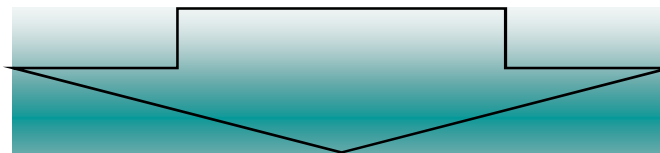


# Termodinamica atmosferei

## Atmosfera ca un gaz ideal

- extremele absolute ale temperaturii atmosferei la suprafata solului sunt  $-88.3^{\circ}\text{C}$ , respectiv  $+60^{\circ}\text{C}$ ;
- in general, temperatura atmosferei variaza între  $-50^{\circ}\text{C}$  și  $+50^{\circ}\text{C}$  ;
- variatia presiunii la nivelul mării normale este mică (ajungând la  $\pm 3\%$  din valoarea presiunii atmosferice normale):
- pe direcție verticală presiunea scade monoton;
- in domeniile de valori în care variaza temperatura si presiunea atmosferei gazele ce formeaza aerul atmosferic uscat se comporte ca si *gaze perfecte*;
- vaporii de apă din atmosfera reală se comportă - când sunt departe de saturație, în condiții de temperatură și presiune obișnuite - ca un *gaz ideal*.



**Atmosfera = gaz ideal**

# Legile gazului ideal

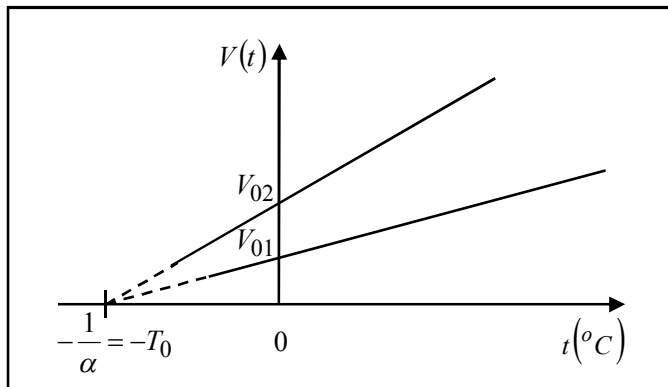
1. Legea Boyle–Mariotte

$$pV = ct \quad (m = ct, T = ct)$$

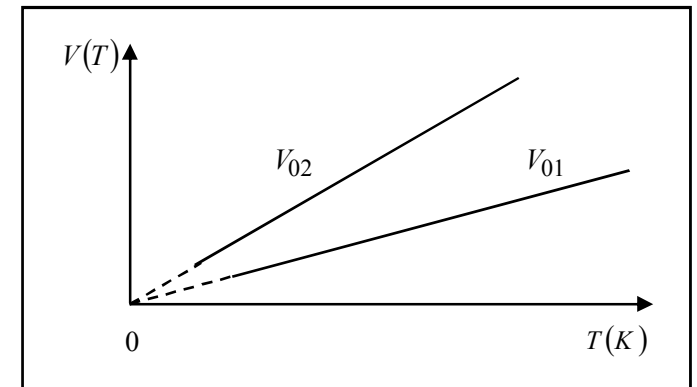
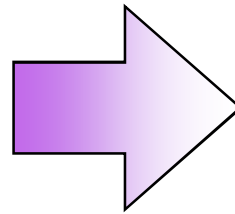
2. Legea Gay-Lussac

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha \cdot t \Rightarrow V(t) = V_0(1 + \alpha t) \quad \alpha = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273.15} \text{ grad}^{-1}$$

**Coefficient de dilatare volumica**



$$T = t + T_0, \quad T > 0$$



$$\frac{V}{T} = ct \quad (m = ct, p = ct)$$

3. Legea lui Charles  $\frac{p - p_0}{p_0} = \beta \cdot t \Rightarrow p(t) = p_0(1 + \beta t)$

$$\beta = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273.15} \text{ grad}^{-1}$$

$$\frac{p}{T} = ct \quad (m = ct, V = ct)$$

**Coefficient de variatie termica a presiunii**

4. Legea transformării generale

$$\frac{pV}{T} = ct$$

$$pV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT$$

$$R \cong 8310 \text{ J / kmol} \cdot \text{K}$$

**Constanta gazelor ideale**

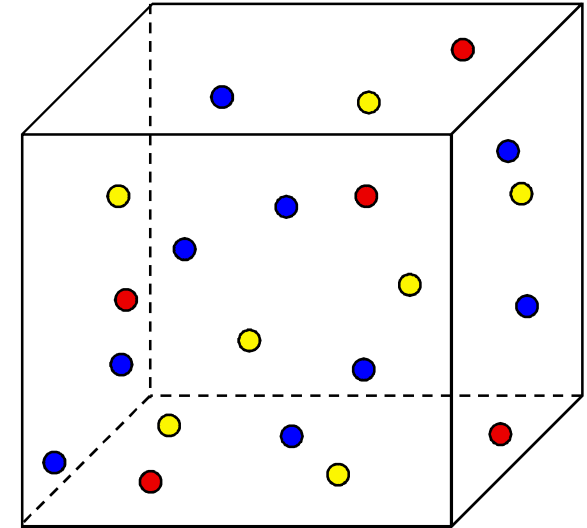
# Aerul uscat

Legea Dalton:

$$p_a V = \frac{m_a}{\mu_a} RT = \left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n} \right) RT$$

$$\frac{m_a}{\mu_a} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i} \Rightarrow \frac{1}{\mu_a} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m_a} \cdot \frac{1}{\mu_i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu_i} g_i$$

$g_i = m_i / m_a$  - ponderile masice ale fiecărui component gazos



oxigen (ponderea masică 23.1%)

$$\mu_{O_2} = 32 \text{ Kg / Kmol}$$

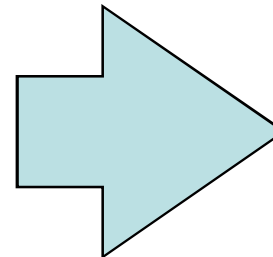
nitrogen (75.6%)

$$\mu_{N_2} = 28 \text{ Kg / Kmol}$$

argon (1.29%)

$$\mu_{Ar} = 40 \text{ Kg / Kmol}$$

$$\frac{1}{\mu_a} = \frac{75.6}{100} \cdot \frac{1}{\mu_{N_2}} + \frac{23.1}{100} \cdot \frac{1}{\mu_{O_2}} + \frac{1}{100} \cdot \frac{1.29}{\mu_{Ar}}$$



$$\mu_a \cong 28.95 \text{ kg / kmol}$$

# Amestecul de aer uscat cu vapori de apă (aerul umed)

$$p_{au} = p_a + e$$

( $p_a$  și  $e$  sunt presiunile parțiale ale aerului uscat, respectiv ale vaporilor de apă)

$$eV = \frac{m_v}{\mu_v} RT \Rightarrow e = \frac{\rho_v}{\mu_v} RT \quad \mu_v = \mu_{H_2O} = 18 \text{ kg/kmol}$$

$$p_{au} = \frac{RT}{V} \left( \frac{m_a}{\mu_a} + \frac{m_v}{\mu_v} \right)$$

$$R_a = R / \mu_a$$

- constanta redusă a gazelor

$$pV = m_{\text{aer umed}} R_a T_v$$

$$T_v = T \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\mu_v}{\mu_a} \right) \frac{e}{p} \right]$$

- temperatura virtuală a aerului umed

**Temperatura virtuală** este acea temperatură la care aerul uscat ar avea la aceeași presiune, o densitate egală cu cea a aerului umed.

Comparând ecuația termică de stare pentru aerul uscat și pentru aerul umed, se constată că **densitatea aerului umed este mai mică decât cea a aerului uscat.**

# Transformarea politropa

Primul principiu al tdm:  $dQ = dU + dL$

Legea Joule:  $dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV = \nu C_V dT$

Lucrul mecanic elementar:  $dL = p \cdot dV$

$$\nu C_V dT = \nu C dT - p dV$$

Definim **transformarea politropa** transformarea termodinamica in care caldura molara ramane constanta.

$$npdV + Vdp = 0 \quad \Rightarrow \quad pV^n = \text{const} \quad \text{unde} \quad n = \frac{(C_p - C)}{(C_V - C)} \quad \text{- indicele politropic}$$

**Cazuri particulare:**

$n=1; C=C_T$  - transformarea izoterma

$n=0; C=C_p$  - transformarea izobara

$n=\gamma; C=0$  - transformarea adiabatica

$n=\infty; C=C_V$  - transformarea izocora



# Transformarea adiabatică

Ecuatiile Poisson

$$pV^\gamma = ct$$

$$TV^{\gamma-1} = ct \quad \gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

$$p^{1-\gamma}T^\gamma = ct$$

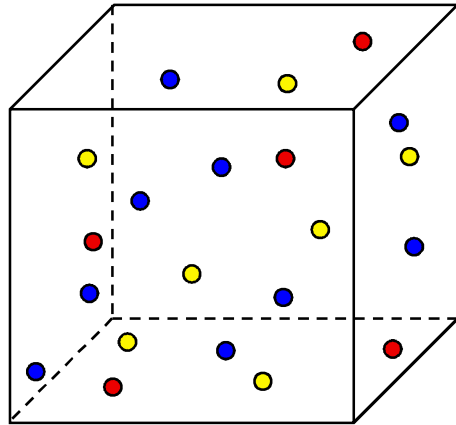
Definim **temperatura potențială**  $\Theta$  ca fiind temperatura la care ajunge o particulă de aer dacă ea este deplasată adiabetic de la starea inițială  $(p_0, T_0)$  la starea  $p = 1000$  mbari

$$p_0^{1-\gamma}T_0^\gamma = p^{1-\gamma}T^\gamma \Rightarrow T = T_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \Theta = T_0 \left( \frac{1000}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_0 \left( \frac{1000}{p_0} \right)^{\frac{R}{C_p}} = T_0 \left( \frac{1000}{p_0} \right)^{\frac{2}{7}}$$

**OBSERVATIE:**

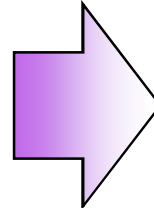
temperatura potențială este o *mărimă conservativă* a aerului uscat și a aerului umed nesaturat

## Căldura molară la volum constant pentru atmosferă

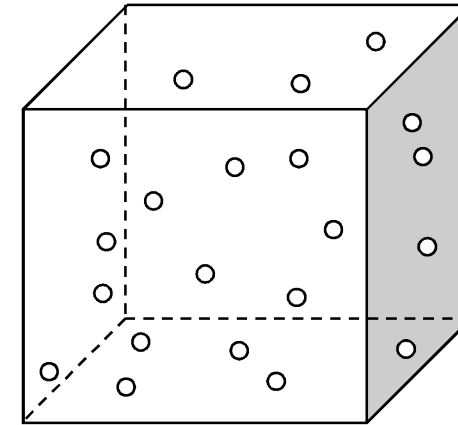


T

$$Q = \nu C_V \Delta T$$



$$Q = \sum_i Q_i$$



T + ΔT

$$\nu C_V \Delta T = \nu_1 C_{V1} \Delta T + \nu_2 C_{V2} \Delta T + \dots + \nu_n C_{Vn} \Delta T$$

$$C_V = \frac{\sum \nu_i C_{Vi}}{\sum \nu_i} = \sum p_i C_{Vi}$$

$$p_i = \frac{\nu_i}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n} = \frac{m_i / \mu_i}{m_a / \mu_a} = C_i \frac{\mu_a}{\mu_i}$$

$p_i$  - ponderi molare,  $C_i$  - ponderi masice

$$C_V^{atm} = \frac{5}{2} R \left( \frac{23.1}{100} \right) \frac{28.9}{32} + \frac{5}{2} R \left( \frac{75.6}{100} \right) \frac{28.9}{28} + \frac{3}{2} R \left( \frac{1.29}{100} \right) \frac{28.9}{40} \cong 2.41R \cong \frac{5}{2} R$$

$$\gamma^{atm} = \frac{C_p}{C_v} = 1.4$$



# Umiditatea în atmosferă

- Anual se evaporă o cantitate de 519 000  $km^3$  de apă, din care 448 000  $km^3$  din mări și oceane, iar 71 000  $km^3$  de la suprafața uscatului.
- În medie, pe un an de zile în zonele temperate și polare se evaporă un strat de apă între 700  $mm$  iar la latitudini mici un strat de apă de aproximativ 1000  $mm$ .

**Umiditatea absolută ( $a$ )** - masa de vapori de apă conținută în unitatea de volum:

$$a = \rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{e\mu_v}{RT}$$

**Umiditatea specifică ( $q$ )** - raportul dintre cantitatea vaporilor de apă (măsurată în grame) conținuți într-un kg de aer umed:

$$q = \frac{m_v}{m_{aer}}$$

**Umezeala relativă** - raportul dintre presiunea actuală a vaporilor de apă și presiunea maximă (presiunea vaporilor saturați) la aceeași temperatură:

$$U_r = \frac{e}{E} \times 100$$

**Temperatura punctului de rouă** - temperatura pe care trebuie să o aibă aerul umed astfel încât acesta să ajungă la presiunea de saturație a vaporilor, când apare condensarea.



# Entropiile aerului uscat si a celui umed.

## Entropia aerului uscat

$$dS = \frac{dU + \delta L}{T} = \nu C_V \frac{dT}{T} + \nu R \frac{dV}{V} \Rightarrow S(V, T) = \nu C_V \int \frac{dT}{T} + \nu R \int \frac{dV}{V} = \nu C_V \ln T + \nu R \ln V + S_0$$

$$dS = \nu C_p \frac{dT}{T} - \nu R \frac{dp}{p} \Rightarrow S(T, p) = \nu C_p \ln T - \nu R \ln p + S'_0$$

$$T = \Theta \left( \frac{p}{1000} \right)^{R/C_p} \Rightarrow S(\Theta) = \nu C_p \ln \left[ \Theta \left( \frac{p}{1000} \right)^{R/C_p} \right] - \nu R \ln p + S'_0 = \nu C_p \ln \Theta + S''_0$$

## Entropia aerului umed

**Entropia fiind o marime aditiva de stare rezulta ca entropia aerului umed este formata din entropia aerului uscat continut in acea masa de aer umed, din entropia vaporilor de apa si din entropia apei rezultate prin condensare.**

$$S_a = \nu C_p \ln T - \nu R \ln(p - E) + c_1 \quad S_v = m_{apa} c_{apa} \ln T + \frac{m_v \lambda_v}{T} + c_2$$

$$S = \left( \nu C_p + m_{apa} c_{apa} \right) \ln T - \nu R \ln(p - E) + \frac{m_v \lambda_v}{T} + c_3$$

# Mișcarea verticală a aerului

$$\left. \begin{aligned} vC_V dT &= -pdV \\ pV &= vRT \quad pdV + Vdp = vRdT \\ dp &= -\rho g dz \end{aligned} \right\} \begin{aligned} -\frac{dT}{dz} &= \frac{\mu_a g}{C_p} = \Gamma_a \cong 9.8^{\circ} C / km \\ &\text{expresia gradientului adiabatic al aerului uscat} \end{aligned}$$

$$T(z) = T_0 - \Gamma z \quad \Gamma = 6.5^{\circ} C / km \quad \text{gradientul termic vertical}$$

$$\Theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{\frac{2}{7}} \quad \text{Derivând această relație în raport cu înălțimea, avem}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} dz = \frac{\partial T}{\partial z} dz \left( \frac{1000}{p} \right)^{2/7} + \frac{2}{7} T \left( \frac{1000}{p} \right)^{2/7-1} \left( -\frac{1000}{p^2} \right) \frac{\partial p}{\partial z} dz \Rightarrow \frac{T}{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{2}{7} \frac{\mu g}{R}$$

$$\frac{T}{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z} = -\Gamma + \Gamma_a$$

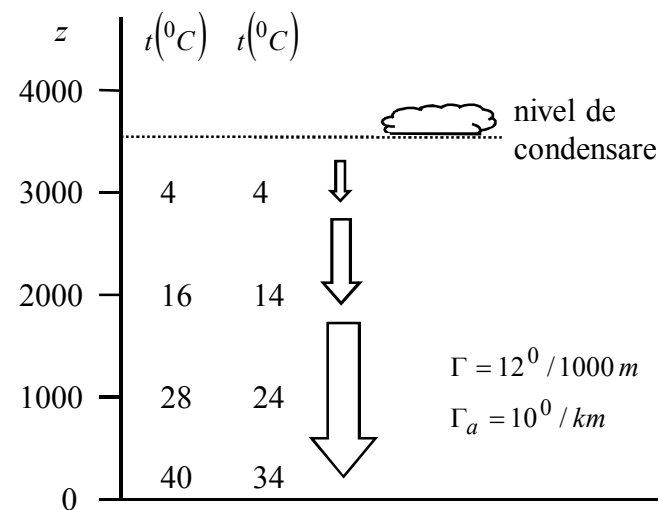
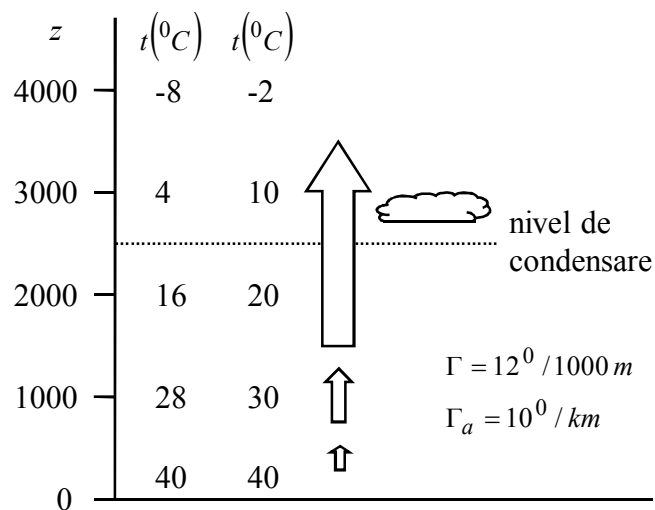
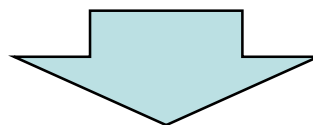
# Stabilitatea și instabilitatea atmosferei

$$\frac{T}{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z} = -\Gamma + \Gamma_a$$

1. Instabilitate de tip convectiv:

$$\Gamma_a < \Gamma$$

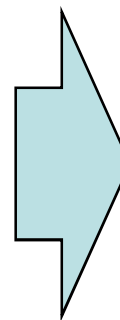
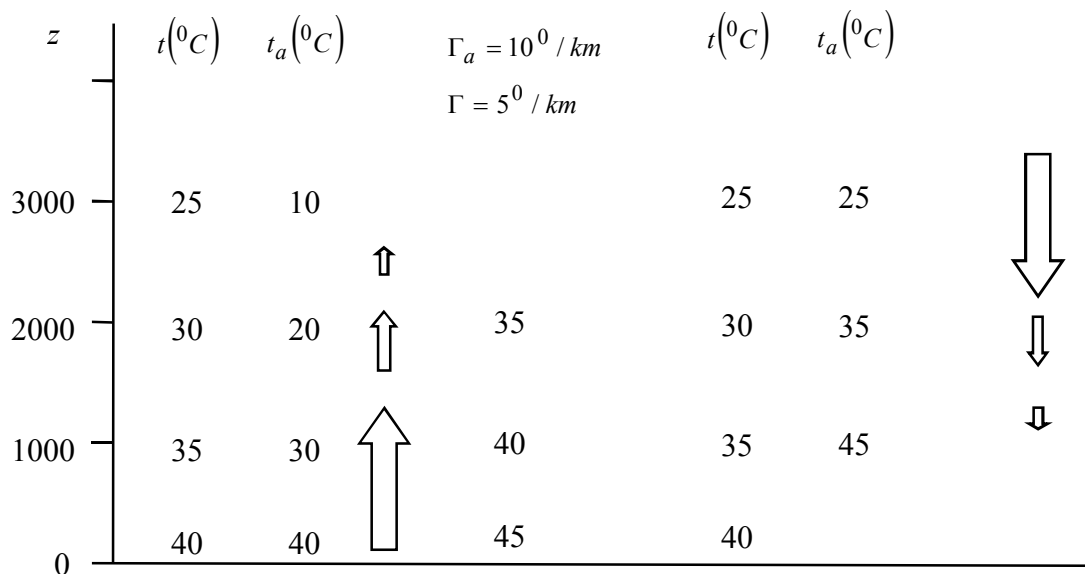
$$\frac{d\Theta}{dz} < 0$$



# Stabilitatea și instabilitatea atmosferei

2. Echilibru indiferent:  $\Gamma_a = \Gamma \quad \frac{d\Theta}{dz} = 0$

3. Echilibru stabil:  $\Gamma_a > \Gamma \quad \frac{d\Theta}{dz} > 0$



$$\frac{d^2}{dt^2}(\delta z) + N^2(\delta z) = 0$$

$$\delta z = A \exp(iNz)$$

**frecvența Brunt-Vaisala**

$$N^2 = \frac{g}{\Theta} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial z}$$

$$\tau = \frac{2\pi}{N} \cong 8 \text{ min } 43 \text{ s}$$

# Transformările fază ale apei în atmosferă

**Condensarea**

- la nivelul solului (roua, bruma)
- la mică înălțime deasupra Pământului (ceața, pâcla)
- la înălțime (nori)

**Nuclee de condensare**

- aerosoli
- saruri solubile
- solide higroscopice

În cazul aerului lipsit de impurități, procesul de condensare este foarte greu de realizat. Aerul trebuie răcit până devine **suprasaturat** cu un procent de suprasaturație de cca 400%. În aceste condiții speciale începe, **de la sine**, condensarea vaporilor.

**Ecuatia Kohler:**

$$e_r = e_{s,\infty} \left( 1 + \frac{A}{r} - \frac{B}{r^3} \right)$$

$A/r$  - termenul ce descrie curbura suprafeței (Laplace)

$$A = \frac{2\sigma\mu_{apa}}{RT\rho_{apa}}$$

$B/r^3$  - termenul ce descrie efectul soluției (Van't Hoff)

$$B = \frac{3Vm_s\mu_{apa}}{4\pi\mu_s\rho_{apa}}$$

$V$  – coef. Van't Hoff

$$S - 1 = \frac{e_r}{e_{s,\infty}} - 1 \quad \text{raportul de saturație}$$

# Tipuri de nori

**Nori superiori**  
(> 6000 m)



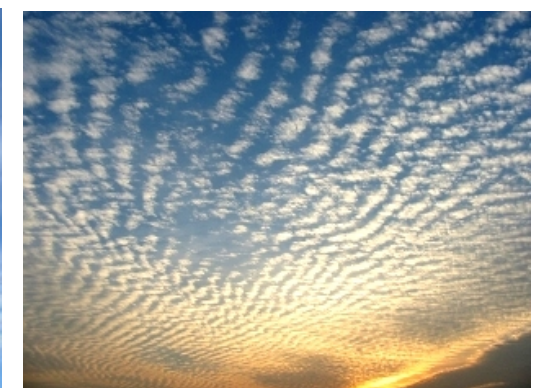
Cirrus (Cs)



Cirrostrat (Cs)



Cirrocumulus (Cc)



Cirrus uncinus

# Tipuri de nori

**Nori mijlocii**  
(2000 – 6000m)



Altocumulus (Ac)



Altostratus (As)



# Tipuri de nori



**Nori inferiori**  
( $< 2000\text{m}$ )

Stratus (St)

Stratocumulus (Sc)

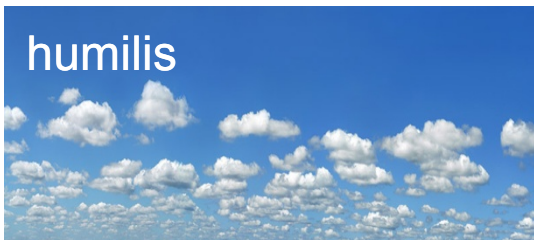
Nimbostratus (Ns)



# Nori cu dezvoltare verticala



humilis



mediocris



Cumulus (Cu)



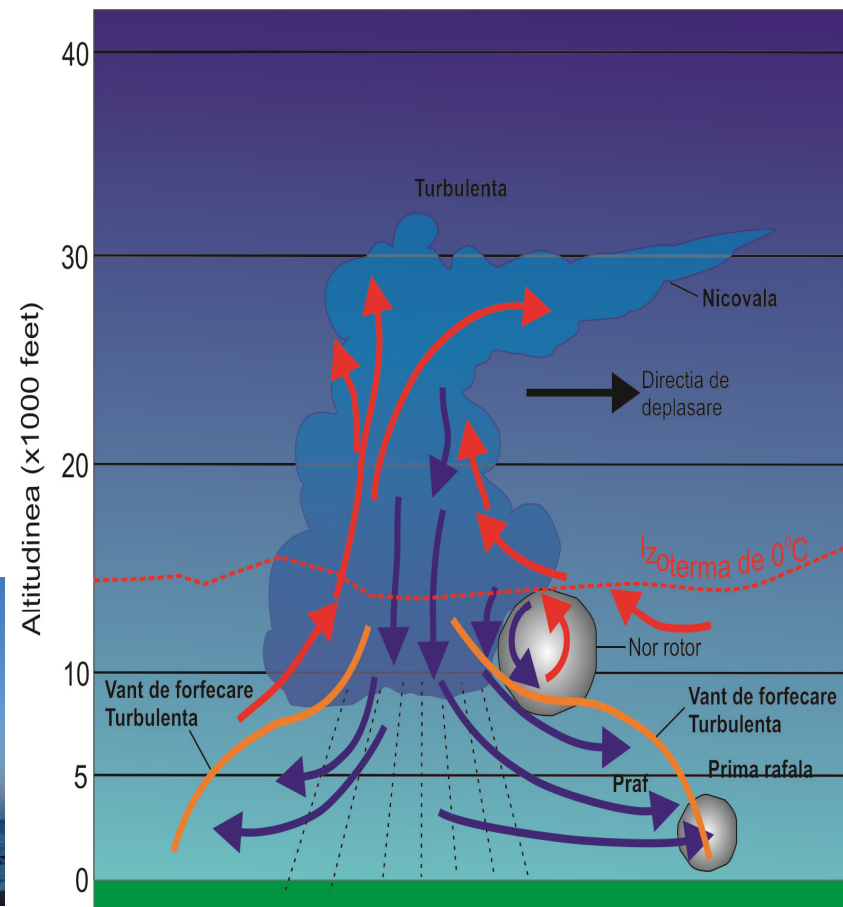
Cumulus calvus



Cumulonimbus



Cumulonimbus incus

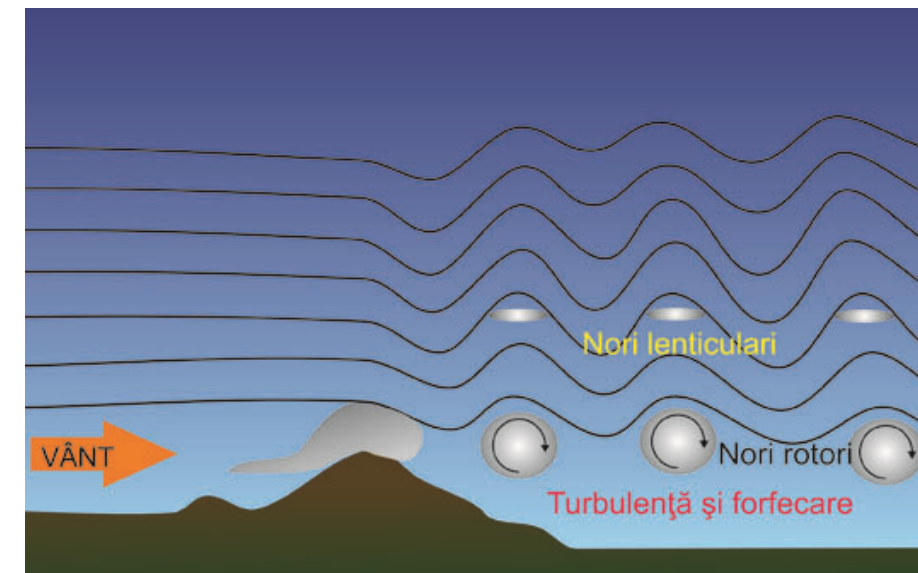
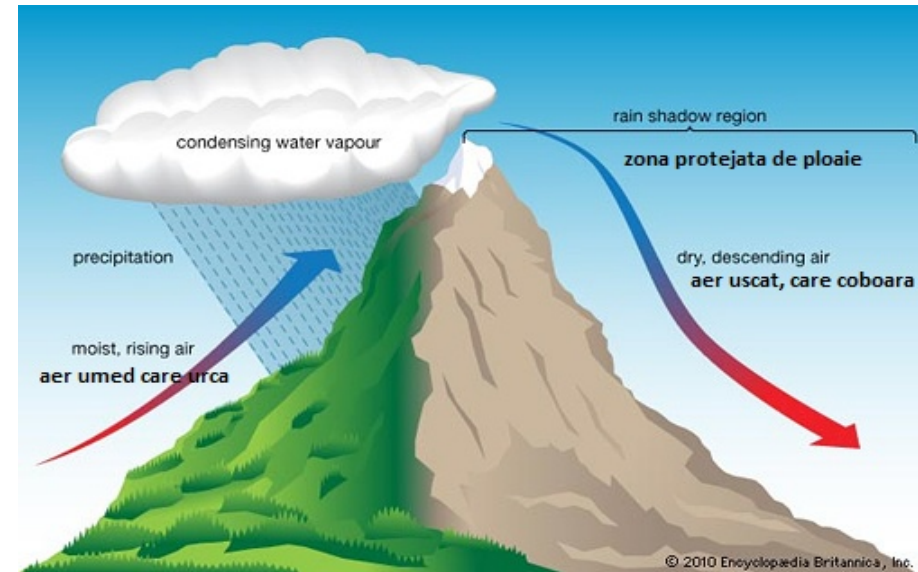


# Nori periculosi

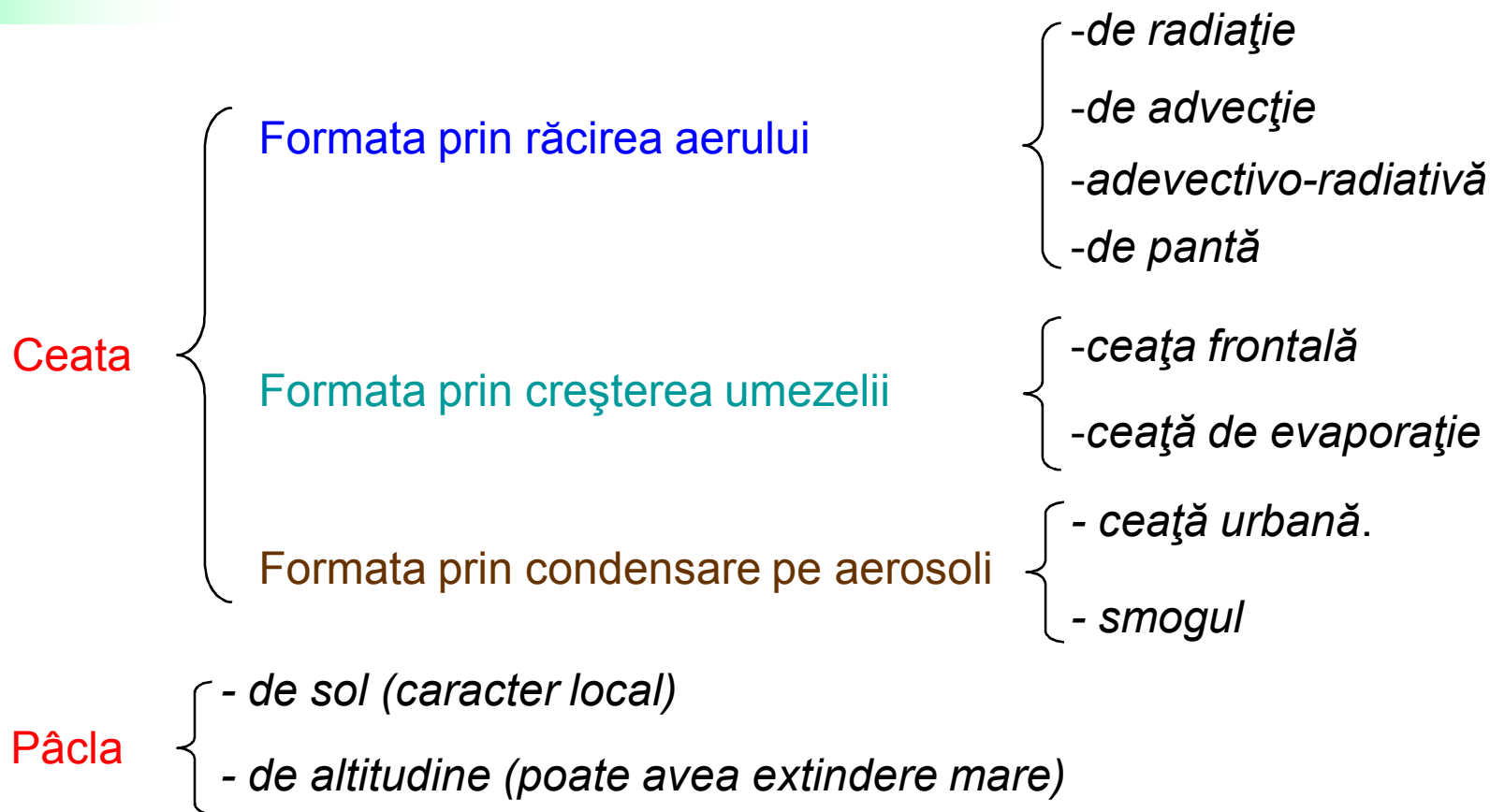
## Cumulus mammatus



# Nori orografici



# Ceața și pâcla



Pâcla este **cauzată de impurificarea aerului** cu particule fine de praf, cenușă, fum sau cu alte materii solide foarte fine. Formarea și extinderea pâclei este deseori condiționată de existența unei **inversiuni termice** în atmosferă. Această inversiune termică **se opune dezvoltării mișcărilor verticale** și duce la **acumularea de impurități** pe diferite grosimi din atmosferă.

# Marele Smog – Londra 5-9 dec.1952



- încălzirea locuințelor în metropola britanică se baza în special pe cărbune.
- gazele de ardere au format împreună cu ceata un strat de smog cu efecte negative asupra populației.
- efectul a fost amplificat de fenomenul de inversiune termică (aerul rece poluat a fost blocat aproape de nivelul solului de un strat de aer cald).
- în acea lună au murit peste 4.000 de oameni (prin afecțiuni cardiovasculare și respiratorii);
- în lunile următoare s-au înregistrat alte câteva mii de decese;
- efectele negative s-au resimțit pe termen mai lung (diverse tipuri de cancer și tulburări neurologice).

Fenomenul s-a repetat în perioada 12 - 15 decembrie 1991, provocând decesul a 160 de oameni.



# Smogul (smoke & fog)



Los Angeles



Sao Paolo



Mexico City  
Smog fotochimic – dec. 2010



Paris



# Beijing

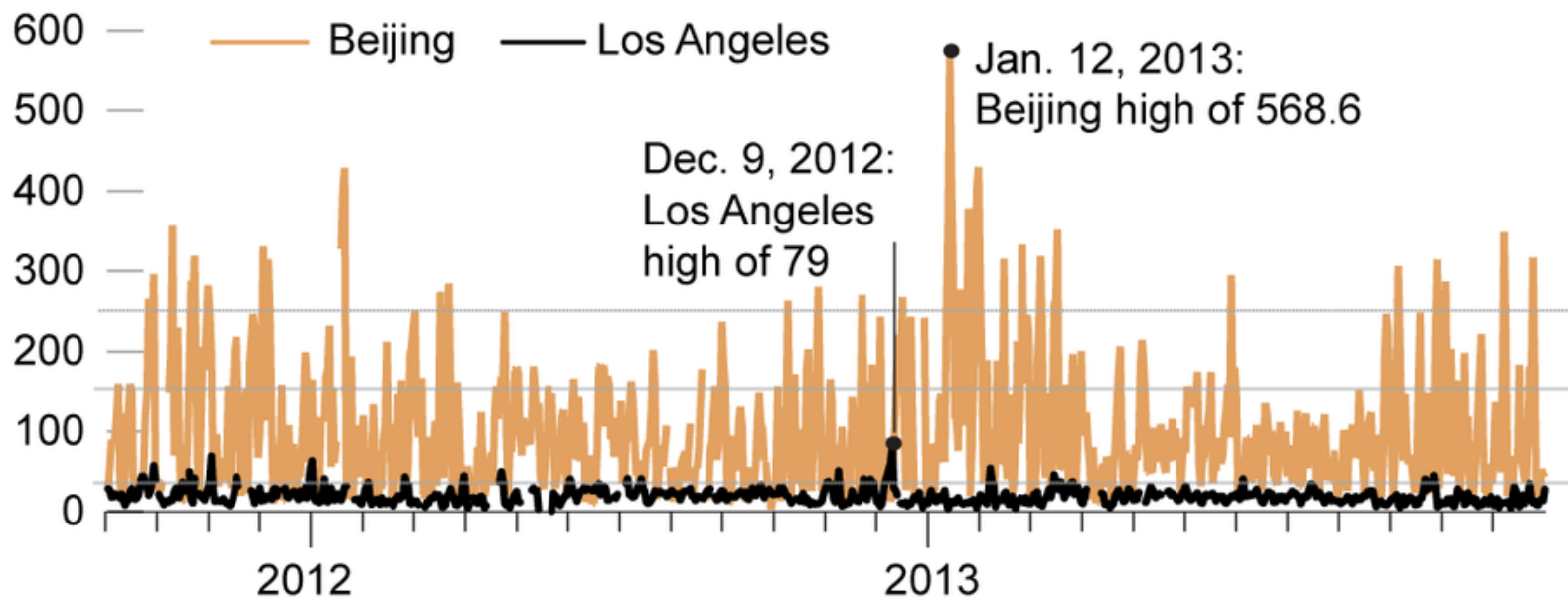


# Beijing vs. Los Angeles

## Beijing regularly tops L.A.'s worst smog day

On an average day Beijing has far more particulate matter in its air than the worst day in Los Angeles.

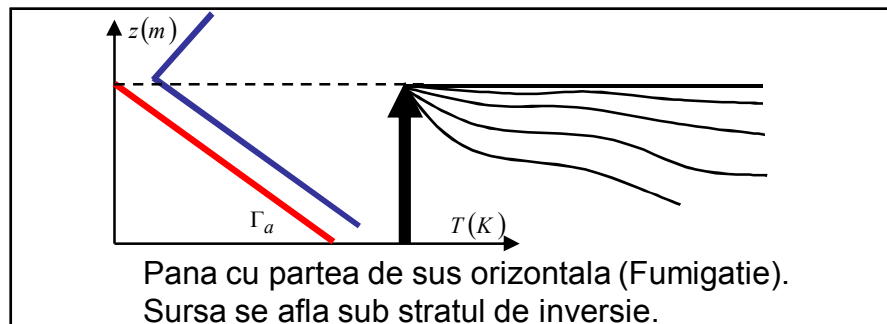
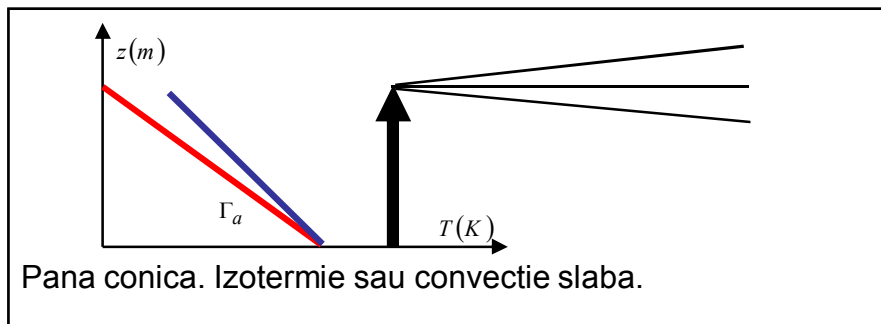
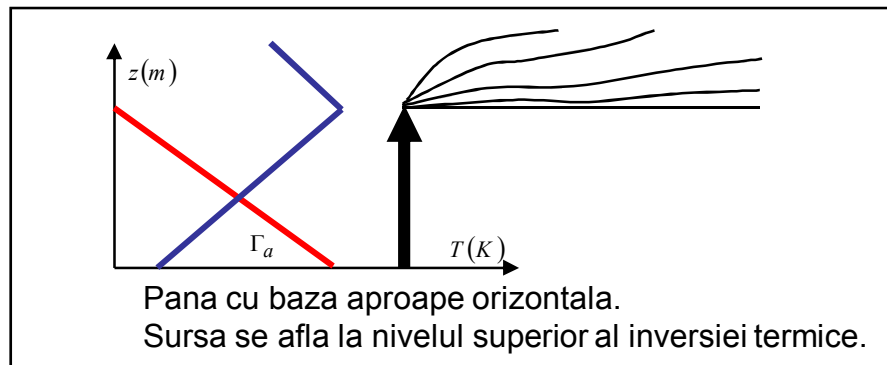
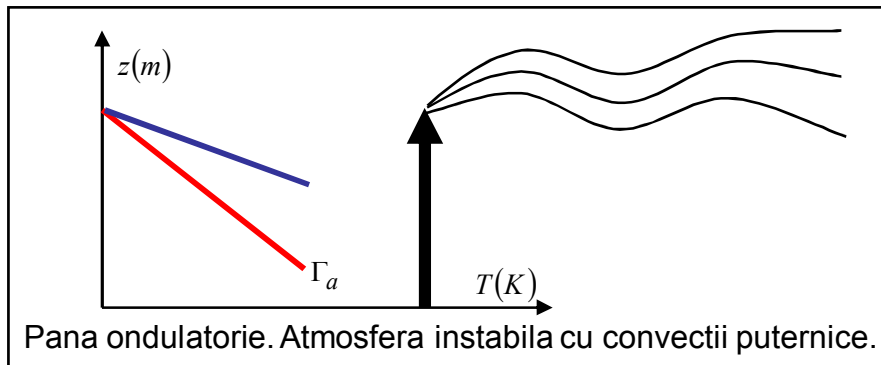
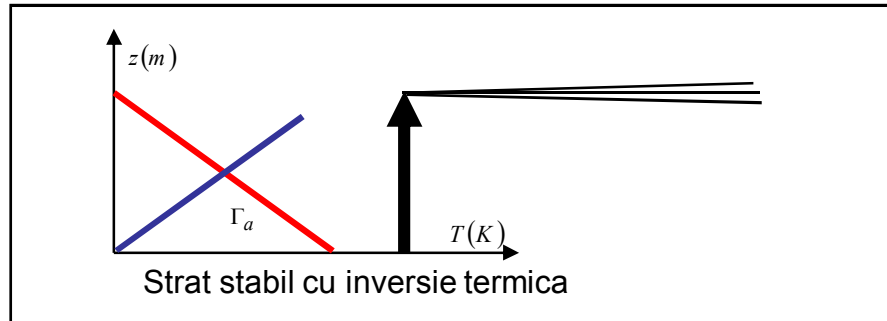
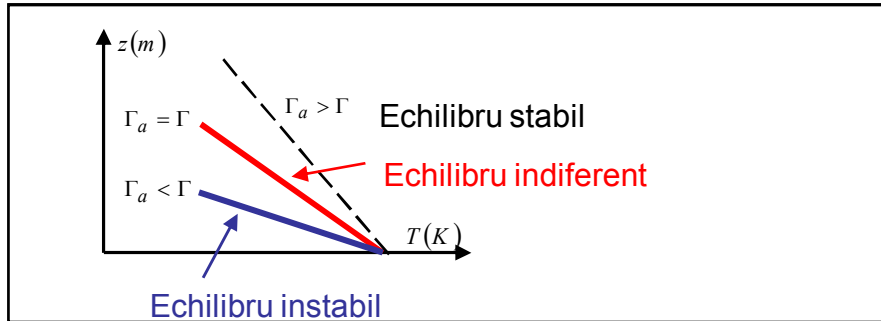
**Daily average, particulate matter (PM2.5)** (In micrograms per cubic meter)



Sources: South Coast Air Quality Management District, State Department.



# Pene de poluant



# Sedimentarea gravitacionala a poluantilor

## Legea de miscare

$$4\pi r^3 \rho / 3 \times \frac{d^2 z}{dt^2} = \langle F_{Browniana} \rangle - 4\pi r^3 (\rho - \rho_{aer}) g / 3 - 6\pi \eta r \frac{dz}{dt}$$

**In cazul stationar si in aproximatia neglijarii difuziei, ecuatia de miscare devine**

$$0 = 4\pi r^3 (\rho - \rho_{aer}) g / 3 - 6\pi \eta r v_{lim}$$

$$v_{lim} = \frac{2gr^2(\rho - \rho_{aer})}{9\eta}$$

Pentru:  $g=10 \text{ m/s}^2$

$\eta = 2 \times 10^{-3} \text{ kg/m/s}$

$\rho = 3001.23 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{aer} = 1.23 \text{ kg/m}^3$

$D \text{ (mm)}$	Viteza de cădere (m/s)	Timpul de cadere pe distanta de 90 m
1	3.33	27 s
0.1	0.033	45.4min
0.01	0.00033	3.15 zile
0.001	0.000003	11.5 luni