

# Benjamin Loubet

Unité mixte INRAE-AgroParisTech  
EcoSys : écologie fonctionnelle  
écotoxicologie des  
agroécosystèmes

Cours élaboré avec Patricia Laville

<https://www6.versailles-grignon.inrae.fr/ecosys>



# Thèmes de recherche

- Contribution de l'agriculture au réchauffement climatique et à la pollution de l'air
- Fonctionnement des plantes de grandes cultures en interaction avec les facteurs biotiques et abiotiques
- Etudes des mécanismes d'émission et de dépôt par voie atmosphérique dans les systèmes agricoles

# Objectif du cours biogéochimie appliquée aux écosystèmes

Traiter des outils et méthodes pour étudier les flux de masse et d'énergie de la biosphère continentale et des interactions de l'atmosphère avec le sol et les couverts végétaux.

Enseignements sur les échanges de masse et d'énergie

- Transferts radiatifs + conductifs
- Transferts convectifs (flux de chaleur sensible, latent)
- Cycle de l'eau dans la biosphère.

Ces enseignements serviront de bases à l'introduction de problématiques scientifiques d'actualités :

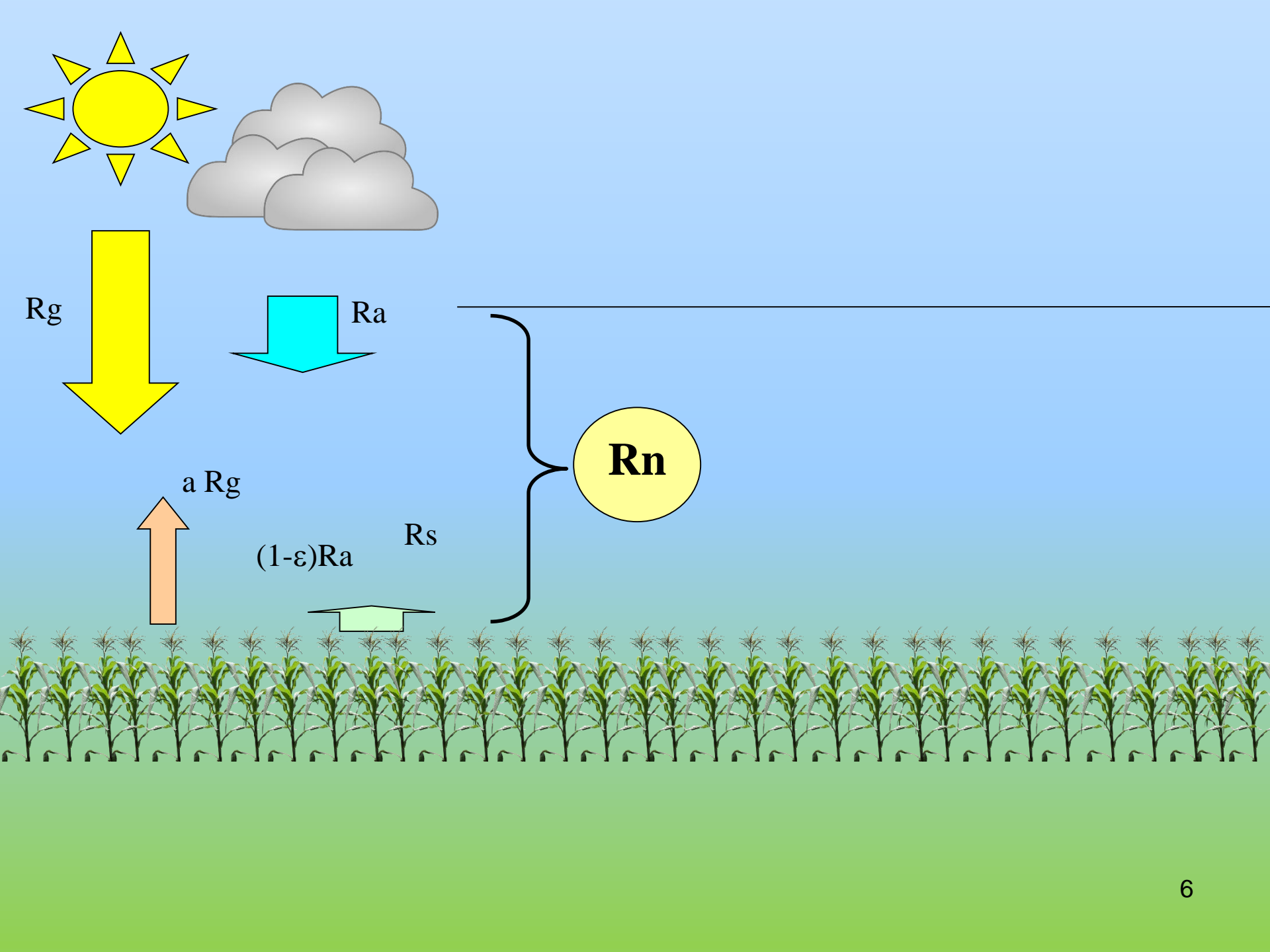
- Contribution de l'activité agricole à l'effet de serre, et à la pollution atmosphérique

# Plan du cours

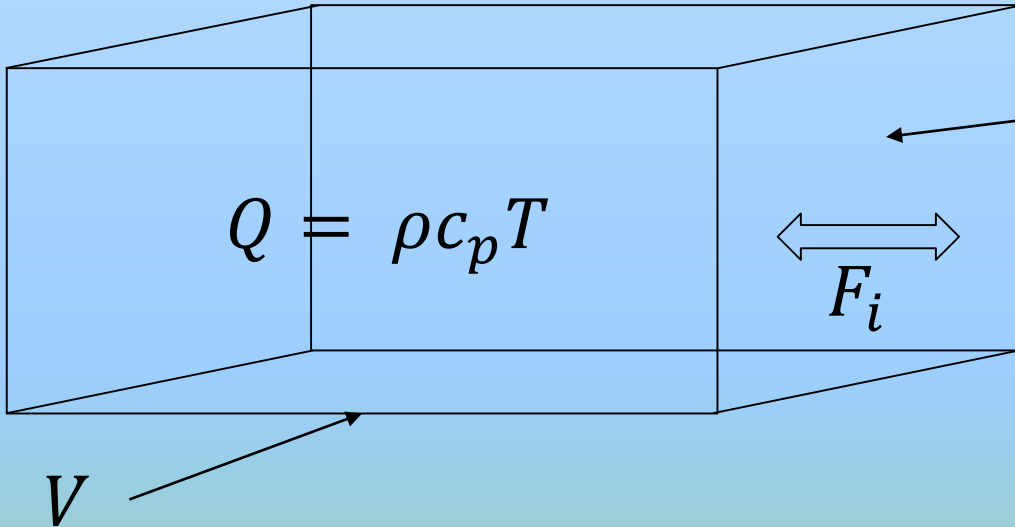
Jour	Durée	Début	1h30	1h30
Mercredi 26/01/2022	03h00	13h30	Introduction et Bilan radiatif	TD bilan radiatif
Mercredi 02/02/2022	03h00	13h30	Transferts convectifs	TD transferts convectifs
Mercredi 09/02/2022	03h00	13h30	Cycle de l'eau	TD cycle de l'eau
Mercredi 16/02/2022	03h00	13h30	TP micrométéo sous R	
Mercredi 09/03/2022	03h00	13h30	Effet de Serre & Cycles C & N	
Mercredi 16/03/2022	03h00	13h30	TP Effet de serre & cycles C & N sous R	
Mercredi 23/03/2022	04h00	13h30	Examen	

# Bilan d'énergie des écosystèmes

## Transferts par convection diffusion et conduction



# Principe de conservation de la chaleur



$$V \frac{dQ}{dt} = \sum S_i F_i$$

$Q$  Energie contenue par unité de volume ( $\text{J m}^{-3}$ )

$\rho$  masse volumique ( $\text{kg m}^{-3}$ )

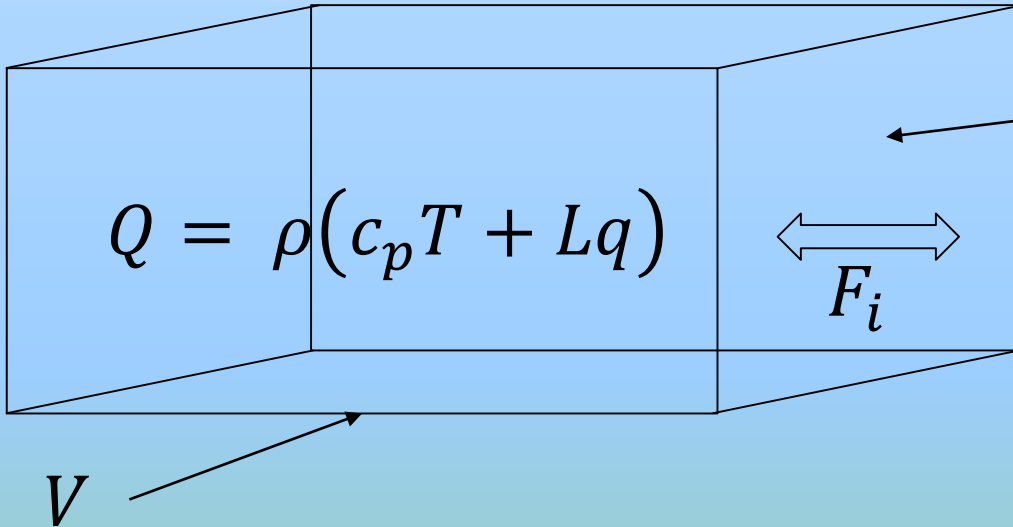
$c_p$  Capacité calorifique massique du matériau ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$T$  température (K)

$F_i$  flux de chaleur par unité de surface ( $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} = \text{W m}^{-2}$ )

$S_i$  surface  $i$  ( $\text{m}^2$ )

# Principe de conservation de la chaleur mélange avec eau



$$V \frac{dQ}{dt} = \sum S_i F_i$$

$Q$  Energie contenue par unité de volume ( $\text{J m}^{-3}$ )

$\rho$  masse volumique ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$c_p$  Capacité calorifique massique du matériau ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$T$  température (K)

$q$  humidité spécifique ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

$L$  chaleur latente contenue dans l'eau ( $\text{J kg}^{-1}$ )

$F_i$  flux de chaleur par unité de surface ( $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} = \text{W m}^{-2}$ )

$S_i$  surface  $i$  ( $\text{m}^2$ )



# Capacité calorifique (cp)

**Capacité calorifique = chaleur massique**

« C'est l'énergie qu'il faut apporter à 1kg du matériau pour élever sa température d'1°K »

« C'est aussi l'énergie restituée au milieu par 1kg du matériau lorsque sa température baisse d' 1°K »

cp est en  $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$

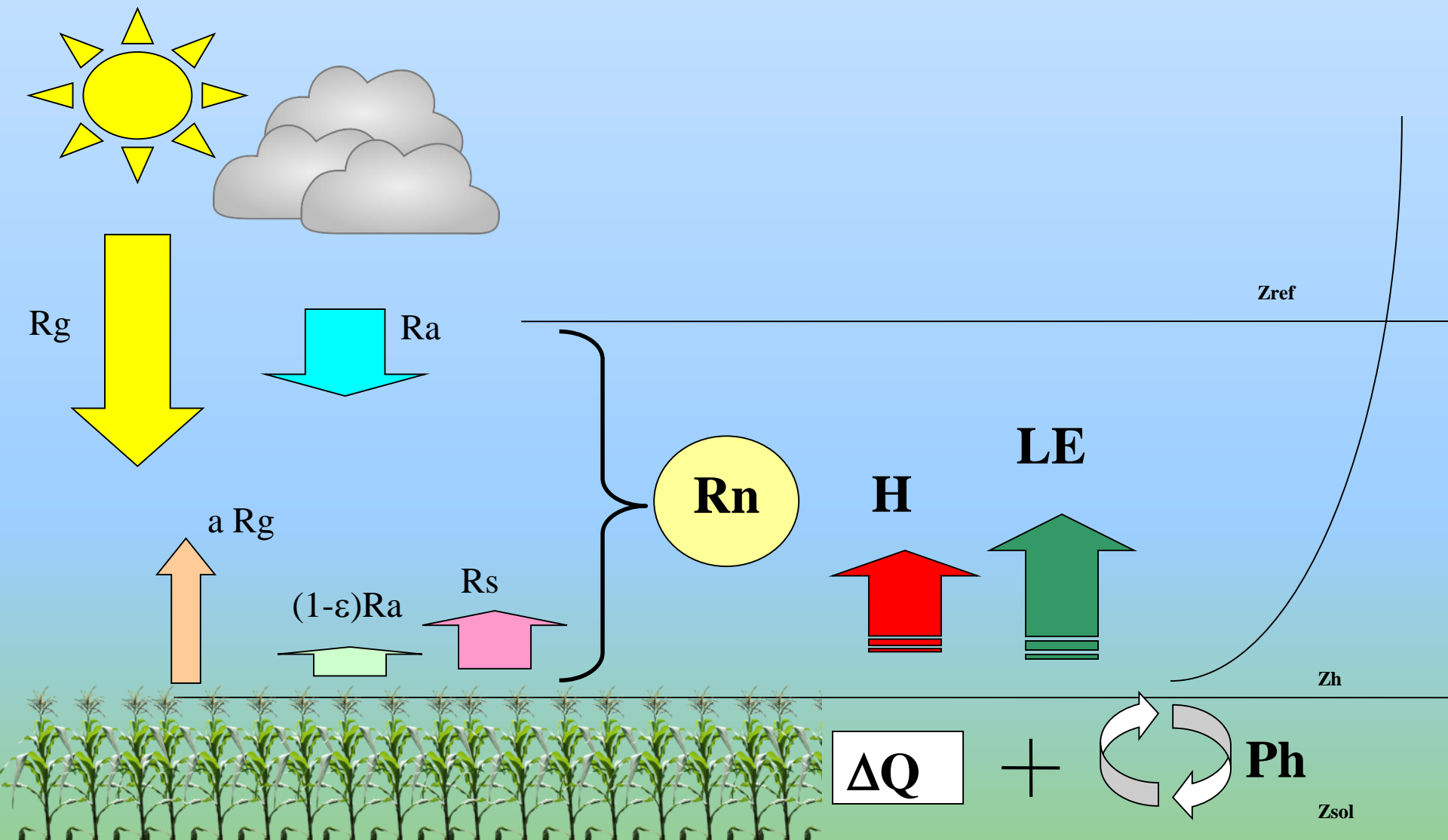
# Chaleur latente de vaporisation (L)

## Chaleur latente de vaporisation

« C'est l'énergie qu'il faut apporter pour vaporiser 1 kg du liquide »

« C'est aussi l'énergie restituée au milieu par 1kg du gaz lorsqu'il se condense»

L est en  $\text{J kg}^{-1}$



$$h_c \frac{dQ}{dt} = R_n + H + LE + G + Ph$$

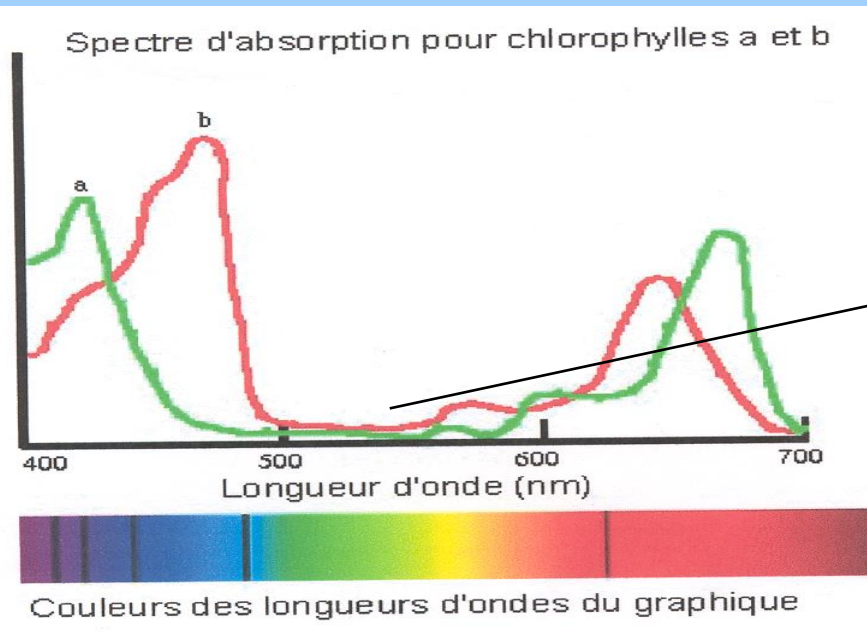
# Energie nécessaire à la photosynthèse

# Energie de photosynthèse (Ph)

Photosynthèse: processus biochimique qui convertit l'énergie de la lumière en énergie chimique (sucres)  
Elle s'effectue dans les chloroplastes des cellules végétales



Hydrate de carbone



Le vert est réfléchi

Il faut ~ 12 quantum de lumière pour transformer 1 molécule de  $CO_2$ <sub>13</sub>  
Ph ~ 1 à 2% du Rg : dépend du stade de développement de la plante

Transfert par conduction dans le sol

# Transfert thermique dans les sols

Intérêts pour la germination et la croissance des plantes,

Influence sur les activités biologiques,...

**Le transfert se fait par conduction**

C'est le mouvement induit par l'agitation thermique des molécules

Support Sol => milieu complexe constitué d'éléments solide, liquide, gazeux

La phase solide

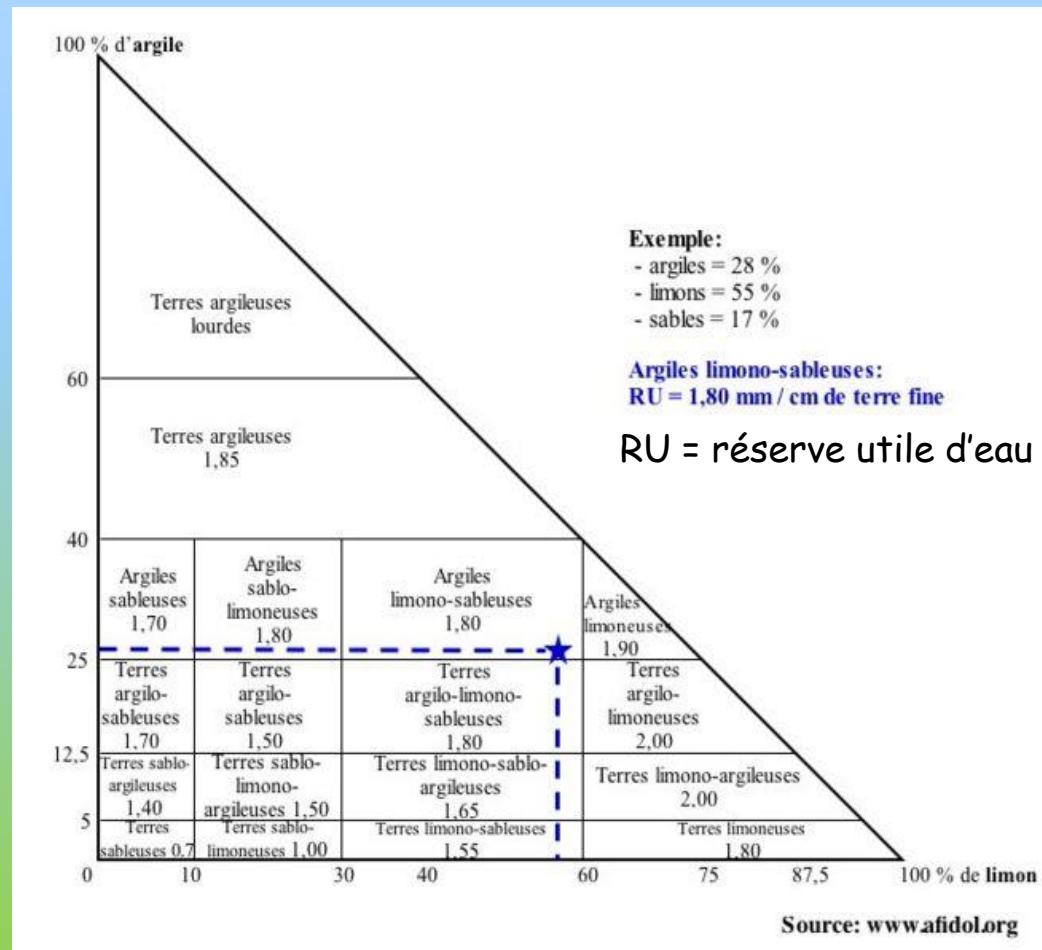
- minéraux
- matières organiques

# Transfert thermique dans les sols

La texture (caractéristique minérale) renseigne sur les Propriétés physiques (transfert d'eau, conduction) et chimiques des sols

Texture : la taille prédominante des particules

- Sable 0.05 -2 mm
- Limon 0.002-0.05 mm
- Argile < 0.002mm





# Transfert thermique dans les sols

Capacité calorifique massique  
d'un sol  $c_p$  ( $\text{J kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$$\rho c_p = \sum x_i c_{p_i}$$

$\rho$  masse volumique ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$x_i$  masse volumique de la fraction  $i$  ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$c_{p_i}$  Capacité calorifique massique de fraction ' $i$ '  
(liquide, solide, gaz)

$\rho$  masse volumique ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$x_i$  masse volumique de la fraction  $i$  ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$c_{p_i}$  Capacité calorifique massique de fraction ' $i$ '  
(liquide, solide, gaz)

# Propagation de la chaleur par conduction

Loi de Fourier

$$G(z) = -\lambda \frac{dT}{dz}$$

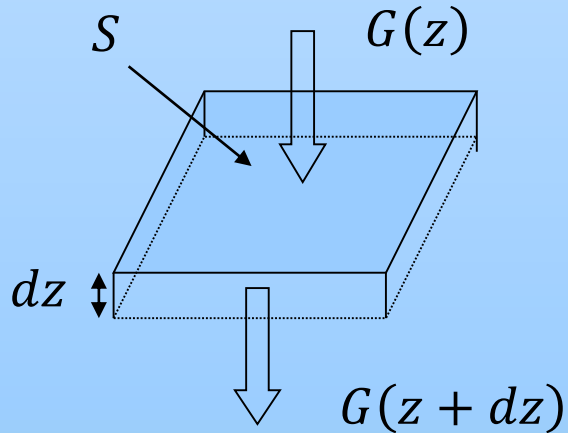
$\lambda$  conductivité thermique ( $\text{J m}^{-1} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ )

$G(z)$  flux de chaleur par unité de surface ( $\text{W m}^{-2}$ )

'-' : circulation des flux à contre gradient

$\lambda$  traduit l'agitation thermique dans un matériaux

# Propagation de la chaleur par conduction



Conservation de la chaleur

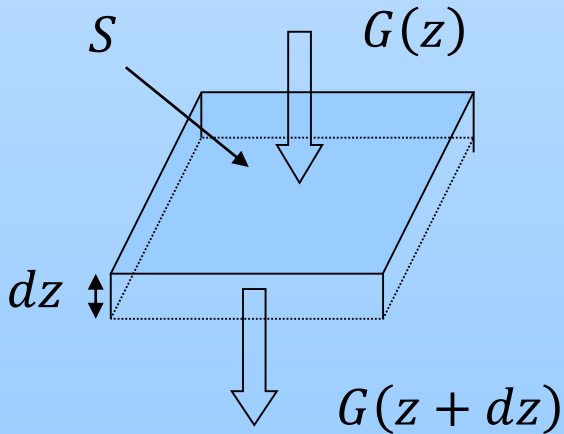
$$V \frac{dQ}{dt} = \sum S_i F_i$$

$$S * dz * \frac{d\rho c_p T}{dt} = S * (G(z) - G(z + dz))$$

On obtient :

$$\frac{d\rho c_p T}{dt} = - \frac{dG(z)}{dz}$$

# Propagation de la chaleur par conduction



Conservation de la chaleur  $\frac{d\rho c_p T}{dt} = -\frac{dG(z)}{dz}$

Loi de Fourier  $G(z) = -\lambda \frac{dT}{dz}$

$$\frac{d\rho c_p T}{dt} = -\frac{d}{dz} \left( -\lambda \frac{dT}{dz} \right)$$

## Equation de diffusion de la chaleur

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d^2 T}{dz^2}$$

$$D_T = \frac{\lambda}{\rho c_p} \text{ diffusivité thermique (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$$

# Variations journalières et annuelles

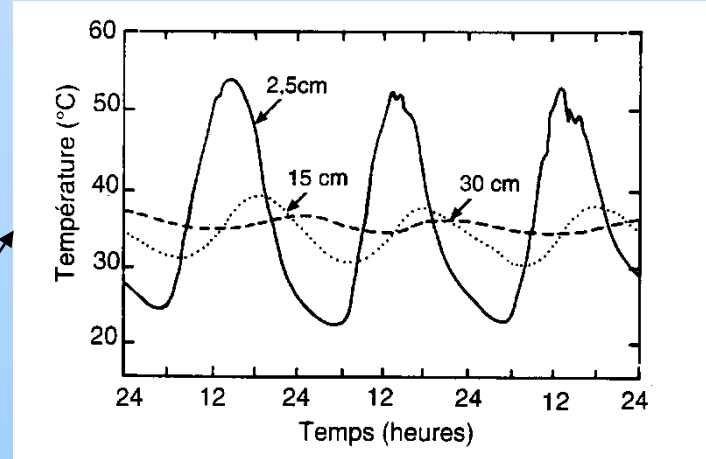
$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d^2T}{dz^2}$$

Conditions aux limites:

$$T(0, t) = T_m + A_s \sin(\omega(t - t_0))$$

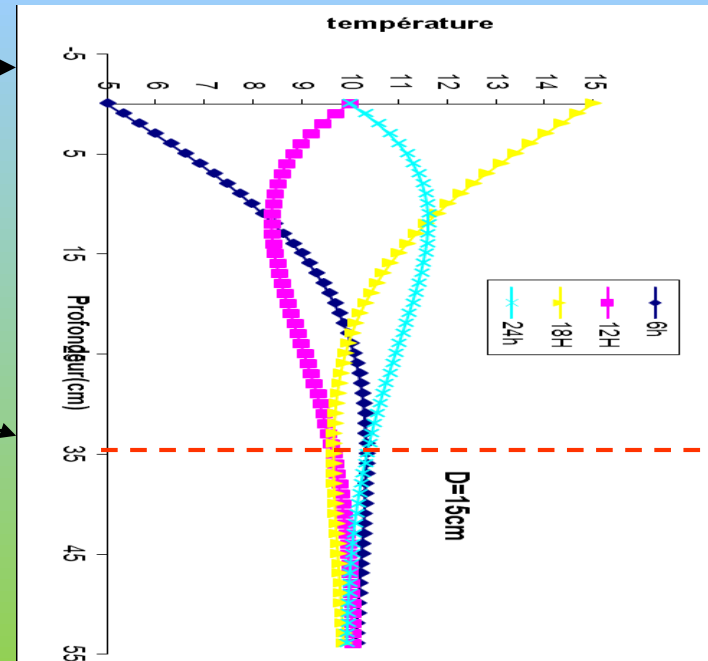
$$T(z_{max}, t) = T_m$$

$$T(z, t) = T_m - A(z) * \sin\left(\omega t - \frac{z}{D}\right)$$



$$A(z) = A_s * \exp\left(-\frac{z}{D}\right)$$

$$D = \sqrt{\frac{2D_T}{\omega}}$$



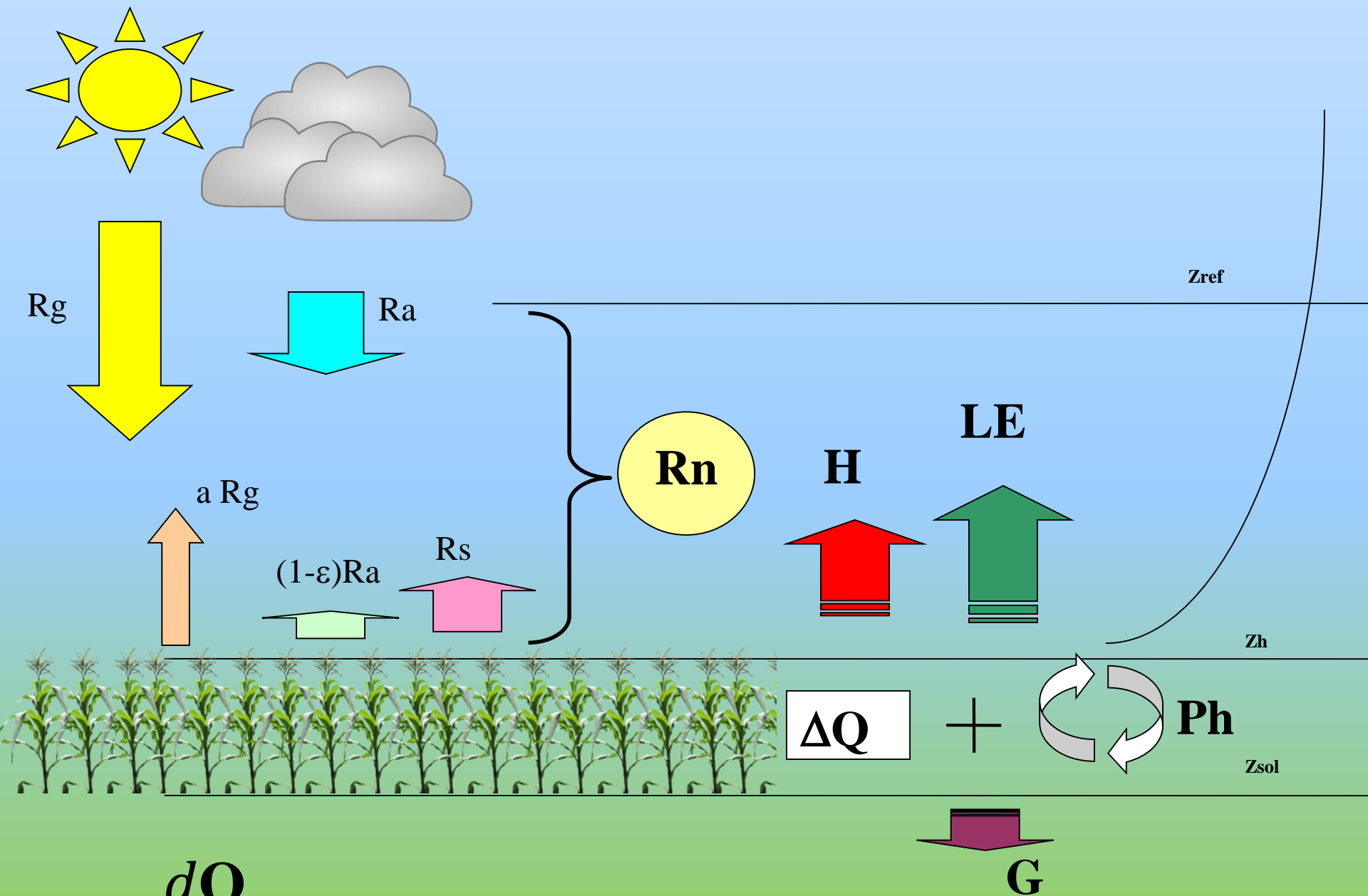
D (jour) profondeur d'amortissement  
 ~ 7 à 16 cm suivant le sol et humidité  
 D (an) ~ 1.5 à 3 m

# Propagation de la chaleur par conduction

Tableau 2.1 — Propriétés thermiques de quelques matériaux naturels (d'après Arya, 1988).

Matériau	Conditions	$\rho$	$C_p$	$C_p$	$\lambda$	$D_T$
		kg·m <sup>-3</sup> x10 <sup>3</sup>	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> x10 <sup>3</sup>	J·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> x10 <sup>6</sup>	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> x10 <sup>-6</sup>
Air	calme, 20°C	0,0012	1,00	0,0012	0,026	21,5
Eau	calme, 20°C	1,00	4,19	4,19	0,58	0,14
Glace	pure, 0°C	0,92	2,10	1,93	2,24	1,16
Neige	fraîche	0,10	2,09	0,21	0,08	0,38
Sol sableux espace poral 40%	sec	1,60	0,80	1,28	0,30	0,24
	saturé	2,00	1,48	2,98	2,20	0,74
Sol argileux espace poral 40%	sec	1,60	0,89	1,42	0,25	0,18
	saturé	2,00	1,55	3,10	1,58	0,51
Sol de tourbière espace poral 80%	sec	0,30	1,92	0,58	0,06	0,10
	saturé	1,10	3,65	4,02	0,50	0,12

# Transferts convectifs et diffusifs



$$h_c \frac{dQ}{dt} = R_n + H + LE + G + Ph$$



# Notion de couche limite

fig. 1: mise en évidence d'une couche limite de surface  
(d'après cours DEA, Brunet, 1996)

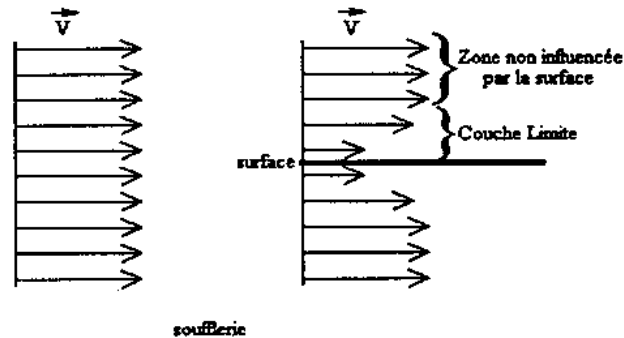
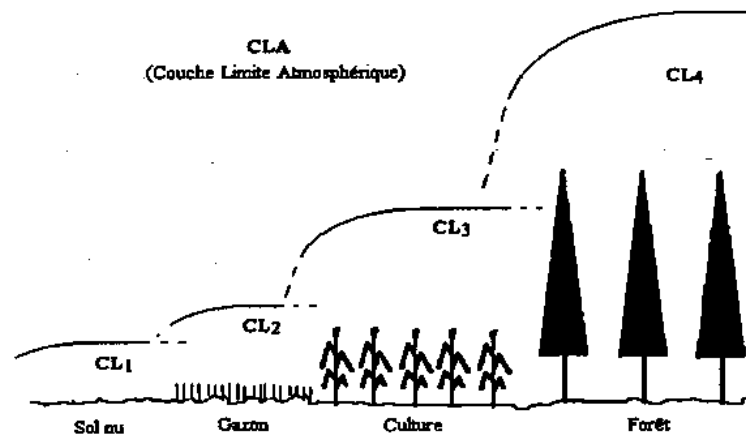
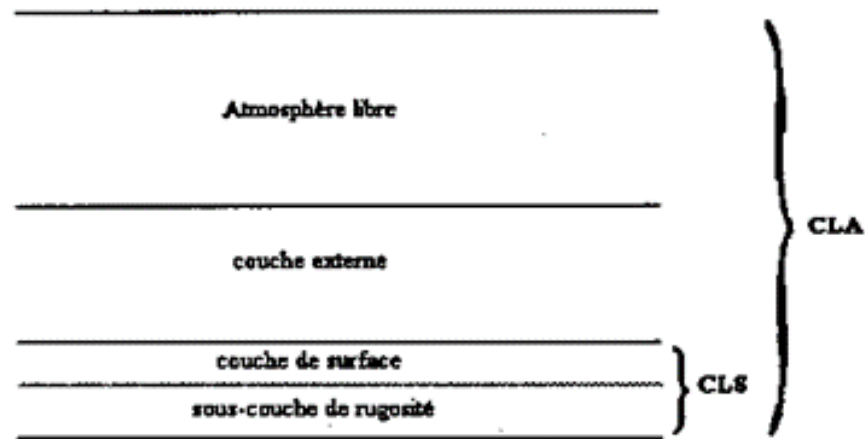


fig. 2: établissement d'une couche limite en fonction du type de surface



# Notion de couche limite

fig. 3: Couches limites



CLA: couche limite atmosphérique  
CLS : couche limite de surface

# Transferts convectifs et diffusifs

**Transferts convectifs** : transfert de masse ou d'énergie par déplacement d'un fluide (air). Convection peut être libre (naturelle) ou forcée.

**Convection libre** : Liée à un gradient de densité (ex: masse d'air + chaude Au contact du sol s'élève et est remplacé par de l'air + froid d'en haut)

**Convection forcée** : Champ extérieur de pression (anticyclone et dépression)

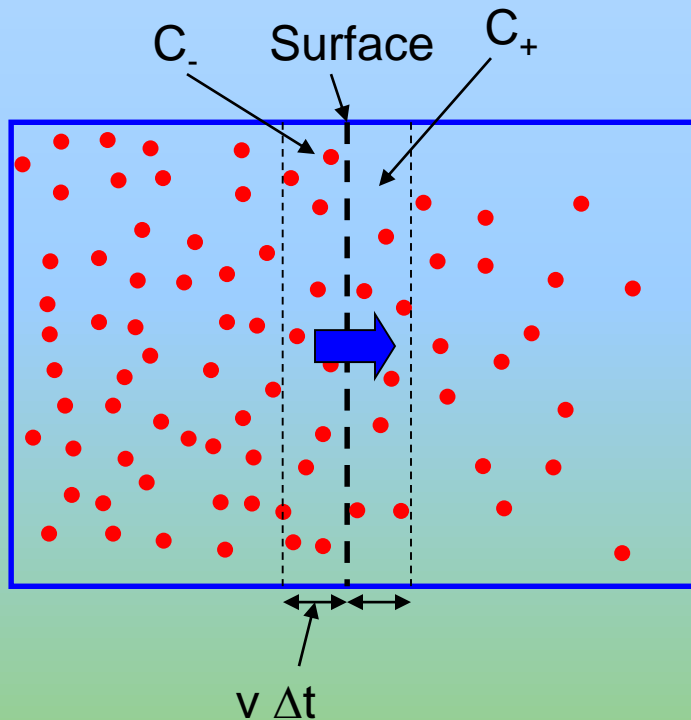
**Convection mixte** = Forcée + libre

**Transferts diffusifs** : transferts par diffusion moléculaire.

Prédominants aux interfaces

# Transferts diffusif

Flux diffusif = issu du mouvement désordonné des molécules (agitation moléculaire)



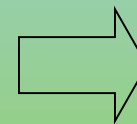
$v$  = vitesse quadratique moyenne  
 $\lambda$  = libre parcours moyen

$$F_x = [C_- v \Delta t - C_+ v \Delta t] / \Delta t$$

$$F_x = (C_- - C_+) v$$

$$C_- - C_+ = - (dC / dx) \Delta x \sim (dC / dx) \lambda$$

$$F_x \sim -\lambda v (dC / dx)$$



$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Loi de Fick

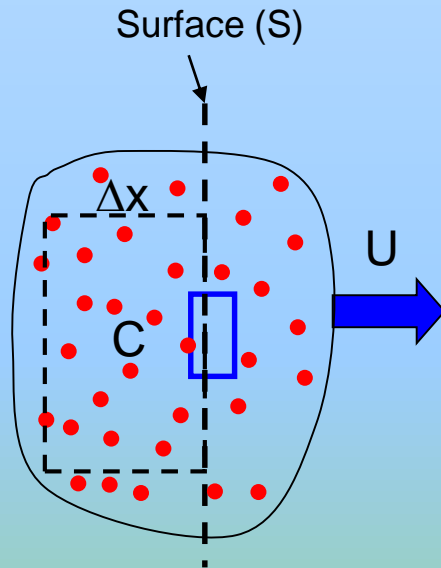
# Transferts diffusif

## QUELQUES VALEURS DE DIFFUSIVITÉS MOLÉCULAIRES

$m^2 s^{-1}$

Gaz-trace	Masse molaire <sup>1</sup> g mol <sup>-1</sup>	Diffusivité moléculaire à 20°C <sup>2</sup> × 10 <sup>-5</sup>
H <sub>2</sub> O	18	2.49 (2.42 <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub>	44	1.51
NH <sub>3</sub>	17	2.29 (2.18 <sup>3</sup> )
SO <sub>2</sub>	64	1.22
HNO <sub>3</sub>	63	1.18
NO <sub>2</sub>	46	1.84
O <sub>3</sub>	48	1.58
Chaleur	-	1.55
V	-	1.55

# Transferts convectifs par mouvement moyen du fluide : L'advection



U normal à la surface S

C concentration ( $\text{kg m}^{-3}$ )  
U vitesse du fluide ( $\text{m s}^{-1}$ )

$$\Delta x = U \Delta t$$

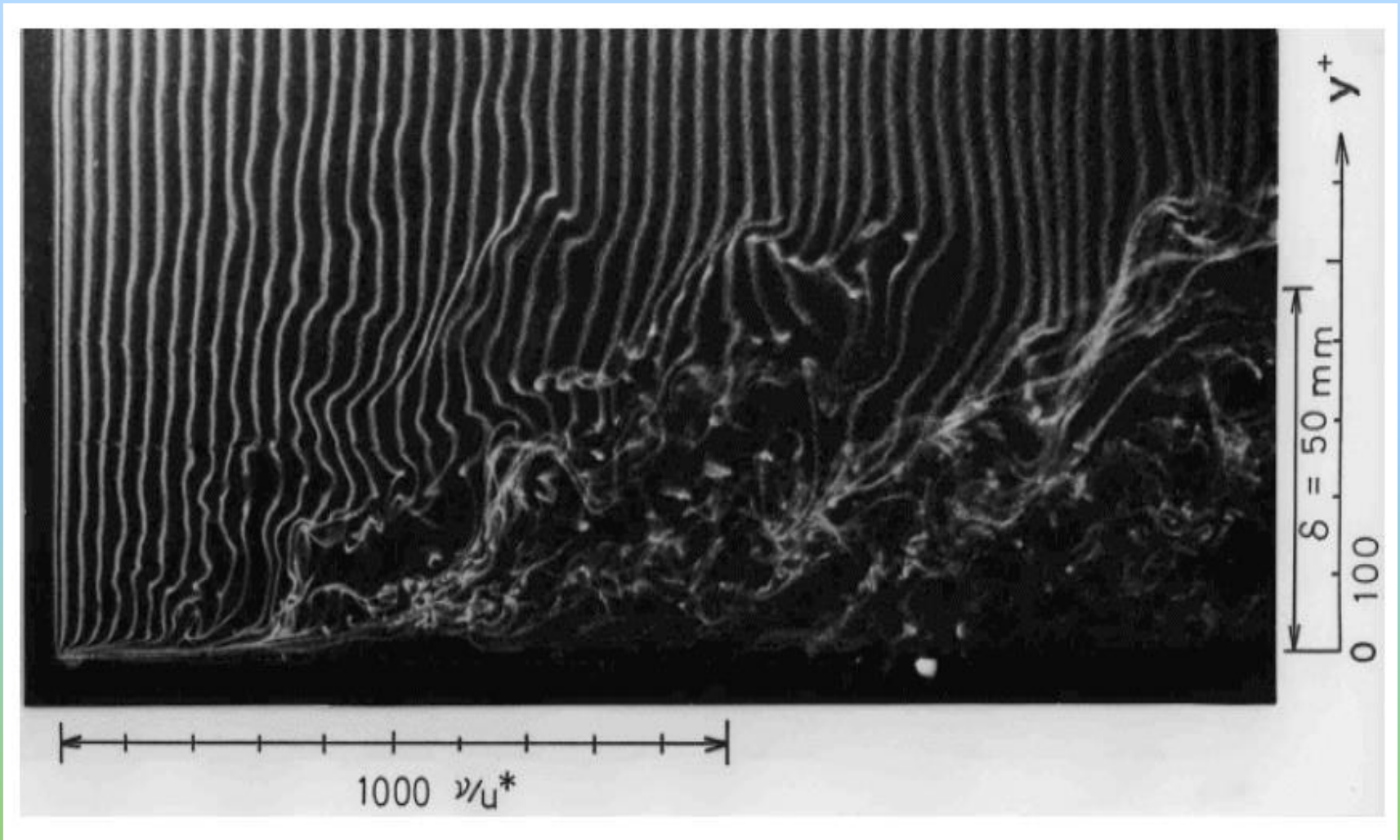
Nb de moles traversant la surface S pendant  $\Delta t$

$$N = C S \Delta x$$

D'où le flux advectif

$$F = \frac{C \cdot S \cdot \Delta x}{S \cdot \Delta t} = C \cdot U$$

# Transferts turbulent



# Transferts turbulent

UN ÉCOULEMENT EST-IL LAMINAIRE OU TURBULENT ?

Reynolds Number

$$Re = \frac{d \cdot u}{\nu}$$

$$\nu_{\text{air}} = 1.55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



Osborne Reynolds

**Re** is the ratio between inertial and viscous forces

d, physical dimension

u, fluid velocity

$\nu$ , kinematic viscosity

$Re < 2000$ , laminar

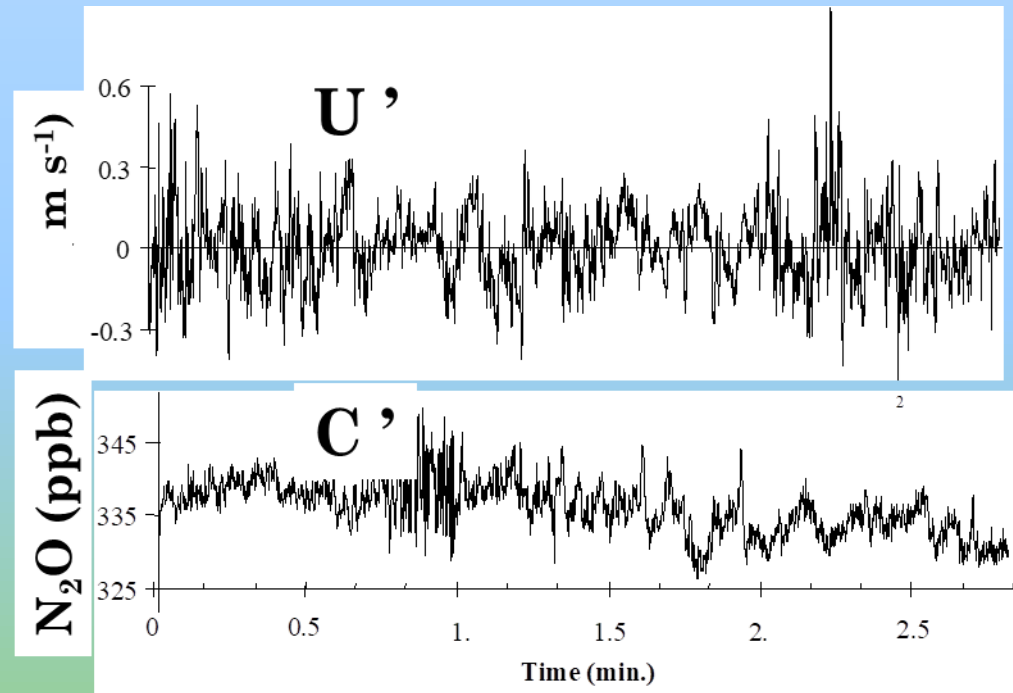
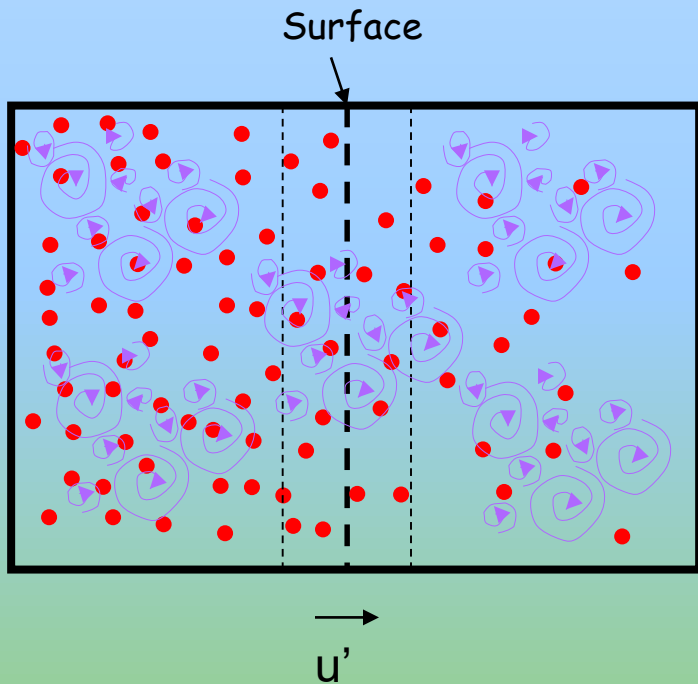
Nb de Reynolds critique

Quel est le nombre de Reynolds à la surface d'une plaque plane?



# Transferts turbulent

Contrairement au cas laminaire (diffusion moléculaire), il y a fluctuation des quantités macroscopiques (concentration et vitesse du vent) au cours du temps



Quel est l'ordre de grandeur des déplacements turbulents?

Comparer au libre parcours moyen?

Quel phénomène est prépondérant entre diffusion moléculaire et turbulente ?

# Transferts turbulent

## LA DÉCOMPOSITION DE REYNOLDS

Pour toute variable  $X$  turbulente:

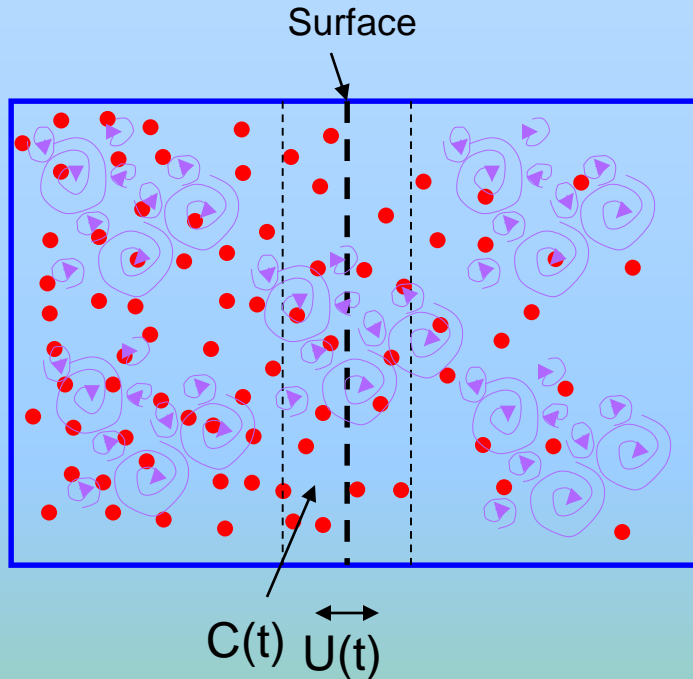
$$X(t) = \overline{X} + x'(t)$$

$$E(X(t)) = \overline{X}$$

$$E(x'(t)) = 0$$

Démontrer la dernière égalité

# Transferts turbulents : le flux turbulent



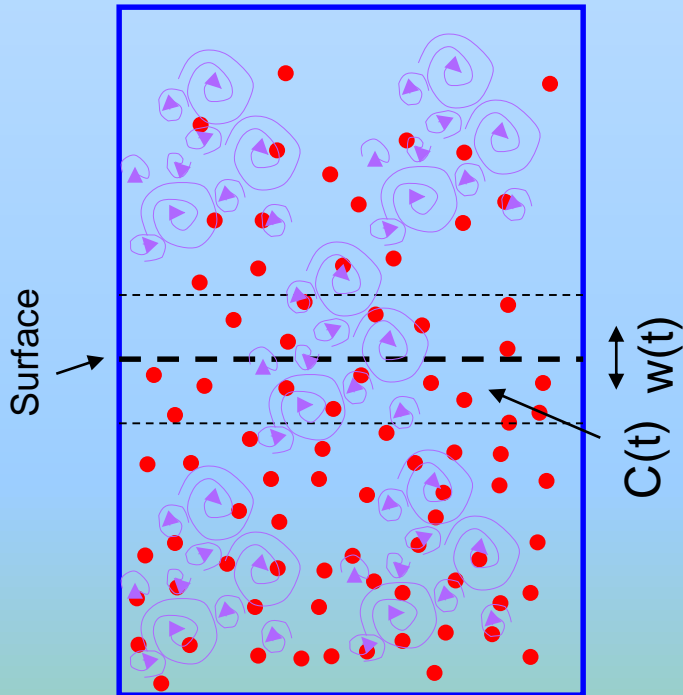
Flux advectif instantané

$$F(t) = U(t) \cdot C(t)$$

$$\overline{F} = \overline{U(t) \cdot C(t)} = \overline{(\overline{U} + u') \cdot (\overline{C} + c')} = \overline{U} \cdot \overline{C} + \overline{u' c'}$$

Démontrer la dernière égalité

# Transferts turbulent : les flux turbulent de chaleur



$$F = \bar{W}\bar{C} + \overline{w'c'}$$

$$\bar{W} = 0$$

$$F = \overline{w'c'}$$

Pour la chaleur sensible  $H$ , on remplace  $c$  par  $\rho c_p T$   
Pour la chaleur latente, le flux d'évaporation  $E$   
s'exprime en remplaçant  $c$  par  $\rho q$ , où  $q$  est la  
concentration spécifique en vapeur d'eau ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

# Flux turbulents dans la couche limite

Flux de chaleur sensible

$$H = \rho.c_p.\overline{w'T'} \quad \text{W.m}^{-2}$$

$\rho$  densité de l'air  $1.2 \text{ kg.m}^{-3}$  à  $25^\circ\text{C}$   
 $c_p$  chaleur massique de l'air  $1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Flux de chaleur latente

$$E = \overline{\rho w' q'} \quad \text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$LE = L\overline{\rho w' q'} \quad \text{W.m}^{-2}$$

$q$  humidité spécifique de l'air  $\text{kg.kg}^{-1}$   
 $L$  chaleur latente de vaporisation de l'eau  $2.44 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$  à  $25^\circ\text{C}$

# Transferts turbulent : le flux turbulent

Par analogie avec la diffusion moléculaire, on définit:

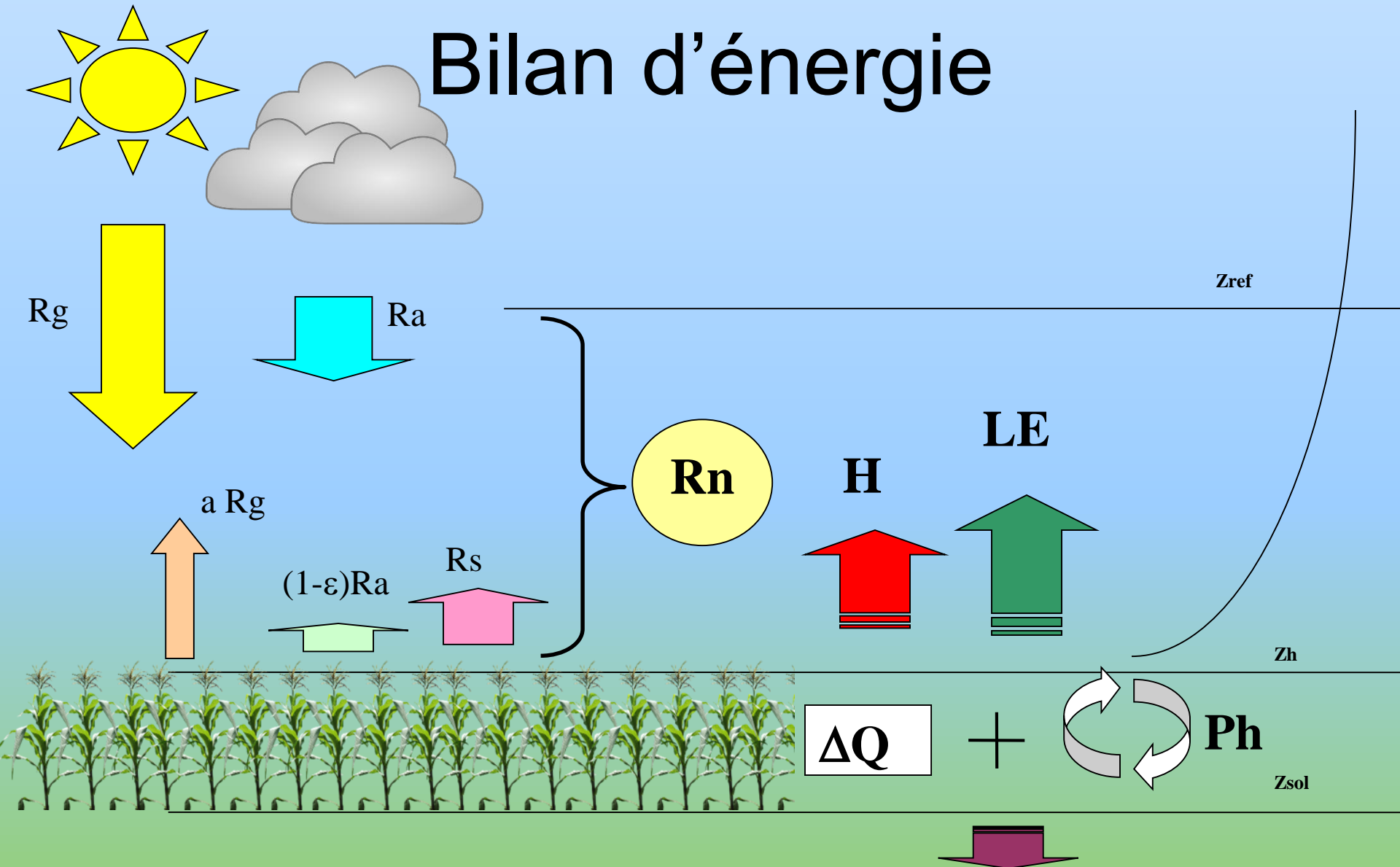
$$F = -D_{turb}(z) \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$D_{turb}(z) \sim 0.4 u_* z$$

$$D_{turb} \sim 10^{-2} - 10^0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

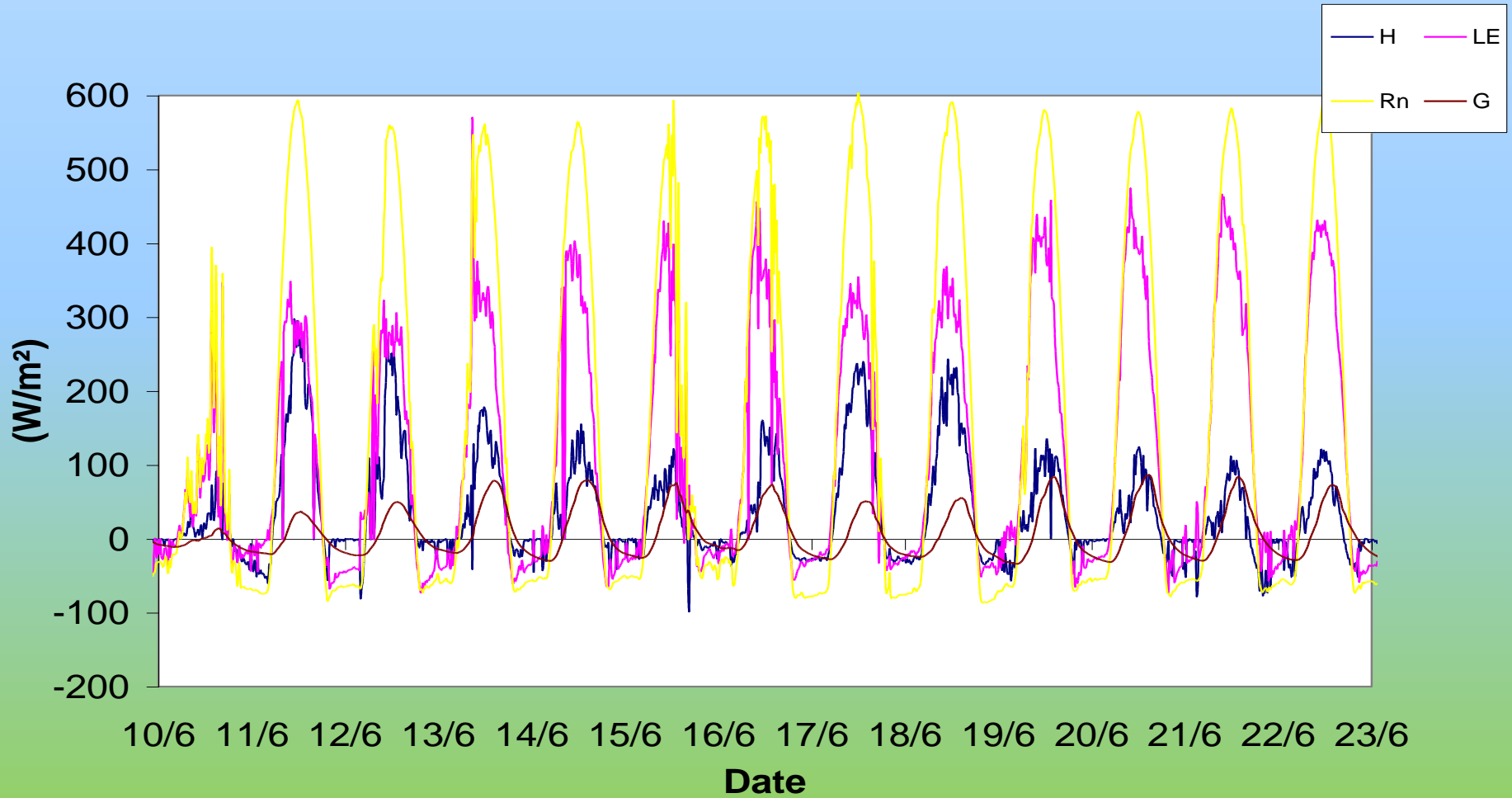
$$D_{mol} \sim 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

# Bilan d'énergie



$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d\rho c_p T}{dt} = R_n + H + LE + G + Ph$$

# Bilan d'énergie





Profils de vent et de concentration  
dans la couche limite de surface et  
expression des flux par rapport  
aux gradients

# Flux de quantité de mouvement dans la couche limite

$\tau$ : flux de quantité de mouvement ou contrainte de cisaillement.  
C'est la perte de quantité de mouvement par frottement au contact de la surface

$$\tau = -\overline{\rho u \cdot w} = \rho \cdot u_*^2$$

$u_*$  vitesse de frottement

Dépend des caractéristiques de la surface et notamment de sa rugosité ( $z_0$ )

# Profils dans la couche limite

théorie Prandtl de longueur de mélange

$$k_m = k u_* z$$

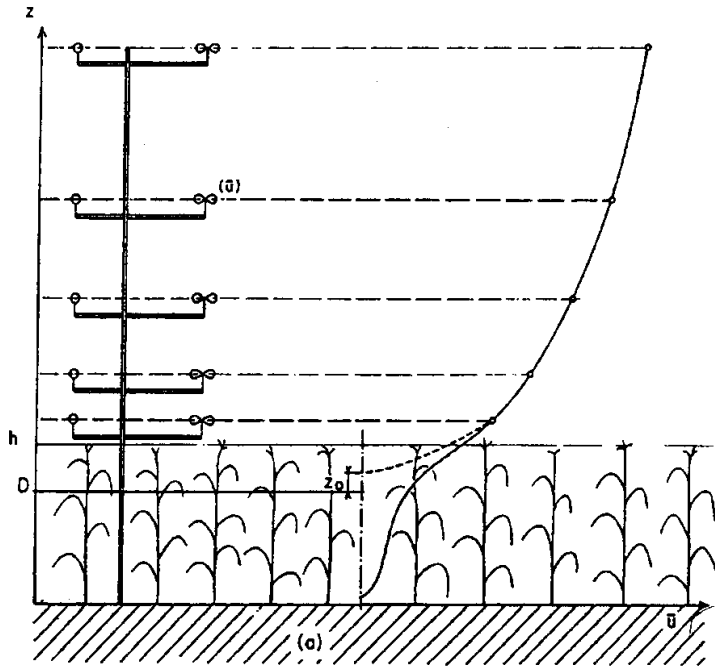
$$\tau = \rho u_*^2 z = \rho k u_* z \frac{du}{dz}$$

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$$

Le profil de vent est logarithmique

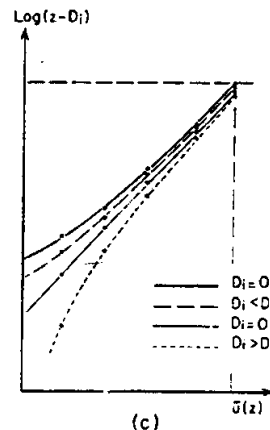
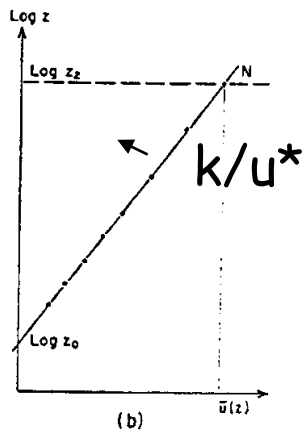
C'est vrai aussi pour les scalaires et la chaleur

# Profil de vent dans la couche limite



Profils types de vent dans couche limite au dessus d'une parcelle végétale

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \times \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$$



$z_0$  hauteur de rugosité  $\sim 10\%hc$

Sans couvert

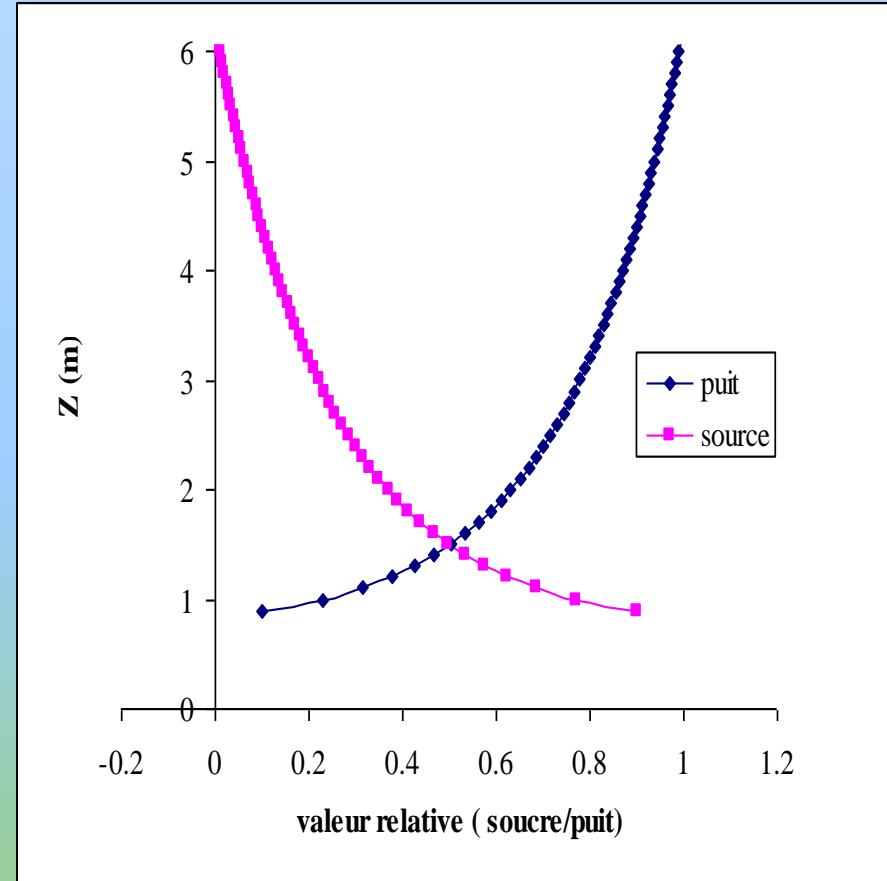
Avec couvert

## Profil verticaux pour les autres scalaires

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \times \ln \left( \frac{z}{Z_0} \right)$$

$$c(z) = \frac{c_*}{k} \times \ln \left( \frac{z}{Z_0} \right)$$

$$T(z) = \frac{T_*}{k} \times \ln \left( \frac{z}{Z_0} \right)$$



$u^*$ ,  $c^*$ ,  $T^*$  longueur d'échelle  $\Rightarrow$  source - ; puits +

# Expressions des flux

$$\tau = -\rho \overline{uw} = \rho u_*^2 = \rho K \frac{du}{dz} = \rho h(u_2 - u_1)$$

*Flux de quantité de mvt*

$$H = \rho c_p \overline{T\overline{w}} = -\rho T^* u^* = -\rho c_p K \frac{dT}{dz} = -\rho c_p h(T_2 - T_1)$$

*Flux de chaleur sensible*

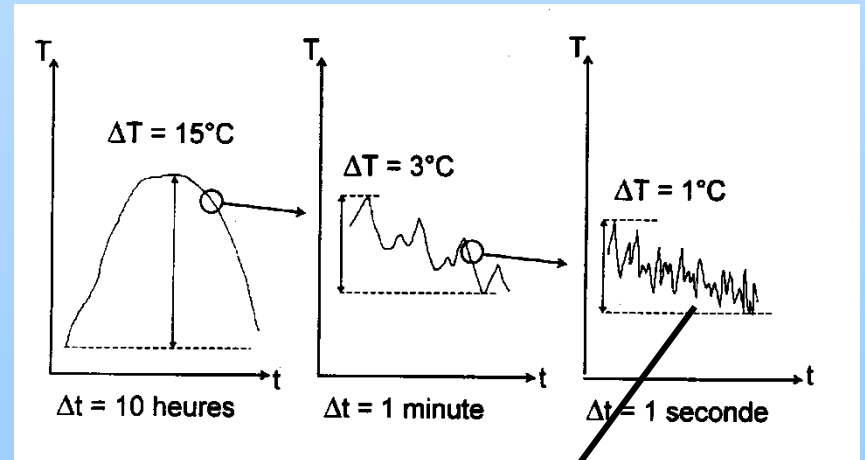
$$LE = \rho L \overline{q\overline{w}} = -\rho q^* u^* = -\rho L K \frac{dq}{dz} = -\rho L h(q_2 - q_1)$$

*Flux de chaleur sensible*

$K(z)$  = Diffusivité turbulente identique pour tous ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

$$K(z) = k u_* z * \Phi(\text{stabilité})$$

# Echelles de temps des mouvements turbulents

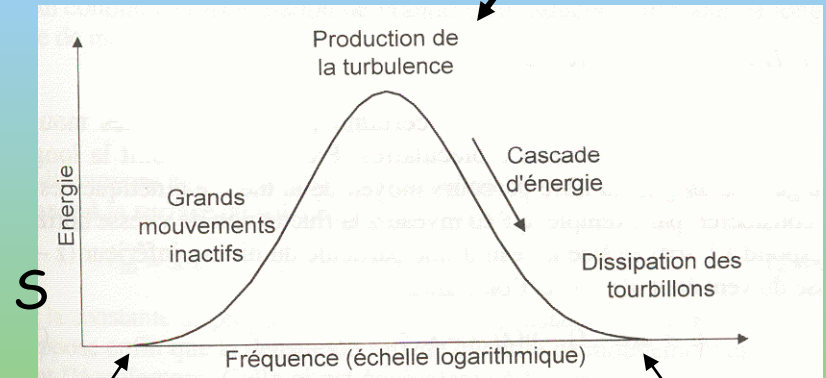


TF

TF => spectre fréquentiel du signal

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \exp(2j\pi ft) dt$$

$$\text{Var}(s(t)) = \int_0^{+\infty} S(f) \cdot df$$



$\sim 0.001$

$n = fZ/U \sim 0.1$

$\sim 10$