



# Introduction à la Météorologie SCA2611



## Table des matières

### 9. Circulation thermique du vent

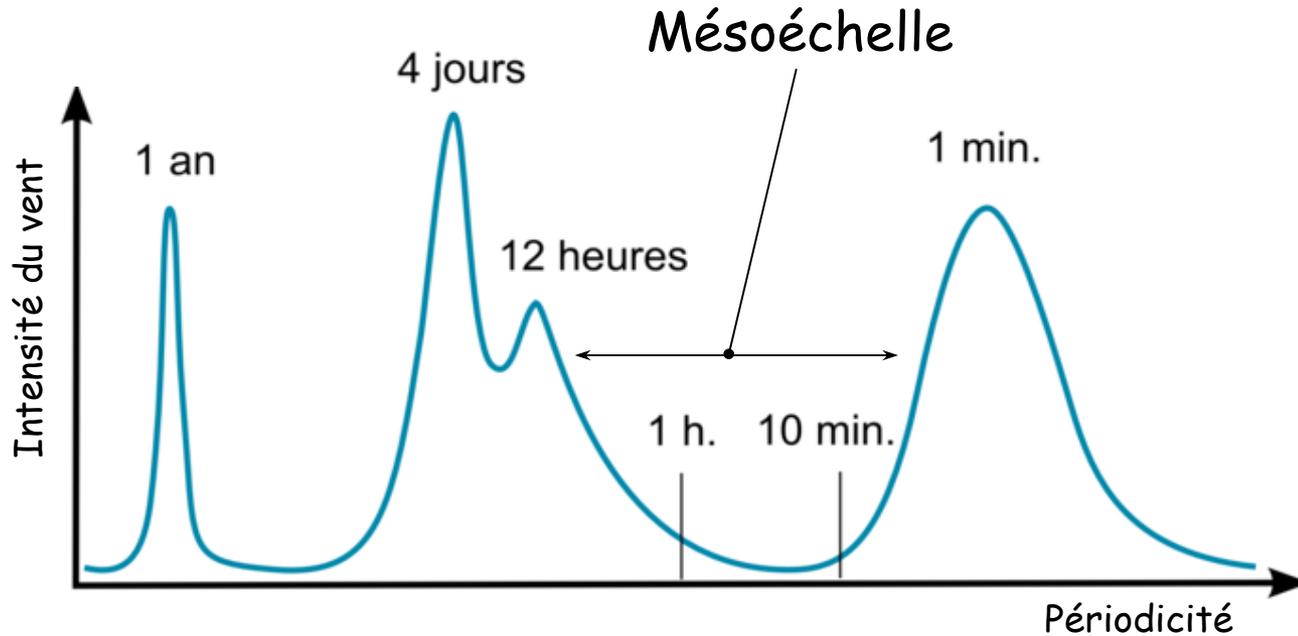
- Le gradient de pression
- Classification des phénomènes météorologiques
- Les brises
  - La brise de mer ou de lac
  - La brise de terre
  - La brise de vallée et de montagne
    - Vents anabatique et catabatique
- La mousson
- Le virage graduel de la brise
  - La force de Coriolis

# Échelles caractéristiques des phénomènes météorologiques

Globale 5 000 km et plus					Ondes planétaires
Synoptique 2 000 - 5 000 km					Cyclones et anticyclones aux latitudes moyennes, fronts
Méso $\alpha$ 200 - 2000 km				Petits ouragans, faibles anticyclones, vent de Chinook	Ouragans, tempêtes tropicales, les moussons
Méso $\beta$ 20 - 200 km			Systemes convectifs, brises, orages XL		
Méso $\gamma$ 2 - 20 km		Cellules orageuses, gros cumulus			
Micro $\alpha, \beta, \gamma$ et $\delta$ jusqu'à 2 km	Petits tourbillons	Tornades, trombes t. et m., t. de poussière			
	sec - 3 min	3 - 30 min	30 min - 6 h	6 h - 2 j	2 j - 7 j et plus

# Périodicités du vent horizontal

## Spectre de Van der Hoven



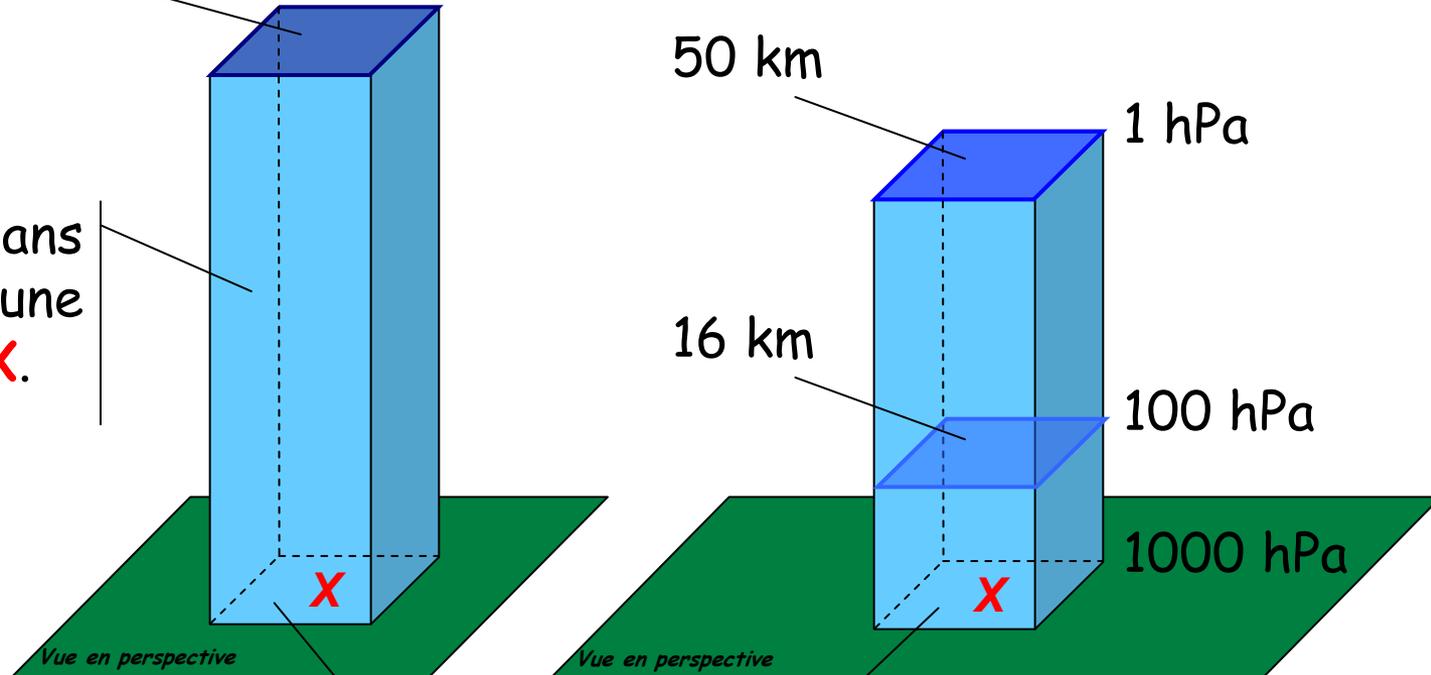
- 1 an** : cycle annuel
- 4 jours** : cycle des systèmes à la grande échelle (dépressions et anticyclones)
- 12 heures** : cycle journalier (vents locaux)
- ~1 minute** : turbulence, dissipation visqueuse

# Le gradient de pression

# La pression

Sommet de l'atmosphère

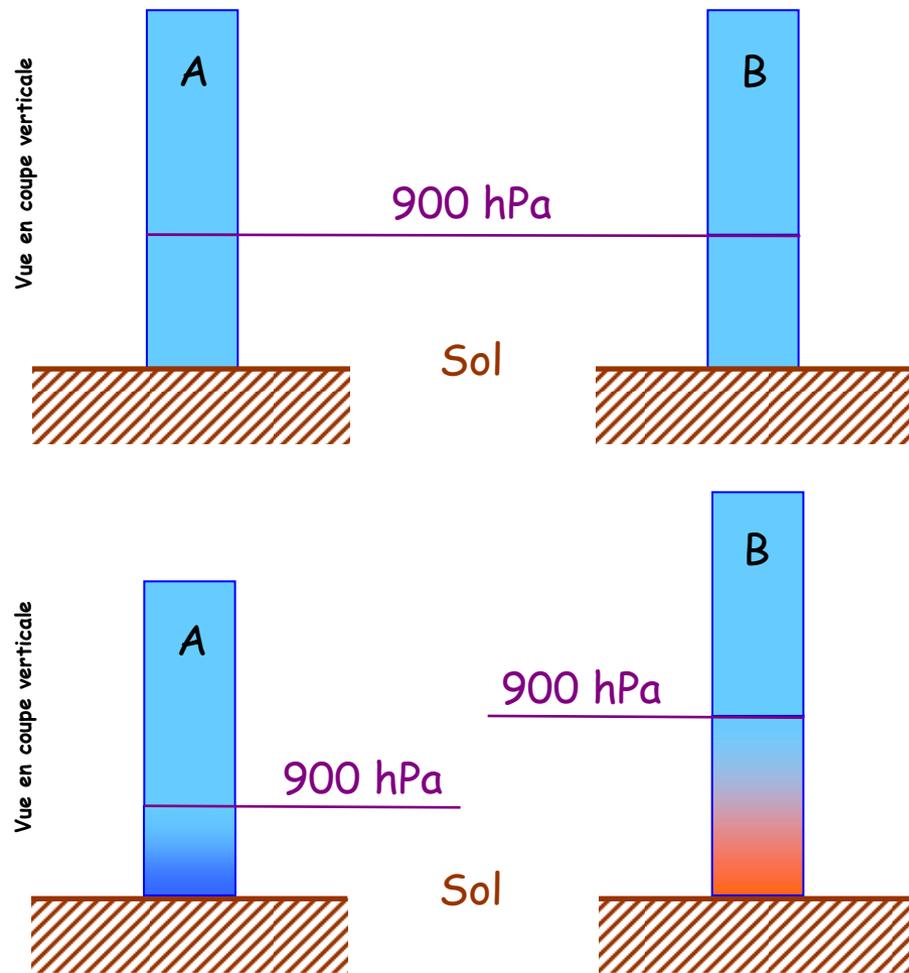
Le poids de l'air dans la colonne exerce une pression au point X.



Surface unitaire

- La pression atmosphérique est la force par unité de surface exercée par le poids de l'air au-dessus de la surface. Au point X la pression augmente ou diminue en fonction du poids de la colonne d'air au-dessus.
- L'air étant compressible, la gravité comprime la majeure partie de la masse atmosphérique près de la surface de la Terre.

# Niveaux de pression et température ★ ★ ★ 9-6

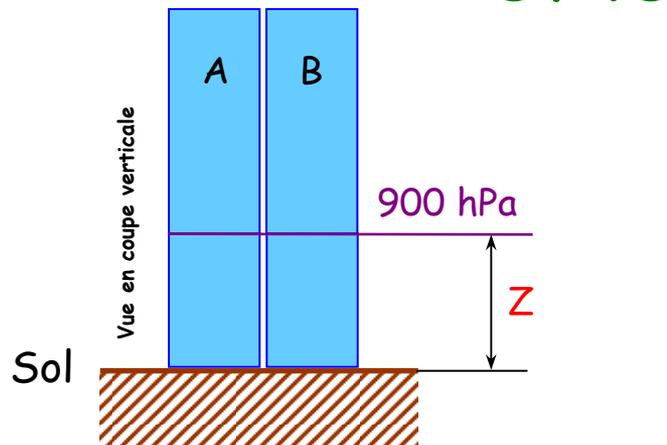


← À côté : la colonne A et B ont la même température. La hauteur du niveau 900 hPa est la même pour les deux colonnes.

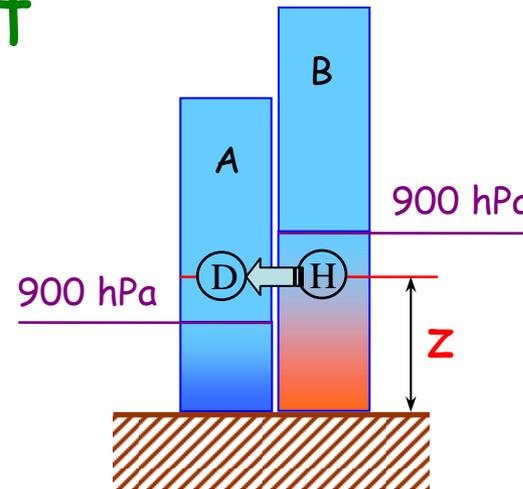
↙ En bas : on a refroidi la partie inférieure de la colonne A et réchauffé celle de la colonne B. Or, d'une part la hauteur du niveau 900 hPa de la colonne A a diminué car l'air plus froid est plus dense. D'autre part la hauteur du niveau 900 hPa de la colonne B a augmenté car l'air plus chaud est moins dense.

⇒ La hauteur d'un niveau de pression varie en fonction de la température de la colonne d'air en dessous.

# Le gradient horizontal de pression et le vent



- Considérons deux colonnes d'air de la même masse.

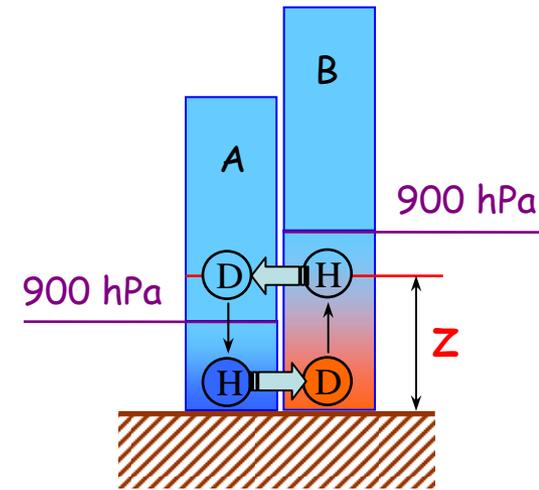


- On refroidit la partie inférieure de la colonne A qui se comprime et on réchauffe celle de la colonne B qui se dilate.

- La masse d'air dans la colonne B au-dessus du niveau  $Z$  est plus grande que dans la colonne A. Pour cela, la pression au niveau  $Z$  est plus élevée dans la colonne B que dans la colonne A.
- L'air se déplacera du sommet de la colonne B vers le sommet de la colonne A en réponse au gradient horizontal de pression.

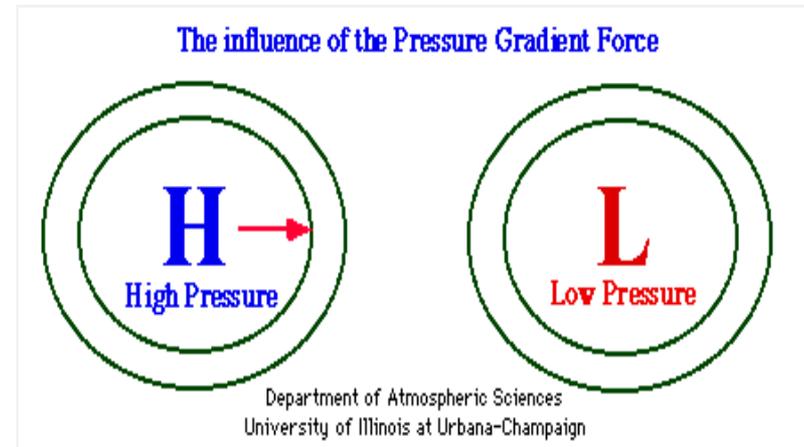
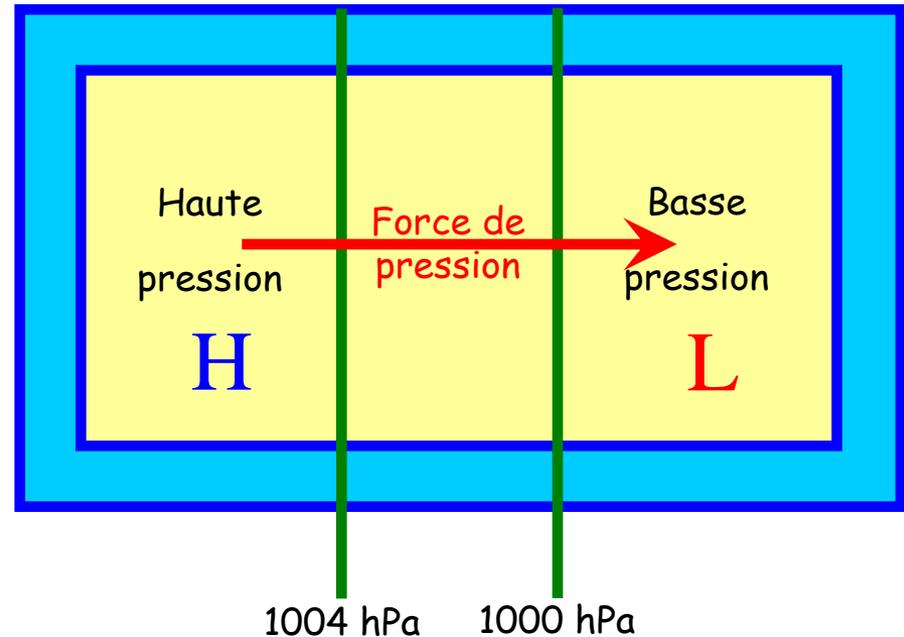
# Le gradient horizontal de pression et le vent

- Puisque la masse d'air dans la colonne B diminue, la pression de surface diminue aussi.
  - Comme la masse dans la colonne A augmente, la pression à la surface augmente aussi.
  - Un flux d'air à la surface de la colonne A vers la colonne B en découle.
  - Des mouvements verticaux s'établissent aussi en réponse aux écoulements horizontaux ce qui établit une circulation de l'air.
- La différence de pression entre deux points de même altitude, ou gradient horizontal de pression, est la plus importante force motrice du vent.

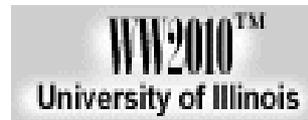


# L'action du gradient de pression

- Le gradient de pression donne lieu à une force nette dirigée de la haute pression vers la basse pression qui est appelée "force du gradient de pression".
- Un gradient de pression de 10 hPa sur 1000 km donne une force de l'ordre d'**un dix millième de la gravité**.
- En l'absence d'autres actions, l'air coule des hautes pressions vers les basses pressions.



# Les brises



[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/fw/sea/crc.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/fw/sea/crc.rxml)

# La brise de mer/lac

- La brise de mer/lac est un vent local dont l'échelle spatiale est de quelques dizaines de kilomètre.  
*(En Basse-Côte-Nord, elle peut être ressentie jusqu'à une quinzaine de milles marins au large et elle peut atteindre 25 noeuds.)*

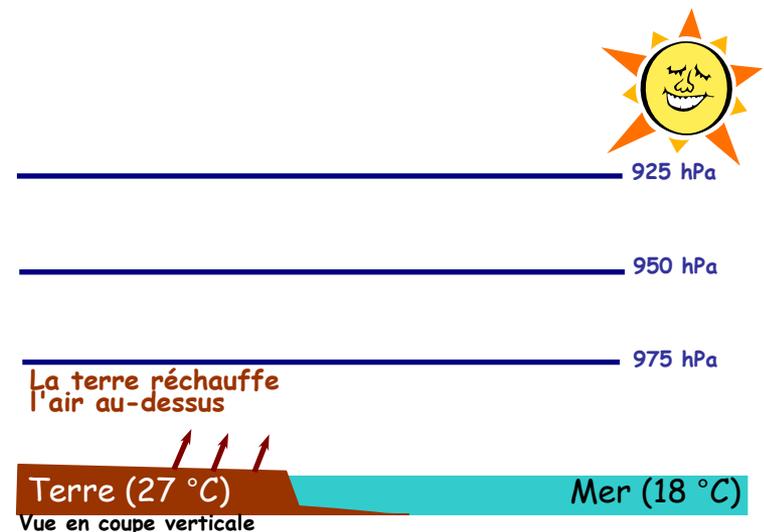
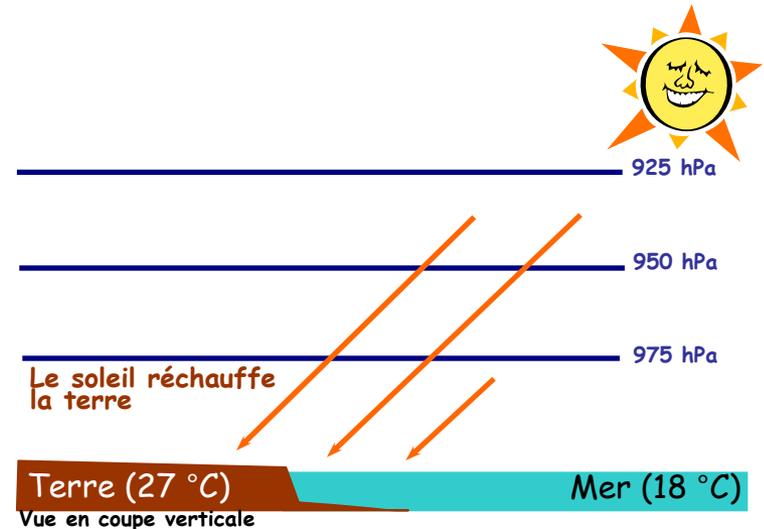
Dans l'histoire :

800 av. J.-C. : Homère parle de la brise de mer en mentionnant que les combattants qui partaient au large au coucher du soleil étaient favorisés.

300 av. J.-C. : Selon Aristote, la brise de mer est une réflexion de la brise de terre. Un obstacle comme une île par exemple est nécessaire afin de produire la brise de mer.

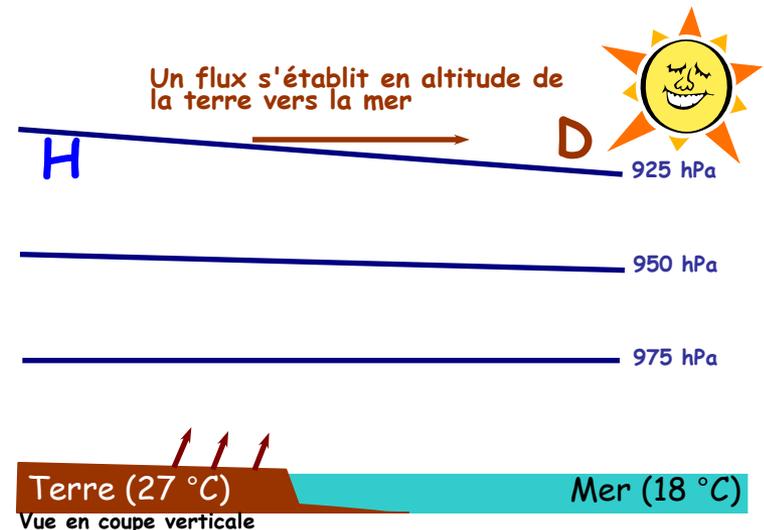
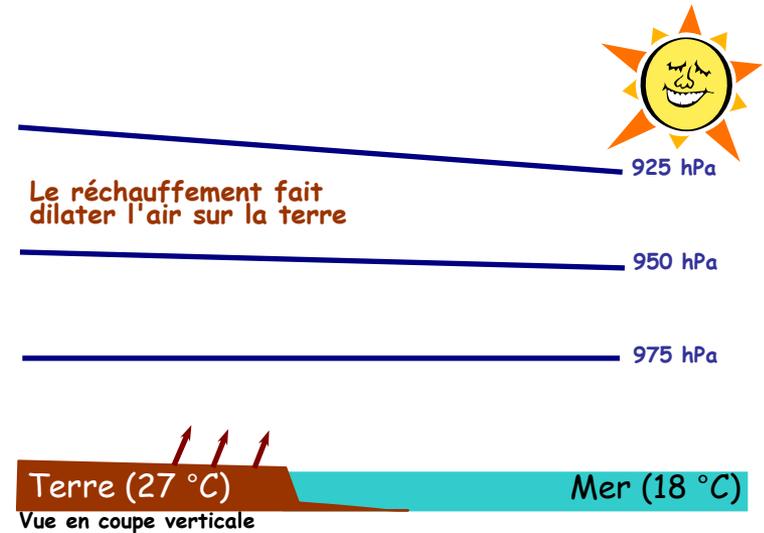
# La brise de mer/lac

- Soient des conditions isothermes et isobares à la surface, tôt un matin, par vent calme.
- Quelques heures plus tard la température de la terre augmente tandis que celle de l'eau demeure à peu près constante grâce à la grande capacité calorifique de l'eau.
- L'air n'est pas réchauffé directement par le soleil mais plutôt indirectement par la surface. Donc au-dessus de la terre l'air est plus chaud qu'au-dessus de l'eau. Ce réchauffement peut affecter typiquement une couche de 1000 à 1500 m d'épaisseur.



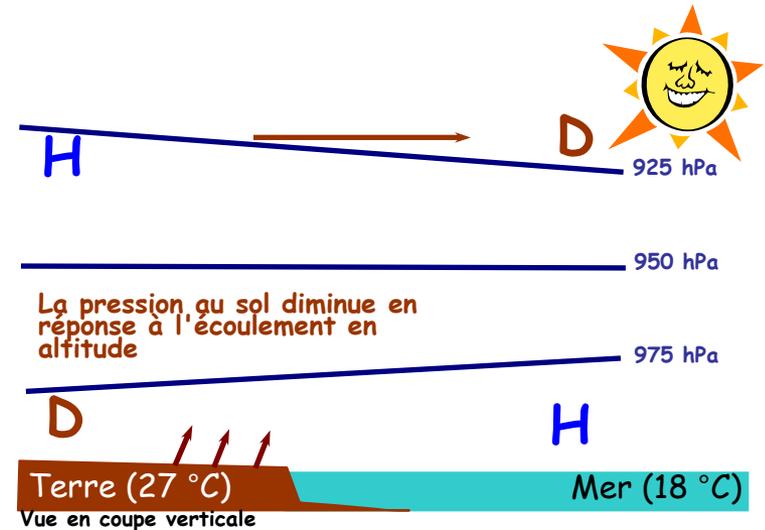
# La brise de mer/lac

- Puisque l'air chaud est moins dense, l'air au-dessus de la terre se dilate à partir du sol. Cela provoque une augmentation de la distance entre les surfaces de pression. Au-dessus de l'eau où l'air est très peu réchauffé la distance entre les surfaces de pression reste la même.
- Une zone de haute pression se développe en altitude au-dessus de la terre et par conséquent, une dépression au-dessus de la mer en ressort. Un flux d'air s'établit en altitude de la terre vers la mer à cause de ce gradient de pression.

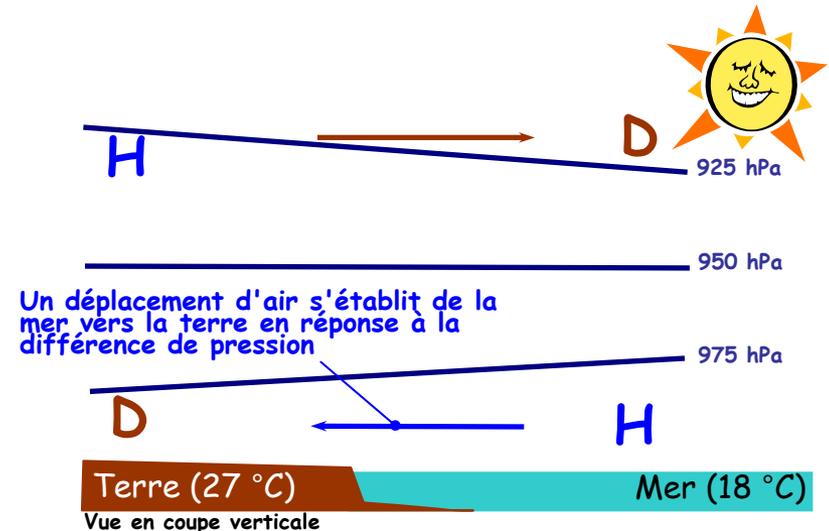


# La brise de mer/lac

- En réponse à l'écoulement en altitude, une dépression se développe en surface sur la terre et une haute pression sur la mer.

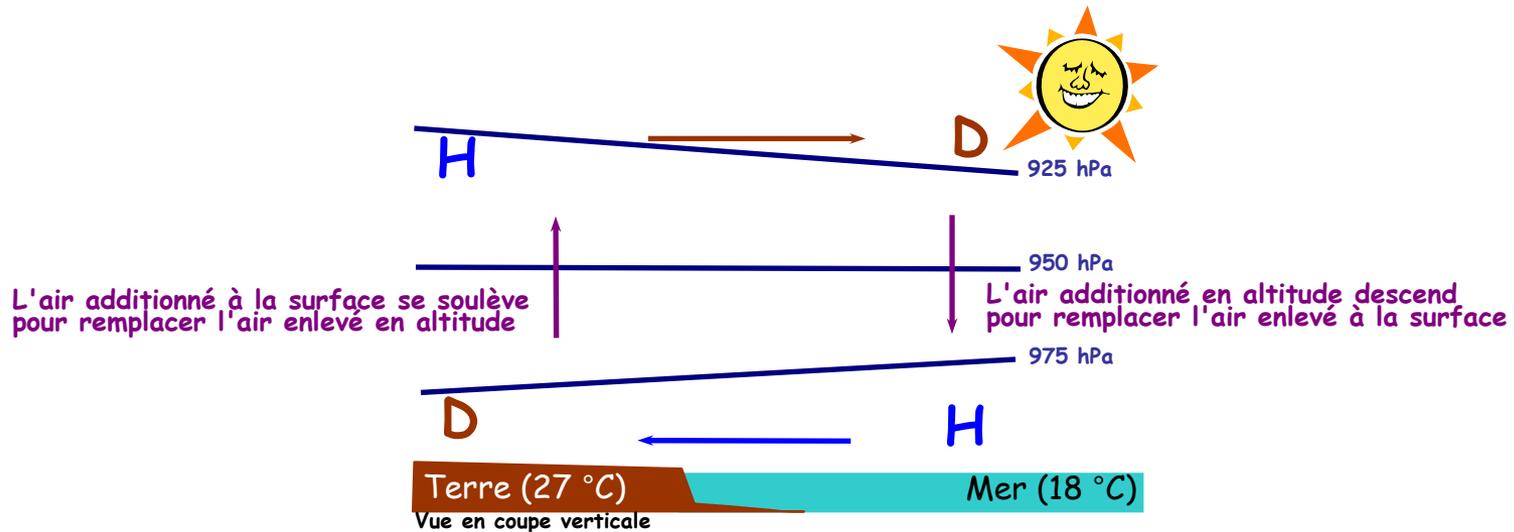


- Un déplacement d'air plus frais s'établit de la mer vers la terre à cause de ce gradient de pression.

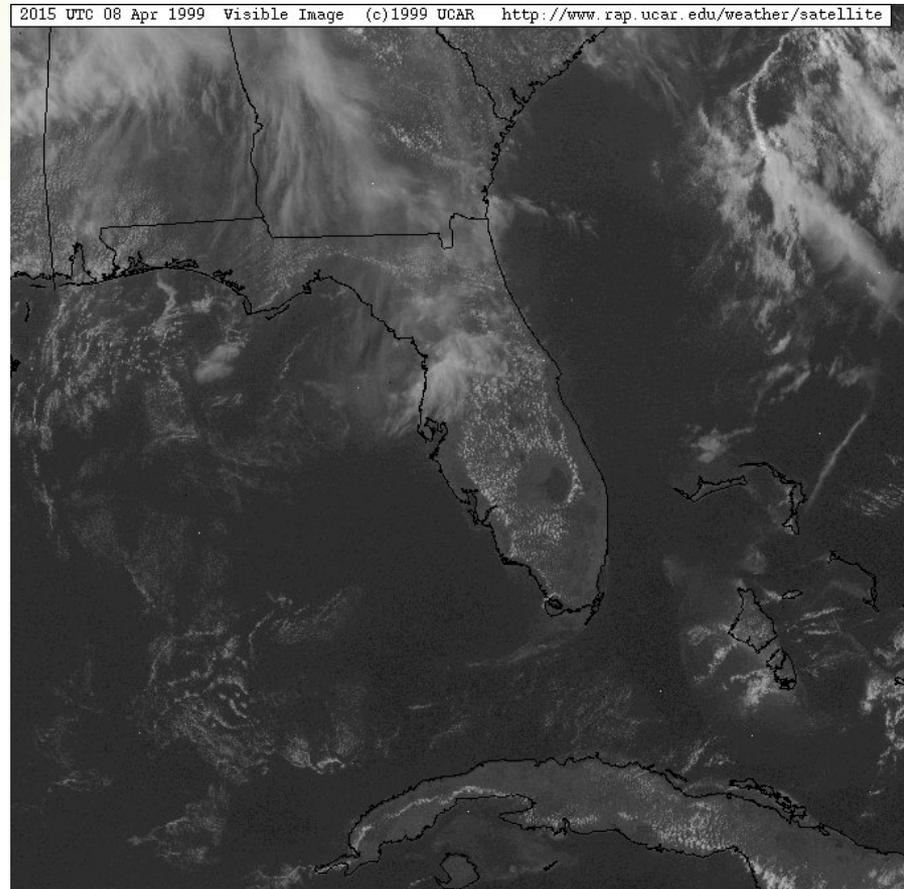
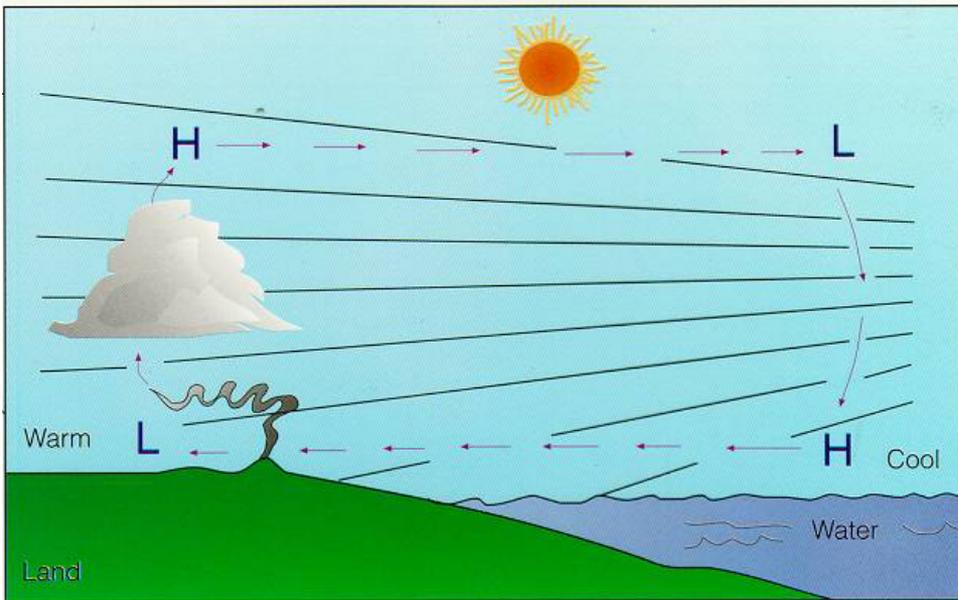


# La brise de mer/lac

- Des mouvements verticaux s'établissent aussi en réponse aux écoulements horizontaux de l'air ce qui complète la circulation de la brise de mer.

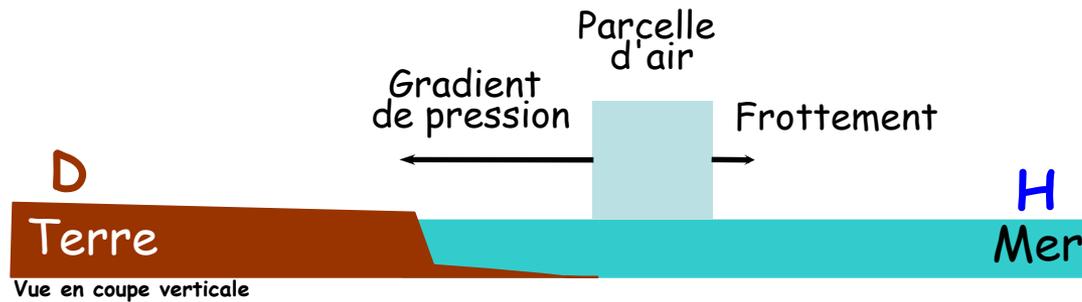


# Nébulosité associée à la brise de mer/lac

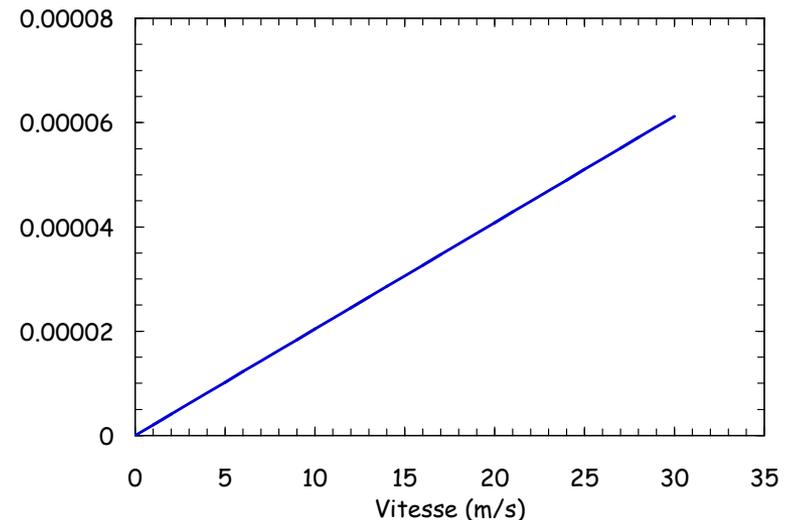


# L'action de la friction à la surface

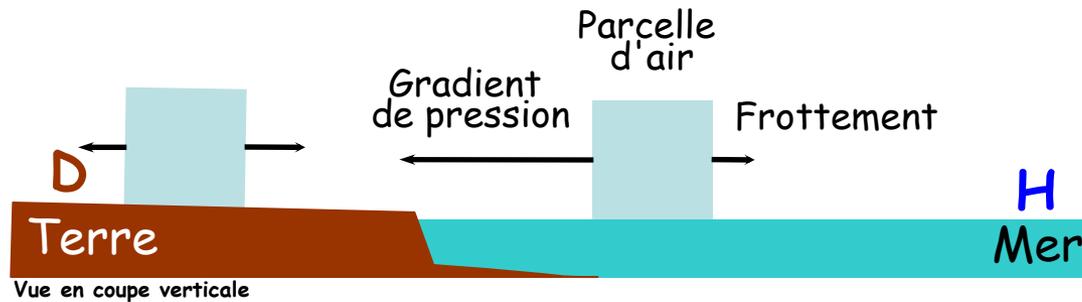
- Pour décrire le mouvement horizontal des parcelles d'air, il faut tenir en compte non seulement de l'action du gradient horizontal de pression, mais aussi du frottement à la surface.



- La friction des parcelles d'air à la surface donne une action proportionnelle à leur vitesse horizontale et de l'ordre d'une **fraction d'un dix millième de la gravité**.



# Étendue horizontale de la brise de mer/lac



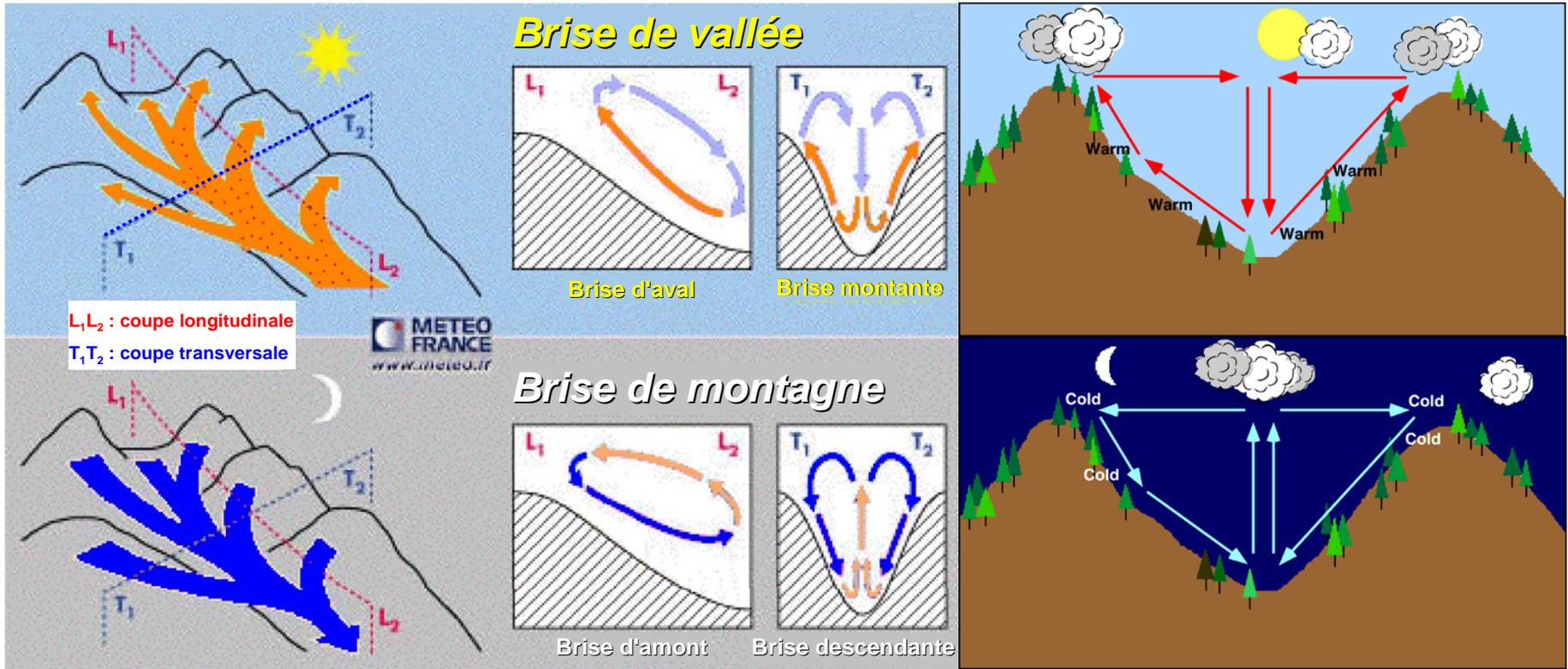
- Au fur et à mesure que la brise franchit de grandes distances dans les terres, le gradient horizontal de pression dû à la différence de température diminue et l'écoulement devient de plus en plus faible à cause du frottement. Éventuellement la brise est complètement stoppée par la friction à la surface attribuable au relief du territoire. La circulation peut parfois pénétrer une distance horizontale d'environ 40 km du bord de l'eau.

# Brise de terre

- Le soir venu, la terre se refroidit très rapidement, mais la température de la mer diminue à peine durant de la nuit. La terre devient ainsi légèrement plus froide que la mer. Une circulation inverse à celle de la brise de mer, mais plus faible, s'installe : c'est la **brise de terre**.

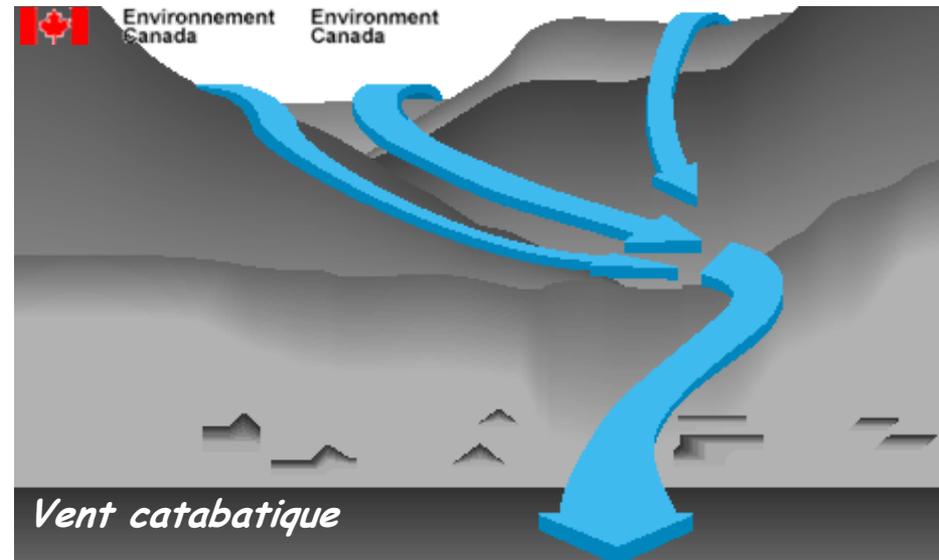
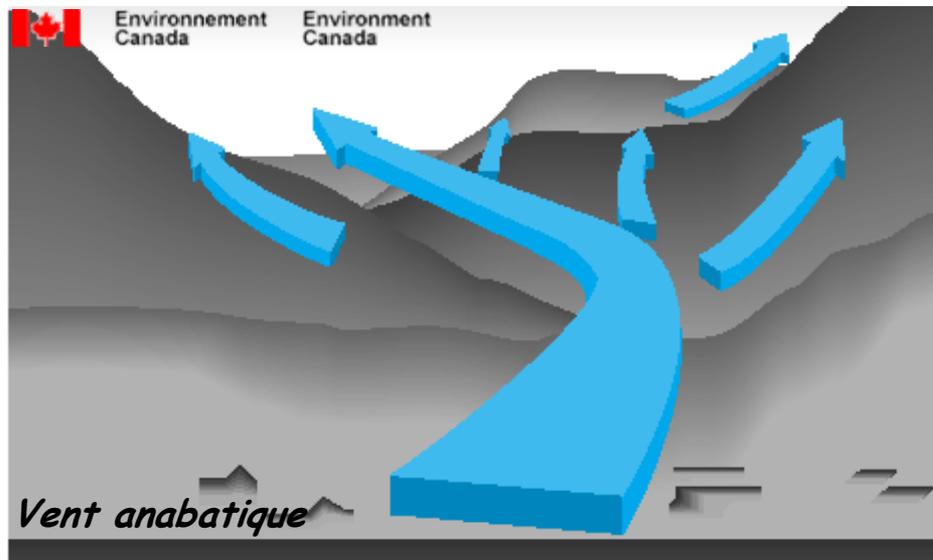


# Brise de vallée et de montagne



- Brise de montagne :**
- **Refroidissement** de l'air près de la surface
  - L'air devient **plus** dense et tend à **descendre** le long de la pente mais **réchauffe** selon le taux adiabatique.
- Après un certain temps, une circulation transversale fermée s'établit aussi.
  - Si les conditions sont propices, la vapeur d'eau dans l'air ascendant atteint la saturation et du nuage de type cumulus se forme.

# Vents anabatique et catabatique

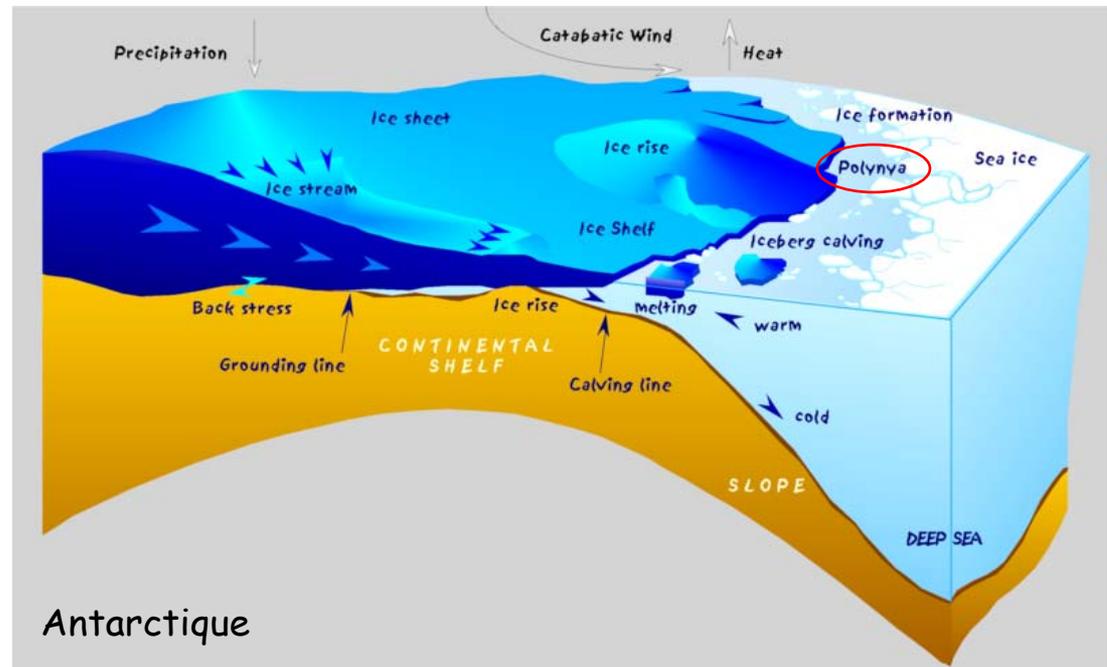


- S'il est causé par un réchauffement/refroidissement local,
  - le vent qui monte la pente d'un relief est appelé anabatique
  - et celui qui la descend, est appelé catabatique.
- Les vents anabatique et catabatique se distinguent des vents de type Chinook. Le Chinook est le résultat d'un forçage par le vent de l'air par-dessus le relief et sa température au sommet de l'obstacle n'est pas dû à un forçage local.

# Vents catabatiques spectaculaires

- Le *Williwaw* (en Arctique et en Antarctique)
- Le *Piterak* (au Groenland, il peut atteindre 260 km/h)
- Le *Mistral* (il concerne la Provence, du Languedoc (Est de Montpellier) au Var (Fréjus), toute la vallée du Rhône (de Lyon à Marseille), et le golfe de Gênes)
- La *Bora* (sur la mer Adriatique, la mer Noire, la Grèce et la Turquie)

Vents catabatiques le long de la côte Antarctique causant une polynie



# La mousson

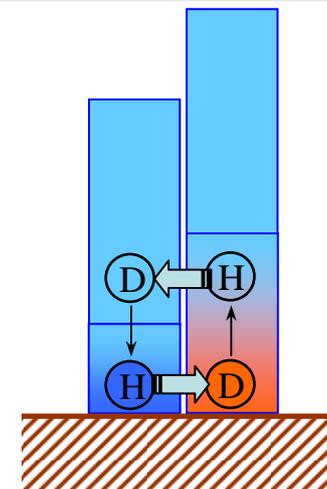
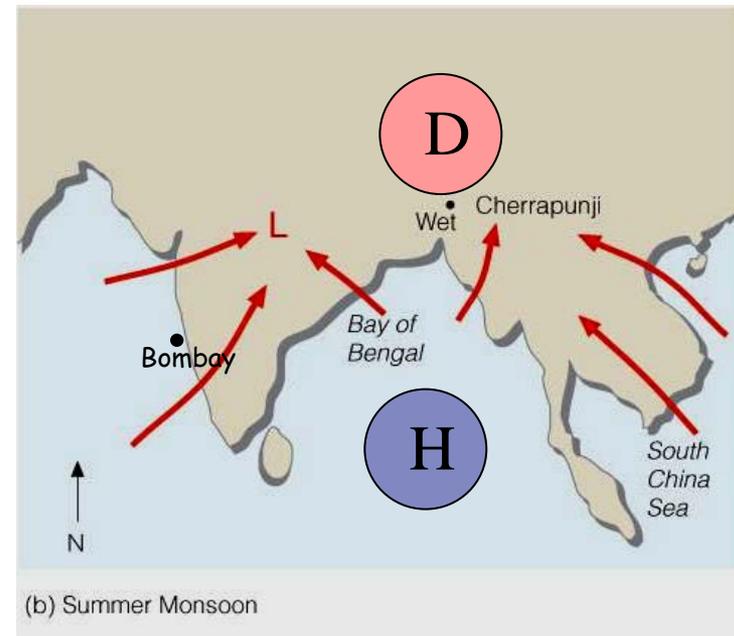
# La mousson

- La mousson est le nom d'un système de vents périodiques, actifs particulièrement dans **l'océan indien et l'Asie du sud**. Le mot mousson proviendrait du mot arabe « *mausim* » qui signifie saison.
- Des systèmes de vents de mousson existent aussi dans les autres continents :
  - Australie,
  - Afrique - entre le Sahara et l'Océan Atlantique,
  - Amérique du Sud - entre le Brésil et l'océan Atlantique et
  - Amérique du Nord - entre le Mexique et l'Arizona et l'océan Pacifique.
- Les moussons sont causées par le fait que la terre s'échauffe et se rafraîchit plus vite que la mer.

# La Mousson d'été

## Océan indien et Asie du sud

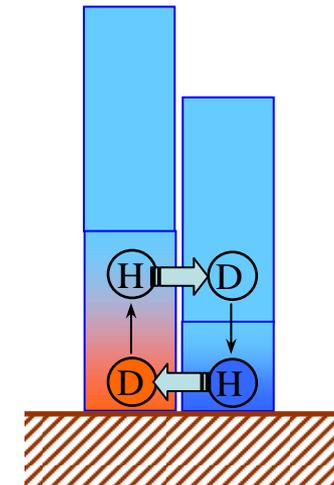
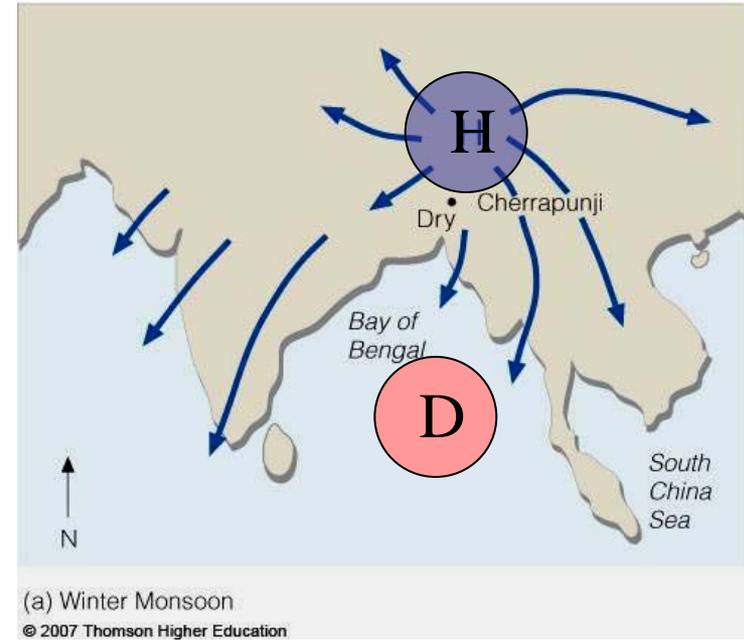
- Au printemps, les températures terrestres s'élèvent progressivement et la terre atteint une température plus élevée que la mer.
- L'air chaud de la terre tend à s'élever, créant une zone dépressionnaire persistante au niveau du sol.
- Cela crée un vent extrêmement constant soufflant de la mer vers la terre.
- Les pluies qui y sont associées deviennent torrentielles à partir de juin.



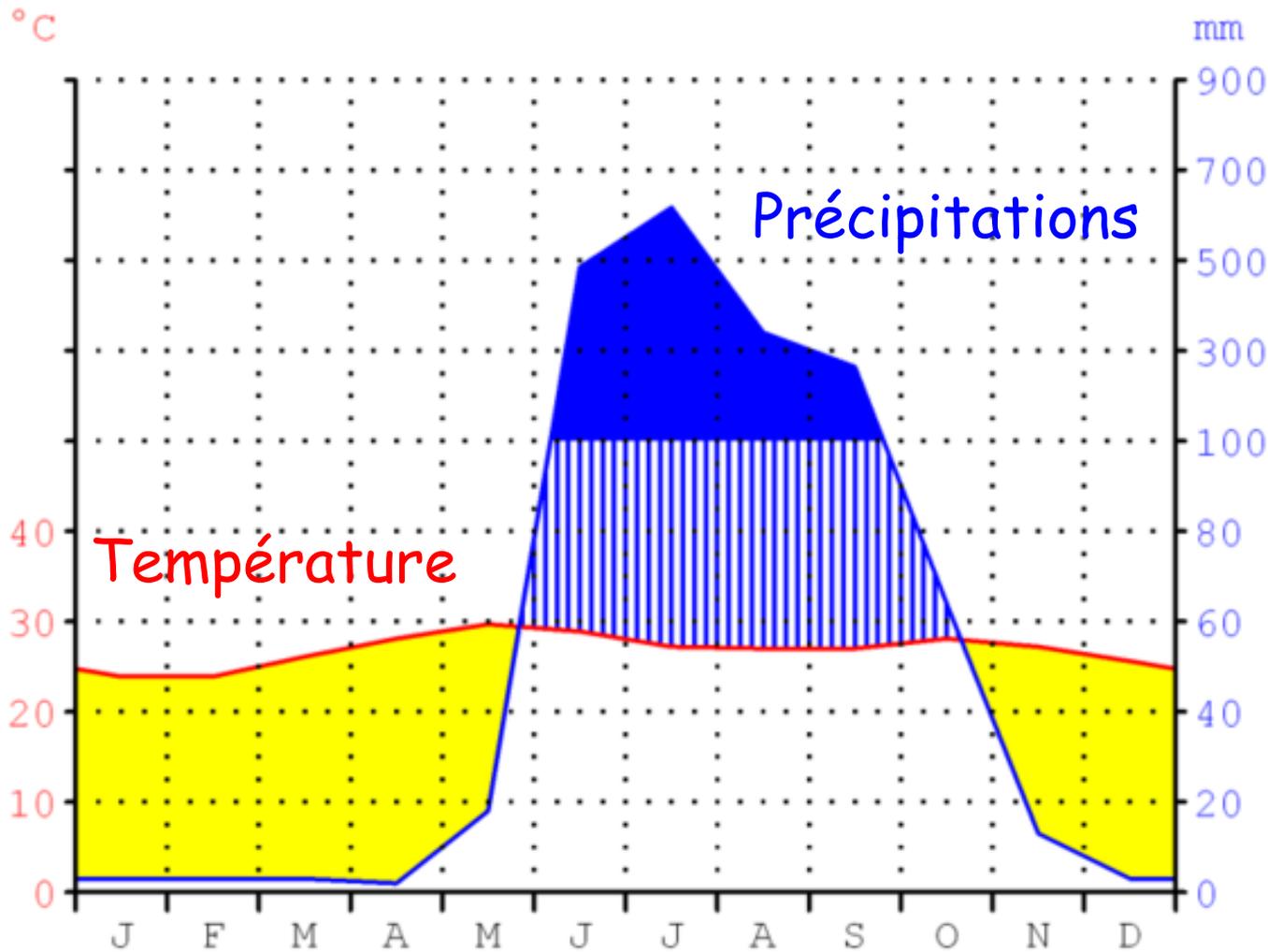
# La mousson d'hiver

## Océan indien et Asie du sud

- En hiver, la terre se rafraîchit plus vite et la mer garde la chaleur plus longtemps.
- L'air frais au-dessus de la terre est plus dense, créant une zone de haute pression et du même coup un vent de la terre vers la mer.
- La différence de température entre la mer et la terre étant moindre qu'en été, le vent de la mousson d'hiver n'est pas aussi constant que celui de la mousson d'été.



# Le hyétogramme de Bombay



Monat	Temp. (°C)	Nied. (mm)
JAN	23,9	3
FEB	23,9	3
MRZ	26,1	3
APR	28,1	2
MAI	29,7	18
JUN	28,9	485
JUL	27,2	617
AUG	27,0	340
SEP	27,0	264
OKT	28,1	64
NOV	27,2	13
DEZ	25,6	3

Temp.-Jahresmittel  
26,9 °C

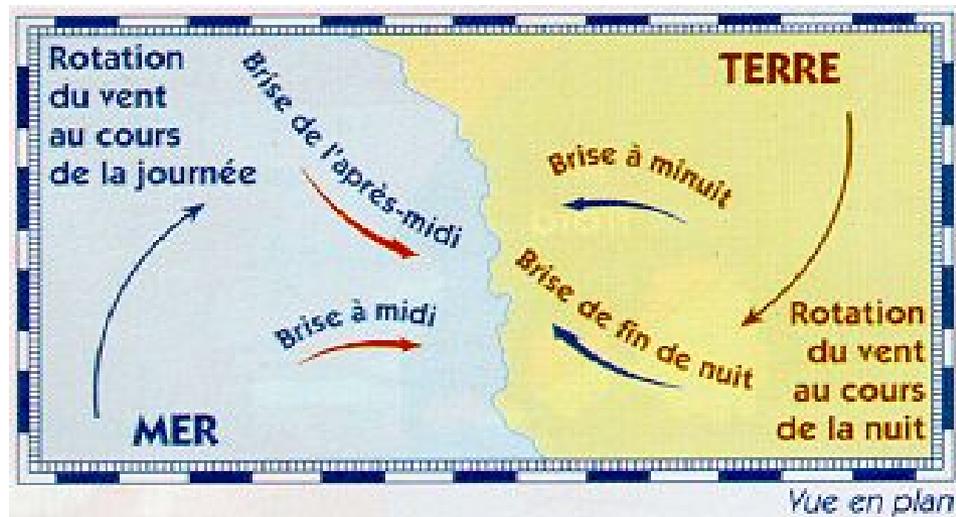
Niederschlagssumme  
1815 mm

# Le virage de la brise de mer

## La force de Coriolis

# Le virage de la brise de mer

- Aux latitudes équatoriales, la brise maintient la même direction perpendiculaire à la côte tout au long de la journée.
- Aux latitudes moyennes dans l'hémisphère nord, le matin la brise est perpendiculaire à la côte. Puis, à mesure qu'elle prend de la force, elle pivote graduellement vers la droite et dans l'après-midi, finit par souffler obliquement à  $45^\circ$  par rapport le littoral.



- Aux latitudes moyennes dans l'hémisphère sud, la situation est identique sauf que le virage du vent s'effectue vers la gauche.

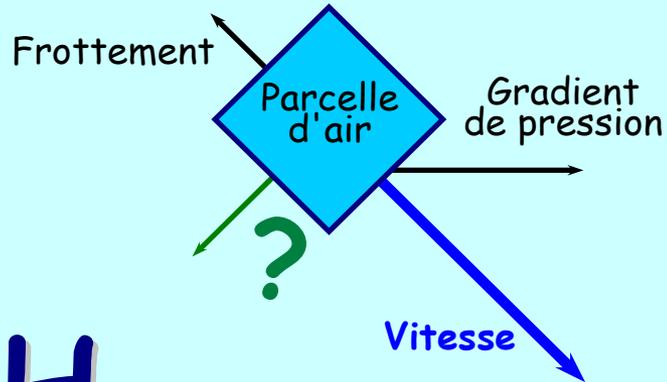
# Le virage de la brise de mer

## Hémisphère nord

Vue en plan

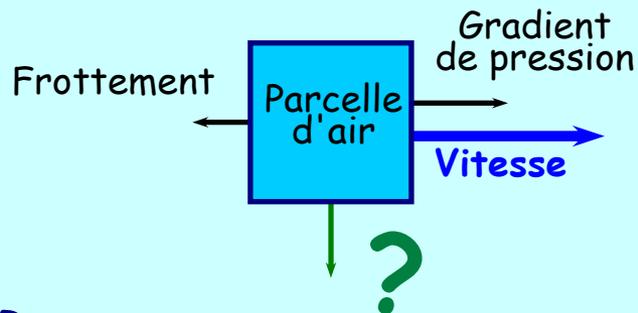
TERRE

*La brise de l'après-midi*



- Le seul gradient de pression et la friction ne permettent pas d'expliquer le virage de la brise !

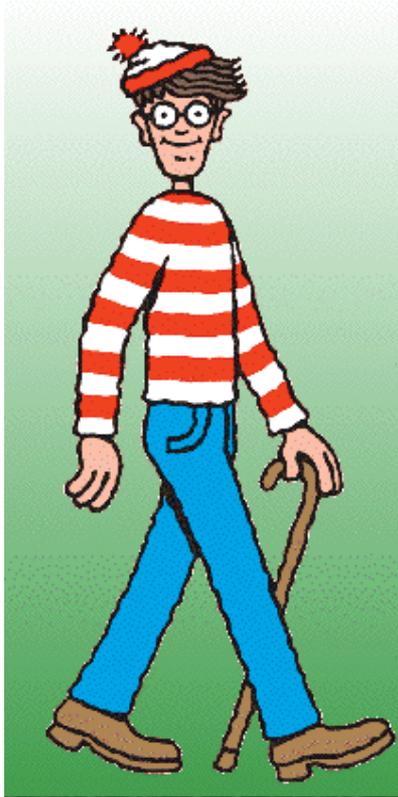
*La brise du matin*



- De toute évidence il manque une action qui agit **à la droite** du mouvement et qui fait virer les parcelles d'air!

MER

# Qu'est-ce qu'on cherche?



On cherche :

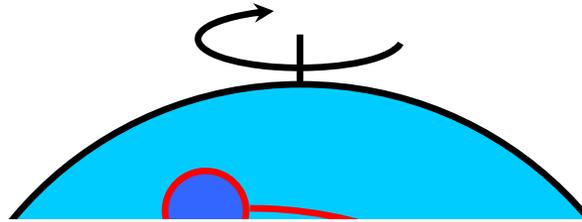
- une action de grandeur comparable au gradient de pression,
- qui se manifeste seulement sur les objets en mouvement,
- nulle à l'équateur,
- **à la droite** du mouvement dans l'hémisphère Nord et
- à la gauche du mouvement dans l'hémisphère Sud.



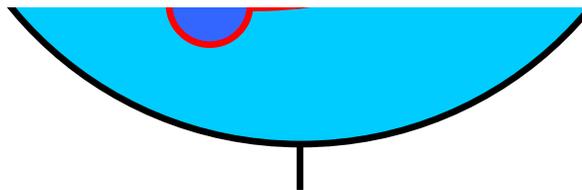
# La force de Coriolis



Gaspard-Gustave Coriolis



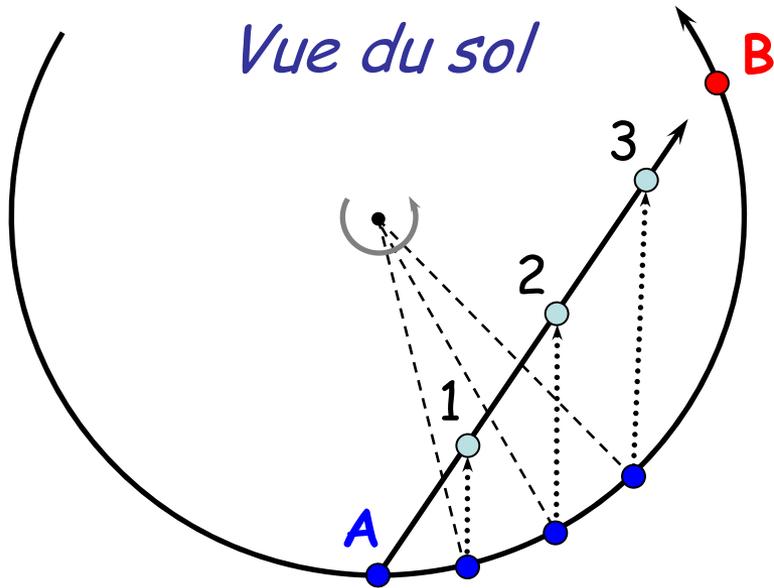
- Soulignons le fait que nous avons regardé l'animation en étant "confortablement" assis à la place d'un observateur-spectateur. Nous avons vu le carrousel et la Terre tourner sans que nous soyons en rotation avec eux!





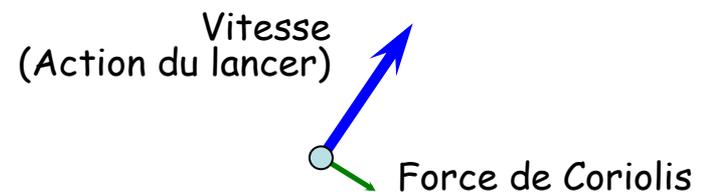
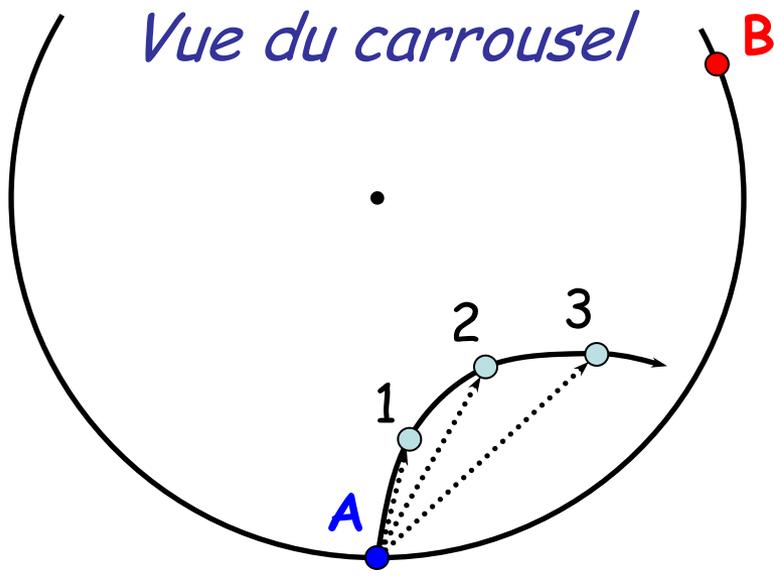
# Sur un carrousel

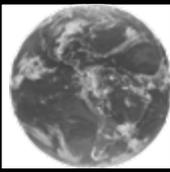
Vue du sol



- "A" lance directement une balle vers "B" pendant que le carrousel tourne.
- Du sol, la trajectoire de la balle est rectiligne mais vue du carrousel, elle est courbée vers la droite et pour cela, "B" n'arrivera pas à attraper la balle.
- Du carrousel, il faut donc considérer l'action du lancer, mais aussi celle de rotation du carrousel (*force de Coriolis*) pour expliquer la trajectoire de la balle.

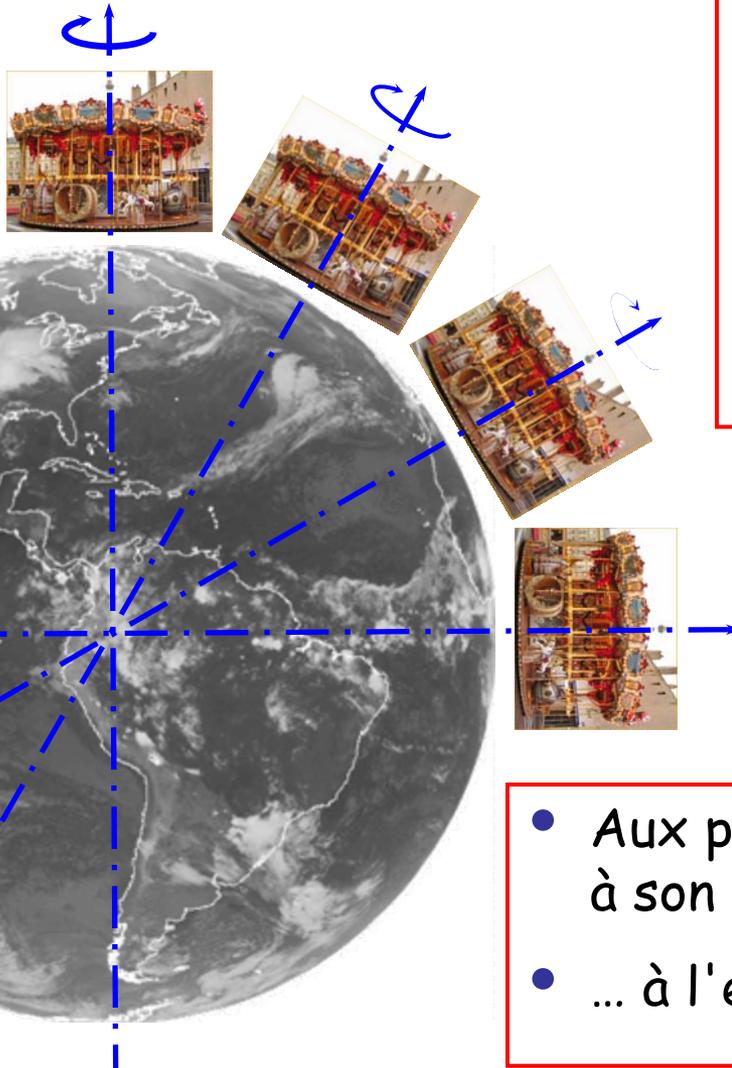
Vue du carrousel





# Sur Terre

- ... mais la Terre n'est pas plate.

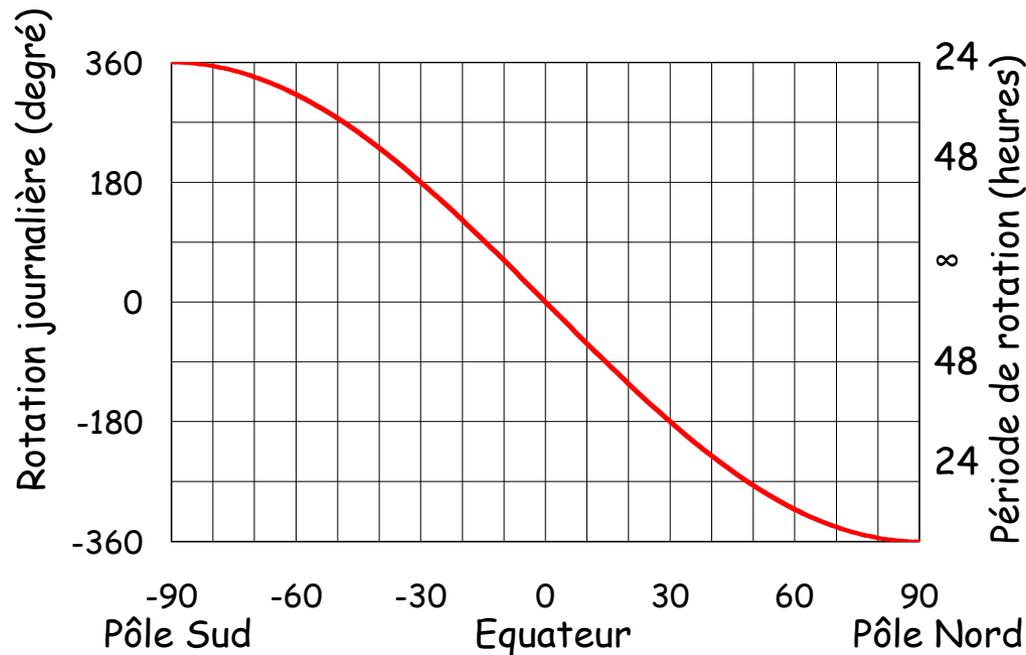


- Vue de l'espace, quelle est la vitesse de rotation du carrousel qui correspond à la vitesse de rotation de la Terre autour d'un axe perpendiculaire à la surface?

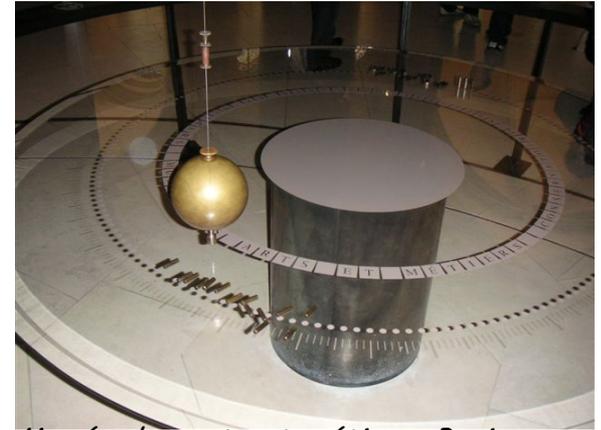
- Aux pôles, l'effet de la rotation est à son maximum,
- ... à l'équateur, il est nul.

# Rotation locale de la Terre

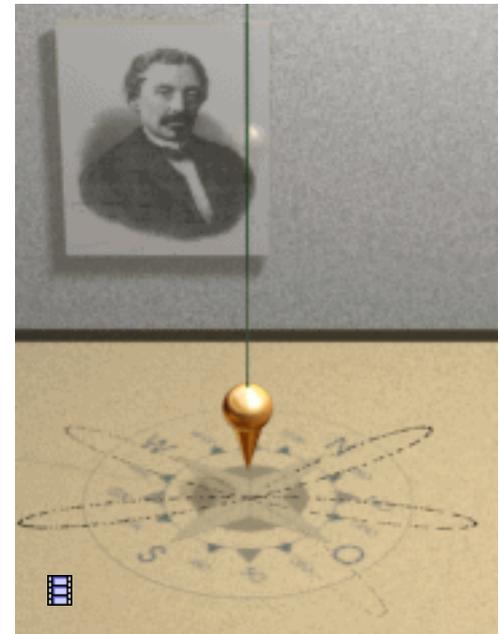
- L'instrument qui mesure la rotation locale de la Terre est le pendule de Foucault.



- Aux pôles, l'effet de la rotation est à son maximum,
- ... à l'équateur, il est nul.



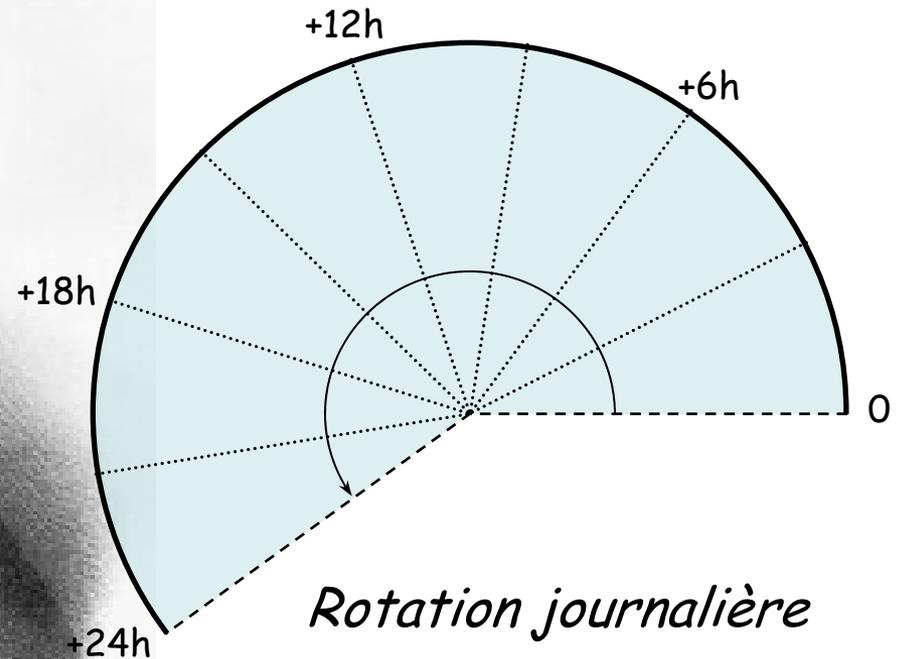
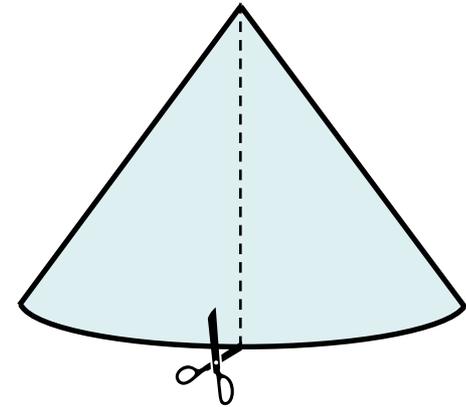
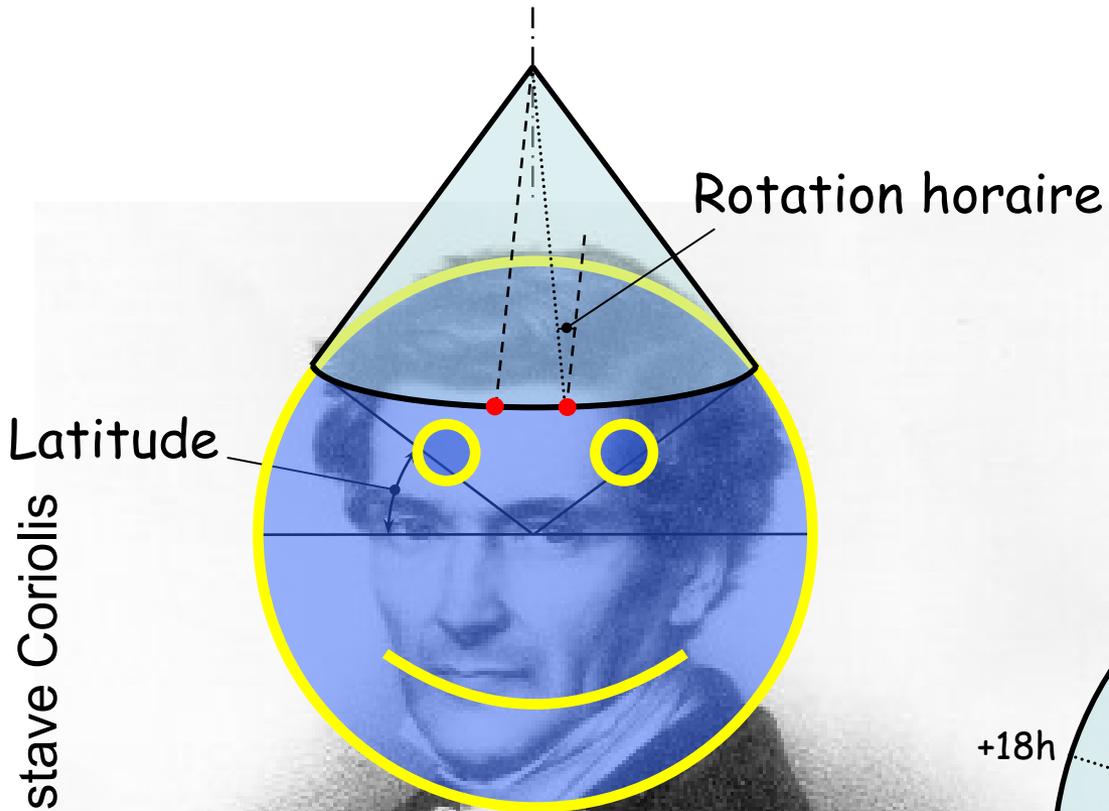
*Musée des arts et métiers, Paris*



*Attention! L'animation est pour l'hémisphère Sud et pour une Terre "speedy".*

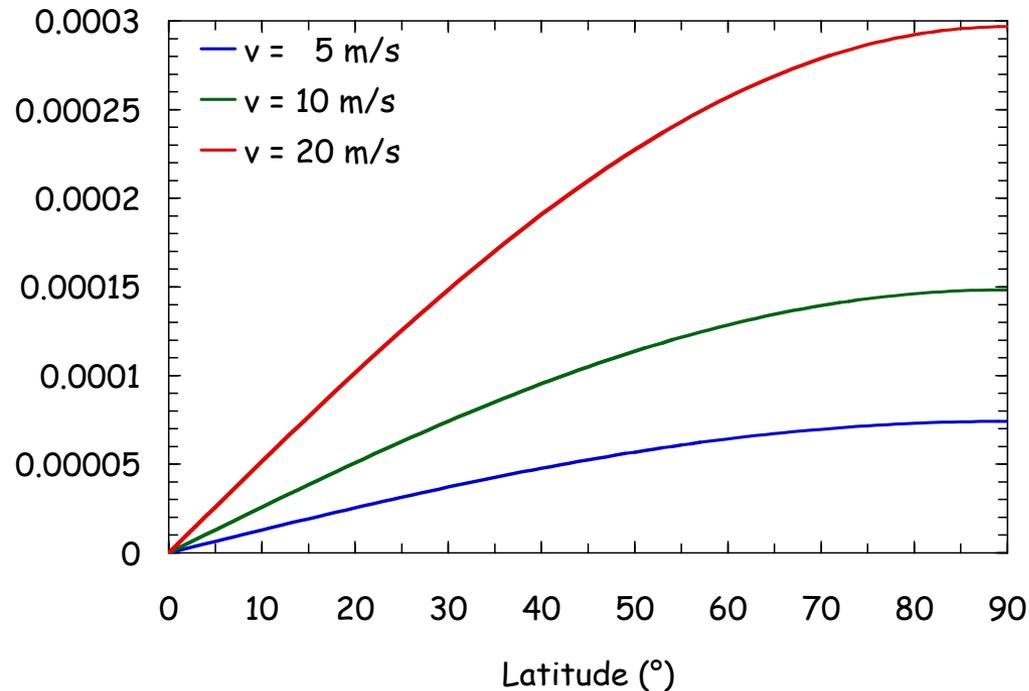
# Turlututu chapeau pointu

*24 h après,  
le chapeau est prêt.*



# La force de Coriolis

- La force de Coriolis est proportionnelle à la rotation locale de la Terre et à la vitesse horizontale de la parcelle.

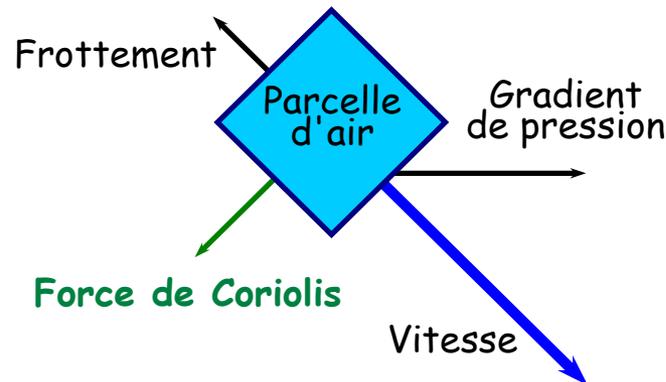


- La force de Coriolis est de l'ordre des **dix millièmes de la gravité**.

# Le virage de la brise de mer

## Hémisphère Nord

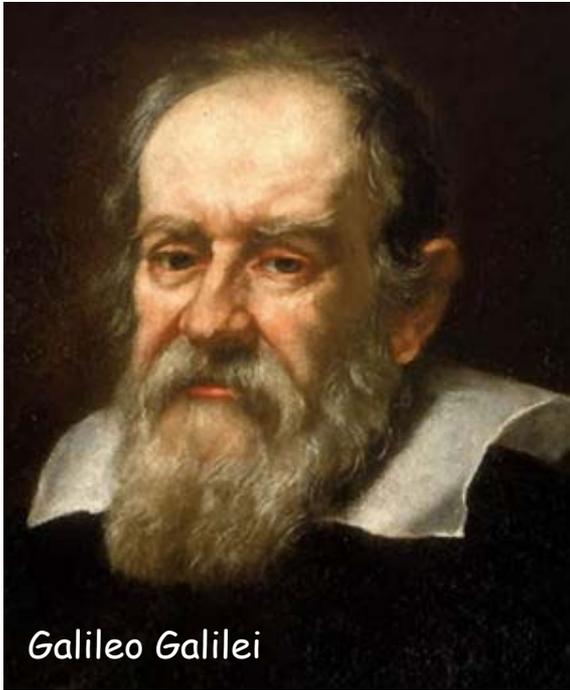
- L'action de la rotation de la Terre (force de Coriolis) sur les mouvements de l'air est comparable à celle du gradient de pression. Son effet se fait ressentir lentement et il est essentiel pour justifier le comportement du vent.



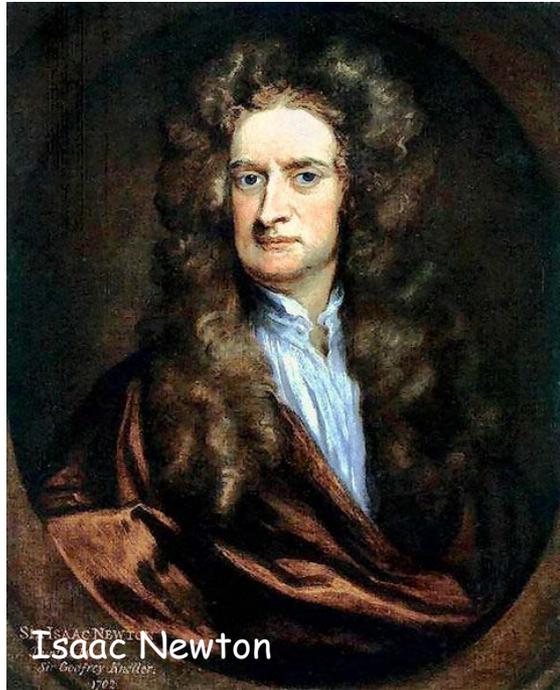
# Les forces qui déterminent le vent

- L'action du **gradient de pression** est à l'origine du vent.
- L'action du **frottement** de l'air sur la surface terrestre s'oppose constamment au vent et le ralentit.  
Le frottement est généralement négligeable en altitude.
- L'action de la **rotation de la Terre** (force de Coriolis) est essentielle pour établir la direction du vent.

La force de Coriolis et le frottement ne sont pas à l'origine des vents, mais apparaissent plutôt lorsque le vent est déjà présent. Leur action modifie la direction et la vitesse du vent.



Galileo Galilei



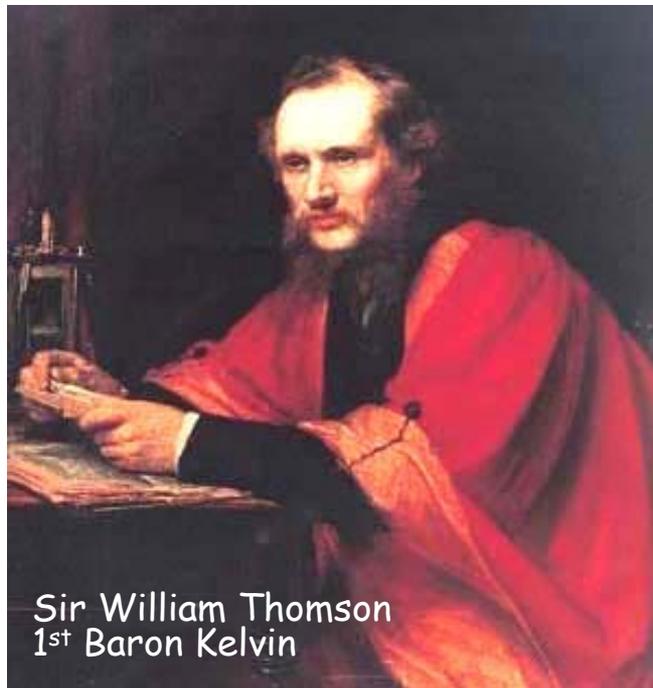
Isaac Newton



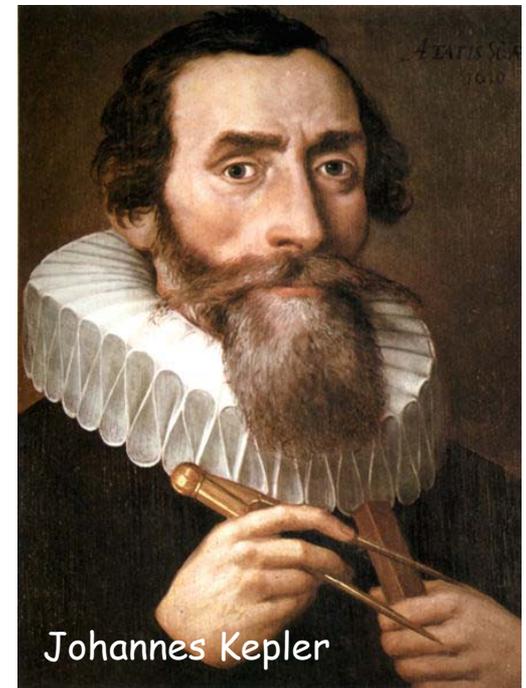
Blaise Pascal



Anders Celsius

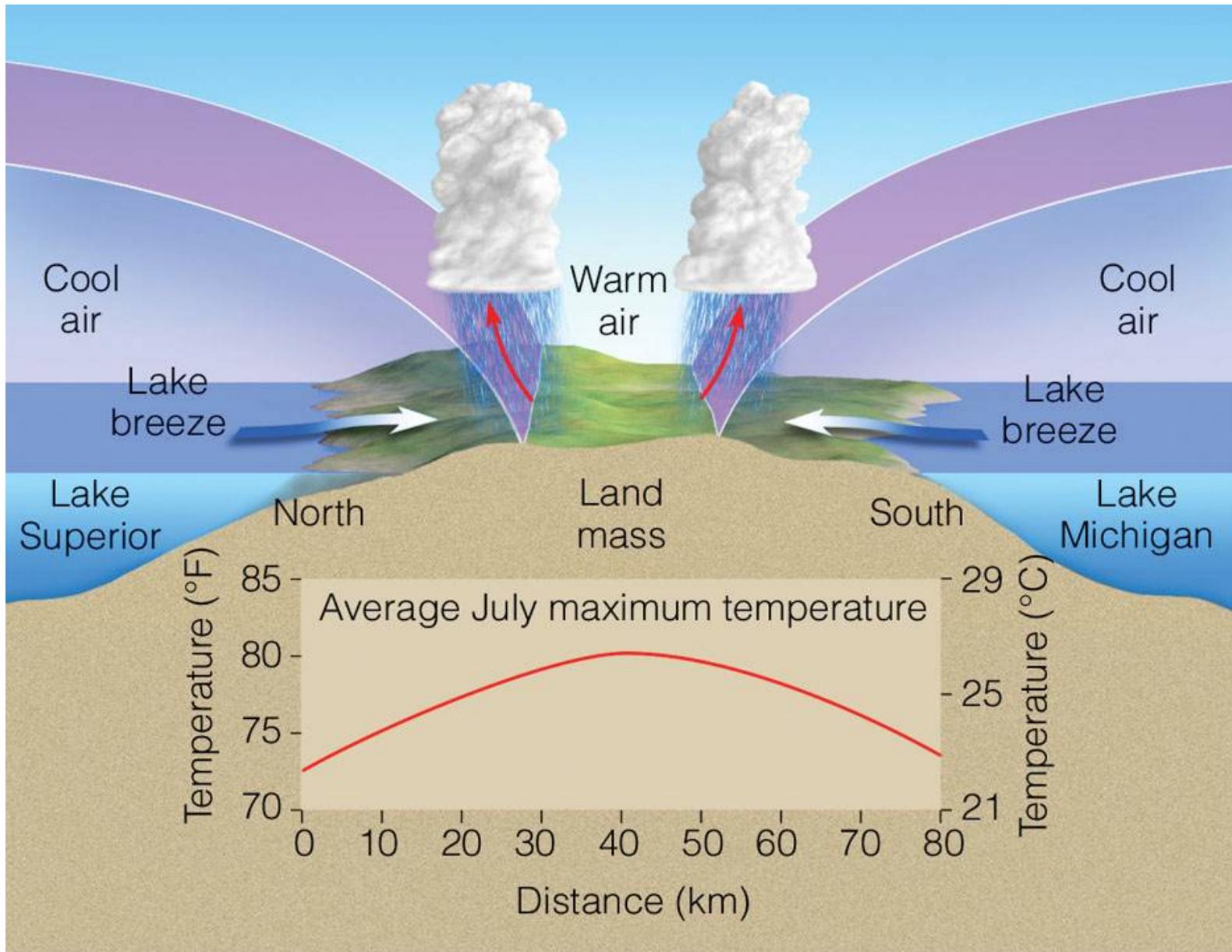


Sir William Thomson  
1<sup>st</sup> Baron Kelvin



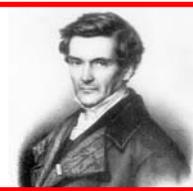
Johannes Kepler

# Étendue horizontale de la brise de mer





# La force de Coriolis



Gaspard-Gustave Coriolis

