

La dynamique de l'atmosphère : chaos, prévisibilité et émergence.

F. BOUCHET (ENS-Lyon, France)

Lyon, Juin 2013

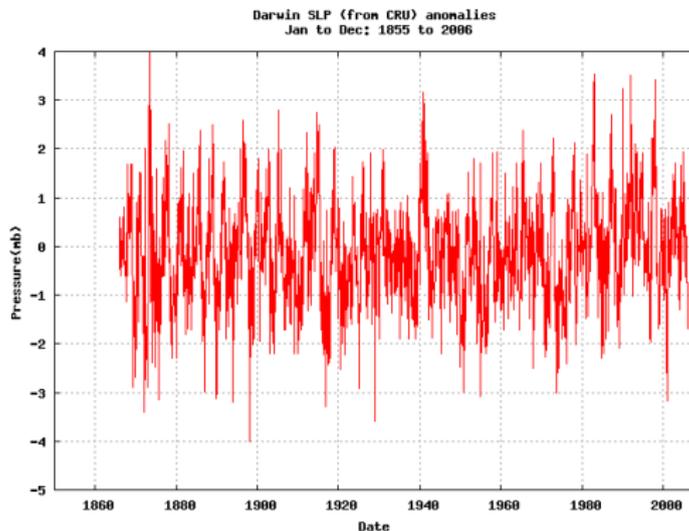
Cyclones et Anticyclones



Un cyclone (zone de faible pression)

- Mécanique des fluides géophysiques.

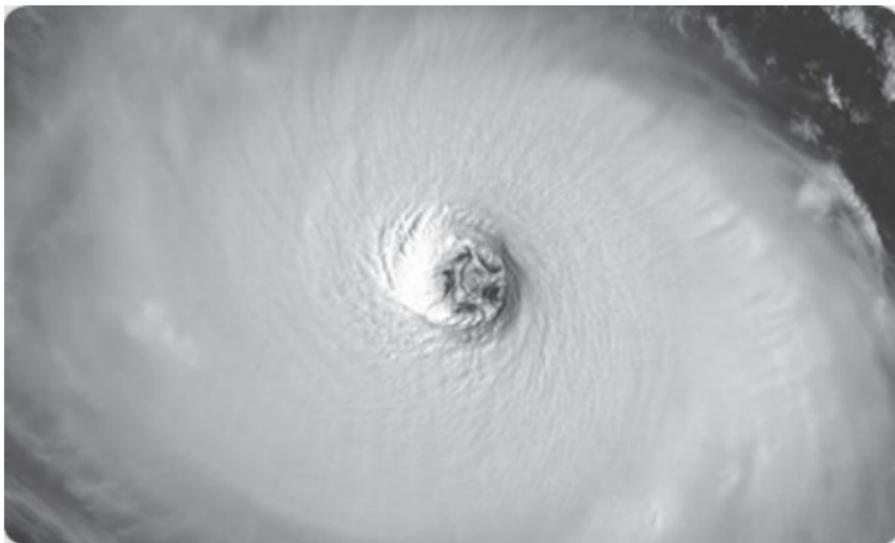
Cyclones et Anticyclones



Une courbe représentant la pression au cours du temps

- L'évolution d'un écoulement turbulent.

Cyclones et Anticyclones



Un cyclone tropical (l'ouragan Isabell)

- Comment les fluides connaissent-ils les hexagones? Un phénomène émergent.

La dynamique de l'atmosphère : chaos, prévisibilité et émergence.

- 1 Dynamique de l'atmosphère
 - Quelle est la source d'énergie ?
 - Le temps, le vent et la pression
 - La météorologie chaotique et le climat
- 2 Prédire la formation des cyclones en lançant des dés
 - La prédiction des probabilités en physique
 - Mécanique statistique : tourbillons aléatoires et émergence des cyclones
 - Un peu plus à propos de la physique du climat
- 3 Conclusions

Quelques Questions Fondamentales

- Pourquoi l'atmosphère est-il animé de mouvements incessants ?
- Quelle est la source d'énergie de ce mouvement ?
- Quels sont les principes de ce mouvement ?

Quelques Questions Fondamentales

- Pourquoi l'atmosphère est-il animé de mouvements incessants ?
- Quelle est la source d'énergie de ce mouvement ?
- Quels sont les principes de ce mouvement ?

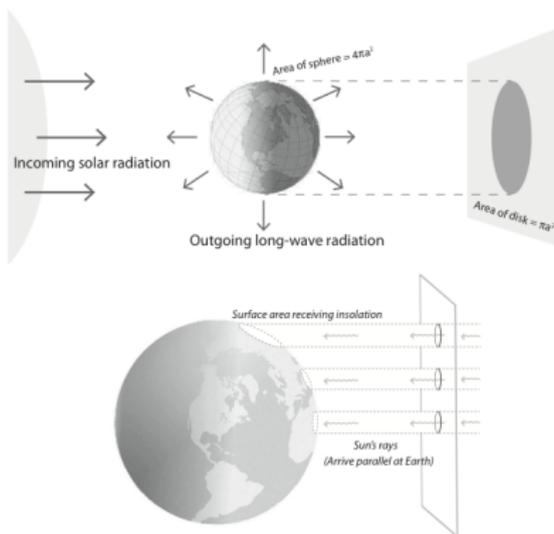
Quelques Questions Fondamentales

- Pourquoi l'atmosphère est-elle animée de mouvements incessants ?
- Quelle est la source d'énergie de ce mouvement ?
- Quels sont les principes de ce mouvement ?

Outline

- 1 Dynamique de l'atmosphère
 - Quelle est la source d'énergie ?
 - Le temps, le vent et la pression
 - La météorologie chaotique et le climat
- 2 Prédire la formation des cyclones en lançant des dés
 - La prédiction des probabilités en physique
 - Mécanique statistique : tourbillons aléatoires et émergence des cyclones
 - Un peu plus à propos de la physique du climat
- 3 Conclusions

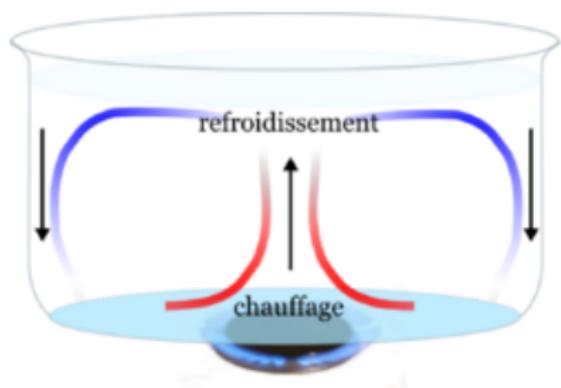
Le Soleil est la Source Essentielle d'Énergie sur Terre



Pourquoi et comment varie l'ensoleillement (l'insolation) sur terre.

- La source du mouvement est la différence de température entre l'équateur et les pôles, due aux variations d'ensoleillement.

Convection : des Différences de Température Mettent les Fluides en Mouvement



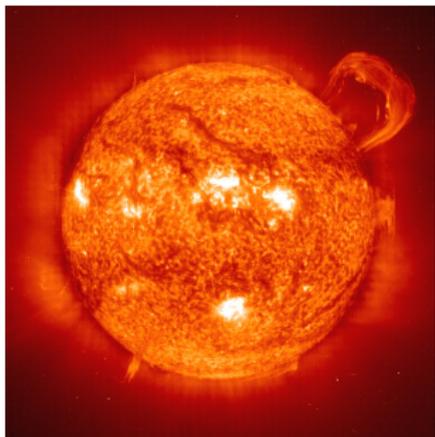
Convection dans une casserole
chauffée par dessous



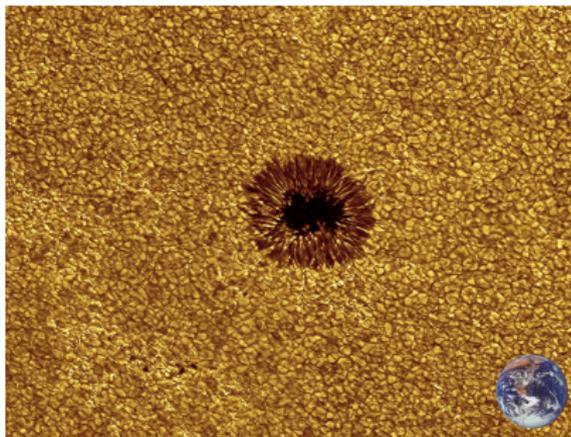
Convection de Rayleigh-Bénard

Les Cellules de Convection Solaires

Le soleil est un plasma avec une source d'énergie interne

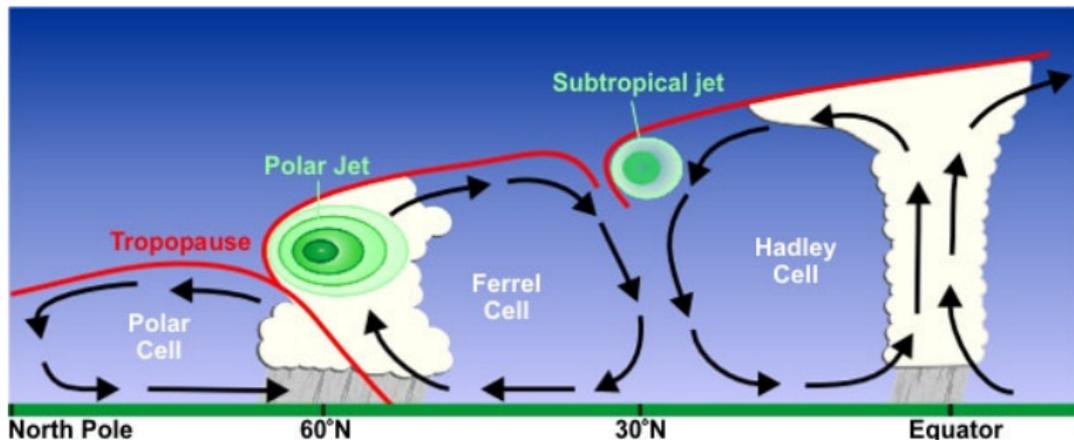


Le Soleil observé par le satellite Soho



Cellules de convection solaires

Convection Atmosphérique



Les cellules de convection de l'atmosphère

Outline

- 1 Dynamique de l'atmosphère
 - Quelle est la source d'énergie ?
 - Le temps, le vent et la pression
 - La météorologie chaotique et le climat
- 2 Prédire la formation des cyclones en lançant des dés
 - La prédiction des probabilités en physique
 - Mécanique statistique : tourbillons aléatoires et émergence des cyclones
 - Un peu plus à propos de la physique du climat
- 3 Conclusions

Dynamique des Cartes Météorologiques



- Quelles sont les causes des changements météorologiques ?

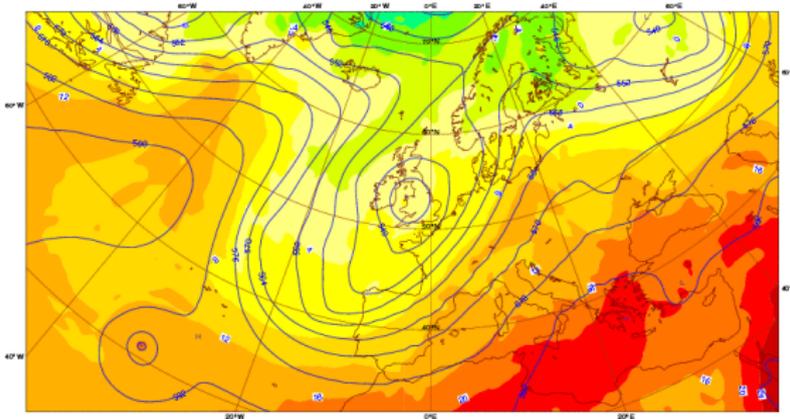
Les Cartes de Pression Expliquent le Temps



- Le temps est corrélé aux cartes de pression. Les dépressions sont des cyclones, les hautes pressions des anticyclones.
- Peut-on comprendre la dynamique des cartes de pression ?

La Bonne Echelle n'est pas celle d'un Pays

Monday 24 September 2012 00UTC ©ECMWF Forecast t+048 VT: Wednesday 26 September 2012 00UTC
850 hPa Temperature / 500 hPa Geopotential

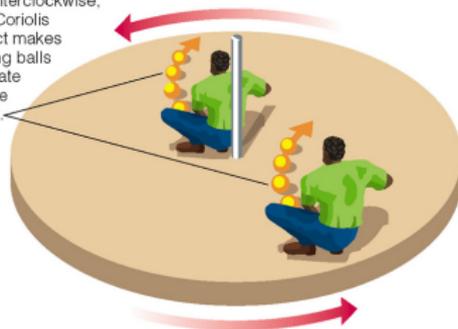


Cartes de température et de pression au dessus de l'Europe (26/09/2012)

- L'échelle "synoptique" (milliers de kilomètres) est l'échelle pertinente pour comprendre la dynamique.

La Force de Coriolis

On a merry-go-round spinning counterclockwise, the Coriolis effect makes rolling balls deviate to the right.



© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

- La force de Coriolis est une des forces d'inertie, par exemple dans un référentiel en rotation uniforme.
- La force de Coriolis (qui dépend de la vitesse) est différente de la force centrifuge (qui ne dépend pas de la vitesse).

Les Equations de Navier-Stokes en Rotation

- Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} - 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u} + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{g}$$

- Le nombre de Rossby compare l'ordre de grandeur des termes d'advection et de la force de Coriolis

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{O}(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u})}{\mathcal{O}(2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u})} = \frac{U}{2\Omega L} \quad \varepsilon = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \times 2\pi / 10^5 \text{ s}^{-1} \times 10^6 \text{ m}} \simeq 0,1$$

Les Equations de Navier-Stokes en Rotation

- Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} - 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u} + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{g}$$

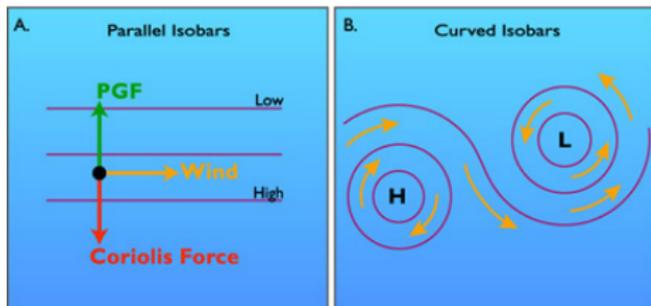
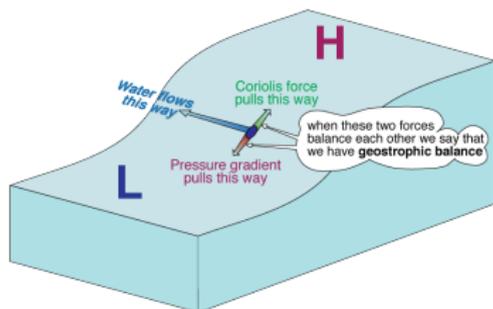
- Le nombre de Rossby compare l'ordre de grandeur des termes d'advection et de la force de Coriolis

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{O}(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u})}{\mathcal{O}(2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u})} = \frac{U}{2\Omega L} \quad \varepsilon = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \times 2\pi / 10^5 \text{ s}^{-1} \times 10^6 \text{ m}} \simeq 0,1$$

- Pour l'atmosphère, la dynamique horizontale est dominée par l'équilibre entre le gradient de la pression et la force de Coriolis (équilibre géostrophique).

Le Vent est Dirigé le Long des Lignes de Pression Constante

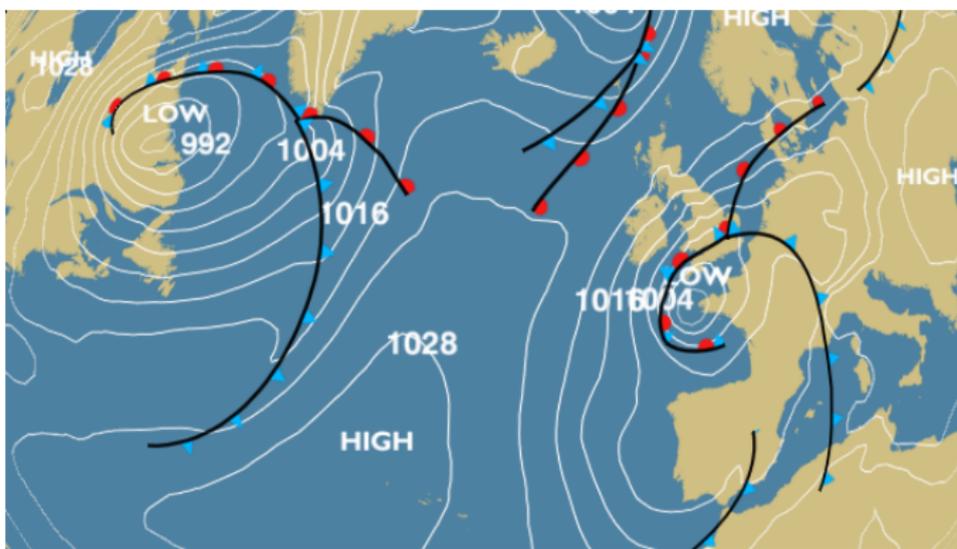
L'équilibre géostrophique



$$\frac{\nabla_h P}{\rho} = - (2\Omega \wedge \mathbf{u})_h$$

- Le vent a un mouvement horaire autour des anticyclones (hautes pressions) et anti-horaire autour des cyclones (dépressions).
- C'est le contraire dans l'hémisphère sud. Pourquoi ?

Dynamique des Cartes de Pression ?

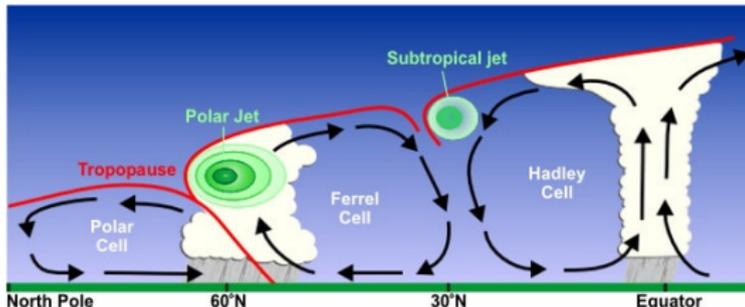


Carte de pression au dessus de l'atlantique nord (29/04/2012)

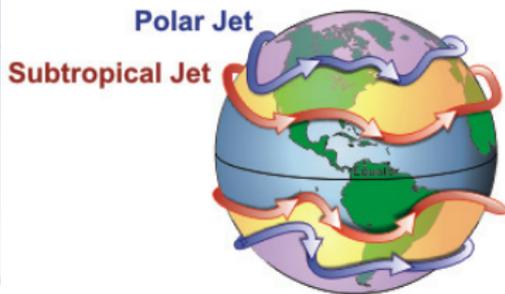
Résumé

- L'atmosphère est mise en mouvement par des différences de température dues à l'ensoleillement différentiel.
- La bonne échelle pour comprendre ces phénomènes est l'échelle synoptique (milliers de kilomètres).
- En première approximation, les vents suivent les lignes isobares (équilibre géostrophique), dans le sens horaire autour des anticyclones et anti-horaire autour des cyclones.

La Convection Atmosphérique et les Courant-Jets

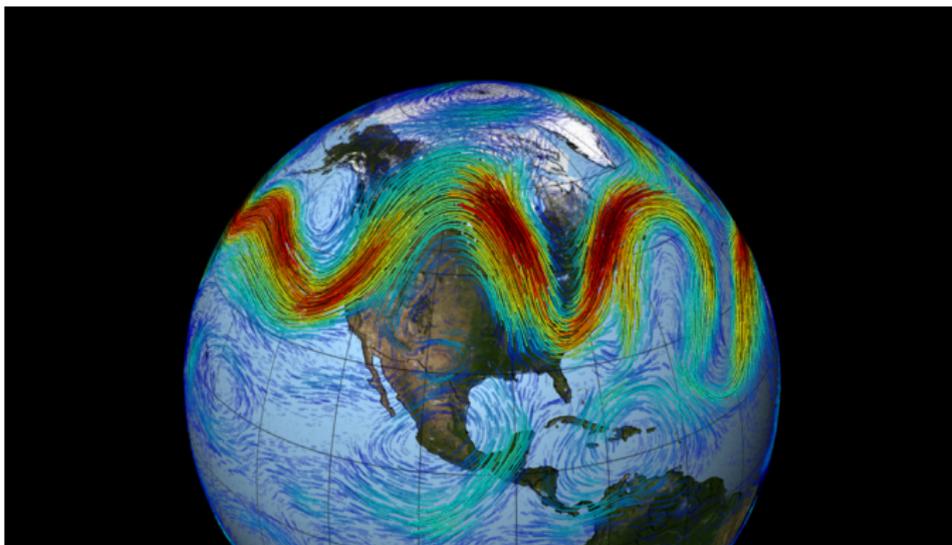


Les cellules de convection atmosphériques



Configuration schématique
des courant jet

Dynamique des Jets Atmosphériques



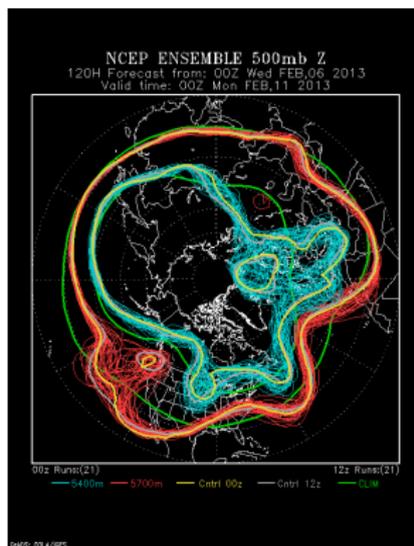
Vitesse dans la haute troposphère

Outline

- 1 Dynamique de l'atmosphère
 - Quelle est la source d'énergie ?
 - Le temps, le vent et la pression
 - La météorologie chaotique et le climat
- 2 Prédire la formation des cyclones en lançant des dés
 - La prédiction des probabilités en physique
 - Mécanique statistique : tourbillons aléatoires et émergence des cyclones
 - Un peu plus à propos de la physique du climat
- 3 Conclusions

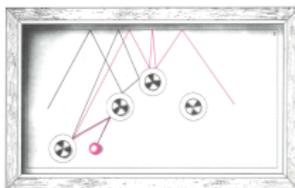
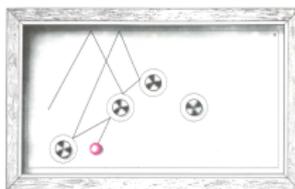
La Dynamique des Jets Atmosphériques est Chaotique

Le notion de sensibilité aux conditions initiales (l'effet papillon)



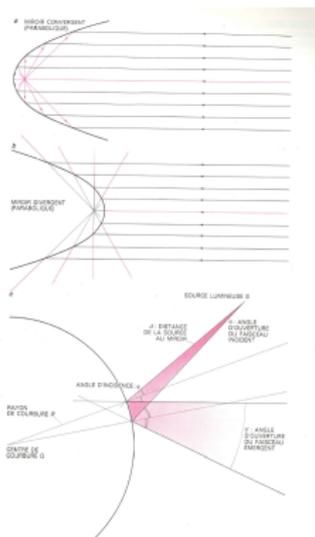
- La météorologie ne peut pas être prédite au delà de deux semaines.

Dynamique d'un Billiard et Sensibilité aux Conditions Initiales



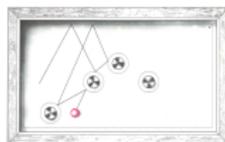
- La plupart des billiards sont chaotiques : essence du chaos.

Réflexion Spéculaire et Dynamique d'un Billard



- Comportement **convergent (parabolique)** ou **divergent (hyperbolique)**. $\theta' = \theta (1 + 2d/R \cos \phi) > \theta$.

Dynamique d'un Billard et Sensibilité aux Conditions Initiales



- Les billards chaotiques : l'essence du chaos.
- n nombre de chocs avec un obstacle intérieur. **Croissance exponentielle de l'écart entre 2 trajectoires :**

$$\Delta\theta = (\Delta\theta)_0 2^n = (\Delta\theta)_0 \exp(n \log 2).$$

Exposant de Lyapunov

- L'exposant de Lyapunov d'un système dynamique est une quantité qui caractérise le taux de séparation de trajectoires infiniment proches.
- Deux trajectoires avec une séparation initiale $\delta\mathbf{Z}_0$ divergent à un taux donné approximativement (pour $|\delta\mathbf{Z}_0|$ petit) par

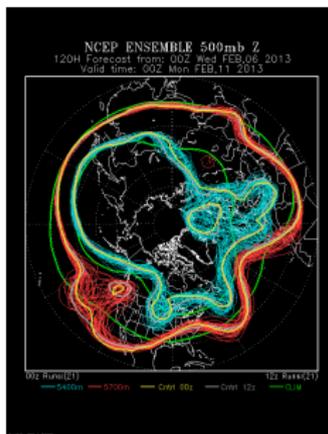
$$|\delta\mathbf{Z}(t)| \approx e^{\lambda t} |\delta\mathbf{Z}_0|,$$

où λ est l'exposant de Lyapunov.

- Au delà d'un temps de l'ordre du temps de Lyapunov $\tau = 1/\lambda$, le système n'est plus prévisible.
- La plupart des dynamiques dans la nature sont chaotiques.
- Le temps de Lyapunov du billard chaotique est $1/\log 2$.

La Dynamique des Jets Atmosphériques est Chaotique

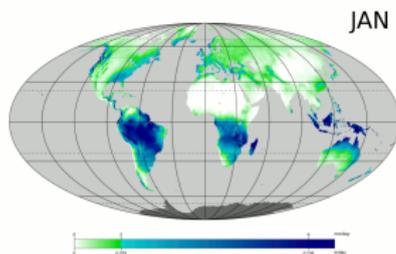
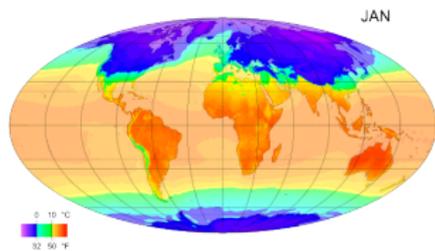
Le temps de Lyapunov est de l'ordre de deux semaines



- La météorologie ne peut pas être prédite au delà de deux semaines (temps de Lyapunov).
- Ce n'est pas un problème pratique, c'est une propriété fondamentale et intrinsèque de la dynamique atmosphérique. Elle est chaotique.

Quelles Différences entre Climat et Météorologie ?

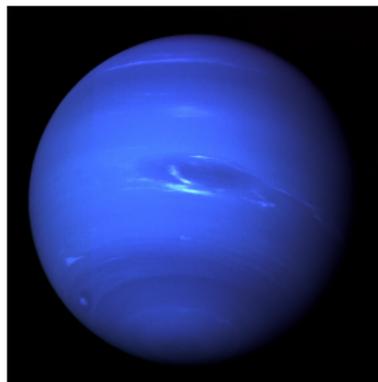
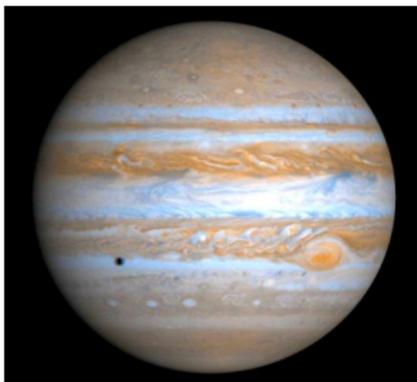
Le Climat est l'étude de la statistique (moyennes, variance, etc.) des propriétés de l'atmosphère



Moyennes mensuelles des températures et précipitation (animation Temp., animation Prec) (NCEP-NCAR)

- La météorologie étudie le temps aujourd'hui et demain, le climat étudie sa statistique sur des échelles temporelles longues.

Changeons à Nouveau d'Echelle : Jupiter et Neptune

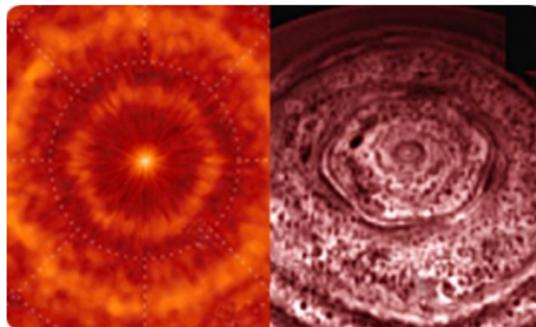
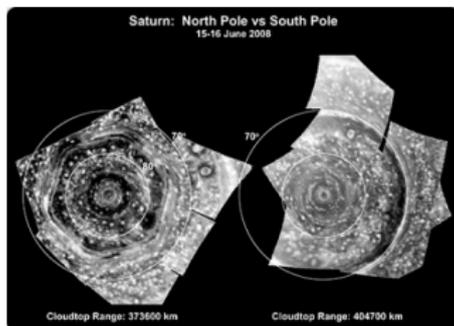


L'atmosphère de Jupiter

L'atmosphère de Neptune

- L'organisation sous forme de jets, de cyclones et d'anticyclones est universelle pour les fluides en rotation.

Saturne Connait aussi les Hexagones



Les hexagones du pole nord de Saturne

Questions Fondamentales

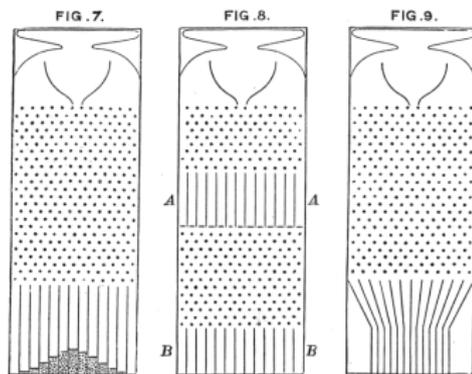
- Comment pouvons nous prédire le climat si nous ne pouvons pas prédire le temps ?
- Pouvons nous expliquer pourquoi l'émergence de jets, de cyclones et d'anticyclones est universelle ?

Outline

- 1 Dynamique de l'atmosphère
 - Quelle est la source d'énergie ?
 - Le temps, le vent et la pression
 - La météorologie chaotique et le climat
- 2 Prédire la formation des cyclones en lançant des dés
 - La prédiction des probabilités en physique
 - Mécanique statistique : tourbillons aléatoires et émergence des cyclones
 - Un peu plus à propos de la physique du climat
- 3 Conclusions

Le Quincunx de Galton

Une machine à probabilités



La machine à probabilités de Galton

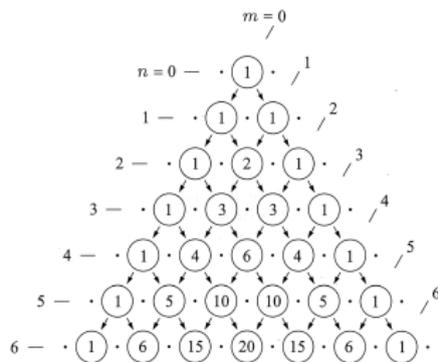
Galton (1822-1911)

- Des systèmes mécaniques simples ont des comportements probabilistes.

Le Triangle de Pascal

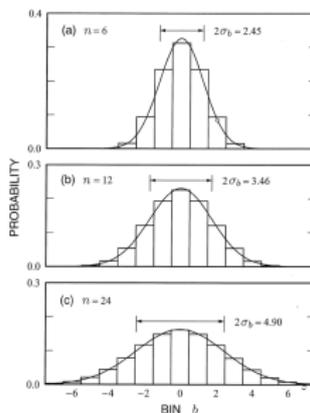
Loi de probabilité binomiale pour deux évènements équiprobables ($p=1/2$)

On fait un tirage aléatoire de la direction (droite ou gauche), avec probabilité $1/2$. Le triangle de Pascal compte le nombre de réalisations conduisant à une position k après n pas.



Le triangle de Pascal donne une loi binomiale de paramètre $p = 1/2$

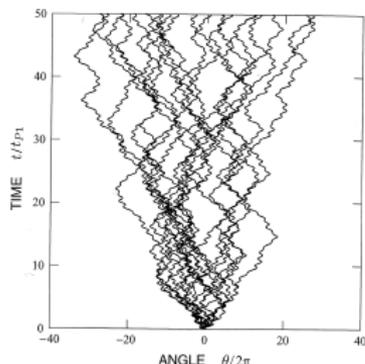
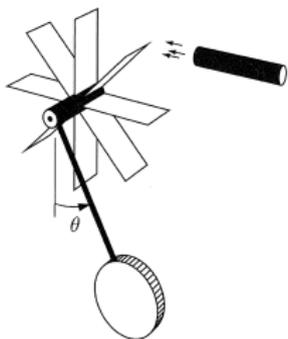
Evolution selon le Triangle de Pascal et Probabilité Gaussienne



Evolution d'une loi binomiale en fonction de n : convergence vers une loi de probabilité Gaussienne

Un Pendule Forcé par un Couple Périodique

Une autre machine à probabilités

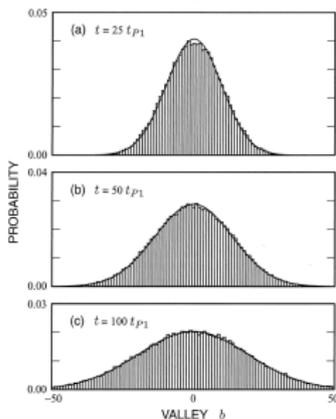


Un pendule avec couple périodique

- La plupart des systèmes mécaniques (même simples) ont un comportement probabiliste.

Evolution de l'angle du pendule

Statistique du Pendule Forcé



Evolution de la probabilité de l'angle du pendule

- Même si la dynamique est chaotique et imprévisible, l'évolution des lois de probabilité est régulière et peut être prédite.
- Dans ce cas également, pour des temps longs, la probabilité est une loi Gaussienne.

Lois de Probabilité et Systèmes Dynamiques Chaotiques

- Dans la nature, la plupart des dynamiques ont des comportements imprévisibles après un certain temps.
- Ces dynamiques sont appelées chaotiques (sensibilité exponentielle aux conditions initiales).
- Leurs probabilités peuvent être prédites.
- Nous pouvons prédire le climat même si la météorologie est imprévisible au delà de deux semaines.

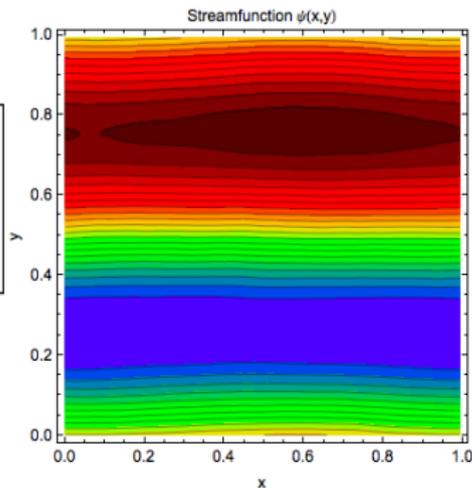
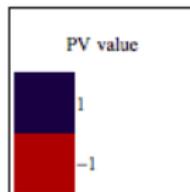
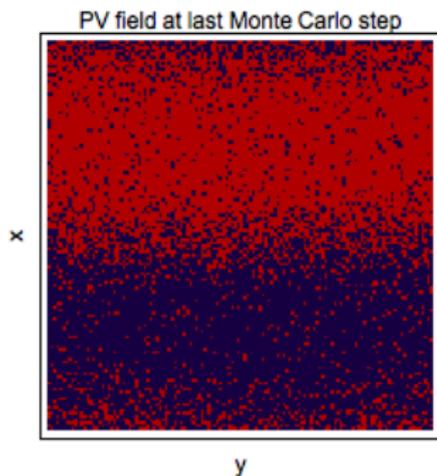
Outline

- 1 Dynamique de l'atmosphère
 - Quelle est la source d'énergie ?
 - Le temps, le vent et la pression
 - La météorologie chaotique et le climat
- 2 Prédire la formation des cyclones en lançant des dés
 - La prédiction des probabilités en physique
 - Mécanique statistique : tourbillons aléatoires et émergence des cyclones
 - Un peu plus à propos de la physique du climat
- 3 Conclusions

La Mécanique Statistique

- La mécanique statistique est la branche des sciences physiques ayant pour but d'expliquer les lois et principes thermodynamiques et les comportements macroscopiques de la matière, à partir d'un traitement probabiliste des lois microscopiques (mécanique classique, mécanique quantique).
- La mécanique statistique est née à la fin du 19ème siècle (Boltzmann, Gibbs, Maxwell, etc.).
- Il s'agit d'une des branches de la physique contemporaine les plus actives.
- La mécanique statistique des écoulements turbulents en une science naissante.

Tirage Aléatoire des Positions de Tourbillons



Lignes de pression constante

Tourbillons aléatoires

Jets, Cyclones et Anticyclones Emergent de Tourbillons Aléatoires

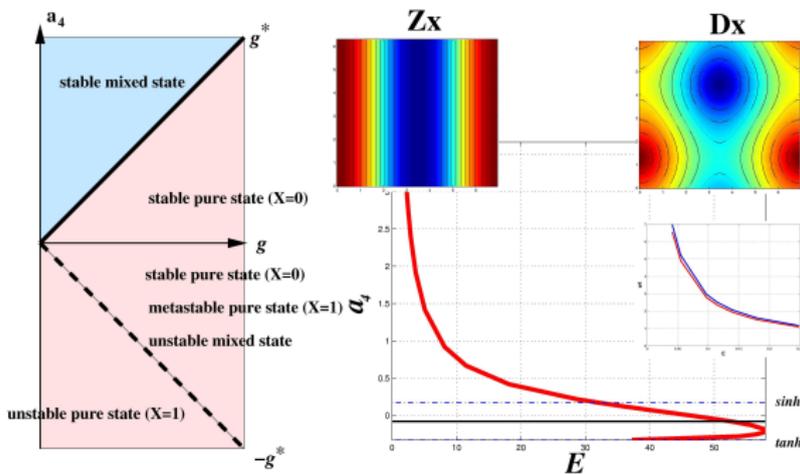


Diagramme de phase pour les équations d'Euler 2D

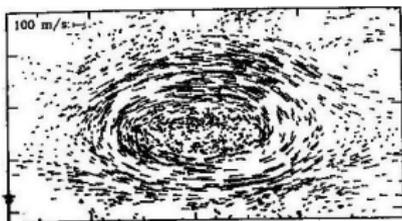
Mécanique Statistique de la Grande Tache Rouge de Jupiter



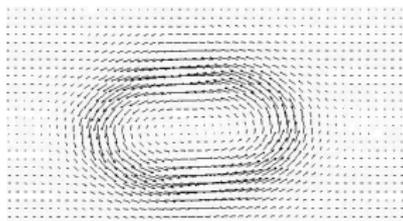
- Des tourbillons aléatoires et la conservation de l'énergie suffisent à expliquer l'émergence, la stabilité, et la prévisibilité des cyclones et anticyclones de Jupiter.

Grande Tache Rouge de Jupiter

Comparaison entre l'écoulement observé et les prédictions de la mécanique statistique



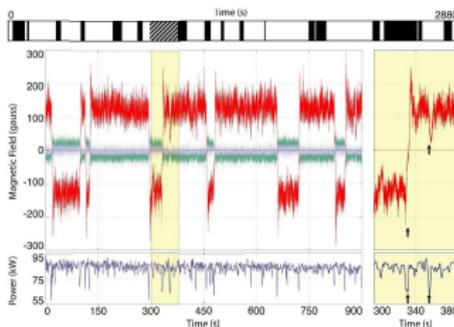
Données d'observation
(Voyager)



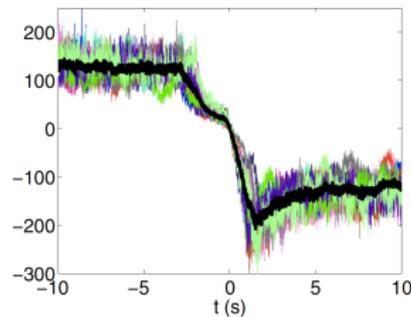
Equilibre statistique

Transitions Aléatoires dans des Ecoulements Turbulents

Renversement du champ magnétique terrestre (Dynamo turbulente, MHD)



Magnetic field timeseries



Zoom on reversal paths

(Expérience VKS)

Diagramme de Phase pour les Equations d'Euler 2D

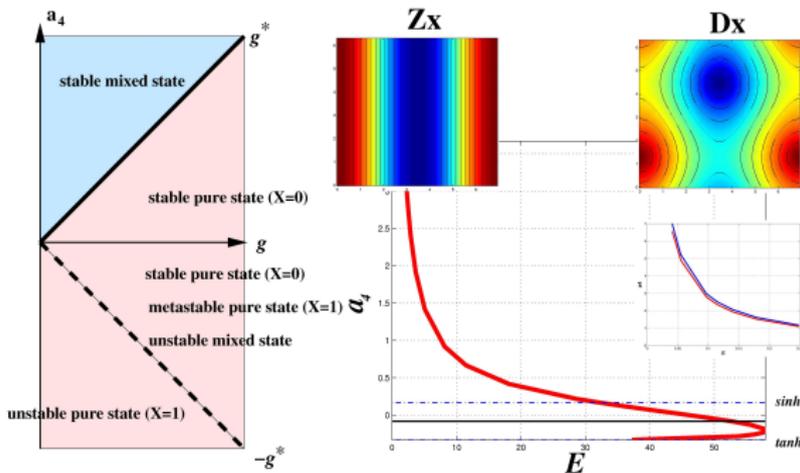
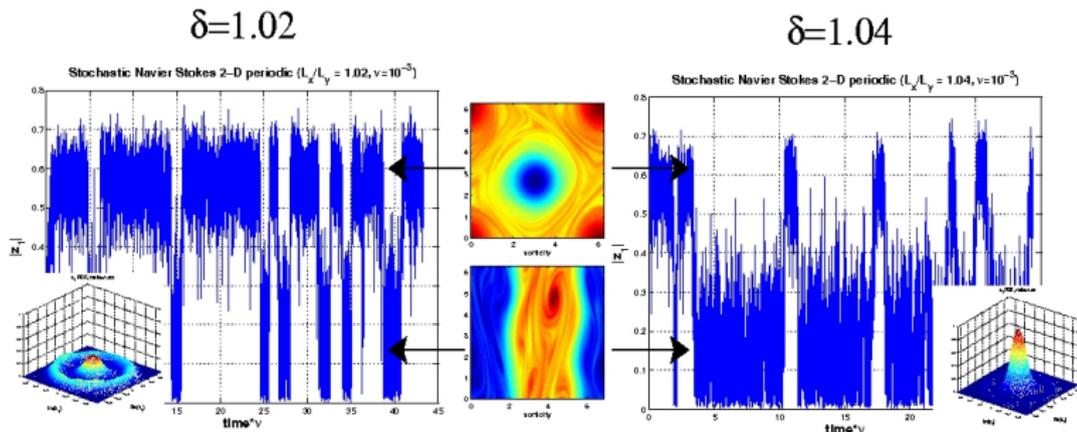


Diagramme de phase pour les équations d'Euler 2D

Transitions de Phase pour Navier-Stokes 2D

Transitions aléatoires entre minima d'énergie libre



Paramètre d'ordre : $z_1 = \int dx dy \exp(iy) \omega(x, y)$.

Pour les écoulements parallèles $|z_1| \simeq 0$, pour les dipôles $|z_1| \simeq 0.6 - 0.7$.

Loi d'Arrhenius pour les Ecoulements Turbulents

Transitions aléatoires entre minima d'énergie libre

- Ces transitions sont aléatoires et caractérisées par une **loi de Poisson** (comme pour le déclin radioactif)

$$P(\tau) = P(0) \exp(-\lambda \tau).$$

- Le temps de transition est donné par une **loi d'Arrhenius**

$$\lambda = \frac{1}{\tau_s} e^{-\frac{F}{k_B T}}.$$

- La statistique des écoulements turbulents est décrite par un formalisme thermodynamique.
- Ceci suggère qu'ils peuvent être étudiés dans un cadre de mécanique statistique hors-équilibre.

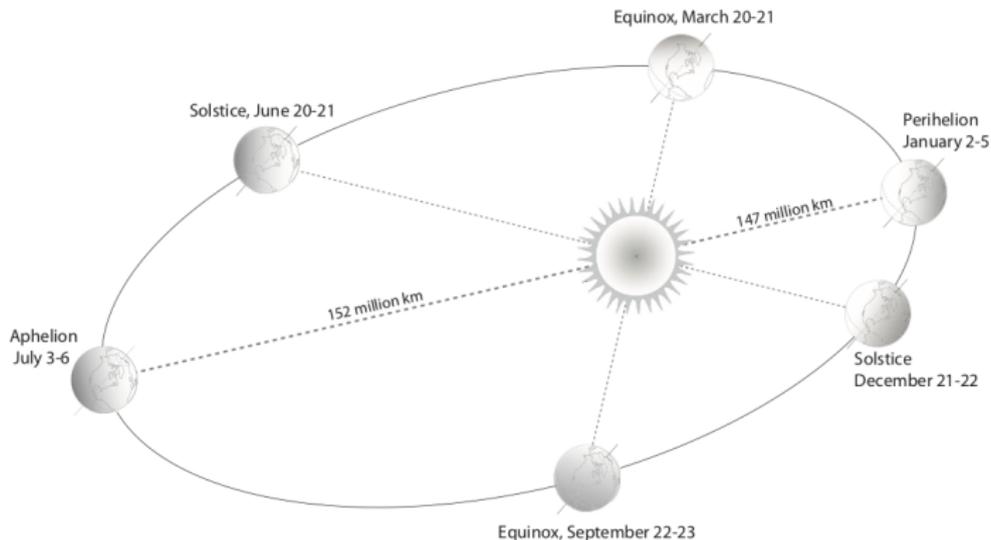
Résumé

- De la même manière qu'il est possible de déduire la thermodynamique de la statistique de la dynamique chaotique des atomes, Il est possible de décrire les propriétés macroscopiques des systèmes turbulents à partir de la statistique des champs de vitesse chaotiques.
- Le formalisme de la thermodynamique et de la mécanique statistique est alors extrêmement utile.
- Les concepts d'entropie d'un écoulement turbulent, d'énergie libre, de diagramme de phase, de transitions de phase, deviennent alors pertinents.
- Les transitions entre différents attracteurs sont décrit par des loi de type Arrhenius.

Outline

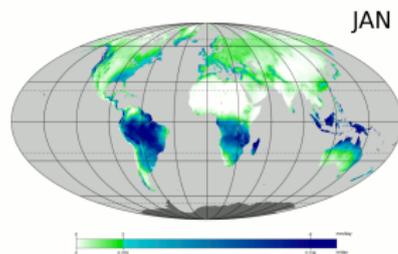
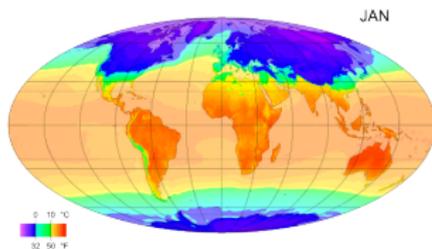
- 1 Dynamique de l'atmosphère
 - Quelle est la source d'énergie ?
 - Le temps, le vent et la pression
 - La météorologie chaotique et le climat
- 2 Prédire la formation des cyclones en lançant des dés
 - La prédiction des probabilités en physique
 - Mécanique statistique : tourbillons aléatoires et émergence des cyclones
 - Un peu plus à propos de la physique du climat
- 3 Conclusions

Variations Saisonnières et Annuelles de l'Ensoleillement



L'obliquité de l'axe de la rotation de la terre et les variations saisonnières

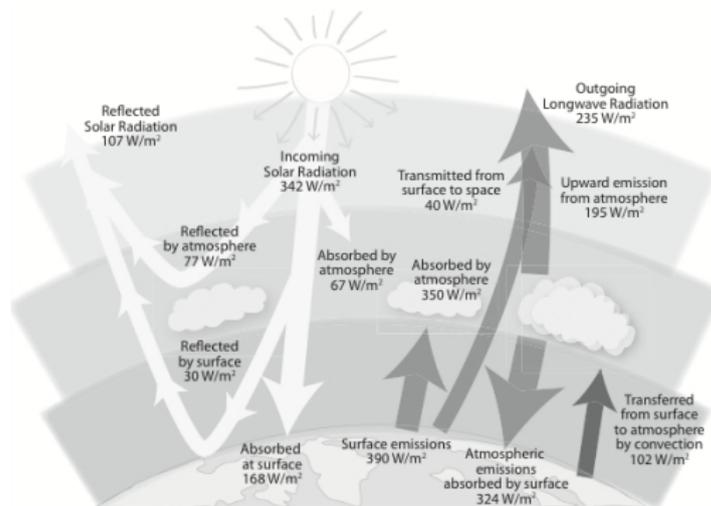
Variations Saisonnières des Températures et Précipitations



Moyennes mensuelles des températures et précipitations (animation Temp., animation Prec) (NCEP-NCAR)

L'Effet de Serre

Un phénomène naturel, donnant à la terre un climat clément



- L'intensité de l'effet de serre est profondément perturbé par les émissions anthropiques de CO_2 et de méthane (combustion des carburants fossiles).

Conclusions

- Le soleil est la source de l'énergie de la dynamique de l'atmosphère.
- Mécanique : la dynamique est dominée par la force de Coriolis. Le vent des anticyclones (hautes pressions) souffle dans le sens des aiguilles d'une montre, le long des isobares.
- Systèmes dynamiques : la météorologie est chaotique et n'est pas prévisible au delà de quelques jours, mais le climat est prévisible.
- Nous observons l'émergence de nombreux aspects universels qui peuvent être compris grâce à la mécanique statistique.
- La compréhension de la statistique des écoulements turbulents, et plus généralement de la mécanique statistique des systèmes complexes, est une des frontières de la science moderne.