



# Introduction à la Météorologie SCA2611

---

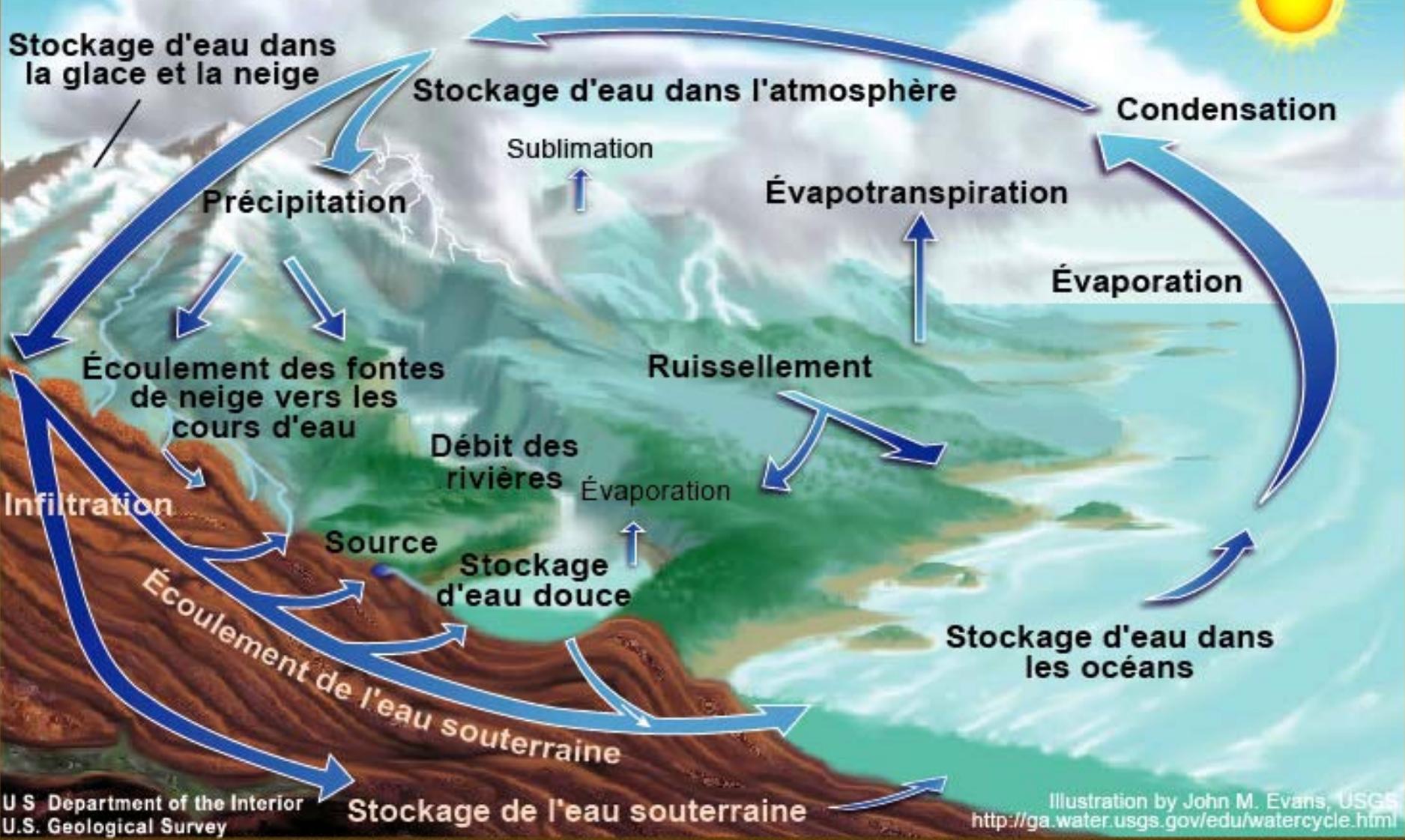
## Table des matières

### 5. Les nuages

- Qu'est-ce qu'un nuage?
- La vapeur d'eau, l'eau et la glace
- Les brouillards
- La formation des nuages
  - i. Les procédés adiabatiques
  - ii. Les soulèvements



# Le cycle de l'eau

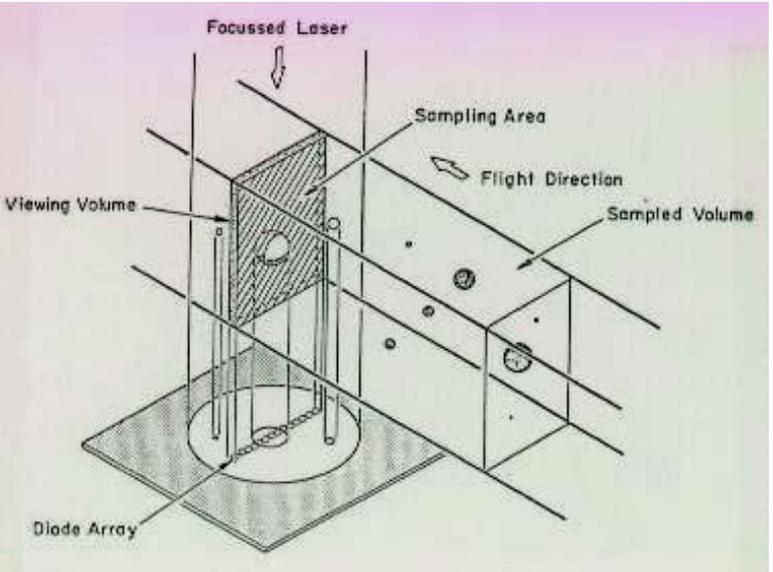


# Qu'est-ce qu'un nuage?

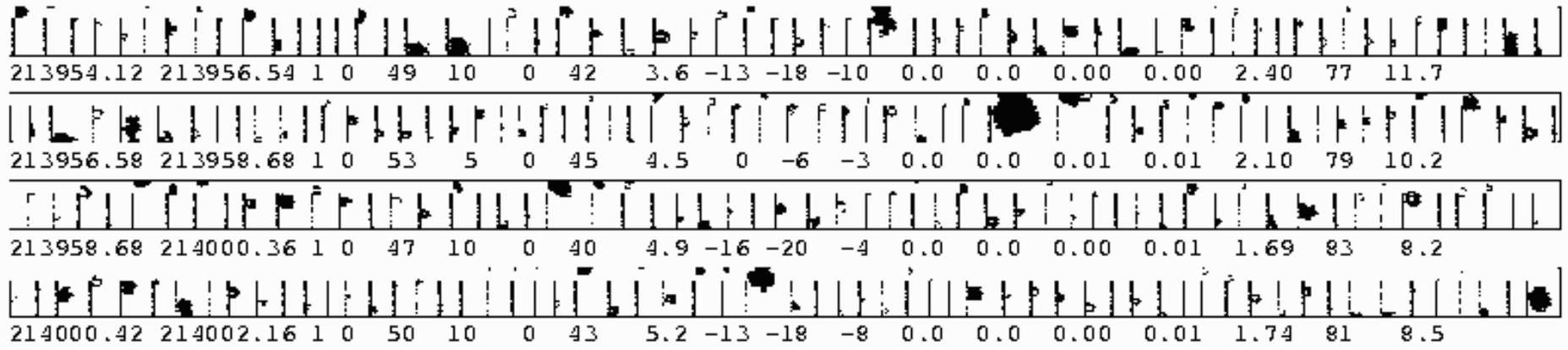
- Un nuage est un amas des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace en très grande concentration (environ de 100 à 500 par  $\text{cm}^3$ )
- Les gouttelettes et les cristaux ont une taille typique de 0,01 mm et sont si légers qu'ils demeurent en suspension dans l'air.
- Les nuages stockent l'eau dans l'atmosphère, produisent la précipitation et sont d'une grande importance dans la régulation du climat.



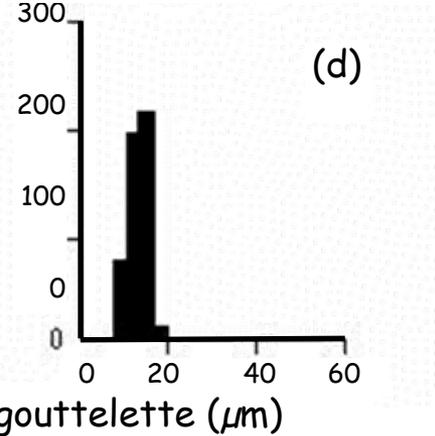
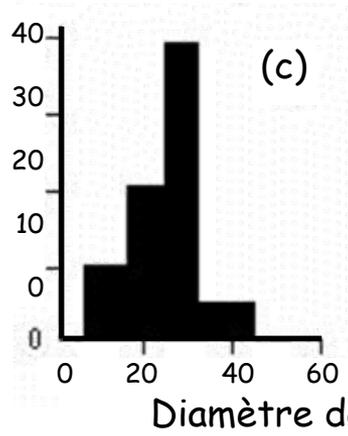
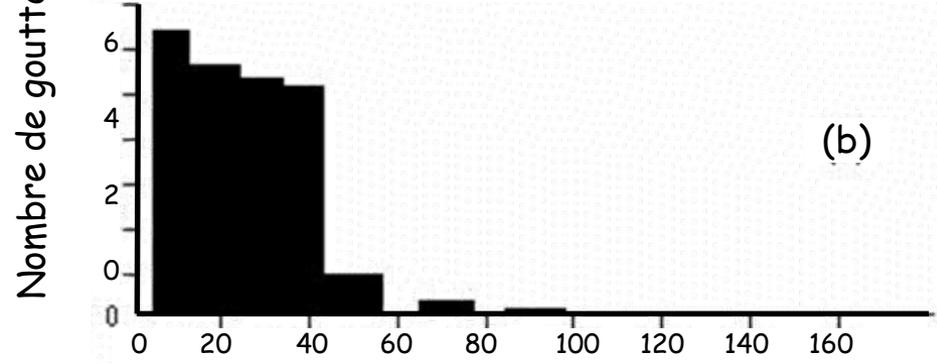
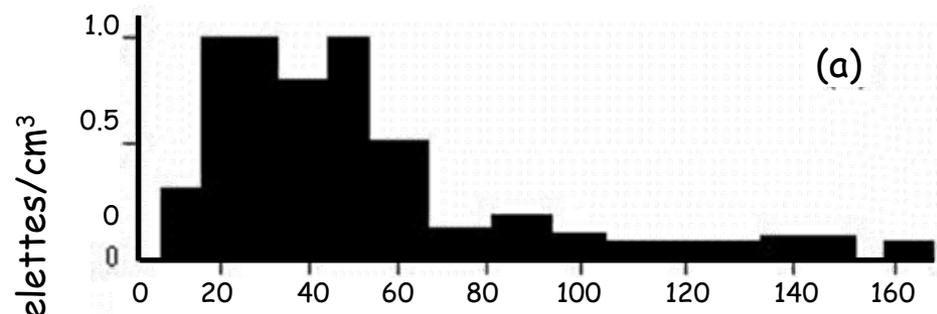
# Mesure de la taille des hydrométéores



Sonde laser 2D



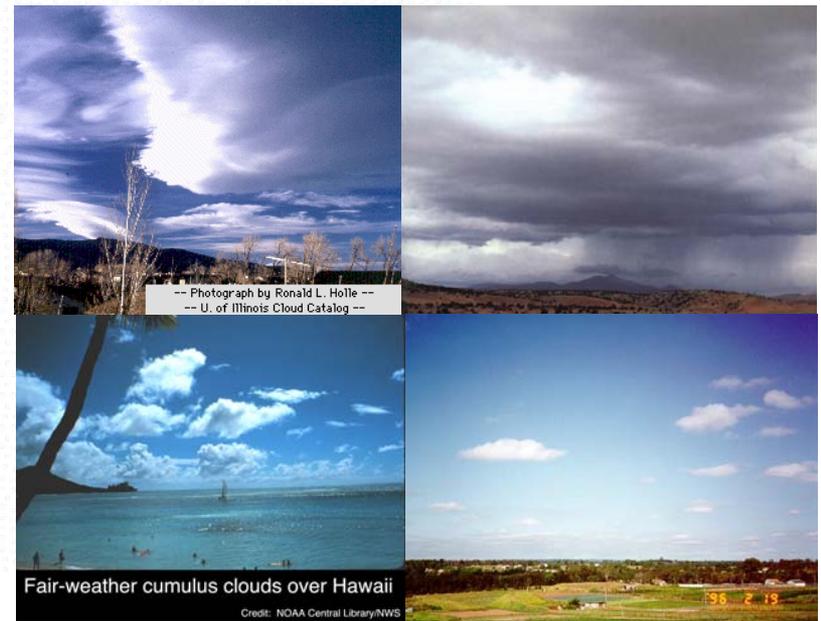
# Taille et nombre des gouttelettes de nuages



- La quantité totale d'eau sous forme de gouttelettes est mesurée en  $g_{eau}/m^3$

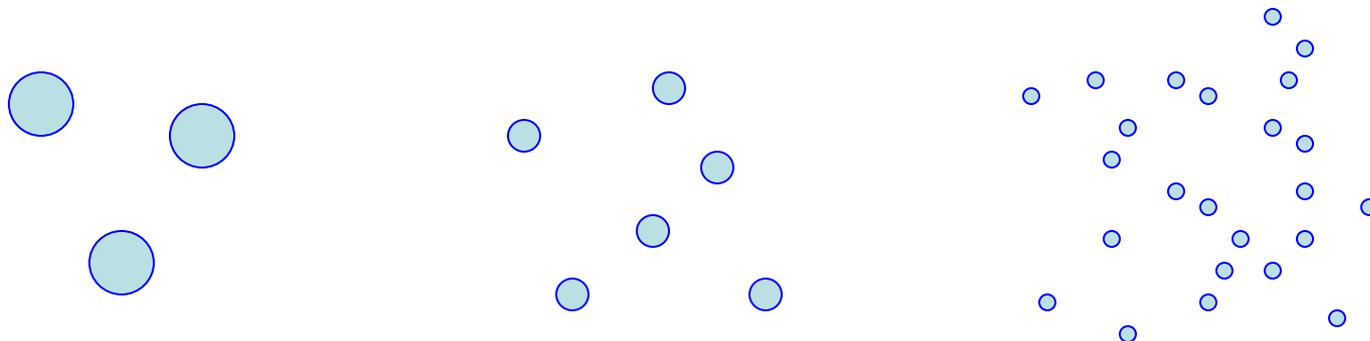
**Légende**

a) Nuage orographique (Hawaii),  $0,40 g/m^3$   
 b) Stratus épais (Hawaii),  $0,34 g/m^3$   
 c) Cumulus d' Alizé (Hawaii),  $0,50 g/m^3$   
 d) Cumulus continental (Australie),  $0,35 g/m^3$



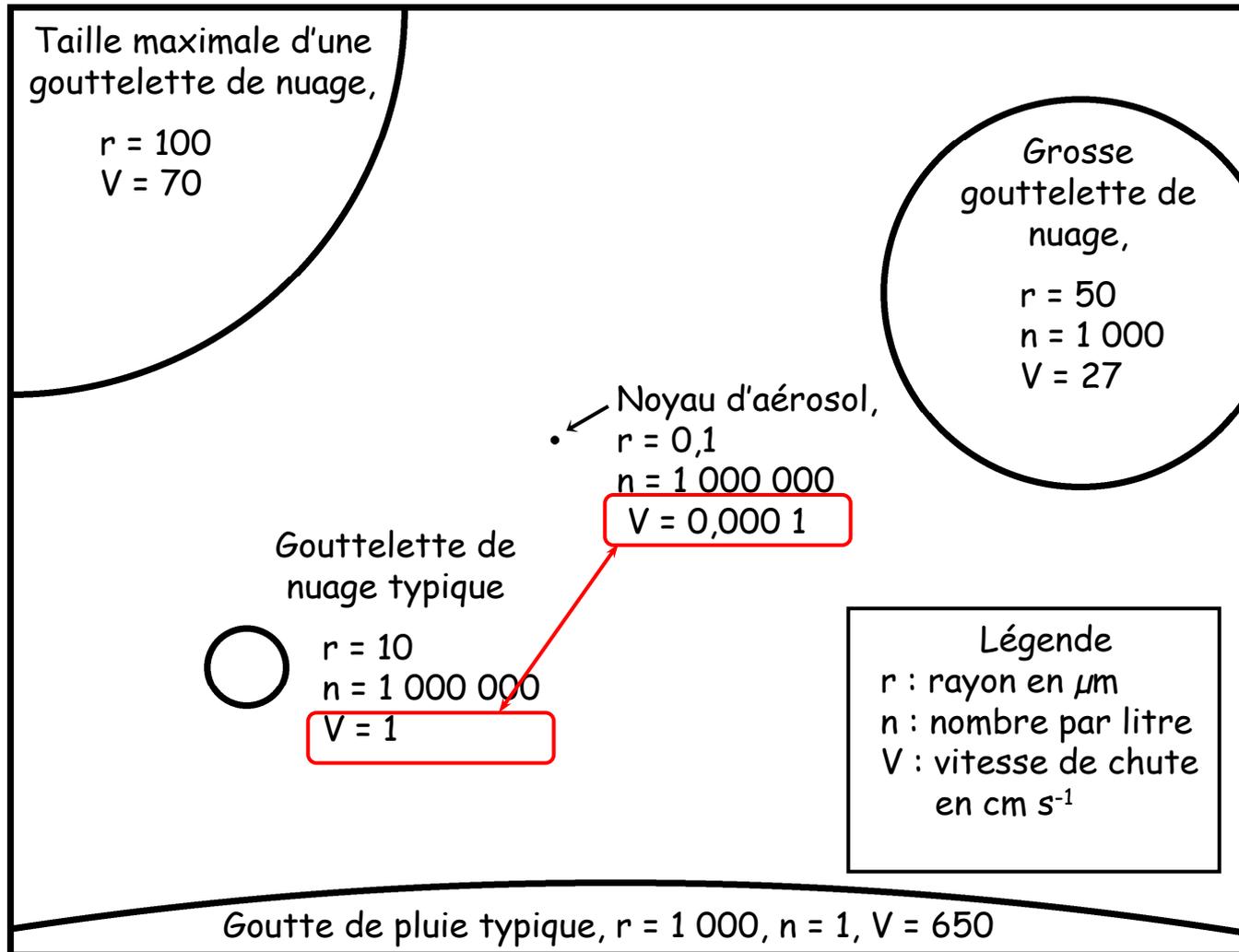
# Distribution des tailles des gouttelettes de nuages

- Important pour la formation de la précipitation
- Propriétés radiatives des nuages
  - Si  $r$  diminue  $\rightarrow$  la réflectivité du nuage au rayonnement solaire augmente
  - Si  $r$  diminue  $\rightarrow$  persistance plus grande du nuage
  - Effet climatique relié aux aérosols



# La taille des gouttelettes de nuage

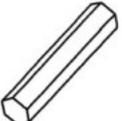
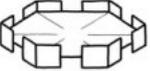
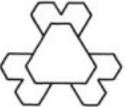
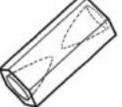
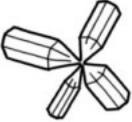
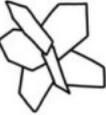
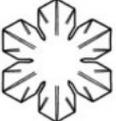
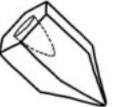
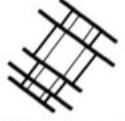
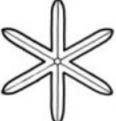
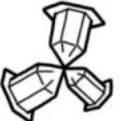
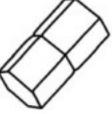
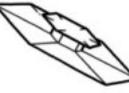
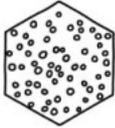
- Leur diamètre varie de 4 à 100  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$ )



\* Pour convertir la vitesse de chute de  $\text{cm/s}$  à  $\text{km/h}$ , multiplier par 0,36

# Les cristaux de glace ★

<http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/>

				
Simple Prisms	Solid Columns	Sheaths	Scrolls on Plates	Triangular Forms
				
Hexagonal Plates	Hollow Columns	Cups	Columns on Plates	12-branched Stars
				
Stellar Plates	Bullet Rosettes	Capped Columns	Split Plates & Stars	Radiating Plates
				
Sectoried Plates	Isolated Bullets	Multiply Capped Columns	Skeletal Forms	Radiating Dendrites
				
Simple Stars	Simple Needles	Capped Bullets	Twin Columns	Irregulars
				
Stellar Dendrites	Needle Clusters	Double Plates	Arrowhead Twins	Rimed
				
Fernlike Stellar Dendrites	Crossed Needles	Hollow Plates	Crossed Plates	Graupel

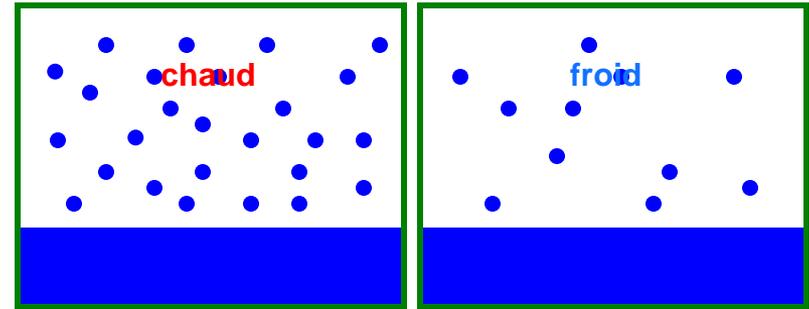


# La vapeur d'eau, l'eau et la glace

# L'humidité



- L'humidité représente la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.
- La quantité de vapeur d'eau qu'un volume peut contenir est finie.
- Plus la température d'un volume est élevée, plus il peut contenir de vapeur d'eau.
- Lorsque la quantité de vapeur d'eau a atteint sa valeur maximale (correspondant à une certaine température), le volume est alors saturé.



# L'humidité relative

- C'est le rapport de la **quantité** de vapeur d'eau contenue dans un volume sur la *quantité maximale* que ce volume peut contenir.
- Elle est mesurée en pourcent (%).
- Pour une même quantité de vapeur d'eau, **l'humidité relative** varie en fonction de la température.

## Température du point de rosée

- C'est la température à laquelle l'air doit être refroidi afin que le volume devienne saturé.  
(à pression constante)



# La pression partielle et de saturation

- La **pression atmosphérique** est la force par unité de surface exercée par le poids de l'air au-dessus de la surface.
- La **pression partielle** est la pression qu'exerce une seule espèce gazeuse du mélange air atmosphérique.
  - Sachant que l'air est composé d'oxygène (~21%) et d'azote (~78%), on sait qu'à la pression standard, soit 1013,25hPa, la répartition des pressions partielles est :

AZOTE ( $N_2$ )  
~ 790 hPa

OXYGÈNE ( $O_2$ )  
~ 213 hPa

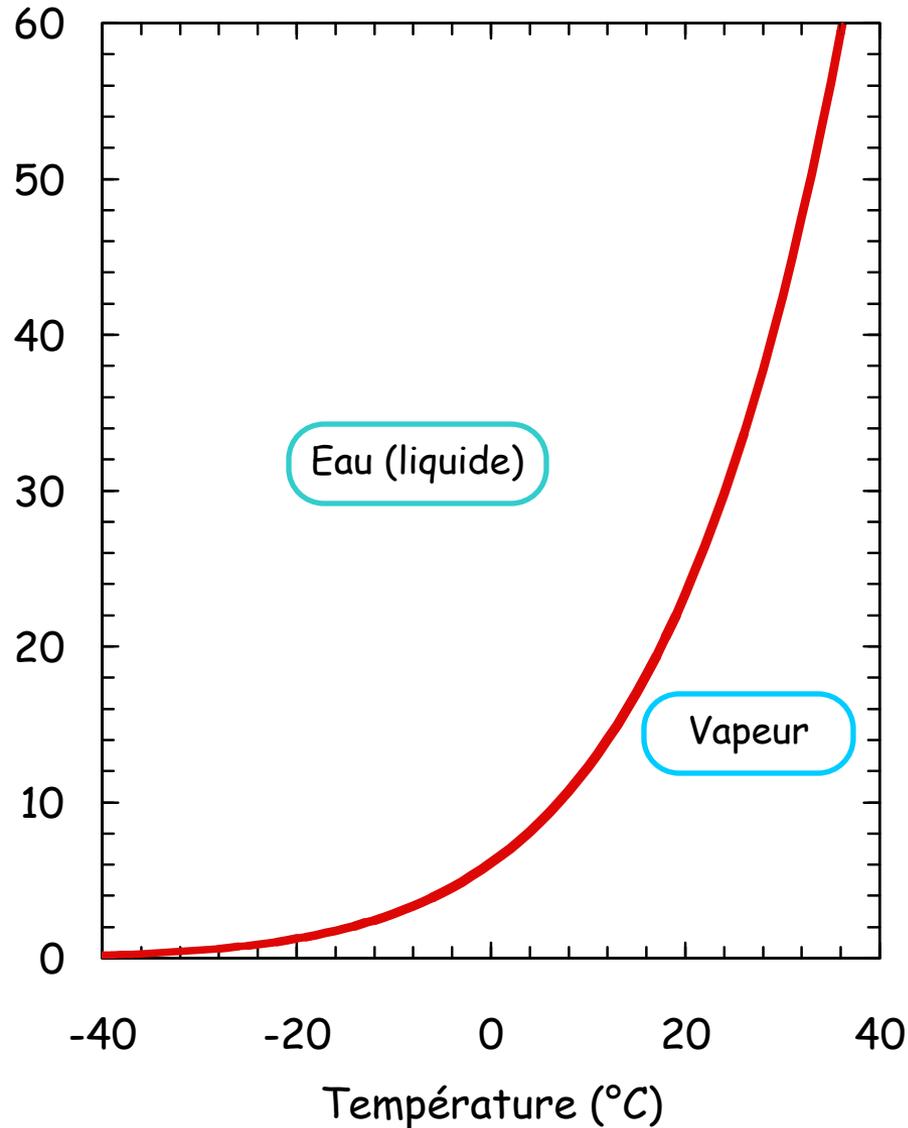
Dans l'atmosphère terrestre, les pressions partielles de l'azote et de l'oxygène dépendent uniquement de la pression totale.

- La **pression partielle de la vapeur d'eau** varie dans le temps et dans l'espace en relation aux conditions météorologiques.
- La **pression de saturation de la vapeur d'eau**,  $e_s$ , dépend uniquement de la température.

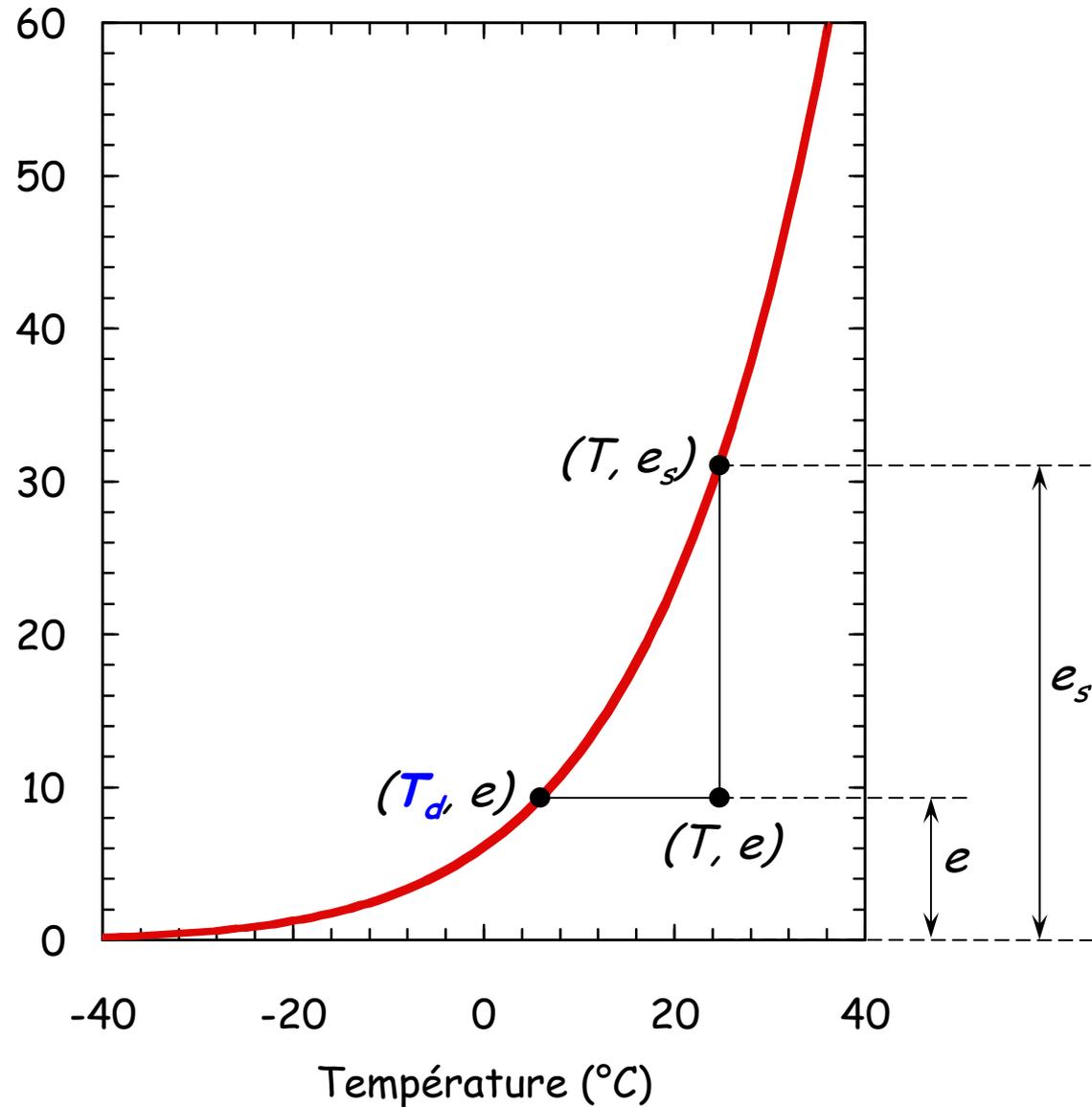
# Relation entre $e_s$ et $T$

Pression de vapeur saturante

Surface d'eau chimiquement pure



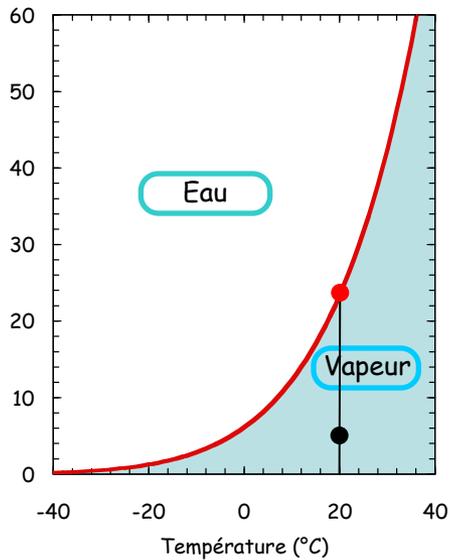
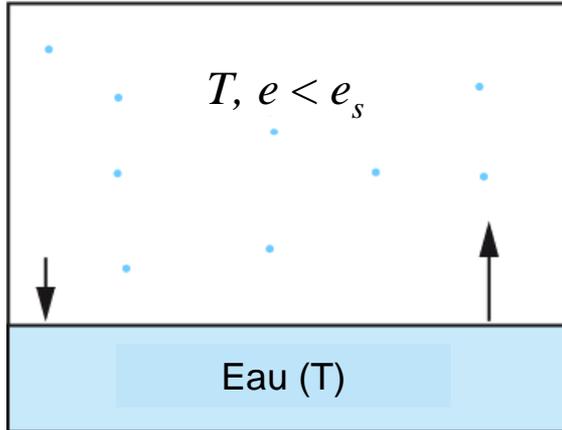
# Humidité relative - Point de rosée



$$RH(\%) = 100 \times \frac{e}{e_s}$$

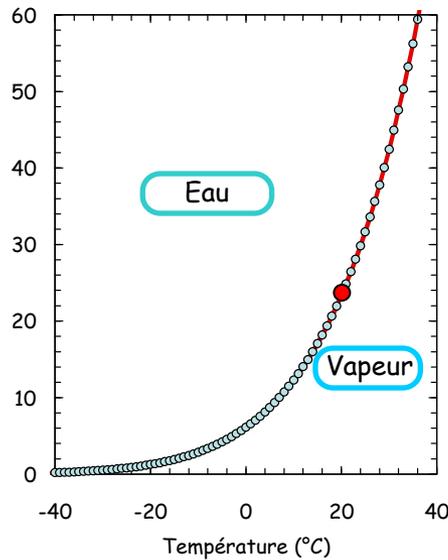
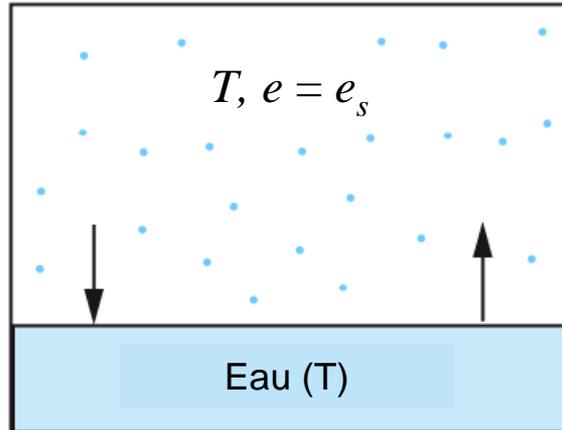
# Évaporation/Condensation

1. HR < 100% : Sous-saturation



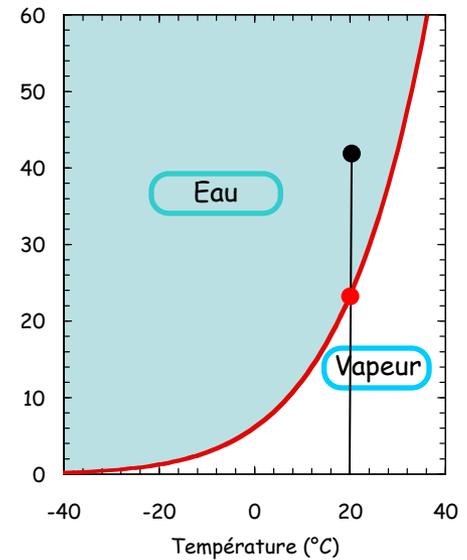
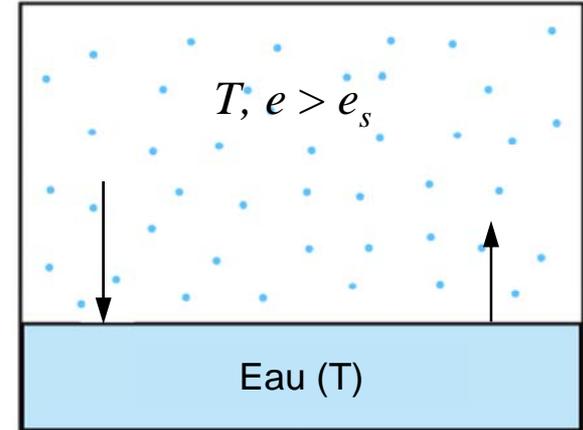
taux de condensation  
<  
taux d'évaporation

2. HR = 100% : Saturation



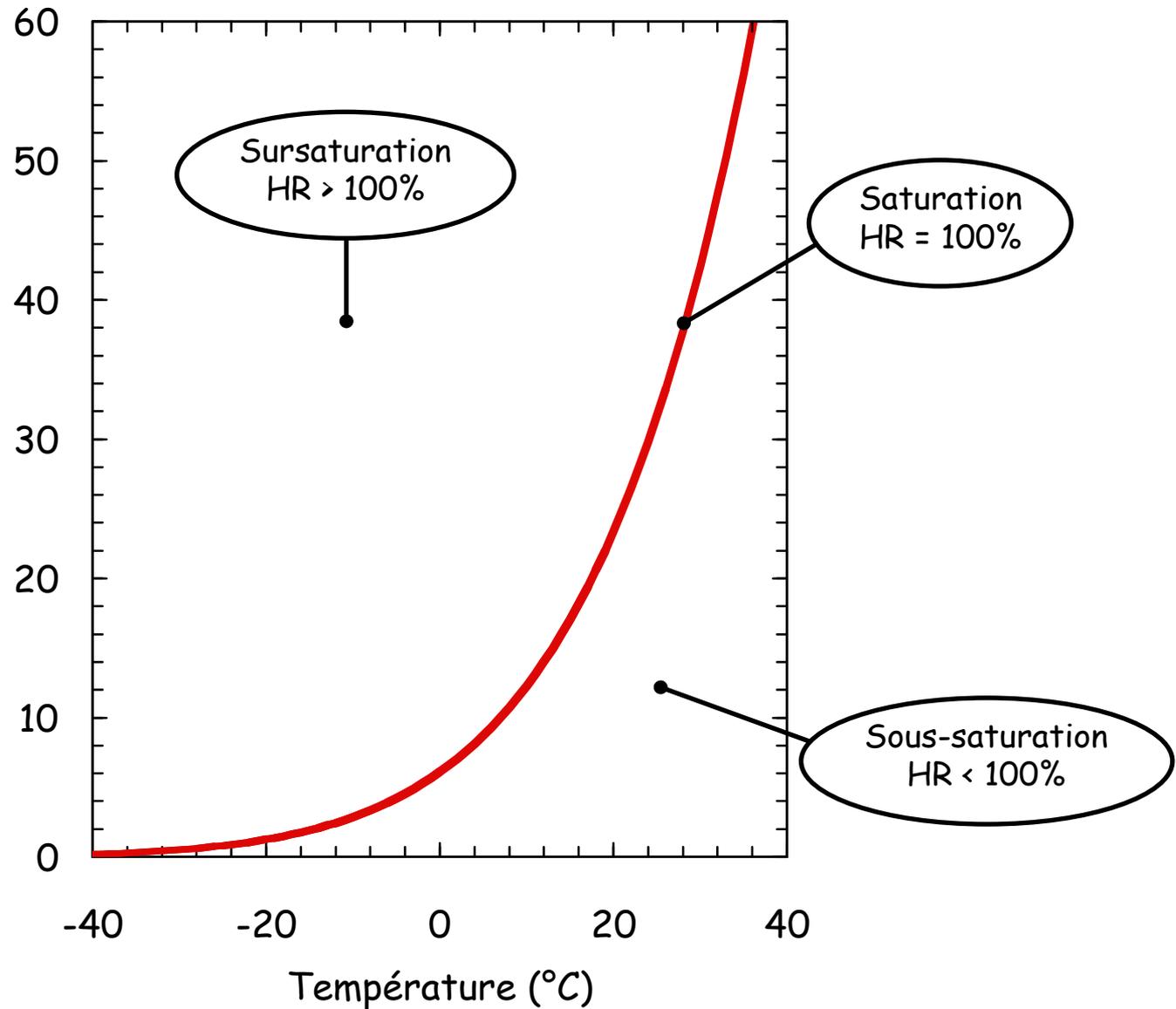
taux de condensation  
=  
taux d'évaporation

3. HR > 100% : Sursaturation

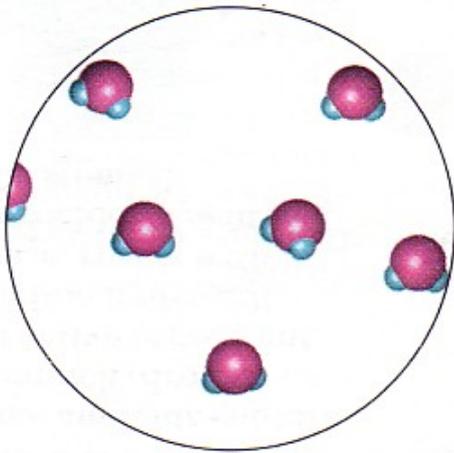
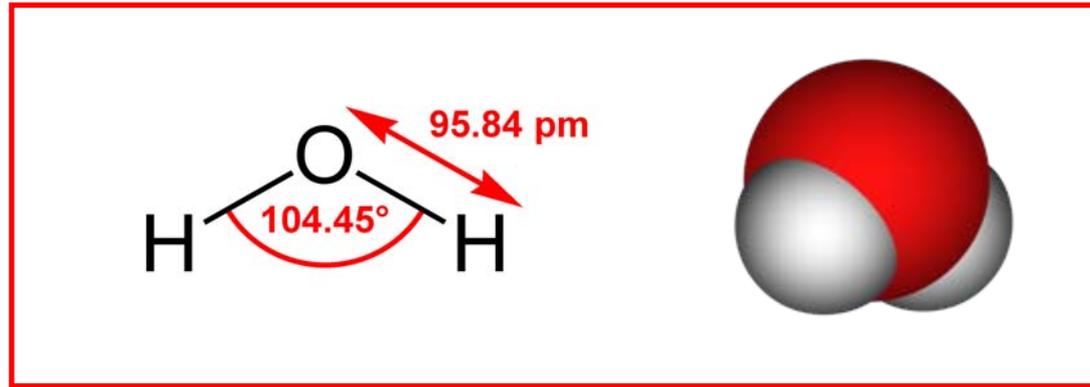


taux de condensation  
>  
taux d'évaporation

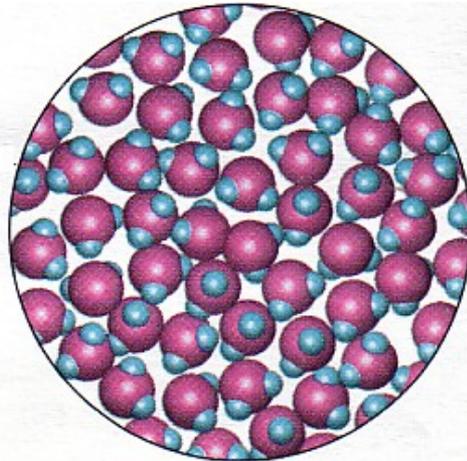
# État de saturation



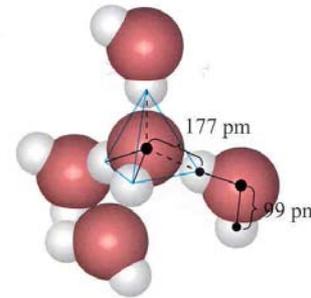
# La molécule H<sub>2</sub>O



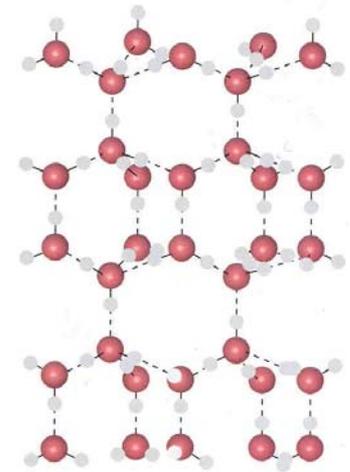
Vapeur



Eau

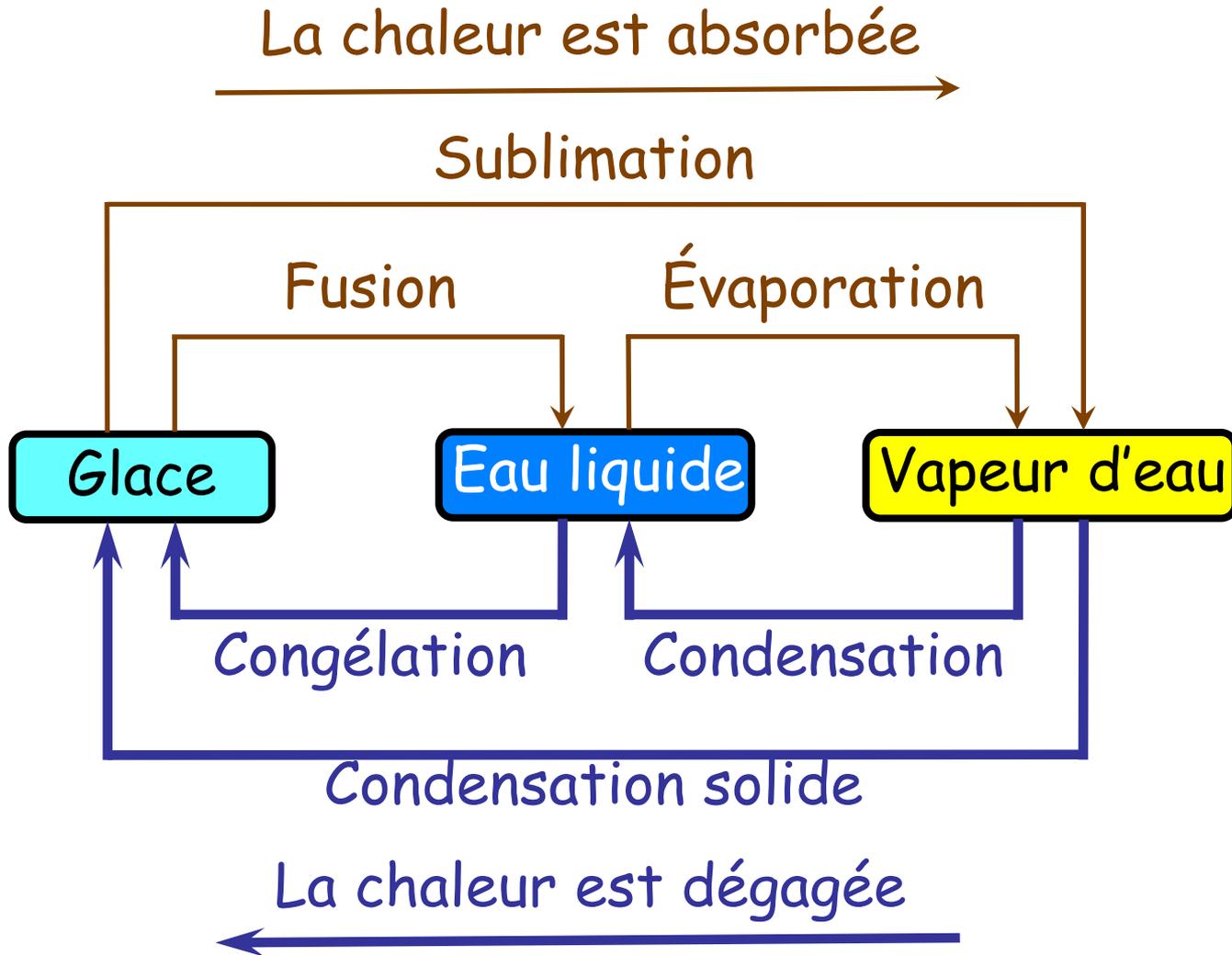


Liaison  
hydrogène



Glace

# Les changements de phase de l'eau



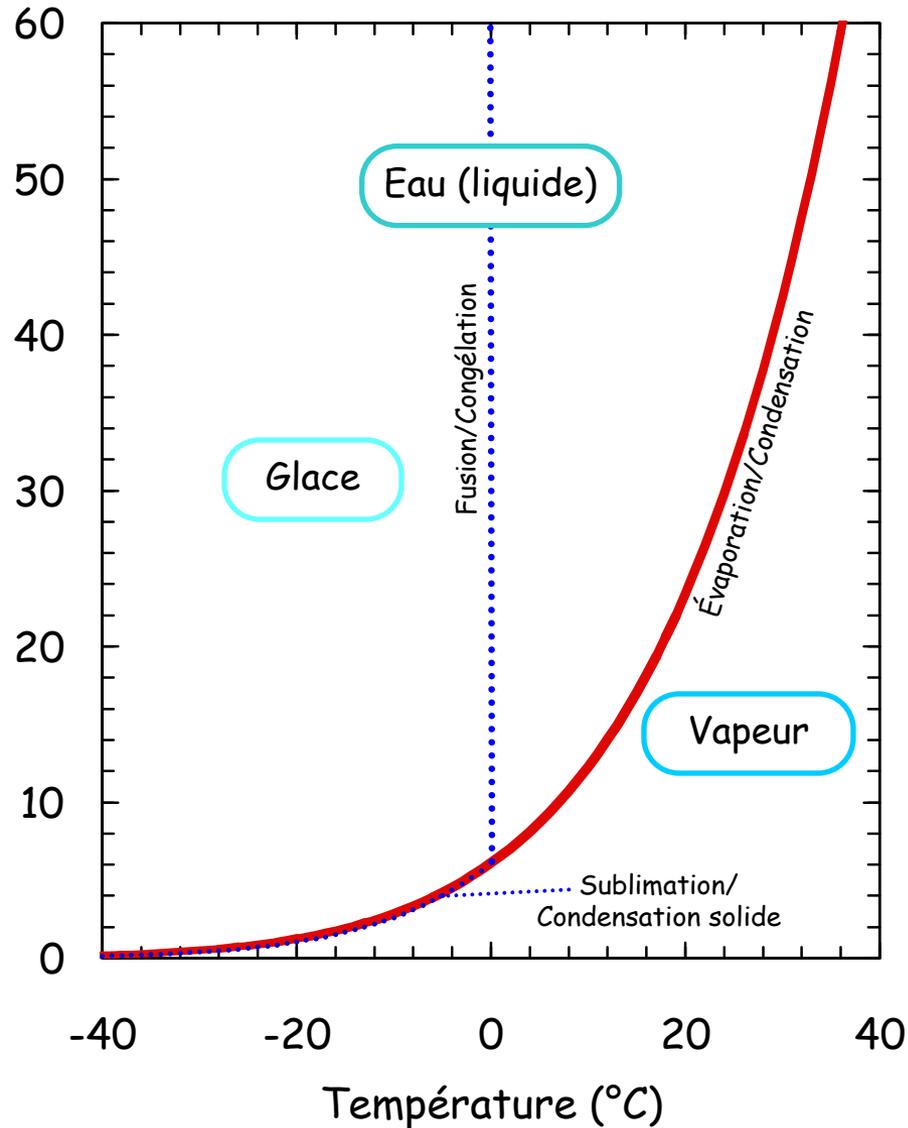
# Les changement de phase de l'eau

- Formation du nuage
  - i. Condensation
  - ii. Condensation solide
  
- Dissipation du nuage
  - i. Évaporation
  - ii. Sublimation
  
- Nuage d'eau/de glace
  - i. Congélation
  - ii. Fusion

# Relation entre $e_s$ et T

Pression de vapeur saturante

Surface d'eau chimiquement pure



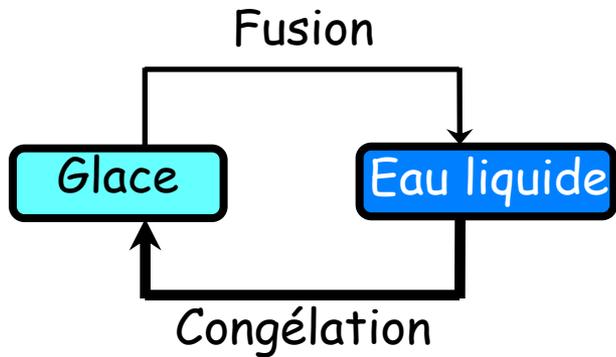
La chaleur est absorbée



La chaleur est dégagée



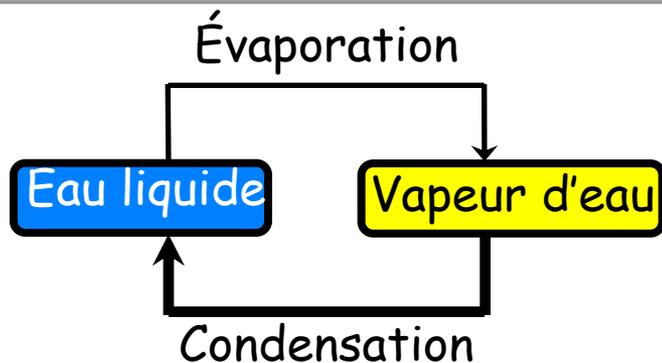
# Chaleurs latentes



$$\text{Chaleur}_{\text{Fusion}} = 0,3337 \text{ MJ kg}^{-1}$$

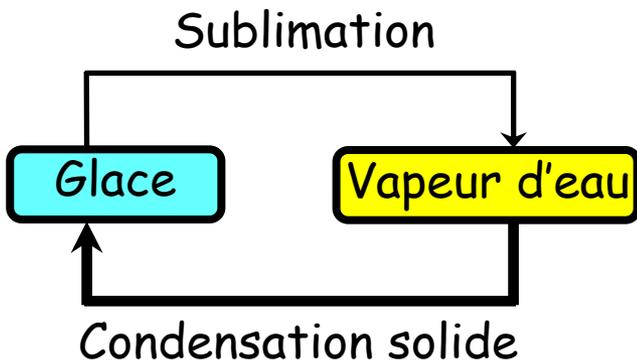
Fusion :  $T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Congélation :  $T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$



$$\text{Chaleur}_{\text{Évaporation}} = 2,5008 \text{ MJ kg}^{-1}$$

Condensation/Évaporation :  $T > -40 \text{ } ^\circ\text{C}$



$$\text{Chaleur}_{\text{Sublimation}} = 2,8345 \text{ MJ kg}^{-1}$$

$$= (0,3337 + 2,5008) \text{ MJ kg}^{-1}$$

Condensation solide/Sublimation :  $T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

# La formation des nuages

## Les brouillards

- Diminution de la température
  - i. Ascension de l'air
  - ii. Pertes radiatives
  - iii. Advection d'air humide sur terrain froid
- Ajout de vapeur d'eau par évaporation
  - i. Fumée de mer
  - ii. Brouillard d'évaporation
- Mélange de 2 masses d'air de T différentes
  - i. Brouillard de mélange
  - ii. Brouillard d'haleine

# Les brouillards

# Brouillard de radiation

Le brouillard de radiation est causé par le refroidissement radiatif de la surface durant la nuit.

Deux facteurs favorisent ce type de brouillard:

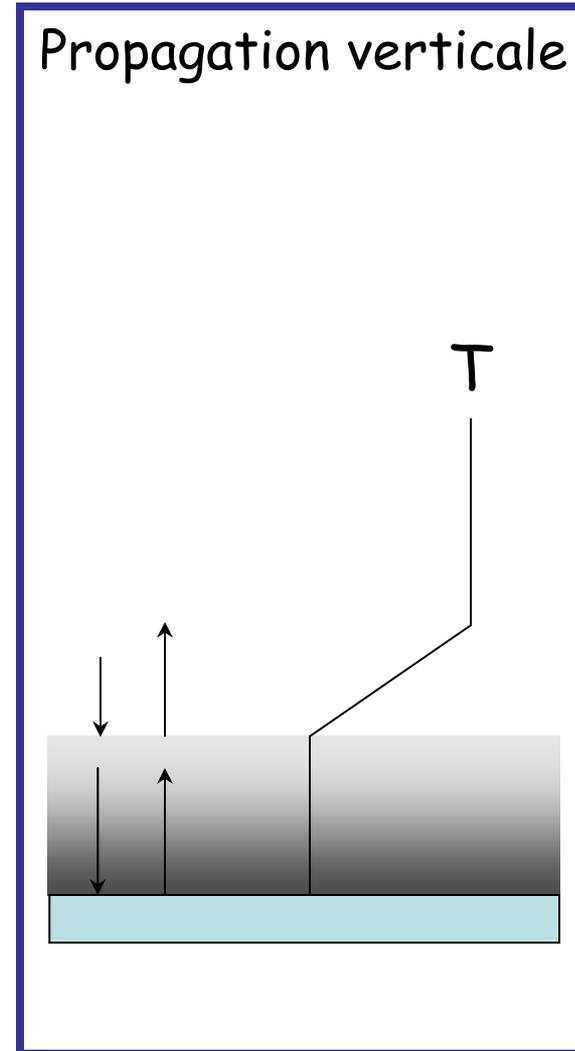
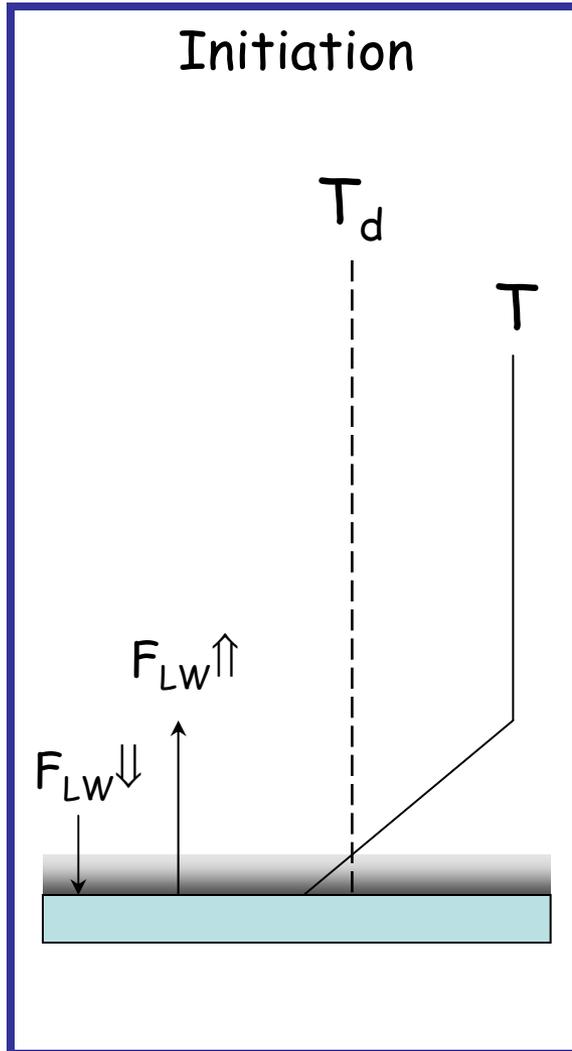
- Une masse d'air humide
- Nuits claires (sans nuage)

Endroits favorisés:

- Villes et campagnes côtières
- Champs d'agriculture/forêts
- Vallée

# Brouillard de radiation

## Initiation - Propagation verticale



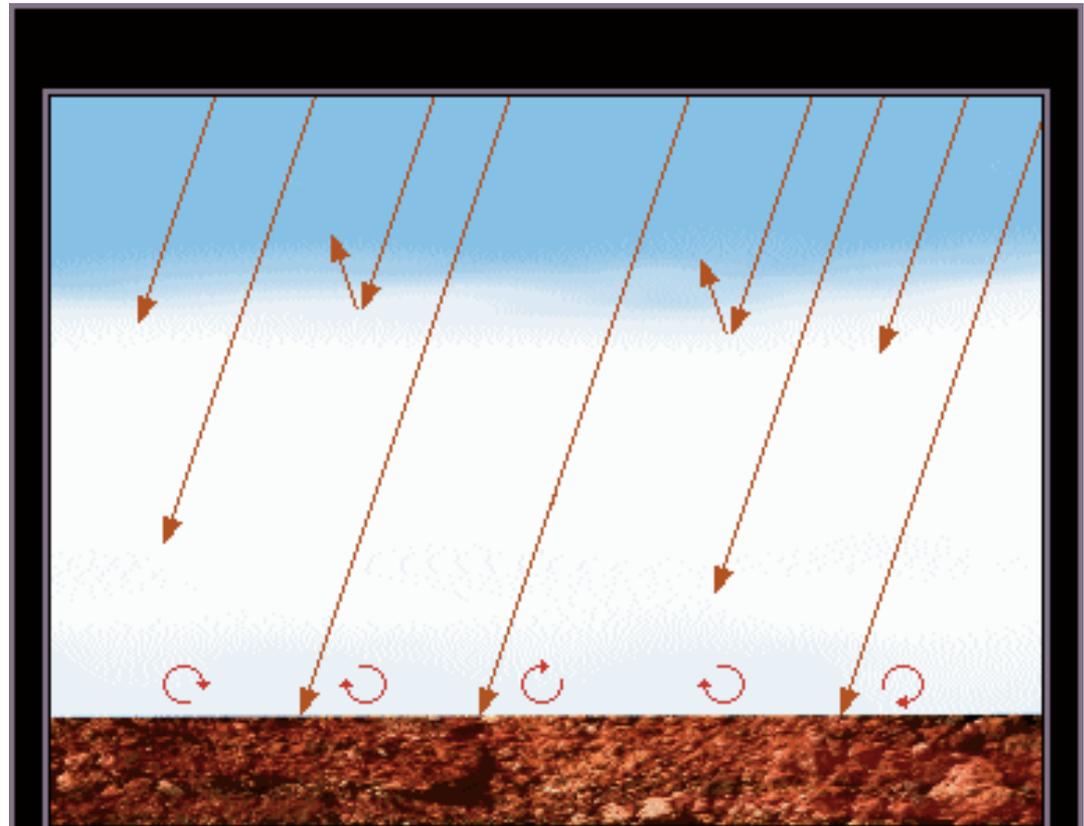
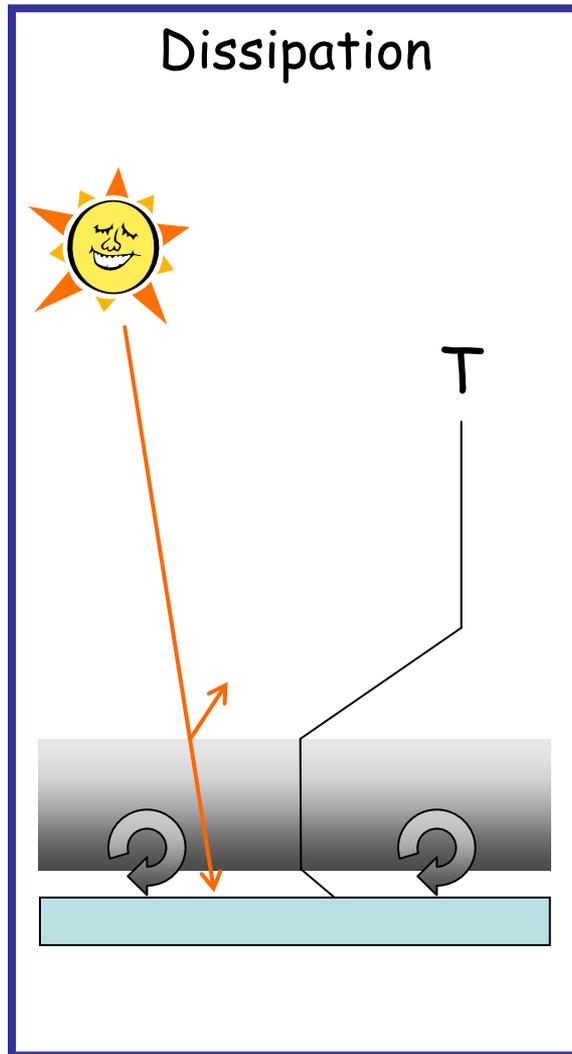
# Brouillard de radiation

## Initiation - Propagation



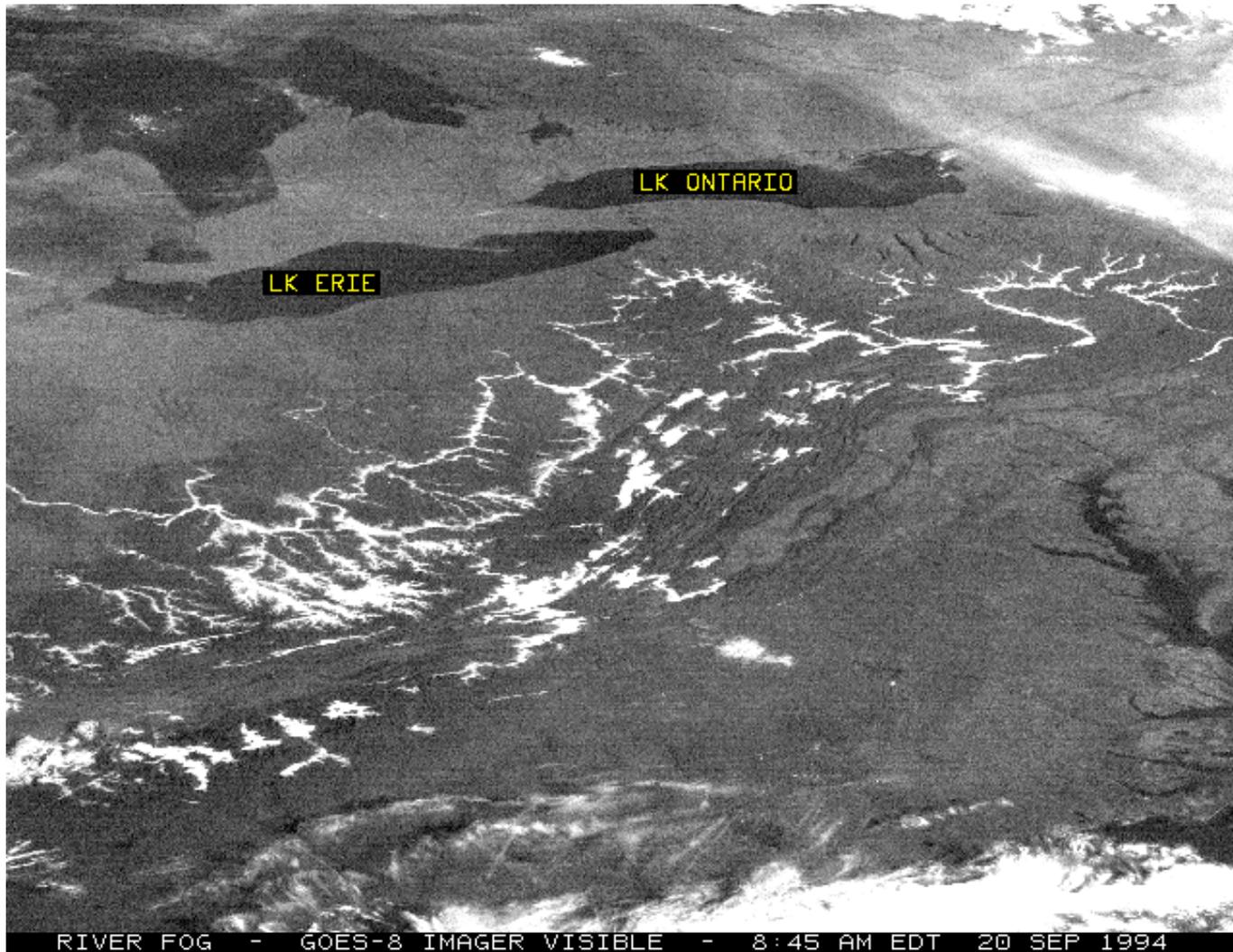
# Brouillard de radiation

## Dissipation



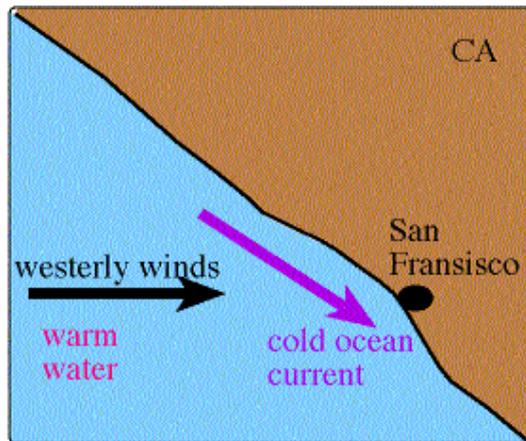
"The source of this material is the Cooperative Program for Operational Meteorology, Education and Training (COMET®) Website at <http://meted.ucar.edu/> of the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), funded by the National Weather Service. ©1997-2003, University Corporation for Atmospheric Research. All Rights Reserved."

# Brouillard de vallée



# Brouillard d'advection

- Brouillard qui se forme au passage d'une masse relativement chaude et humide au-dessus d'une surface plus froide. Les brouillards d'advection sont denses et recouvrent de vastes régions.



# Bouillard d'évaporation

Air froid au-dessus d'un plan d'eau "chaude".

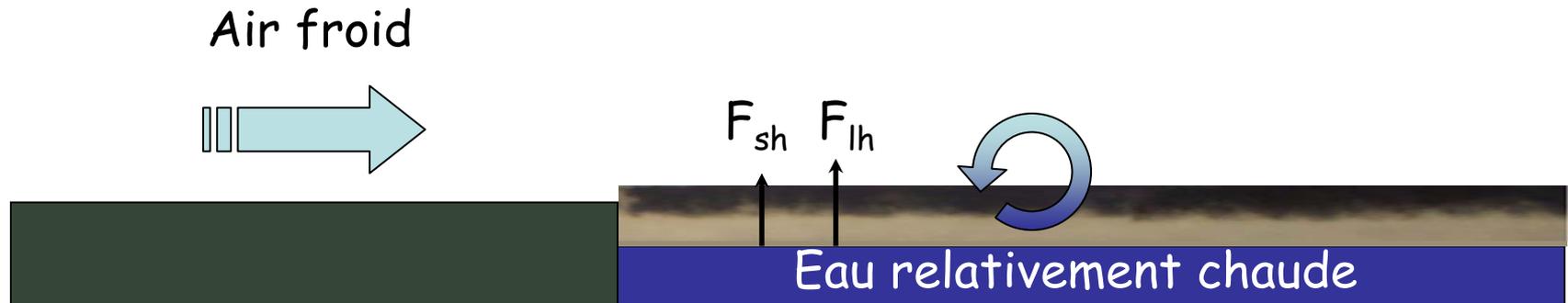


# Fumée de mer

Advection d'air très froid au-dessus d'un plan d'eau "chaude".



# Fumée de mer



- Advection d'air très froid au-dessus d'un plan d'eau chaude.
  - Formation d'une mince couche de brouillard au contact de l'air froid et de l'eau chaude.
  - L'air près de la surface de l'eau continue de se réchauffer et de s'humidifier tout en demeurant saturée.
  - L'instabilité résultant du réchauffement de l'air en surface provoque un mélange de l'air qui donne l'aspect de fumée au brouillard.
- ? Le processus est plus efficace si  $T < 0$ . Pourquoi?

# Brouillard d'haleine



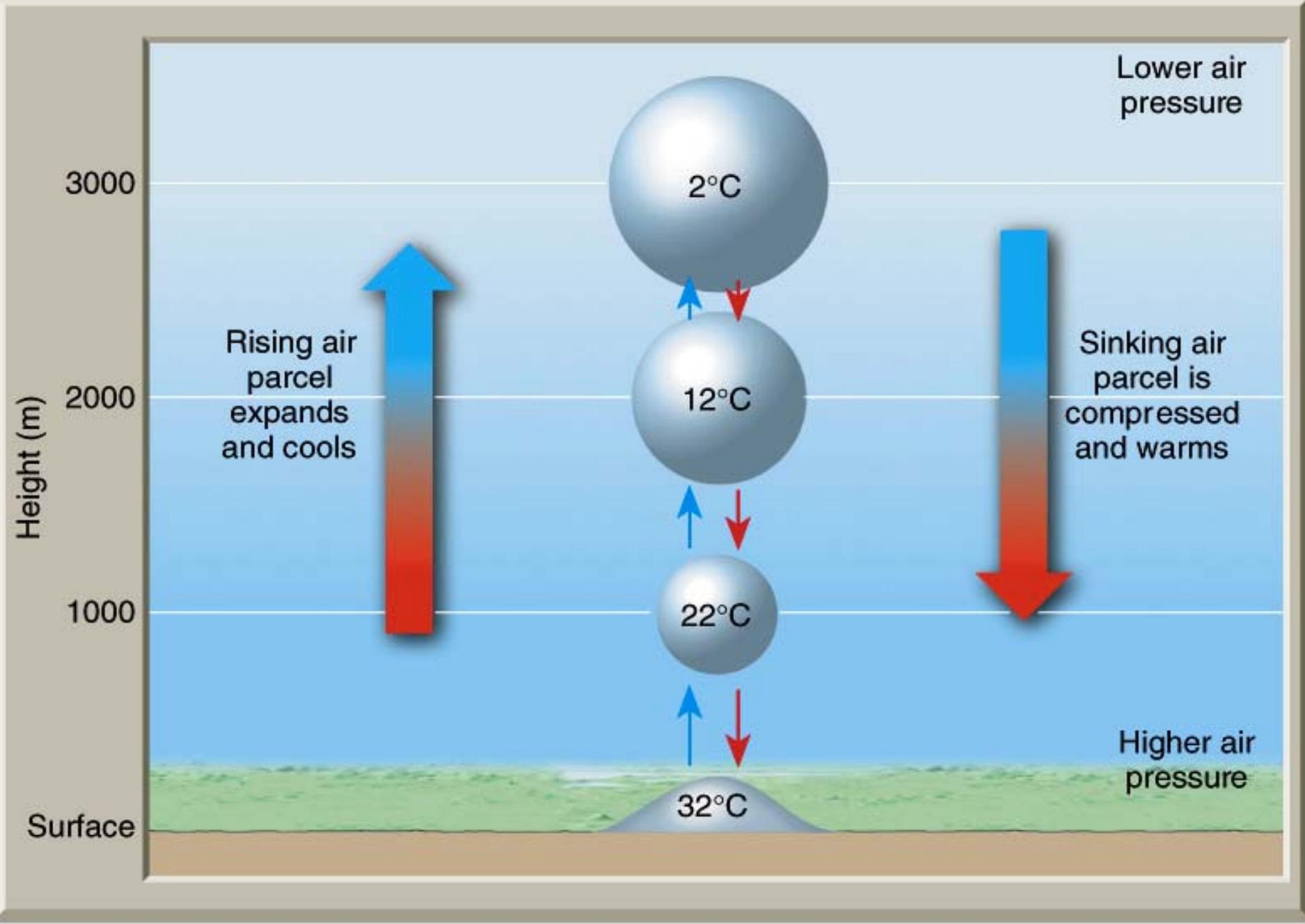
# La formation des nuages

## Ascension de l'air

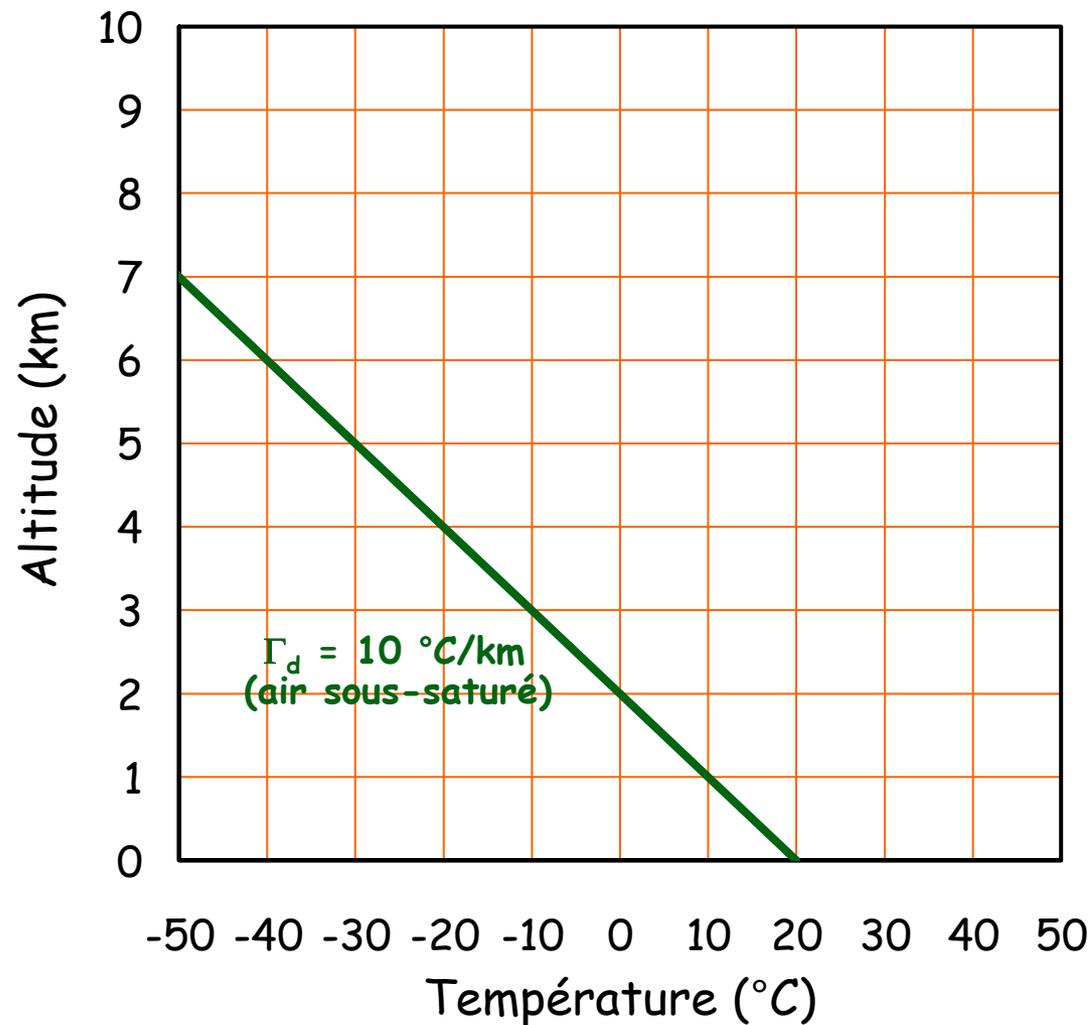
# Refroidissement par ascension de l'air

## Cas sous-saturé : Procédé adiabatique

- Lorsqu'une parcelle d'air s'élève dans l'atmosphère, sa pression s'ajuste à la pression ambiante et alors elle se détend, c'est-à-dire que son volume augmente.
- En absence d'apport extérieur de chaleur, la parcelle doit utiliser une partie de son énergie interne afin de se détendre (elle fait un travail). Cela produit une baisse de sa température.
- On peut montrer (1<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique) que le taux de refroidissement dans de telles conditions est d'environ  $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .



# Procédé adiabatique

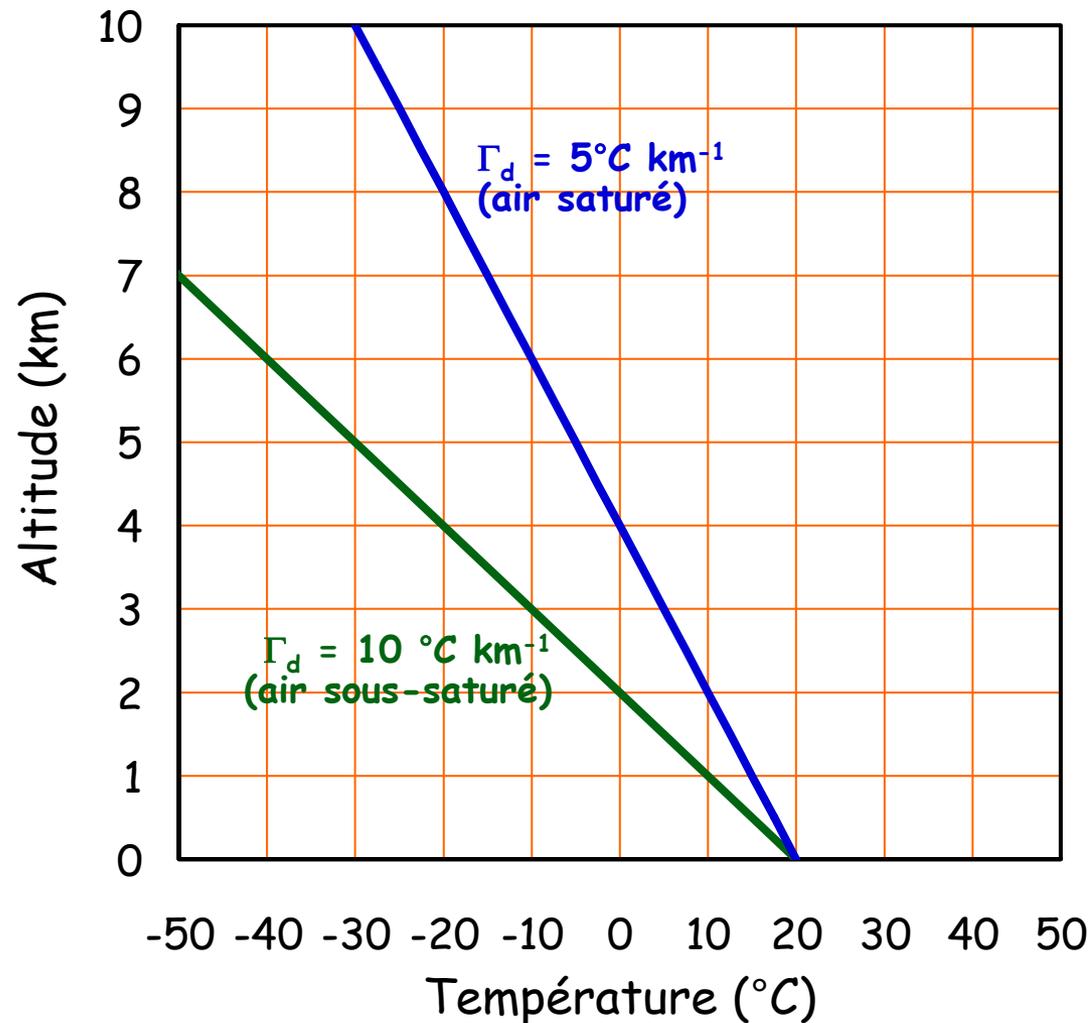


# Refroidissement par ascension de l'air

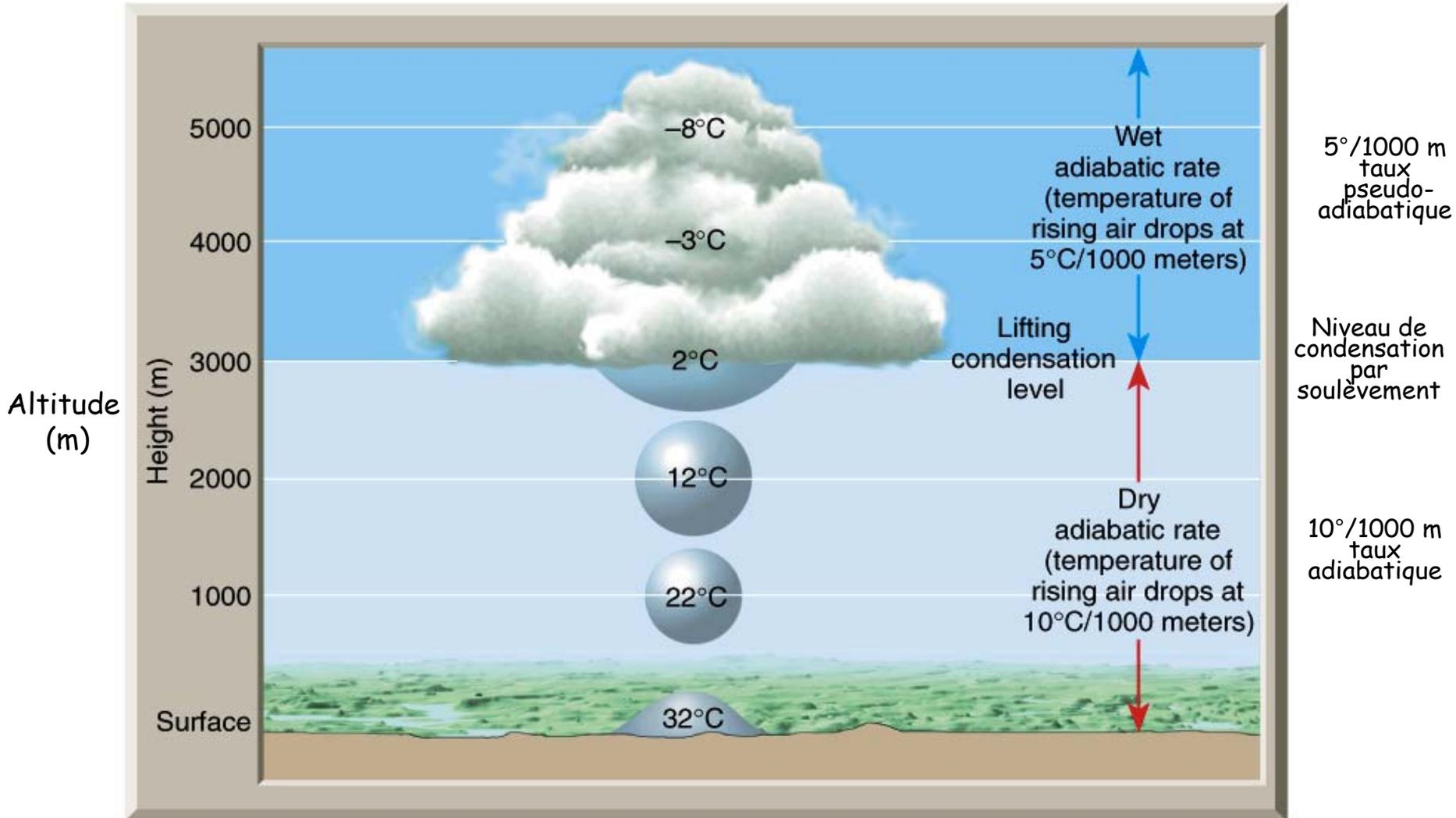
## Cas saturé : Procédé pseudo-adiabatique

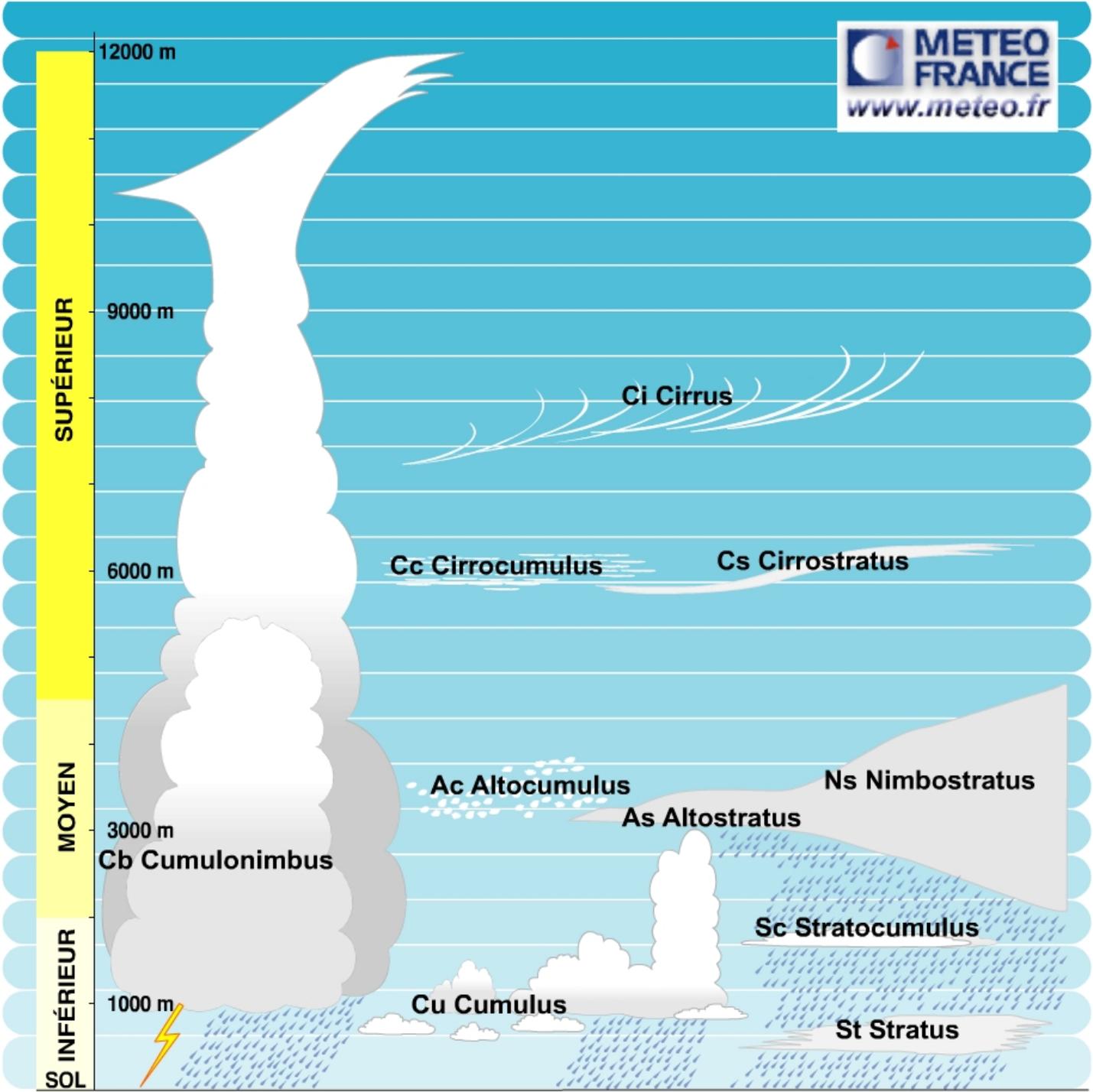
- S'il y a changement de phase (condensation), alors il y a dégagement de chaleur latente. Cela réduit le taux de refroidissement de la parcelle d'air.
- Dans ce cas, le taux de refroidissement varie entre 5 et  $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .

# Procédé pseudo-adiabatique

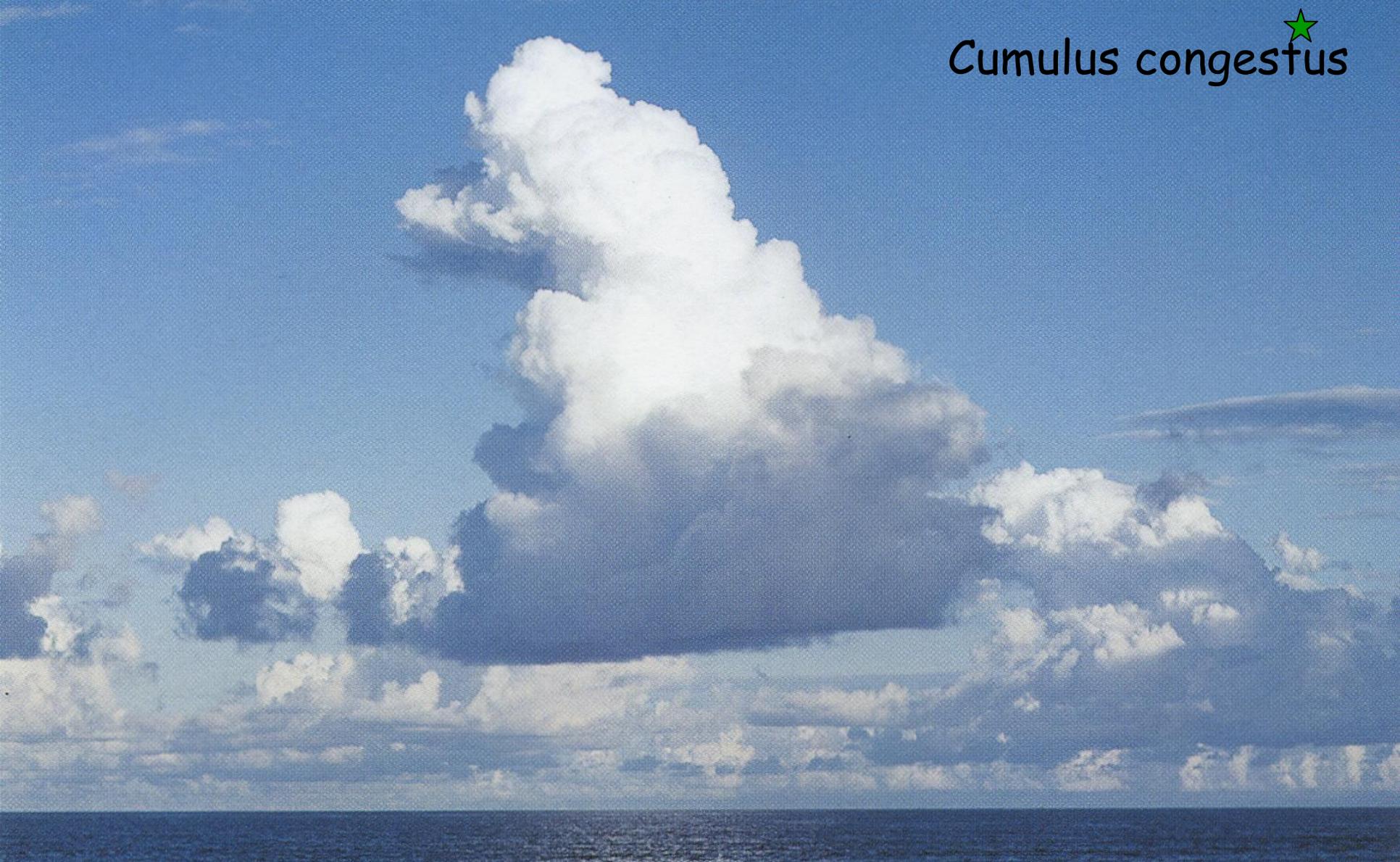


# Refroidissement par ascension





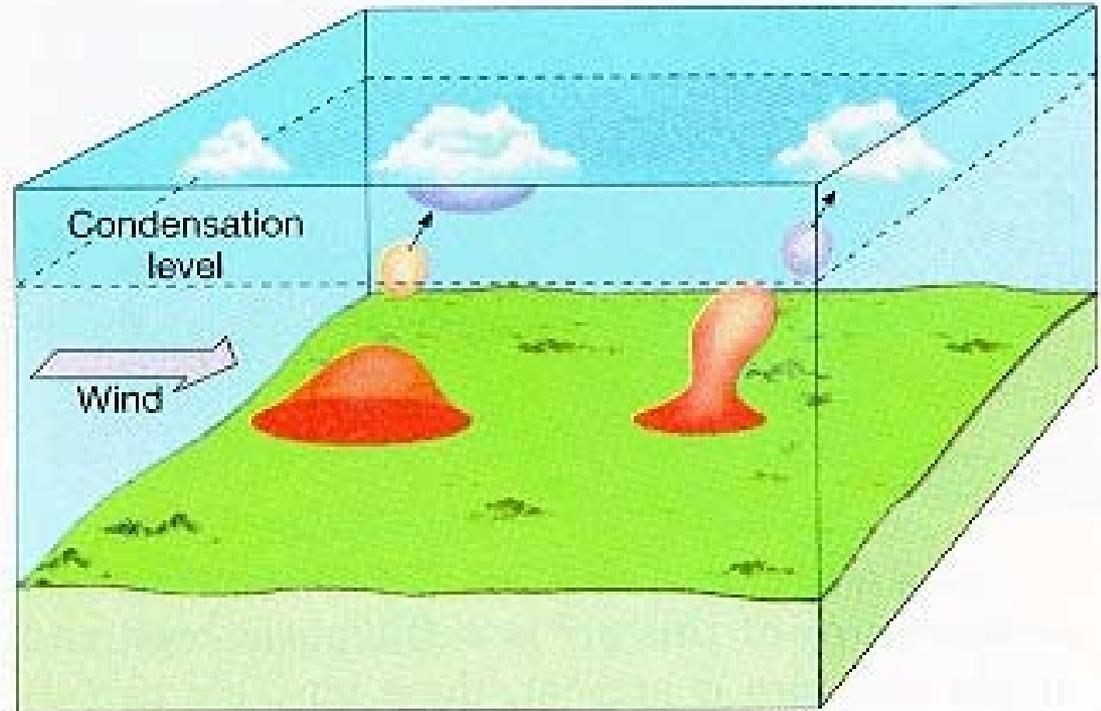
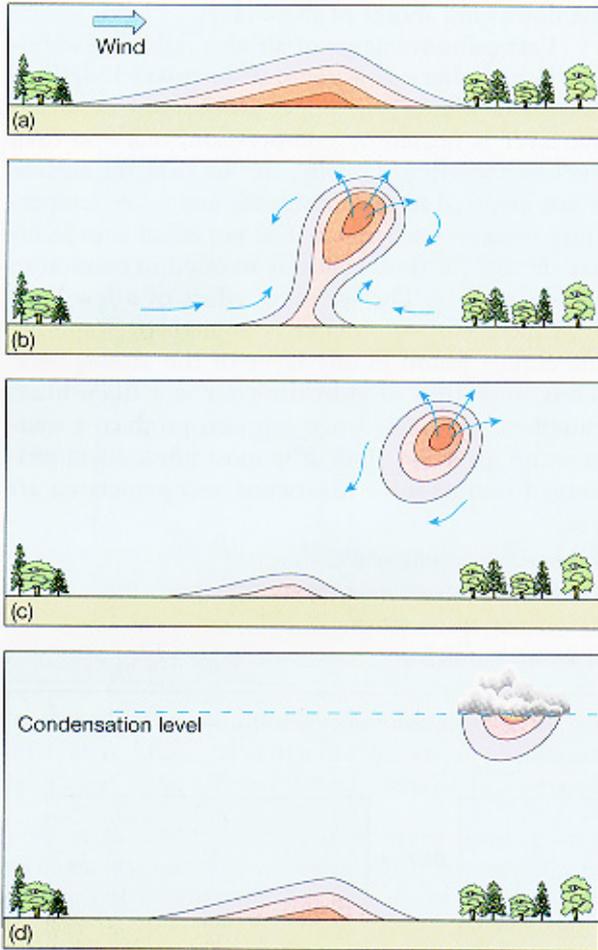
# Cumulus congestus



- Comment peut-on forcer une parcelle d'air à s'élever dans l'atmosphère?

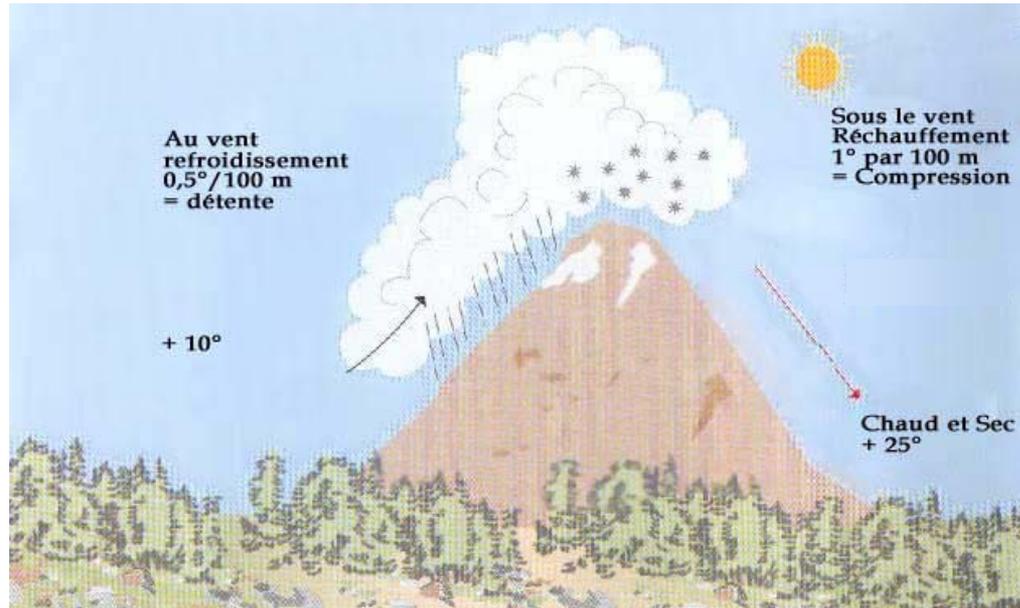
# Le soulèvement

# Convection naturelle



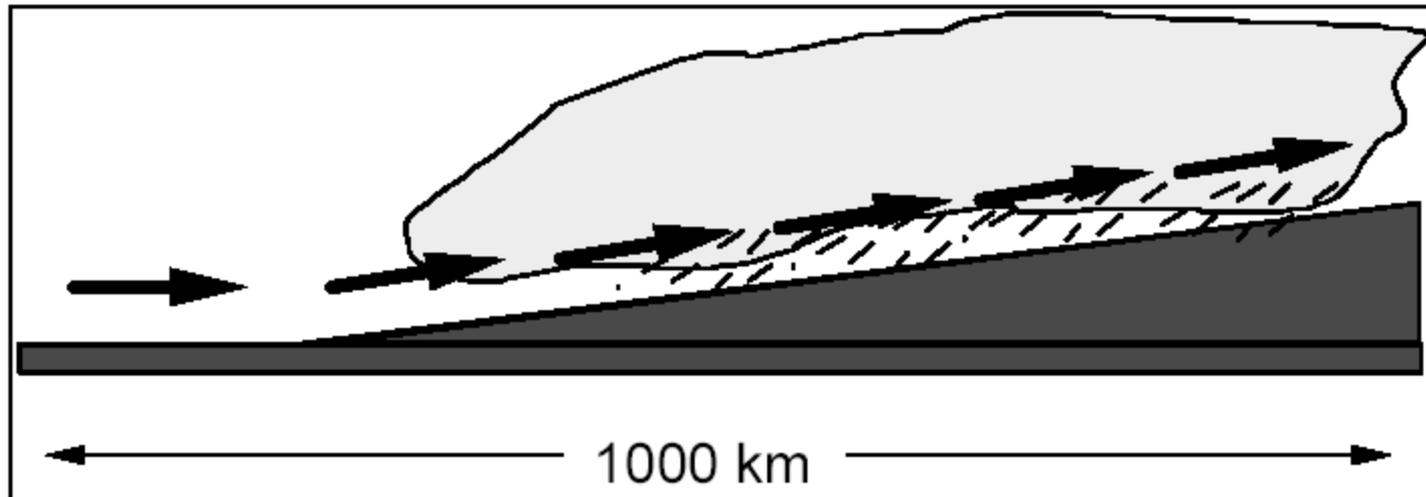
# Soulèvement orographique

## Montagne

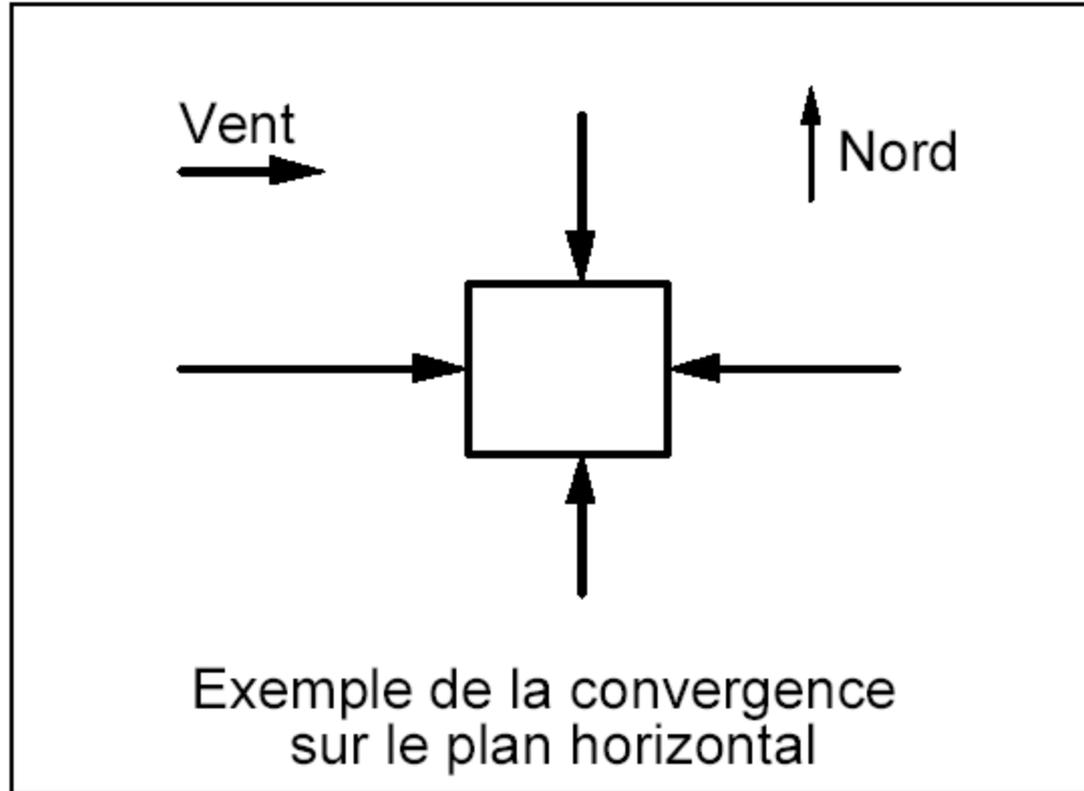


# Soulèvement orographique

## Plateforme continentale



# Convergence horizontale du vent



Précip. 6h  
(pouce)

