

L'eau dans l'atmosphère

Jean-Louis Dufresne

jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr

Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS, UPMC, ENS, X)

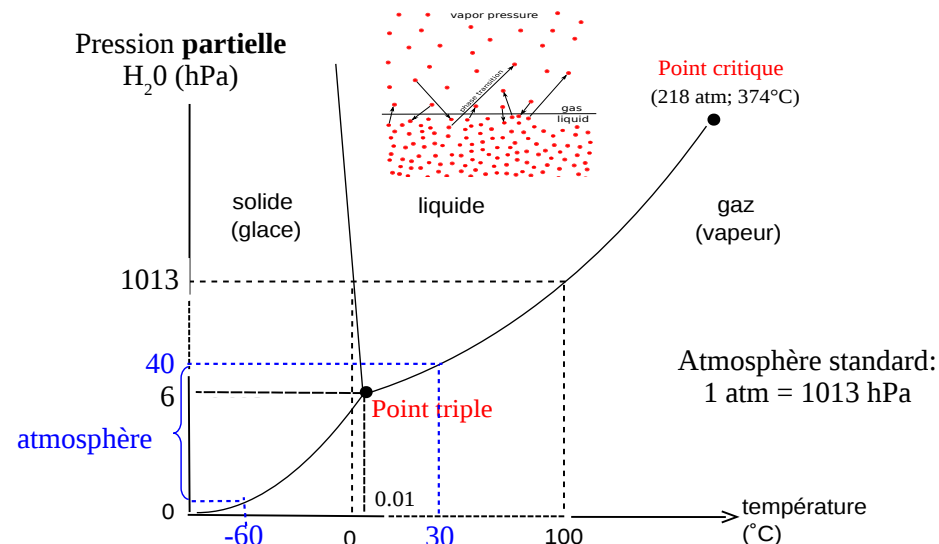
Institut Pierre Simon Laplace.

Avec l'aide de mes collègues F. Codron et A. Spiga



École nationale supérieure des Mines de Rabat, 27 mars 2017

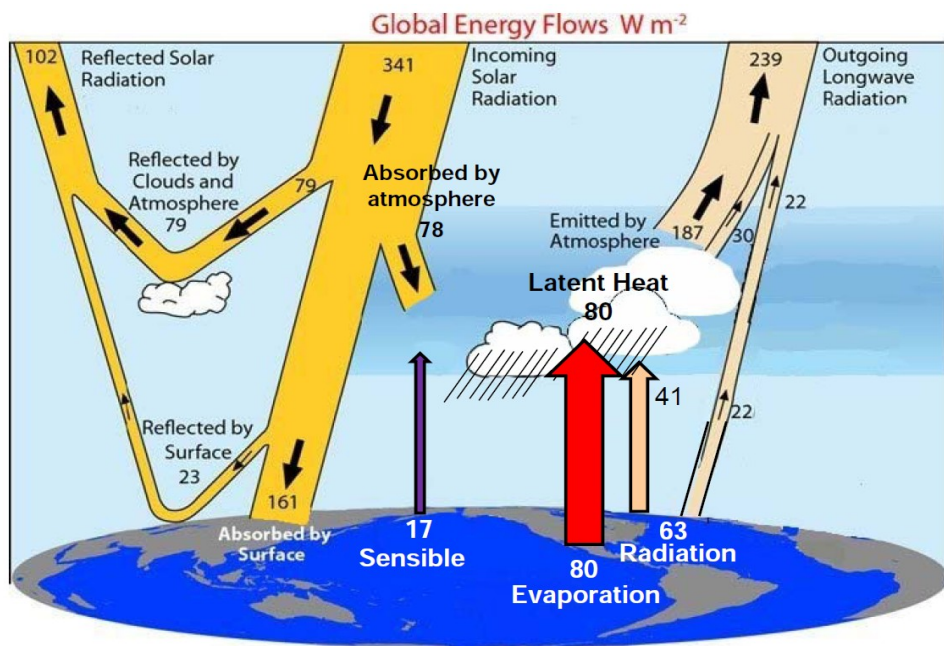
Diagramme de phase de l'eau



Chaleur latente de changement d'état: $L^* = Q/n$; $L = Q/m \approx 2,3 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$

Avec Q l'énergie thermique (chaleur) nécessaire pour faire passer n moles (ou une masse m) d'un état 1 à un état 2 à pression et température constantes

Cycle global de l'eau et de l'énergie



Adapté de [Trenberth & Fasullo, 2012]

Relation de Clausius-Clapeyron

Variation avec le temp. de la pression partielle de changement d'état:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L^*}{T \Delta V}$$

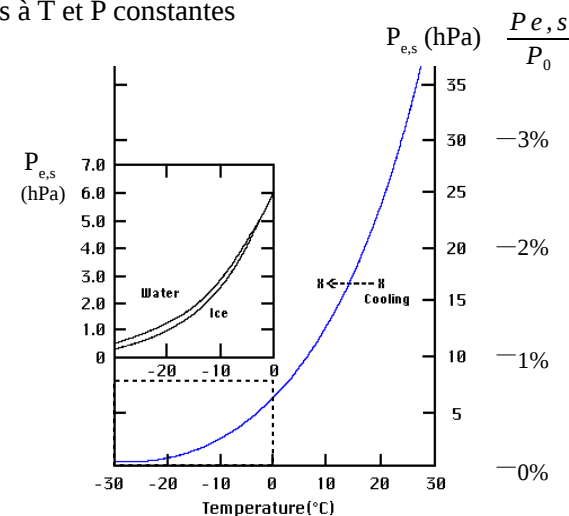
L^* : enthalpie de changement d'état
 V : variation de volume entre les deux états à T et P constantes

Pour la vaporisation ou la sublimation de l'eau (si $L^* = c^*e$ et gaz parfait):

$$\frac{dP_{e,s}}{dT} \approx \frac{L^* P_{e,s}}{T^2 R^*}$$

$$P_{e,s} = P_0 e^{\frac{L^*}{R^*} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$$

$$P_{e,s} = P_0 e^{\left(\frac{14.33 - 5350}{T} \right)} \text{ pour } T_0 \approx 20^\circ\text{C}$$



Humidité

Humidité relative

$$H = \frac{P_e}{P_{e,s}}$$

Avec P_e pression partielle de H_2O
 $P_{e,s}$ pression partielle de H_2O à saturation

Rapport de mélange (en kg de vapeur d'eau par kg d'air, kg/kg)

$$q = \frac{m_{\text{vapeur d'eau}}}{m_{\text{air}}} = \frac{M_e}{M_{\text{air}}} \frac{P_e}{P}$$

avec M_e et M_{air} masse molaire de H_2O et air
 $q \approx 0.622 P_e / P$

Rapport de mélange à la saturation :

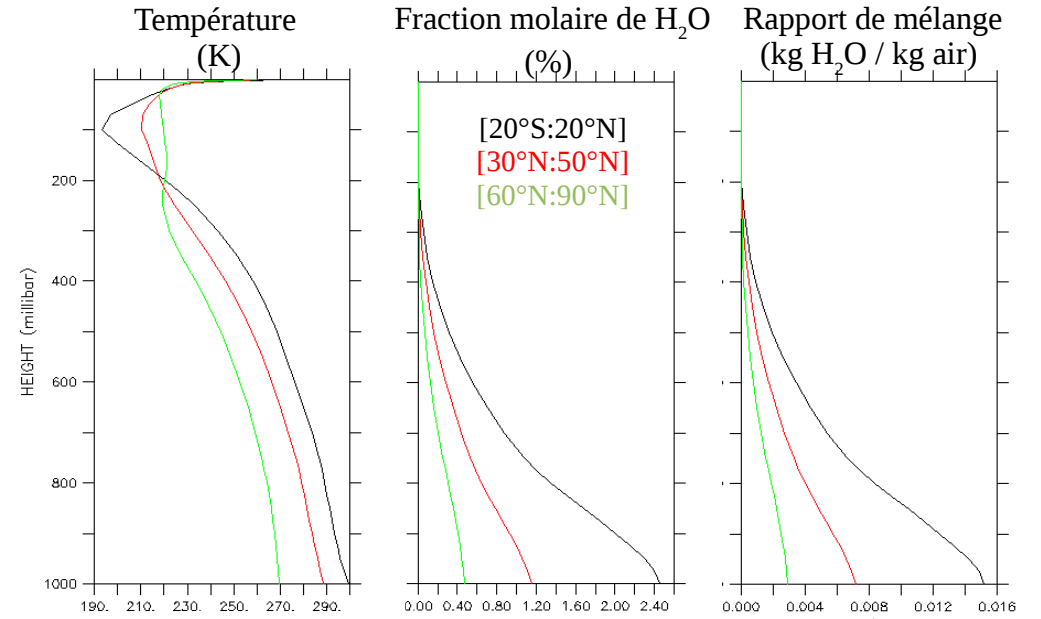
$$q_s = \frac{M_e}{M_{\text{air}}} \frac{P_{e,s}}{P}$$

Ordre de grandeur:

T	30°C	20°C	10°C	0°C	-20°C	-40°C
$P_{e,s}/P$	4%	2.3%	1.2%	0.6%	0.1%	0.01%
q_s (kg/kg)	0.026	0.014	0.007	0.004	0.6‰	0.08‰

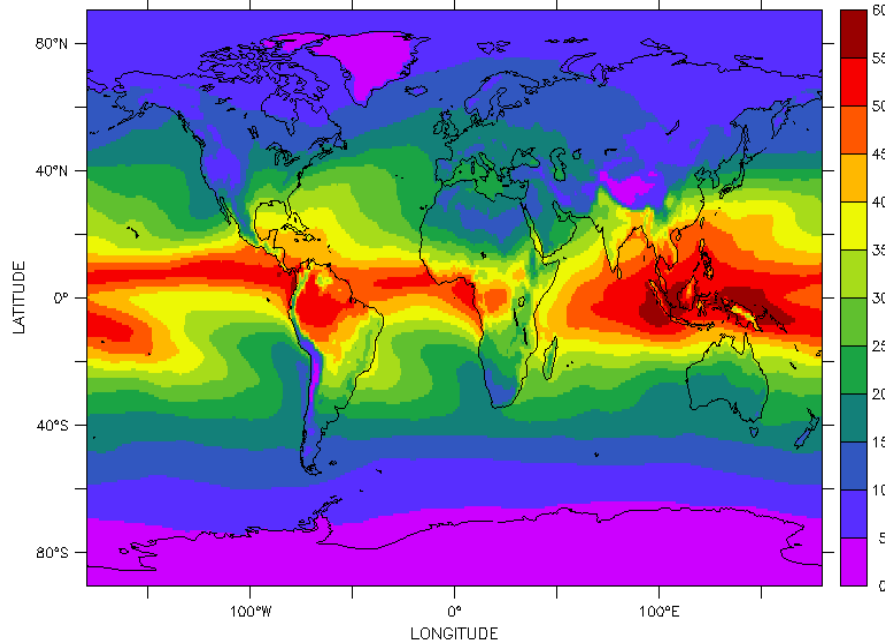
Profils verticaux

Analyses météorologiques ECMWF, moyenne annuelle



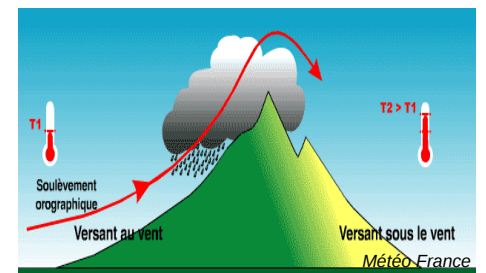
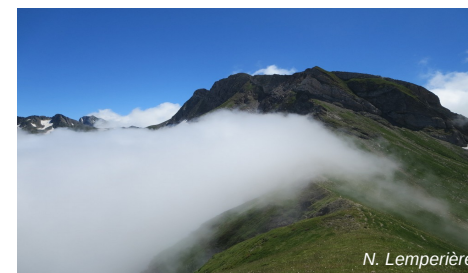
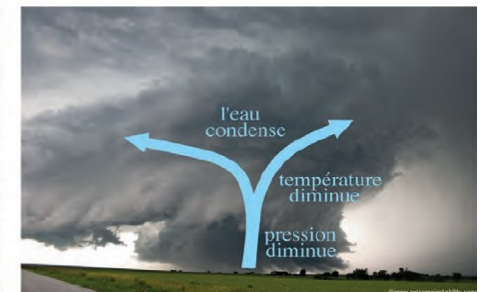
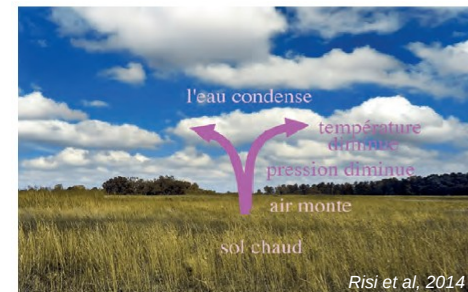
Intégrale verticale de la vapeur d'eau

Analyses météorologiques ECMWF, moyenne annuelle (kg.m⁻²)



Formation des nuages

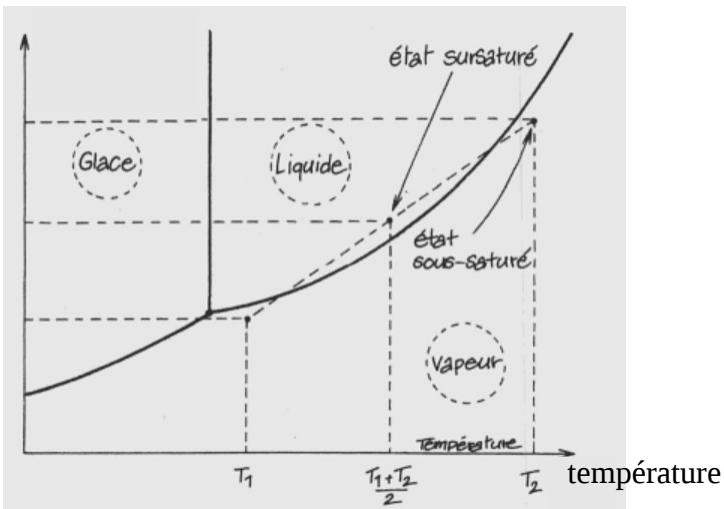
Presque tous les nuages se forment lors de l'ascension de l'air, qui se refroidit en montant. Nuages de couche limite, de convection (orage), orographiques...



Formation des nuages

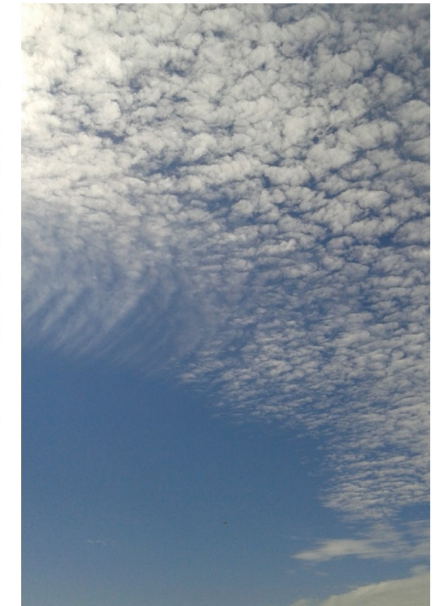
Mais il y a également la formation des nuages par refroidissement radiatif (e.g. bouillard) et par mélange de masse d'air

Pression partielle de H₂O

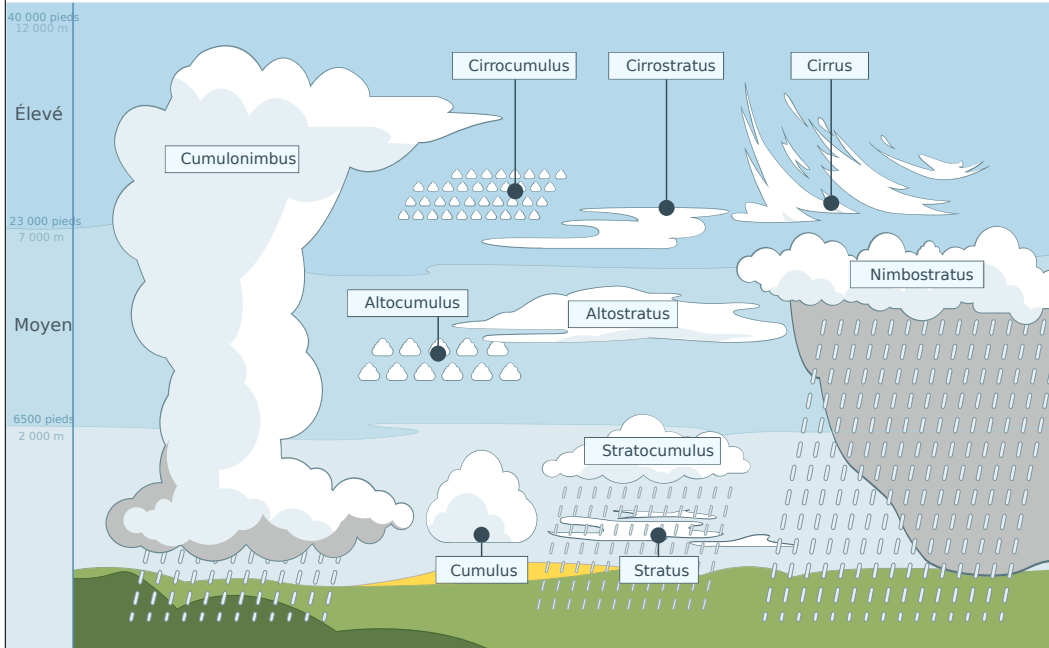


Formation des nuages

Mais il y a également la formation des nuages par refroidissement radiatif (e.g. bouillard) and par mélange de masse d'air

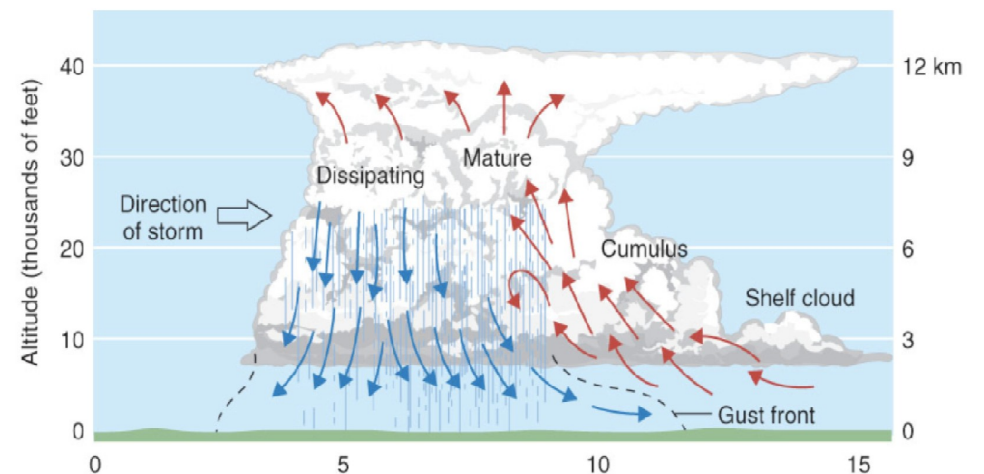


Les différents types de nuages



[Wikipedia]

Pourquoi fait-il froid et il y a-t-il des rafales de vents sous les orages



Profil vertical de température d'une atmosphère humide

Premier principe de la thermodynamique: $C_p dT = \frac{dP}{\rho} + d\dot{Q}$

Equation hydrostatique: $dP = -\rho g dz \Rightarrow C_p dT + g dz - d\dot{Q} = 0$

Changement de phase: $d\dot{Q} = -L dq$ avec $q = \frac{m_{\text{vapeur d'eau}}}{m_{\text{air}}}$

Si l'air est saturé en humidité: $q = q_s$ $dq = \frac{dq_s}{dT} dT$

$$\left(C_p + L \frac{dq_s}{dT} \right) dT + g dz = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dz} = \Gamma_s$$

$$\Gamma_s = \frac{-g}{C_p + L \frac{dq_s}{dT}}$$

Profil vertical de température d'une atmosphère humide

Air humide saturé

$$\frac{dT}{dz} = \Gamma_s$$

$$\Gamma_s = \frac{-g}{C_p + L \frac{dq_s}{dT}}$$

Air sec

$$\frac{dT}{dz} = \Gamma_a$$

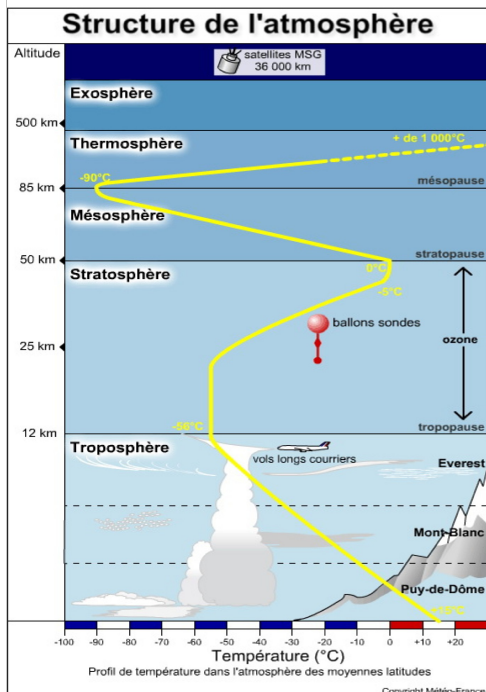
$$\Gamma_a = \frac{-g}{C_p}$$

Comme $\frac{dq_s}{dT} > 0$, alors $\Gamma_s > \Gamma_a$

A cause du dégagement de chaleur latente, la température diminue moins vite pour une **parcelle saturée** en ascension que pour une **parcelle sèche**.

Pour les conditions terrestres, on trouve: $\Gamma_s = -6.5 K km^{-1}$

Variation de la température avec l'altitude



Le profil de température dans la troposphère diminue bien de façon quasi-linéaire avec l'altitude, avec une valeur proche de $-6.5 K/km$.

Effet de foehn

Du fait de la condensation de l'eau, qui libère de l'énergie, l'air qui s'élève en formant un nuage se refroidit moins que l'air qui s'élève sans former de nuage.

