



***Meteorologia e Micrometeorologia
per l'inquinamento atmosferico
2011***

Parte 1

**Caratteristiche Generali del
Planetary Boundary Layer
(PBL)**

*dott. Roberto Sozzi
dott. Andrea Bolignano*

MICROMETEOROLOGIA

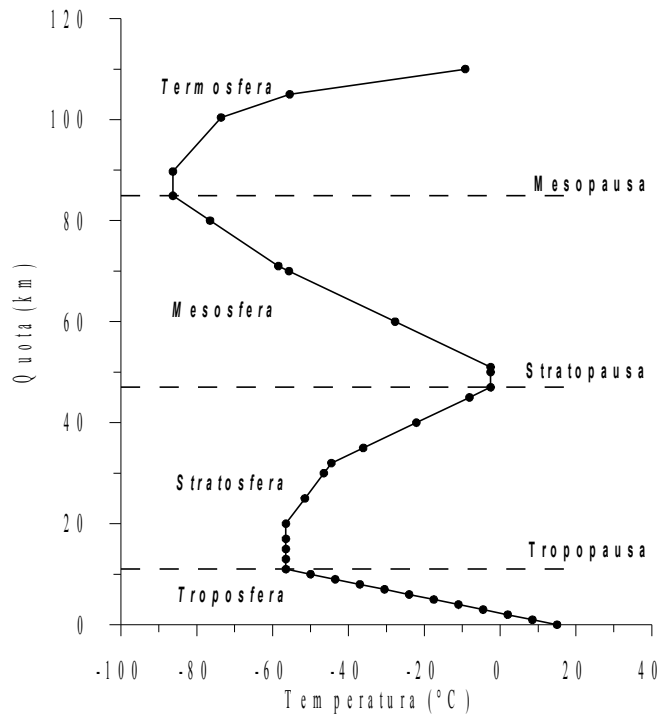


Quella parte della **Meteorologia** che studia la porzione di **Troposfera** in cui si ha:

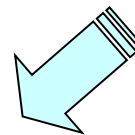


- l'emissione delle sostanze inquinanti
- il loro trasporto
- la loro diffusione
- la loro parziale eliminazione
- la loro trasformazione chimica

Troposfera → parte dell'**Atmosfera** (involucro gassoso che circonda l'intero globo terrestre)



Stratificazione tipica



La **Troposfera** è la parte più bassa dell'atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre.

Ai fini dello studio dell'inquinamento atmosferico, siamo interessati solo ad una porzione di essa, quella a più diretto contatto col suolo.

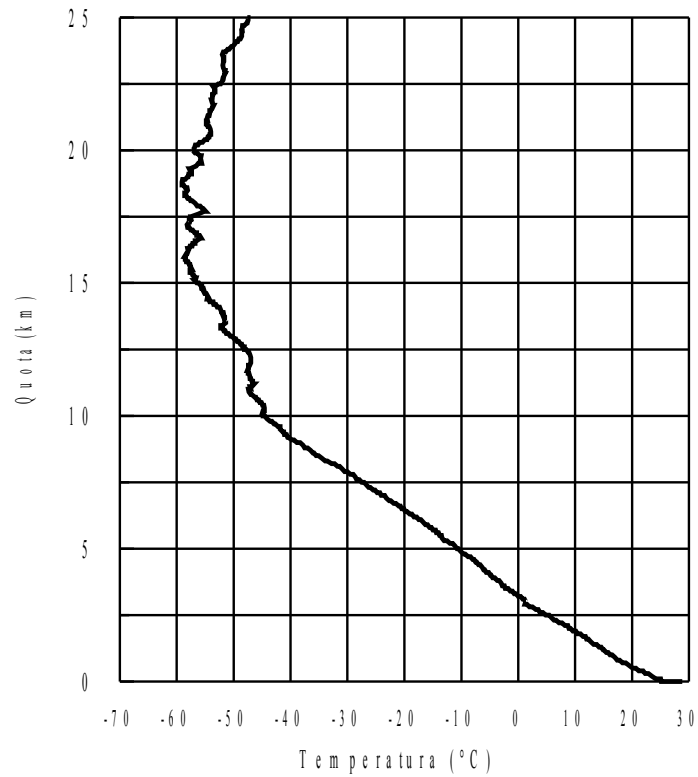
Questo strato di Troposfera si estende dal suolo fino ad una quota che varia durante il giorno e da giorno a giorno

(estensione massima di 1 – 2 km nelle ore diurne e soleggiate).

Possiede caratteristiche fisiche e chimiche nettamente distinte dal resto della troposfera.

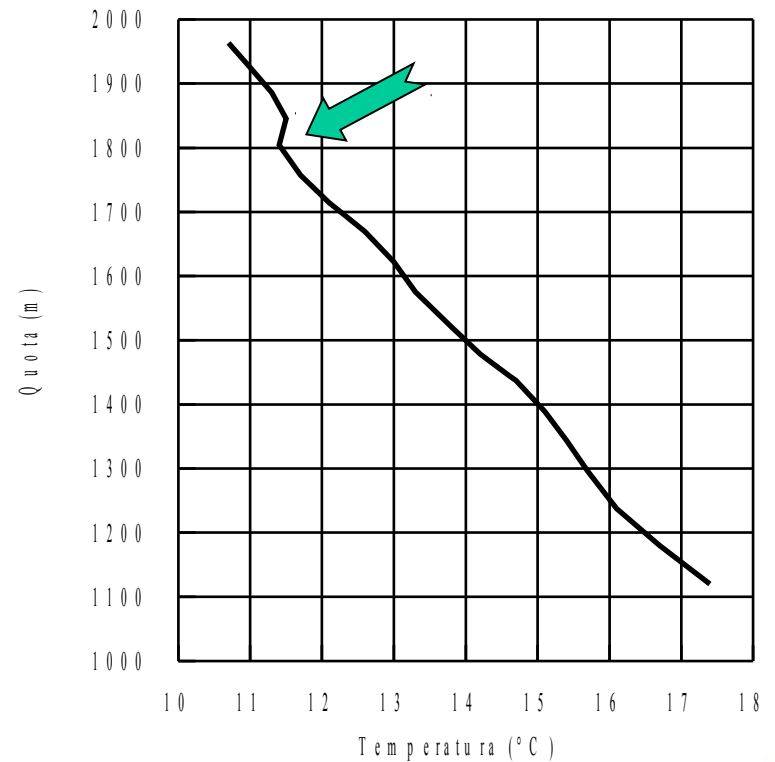
Prende il nome di:

Planetary Boundary Layer (PBL)
Strato Limite Planetario
Atmospheric Boundary Layer



Profilo verticale di temperatura nella Troposfera

Individuazione preliminare del PBL



CARATTERIZZAZIONE DEL PBL

Il PBL è un sistema fisico che si deve studiare nel contesto della Fluidodinamica

Sistema fisico \Rightarrow miscuglio di gas

Per il suo **studio** è necessario definire:

- un dominio di indagine
- un sistema di coordinate di riferimento
- un insieme di variabili fisiche che descrivono il PBL
- un insieme di variabili chimiche che descrivono il PBL

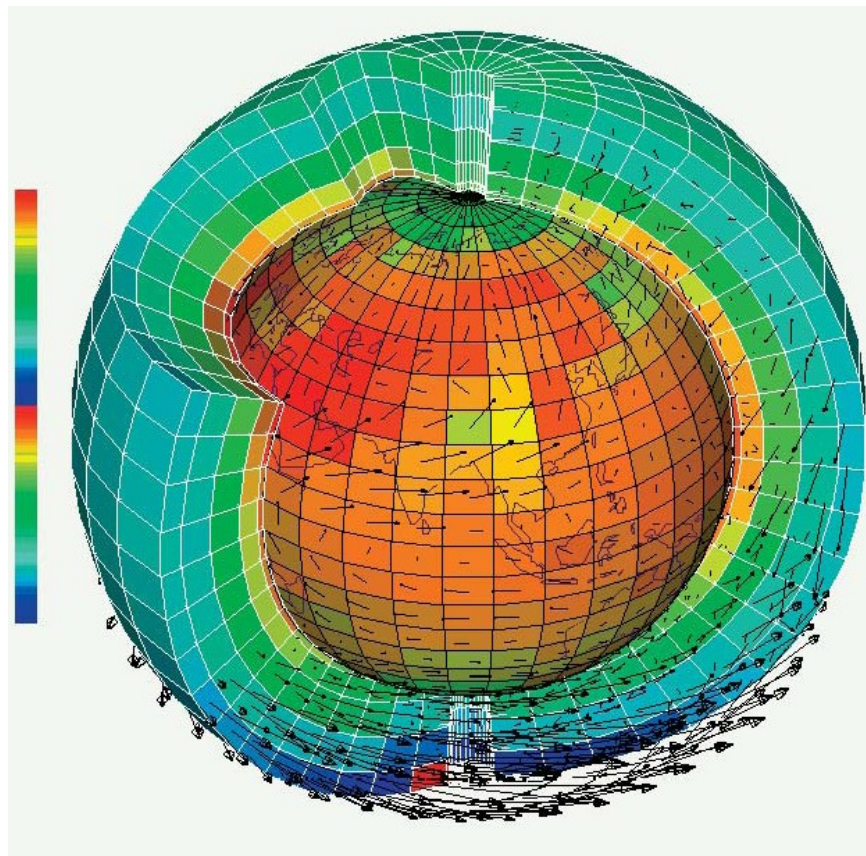
Dominio di Indagine

Volume geometrico entro cui si studia un fenomeno (in questo caso lo stato ed il moto delle masse d'aria dell'Atmosfera).

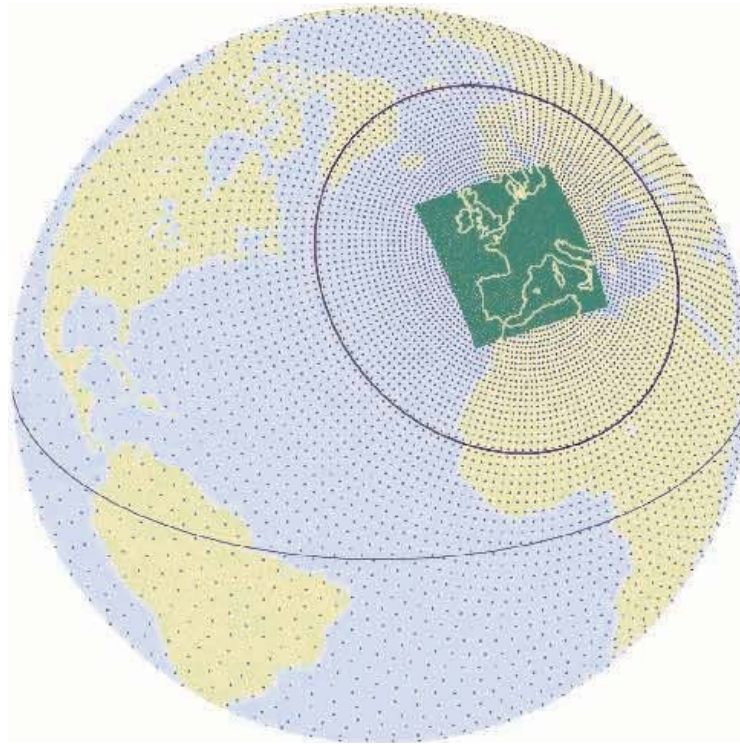
Il Dominio di Indagine ha:

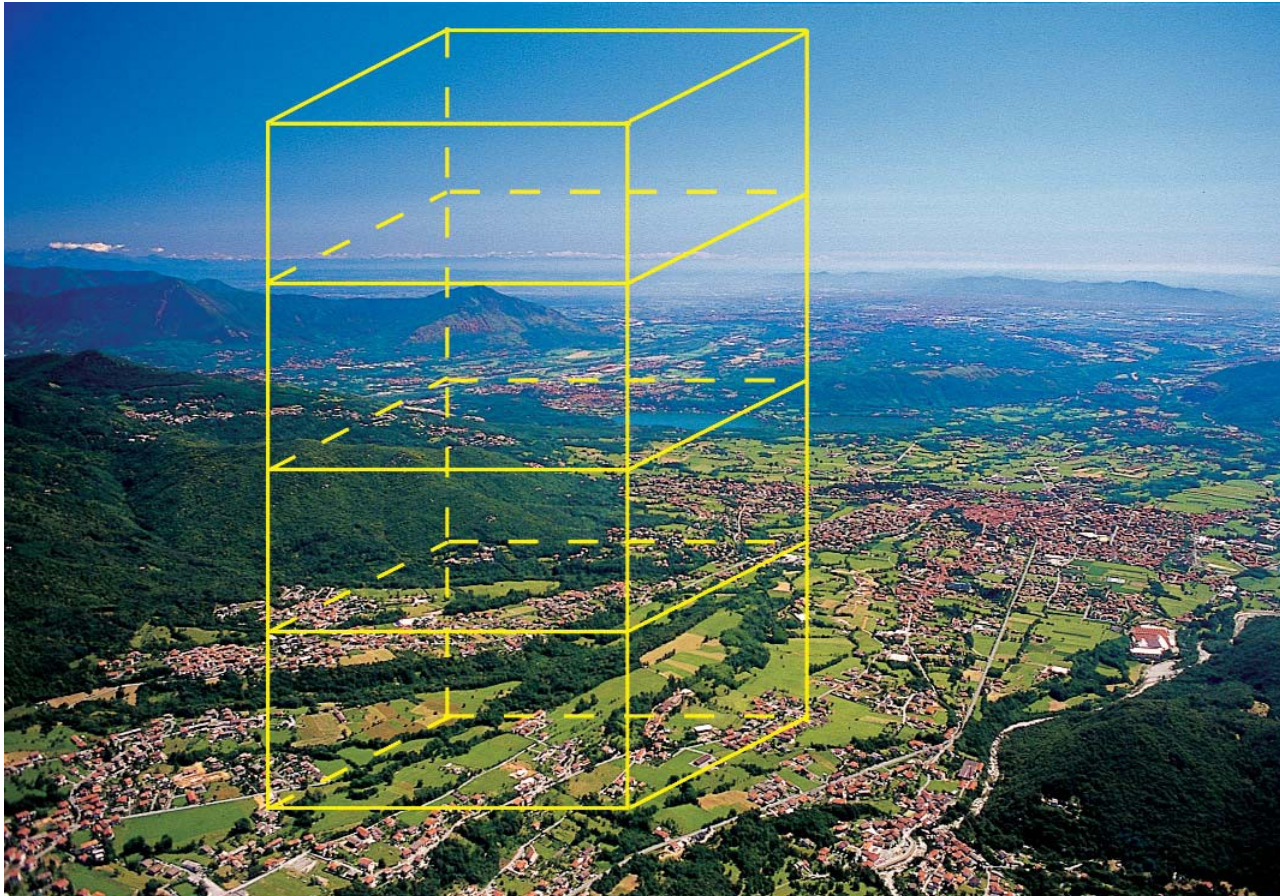
- la caratteristica principale di avere sempre la superficie terrestre come sua frontiera inferiore;
- è differente se si sta effettuando uno studio di Meteorologia Generale o di Micrometeorologia

Il primo tipo di dominio spaziale è costituito da tutta l'atmosfera che circonda la Terra. Un modello che adotta un tale dominio di calcolo è un **Modello Globale**



Il secondo tipo di dominio è costituito da una porzione di atmosfera sovrastante un'area limitata della superficie terrestre (**Modello ad Area Limitata**)





Sistema di Riferimento

Euleriano: un sistema di riferimento euleriano è costituito da una terna di assi cartesiani ortogonali fissati ad un punto definito della superficie terrestre.

- Questo sistema è fisso nello spazio e nel tempo ed in generale non è inerziale;
- È il sistema di riferimento adottato nel realizzare le misure meteorologiche e di concentrazione delle sostanze inquinanti;
- In sostanza, adottando un sistema di riferimento di questo tipo, si realizza una **descrizione euleriana del fenomeno**, cioè si descrive il fenomeno come lo vedrebbe un osservatore fisso posto all'origine degli assi.

Lagrangiano: si isola una porzione estremamente piccola di aria e si attacca a tale particella un sistema di assi cartesiani ortogonali. Quindi un tale sistema di assi si muoverà con la particella.

- È un sistema di riferimento in movimento
- Varia al variare della particella considerata
- In sostanza, adottando un tale sistema di riferimento si realizza una **descrizione lagrangiana** del fenomeno, cioè si descrive il fenomeno da un sistema di riferimento che si muove con la particella d'aria selezionata.

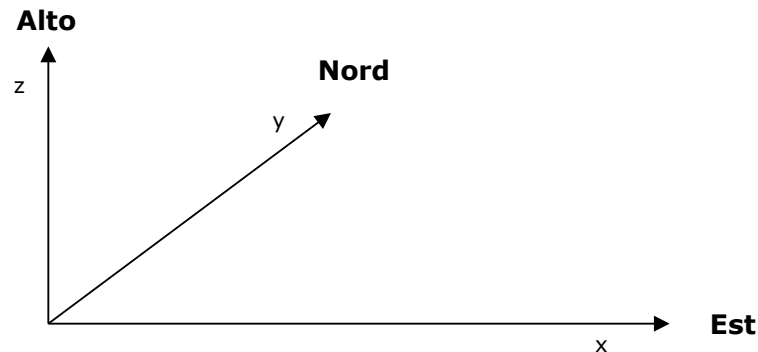
Sistema di riferimento Euleriano



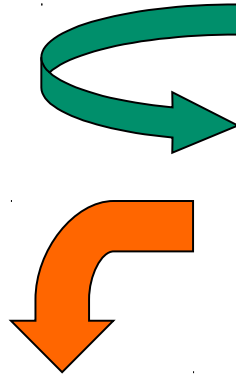
A differenza della Meteorologia a grande scala, nello studio del *PBL* si usa un Sistema di riferimento Cartesiano Ortogonale



- Asse x diretto in direzione **W-E** (positivo verso E)
- Asse y diretto in direzione **S-N** (positivo verso N)
- Asse z diretto **Basso-Alto** (positivo verso l'alto)



Descrizione Euleriana del PBL



Concetto di Volume di controllo.

porzione di fluido tanto piccola da avere un volume infinitesimo rispetto all'intero volume del *PBL*, ma abbastanza grande da avere le medesime caratteristiche fisico/chimiche dell'aria circostante.



**Lo studio ha luogo applicando al volume di controllo
le leggi di conservazione della Fluidodinamica**

Descrizione Lagrangiana del PBL

Posizione di una Particella $\Rightarrow P(x,y,z)$

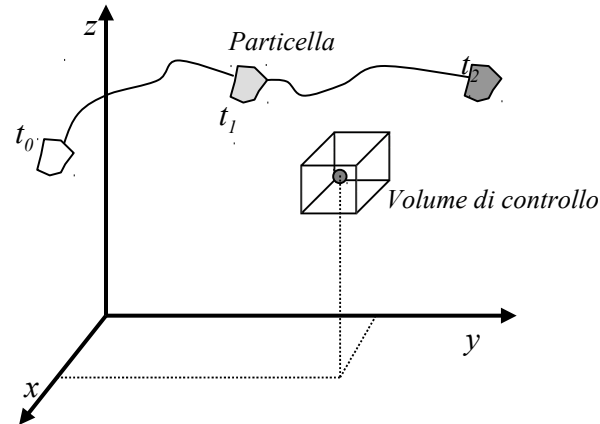
La particella si muove \Rightarrow Velocità della Particella

$\Rightarrow V_x$ componente rispetto all'asse x

$\Rightarrow V_y$ componente rispetto all'asse y

$\Rightarrow V_z$ componente verticale

Rispetto ad un generico sistema di riferimento posto al suolo e fisso nello spazio e nel tempo.



Sia dato un generico sistema di riferimento fisso al suolo.

In un punto $P(x,y,z)$ e al tempo t , la velocità della particella lagrangiana che si viene a trovare in P al tempo t è identica alla velocità che una descrizione euleriana attribuisce al fluido in quel punto e in quell'istante.

Vettore Vento

Consuetudine \Leftrightarrow descrizione vettore vento:

- Ignorando la componente verticale
- Descrivendo la proiezione orizzontale del vettore vento in una particolare forma polare

Velocità del vento

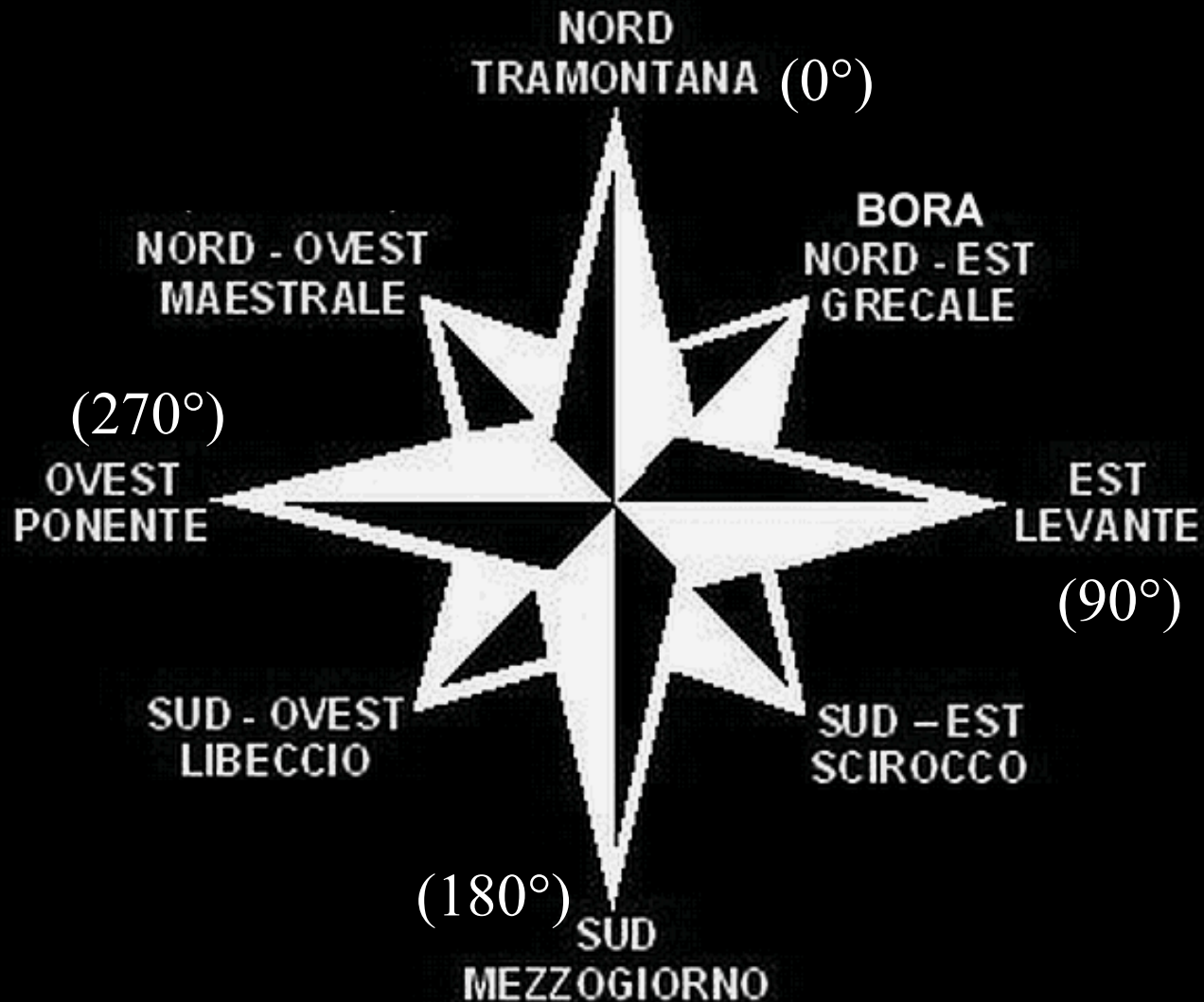
$$U = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} \cong \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)}$$

Direzione di Provenienza del Vento (0°: da N; 90°: da E; 180°: da S; 270°: da W)

$$D = 90^\circ - \frac{360^\circ}{2\pi} \arctan[v_y/v_x] + \alpha_0$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} 0^\circ & \text{se } v_x < 0 \\ 180^\circ & \text{negli altri casi} \end{cases}$$

LA ROSA DEI VENTI



- $v_x = 2\text{m/s}$

- $v_y = 3\text{m/s}$

- $v_z = 0.5\text{m/s}$

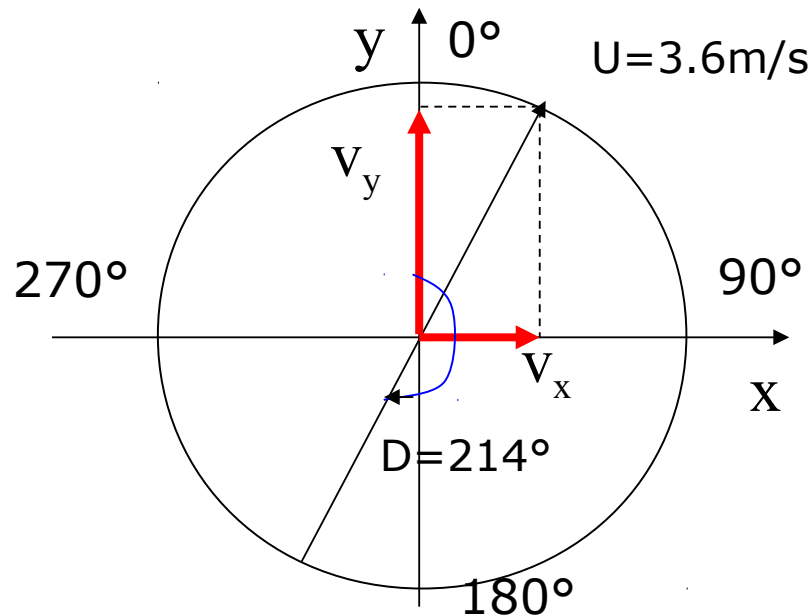


- modulo della velocità;

- direzione di provenienza del vento.

$$U = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} = \sqrt{(2^2 + 3^2 + 0.5^2)} = \sqrt{13.25} \cong 3.6\text{m/s}$$

$$D = 90^\circ - \frac{360^\circ}{2\pi} \arctan[v_y/v_x] + \alpha_0 = 90^\circ - \frac{360^\circ}{2\pi} \arctan[3/2] + 180^\circ \cong 214^\circ$$



Altre Variabili di Interesse

Temperatura T (in gradi Kelvin)

Pressione Barometrica P (in hPa o mb)

Temperatura e pressione variano da punto a punto e con la quota.

E' possibile impiegare una [relazione approssimata](#) per stimare la [pressione barometrica](#) ad una generica quota z nota la temperatura $T(K)$ a quella quota

$$p = p_0 \cdot \exp\left[-\left(0.0342/T\right) \cdot z\right]$$

Unità di misura

Pressione

- 1 mbar=1 hPa;
- 1013 mbar=1 atm;
- 1 atm=760 mmHg;
- 1 Torr=0.00132 atm;
- 1 mbar=100 N/m²;
- 1 atm=1.013*10⁵ N/m².

Temperatura

- $T(K)=t(^{\circ}C)+273.15$;
- $t(^{\circ}C)=(t(^{\circ}F)-32)/1.8$;
- $T(K)=(t(^{\circ}F)+459.67)/1.8$.

Aria Secca

Aria priva di acqua (acqua liquida, solida e vapor d'acqua)

E' un'astrazione che, però, ben rappresenta le situazioni polari

Aria secca \Rightarrow Gas perfetto

$$p = R_d \rho T$$

Densità dell'aria:

$$\rho = 0.34837 \frac{p}{T}$$

Calore Specifico a pressione costante:

$$C_p = 1005 + \frac{(T - 250)^2}{3364}$$

$$\rho C_p = 350.125 \frac{p}{T}$$

Composizione tipica dell'Aria Secca

<i>Componente</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Peso Molecolare</i>	<i>Concentrazione (% in volume)</i>
Azoto	N ₂	28.01	78.084
Ossigeno	O ₂	32.00	20.946
Argon	Ar	39.95	0.934
Biossido di Carbonio	CO ₂	44.01	0.030
Neon	Ne	20.18	2.821 10 ⁻³
Elio	He	4.00	0.524 10 ⁻³
Metano	CH ₄	16.04	0.150 10 ⁻³
Kripton	Kr	83.80	0.114 10 ⁻³
Idrogeno	H ₂	2.02	0.050 10 ⁻³
Xeno	Xe	132.30	0.009 10 ⁻³
Ozono	O ₃	48.00	0.007 10 ⁻³
Ammoniaca	NH ₃	16.04	0.001 10 ⁻³
Iodio	I ₂	253.81	0.001 10 ⁻³
Biossido di Azoto	NO ₂	46.01	0.0001 10 ⁻³
Biossido di Zolfo	SO ₂	64.06	0.00002 10 ⁻³
Monossido di Azoto	NO	30.00	0.00002 10 ⁻³
Acido Solfidrico	H ₂ S	34.08	0.00002 10 ⁻³
Monossido di Carbonio	CO	28.01	tracce

Nell'aria è sempre presente dell'**acqua** soprattutto allo stato gassoso (vapor d'acqua) \Rightarrow **Aria Umida**.

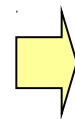
Contenuto di vapor d'acqua

- **Tensione di vapore e** (pressione parziale di vapor d'acqua, mb).
Massimo valore tensione di saturazione = pressione di saturazione e_s .
- **Umidità relativa RH (%)**: $100 e/e_s$
- **Umidità assoluta a** : massa di acqua in 1 m^3 di aria
- **Umidità specifica q** : grammi di acqua per grammo di aria umida
- **Rapporto di mescolanza r** : grammi acqua per grammo di aria secca

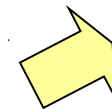
Aria umida = gas perfetto, rispetta l'equazione di stato

$$p = R_d \cdot \rho \cdot T_v$$

T_v è la **temperatura virtuale**



$$T_v = T(1 + 0.608q)$$



Alcune Considerazioni Termodinamiche

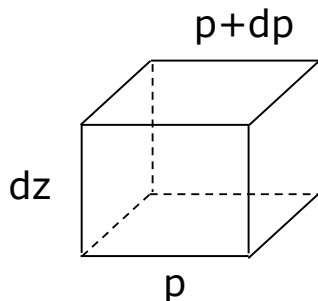
A) Equazione Idrostatica

Consideriamo un'atmosfera in cui:

1. la distribuzione termica e barica siano orizzontalmente omogenee ed isotrope
2. siano assenti moti verticali rilevanti

Stato di riferimento dell'atmosfera

Volume di Controllo



1. Omogeneità ed isotropia barica orizzontale → forza complessiva nulla sulla superficie laterale del volume di controllo
2. Bilancio delle forze verticali

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho$$

Alcune Considerazioni Termodinamiche

B) Temperatura Potenziale e stabilità statica

Conseguenza del Primo Principio della Termodinamica applicato ad una particella in movimento adiabatico in aria.

Se T è la temperatura di una particella in un punto del PBL a pressione p e se la si trasporta adiabaticamente alla pressione di riferimento p_0 (es. 1000 mb) la sua temperatura diventa θ .

$\theta \Rightarrow$ **Temperatura potenziale**

Relazione esatta tra θ e T :

$$\vartheta = T \left[\frac{1000}{p} \right]^{R/C_p}$$

Relazione approssimata tra θ e T :

$$\vartheta \cong T + 0.0098 \cdot z$$

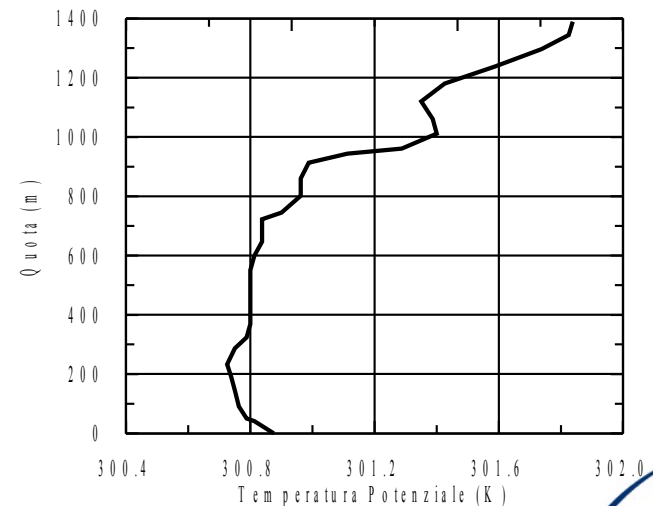
Relazione tra il gradiente verticale di T e di θ $\frac{d\vartheta}{dz} = \frac{dT}{dz} + 0.0098$

Ad un gradiente di temperatura normale di -0.0098 K/m corrisponde un gradiente di temperatura potenziale di 0 K/m

La temperatura potenziale può essere considerata come una **nuova definizione di temperatura**

Se la si applica al profilo verticale di temperatura (relativo a un'ora diurna e soleggiata) visto in precedenza, si ottiene sorprendentemente ciò che appare nella figura

Prima non si notava alcunché di particolare, **ora** si nota chiaramente una **porzione di atmosfera** in cui possono essere individuati **tre strati** che corrispondono a zone con diversi gradienti verticali di temperatura potenziale.



Nelle ore diurne con soleggiamento (cui si riferisce il profilo termico precedente), si nota:

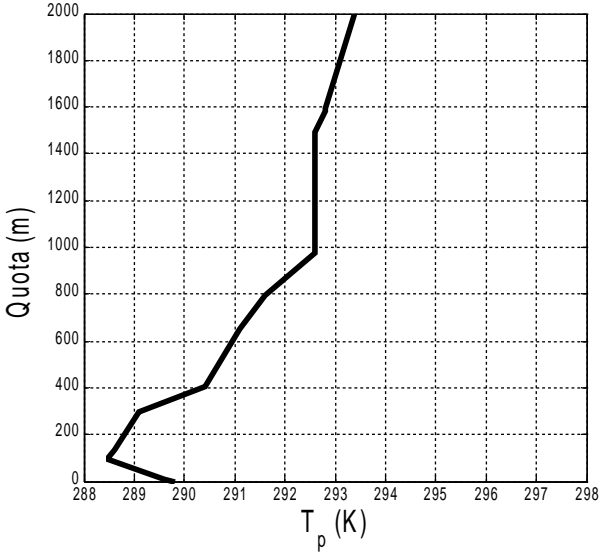
- una zona vicino al suolo ($d\theta/dz$ negativo) \Rightarrow **Strato Superficiale SL**
- una zona intermedia ($d\theta/dz$ circa nullo) \Rightarrow **Strato Rimescolato ML**
- un'altra zona ($d\theta/dz$ molto positivo) \Rightarrow **Strato di Entrainment EL**
- una zona superiore ($d\theta/dz$ positivo, ma inferiore alla precedente, che continua con gradiente circa uguale fino alla sommità della troposfera) \Rightarrow **Atmosfera Libera**

Dalle relazioni precedenti si ha che:

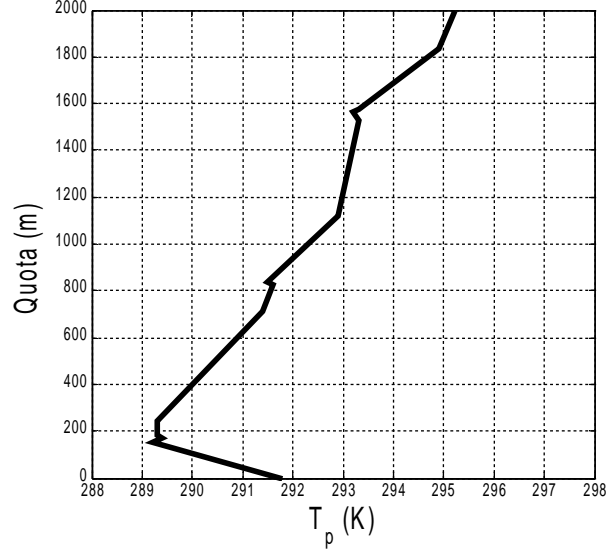
- se $dT/dz < -0.0098$ (K/m), $d\theta/dz < 0$
- se $dT/dz = -0.0098$ (K/m), $d\theta/dz = 0$
- se $dT/dz > -0.0098$ (K/m), $d\theta/dz > 0$

Radiosondaggi - 7 maggio 2006 ore diurne

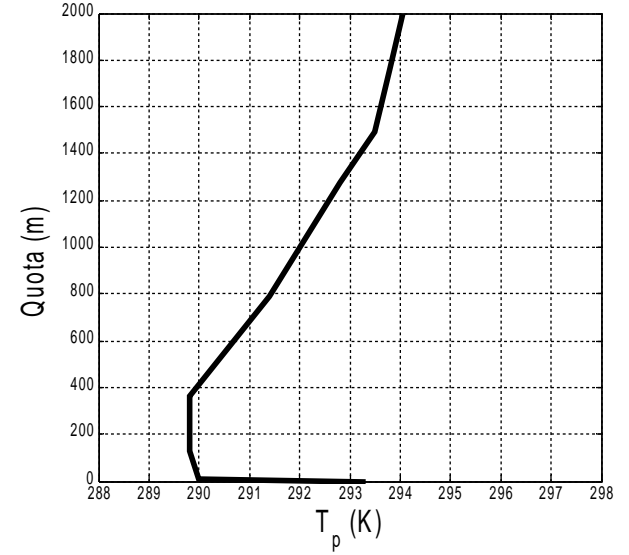
Brindisi



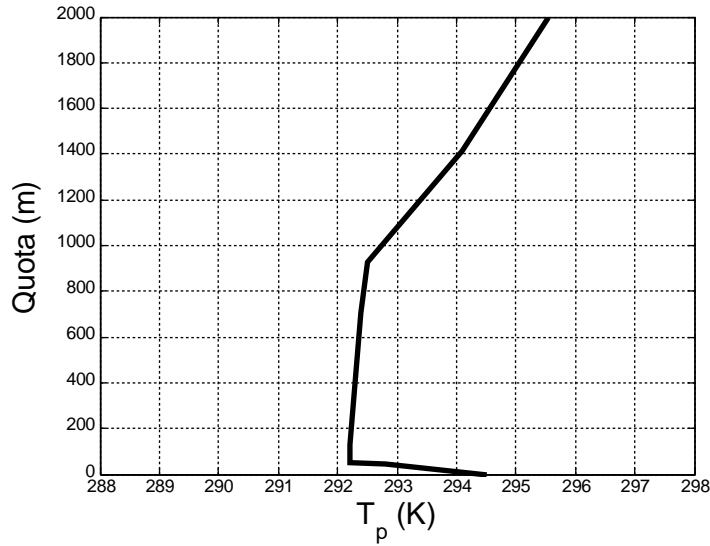
Trapani



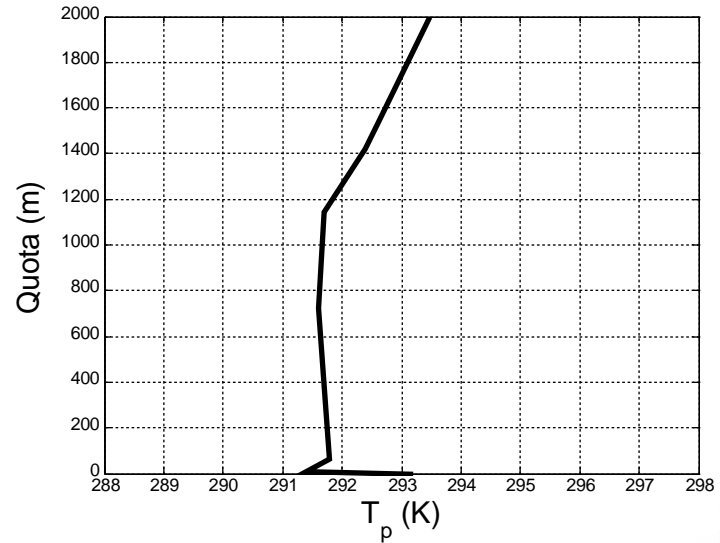
Pratica di mare



Linate

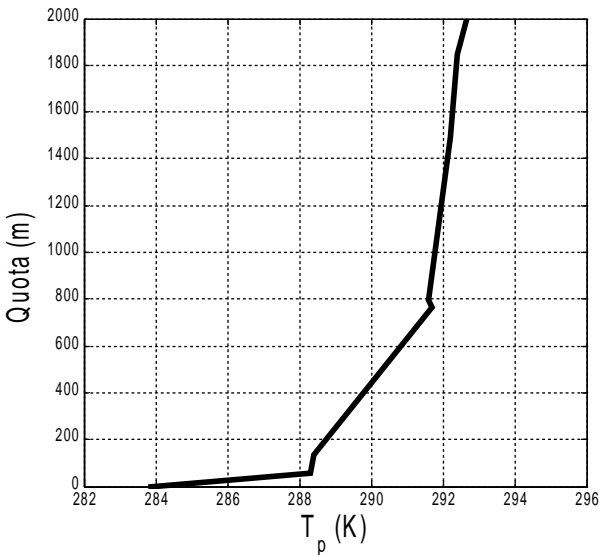


Udine

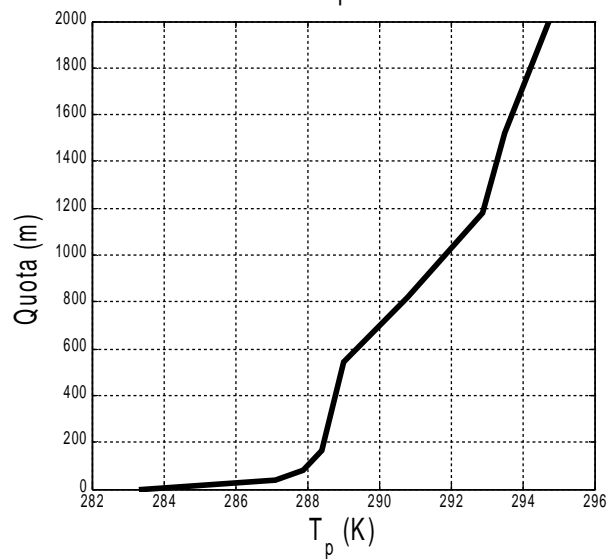


Radiosondaggi - 7 maggio 2006 ore notturne

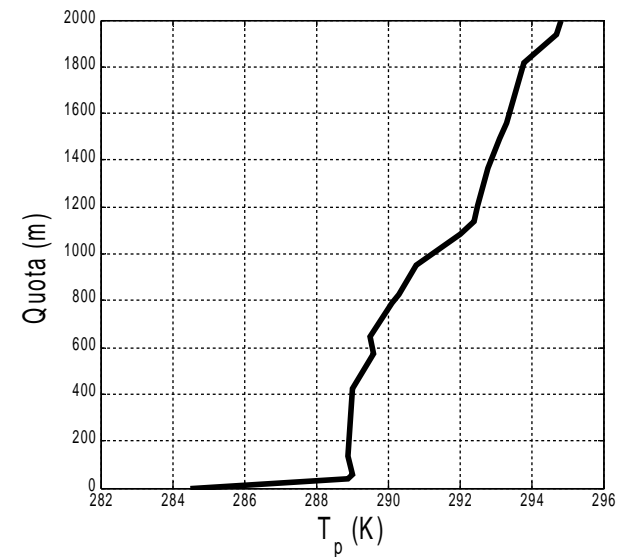
Brindisi



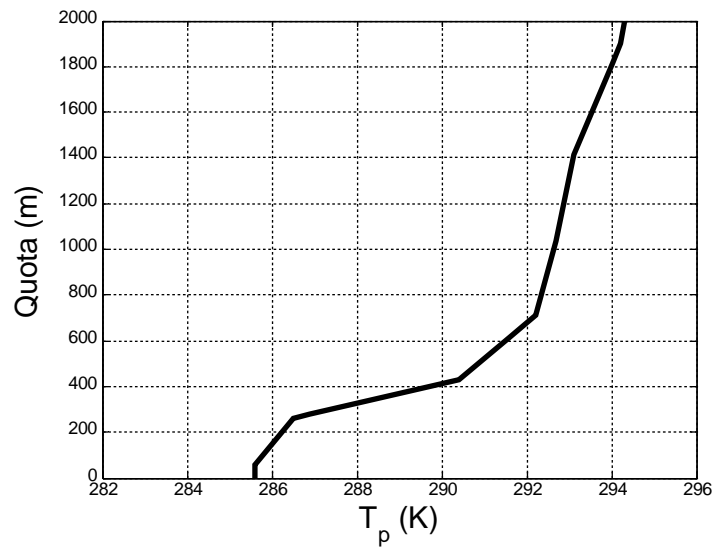
Trapani



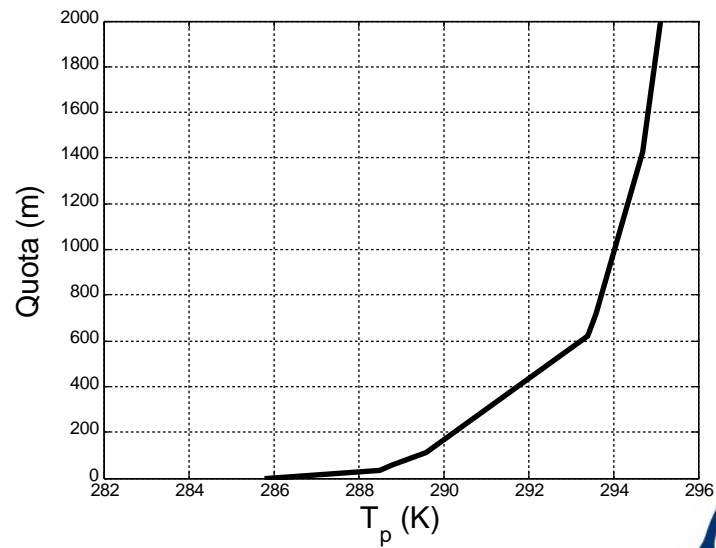
Pratica di mare



Linate



Udine





dove trovare i radiosondaggi ?

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Region	Type of plot	Year	Month	From	To
Europe	Text: List	2006	May	11/00Z	11/00Z



Come si comporta una particella in aria se si altera di poco la sua posizione verticale con una perturbazione verticale δz ?


$$\frac{d^2(\delta z)}{dt^2} + \frac{g}{\theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \delta z = 0$$


Il movimento verticale della particella dipende dal gradiente di temperatura potenziale

⇒ Se $d\theta/dz$ è **positivo**:
$$\delta z = \frac{w_0}{N} \cdot \text{sen}(N \cdot t) \quad N = \left[\frac{g}{\theta_0} \left(\frac{\partial \theta_0}{\partial z} \right) \right]^{1/2}$$

La particella oscilla attorno alla propria posizione originale con frequenza N (Frequenza di Brunt-Vaisala)

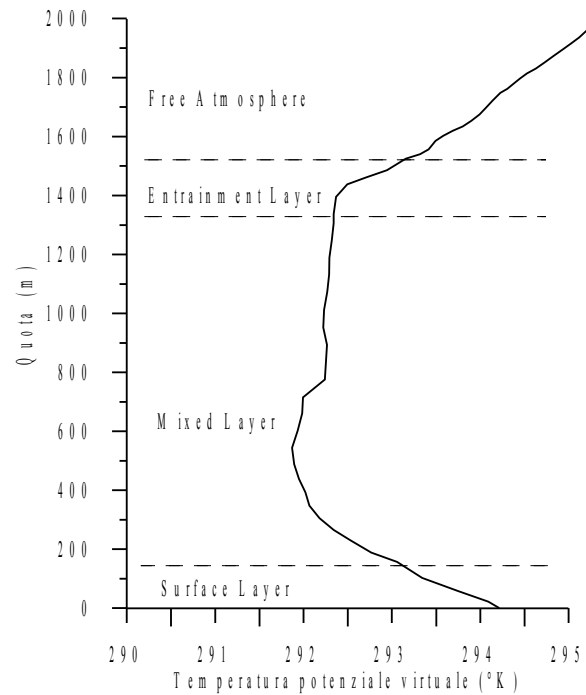
⇒ Se $d\theta/dz$ è **negativo**:
$$\delta z = \frac{w_0}{2} \left[\exp\left(\left| \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|^{1/2} t \right) - \exp\left(- \left| \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|^{1/2} t \right) \right]$$

La particella si allontana indefinitamente dalla propria posizione originale.

⇒ Se $d\theta/dz$ è **nullo**:

la particella non reagisce alla perturbazione

Profilo verticale di temperatura potenziale in una tipica situazione diurna e soleggiata



**Se si ha una struttura del PBL come quella della figura precedente
(gradiente temperatura potenziale positivo in SL, nullo in ML, positivo in EL)**



Se si **rilascia** al suolo una **particella** con una componente verticale positiva della velocità, essa:

- ⇒ abbandona il **SL** senza ritornare, accelerando,
- ⇒ attraversa indisturbata il **ML**,
- ⇒ si blocca nel **EL** e ridiscende garantendo la conservazione della massa.



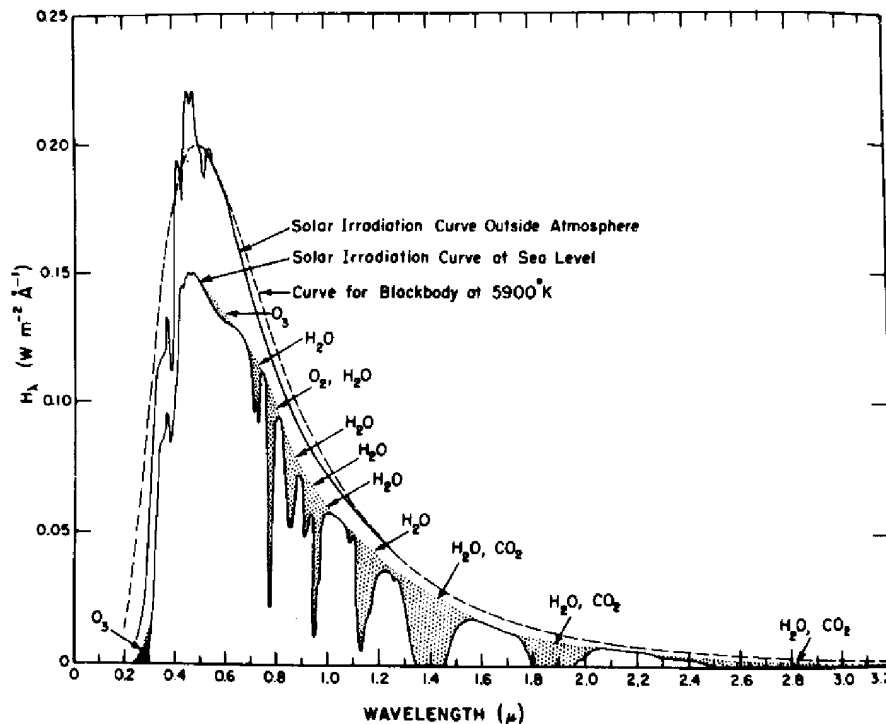
Il PBL è una vera e propria trappola per le particelle emesse al suo interno ed in particolare per quelle emesse al suolo.

Chi è il motore dell'Atmosfera e del PBL, cioè la causa prima dei moti delle masse d'aria ed, in ultima analisi, della vita sulla Terra?

Il Sole.

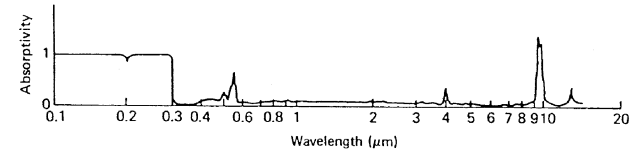
Bilancio Energetico del PBL

Il PBL è una macchina termica gigante che trasforma l'energia solare in movimento dell'aria. Il sole è, quindi, la principale fonte di energia del PBL.

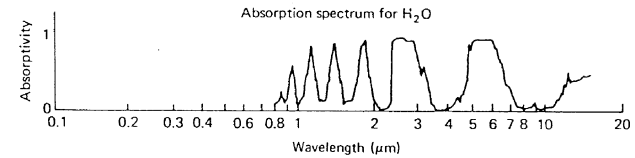


Il sole emette radiazione elettromagnetica nell'intervallo $0.1 \div 1 \mu\text{m}$ (**visibile**) come un *corpo nero* a Temperatura di 6000K. (**radiazione ad onda corta**).

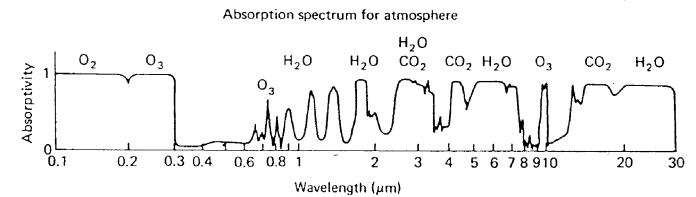
Solo un ristretto numero di gas presenti in aria può assorbire direttamente una porzione di questa energia ($\approx 7\%$).



(a)



(b)



(c)

Una parte di radiazione solare è assorbita e riflessa dalle nubi ($\approx 27\%$)

Un'altra parte è riflessa dalle particelle sospese ($\approx 17\%$)

Un'altra parte è riflessa direttamente dal suolo (albedo $\approx 6\%$)

Circa il 43% della radiazione solare arriva direttamente al suolo!

Radiazione Solare incidente

⇒ **Radiazione Globale R_g**

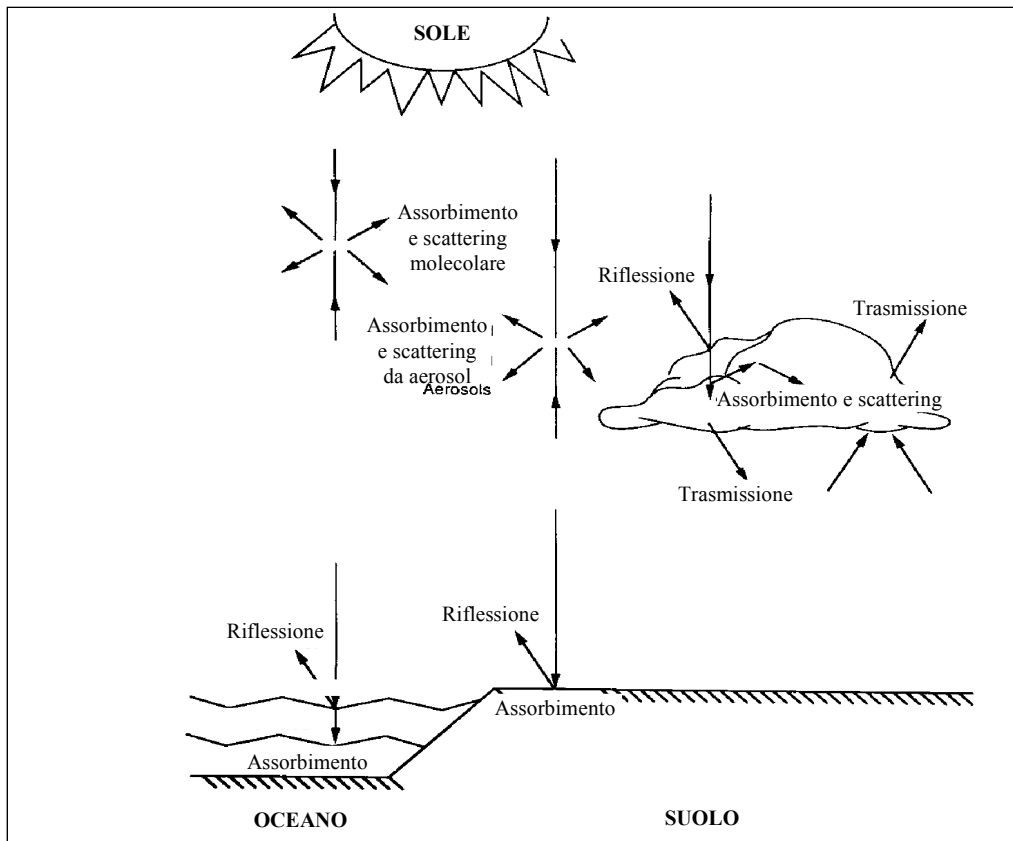
Radiazione riflessa dal suolo

⇒ **Albedo = $-\alpha R_g$**

(α = coefficiente di albedo)

Energia solare trasferita al suolo:

$E = (1-\alpha) R_g$



Ci sono **due reazioni** del sistema fisico al trasferimento di radiazione solare:

⇒ L'**atmosfera** (corpo caldo) ⇒ emette radiazione all'infrarosso
I ↓ verso la superficie terrestre

⇒ Il **suolo** (corpo caldo) ⇒ emette radiazione infrarossa **I** ↑
verso l'atmosfera

Questi due contributi energetici sono ad *onda lunga*.

Legge di Stefan-Boltzmann

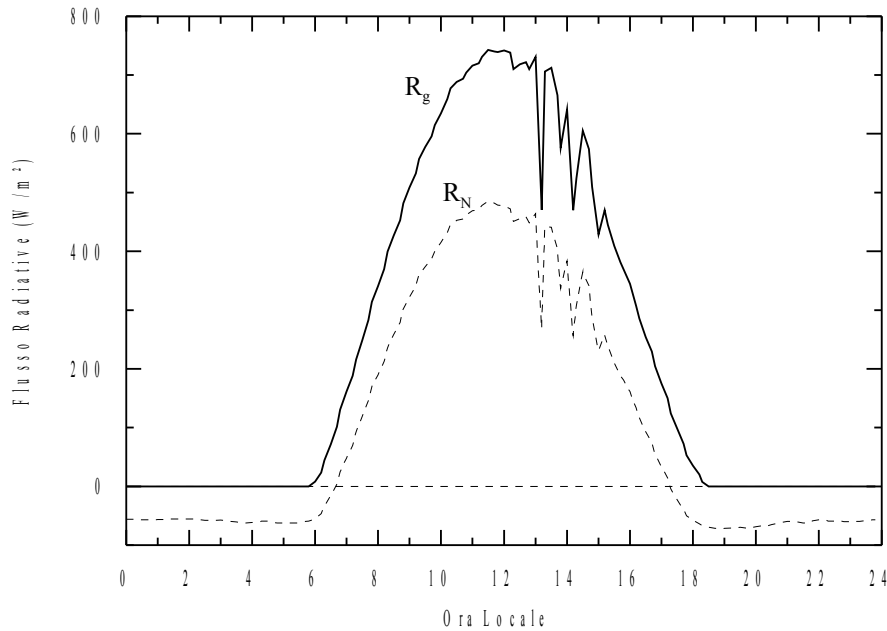
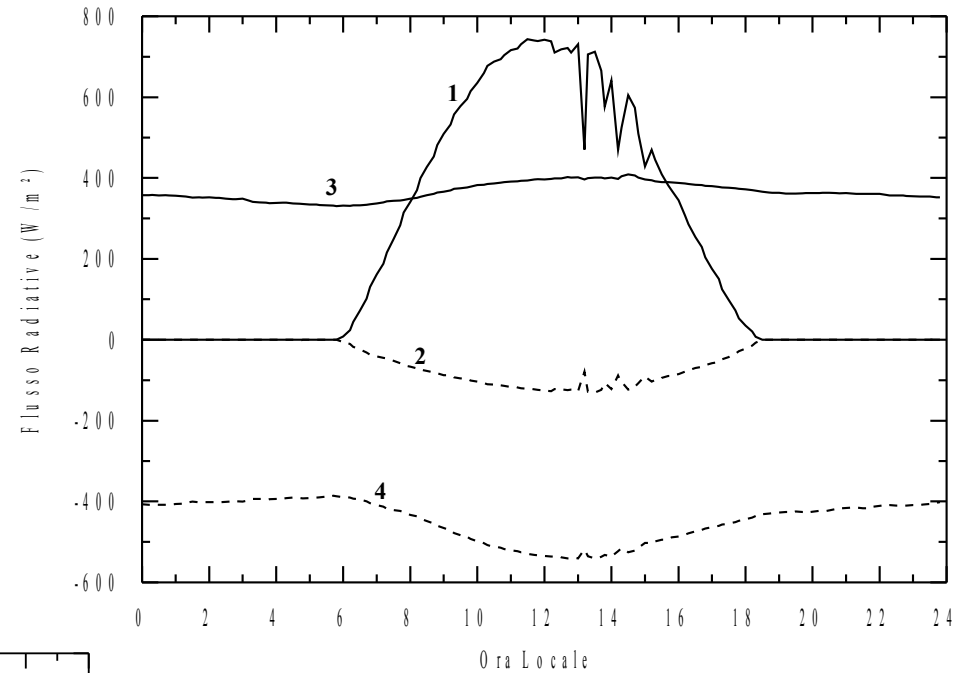
$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$$

La quantità di **energia disponibile al suolo**
(**Radiazione Netta**) è pari a:

$$R_N = (1-\alpha) R_g + I \downarrow - I \uparrow$$

- 1 Radiazione solare globale
- 2 Albedo
- 3 Infrarosso dal cielo
- 4 infrarosso terrestre



Nelle ore diurne (dopo l'alba e prima del tramonto) l'energia disponibile all'interfaccia aria-suolo è positiva, mentre nelle ore notturne è negativa.

A fronte di questa **disponibilità energetica** si ha che:

⇒ Una parte di energia disponibile viene trasmessa per conduzione al suolo

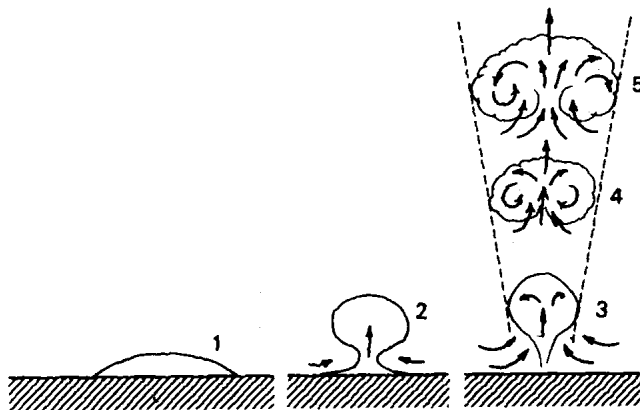
(*Flusso di Calore nel suolo G*)

⇒ una parte viene usata per evaporare l'acqua presente nel suolo e nella vegetazione

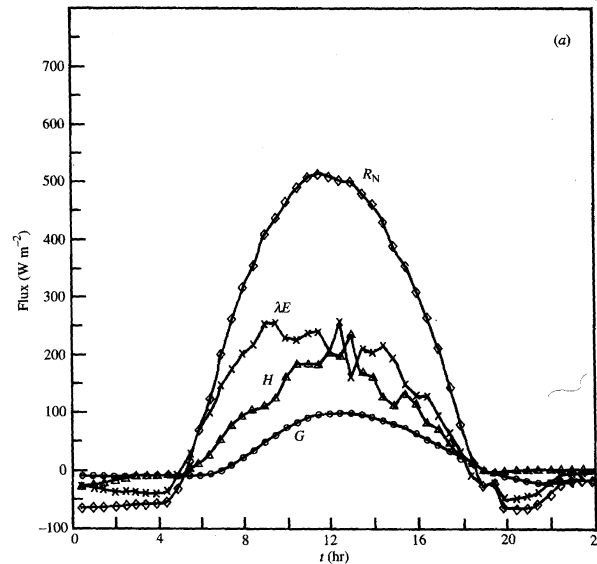
(*Flusso Turbolento di Calore Latente H_E*)

⇒ il resto viene emessa dal suolo e trasmessa ai primi millimetri d'aria e si trasforma in *movimenti irregolari* delle masse d'aria del PBL

(*Flusso Turbolento di Calore sensibile H_0*)



Meccanismo *a bolle* di Oke per il trasferimento di H_0 all'aria del PBL



- ⇒ R_N è positiva nelle ore diurne fino a che $R_g \geq 20 \text{ W/m}^2$
- ⇒ R_N è sempre negativa di notte nelle aree rurali
- ⇒ G è una frazione di R_N
- ⇒ La ripartizione tra H_E e H_0 dipende dal tipo di suolo e dalla umidità presente sullo stesso.

L'aria che passa sopra la *superficie terrestre* **scambia energia** ed altera le proprie caratteristiche fisiche:

⇒ riceve dal suolo H_0 e H_E e queste sono le **sorgenti** di **energia convettiva**.

⇒ a causa della rugosità del suolo, perde energia per *attrito* (**perdita di energia meccanica**). Si genera quindi, come per tutti i fluidi turbolenti in moto su una superficie rugosa, una **turbolenza meccanica**.

⇒ nelle **ore diurne** quando $R_N > 0$ l'energia persa per attrito è quasi sempre minore di quella acquisita per convezione (**Situazioni convettive**)

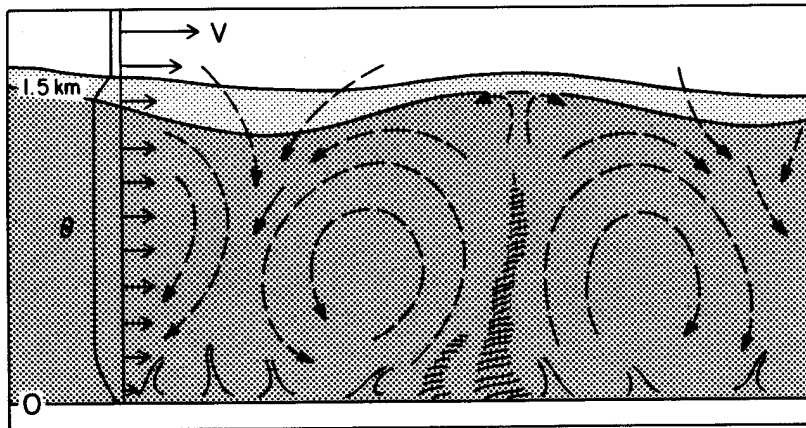
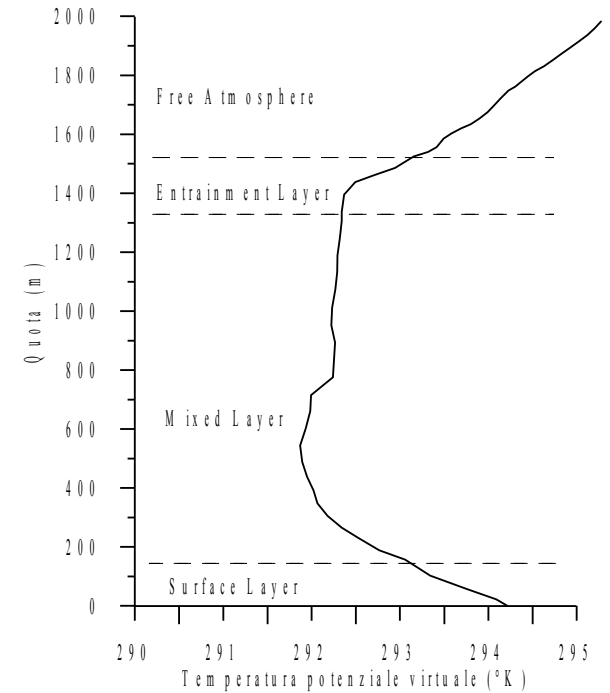
⇒ nelle **ore notturne** ($R_n < 0$), c'è solo una perdita globale di energia (**Situazioni Stabili**).

⇒ ***lo stato del PBL è differente di giorno e di notte***

⇒ ***anche il modo con cui si disperdono gli inquinanti è diverso nei due casi.***

Situazioni Convettive

Profilo di temperatura potenziale



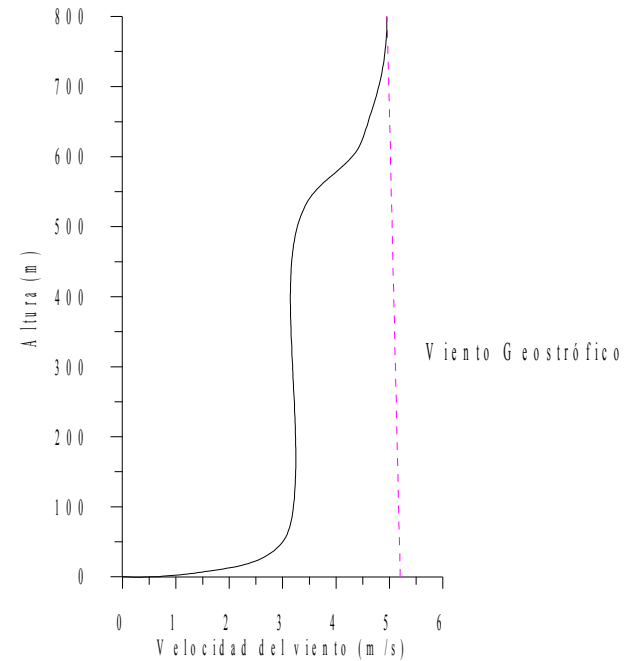
Struttura dei vortici turbolenti

Profilo della velocità del vento

Vento Geostrofico

$$u_g = -\frac{1}{\rho f_c} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$v_g = \frac{1}{\rho f_c} \frac{\partial p}{\partial x}$$

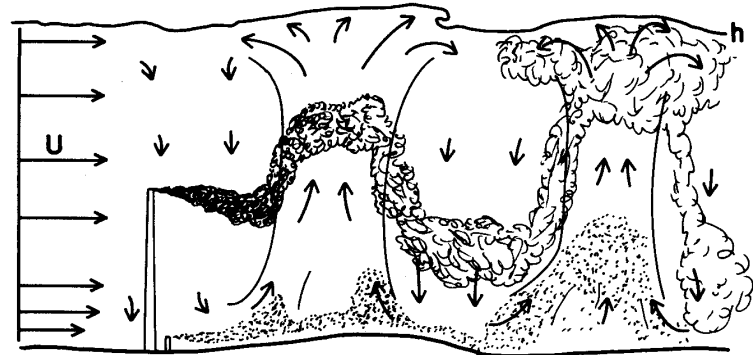


Si vengono ad instaurare:

⇒ un **flusso ascendente** (*up-draft*)

⇒ un **flusso discendente** (*down-draft*)

Gli inquinanti emessi vengono catturati dai flussi ascendenti e discendenti e presentano **pennacchi caratteristici**.



Estensione verticale del PBL ⇒ **Altezza di Rimescolamento**
(secondo la nomenclatura usata
nei modelli di dispersione degli
inquinanti)

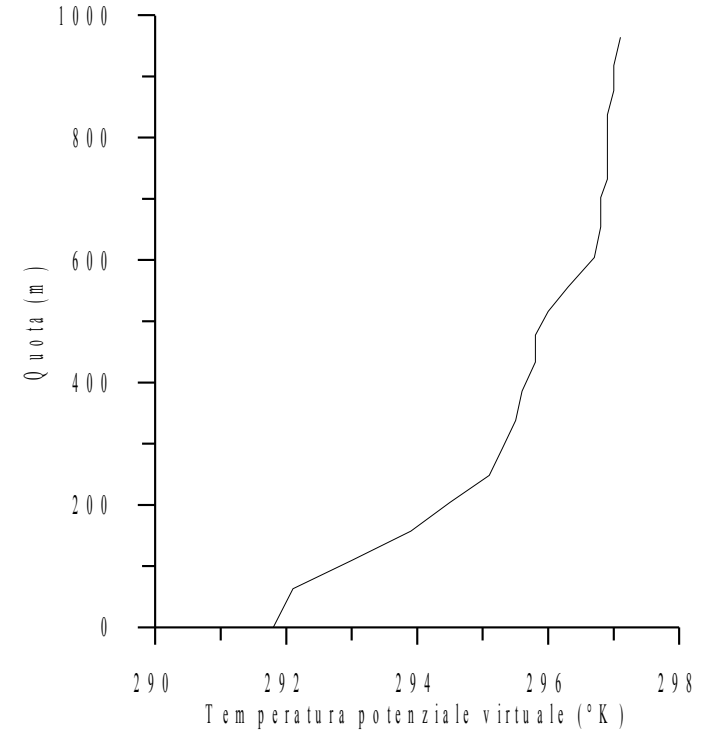
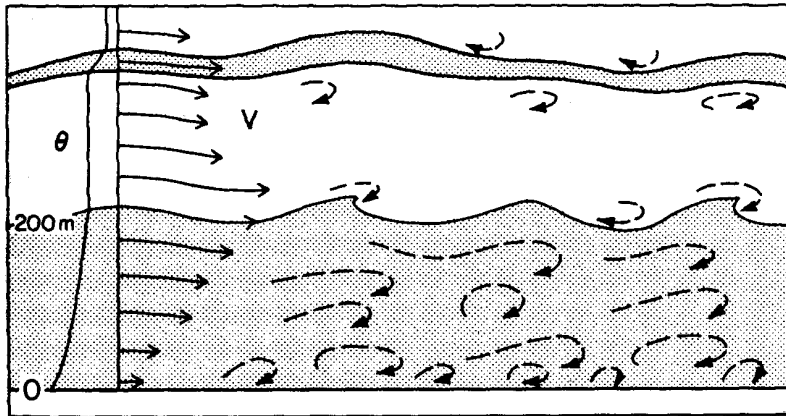


Presenta un'evoluzione diurna caratteristica:

- ⇒ è **minima** nelle prime ore della mattina (dovuta soltanto alla turbolenza meccanica)
- ⇒ **aumenta** con l'arrivo di energia solare fino al tramonto ed in particolare in modo proporzionale all'integrale nel tempo del Flusso Turbolento di calore sensibile.
- ⇒ **decade** molto rapidamente al tramonto con il venir meno dell'apporto energetico solare.

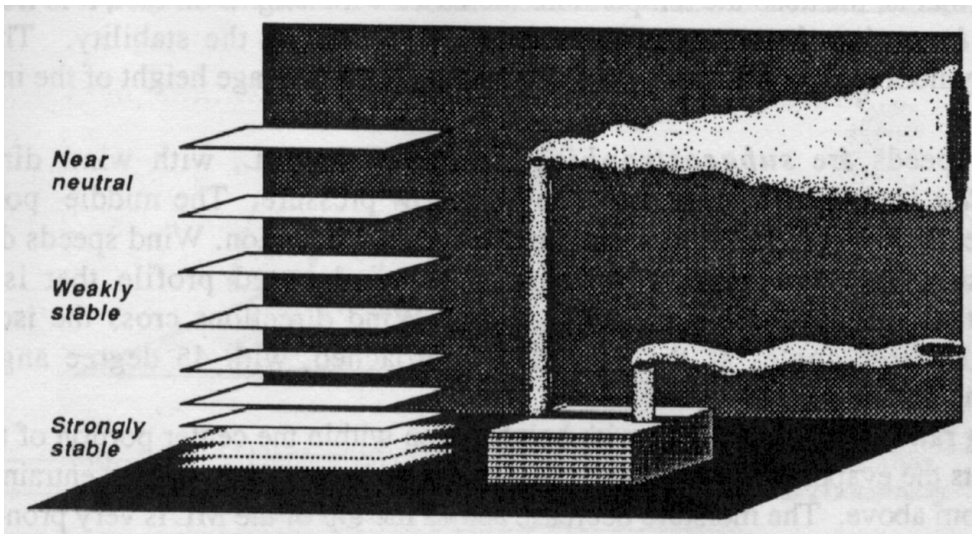
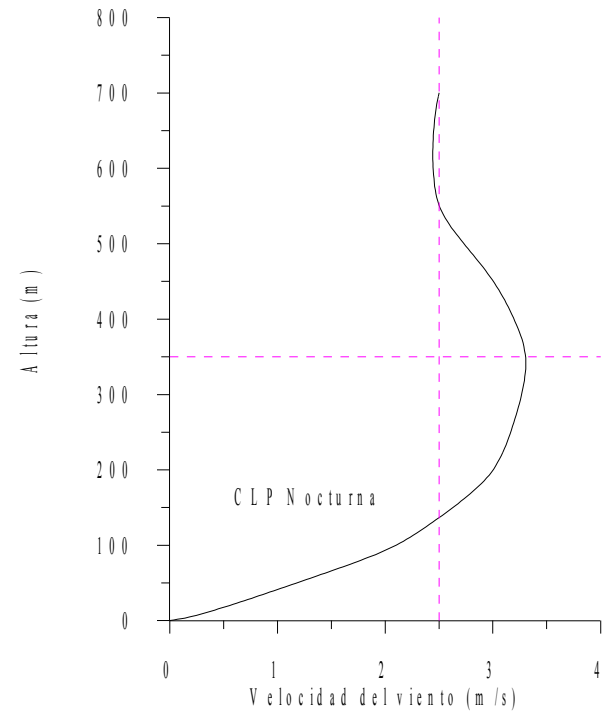
Situazioni Stabili

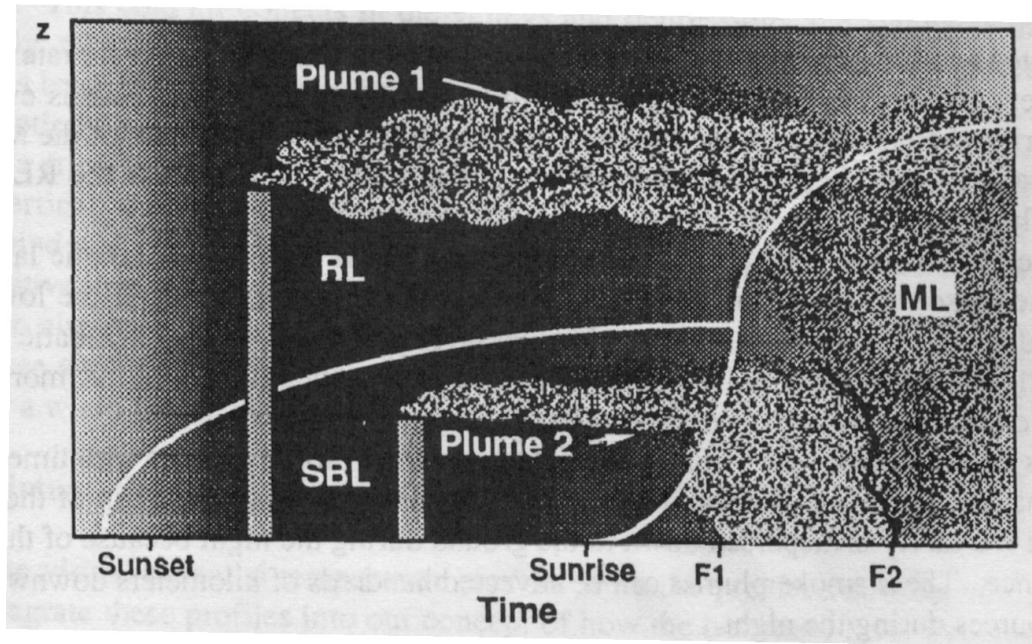
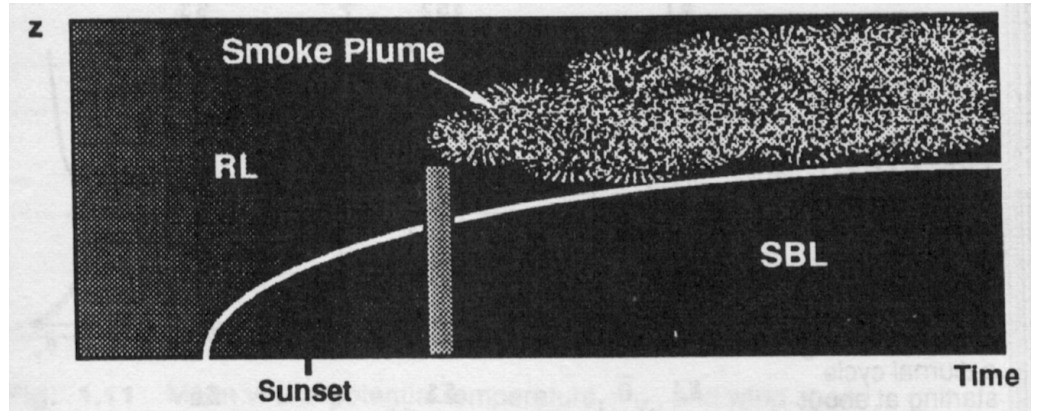
Profilo di temperatura potenziale



Struttura dei vortici turbolenti

Perfil vertical del viento

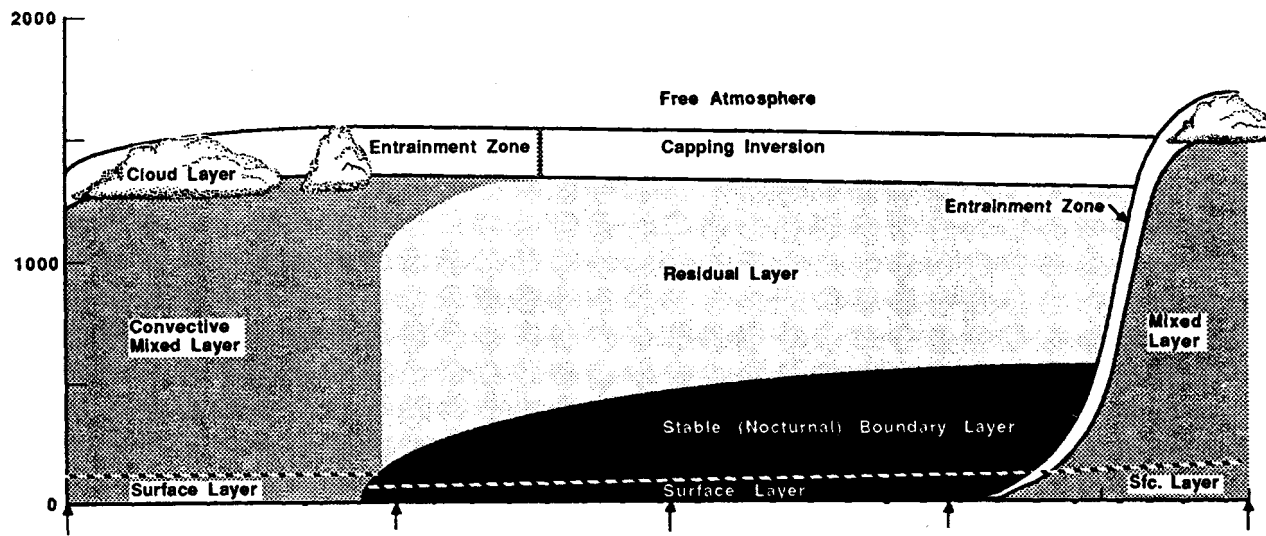






25/08/2011 18:26

Evoluzione Giornaliera dell'altezza di Rimescolamento



Bibliografia Essenziale

R. Sozzi, T. Georgiadis, M. Valentini (2002): Introduzione alla turbolenza atmosferica (ed. Pitagora)

R. Sozzi (2003): La Micrometeorologia e la Dispersione degli Inquinanti in Aria (APAT- CTN-ACE)

Approfondimenti:

R. Sozzi – Capitolo 1: Fondamenti Fisici e Fenomenologici

R.B. Stull (1988): An Introduction to Boundary Layer Meteorology (ed. Kluwer)