



*Engagez votre cerveau
Faites des liens*



Joyeuse St. Valentin

Source : <http://www.physics-astronomy.com/2016/01/seeing-one-day-pass-on-earth-from-space.html>

Voici à quoi ressemble un jour sur Terre depuis l'espace. Cette vidéo contracte 24 heures d'images du satellite japonais Himawari-8 en 12 secondes et nous montre comment notre magnifique planète bleue se détache de l'obscurité du vide sidéral. Le 30 janvier 2016.

Ces rouleaux de neige se sont formés à l'extérieur de la Cour suprême, au centre-ville d'Ottawa, sous le regard de Sheila Nemcsok. (Soumis / Sheila Nemcsok)



Le 6 février 2018

<http://nationalpost.com/news/canada/what-are-snow-rollers-everything-you-need-to-know-about-natures-snowballs-spotted-in-ottawa>

L'eau condensée à la surface et dans l'atmosphère

- La rosée et la gelée (frimas)
- Les brouillards : nuages qui touchent la surface
- Les nuages

Table de matières

- La rosée et le frimas (refroidissement isobarique et diabatique)
- Les nuages
 - Qu'est-ce qu'un nuage? Et un brouillard?
 - Types de brouillards
 - Brouillard de pente (refroidissement adiabatique ou diabatique, non-isobarique)
 - Brouillard radiatif (refroidissement isobarique et diabatique)
 - Conditions propices à sa formation
 - Brouillard d'advection (refroidissement isobarique et diabatique)
 - Air chaud sur surface froide
 - Brouillard d'évaporation (refroidissement adiabatique ou diabatique et isobarique)
 - Air froid sur surface chaude et humide (la fumée de mer)
 - Brouillard de précipitation (refroidissement adiabatique et quasi-isobarique)
 - Pluie chaude s'évaporant dans une mince couche d'air froid

Tant de noms ...

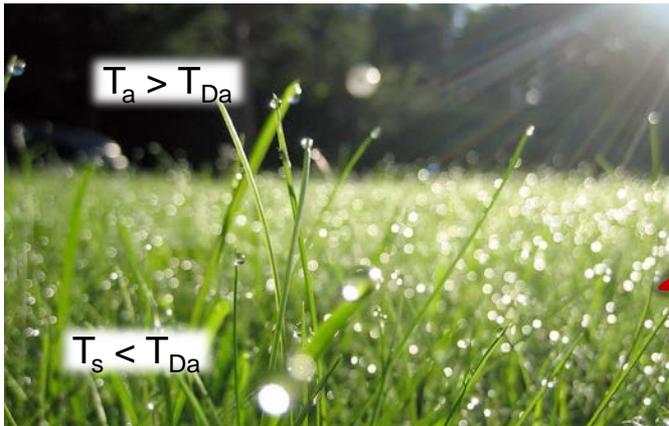
Rosée, brouillard, nuage :
Quelle est la différence?



Conditions de formation de la rosée et du brouillard

Important

Pourquoi parfois on a de la rosée et parfois du brouillard?



La rosée se forme quand la température de la surface atteint le point de rosée de l'air, tandis que la température de celui-ci est supérieure à la température de son point de rosée.

Le brouillard (ou la brume) se forme quand la température de l'air atteint sa température du point de rosée (où à des températures légèrement supérieures au point de rosée dans le cas de la présence d'aérosols hydrophiles qui permettent la condensation à des humidités relatives inférieures à 100%).



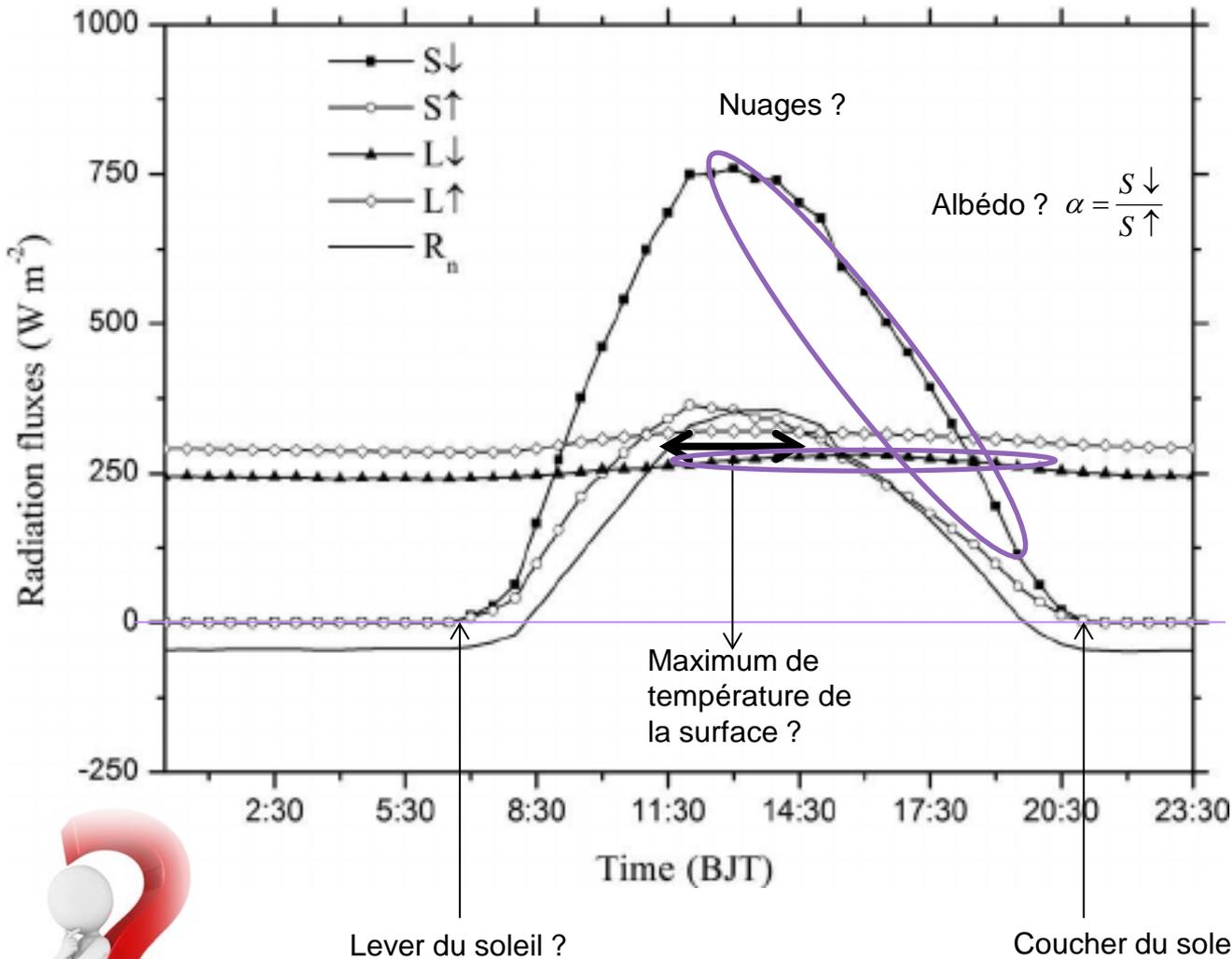
La formation de la rosée et du frimas (gelée blanche)

- On observe de la rosée sur des objets proches de la surface terrestre quand la surface se refroidit au dessous de la température du point de rosée de l'air proche de la surface.



● Phénomène plus probable à la fin des nuits de ciel clair et de vents calmes à cause du refroidissement radiatif.
Pourquoi?

Cycle diurne des flux radiatifs à la surface



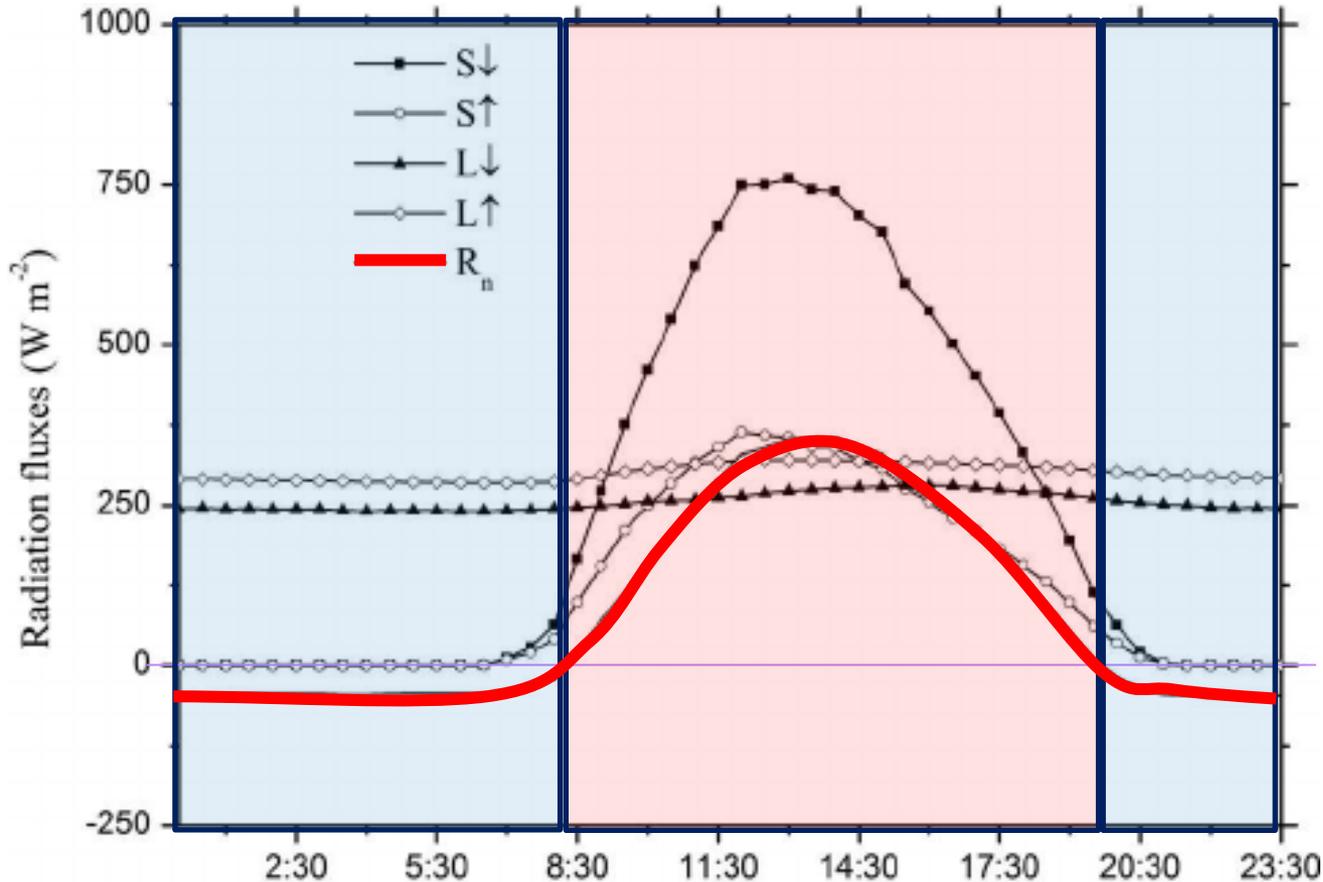
Cycle diurne des flux radiatifs (irradiance) :

- S_{\downarrow} = rayonnement solaire incident ;
- S_{\uparrow} = rayonnement solaire réfléchi ;
- L_{\downarrow} = rayonnement atmosphérique ;
- L_{\uparrow} = rayonnement émis par la surface et
- R_n le rayonnement net reçu à la surface.



*Engagez votre cerveau
Faites des liens*

Cycle diurne des flux radiatifs à la surface



Cycle diurne des flux radiatifs (irradiance) :

- S_{\downarrow} = rayonnement solaire incident ;
- S_{\uparrow} = rayonnement solaire réfléchi ;
- L_{\downarrow} = rayonnement atmosphérique ;
- L_{\uparrow} = rayonnement émis par la surface et
- R_n le rayonnement net reçu à la surface.

Perte d'énergie :
refroidissement
radiatif

Gain d'énergie :
réchauffement
radiatif

Perte d'énergie :
refroidissement
radiatif



*Engagez votre cerveau
Faites des liens*

La formation de la rosée et du frimas (gelée blanche)

- On observe de la rosée sur des objets proches de la surface terrestre quand la surface se refroidit au dessous de la température du point de rosée de l'air proche de la surface.



- Phénomène plus probable à la fin des nuits de ciel clair et de vents calmes à cause du refroidissement radiatif. Pourquoi?

- Le frimas ou gelée blanche se forme quand la température de la surface et le point de rosée de l'air sont inférieurs à 0°C et le refroidissement de la surface dépasse la température du point de rosée de l'air proche de la surface.



Gelée blanche ou frimas



La gelée blanche est un dépôt de glace qui provient de la condensation solide (passage direct de la phase gazeuse à la phase solide) de la vapeur d'eau contenue dans l'air quand la température de la surface et la température du point de rosée de l'air sont inférieure à 0°C.

Le givre ou rosée gelée



Les gouttelettes de la rosée gèlent quand la température de la surface descend au dessous de 0°C. Le résultat est la rosée gelée (différent de la rosée blanche ou frimas)

Rosée / Rosée blanche ou frimas

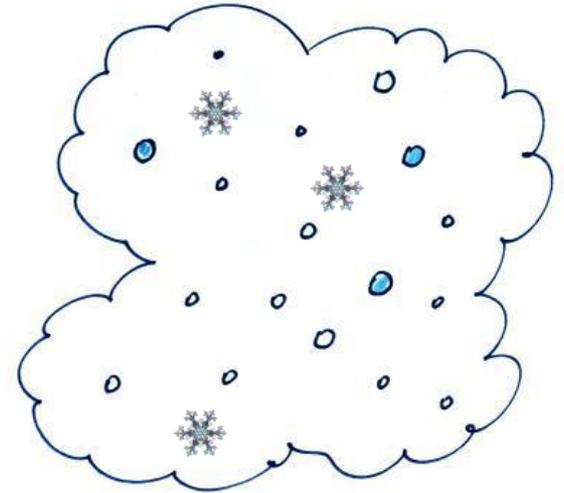
- La rosée peut être une source importante d'eau pour le sol dans des périodes où la précipitation manque...
- La rosée et le frimas se forment sur des surfaces mais il est très rare de voir de la rosée (ou de la rosée blanche) sous des arbustes ou des arbres. Pourquoi?
- Expliquez le raisonnement qui amène à l'expression « **La lune brillante humidifie la terre** »
- En voyage, si vous passez d'une masse d'air très froide ($T \approx 0^{\circ}\text{C}$) à une masse d'air plus chaude ($T > 0^{\circ}\text{C}$) on observe la formation de frimas sur le pare-brise de votre auto. Expliquez le phénomène.



*Engagez votre cerveau
Faites des liens*

Qu'est-ce qu'un nuage?

- Un nuage est un amas des gouttelettes d'eau et/ou des cristaux de glace en très grande concentration (environ de 100 à 500 par cm^3) en suspension dans l'air.
- Les gouttelettes et les cristaux ont une taille typique de $10 \mu\text{m}$ 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.

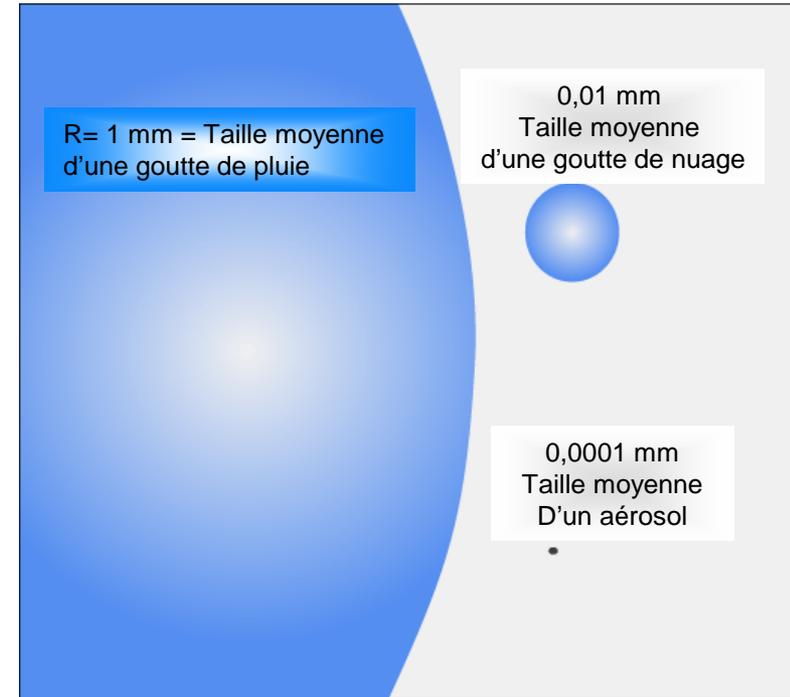


Formation du nuage : condensation

- Le processus de formation du nuage, c'est-à-dire, la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère n'est pas simple.
 - Pour qu'il se forme des gouttelettes de nuage il est essentielle l'existence de surfaces sur lesquelles les molécules se condensent, **les noyaux de condensation**.

Ces noyaux de condensation :

- Sont des poussières en suspension
 - Volcaniques
 - La fumée anthropique
 - Les feux de forêt
 - Des cristaux de sels marins
 - Des particules sulfatées provenant du phytoplancton
- Ils sont plus abondants dans la basse troposphère et dans les régions urbaines.
- Leur taille est très inférieure à celle des gouttes de pluie ou de nuage.



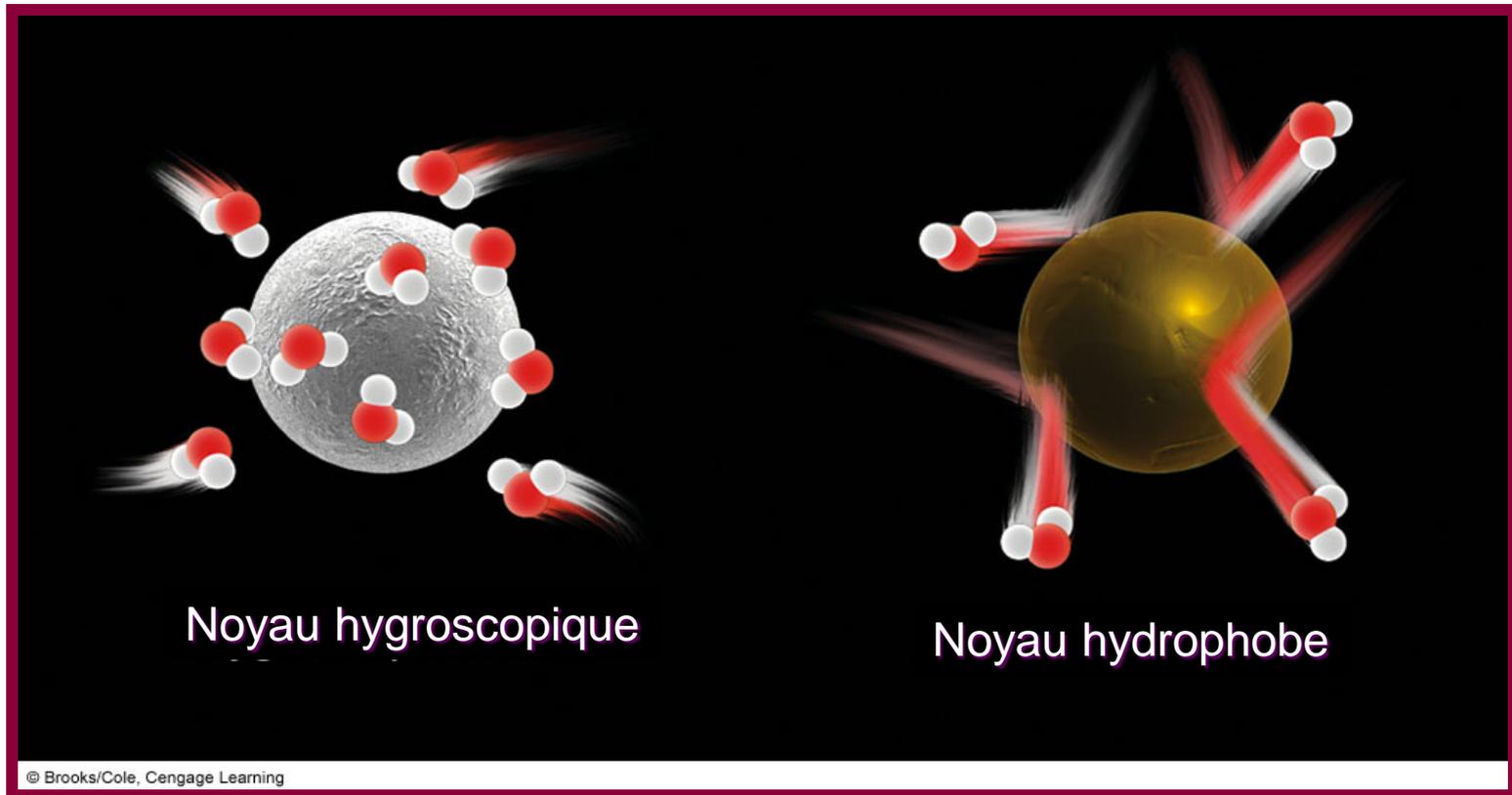
Taille et concentration des noyaux de condensation

- Quantité de masse de noyaux de condensation injectée chaque année dans l'atmosphère : **2×10^9 tonnes**
- Deux types de noyaux :
 - **Hygroscopiques** : des affinités chimiques facilitent la condensation de l'eau sur leurs surfaces.
Exemple : le sel de mer...
 - **Hydrophobes** : aucune affinité chimique. Ils repoussent l'eau.
Exemple : la cire.

Type d'aérosol	Rayon approximatif (μm)	nb de particules par cm^3	
		intervalle	typique
Petits (Aitken)	< 0.2	1000-10000	(1000)
Grands	0.2 - 1.0	1-1000	(100)
Géants	> 1.0	<1 to 10	(1)
Brouillard et gouttes de nuage	> 10.0	10-1000	(300)

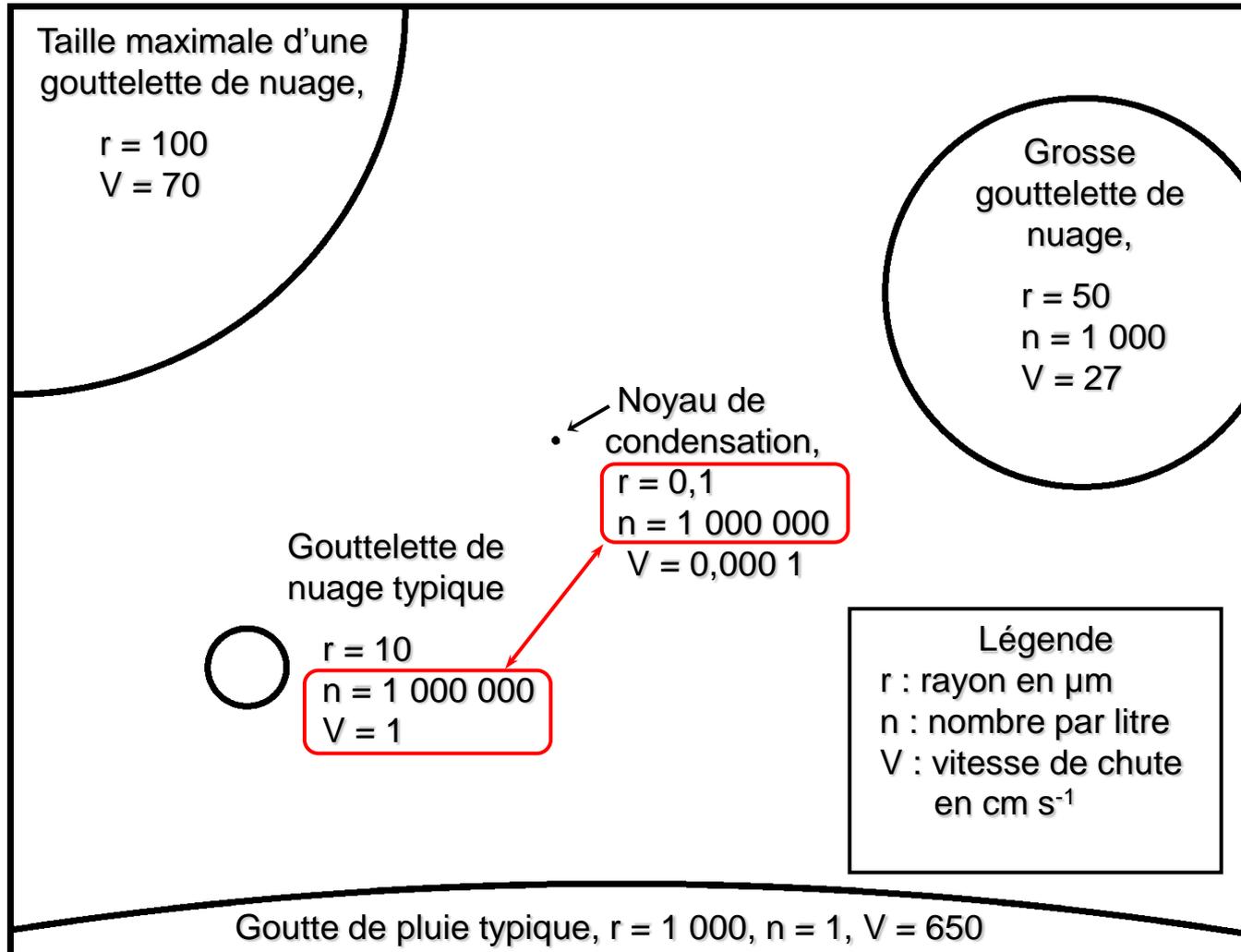
Noyaux de condensation

- Particules en suspension dans l'air sur lesquelles l'eau se condense (gouttelettes d'eau liquide) ou se dépose (condensation solide = cristaux de glace).
 - Hydrophobes / hydrophiles (hygroscopiques)
 - Glaçogènes



La taille des gouttelettes des nuages

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

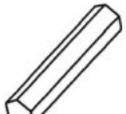


* Pour convertir la vitesse de chute de cm/s à km/h , multiplier par 0,036

Les cristaux de glace



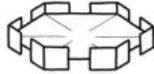
Simple Prisms



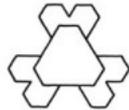
Solid Columns



Sheaths



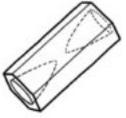
Scrolls on Plates



Triangular Forms



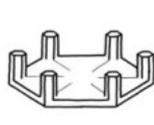
Hexagonal Plates



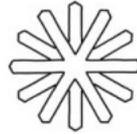
Hollow Columns



Cups



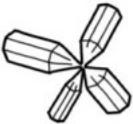
Columns on Plates



12-branched Stars



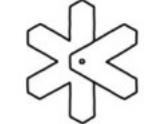
Stellar Plates



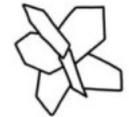
Bullet Rosettes



Capped Columns



Split Plates & Stars



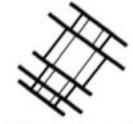
Radiating Plates



Sectored Plates



Isolated Bullets



Multiply Capped Columns



Skeletal Forms



Radiating Dendrites



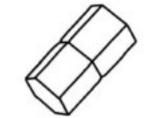
Simple Stars



Simple Needles



Capped Bullets



Twin Columns



Irregulars



Stellar Dendrites



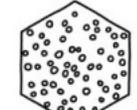
Needle Clusters



Double Plates



Arrowhead Twins



Rimed



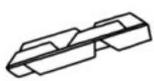
Fernlike Stellar Dendrites



Crossed Needles



Hollow Plates



Crossed Plates

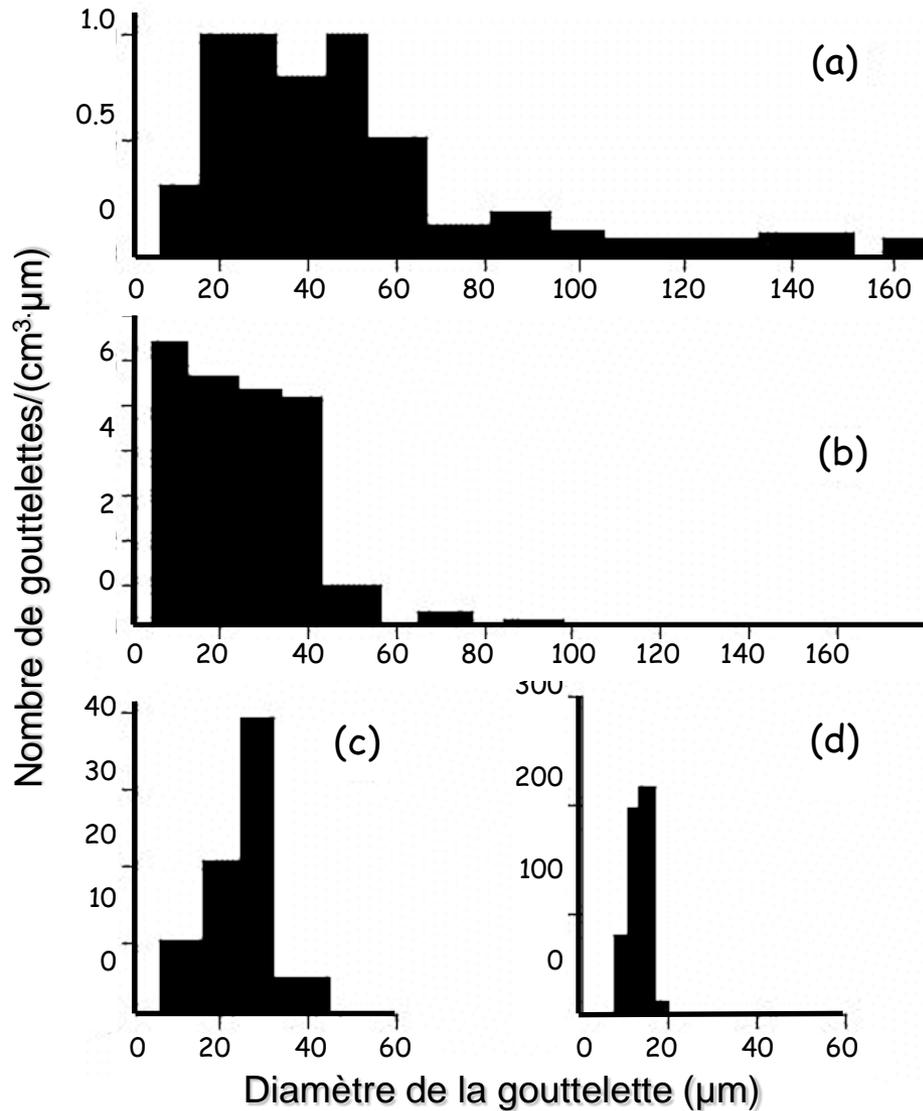


Graupel



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

Taille et nombre de gouttelettes dans les nuages



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

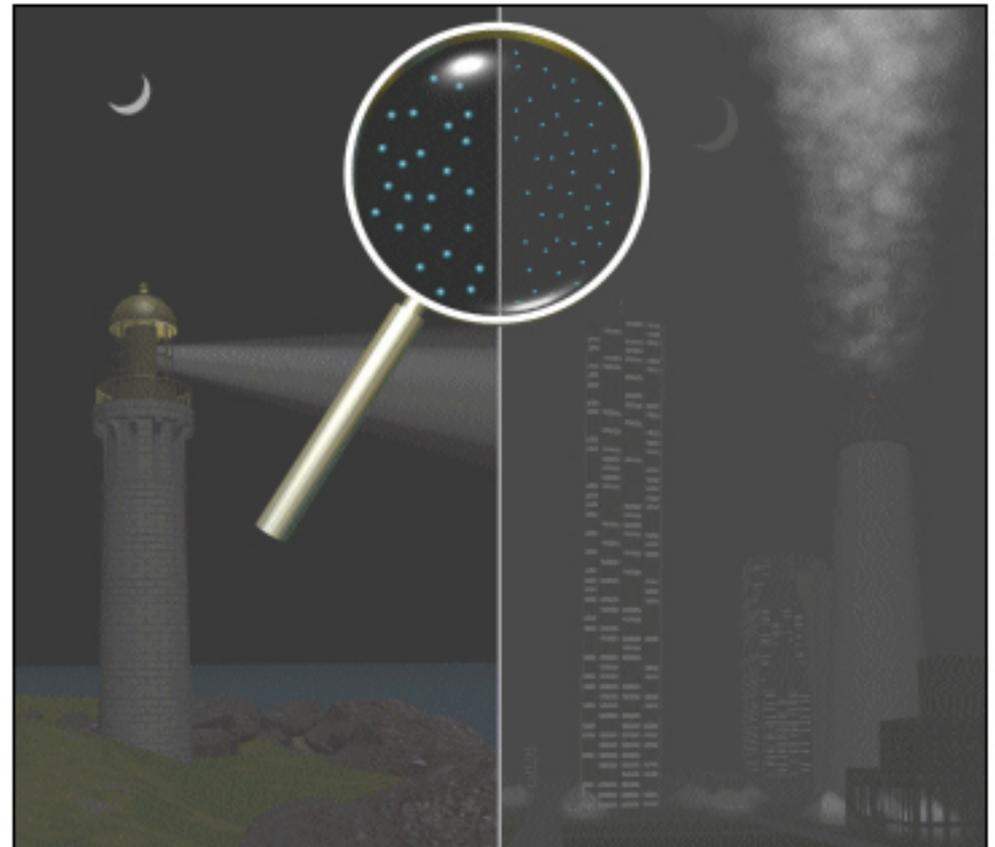
Légende

- 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
 - Pour un même contenu en eau liquide, si r diminue, la réflectivité du nuage au rayonnement solaire augmente. Effet climatique relié aux aérosols.
 - Si r diminue le nuage aura une durée de vie plus grande.



©The COMET Program

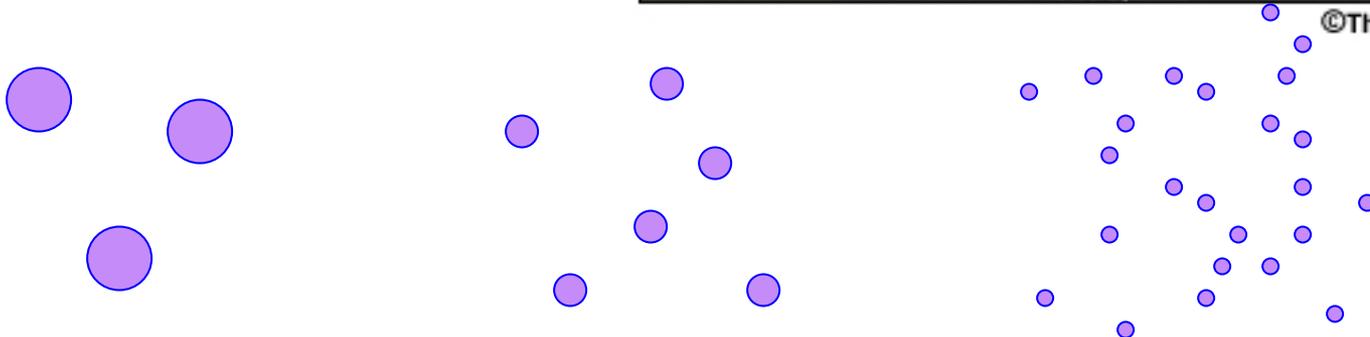


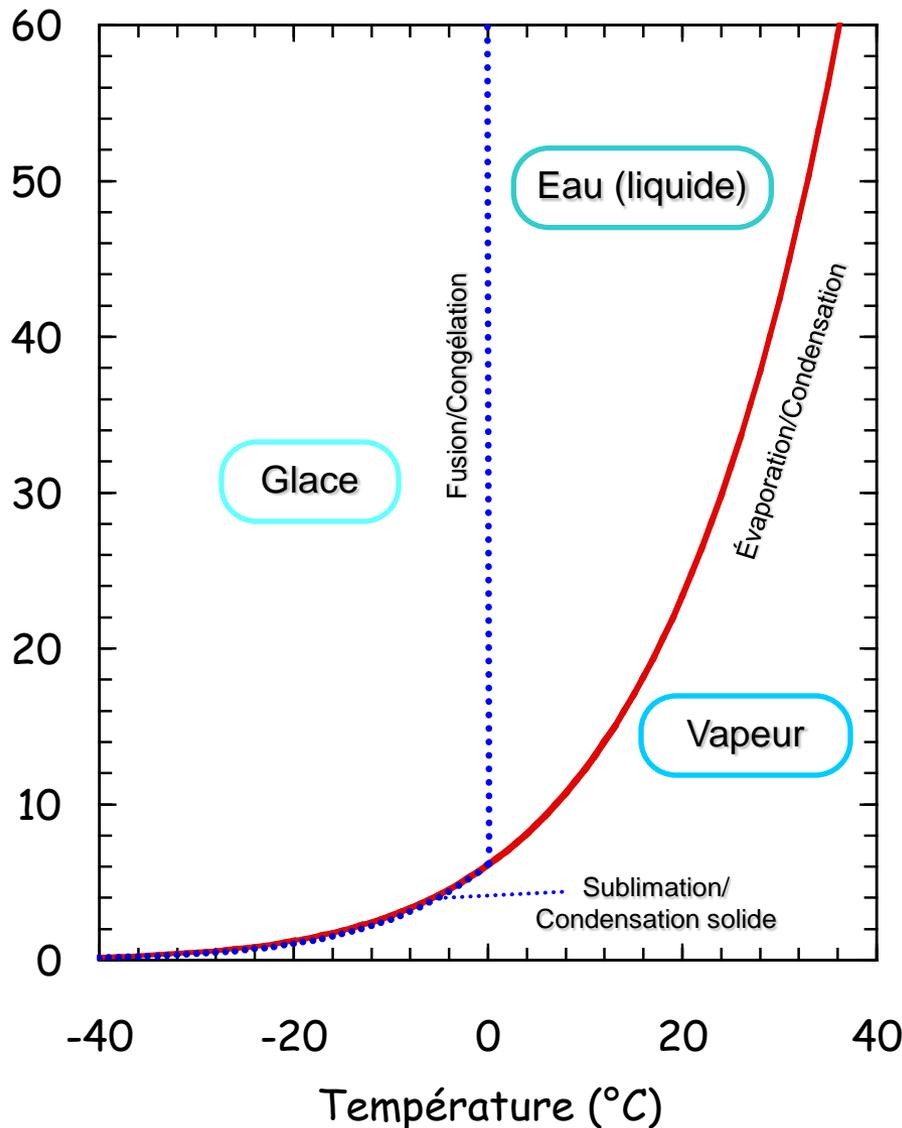
Diagramme de phase de l'eau

Pression de vapeur saturante

Surface plane d'eau chimiquement pure

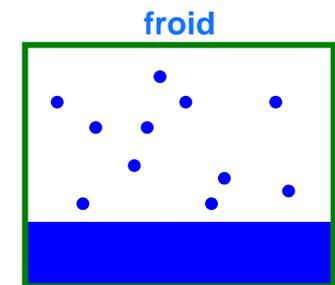
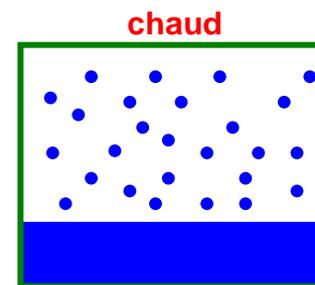


03.2-22

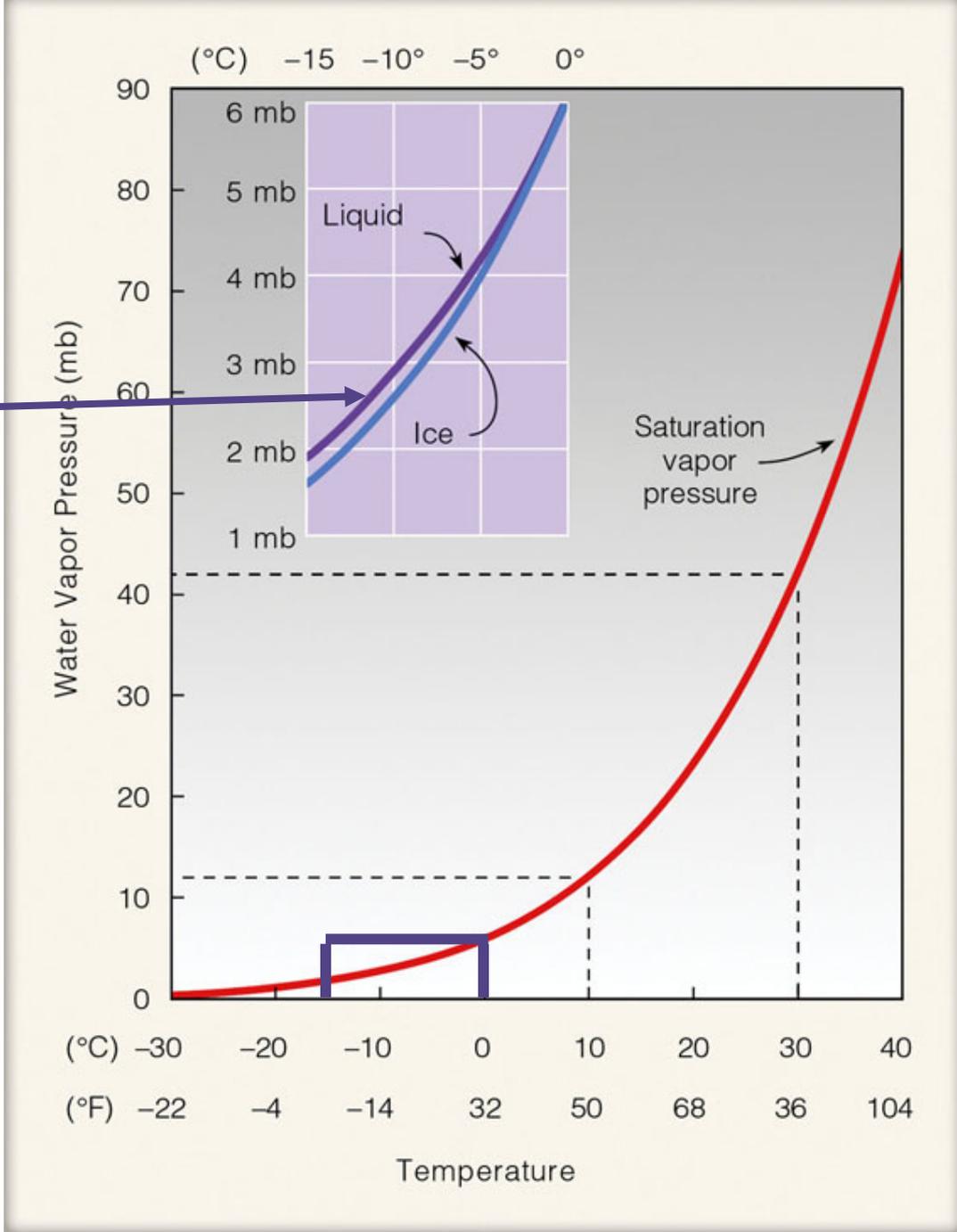


- **À l'équilibre**, la quantité maximale de vapeur d'eau présente dans un volume d'air est limitée et dépend de la **température**.

Par exemple, s'il fait 25°C, on peut trouver jusqu'à 23 g de vapeur d'eau dans un mètre cube d'air. Cependant si la température baisse à 20°C, on peut trouver seulement jusqu'à 17 g de vapeur d'eau dans un mètre cube d'air.



L'eau surfondue



Les changements de phase de l'eau

Condensation liquide ($T > -40\text{ °C}$)

Condensation solide ($T < 0\text{ °C}$)



Formation du nuage

Évaporation ($T > -40\text{ °C}$)

Sublimation ($T < 0\text{ °C}$)



Dissipation du nuage

Congélation/solidification ($T < 0\text{ °C}$)

Glaciation d'un nuage de gouttelettes d'eau surfondue

Fusion ($T \geq 0\text{ °C}$)

Fonte d'un nuage de cristaux et autres particules de glace

Formation des nuages

Les brouillards ou nuages de surface

- Diminution de la température
 - i. Ascension de l'air : formation des nuages
 - ii. Ascension de l'air : brouillard de pente
 - iii. Pertes radiatives
 - iv. Advection d'air chaud et humide sur surface froide
- Mélange de 2 masses d'air
 - i. Brouillard de mélange
 - ii. Fumée de mer
 - iii. Brouillard d'haleine
- Ajout de vapeur d'eau par évaporation
 - i. Fumée de mer
 - ii. Brouillard de précipitation

Brume

Visibilité inférieure à 2 km et supérieure à 1 km

- Les noyaux de condensation secs diffusent la lumière du soleil selon la diffusion de Rayleigh et la brume est bleuâtre : **brume sèche**.
- Des noyaux de condensation humides (humidité relative de l'air inférieur à 100% et supérieure à 75 %) diffuse également toutes les longueurs d'onde (diffusion de Mie) et la brume est blanchâtre ou grisâtre... : **brume humide**.
- Pourquoi l'humidité relative atteint rarement 100 % dans l'air pollué?

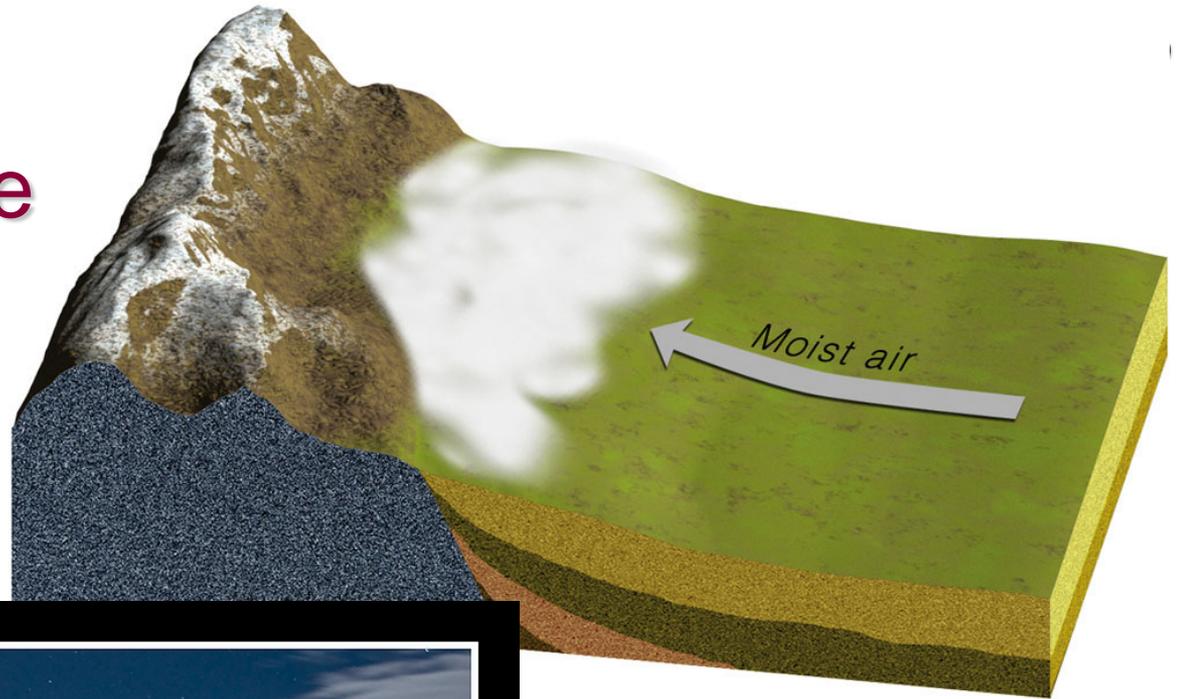


Brouillards

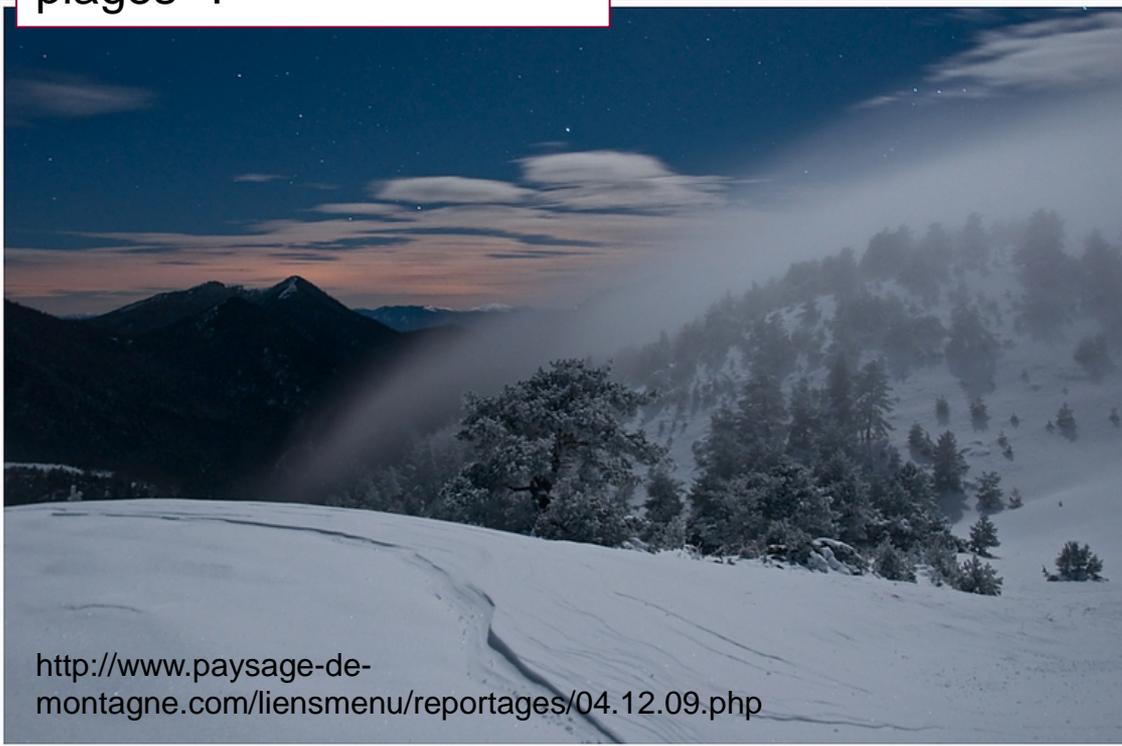
Visibilité inférieure à 1 km

- Commence proche de la surface quand $RH = 100\%$ - la brume devient brouillard.
- En réalité c'est un nuage proche de la surface.
- Définition internationale : quand la visibilité horizontale devient inférieure à 1 km.
- Le brouillard dans des régions pollués peut constituer un problème de santé publique puisqu'il peut être acide.

Brouillard de pente



«Pourquoi les promontoires sont, habituellement, plus de brumeux que les plages»?

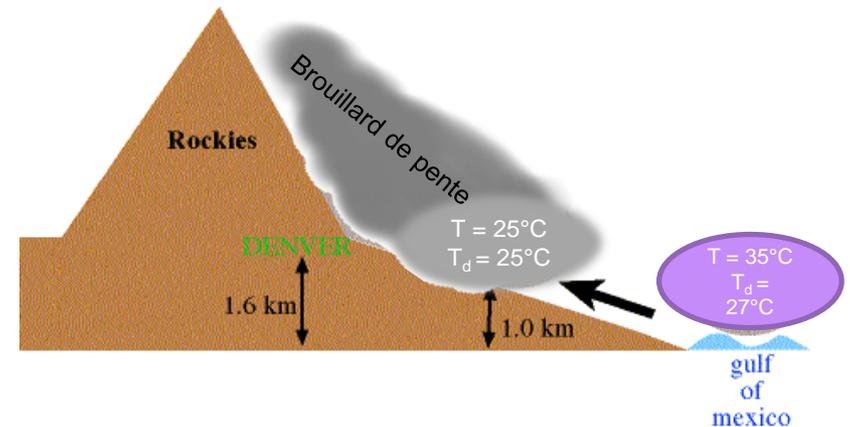
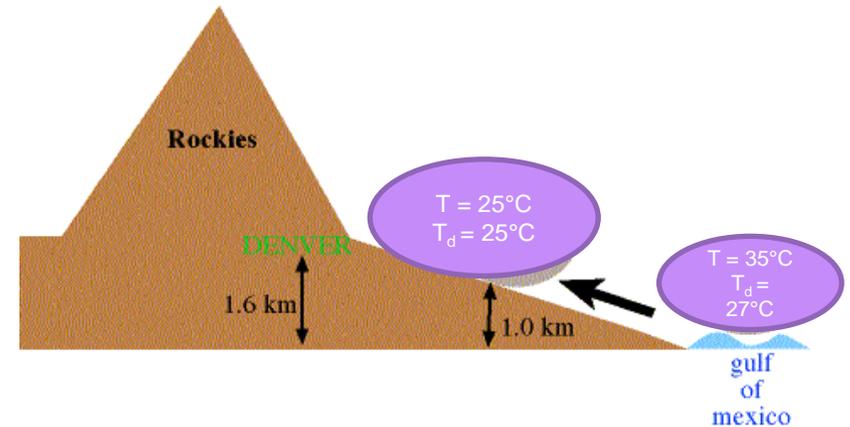
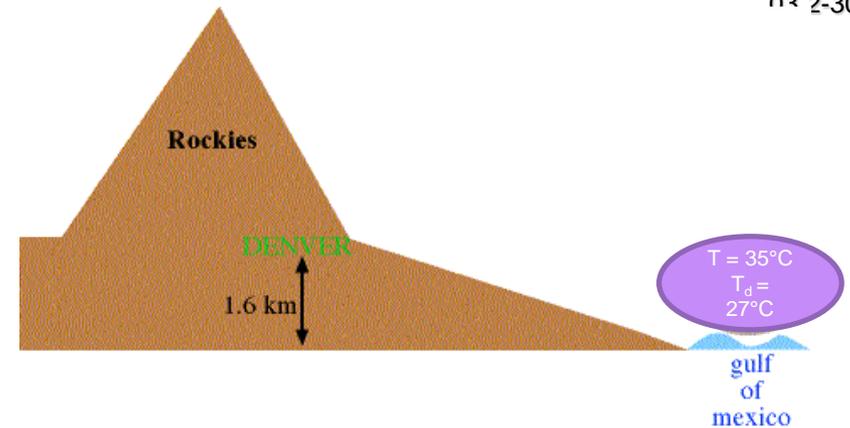


<http://www.paysage-de-montagne.com/liensmenu/reportages/04.12.09.php>

L'air est soulevé par la montagne et atteint la saturation par refroidissement adiabatique.

Brouillard de pente

- L'air est soulevé par la montagne. La pression de l'air diminue, le volume augmente et la température de l'air diminue de $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$
- La température du point de rosée diminue à un taux plus faible, $2^{\circ}\text{C}/\text{km}$, que la température
- La température égale la température du point de rosée et la condensation commence. On a un brouillard de pente.
- Besoins :
 - Une pente!
 - Des vents dans la direction des pentes ascendantes.



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:

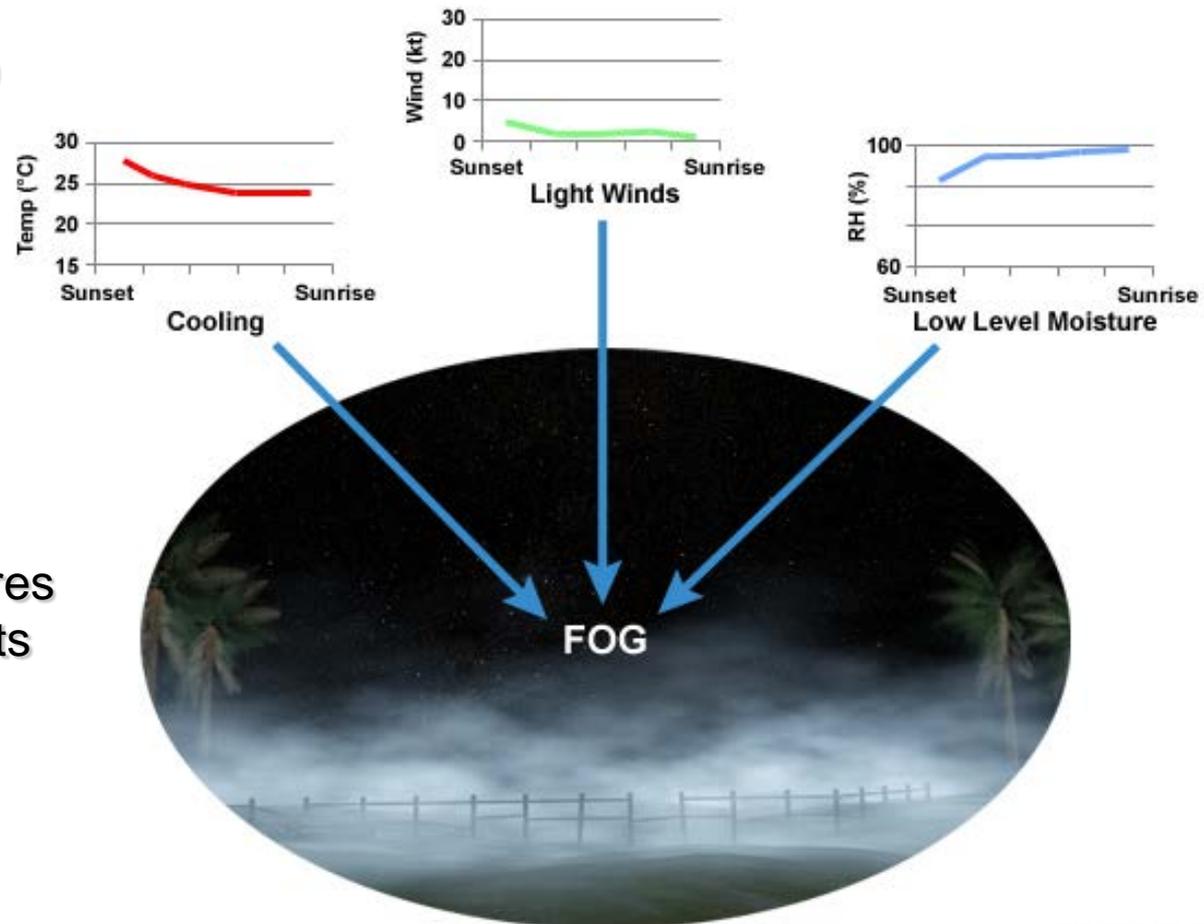
- Une masse d'air humide
- Nuits claires (sans nuage)

D'autres facteurs importants

- Vents faibles
- Durée de la nuit

Endroits favorisés:

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



Brouillard de radiation

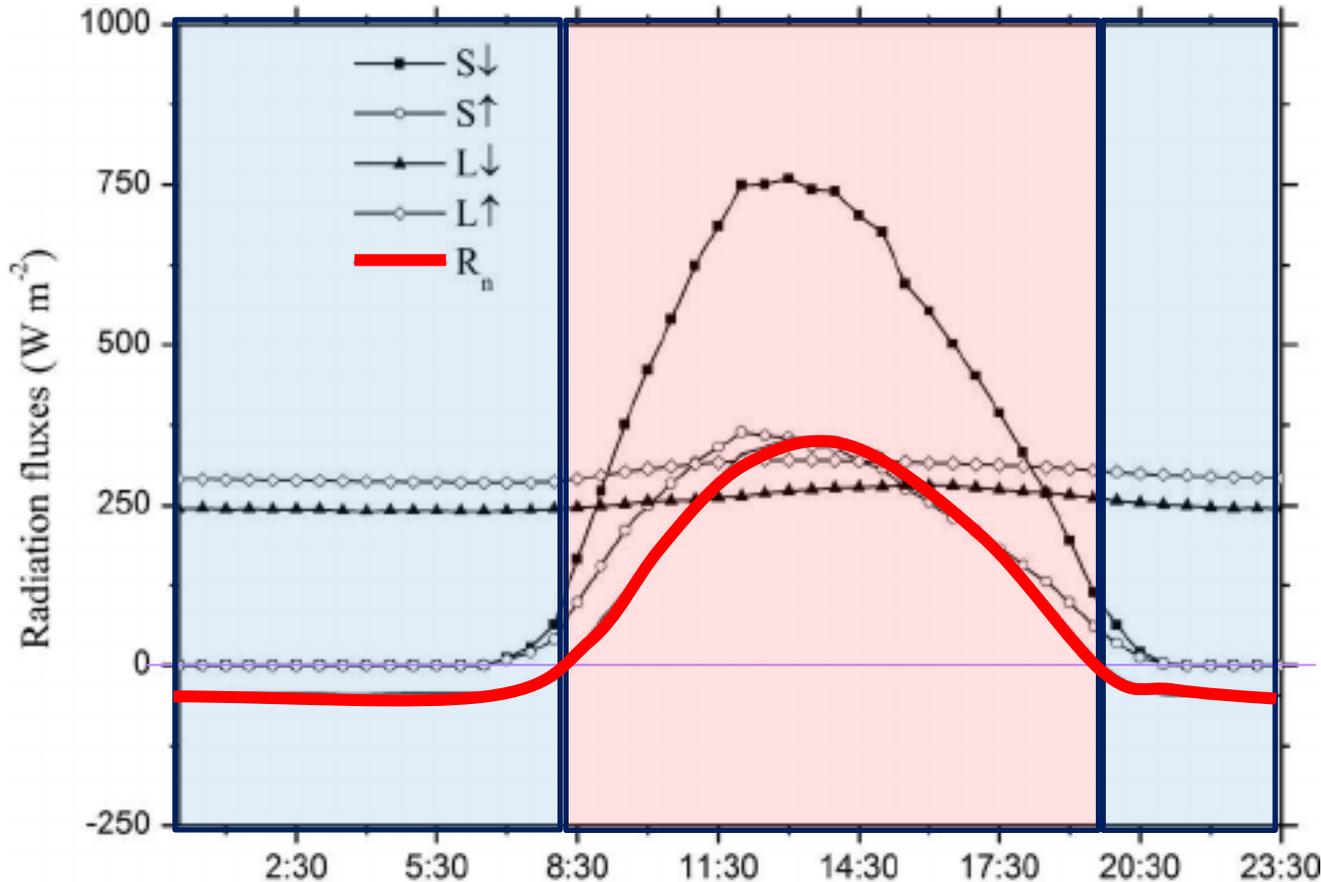
- Besoin de :
 - Couche d'air stable et humide mince proche de la surface
 - Nuits claires et des vents faibles
- Le refroidissement de la surface permet à l'air de refroidir jusqu'à son point de rosée.
- Quand l'air atteint son point de rosée le brouillard commence à se former et le point de rosée diminue.
- Fréquent en automne surtout quand on est sous l'action d'un système de haute pression.
- Souvent on l'observe dans les vallées puisque c'est là que l'air froid s'accumule.



? Est-ce que le brouillard de radiation se développe vers le haut ou vers le bas?

? À quel moment de la journée (de 24 heures) le brouillard de radiation est le plus épais?

Cycle diurne des flux radiatifs à la surface



Perte d'énergie :
refroidissement
radiatif

Gain d'énergie :
réchauffement
radiatif

Perte d'énergie :
refroidissement
radiatif

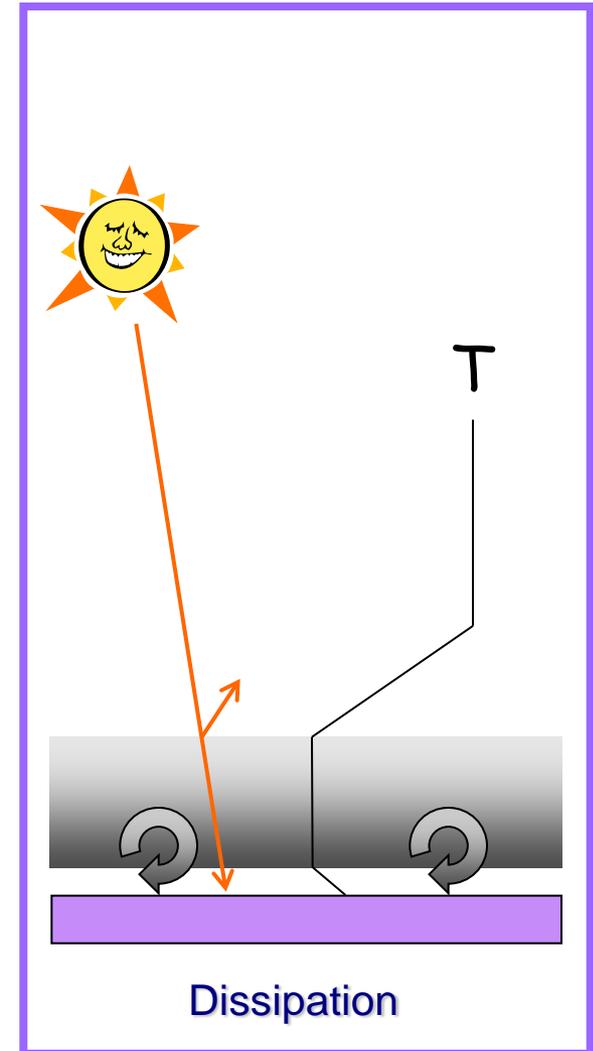
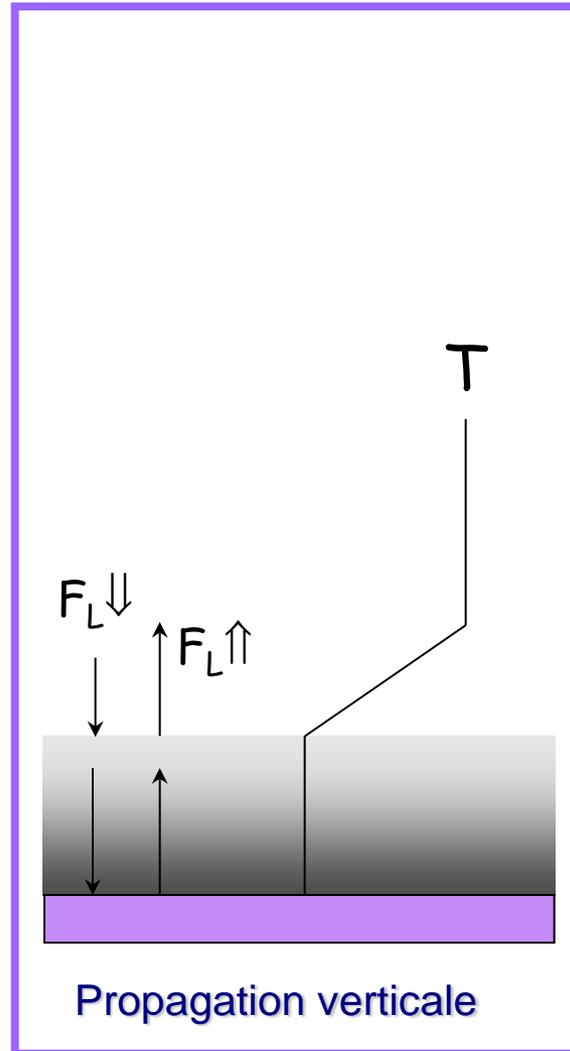
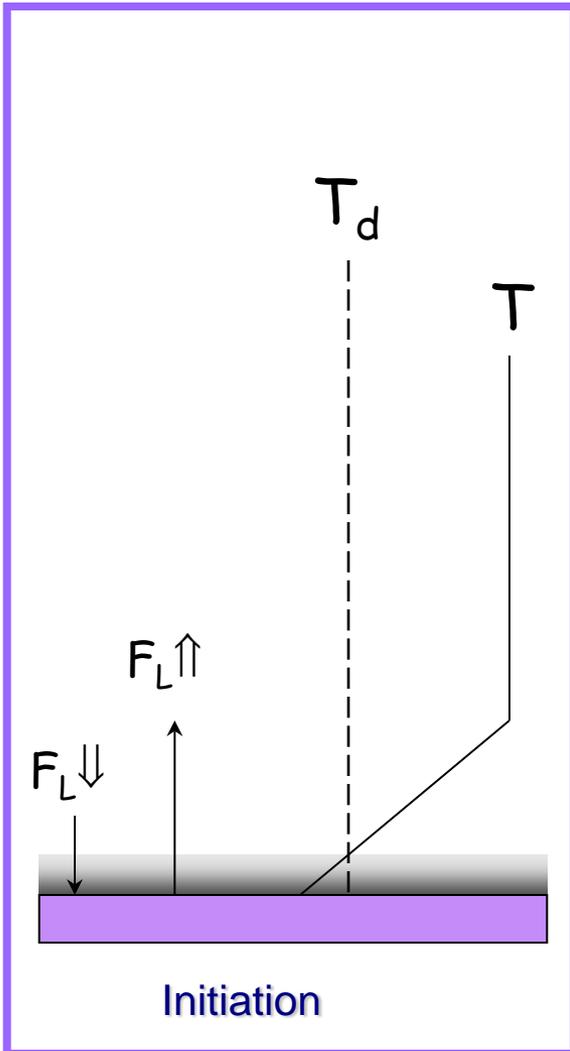
Cycle diurne des flux radiatifs (irradiance) :

- $S\downarrow$ = rayonnement solaire incident ;
- $S\uparrow$ = rayonnement solaire réfléchi ;
- $L\downarrow$ = rayonnement atmosphérique ;
- $L\uparrow$ = rayonnement émis par la surface et
- R_n le rayonnement net reçu (ou perdu) à la surface.

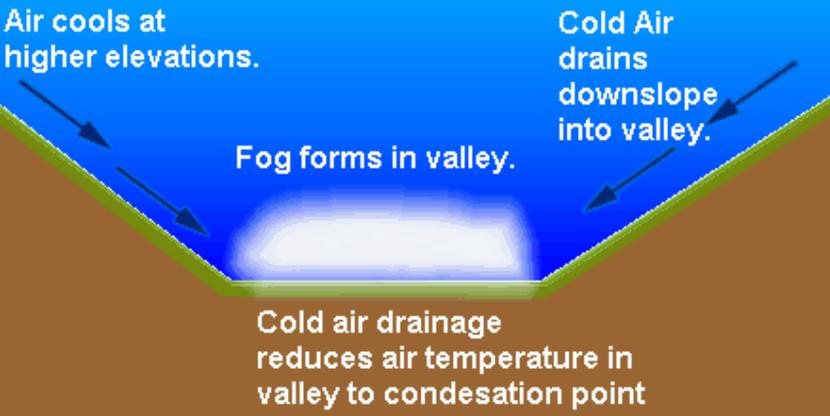


*Engagez votre cerveau
Faites des liens*

Brouillard de radiation



Valley Fog

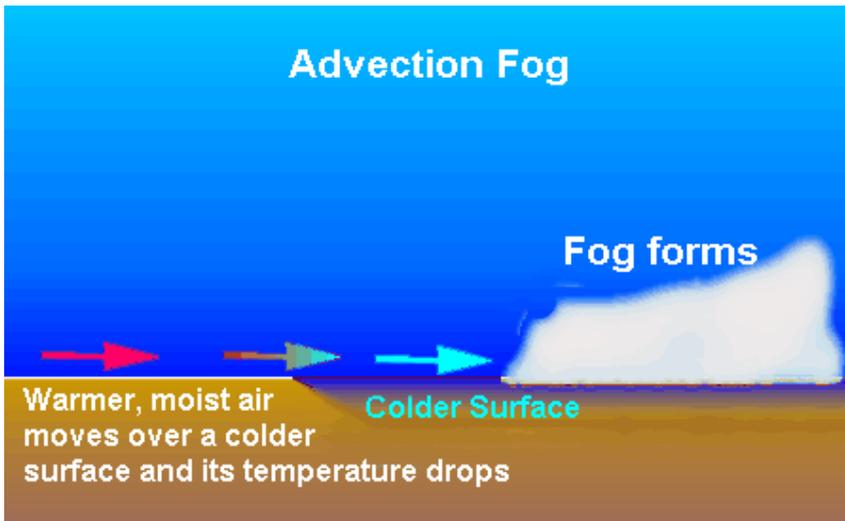


Brouillard radiatif de vallée



Brouillard d'advection

- Brouillard qui se forme au passage d'une masse d'air relativement chaude et humide au-dessus d'une surface plus froide.
- L'air refroidi par conduction et la saturation est atteinte.
- Les brouillards d'advection sont denses et recouvrent de vastes régions.

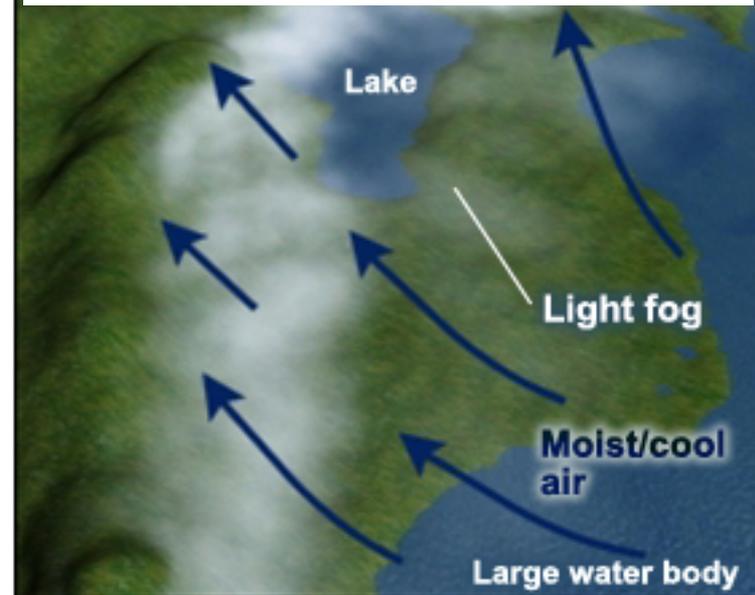


Brouillard de radiation versus Brouillard d'advection

- 1) Processus de formation principal : pertes de chaleur par radiation
- 2) Les effets locaux sont importants
- 3) Le brouillard atteint son maximum à la fin de la nuit, se dissipant, en général, au cours de l'avant-midi



- 1) Processus de formation principal : transport de masse d'air - effet de grande échelle
- 2) Les pertes radiatives sont un ingrédient secondaire. Les effets locaux sont peu importants.
- 3) Peut se former à n'importe quelle période de la journée



Brouillard d'évaporation



Brouillard d'évaporation: de l'air froid se déplace sur des étendues d'eau liquide ou de surfaces humides de température plus élevée.

Le brouillard ainsi formé est peu épais à moins que d'autres facteurs interviennent, ce qui est souvent le cas.

Petite marche hivernale - Estacade du pont Champlain

Publié par [Province canadienne](#)

Bouillard d'évaporation

- À la surface, la vapeur est proche de la saturation, $\sim e_w(T_{eau})$.

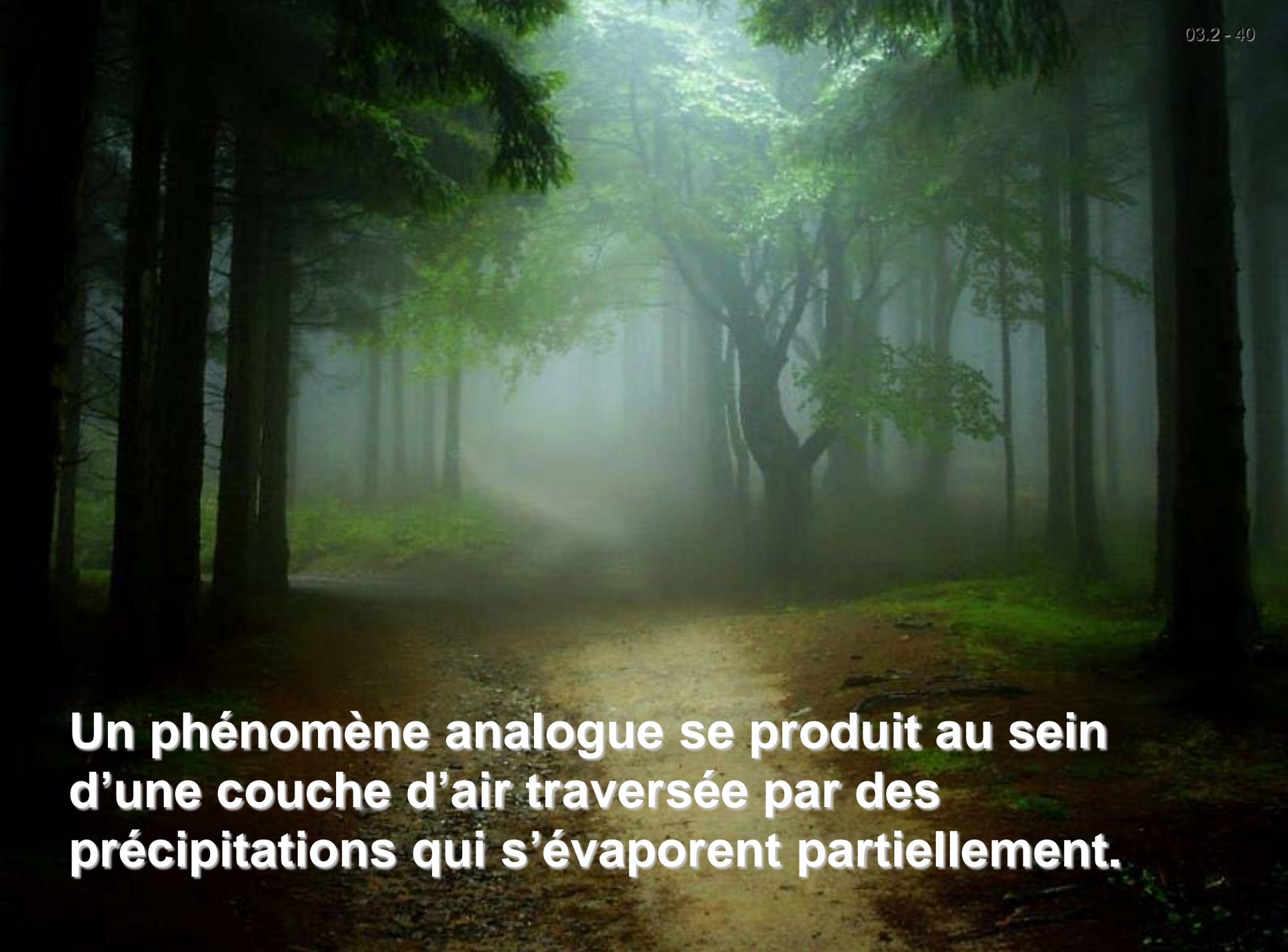
$$T_{eau} > T_{air} \Rightarrow e_w(T_{eau}) > e_w(T_{air})$$
- À cause du gradient de pression de vapeur, la vapeur se diffuse du plan d'eau vers l'air.
- La vapeur se condense enfin et forme le brouillard.



©2001 Brooks/Cole - Thomson Learning

Air froid au-dessus d'un plan d'eau plus chaud



A photograph of a misty forest path. The path is dirt and leads into a dense forest of tall, thin trees. The air is thick with mist, and a soft, ethereal light filters through the canopy, creating a magical atmosphere. The trees are mostly evergreens, and the ground is covered in fallen leaves and moss.

Un phénomène analogue se produit au sein d'une couche d'air traversée par des précipitations qui s'évaporent partiellement.



*Engagez votre cerveau
Faites des liens*

Brouillard de précipitations

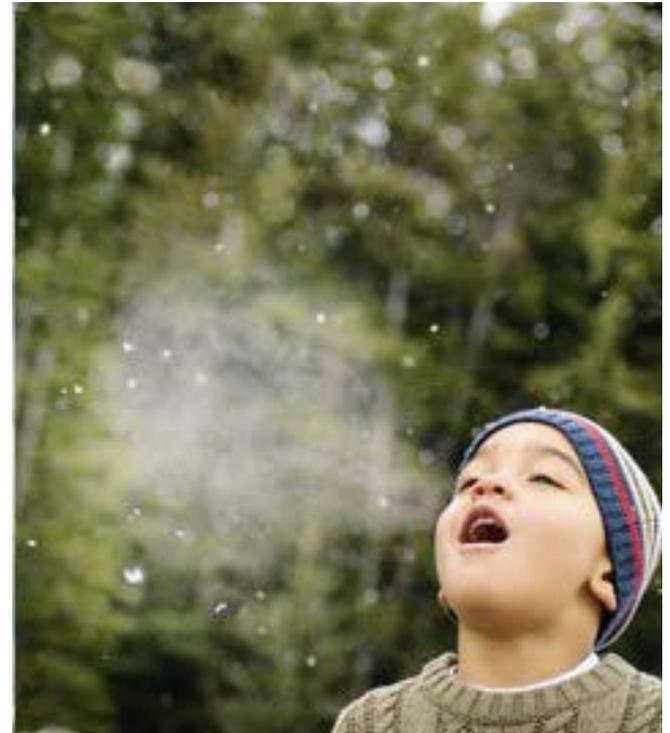
Le brouillard est possible si la température de la pluie est supérieure à la température de l'air qu'elle traverse. L'évaporation des gouttes continue même après la saturation de l'air.



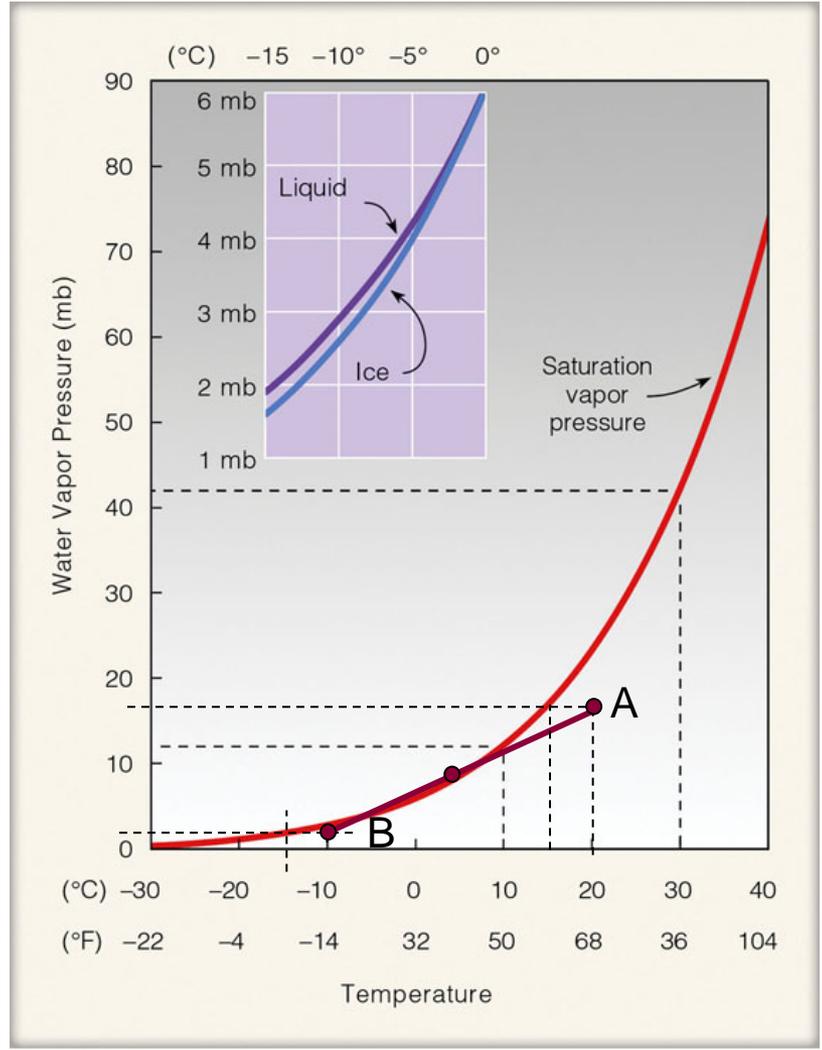
Brouillard d'haleine



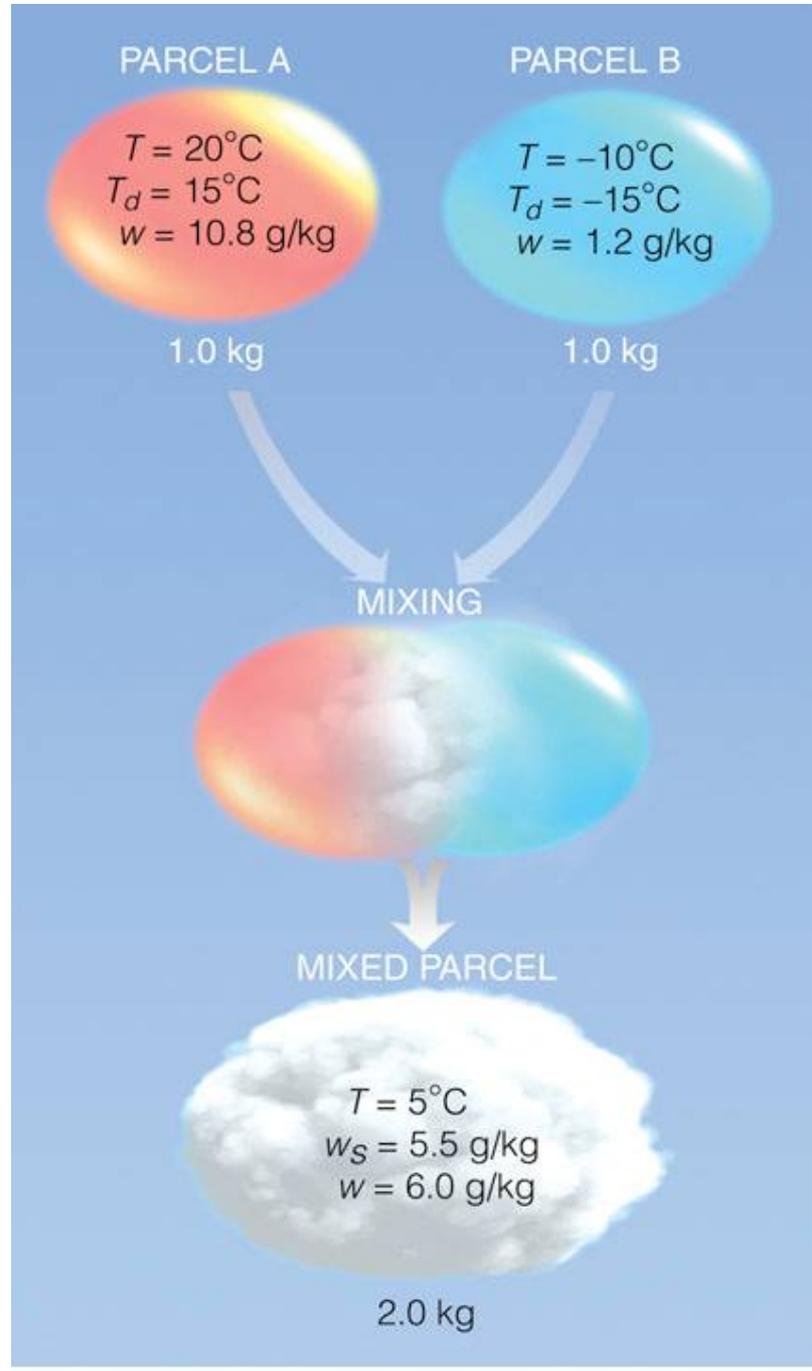
c.-à-d. : Voir son souffle!



Brouillard de mélange et d'haleine

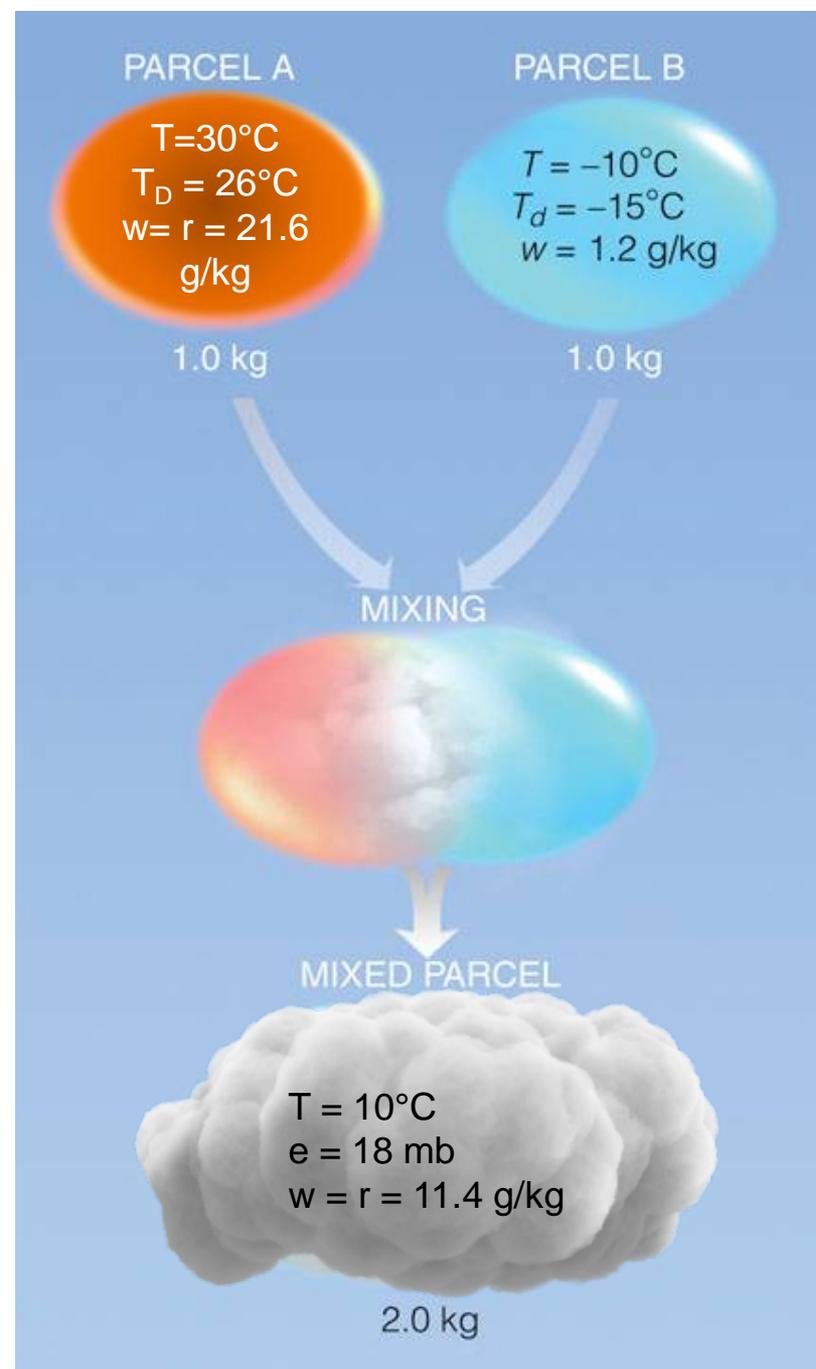
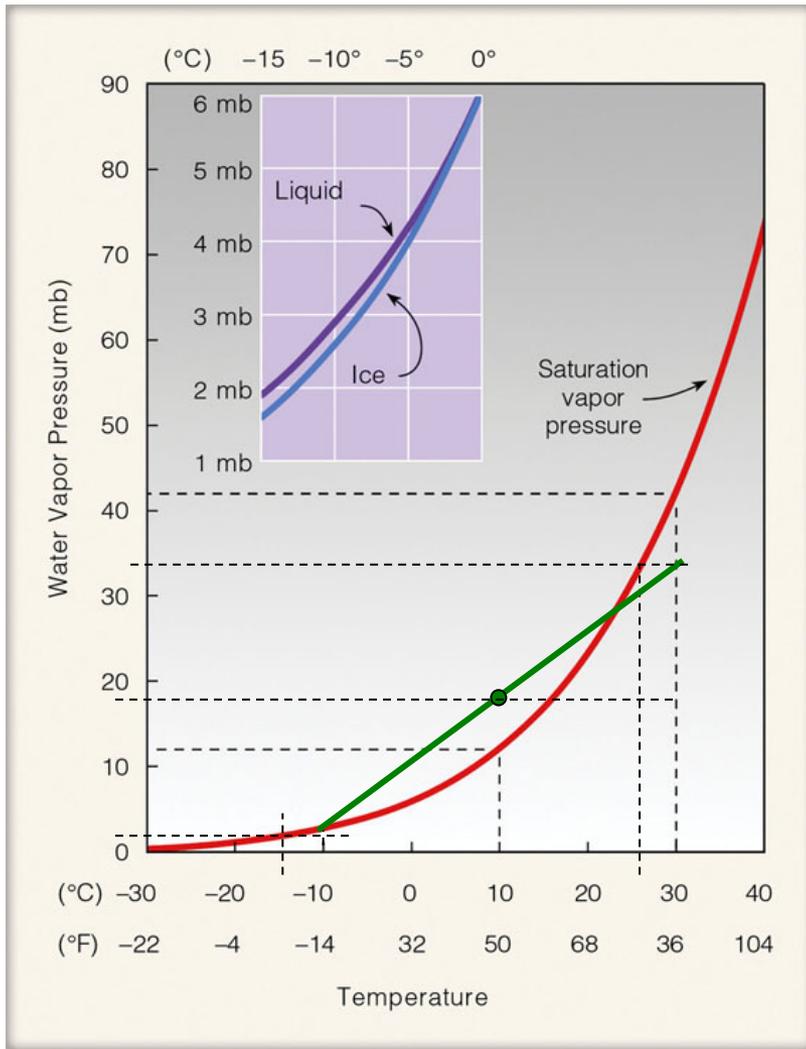


© Brooks/Cole, Cengage Learning

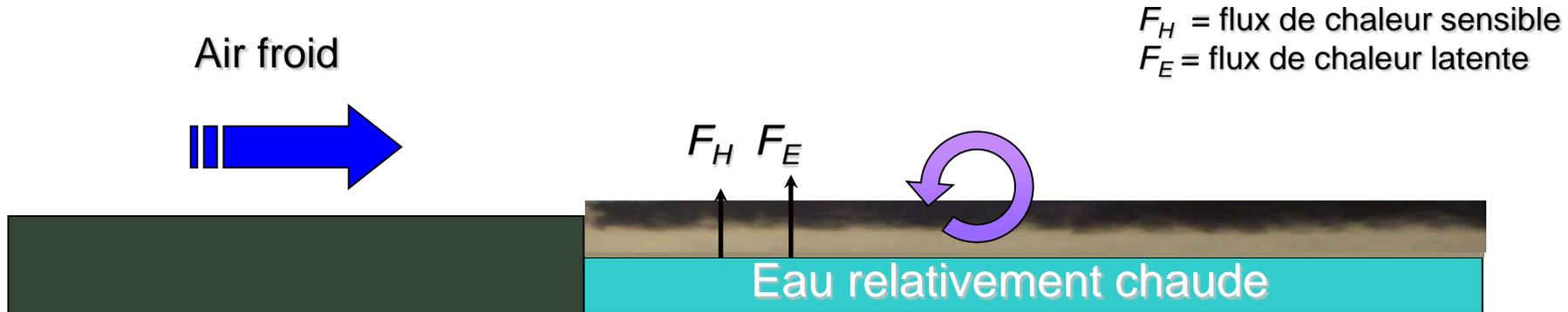


© 2007 Thomson Higher Education

Brouillard de mélange et d'haleine

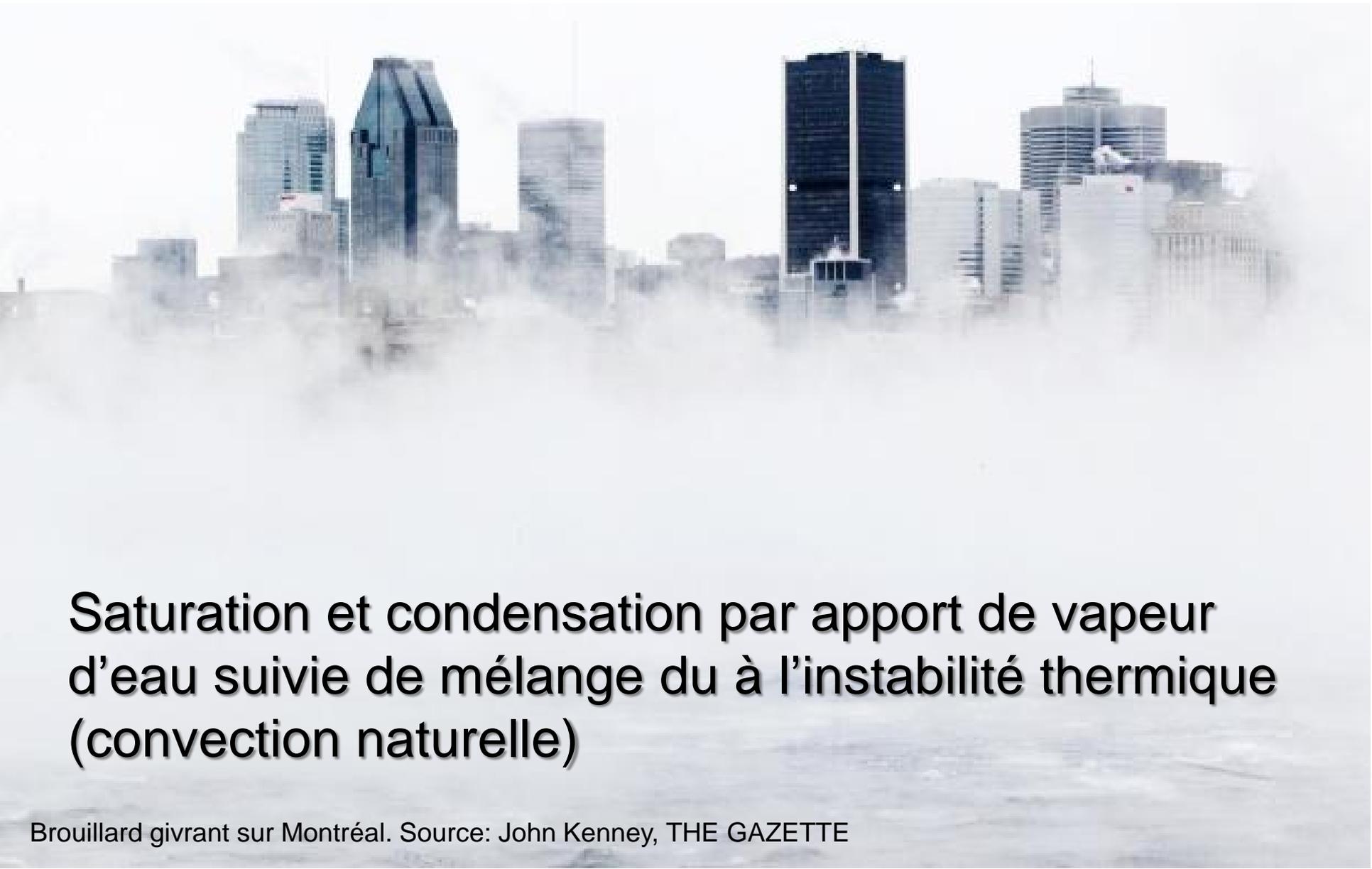


Fumée de mer (évaporation + mélange)



- Advection d'air très froid au-dessus d'un plan d'eau plus chaud.
- Formation d'une mince couche de brouillard au contact de l'air froid et de l'eau plus 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.

Fumée de mer



Saturation et condensation par apport de vapeur d'eau suivie de mélange du à l'instabilité thermique (convection naturelle)

Questions



- Expliquez comment la rosée, et la rosée blanche (le frimas) se forment.
- Quelle est la différence entre la rosée et le brouillard?
- Quelle est la différence entre brume sèche, brume humide et brouillard?
- Types de brouillard ?
 - radiation
 - advection
 - de pente
 - d'évaporation et mélange (fumée de mer)
 - d'évaporation (pluie)
- Quelles sont les conditions atmosphériques propices à la formation de chacun de ces brouillards?

Saturation par soulèvement adiabatique

LA FORMATION DE NUAGES

Table de matières

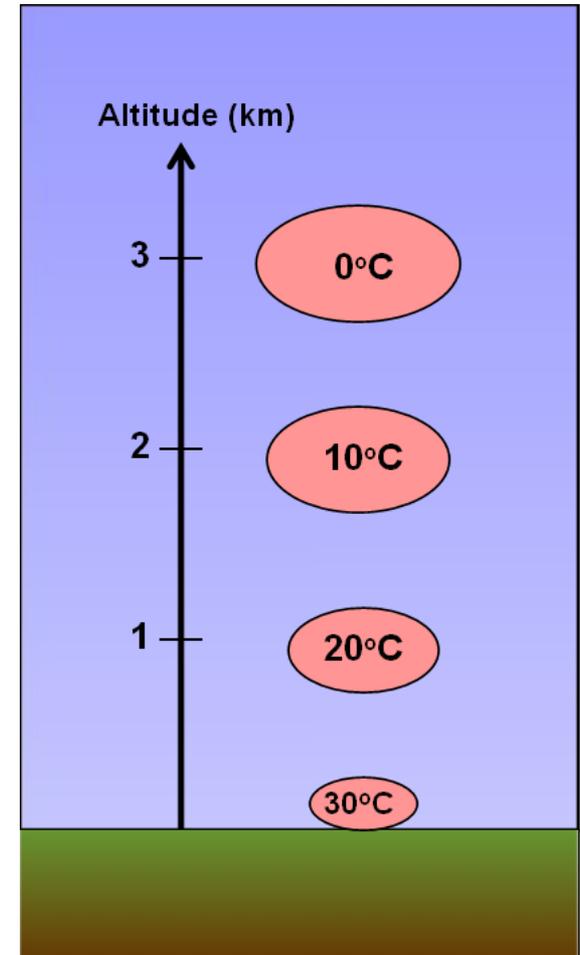
- Pour arriver à la saturation : refroidissement
 - Refroidissement adiabatique sans condensation
 - Refroidissement adiabatique avec condensation
 - Le profil de température de l'atmosphère
 - Processus de soulèvement

Processus adiabatique sans condensation

Dans une atmosphère hydrostatique, la température d'une parcelle en mouvement vertical sans échange de chaleur avec l'environnement et au sein de laquelle il n'y a pas des changements de phase diminue au taux de g/c_p , où g est l'accélération de la gravité et c_p la capacité calorifique massique de l'air atmosphérique.

Dans le cas de l'atmosphère terrestre $g \sim 10 \text{ m/s}^2$ et $c_p \sim 1000 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$. Dans notre atmosphère, le taux de refroidissement adiabatique sans condensation, appelé **taux adiabatique sec**, est $\Gamma_d = 10^\circ\text{C/km}$.

Important



$$\Gamma_d = - \Delta T / \Delta z = 10^\circ\text{C/km}$$

* Démonstration de ces résultats à la fin de ce document

Processus adiabatique sans condensation

La variation de la température d'un gaz parfait due à la variation de pression adiabatique (sans échange de chaleur avec l'environnement et sans changements de phase) est donnée par une des équations de Poisson :

$$T_f = T_i \cdot \left(\frac{p_f}{p_i} \right)^{R/c_p}$$

Les températures sont en kelvin, les pressions dans les mêmes unités (par exemple Pa). R est la constante spécifique du gaz et c_p sa capacité calorifique massique.

Processus adiabatique sans condensation

définition de température potentielle, θ

En météorologie on définit **la température potentielle, θ** , comme la température qui aurait une parcelle d'air de température T_i et pression p_i si on amène sa pression à $p_f = 1000$ hPa par un processus adiabatique sans condensation :

$$\theta [K] = T_i [K] \cdot \left(\frac{1000 [hPa]}{p_i [hPa]} \right)^{R/c_p},$$

$$R \cong R_d = 287 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}; c_p \cong c_{pd} = 1005 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

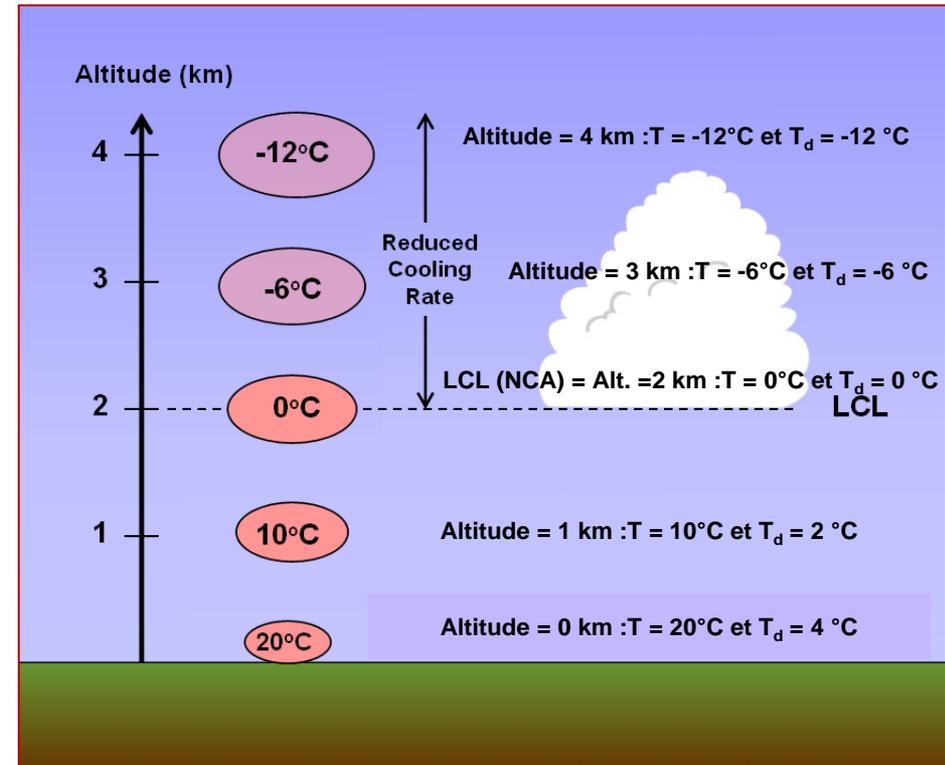
Important

La température potentielle des parcelles d'air se conserve pendant des déplacements où les échanges de chaleur entre les parcelles d'air et leur environnement est négligeable.

Processus adiabatique avec condensation

Dans la plupart des cas, la basse atmosphère est assez humide pour que l'air en ascension devienne saturé par refroidissement adiabatique. La hauteur à laquelle la parcelle d'air est juste saturée s'appelle **le niveau de condensation par soulèvement adiabatique (NCA, LCL en anglais)**

Si le soulèvement se poursuit, une partie de la vapeur d'eau se condense pour maintenir l'équilibre thermodynamique entre l'eau liquide (les gouttelettes) et la vapeur d'eau. La chaleur dégagée va contribuer à diminuer le taux de refroidissement de la parcelle d'air .



Le **taux de refroidissement adiabatique avec condensation**, Γ_s , dépend de l'humidité de l'air et de la température. Il est variable avec la hauteur. À des températures très froides (très haut dans l'atmosphère), quand la quasi-totalité de la vapeur d'eau s'est condensée, $\Gamma_s \sim \Gamma_d$.

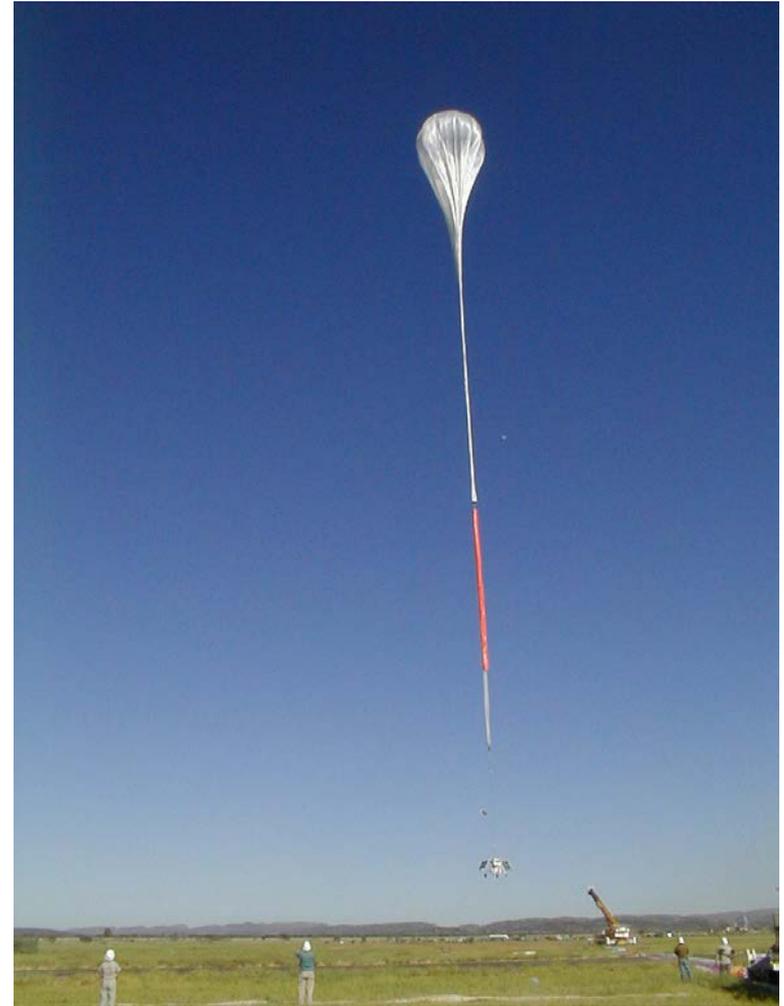
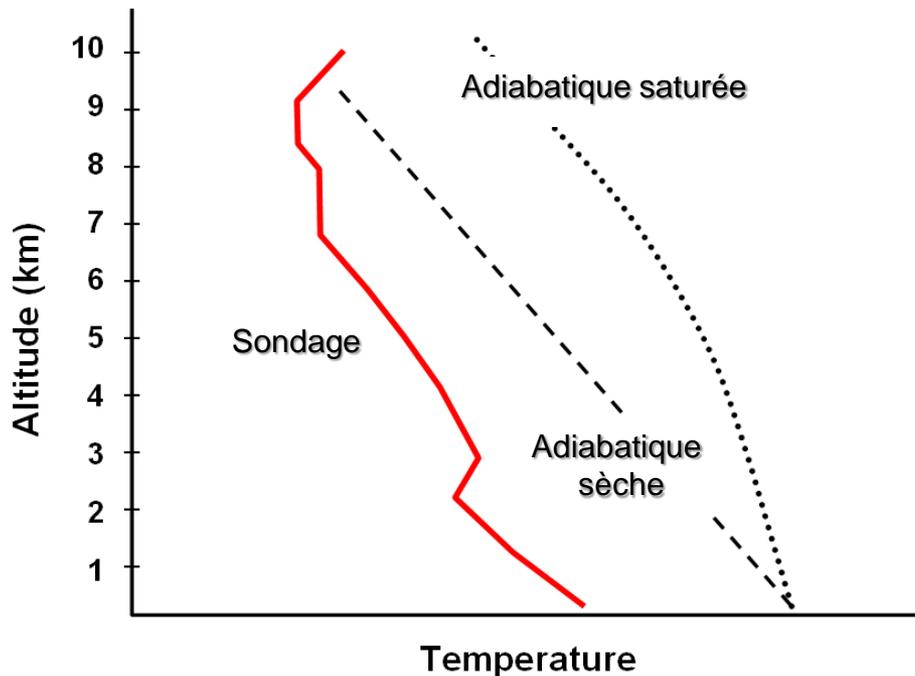


*Engagez votre cerveau
Faites des liens*

* Démonstration de ce résultat dans le cours de Thermodynamique avancée (PHY4501)

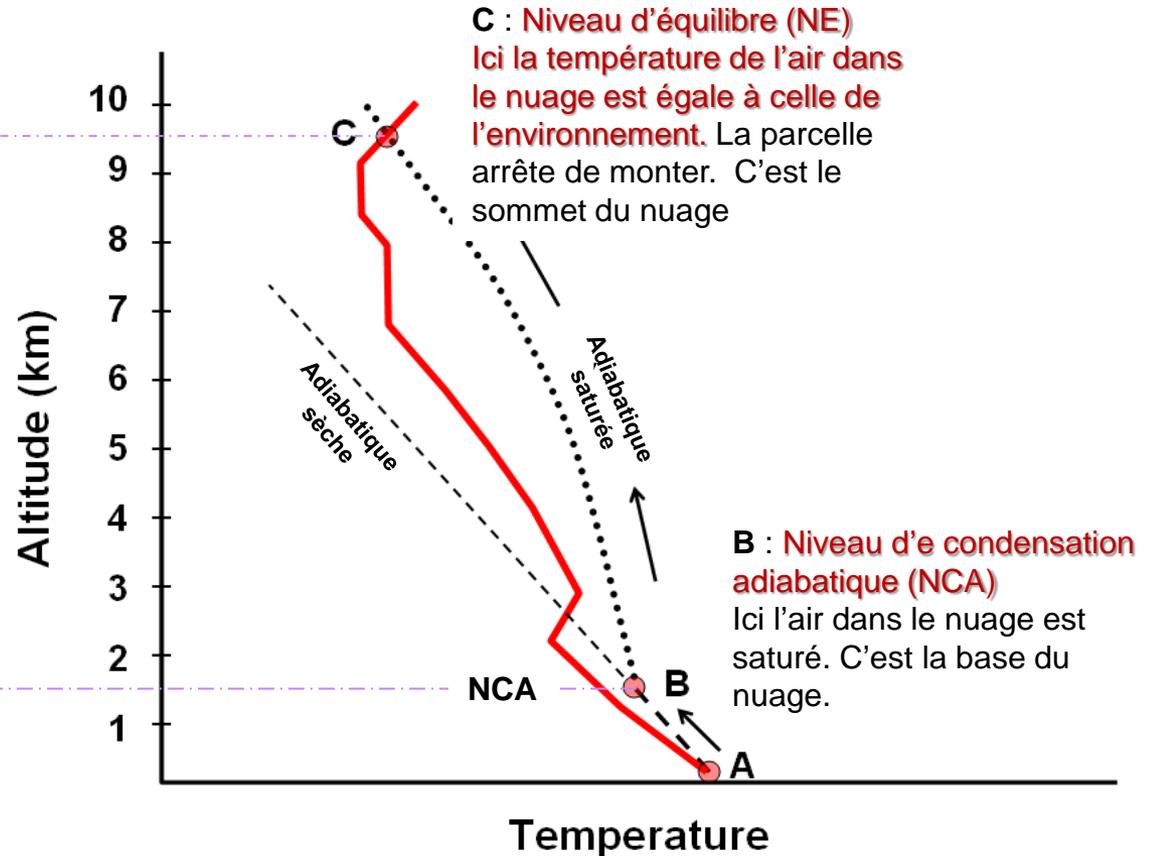
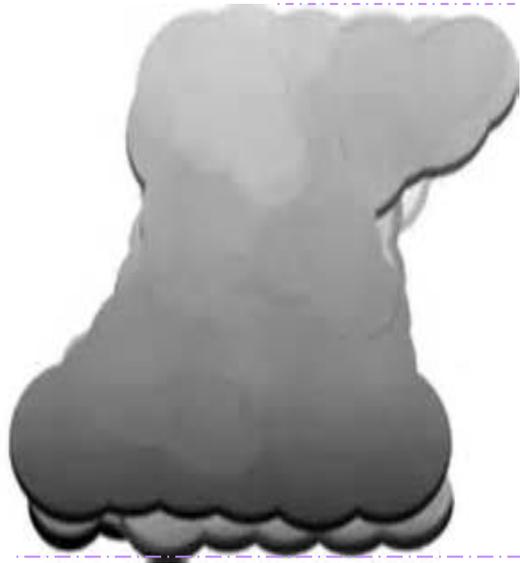
Variation de la température de l'atmosphère avec la hauteur.

La seule façon de savoir comment la température varie avec l'altitude c'est de prendre des mesures. C'est le but des sondages aérologiques. Le profil vertical de la température de l'atmosphère varie dans l'espace et dans le temps.



Les ballons météorologiques transportent des sondes qui permettent la mesure de la température et de l'humidité à plusieurs hauteurs.

Formation d'un nuage par refroidissement adiabatique (convection naturelle)



A : une parcelle d'air, initialement à la surface ($T_p = T_e$) se soulève; sa température diminue au taux de 10°C et est supérieure à T_e au même niveau;

B : la température et la température du point de rosée de la parcelle d'air en ascension sont égales. La parcelle d'air est saturée, **niveau de condensation par ascension adiabatique ou NCA**;

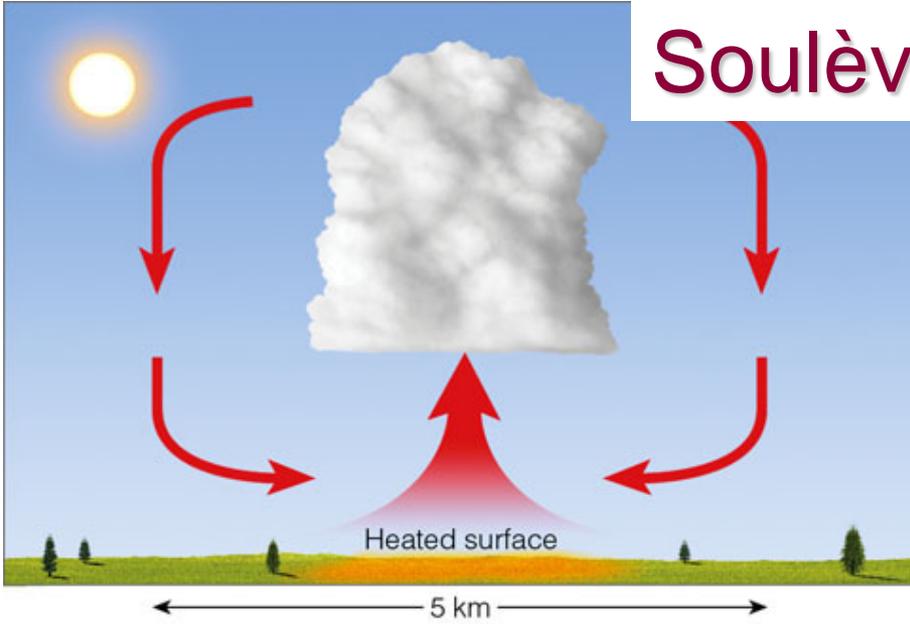
C : entre B et C le nuage se développe puisque, en continuant son ascension sa température diminue (moins vite) et on observe la condensation (formation du nuage).

Cumulus congestus

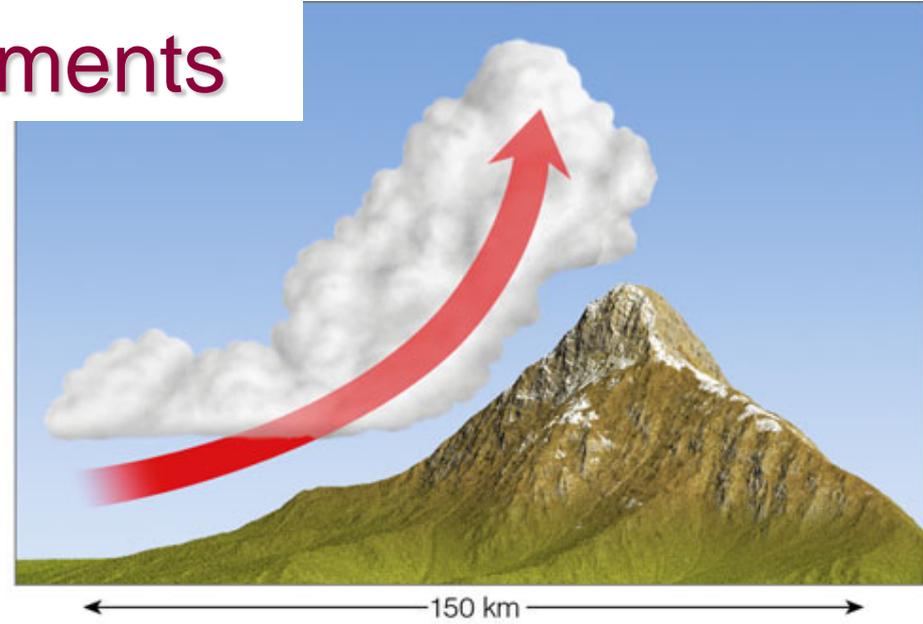


Comment peut-on forcer une parcelle d'air à s'élever dans l'atmosphère?

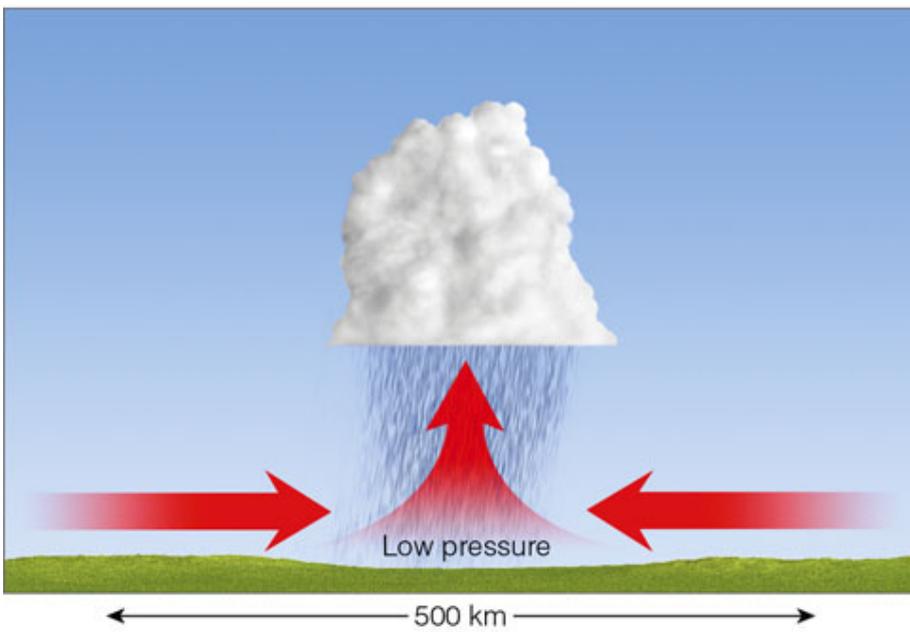
Soulèvements



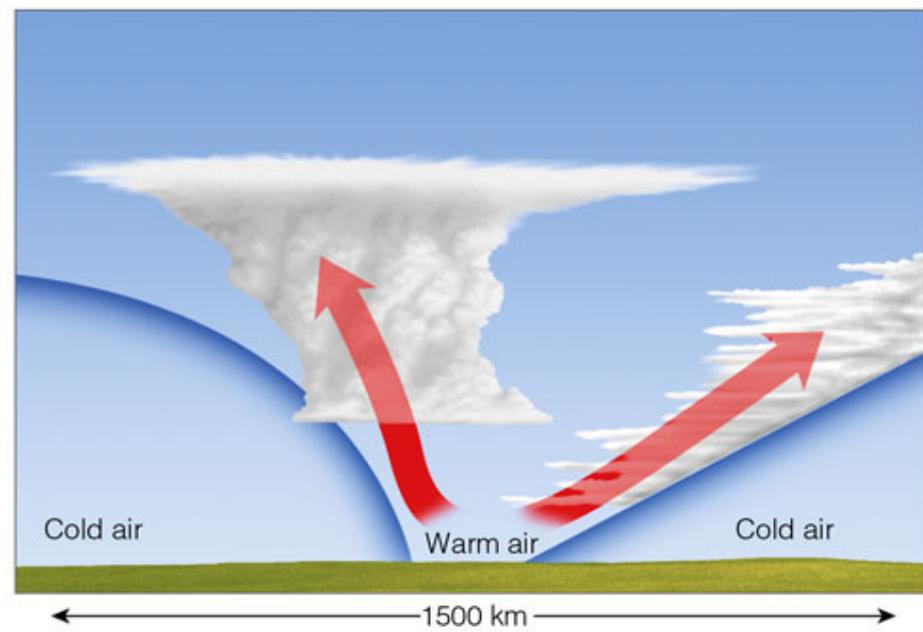
a) Convection



b) Soulèvement orographique

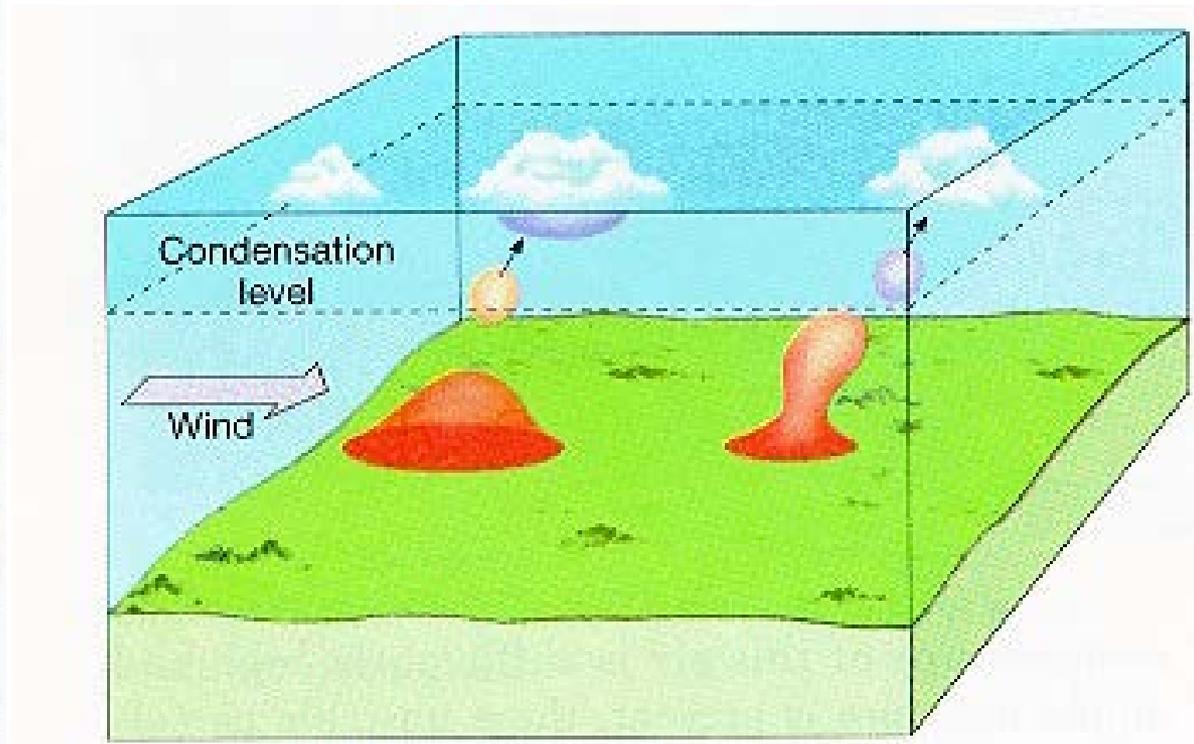
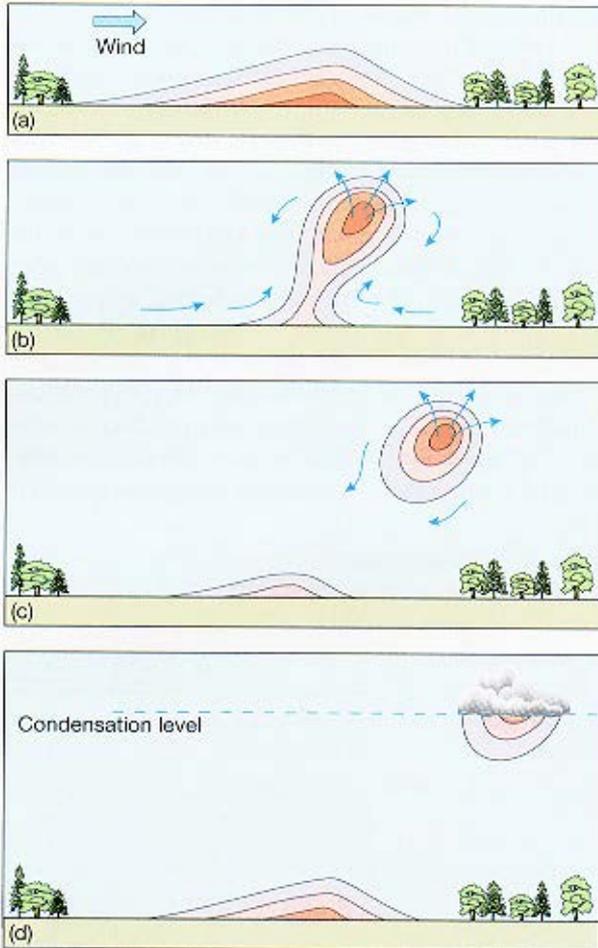


c) Soulèvement par convergence

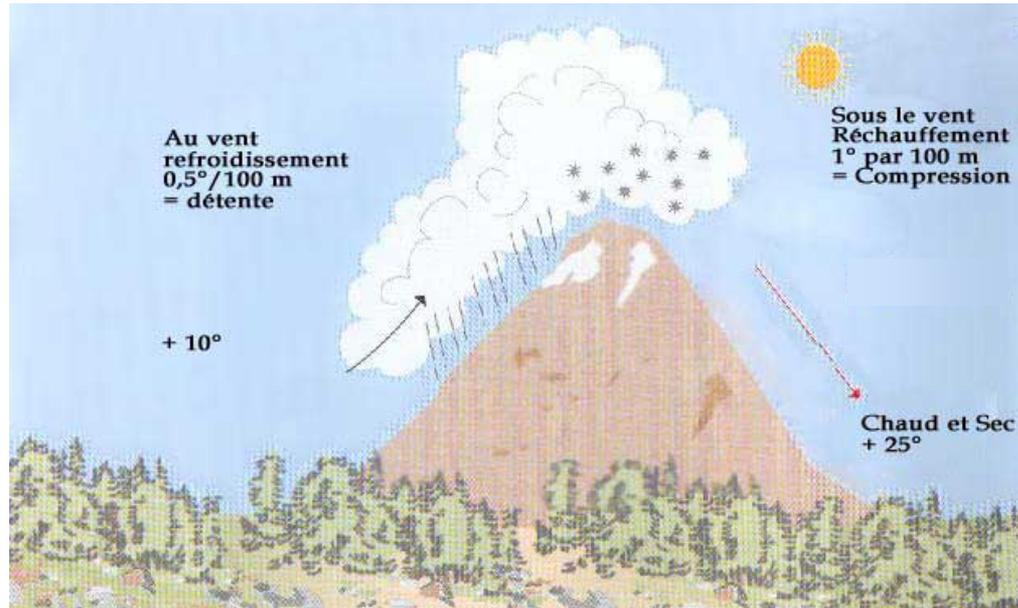


d) Soulèvement frontal

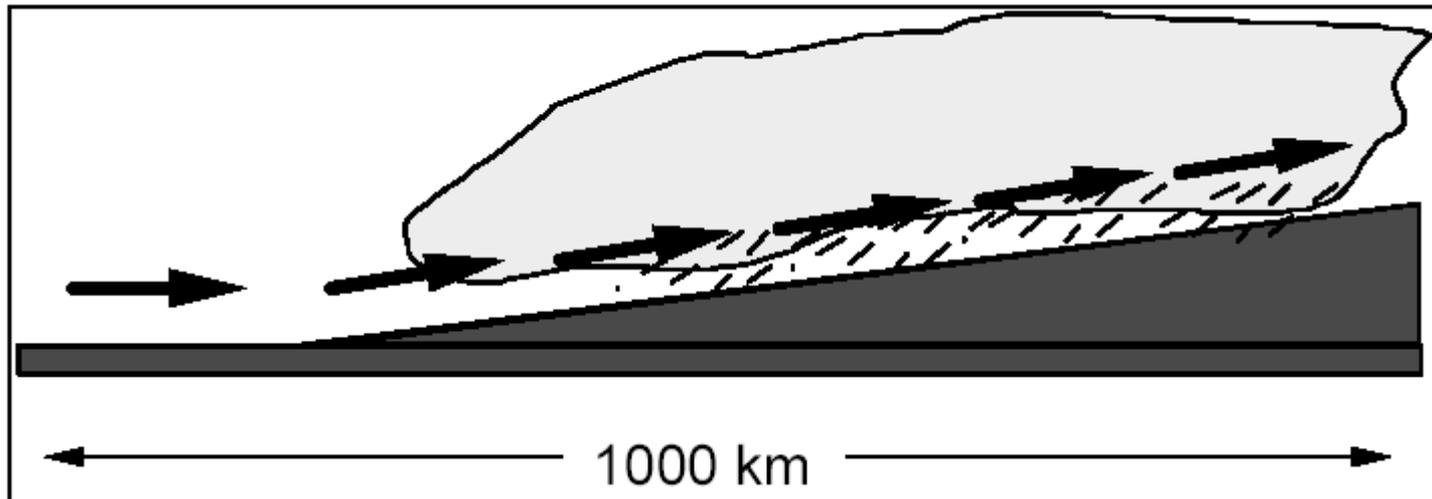
Convection libre ou naturelle



Soulèvement orographique

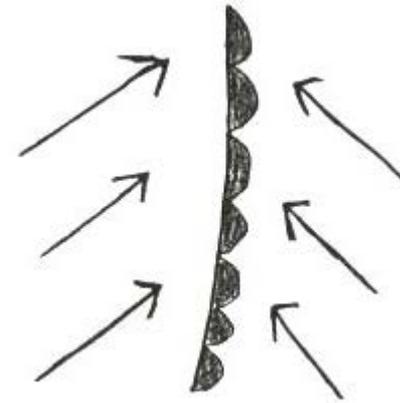
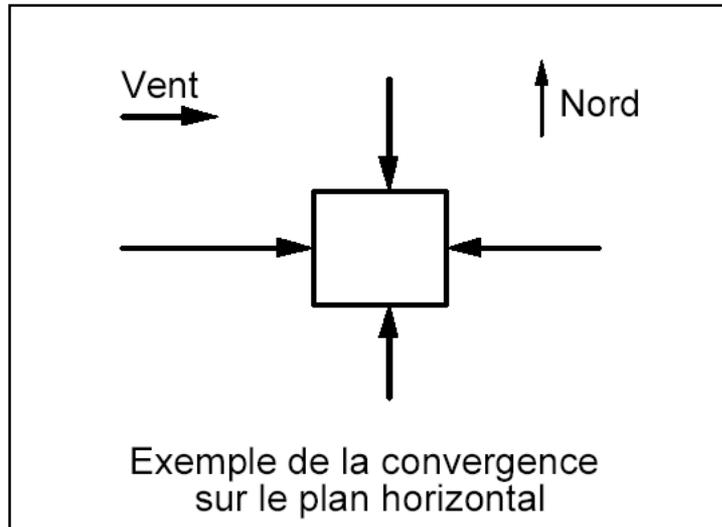


Soulèvement orographique



Plateforme continentale

Convergence horizontale du vent à la surface



Convergence le long d'un front

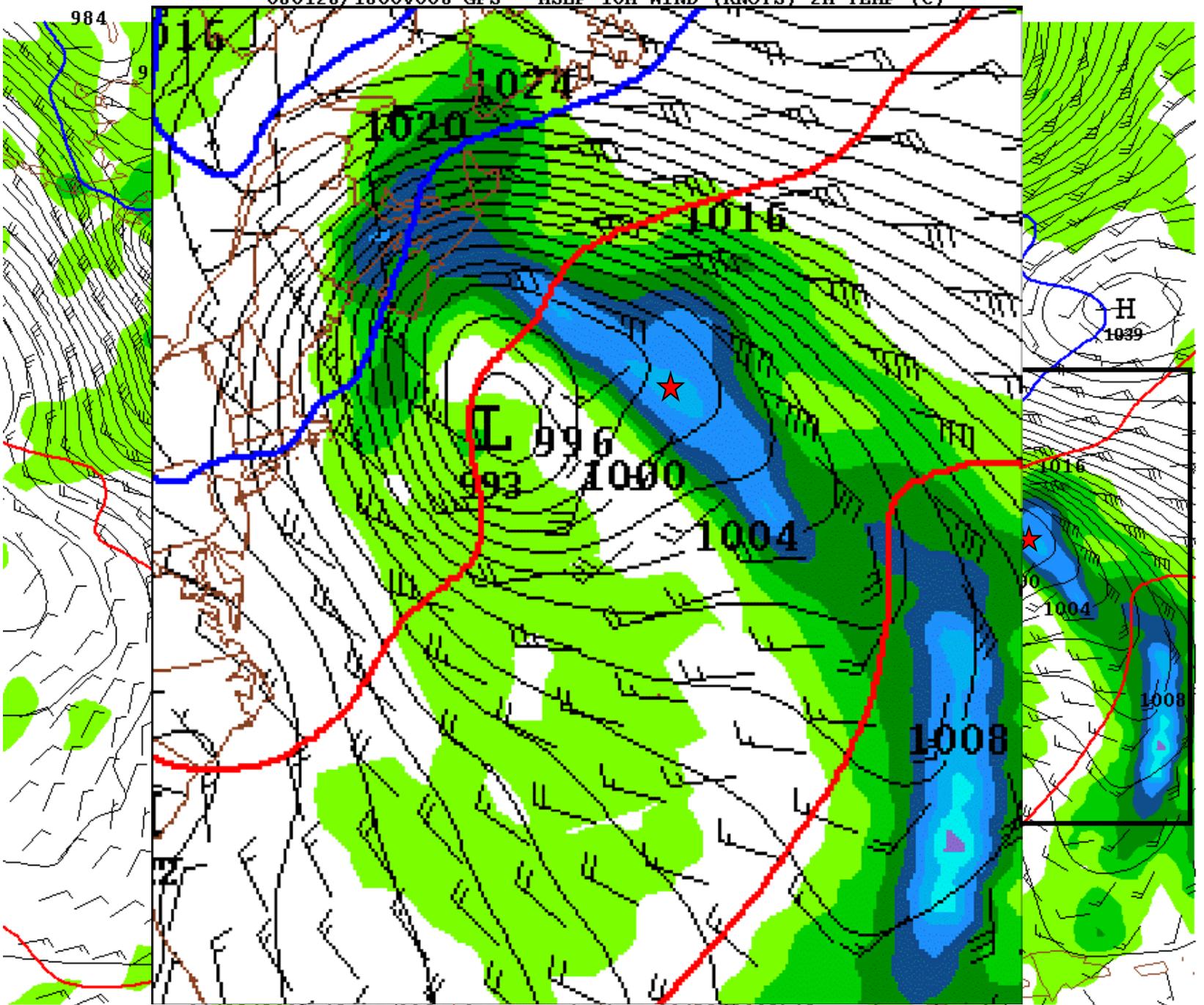
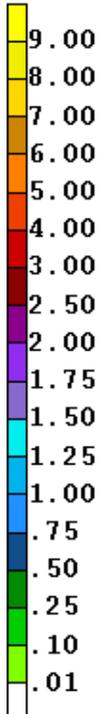


Convergence 1



Convergence 2

Précip. 6h
(pouce)



Résumé

- Rosée et frimas : condensation sur les surfaces quand celles-ci refroidissent au dessous du point de rosée ou de frimas de l'air.
 - Rosée : le point de rosée est supérieure à 0°C
 - Rosée gelée : la température de la surface $< 0^{\circ}\text{C}$ et le point de rosée de l'air est $> 0^{\circ}\text{C}$.
 - Frimas : le point de rosée de l'air est $< 0^{\circ}\text{C}$
- Brouillard : condensation proche de la surface
 - Brouillard de pente : refroidissement adiabatique
 - Brouillard de radiation : refroidissement par pertes radiatives
 - Brouillard d'advection : refroidissement par conduction (air chaud sur surface froide). La température de l'air est inférieure à celle de la surface.
 - Fumée de mer : brouillard formée par addition de vapeur d'eau et mélange de masses d'air. La température de l'air est inférieure à celle de la surface
 - Brouillard d'évaporation : addition de vapeur d'eau par évaporation de la pluie dans l'air. La température de l'air est inférieure à celle de la surface.

Résumé (suite)

- Refroidissement adiabatique :
 - La loi de Poisson : $T_f = T_i \cdot (p_f / p_i)^{R/c_p}$
 - Température potentielle : $\theta = T_i \cdot (1000 \text{ hPa} / p_i)^{R/c_p}$
 - Taux de refroidissement adiabatique sans condensation, $\Gamma_d = 10^\circ\text{C}/\text{km}$
 - Taux de refroidissement adiabatique avec condensation, $\Gamma_s < 10^\circ\text{C}/\text{km}$

- Nuages : condensation en hauteur, donc par soulèvement de l'air
 - Convection naturelle
 - Orographie
 - Convergence
 - Centre de haute pression
 - Fronts
 - ...

À venir...

La stabilité atmosphérique



Démonstration physico-mathématique de quelques formules du cours

- Équation de Poisson
- Température potentielle
- Taux de refroidissement adiabatique

Température potentielle, θ

La **température potentielle** d'un fluide est celle qu'il aurait si on comprimait/détendait celui-ci adiabatiquement vers un niveau de pression standard. Cette notion est surtout utilisée en météorologie et en océanographie.

Dans le cas de l'atmosphère, on effectue le calcul pour trouver la température qu'aurait la parcelle d'air à la pression de 1000 hPa, pression près de la normale à la surface de la Terre.

On utilise le premier principe de la thermodynamique (conservation d'énergie) pour trouver l'expression de θ en fonction de la température et des pression initiales de la parcelle d'air, considéré comme un gaz parfait

Premier principe de la thermodynamique

$$\left. \begin{array}{l} \delta Q = dH - V \cdot dp \\ \text{Gaz parfait : } dH = m \cdot c_p \cdot dT; V = \frac{m \cdot R_d \cdot T}{p} \end{array} \right\} \Rightarrow \delta Q = m \cdot c_p \cdot dT - \frac{m \cdot R_d \cdot T}{p} \cdot dp$$

Température potentielle, θ (suite)

Premier principe de la thermodynamique

$$\left. \begin{array}{l} \delta Q = dH - V \cdot dp \\ \text{Gaz parfait : } dH = m \cdot c_p \cdot dT; V = \frac{m \cdot R_d \cdot T}{p} \end{array} \right\} \Rightarrow \delta Q = m \cdot c_p \cdot dT - \frac{m \cdot R_d \cdot T}{p} \cdot dp$$

Dans le cas adiabatique, $\delta Q = 0$

On intègre l'équation différentielle à gauche entre l'état initial et l'état final :

$$\begin{aligned} \frac{m \cdot c_p \cdot dT}{m \cdot T} - \frac{m \cdot R_d \cdot T}{m \cdot p \cdot T} dp &= 0 \\ c_p \cdot \frac{dT}{T} - R_d \cdot \frac{dp}{p} &= 0 \end{aligned} \quad \left| \int_{T_i}^{T_f} c_{pd} \cdot \frac{dT}{T} - \int_{p_i}^{p_f} R_d \cdot \frac{dp}{p} = 0 \right. \quad \left. T_f = T_i \cdot \left(\frac{p_f}{p_i} \right)^{R_d / c_{pd}} \right.$$

$$c_{pd} \cdot \ln \left(\frac{T_f}{T_i} \right) = R_d \cdot \ln \left(\frac{p_f}{p_i} \right)$$

Température potentielle, θ (suite)

$$T_f = T_i \cdot \left(\frac{p_f}{p_i} \right)^{R_d / c_{pd}}$$

Équation de Poisson : permet le calcul de la température avec la variation de pression de l'air sec (ou humide sous-saturé), dans le cas d'un procédé adiabatique.

$$\theta = T_i \cdot \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{R_d / c_{pd}}, \quad p_0 = 1000 \text{ hPa}, \quad p_i \text{ en hPa}$$

Température potentielle : La température d'une parcelle d'air que subit une compression ou détente adiabatique jusqu'à que sa pression finale soit égale à 1000 hPa.

Important : La température potentielle des parcelles d'air se conserve pendant des déplacements où les échanges de chaleur entre les parcelles d'air et leur environnement est négligeable

Taux de refroidissement adiabatique, $\Gamma_d = g/c_p$

Le taux de refroidissement adiabatique, $\Gamma_d = -dT/dz$, quantifie la variation de température d'une parcelle en mouvement verticale dans un environnement qui est à l'équilibre hydrostatique.

$$\left. \begin{aligned} c_p \cdot dT - \frac{R_d \cdot T}{p} \cdot dp &= 0 \\ dp &= -\rho \cdot g \cdot dz = -\frac{p}{R_d \cdot T} \cdot g \cdot dz \end{aligned} \right\} c_p \cdot dT - \frac{R_d \cdot T}{p} \left(-\frac{p}{R_d \cdot T} \right) \cdot g \cdot dz = 0$$

$$c_p \cdot dT + g \cdot dz = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p}$$

Dans le cas de l'air sec de notre planète :

$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_{pd}} \cong \frac{10}{1000} \text{ K/m} = 0,01 \text{ K/m} = 10 \text{ K/km}$$