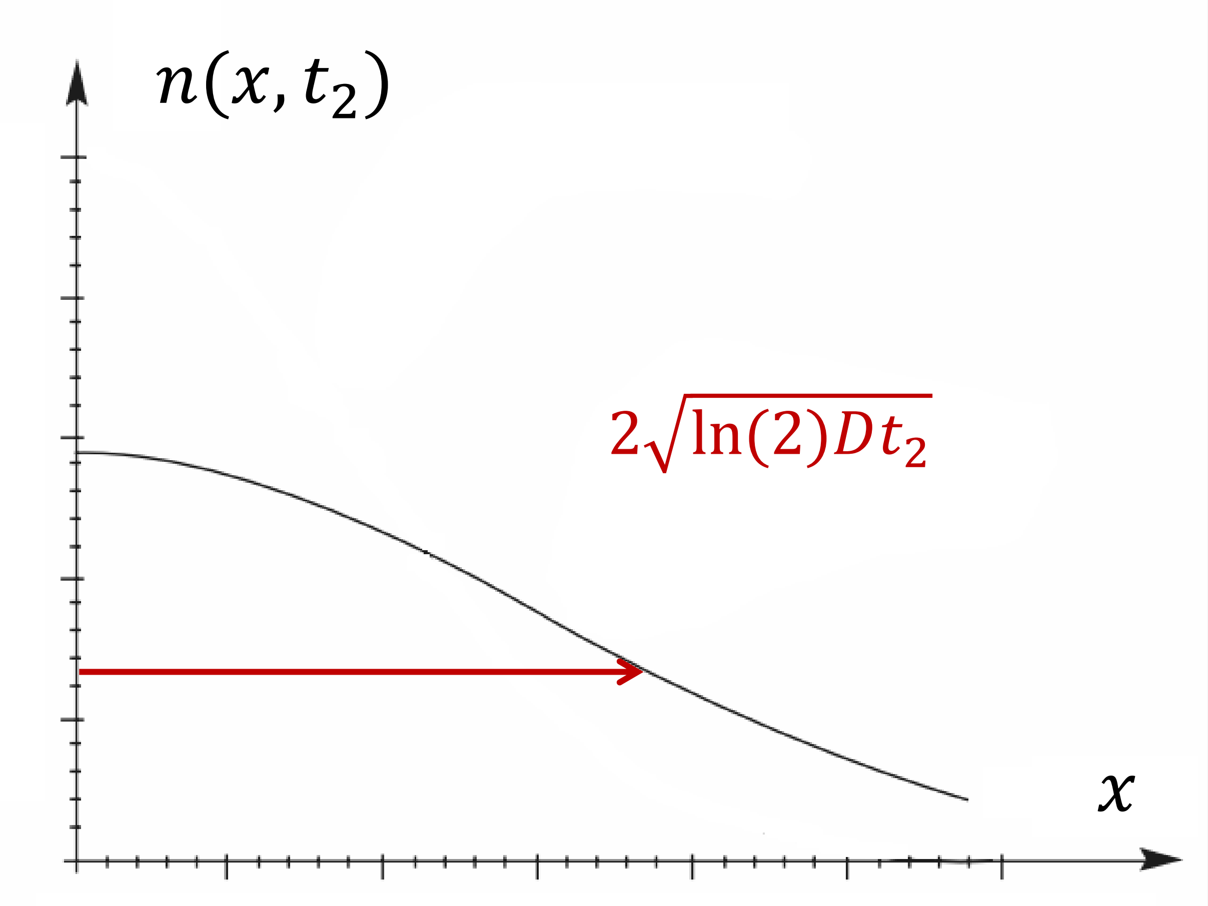
III) 1) DIFFUSION D'UN PIC DE CONCENTRATION





III) 1) DIFFUSION D'UN PIC DE CONCENTRATION





III)2) DIFFUSION À TRAVERS UNE MEMBRANE POREUSE