La circulation thermique

Les brises

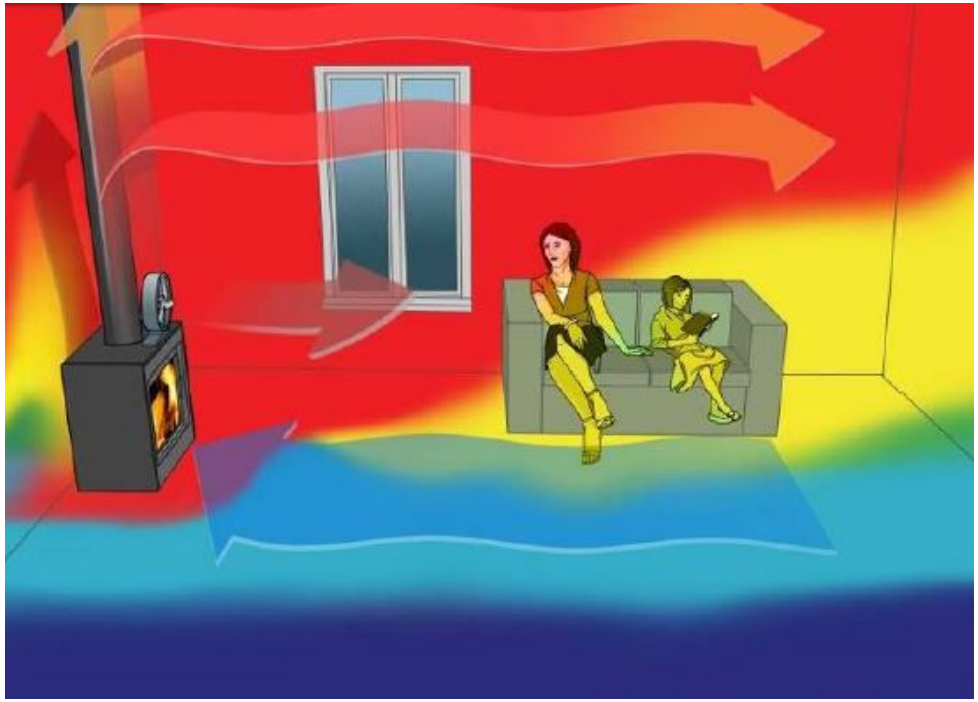
La mousson

La circulation générale

© Brooks/Cole, Cengage Learning

Table de matières

- La circulation thermique de l'air
  - La brise mer/lac
  - La brise vallée et de montagne
    - Vents anabatiques et catabatiques
  - La mousson
  - La circulation générale
    - Modèle a une cellule
    - Modèle à trois cellules
    - Les courants jets



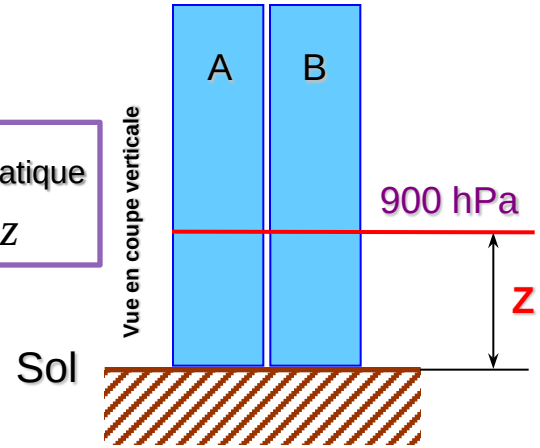
Les gradients de température créent des gradients de pression qui créent les vents.

LA CIRCULATION THERMIQUE

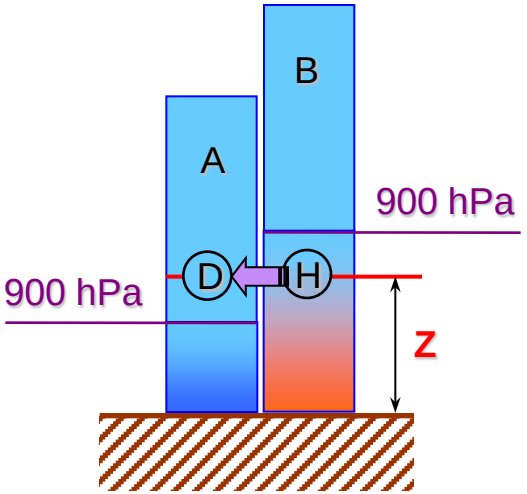
Circulation thermique de l'air

Équation hydrostatique

$$\Delta p \cong -\rho \cdot z$$



- Considérons deux colonnes d'air, A et B, de même masse et de même température. La pression à la surface est la même.

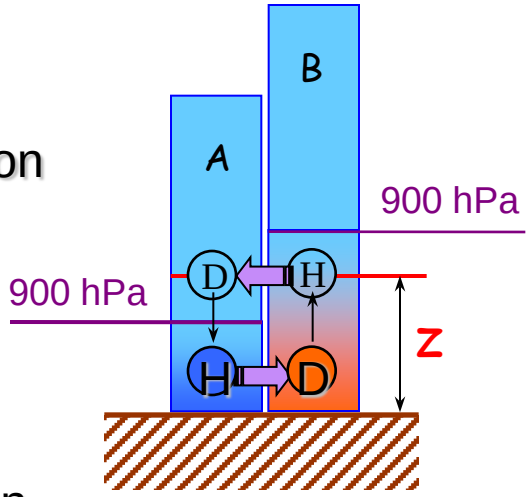


- Création d'un gradient horizontal de température : on refroidit la partie inférieure de la colonne A qui se comprime et on réchauffe celle de la colonne B qui se dilate.

- La masse d'air dans la colonne B au-dessus du niveau Z est plus grande que dans la colonne A. À cause de cela, la pression au niveau Z est plus élevée dans la colonne B que dans la colonne A.

- L'air se déplacera de la colonne B vers la colonne A en réponse au gradient horizontal de pression.

La circulation thermique de l'air



- Puisque la masse d'air dans la colonne B diminue, la pression de surface diminue aussi.
- Comme la masse dans la colonne A a augmenté, 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 :
  - Colonne A : convergence en altitude et divergence à la surface : **mouvement descendant** (ciel clair)
  - Colonne B : divergence en altitude et convergence à la surface : **mouvement ascendant** (formation de nuages)

Effets des gradients thermiques à l'échelle locale

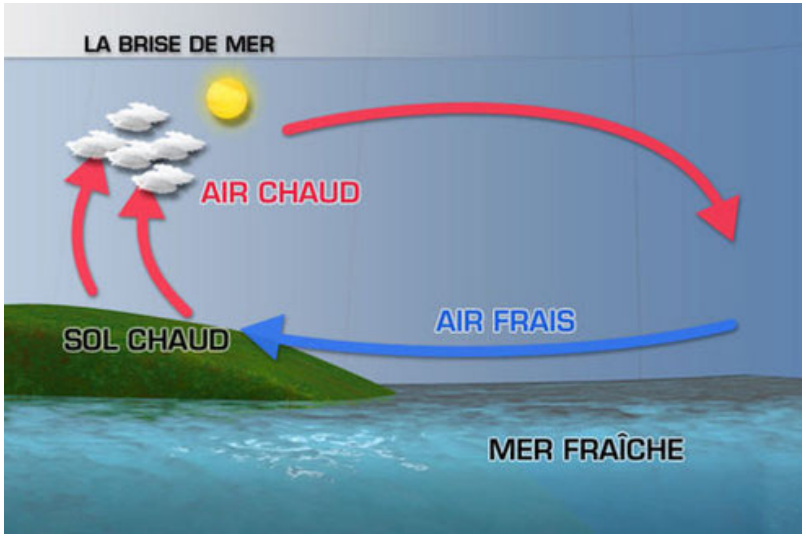
LES BRISES

Artiste peintre : Suzanne St-Ours

www.suzanne-stours.com

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.)

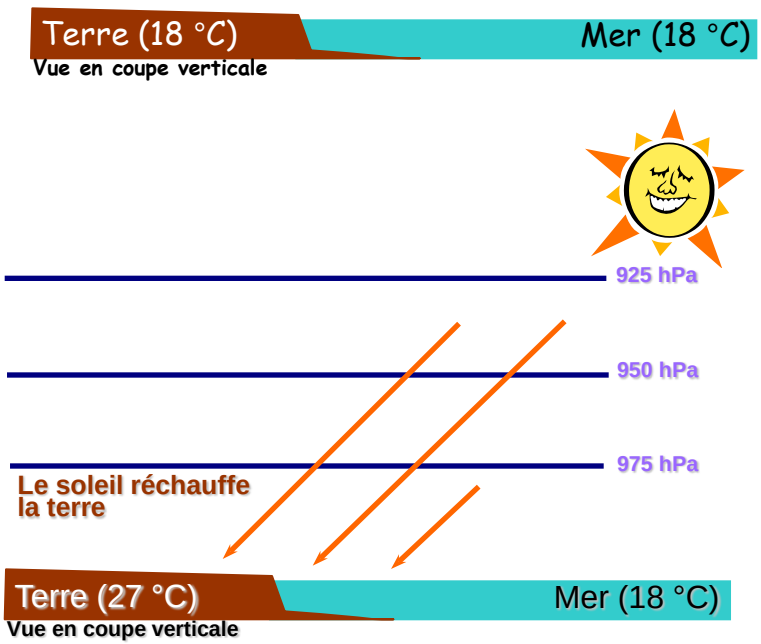


Source : https://www.cntranchais.fr/2014/07/20/dis-papa-c-est-quoi-la-brise-thermique/

Source : http://www.staycationbarbados.com/place/sea-breeze-beach-hotel/

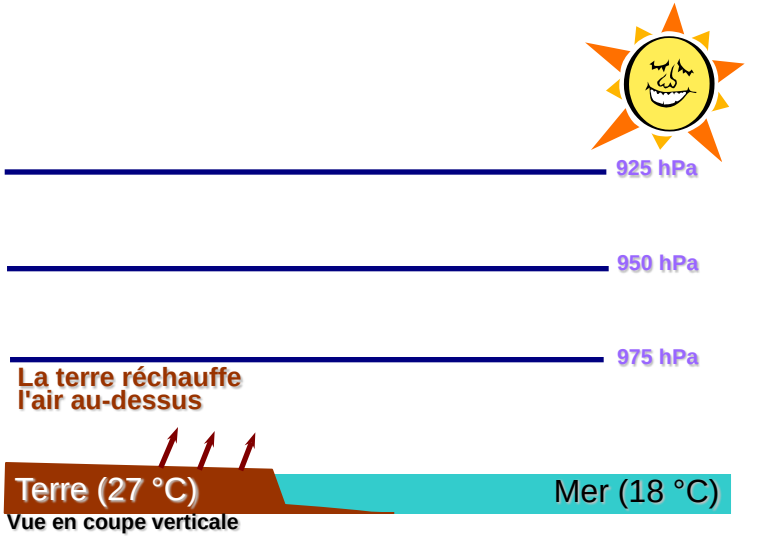
La brise de mer / lac

- 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 et au mouvements de celle-ci.

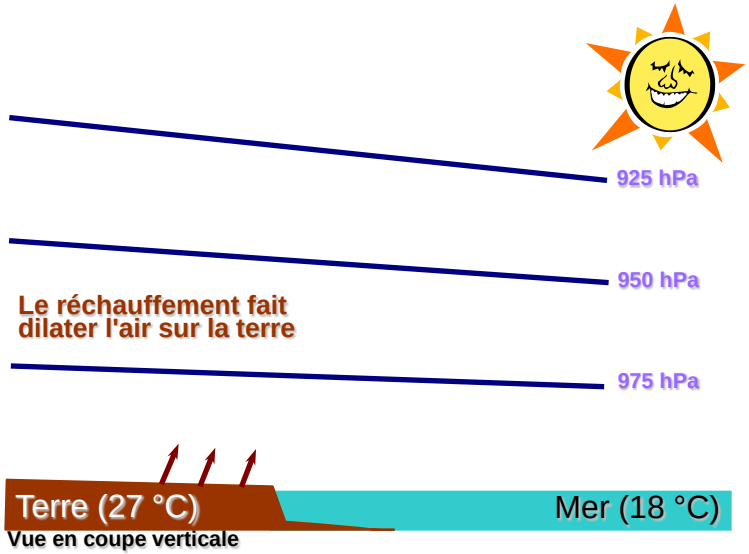
- L'air n'est pas réchauffé directement par le soleil mais plutôt indirectement par la surface. Donc au-dessus de la terre l'air est plus chaud qu'au-dessus de l'eau. Ce réchauffement peut affecter typiquement une couche de 1000 à 1500 m d'épaisseur.



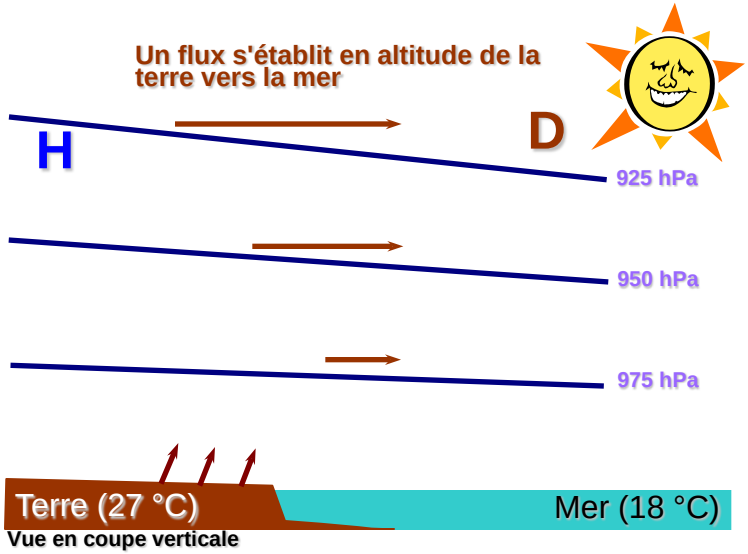
Source : http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/fw/sea/crc.rxml

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.



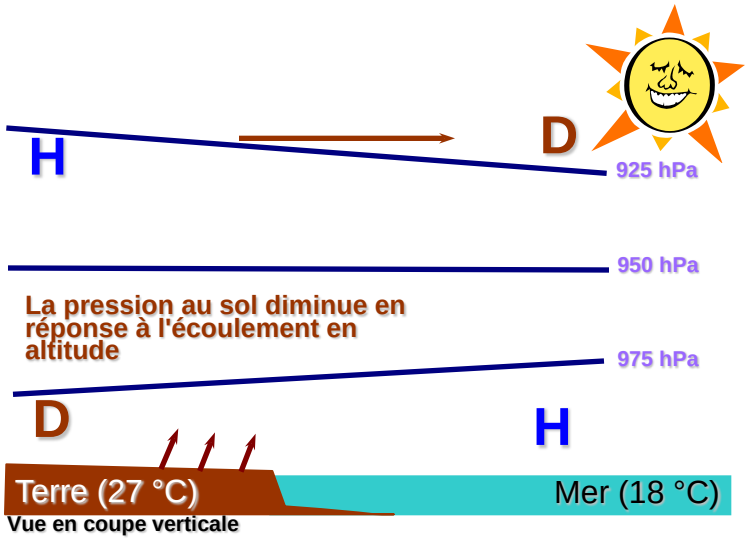
- À la même altitude, par exemple 1000 m, la pression est plus haute au-dessus de la terre et qu'au-dessus de la mer. Un flux d'air s'établit en altitude de la terre vers la mer à cause de ce gradient de pression.



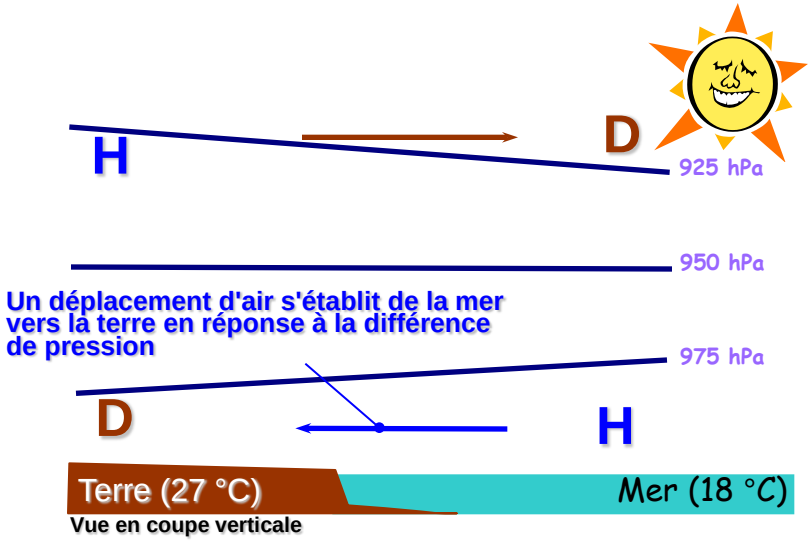
Source : http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/fw/sea/crc.rxml

La brise de mer / lac

- En réponse à l'écoulement en altitude, la pression à la surface, sur la terre, diminue par rapport à la pression sur mer. Un gradient de pression s'établit entre la mer et la terre.



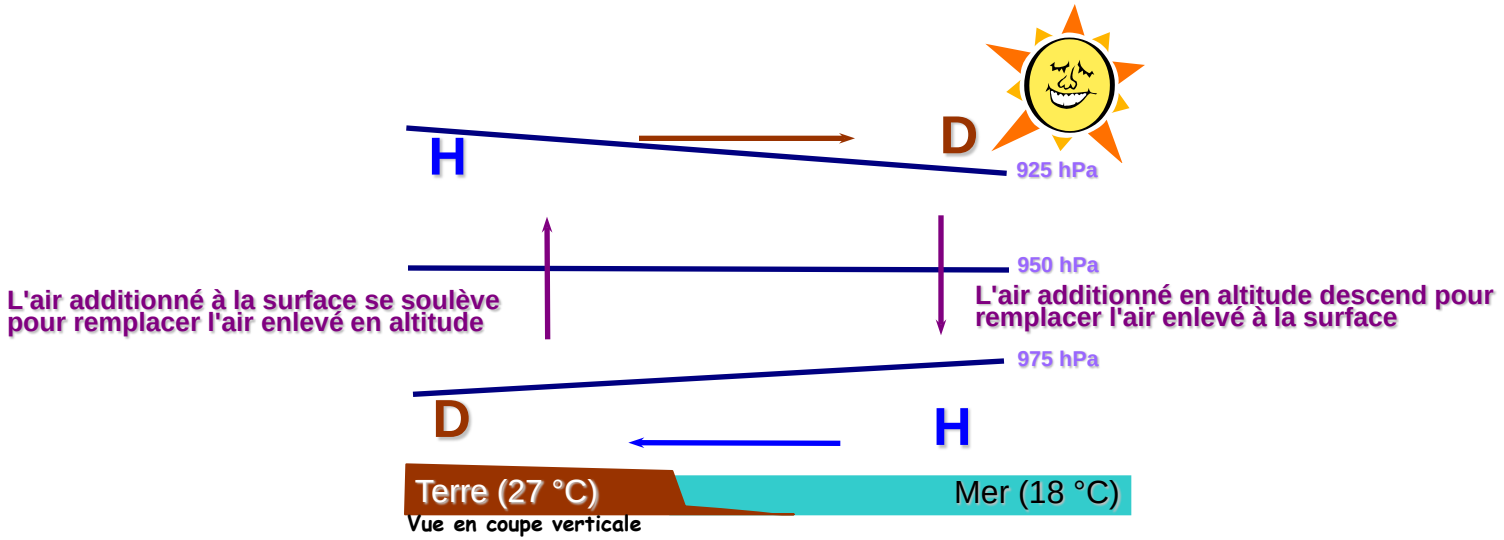
- Un déplacement d'air plus frais s'établit de la mer vers la terre à cause de ce gradient de pression.



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

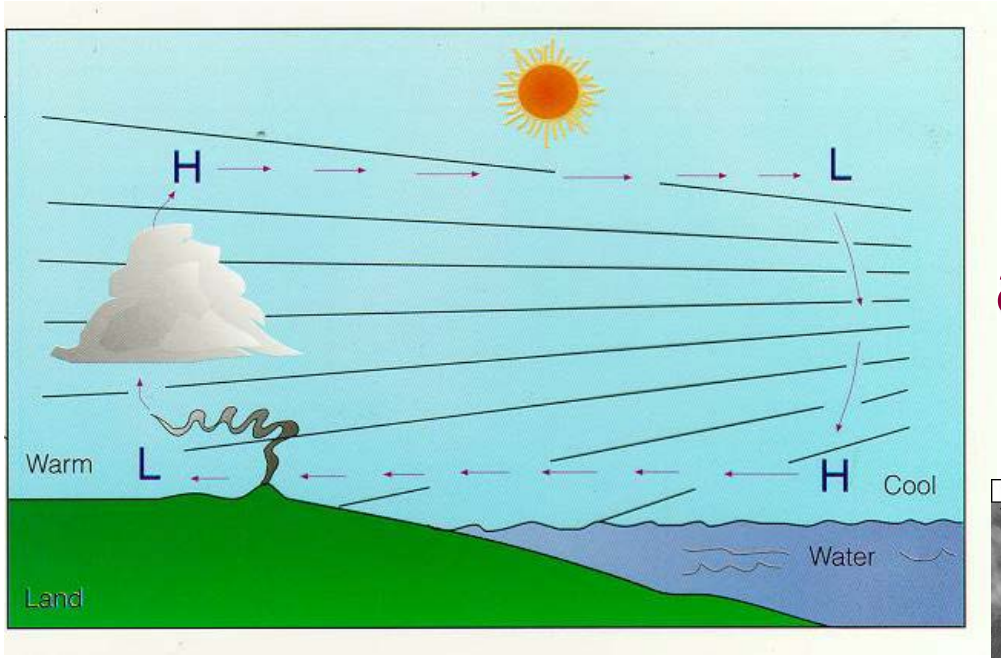
La brise de mer / lac

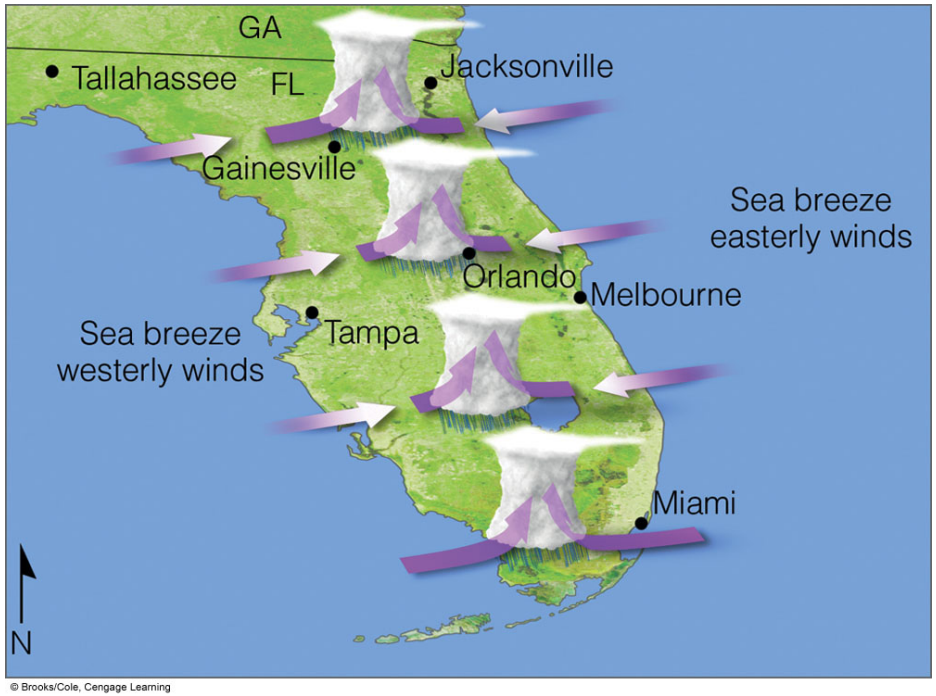
- Des mouvements verticaux s'établissent en réponse aux écoulements horizontaux de l'air ce qui complète la circulation de la brise de mer.



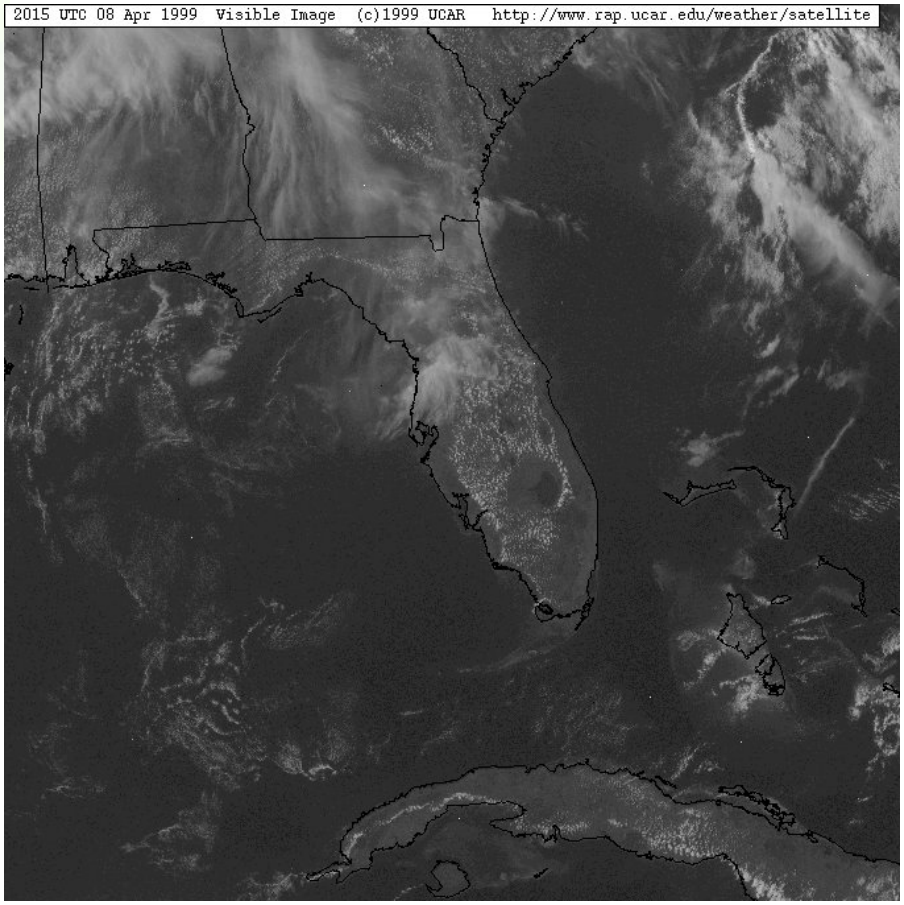
Source : http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/fw/sea/crc.rxml

Nébulosité associée à la brise de mer/lac

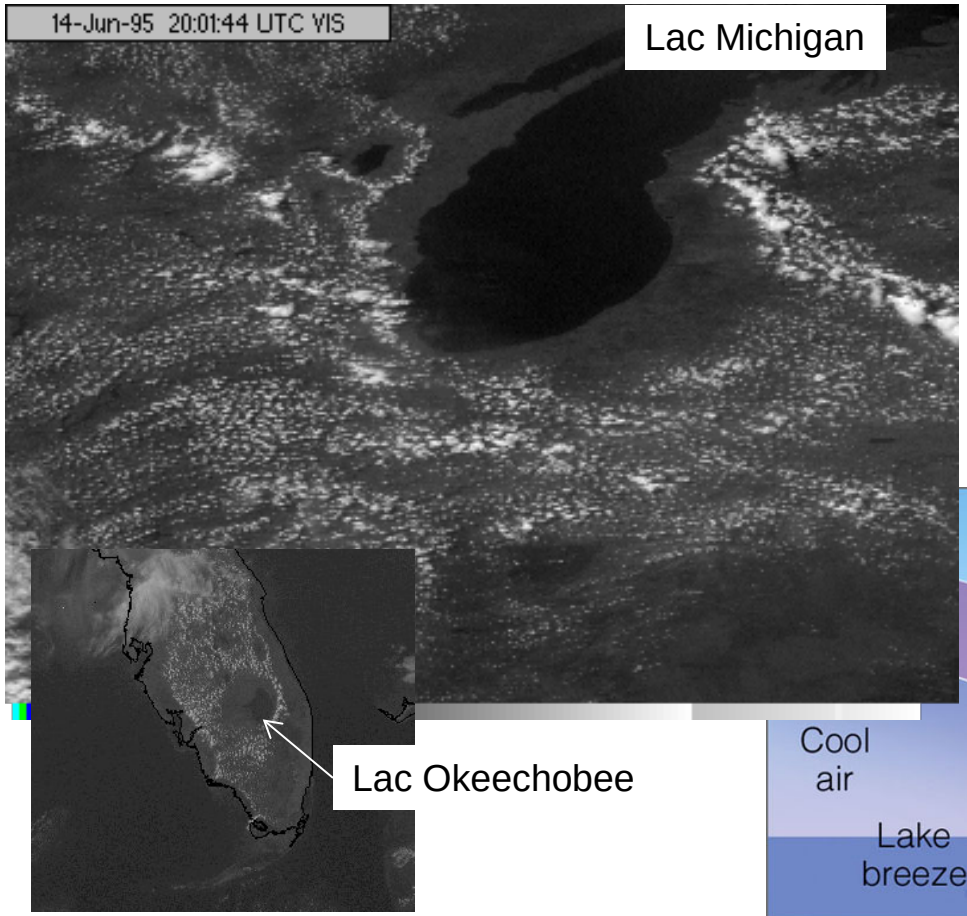


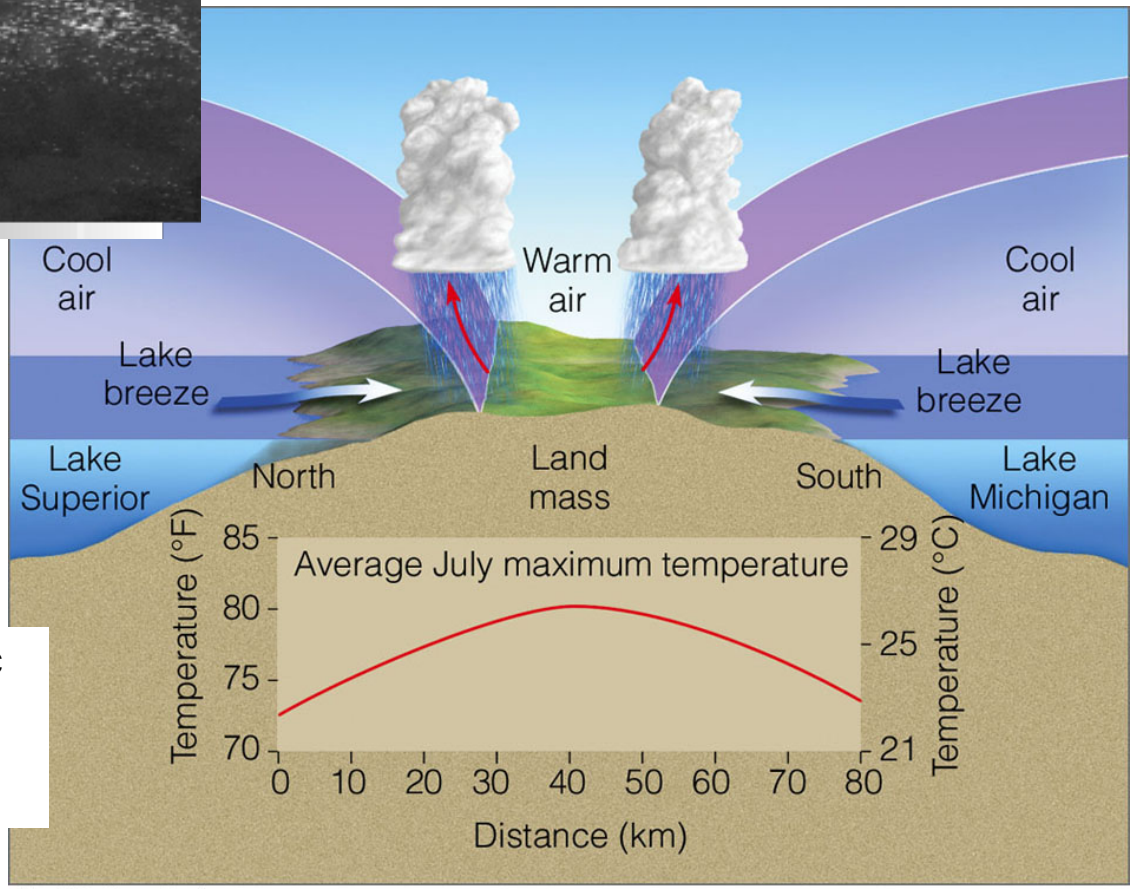


© Brooks/Cole, Cengage Learning



Brise de lac

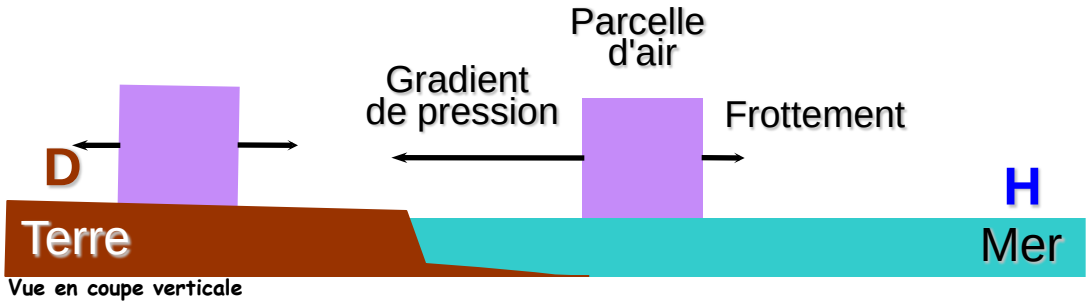




La convergence des deux brises de lac (le lac Supérieur et le lac Michigan) et l'influence dans la distribution spatiale de la température en juillet.

© Brooks/Cole, Cengage Learning

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.

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

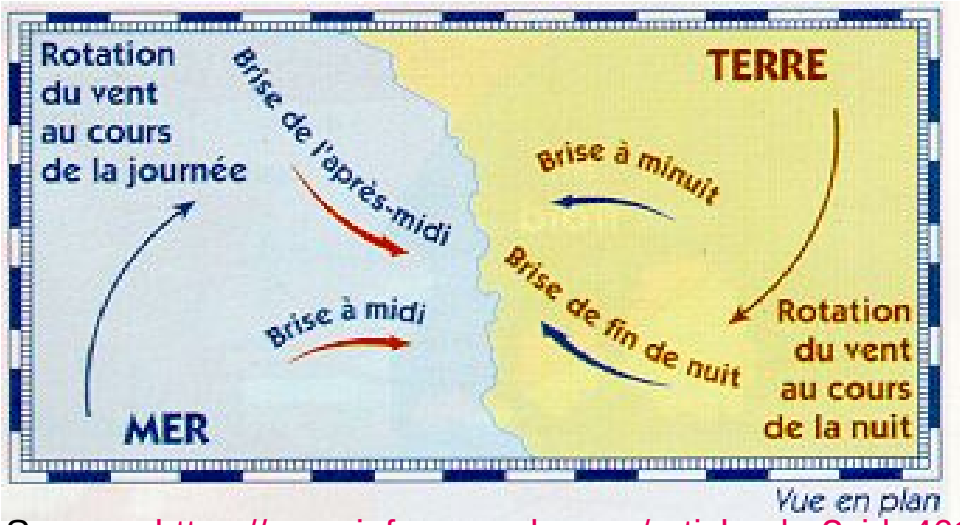
Brise de Terre

- 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.

Le virage de la brise de mer : La force de Coriolis

- Aux latitudes équatoriales, la brise maintient la même direction perpendiculaire à la côte tout au long de la journée.

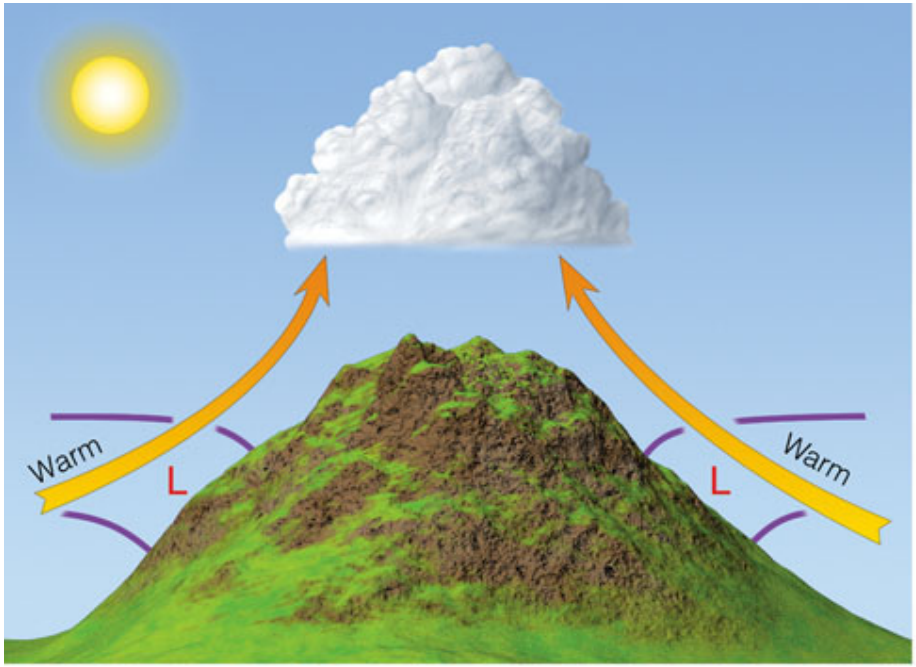
- Aux latitudes moyennes dans l'hémisphère nord, le matin, la brise est perpendiculaire à la côte. Puis, à mesure qu'elle prend de la force, elle pivote graduellement vers la droite et dans l'après-midi, finit par souffler obliquement à 45 ° par rapport le littoral.



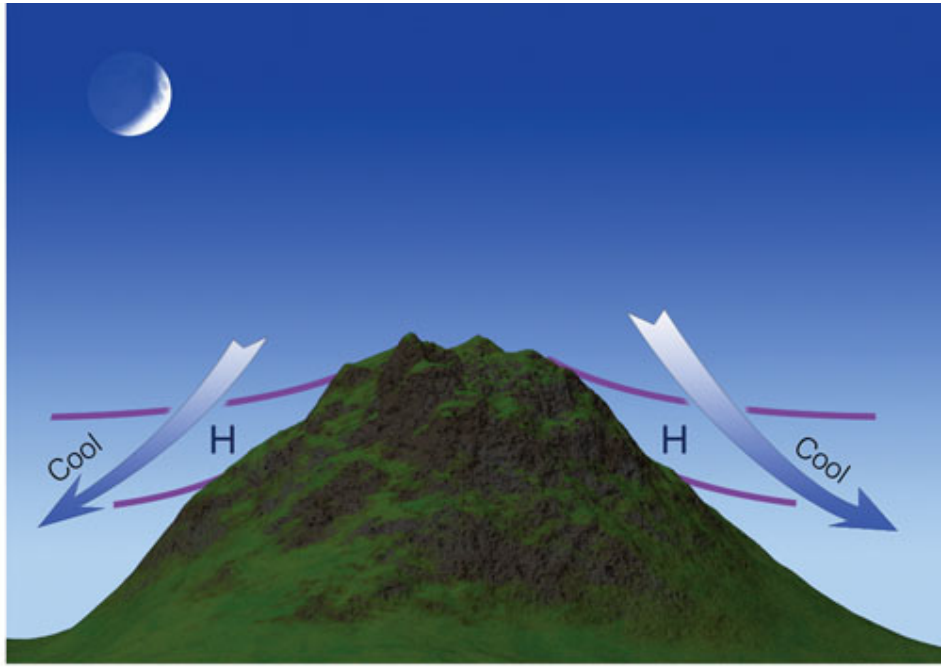
Source : https://www.infocapagde.com/article.php?sid=461

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

Brises de vallée et de montagne



Valley breeze

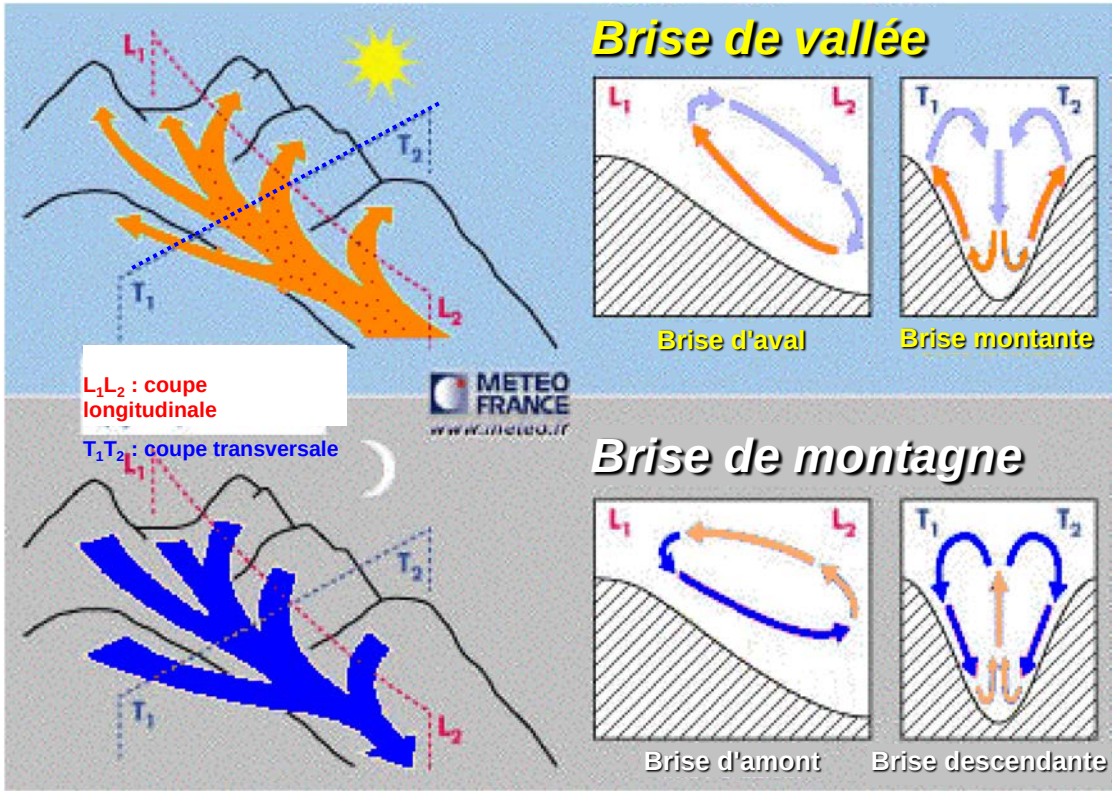


Mountain breeze

© Brooks/Cole, Cengage Learning

Les brises de vallée sont des vents qui montent la pente des montagnes pendant le jour. Pendant la nuit les vents soufflent vers les vallées. Les lignes violettes sont des surfaces isobares. L = basse pression; H = haute pression.

Brise de vallée et de montagne

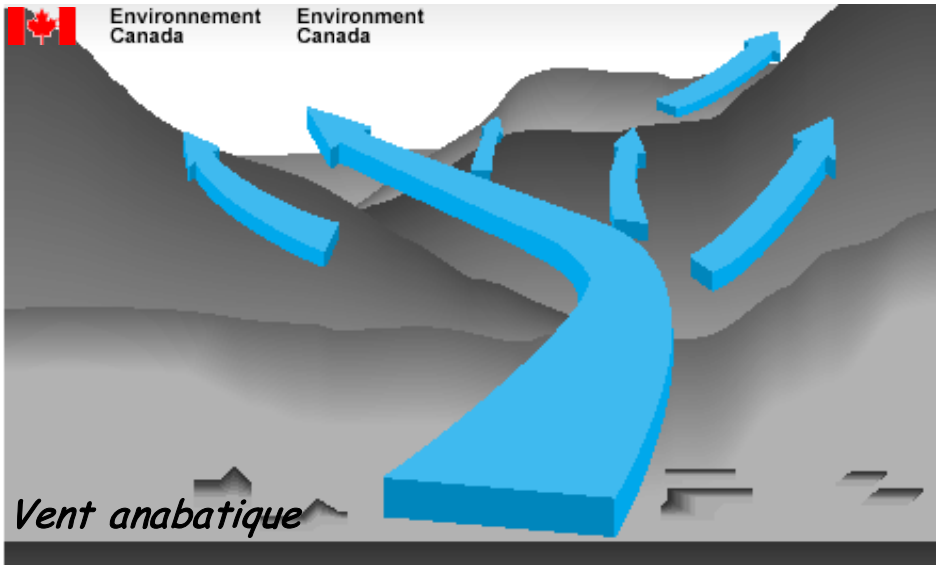


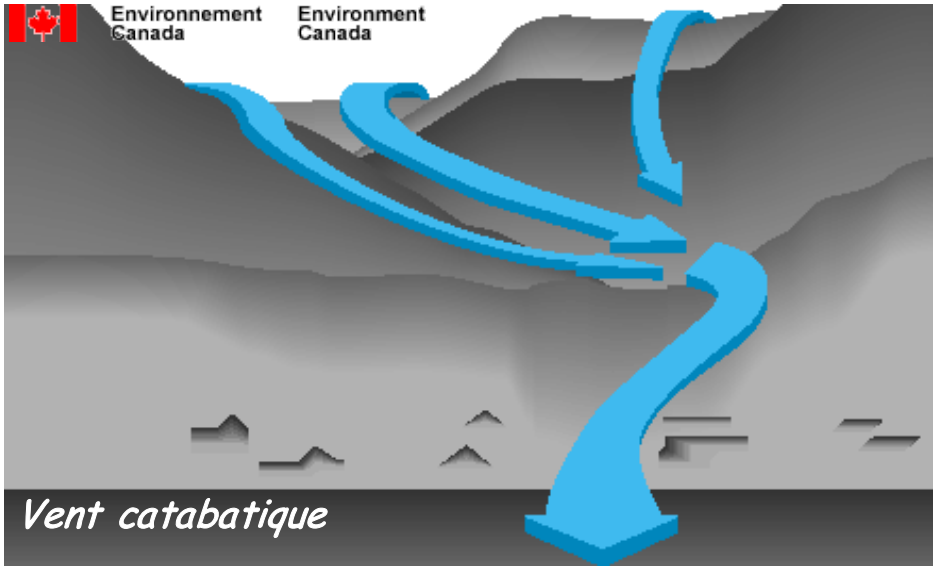
Brise de montagne :

- **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 anabatiques et catabatiques



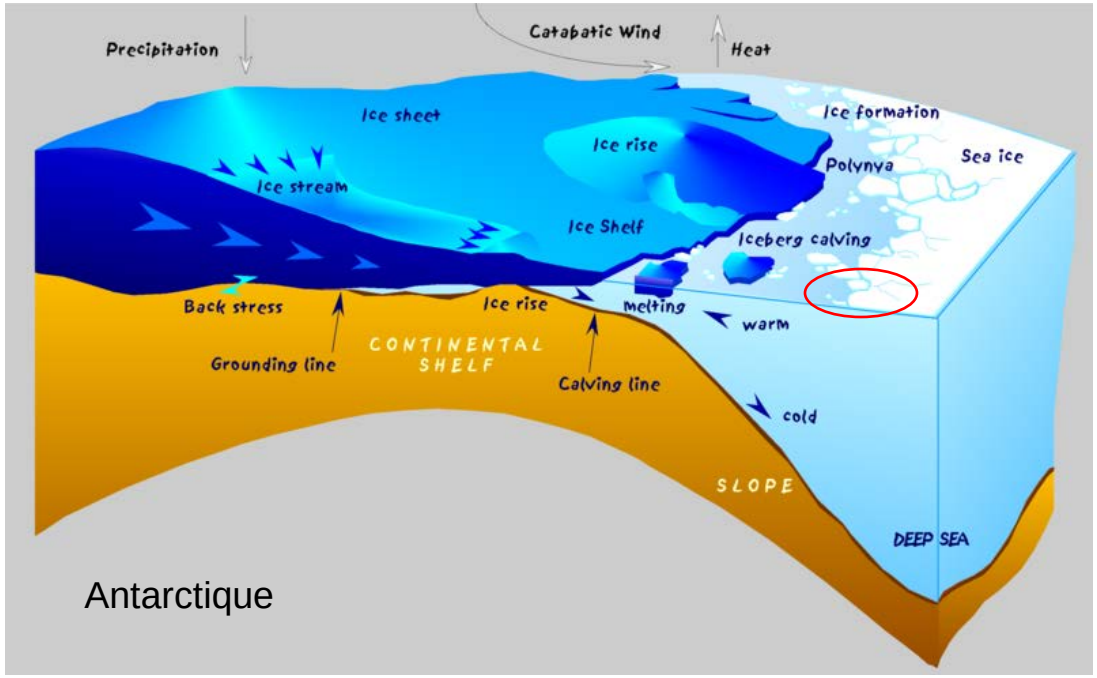


- S'il est causé par un réchauffement/refroidissement local,
  - le vent qui monte la pente d'un relief est appelé anabatique
  - et celui qui la descend, est appelé catabatique.
- Les vents anabatique et catabatique se distinguent des vents de type Chinook. Le Chinook est le résultat d'un forçage de l'air par-dessus le relief à cause de la force de gradient de pression à grande échelle. Sa température au sommet de l'obstacle et à son aval 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



Les vents dans le monde : www.wofrance.fr/reports/wind/

Polynie: Étendue d'eau de plusieurs kilomètres de diamètre qui forme un trou dans la banquise de l'océan glacial Arctique à la suite de la fonte des glaces en été.

Goa, Inde. Source : https://www.gaiia-shop.com/

Effets des gradients thermiques à l’échelle continentale

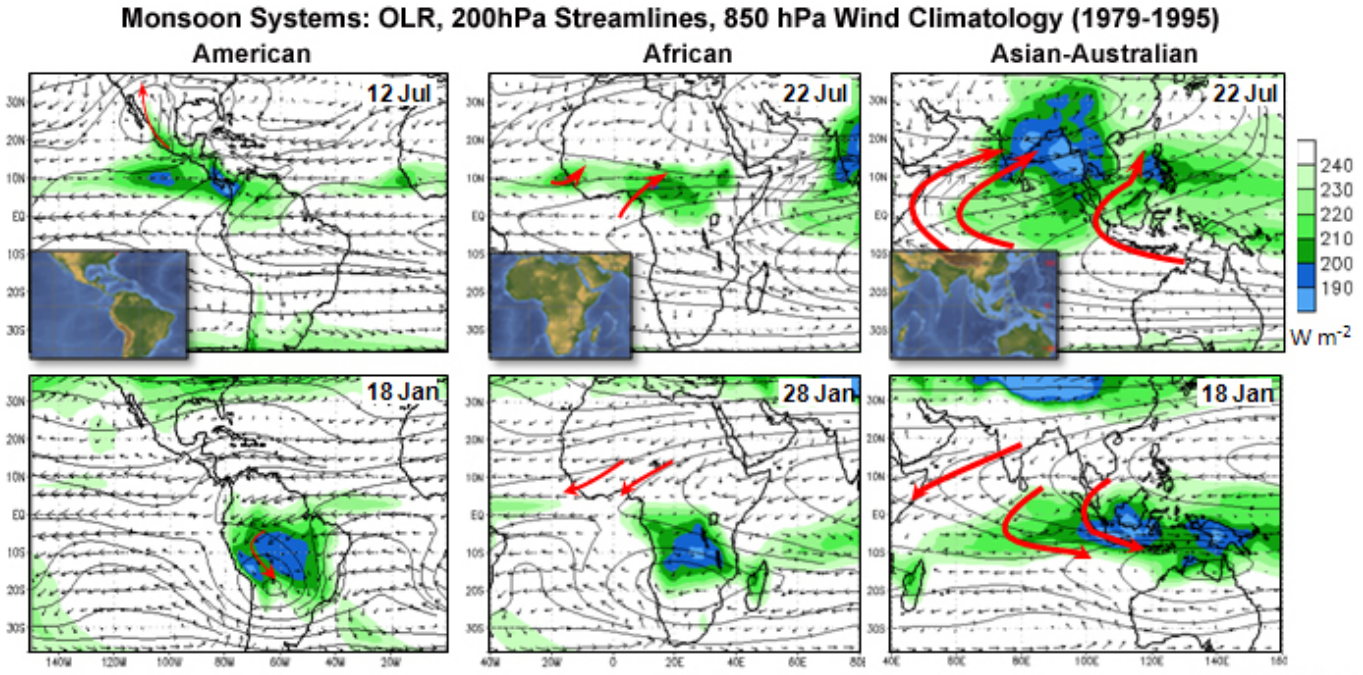
LES MOUSSONS

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 :
  - Amérique du Nord – entre le Mexique et l'Arizona et l'océan Pacifique.
  - Amérique du Sud - entre le Brésil et l'océan Atlantique
  - Afrique - entre le Sahara et l'Océan Atlantique,
  - Australie

- Les moussons sont causées par le fait que la terre s'échauffe et se rafraîchit plus vite que la mer.

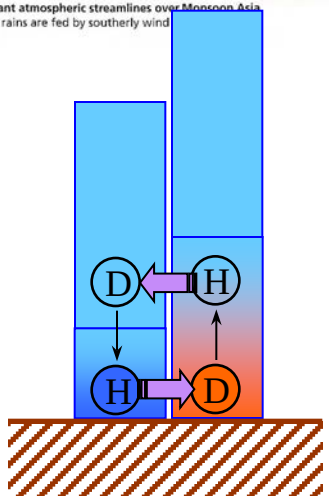


La mousson d’été.

Exemple : 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. Ce gradient de température créent des gradients de pression à l’origine d’une circulation thermique de plus grande étendue que celle associé aux brises de mer/terre.
- L‘augmentation de la température sur le continent, crée 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.

▲ FIGURE 14-2 **Annual rainfall and dominant atmospheric streamlines over Monsoon Asia during the summer.** Asia's summer monsoon rains are fed by southerly wind

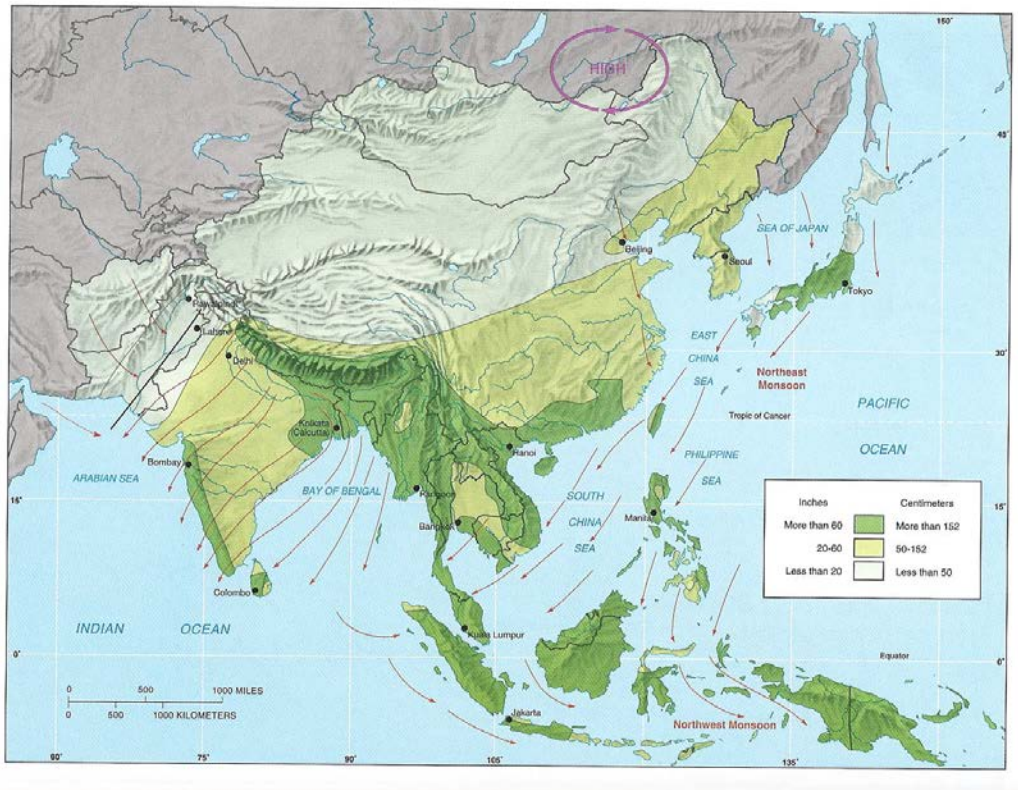


Mousson d'été, mousson d'hiver, quelle différence?

- La durée et les conditions associées aux deux moussons dépendent en grande partie des conditions sur l'océan Indien où elles se forment et de la présence ou de l'absence d'autres conditions atmosphériques.

- La mousson d'été apporte la pluie tous les jours. Une humidité atmosphérique excessive et un air inhabituellement chaud peuvent créer des pluies torrentielles et implacables qui peuvent dévaster les champs cultivés et causer des ravages dans les communautés riveraines et les villes.

▼ FIGURE 14-3 **Dominant atmospheric streamlines over Monsoon Asia during the winter.** The dry winter season is associated with northerly continental wind flows.



- Les moussons d'hiver arrivent en octobre; Ils sont caractérisés par l'air sec et les températures plus fraîches, offrant aux régions pluvieuses un soulagement bienvenu de mois de pluies interminables. Les moussons d'hiver sont généralement moins puissants que les moussons d'été mais peuvent entraîner des vents violents.

Cherrapunji

Cherrapunji est une ville de l'état de Meghalaya dans le Nord-Est de l'Inde. Cet endroit serait le plus pluvieux de la planète. La pluviométrie moyenne annuelle est de 11430 mm sur les 38 dernières années.

Source : https://breathtakingindia.com/SpotLightDestinations.aspx?Name=Cherrapunji

Effets des gradients thermiques à l'échelle planétaire

LA CIRCULATION GÉNÉRALE

Les vents à l'échelle planétaire : la circulation générale

- Nous savons que la Terre, étant un objet sphérique, n'est pas réchauffée uniformément par le Soleil, les tropiques recevant toujours plus d'énergie que les pôles (l'effet étant modulé par l'inclinaison l'axe de rotation de la Terre et les saisons). La sphéricité de la Terre provoque ainsi un *réchauffement différentiel latitudinal**.

- Si la Terre n'avait pas d'atmosphère ni d'océans, il s'ensuivrait un équilibre *radiatif* entre la surface et l'espace interplanétaire grâce auquel, à chaque latitude, des quantités égales d'énergie infra-rouge émise et d'énergie solaire reçue seraient observées. Dans ce cas, le contraste entre l'équateur et les pôles serait extrême. Par exemple, sur la Lune, le contraste entre l'équateur et les pôles peut atteindre plus de 300°C (+100°C à l'équateur vs. -200°C aux pôles) !

* *Latitudinal* : dans le sens nord-sud

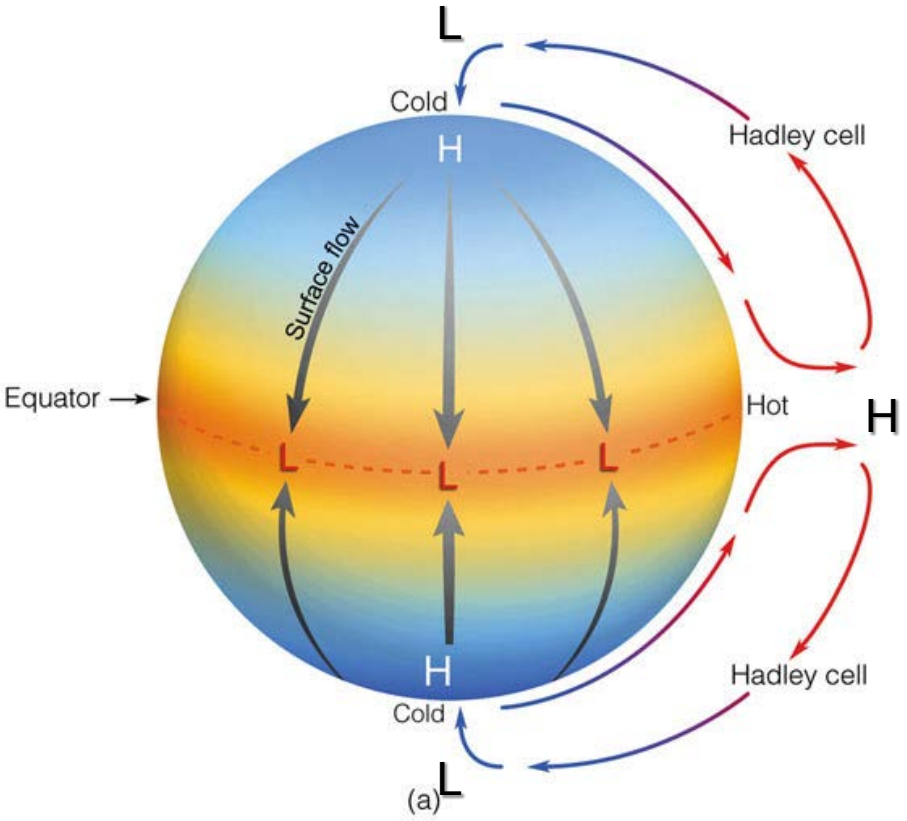
Les vents à l'échelle planétaire : la circulation générale

- La présence d'une atmosphère et des océans autour de la Terre modifie la réponse de la planète au réchauffement différentiel à la manière d'une gigantesque brise de mer nord-sud. Dans ce contexte, la *circulation planétaire* transportera l'excès de chaleur équatoriale vers les pôles, de sorte que le contraste pôle-équateur n'est plus que d'environ 70°C en moyenne (+30° à l'équateur vs. -40°C aux pôles).

  L'effet de l'atmosphère terrestre est donc de *redistribuer globalement la chaleur solaire et minimiser le contraste nord-sud des températures*.

Si la Terre ne tournait pas...

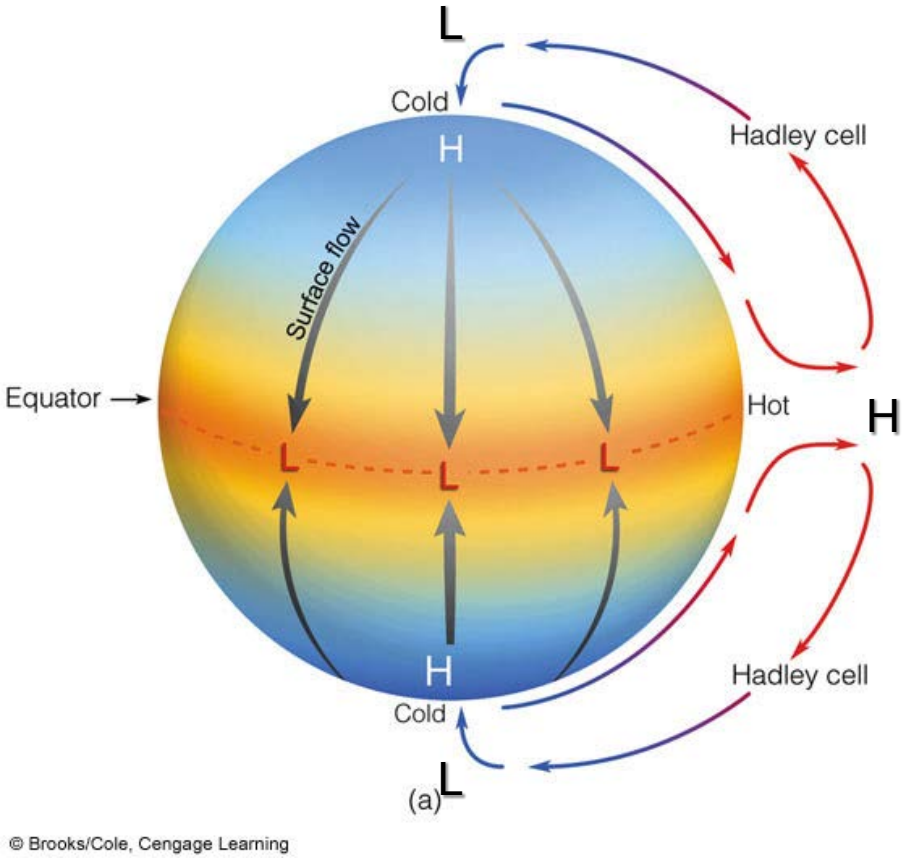
- Nous supposons ici que la Terre ne tourne pas et qu'elle est couverte d'océans à 100%
- Comme dans le cas de la brise de mer, le réchauffement différentiel Nord-Sud causerait ici un gradient de pression permanent en altitude, avec des hautes pressions à l'équateur et des basses pressions dans les régions polaires
- La divergence de l'air au-dessus de l'équateur créerait une basse pression en surface et la convergence au-dessus des pôles créerait une haute pression en surface



© Brooks/Cole, Cengage Learning

Si la Terre ne tournait pas...

- Les vents de surface seraient donc partout du Nord dans l'hémisphère Nord et du Sud dans l'hémisphère Sud, avec des courants ascendants à l'équateur et subsidents aux pôles.
- Il s'en suivrait une circulation thermique nord-sud unique, de l'équateur vers les pôles en altitude, puis des pôles vers l'équateur en surface
- Ces cellules thermiques de circulation s'appellent des ***cellules de Hadley****.



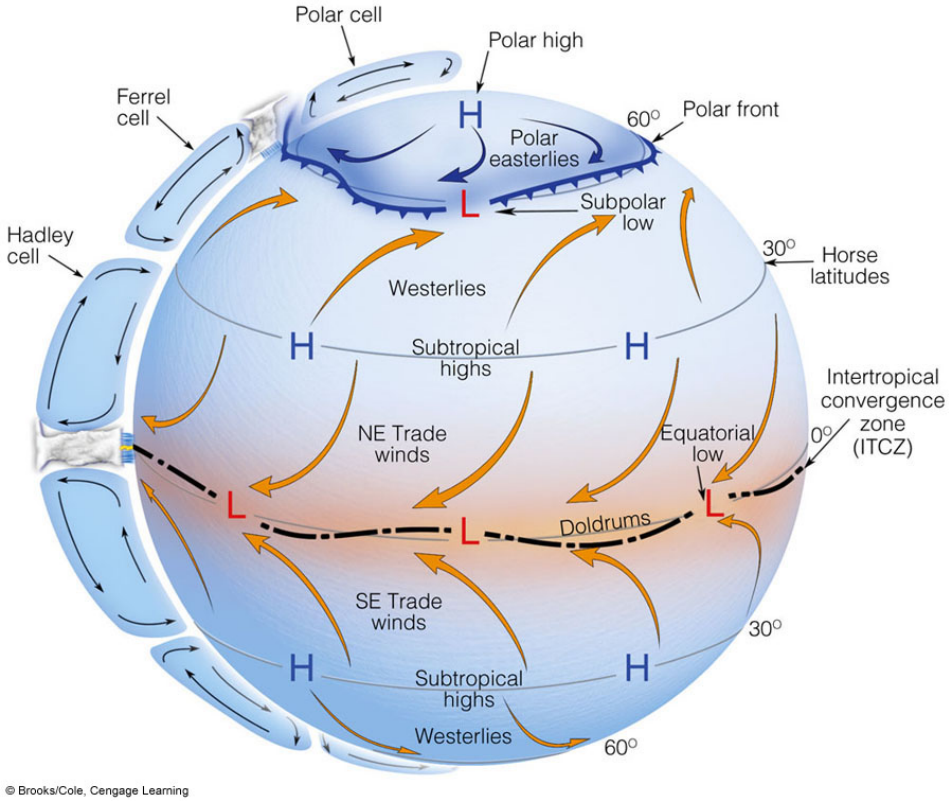
© Brooks/Cole, Cengage Learning

** George Hadley : météorologiste Anglais du XVIII^e siècle*

Et pourtant, elle tourne...

- Une cellule de Hadley unique n'est pas observée sur une planète en rotation comme la Terre, car les vents en surface seraient d'est en ouest à toutes les latitudes, ce qui est contraire aux observations.

- En fait, la rotation de la Terre scinde la cellule de Hadley en *trois cellules* comme le montre la figure ci-contre.

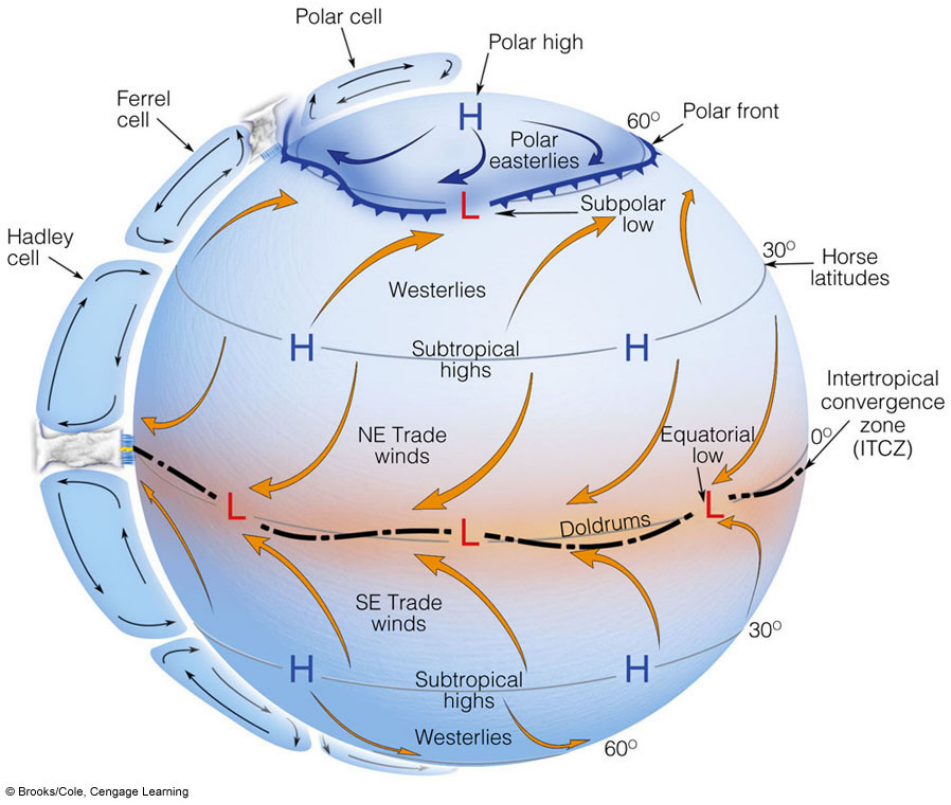


- Notez que la cellule de Hadley existe toujours, mais seulement à l'intérieur d'une bande de latitudes *où la force de Coriolis est minimale, voire nulle* : les régions tropicales, situées entre 30°N et 30°S.

Et pourtant, elle tourne...

- À l'intérieur de cette bande, la (faible) force de Coriolis (combinée avec la friction) provoque tout de même des vents en surface du nord-est dans l'hémisphère Nord, et du sud-est dans l'hémisphère Sud : ce sont les *alizés*.

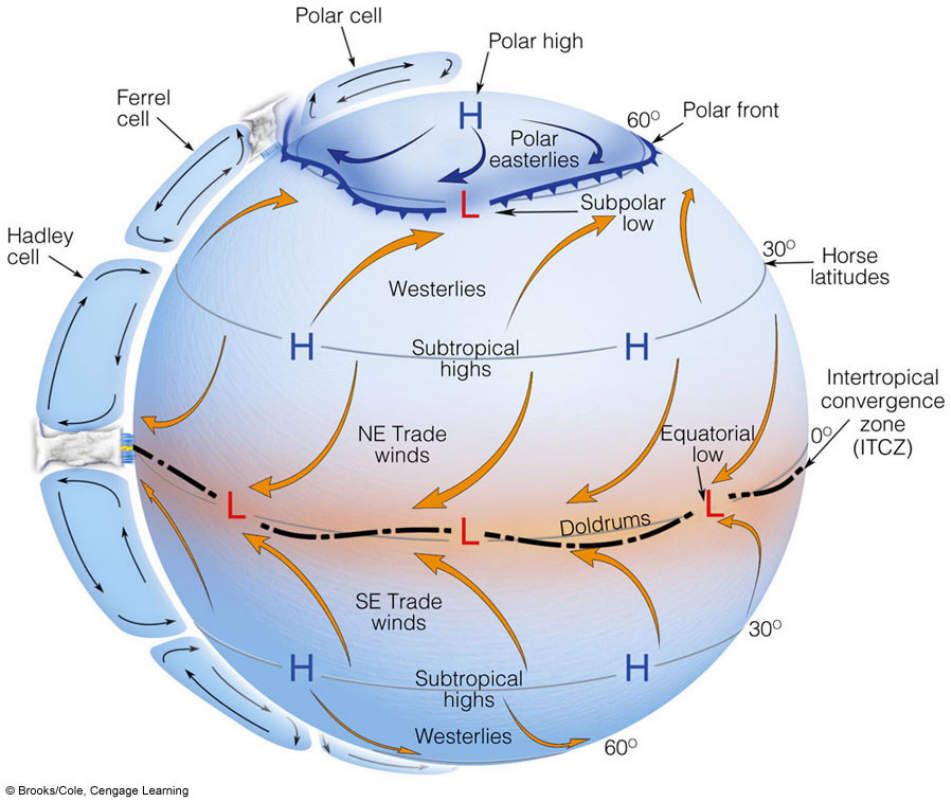
- Ces vents créent une ceinture de convergence en surface et de l'air ascendant tout autour du globe : c'est *la Zone de convergence intertropicale* (ITCZ sur la figure), caractérisée par de fortes précipitations tout au long de l'année.



Et pourtant, elle tourne...

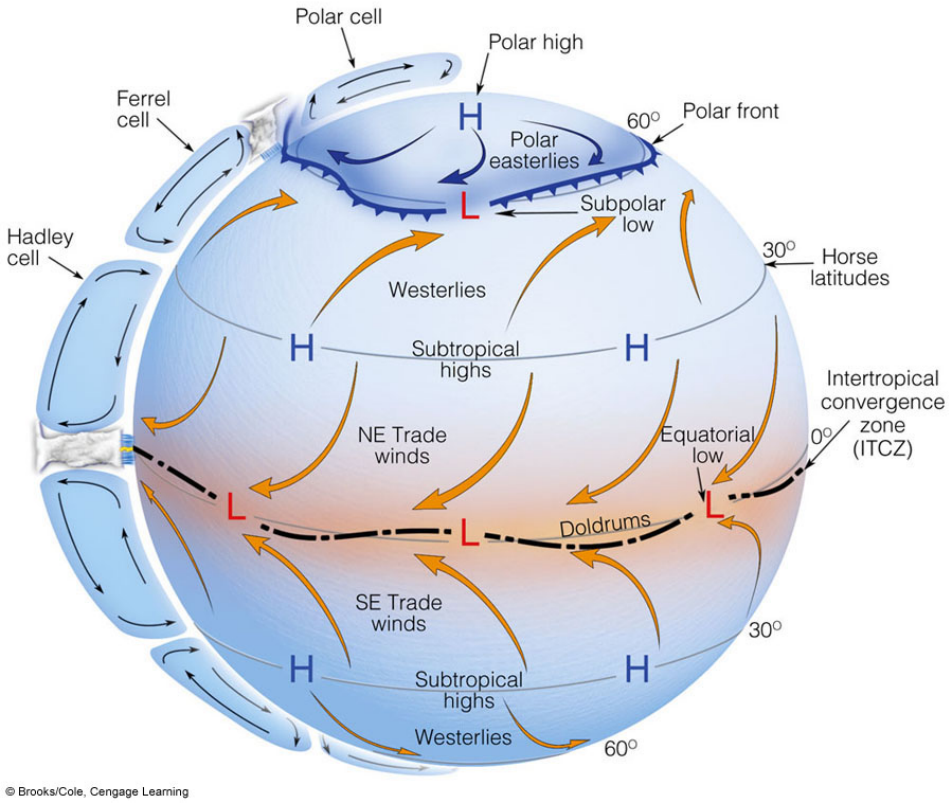
- En altitude, les vents de la cellule de Hadley sont déviés de plus en plus vers l'est, puis convergent à 30°N et 30°S pour y former des ceintures de hautes pressions permanentes où l'air descendant diverge en surface et où le temps est généralement clair.

- Ces *anticyclones sous-tropicaux* abritent les grands déserts du monde (Sahara, Gobi, Kalahari, Australien, etc.)



Tout est question d'équilibre...

- La cellule de Hadley est un type de cellule dite *thermale directe*.
- Ces cellules transportent un excès de chaleur vers les régions ayant un déficit dans le but de minimiser les écarts horizontaux de température.
- La particularité des cellules directes est que l'air chaud doit également *monter*, en plus de se déplacer vers les régions plus froides. De façon similaire, la branche d'air froid doit être *descendante*. Ainsi, la cellule est engendrée *directement* par un réchauffement différentiel et respecte la tendance naturelle de l'air chaud (et peu dense) à monter, et de l'air froid (et plus dense) à descendre.
- Notez que ce transport s'accomplit selon ***un plan vertical*** (et orienté Nord-Sud).



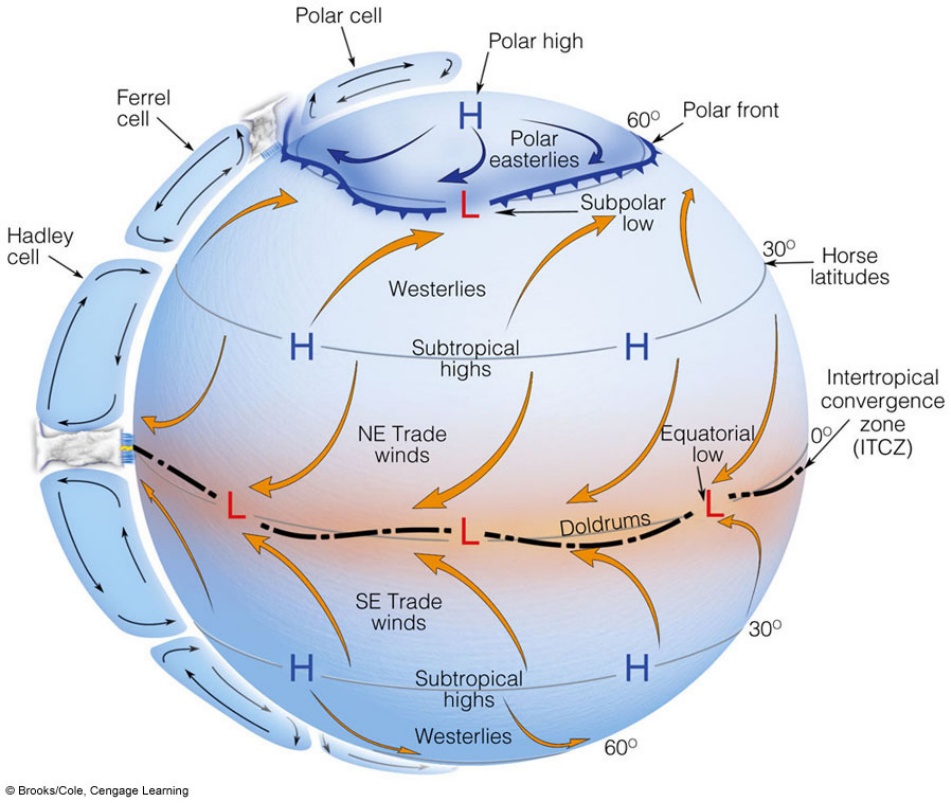
- Une autre cellule agit de façon similaire : la ***cellule polaire***, qui transporte le froid intense des pôles vers le Sud grâce à des vents du Nord-Est en surface.

La cellule de Ferrel

- La cellule intermédiaire entre la cellule de Hadley et la cellule polaire, appelée ***cellule de Ferrel***, est un peu spéciale : elle *n'est pas* engendrée directement par un réchauffement différentiel, la preuve étant que si elle se comportait comme le modèle, l'air chaud des sous-tropiques *descendrait* en se déplaçant vers le Nord, et l'air froid des latitudes moyennes *monterait* en se déplaçant vers le Sud.

- La cellule de Ferrel est en fait le résultat d'un tout autre régime de transport de chaleur qui s'accomplit grâce aux systèmes de hautes et basses pressions des latitudes moyennes.

- Ces systèmes sont caractérisés pas de grands tourbillons en surface qui sont intimement couplés avec de grands courants en altitude appelés *courants jet*.



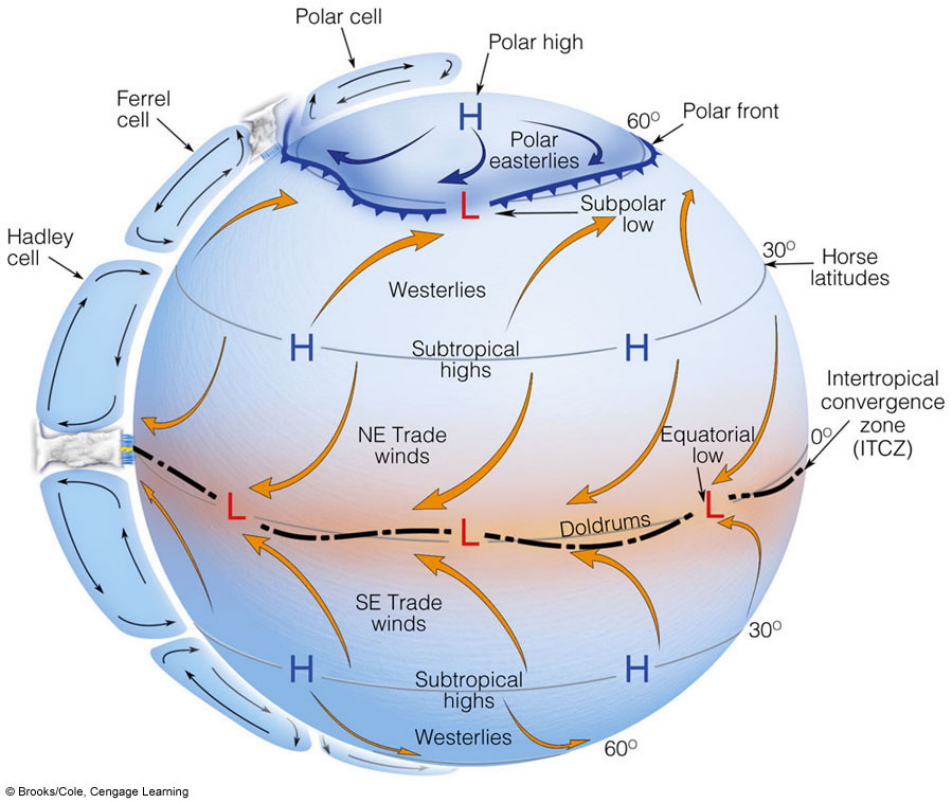
- Ce transport vers les pôles s'accomplit ***dans le plan horizontal***.

Le régime des vents d'ouest

- Les courants jet font partie de ce que l'on appelle le *régime des vents d'ouest*, puisque le gradient nord-sud des températures, de concert avec la force de Coriolis, force des vents généralement d'ouest en altitude.

- Notez qu'en surface, la cellule de Ferrel présente des vents du Sud déviés vers l'est pour former des vents du sud-ouest (ici dans l'hémisphère Nord). Ces vents rencontrent les vents du nord-est de la cellule polaire le long du ***front polaire***.

- Les vents chauds du sud-ouest sont donc forcés de monter, non pas grâce à un réchauffement intense de la surface comme dans les tropiques, mais grâce à la rencontre de deux *masses d'air* de températures et de densités différentes.

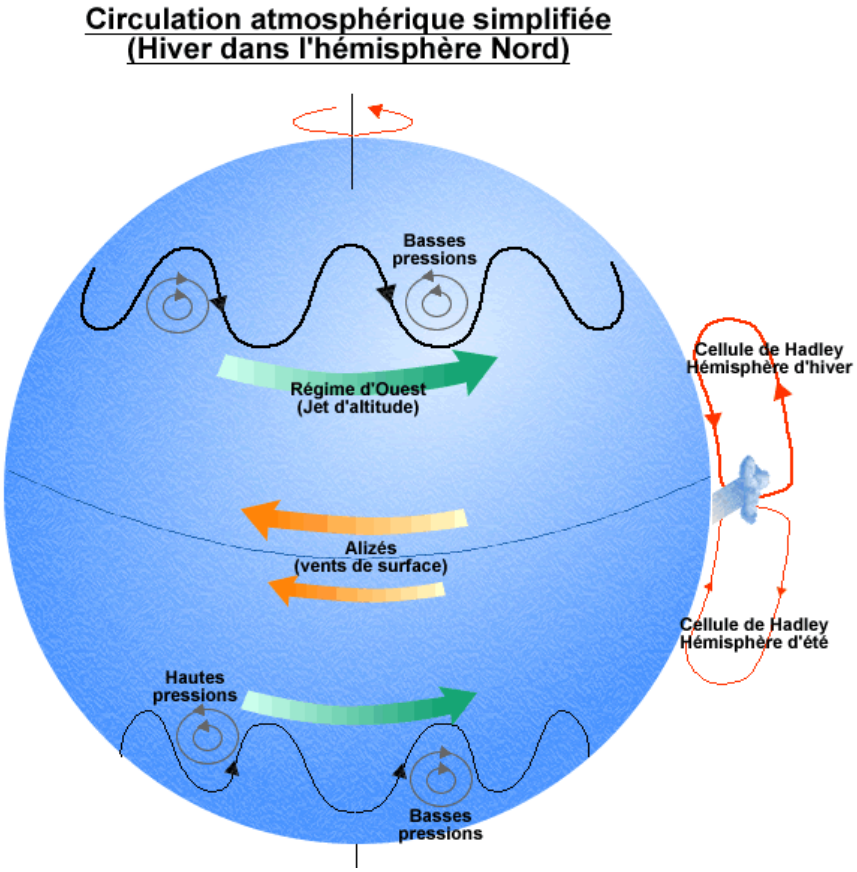


- La montée de l'air est accompagnée de précipitations.

En résumé, deux mécanismes de transport de chaleur pour la Terre

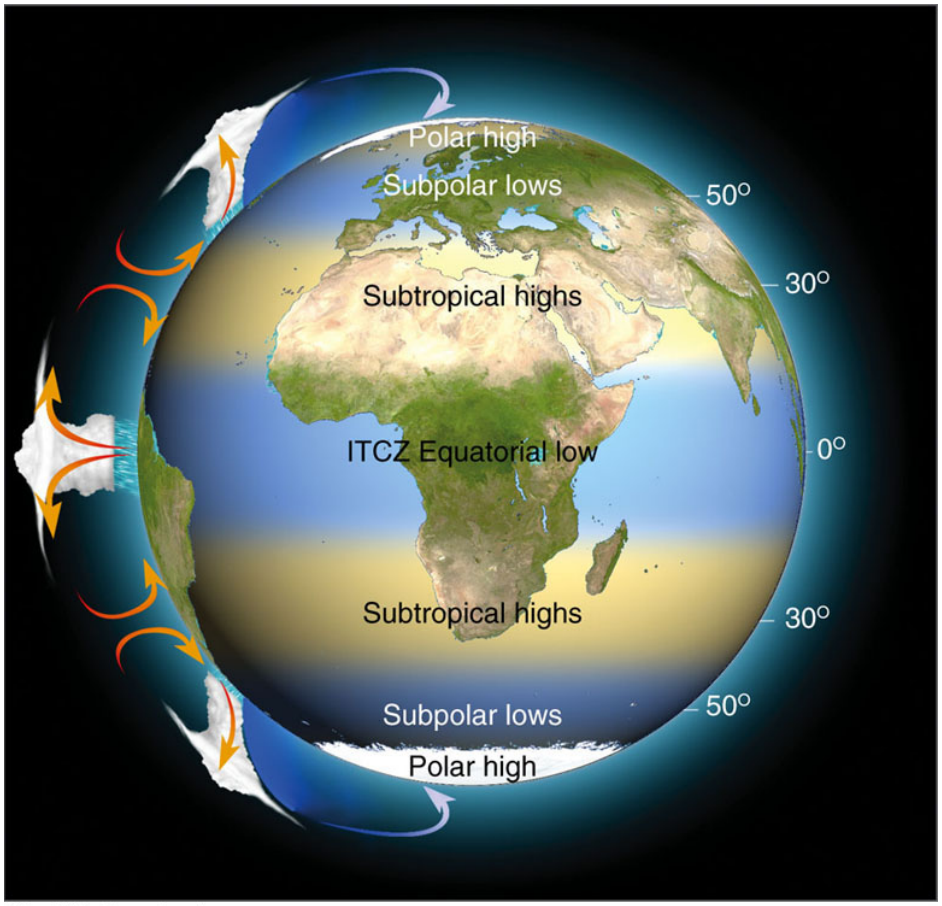
- Dans les régions tropicales, caractérisées par une ***faible rotation***, ***le régime de la cellule de Hadley*** transporte dans ***un plan vertical*** la chaleur équatoriale vers les sous-tropiques, dans une bande de latitudes restreintes entre 30°N et 30°S.

- Sous les moyennes et hautes latitudes, caractérisées par une ***forte rotation***, ***le régime des vents d'ouest*** (aussi appelé régime des cyclones extratropicaux) transporte dans ***un plan horizontal*** la chaleur par l'action des méandres du courant jet et des systèmes de hautes et de basses pressions.



… et deux régimes de précipitation

- Comme « produit dérivé » de ces régimes complémentaires, on observe des régimes de précipitations orageuses et intenses le long de l'équateur et des précipitations plus continues aux latitudes moyennes, tandis que le temps sec et généralement clair domine dans les sous-tropiques et les régions polaires.

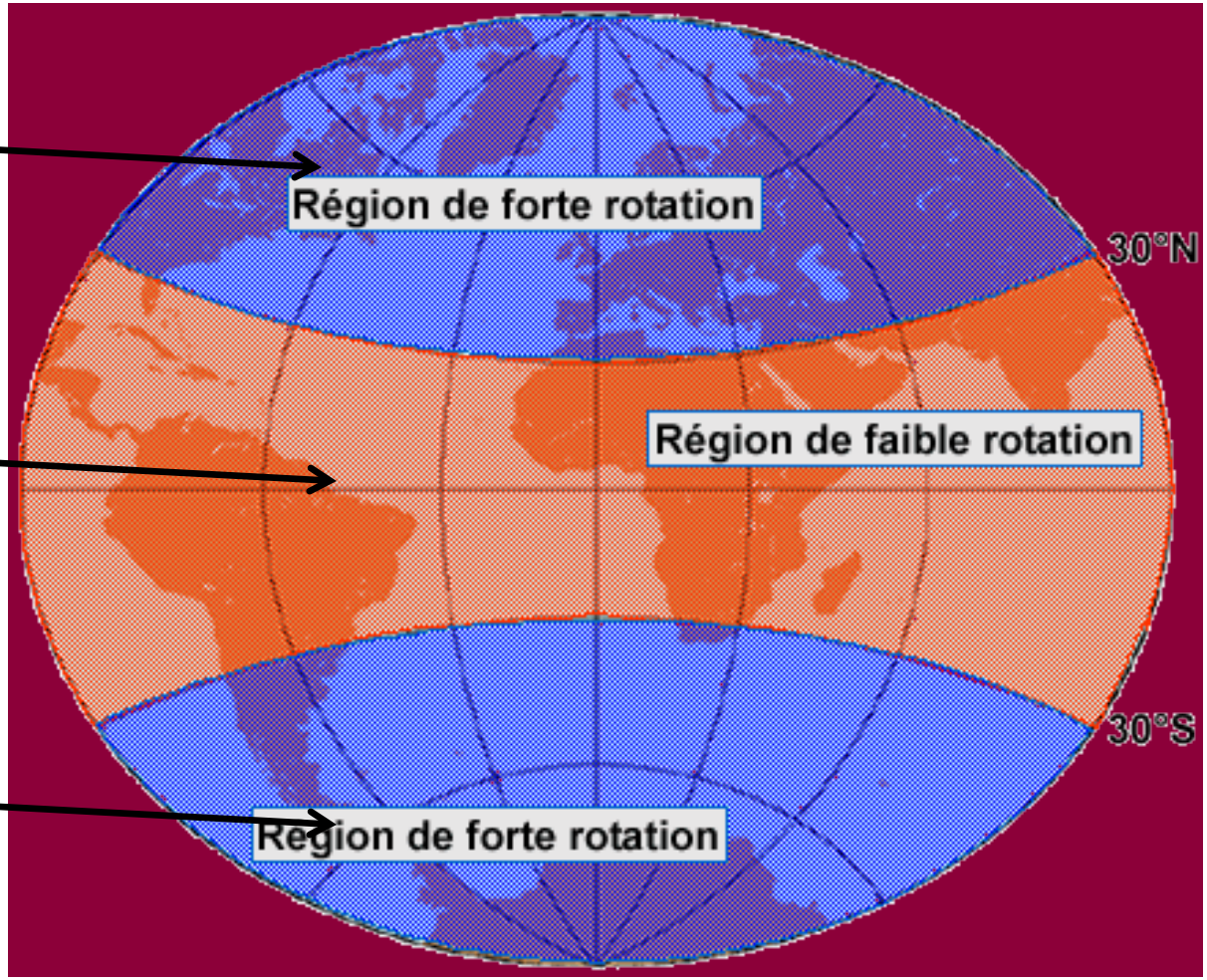


© Brooks/Cole, Cengage Learning

Régime des vents d'ouest

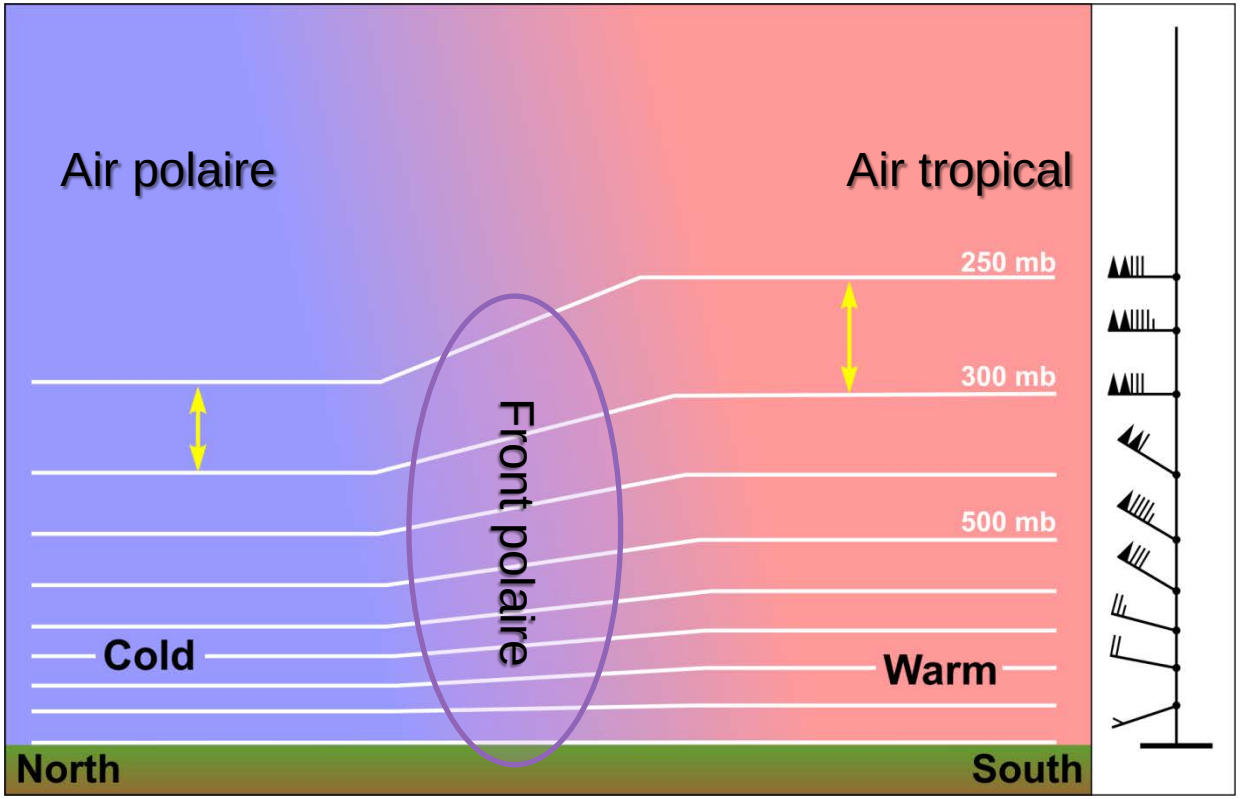
Régime de Hadley

Régime des vents d'ouest



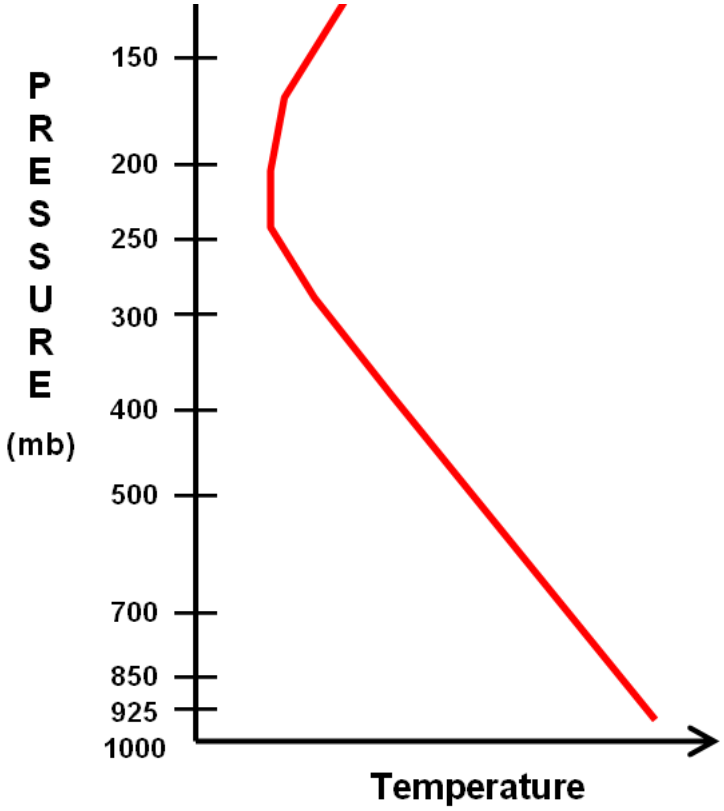
Les courants jet sous-tropical et polaire

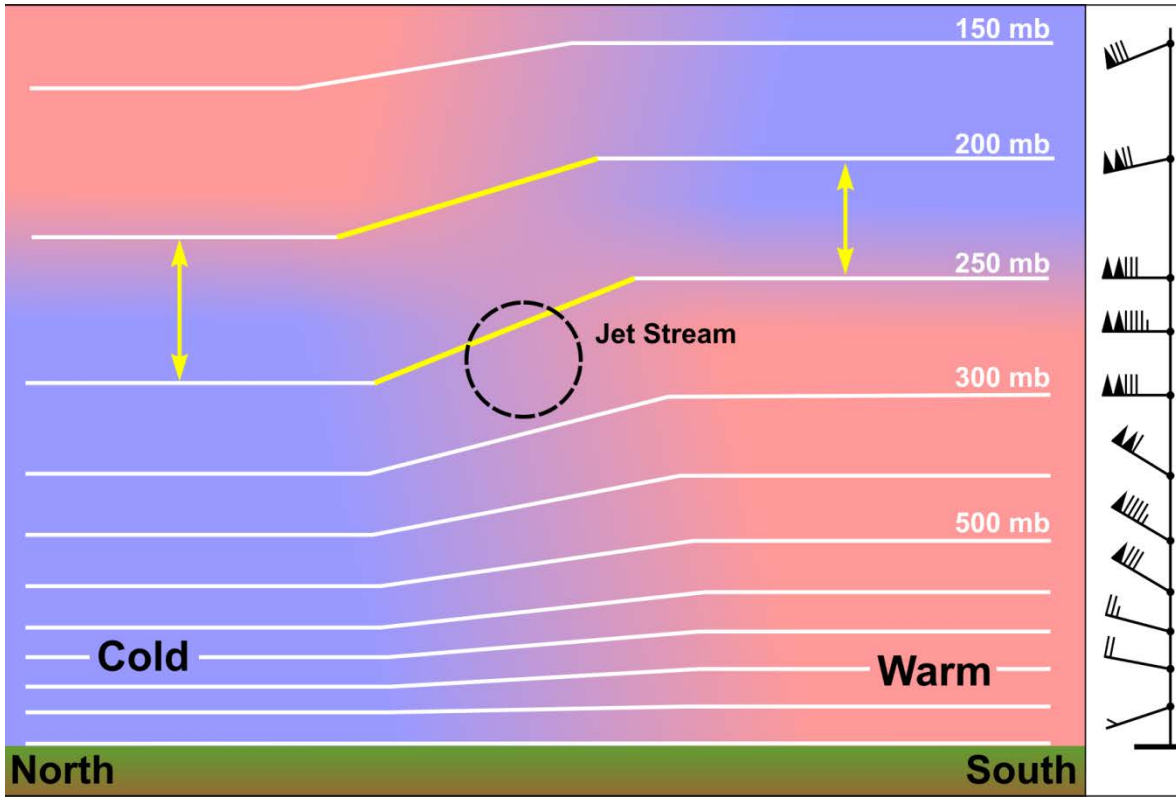
- Par définition, le gradient nord-sud de température est très élevé le long du front polaire. Il s'ensuit un fort gradient nord-sud de pression en altitude, et donc un fort vent d'ouest.



Les courants jet sous-tropical et polaire

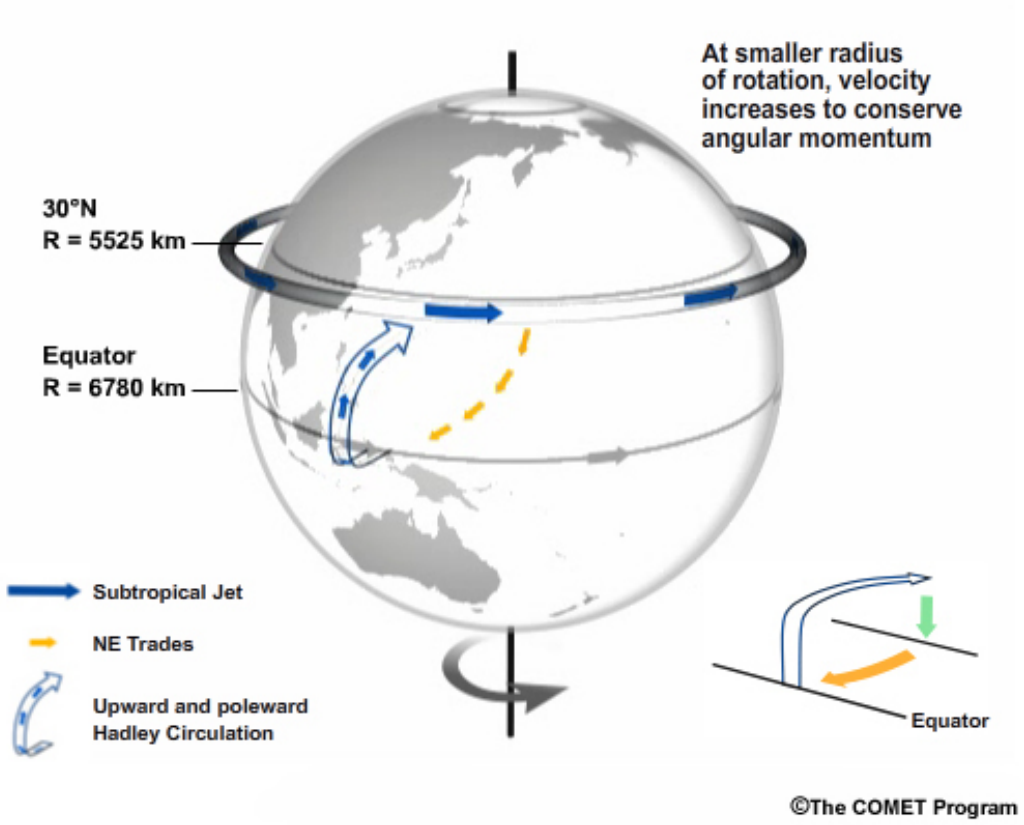
- Ces vents particulièrement forts se situent à la tropopause, et sont fondamentalement reliés à la présence du front polaire : c'est le ***courant jet polaire***, que l'on observe généralement près de 60° de latitude.





Les courants jet sous-tropical et polaire

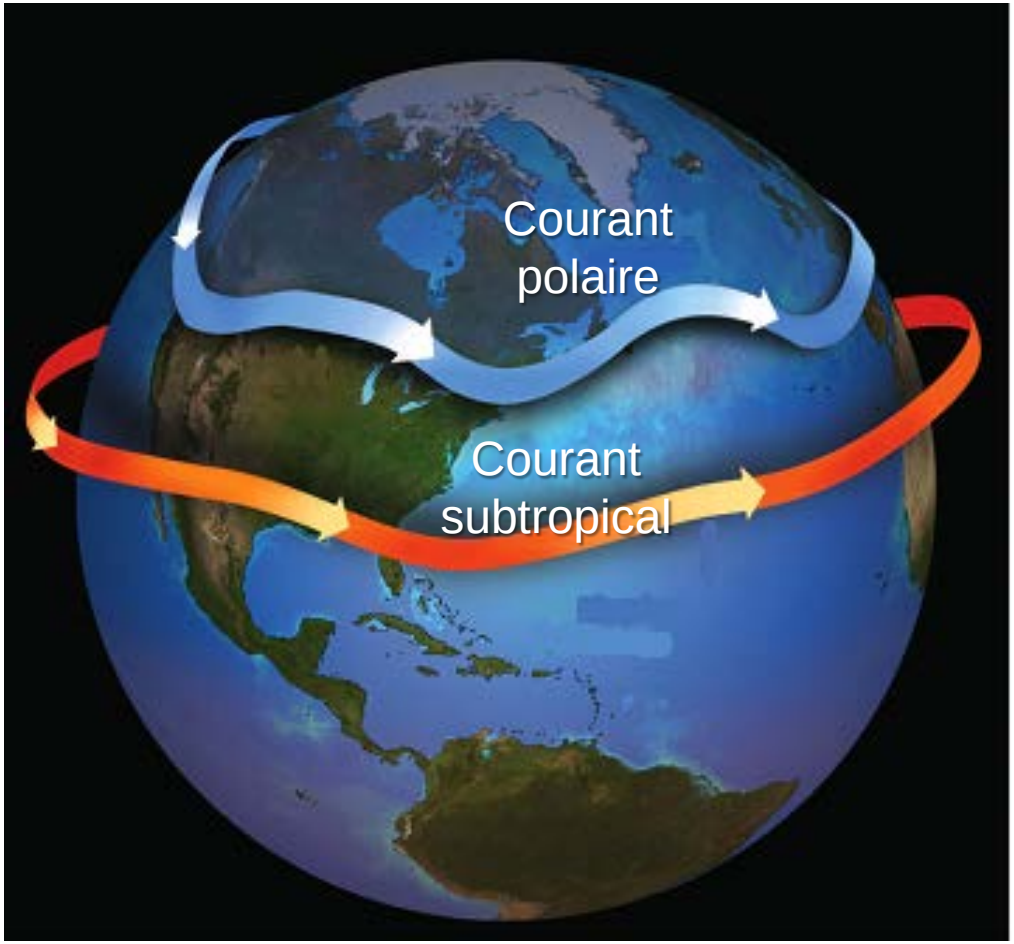
- Le jet sous-tropical à environ 30 ° de latitude résulte de l'écoulement de l'air vers le haut et vers le pôle dans la cellule de Hadley. Comme les parcelles d'air se déplacent dans un cercle de latitude plus petit, leur vitesse doit augmenter afin de conserver le moment angulaire.



Les courants jet s'assimilent donc à des « rivières » rapides d'air qui englobent la Terre aux latitudes sous-tropicales et moyennes.

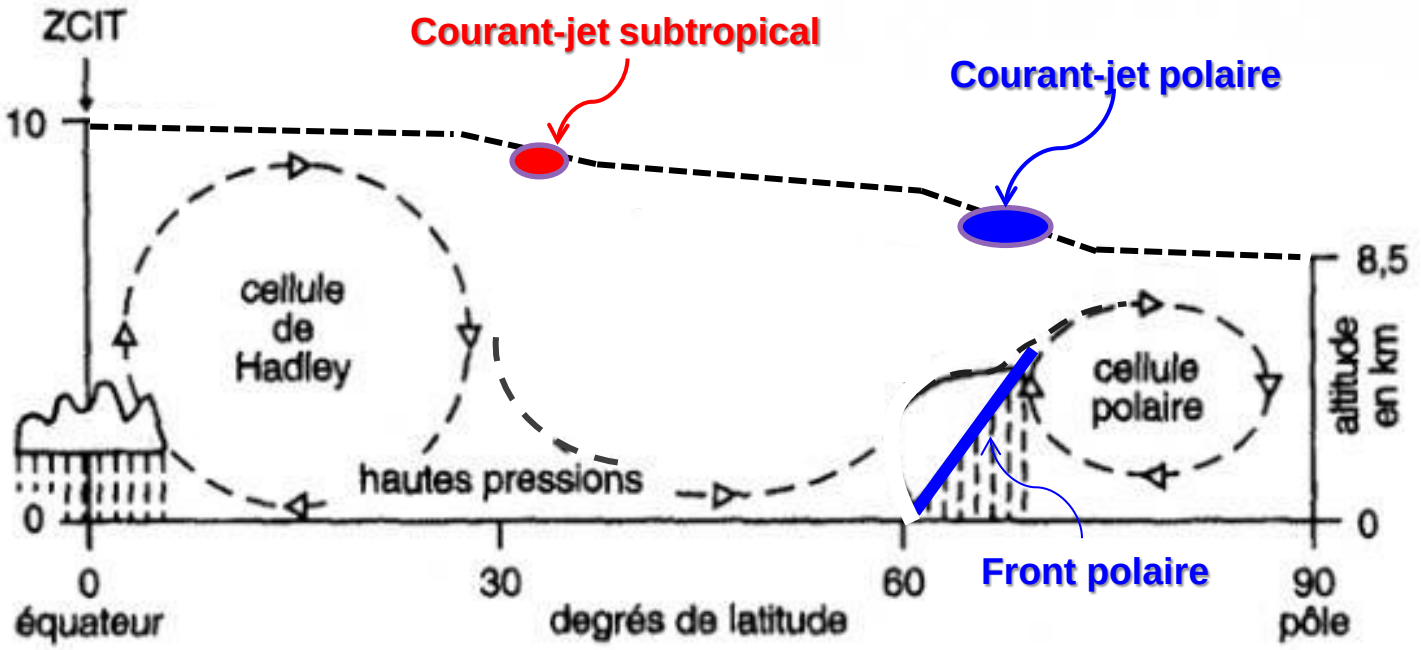
Des rivières d'air autour du globe

- La différence de température entre les pôles et les tropiques crée des gradients de pression qui augmentent avec l'altitude jusqu'à la tropopause. La conséquence est l'augmentation de la vitesse avec l'altitude. Ceci entraîne la formation du **courant jet polaire**.
- L'augmentation du vent avec l'altitude à cause du gradient horizontale de température est appelé **vent thermique.**
- La sphéricité de la terre et la conservation de moment angulaire créent le **courant jet subtropical**.
- En hiver, la plus grande différence de température entre les tropiques et les pôles intensifie le courant polaire.

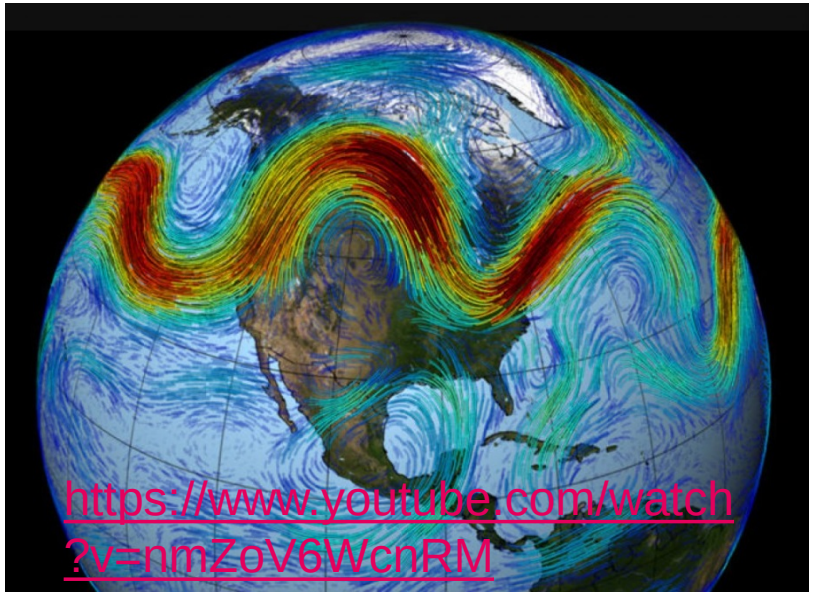


- Ces vents sont dirigés d'ouest en est à cause de la rotation de la Terre (force de Coriolis).

Modèle de circulation générale et conséquences sur le climat



La météo, le climat et le courant jet polaire



Les vents faibles sont représentés par des segments de ligne en vert, les vents forts en jaune et les violents en rouge.
Niveaux de pression disponibles en hPa :
1000 (~120 m); 850(~1500); 700 (3000 m); 500 (5500); 250 (10000 m); 70 (18000 m); 10 (30800).

1. Le vent à la surface : http://earth.nullschool.net/
2. Le vent à ~ 5500 mètres : http://earth.nullschool.net/#current/wind/isobaric/500hPa/
3. Le vent au sommet de la troposphère à ~ 10000 mètres : http://earth.nullschool.net/#current/wind/isobaric/250hPa/

Cirrus de courant-jet Cette photo, prise à une altitude d'environ 320 km, montre une bande de cirrus produits par les vents d'ouest du courant-jet qui s'étend entre la Mer Rouge à l'Arabie saoudite. L'uniformité dans la bande de nuage reflète que le parcours étroit du courant-jet se déplace de la gauche vers la droite sur l'image. Cette photo provenant d'une navette, montre que la bande nuageuse comprend une série de nuages distincts et également espacés. Ils sont formés par un mouvement ondulatoire dans le courant d'air en altitude.

(Gracieuseté de LPI/NASA. Picture #13-32-1099)

Comment faire de la Météo

Entourez votre planète d'une fine couche d'air

Exposez-la au Soleil

Faite tourner la planète autour d'un axe

Additionnez un peu d'eau (autrement comment avoir la précipitation?)

Pour avoir de la variété, additionner quelques surfaces solides au milieu de la surface d'eau

ILLUSTRATION BY BEVERLY POWELL

Eureka!

Résumé

- La circulation générale est la circulation moyenne de l'air atmosphérique. Le vent instantané est très différent de la valeur moyenne.
- Les conditions moyennes nous aident à identifier les causes majeures de l'écoulement de l'air.
- La cause fondamentale de la circulation atmosphérique est le réchauffement différentiel de la planète :
  - L'air chaud est transféré de l'équateur vers les pôles;
  - L'air froid est transféré des pôles vers l'équateur.

Résumé

- Le modèle à une cellule suppose :
  - Une surface uniforme d'eau
  - Le rayonnement solaire incide perpendiculairement à l'équateur
  - La Terre ne tourne pas autour de son axe
- Le modèle à trois cellules
  - La Terre est en rotation autour de son axe = trois cellules (Hadley, Ferrell, Polar)
  - Formation de ceintures de hautes et basses pressions alternativement (avec une ceinture de basses pressions à l'équateur)
  - Des ceintures de vents de direction différente en commençant par des vents de NE au nord de l'Équateur et SE au sud.

Résumé (suite)

- Les vents et la pression à la surface
  - Centres de haute et basse pression semi permanents
- Circulation générale et patrons de précipitation
  - Pluvieux où l'air monte (dépressions à la surface)
  - Régions sèches ou même désertiques où l'air descend (anticyclones à la surface)

Résumé (suite)

- Écoulement moyen et pression en altitude
  - Le gradient de température sud – nord et le gradient de pression en altitude est à l'origine des vents Ouest – Est, surtout où les gradients sont le plus élevés : aux latitudes moyennes.
  - Formation des courants-jets : des forts vents de 100-200 nœuds à l'altitude de 10-15 km, des rubans entourant la planète de milliers kilométres de longueur et de 100 km de largeur et quelques kilomètres de hauteur : Courant-jet polaire et courant jet sous tropical.