

La physique de la Terre IV

Atmosphère et météorologie

Notions utilisées :

1. Introduction
3. Les ondes



Altostratus lenticularis ou nuage lenticulaire au-dessus du Mont Fuji

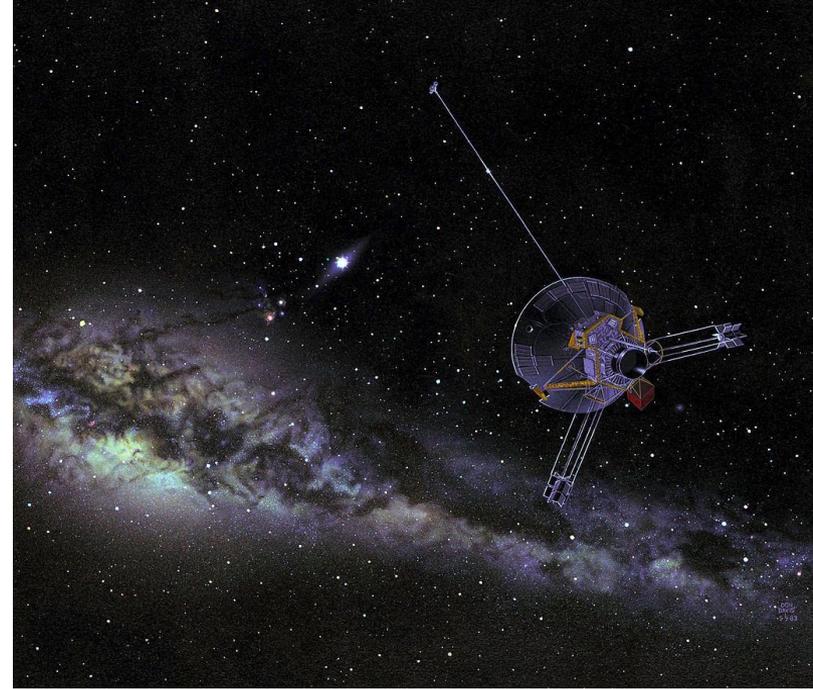
Pour une meilleure compréhension, certaines explications
pourront être légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipedia sauf mention contraire

La vitesse de libération

- C'est la vitesse qui permet à un objet de s'affranchir de l'attraction gravitationnelle d'un corps (en négligeant les frottements de l'atmosphère)
 - Terre : 11,2 km/s (40 000 km/h)

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{GMm}{r} > 0 \Leftrightarrow v > v_L = \sqrt{\frac{2GM}{R_T}}$$

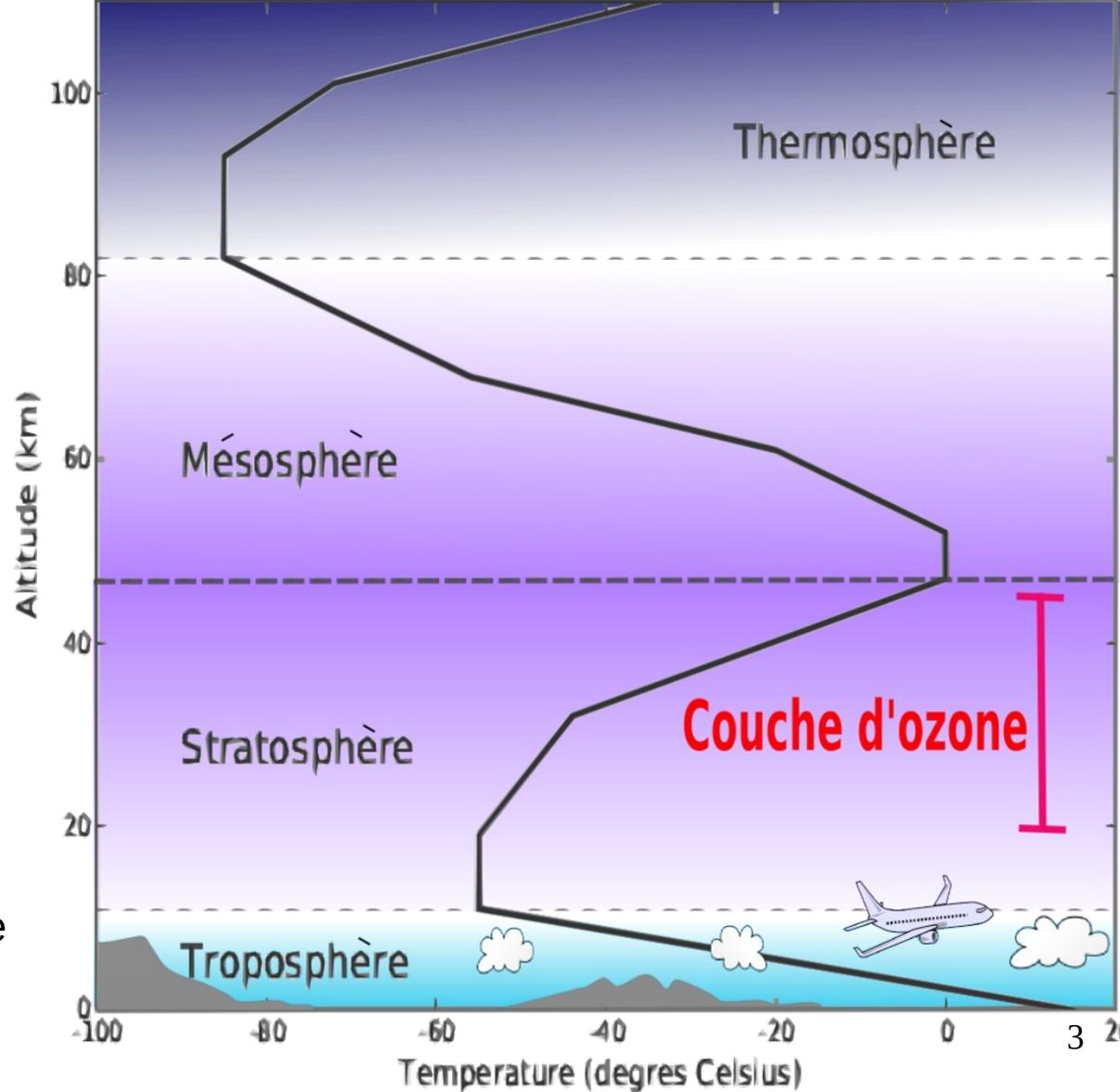
- Vitesse des molécules : ~ 500 m/s pour O_2 et N_2 , 2 km/s pour H_2 à T_p ambiante
- Vitesse de libération de la Lune : 2,4 km/s



sonde Pioneer

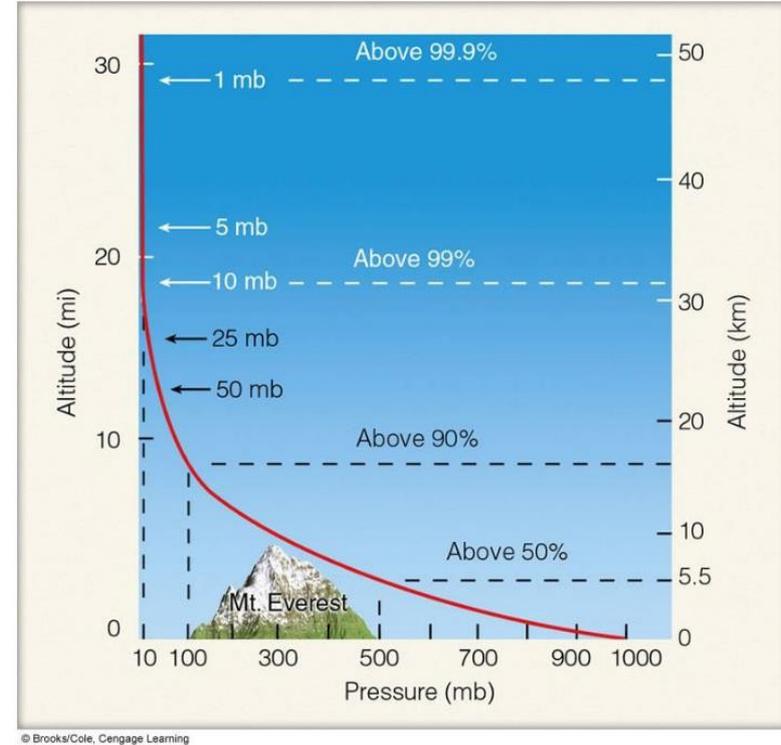
L'atmosphère terrestre

- Enveloppe gazeuse
 - 78,09 % de diazote
 - 20,95 % de dioxygène
 - 0,93 % d'argon
 - 0,041 % de CO₂
 - traces d'autres gaz (Ne 18ppm, He 5 ppm, CH₄ 2 ppm, ...)
 - + vapeur d'eau (0,5 % – 5%)
- Protège la vie sur Terre
 - **Filtre** le rayonnement solaire (UV)
 - **Réchauffe** la surface par la rétention de chaleur (effet de serre)
 - **Réduit** partiellement les **écarts de température** entre jour et nuit



L'espace

- **Pas de limite précise** entre atmosphère et espace
 - Diminution continue de la densité/pression
 - épaisseur entre 350 et 800 km (selon l'activité solaire) – épaisseur moyenne ~ 600 km (frontière thermosphère-exosphère)
- La **ligne de Kármán** (100 km) est considérée comme frontière entre l'atmosphère et l'espace par la Fédération aéronautique internationale

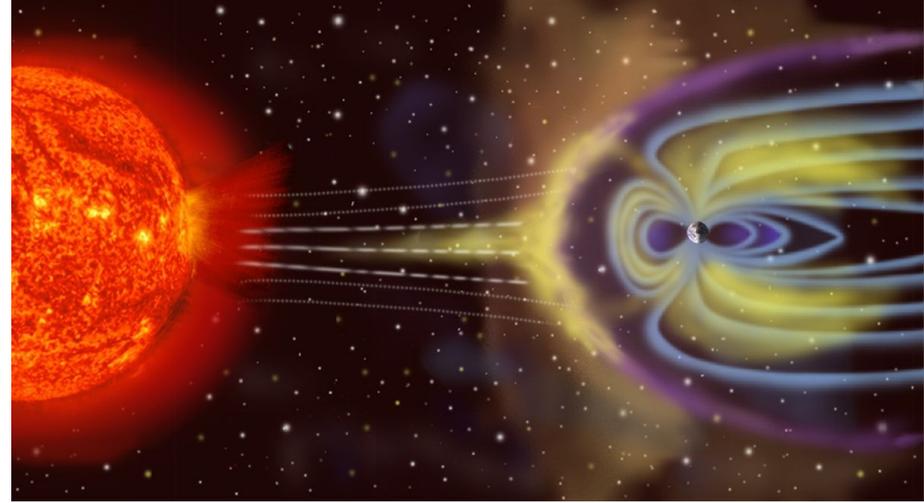


© Brooks/Cole, Cengage Learning



Les aurores polaires

- Ou « lumières du Nord » : boréales (Nord), australes (Sud)
- **Magnétosphère** : zone où les phénomènes physiques sont liés au champ magnétique (800 à 1000 km d'altitude)
- **Ionosphère** : zone caractérisée par une ionisation partielle des gaz (60 à 1 000 km d'altitude)
- Interaction entre les **vents solaires** et la haute atmosphère
 - Une **éruption solaire** éjecte des **particules chargées**
 - Ce flux déclenche un **orage magnétique** sur Terre (= brusque changement de la magnétosphère)
 - Des particules chargées à haute énergie sont **captées et guidées par le champ magnétique terrestre**
 - **excitent/ionisent les atomes** de l'ionosphère, qui se désexcitent en **émettant des photons** (selon leur nature et donc l'altitude)
- Principalement dans les régions **proches des pôles magnétiques** mais, en cas d'activité solaire intense, l'arc auroral peut **se rapprocher de l'équateur**
- Existe **sur d'autres planètes** comme Jupiter ou Saturne



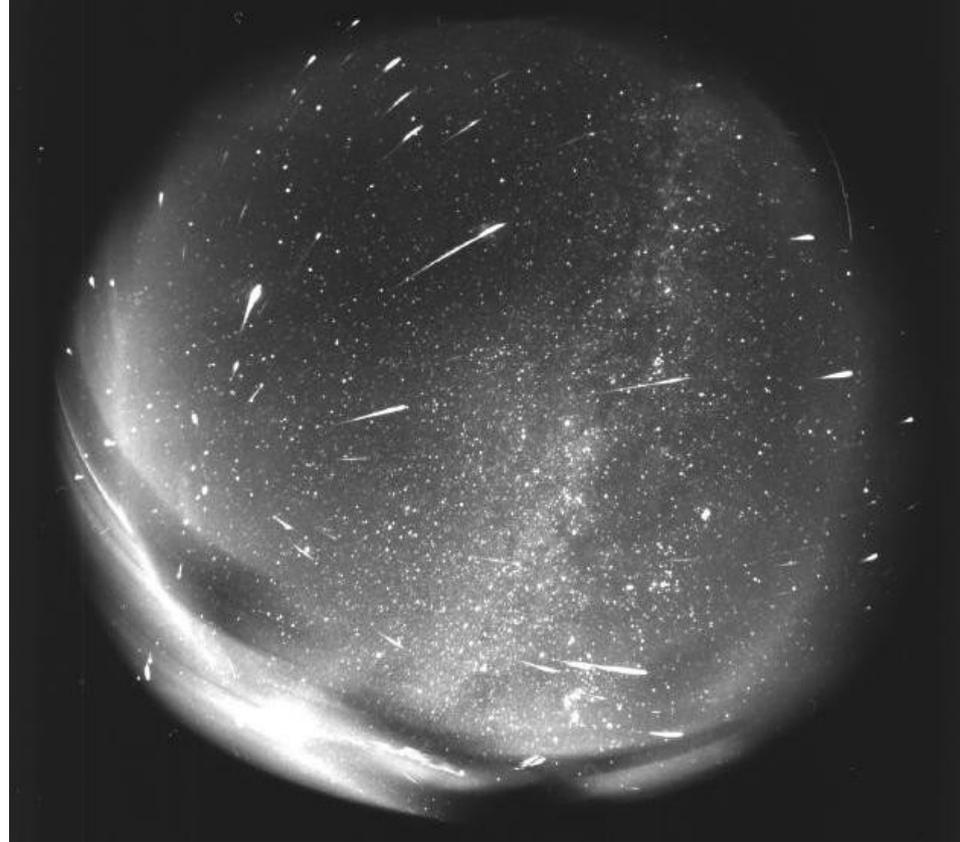
Aurore polaire observée depuis l'ISS – Crédit : NASA/Bob Hines

Les étoiles filantes

- Lumière émise par un « **météoroïde** » entrant dans l'atmosphère
 - Entre astéroïde et poussière
 - Vitesse de jusqu'à **42 km/s**
- Deux causes :
 - **Vaporisation** du météoroïde
 - **Ionisation** de l'air (plasma)

Photographie prise
la nuit des
Léonides de 1998

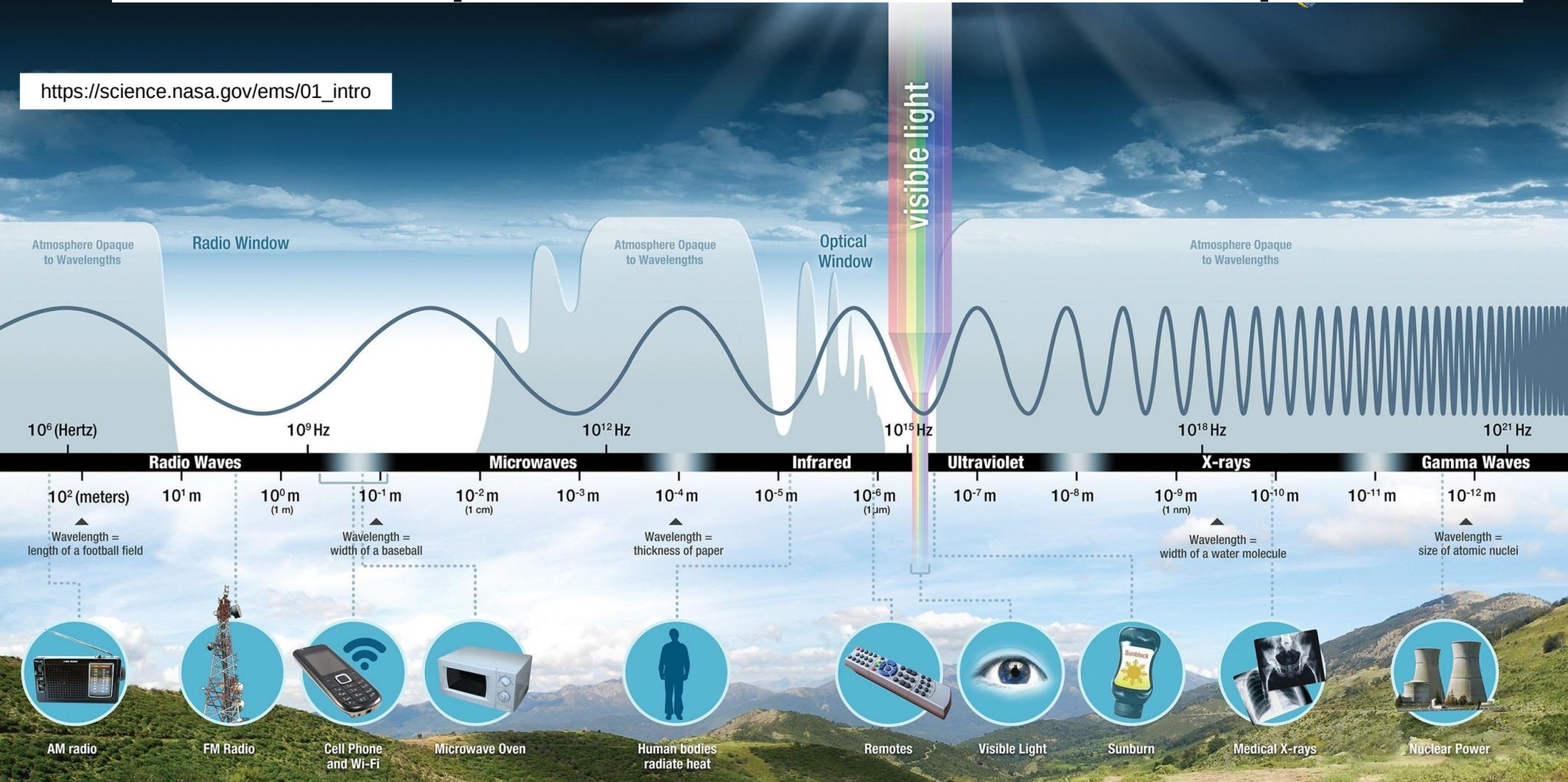
(exposition de
4 heures)



- Chaque année à la même période, la Terre croise des nuages de poussières laissés par des comètes : les « **essaims météoritiques** » (au nombre de 112).
- Provoquent des « pluies de météores », ou « pluies / averses d'étoiles filantes »
 - Orionides, Perséides, Léonides, ...

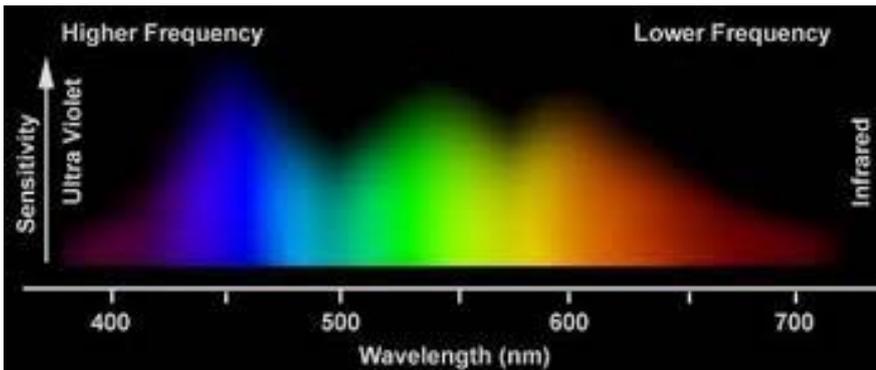
« Transparence » de l'atmosphère

https://science.nasa.gov/ems/01_intro

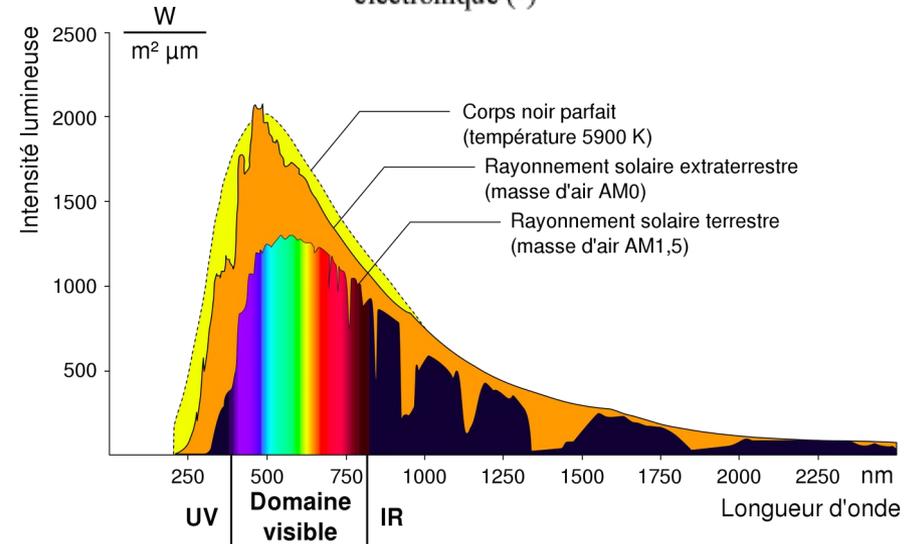
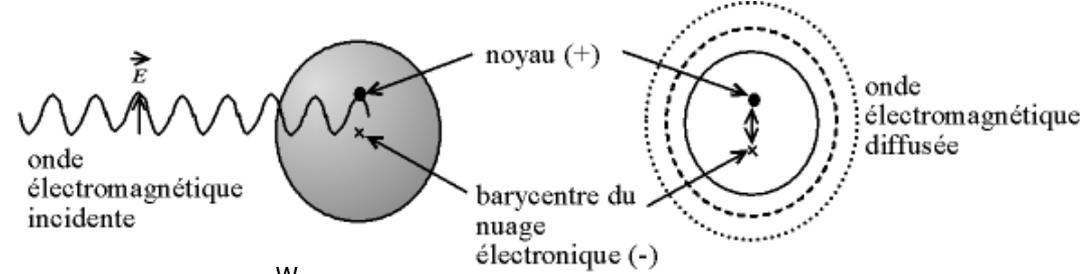


La couleur du ciel

- Résulte de l'interaction entre la lumière du Soleil et les molécules et particules de l'atmosphère terrestre
- **Diffusion de Rayleigh :**
 - Réémission **multidirectionnelle** d'ondes électromagnétiques lorsque de la lumière arrive sur une molécule / un atome
 - Diffusion proportionnelle à $1/\lambda^4$: **favorise les courtes longueur d'ondes**



Sensibilité de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde

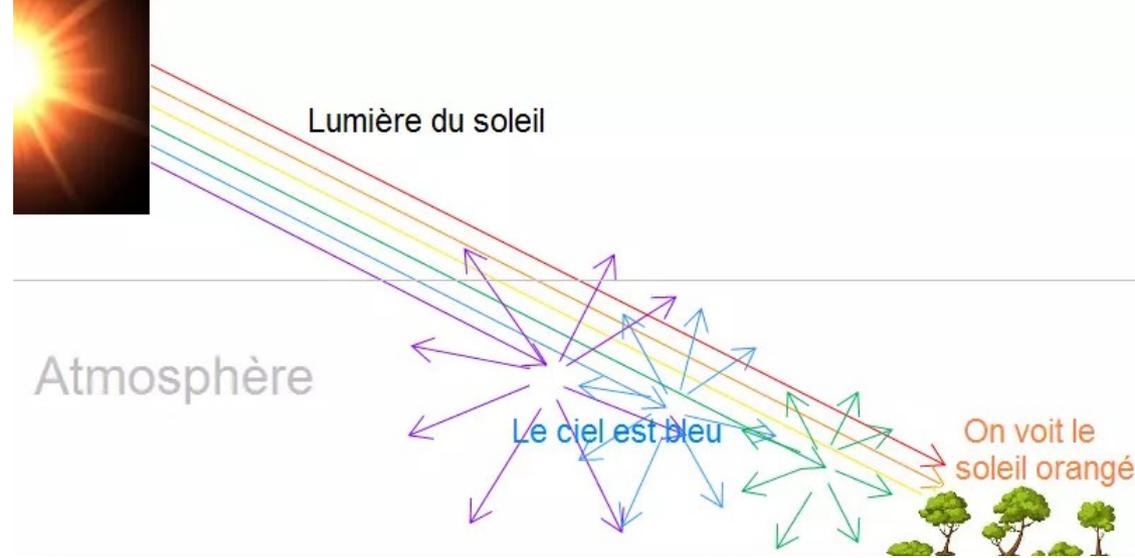


Spectre d'irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde au sommet de l'atmosphère (AM0) et au niveau de la mer (AM1,5)

- La lumière du Soleil contient peu de violet & l'œil humain est moins sensible au violet (« effet Purkinje ») → **bleu**

Le coucher de Soleil

- Lorsque le Soleil se couche, il traverse une **plus grande couche d'atmosphère**
- ⇒ la **diffusion de Rayleigh** augmente : les courtes longueurs d'ondes sont diffusées et ne nous parviennent que les **rayons orange & rouges**



Et ailleurs ?

- Sur Mars

- Soleil **plus petit** (car plus éloigné)
- couleur du ciel ~ **saumon-rouge** en raison de vents de poussière (fine qui absorbent le bleu)



Coucher de Soleil sur Mars, capturé par Spirit dans le cratère Gusev.

- Sur la Lune

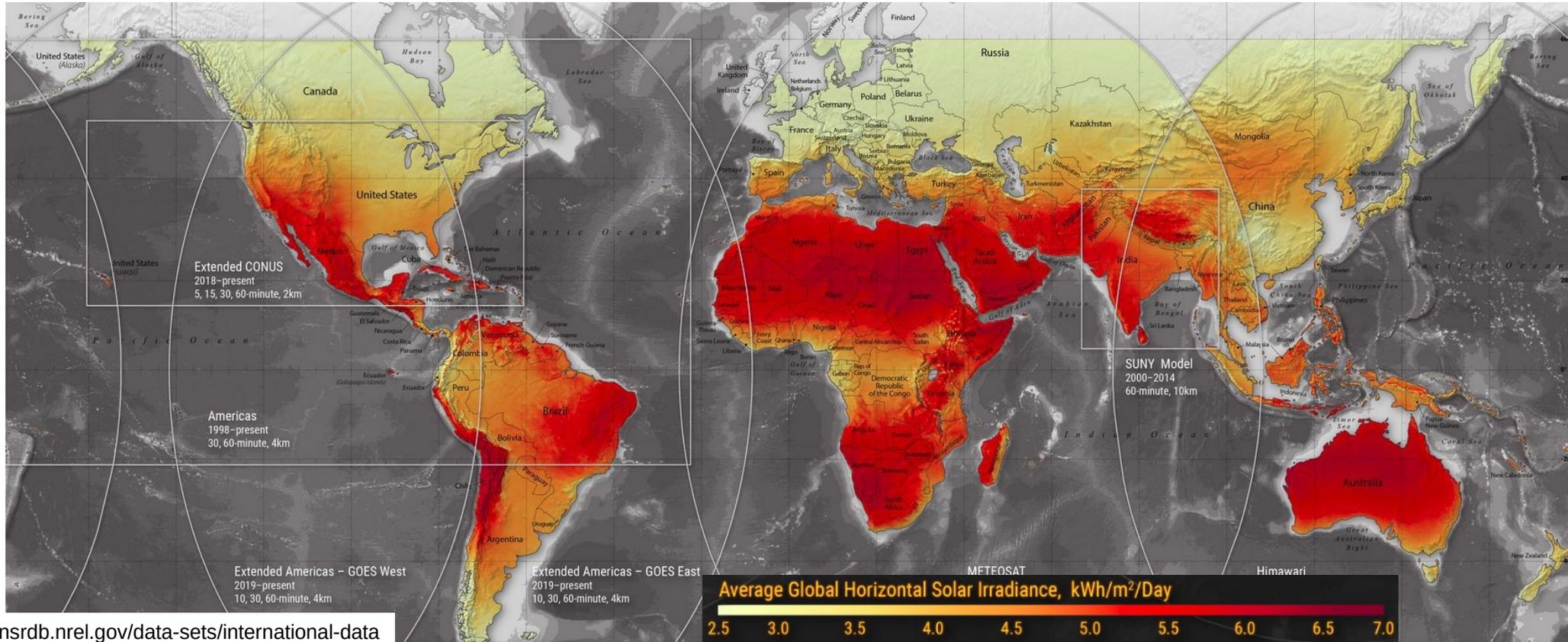
- Pas d'atmosphère, pas de diffusion → ciel noir



© JAXA/NHK

Rayonnement solaire

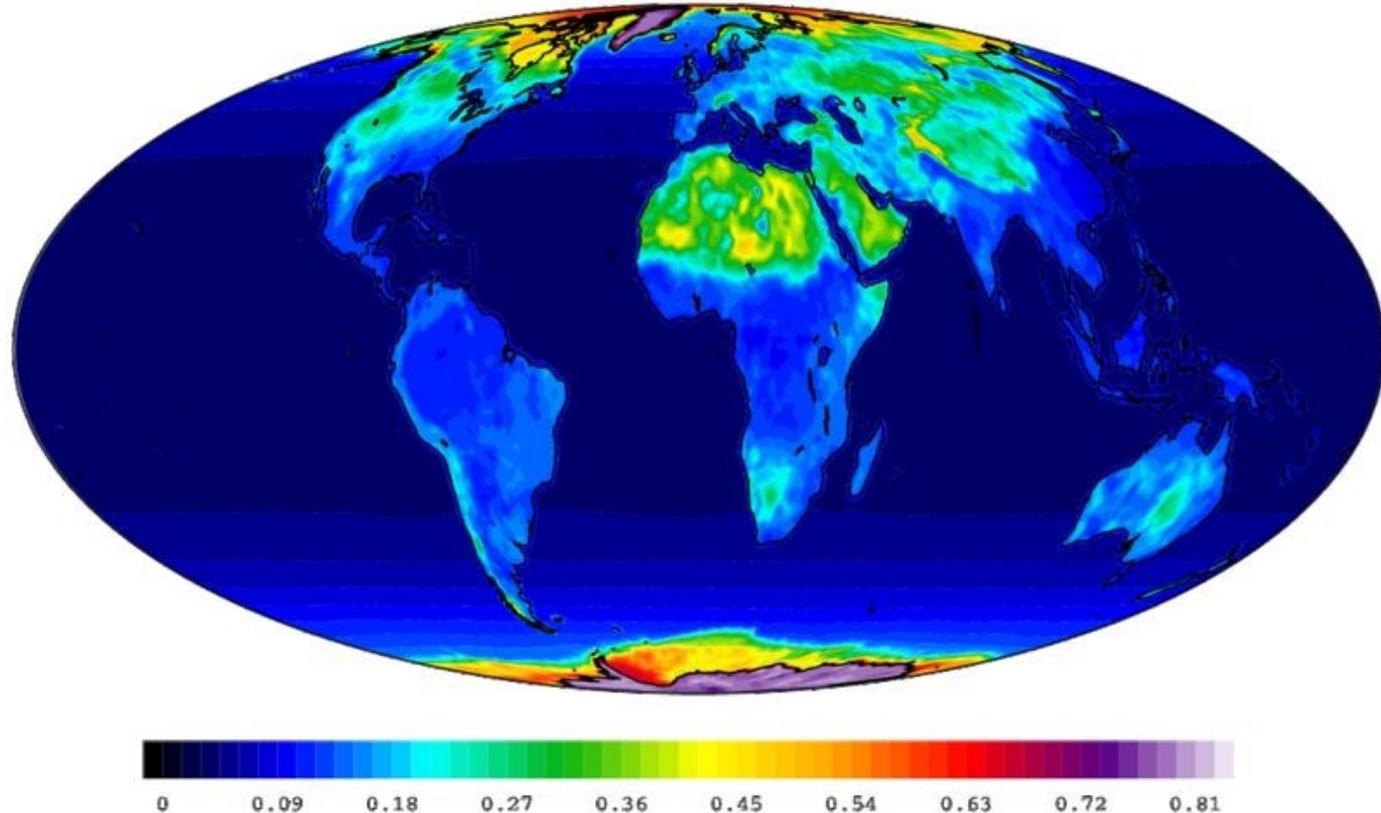
- Le Soleil rayonne une puissance de $\sim 4 \times 10^{26}$ W (« luminosité solaire »)
- La Terre reçoit 180×10^{15} W (PW), soit 5×10^{-10} (0,5 milliardième)
- Soit $350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, soit 6×10^{24} J (YJ) par an, dont 70 % absorbés : 4×10^{24} J (YJ)
- $\sim 10\,000$ fois la consommation terrestre :
- 1h « suffirait »...



L'albédo

- Mesure le **pouvoir réfléchissant** d'une surface = rapport énergie lumineuse réfléchie / énergie lumineuse incidente
 - Grandeur **sans dimension** comprise entre 0 et 1 (%)

Type de surface ↕	Albédo de Bond (de 0 à 1) ↕
Corps noir parfait	0,00
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères ¹	0,05 à 0,15
Forêt de feuillus ¹	0,15 à 0,20
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Calcaire ²	0,40 environ
Nuage	0,50 à 0,80
Glace	0,60 environ
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir parfait	1,00



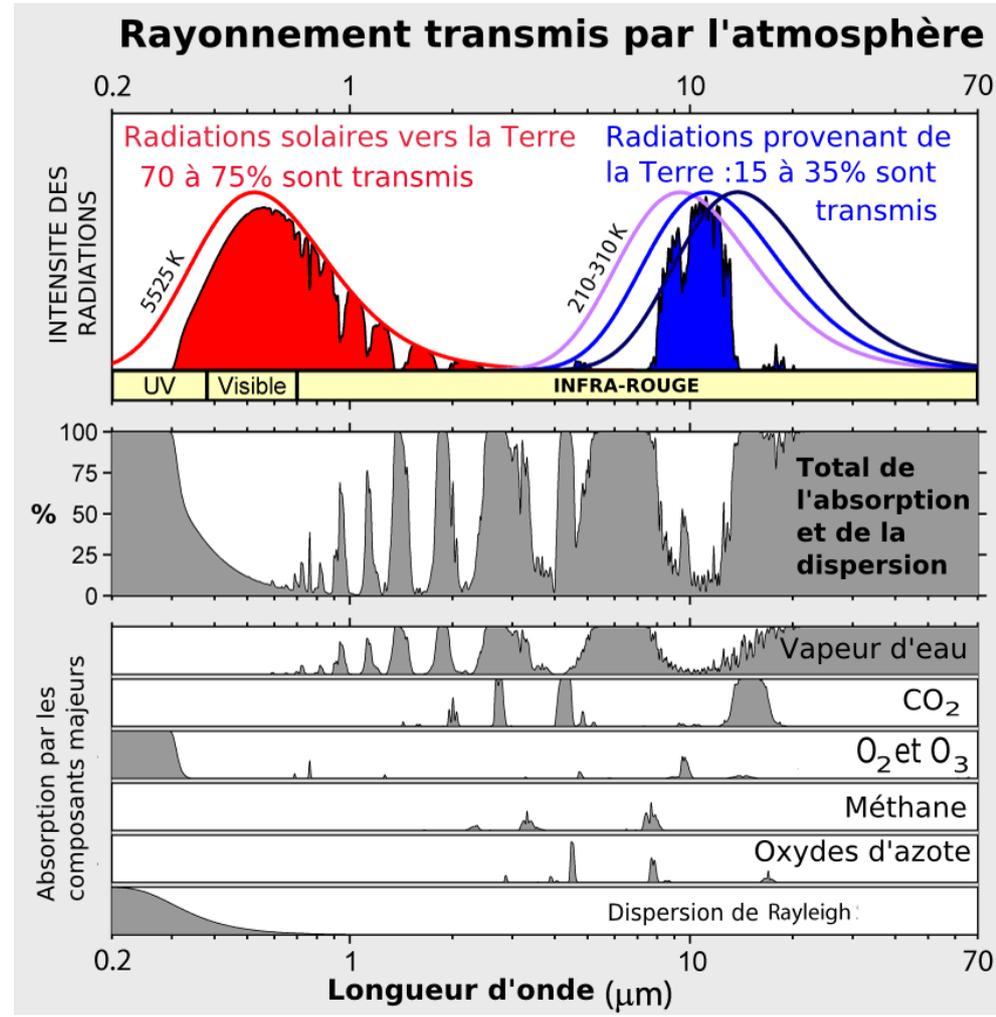
Bilan radiatif de la Terre



All values are fluxes in Wm^{-2}
and are average values based on ten years of data

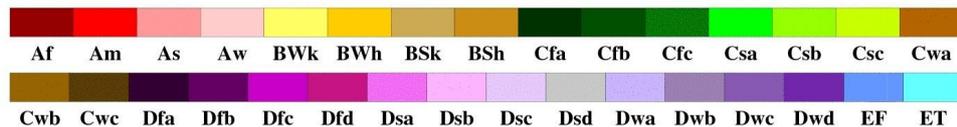
- Rayonnement solaire incident
 - 30 % réfléchis
 - 20 % absorbés par atmosphère
 - 50 % absorbés par la surface
- La surface chauffe
 - **rayonnement IR** absorbé par les « **gaz à effet de serre** »
 - vapeur d'eau : 60 %
 - dioxyde de carbone : 26 %
 - ozone : 8 %
 - méthane et protoxyde d'azote : 6 %
- Sans effet de serre :
 - Température de -18° ⇒ ↑ surface de glace ⇒ ↑ albédo ⇒ $T \sim -50^{\circ}\text{C}$

L'effet de serre



World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

projected using IPCC A1FI Tyndall SC 2.03 temperature and precipitation scenarios, period 2001 to 2025



Main climates

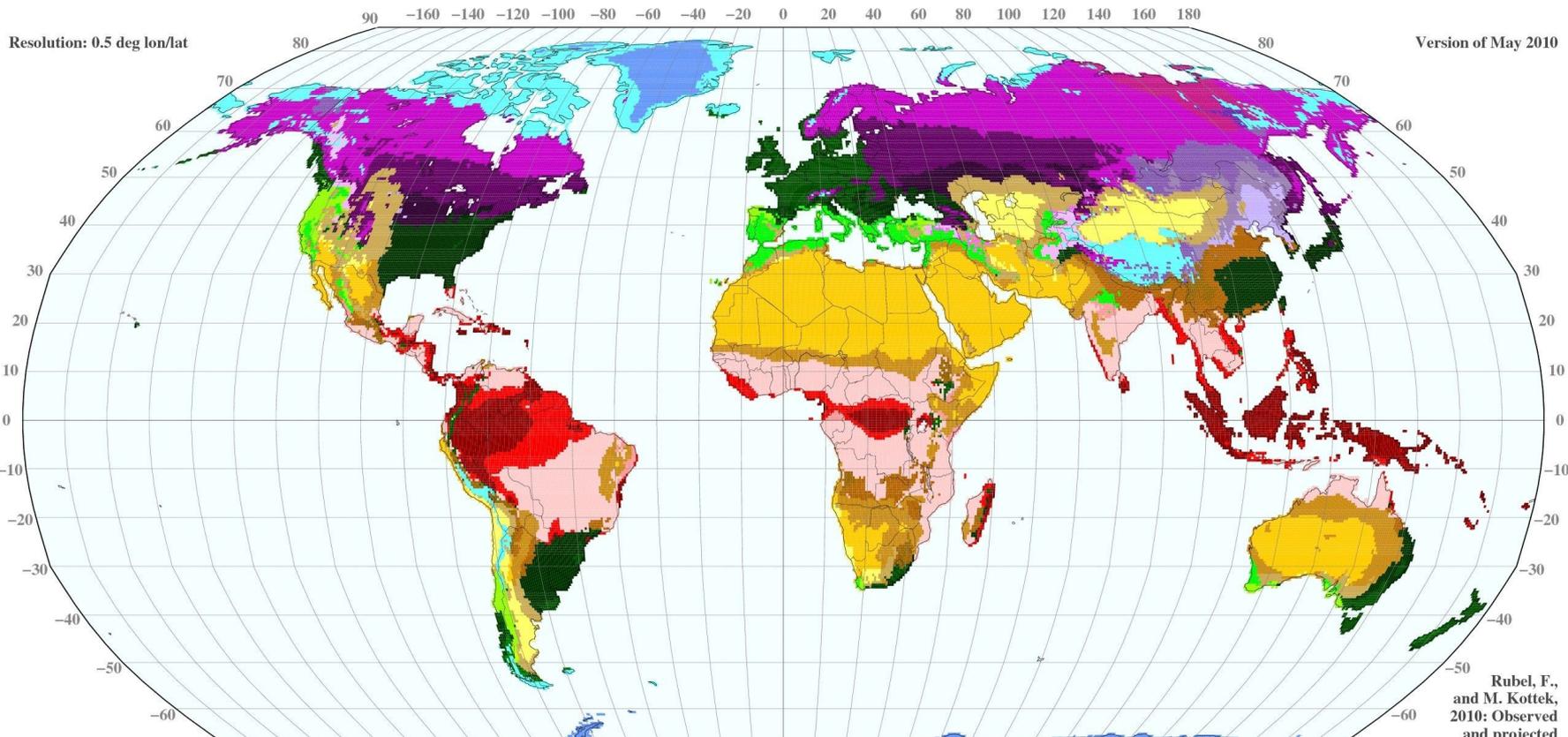
- A: equatorial
- B: arid
- C: warm temperate
- D: snow
- E: polar

Precipitation

- W: desert
- S: steppe
- f: fully humid
- s: summer dry
- w: winter dry
- m: monsoonal

Temperature

- h: hot arid
- k: cold arid
- a: hot summer
- b: warm summer
- c: cool summer
- d: extremely continental
- F: polar frost
- T: polar tundra

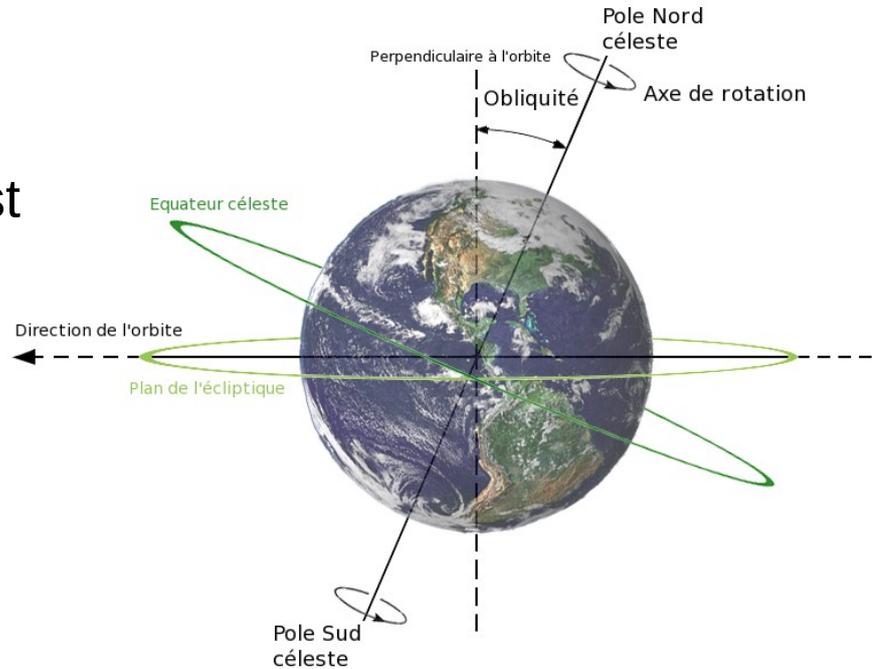


Rubel, F.,
and M. Kottek,
2010: Observed
and projected

Classification des climats fondée sur les précipitations et les températures

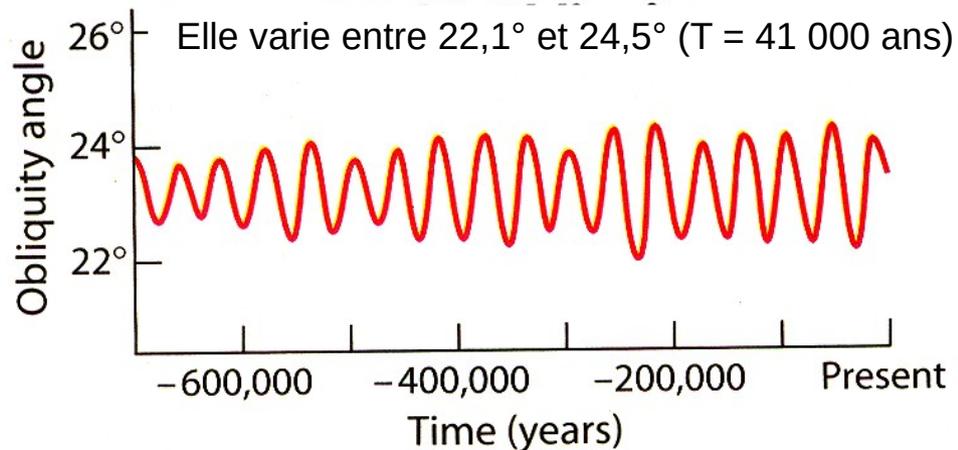
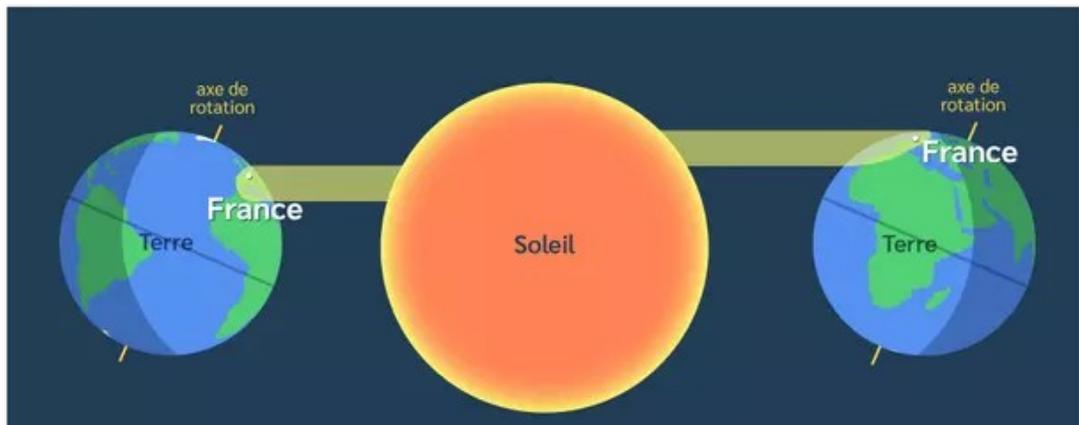
Les saisons

- L'axe de la rotation de la Terre sur elle-même n'est **pas perpendiculaire au plan de son orbite autour du Soleil** (= « **plan de l'écliptique** ») : angle = $23^{\circ}26'$
- L'**angle d'incidence** des rayons du Soleil varie donc au cours de l'année → **saisons**
 - (Pendant l'été de l'hémisphère nord, la Terre est au **plus loin** du Soleil)



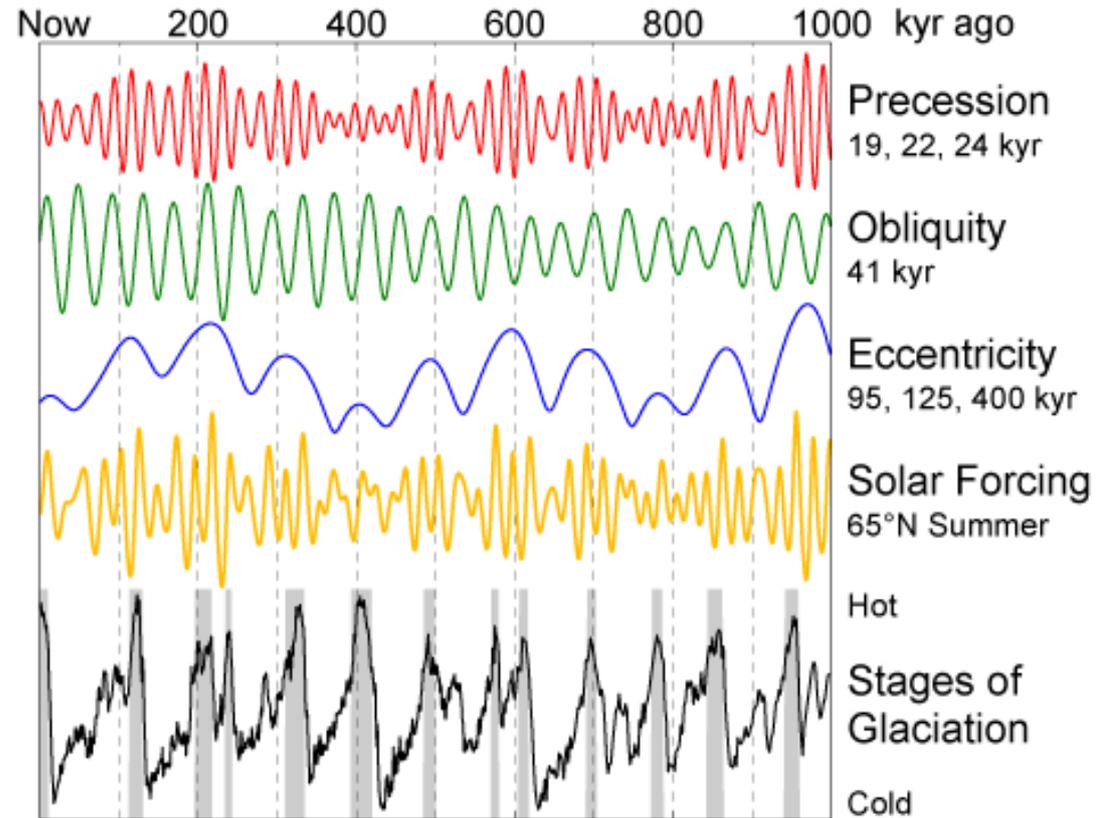
C'est l'été en France.

C'est l'hiver en France.



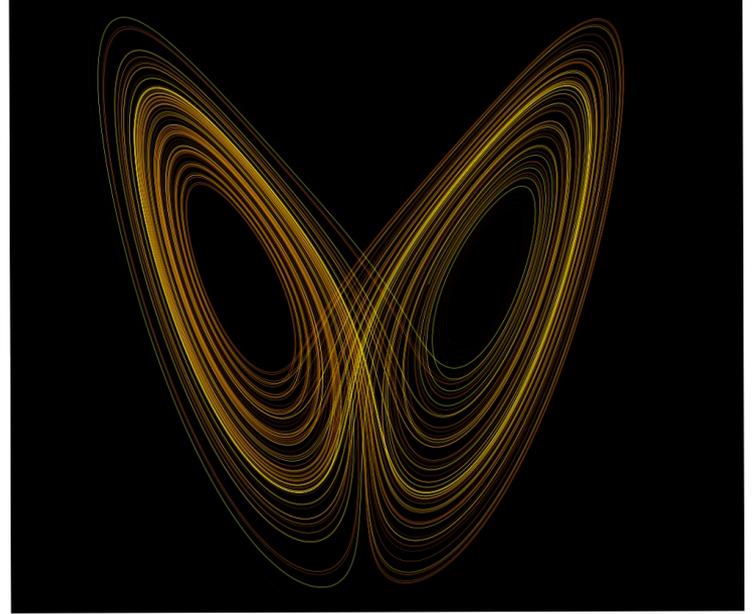
Les cycles de Milanković

- 3 paramètres :
 - **Excentricité**
 - **Obliquité**
 - **Précession des équinoxes**
- notamment utilisés dans le cadre de la théorie astronomique des **paléoclimats**
- « Solar forcing » = « forçage radiatif » = différence entre puissance radiative reçue et puissance radiative émise



La théorie du chaos

- Discipline qui étudie le comportement des systèmes dynamiques « **sensibles aux conditions initiales** »
 - Dans de nombreux systèmes des **modifications infimes** des conditions initiales entraînent des **évolutions rapidement divergentes**
 - ⇒ **prédiction impossible à long terme**
- Bien que **déterministes**, ces systèmes sont **imprévisibles** (leur comportement futur est déterminé par les conditions initiales, sans aucune intervention du hasard), car on ne peut **connaître les conditions initiales avec une précision infinie**
 - P. Guillemant : « La différence de conditions initiales peut provenir de l'échelle quantique. »
- C'est ce qu'on appelle le « **chaos déterministe** »

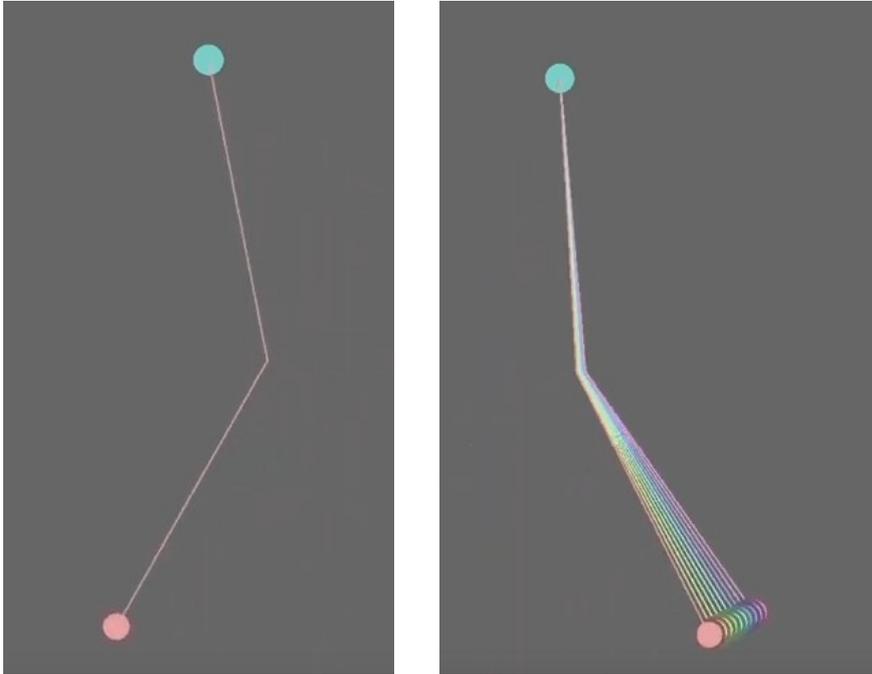


« Attracteur de Lorenz » = solutions chaotiques du « système de Lorenz » (modélisation de la convection atmosphérique)

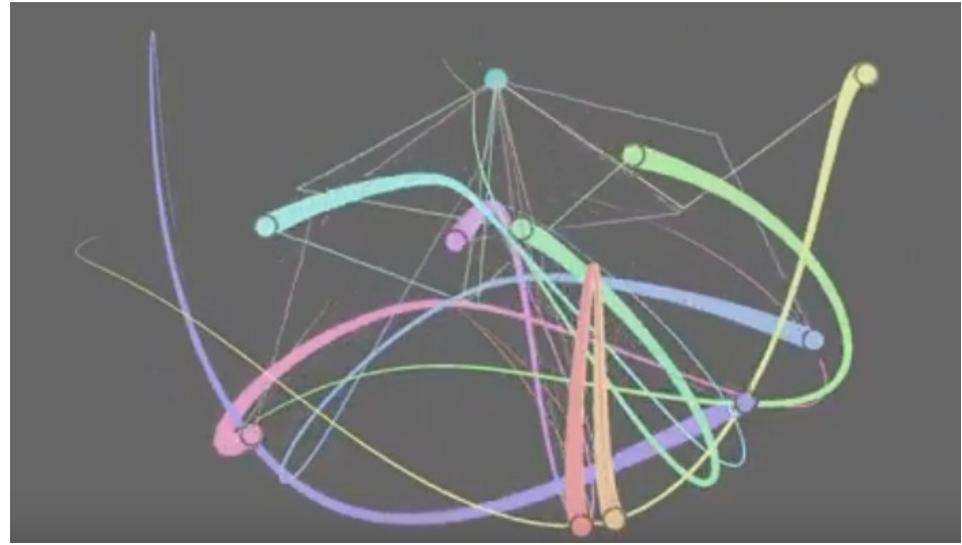
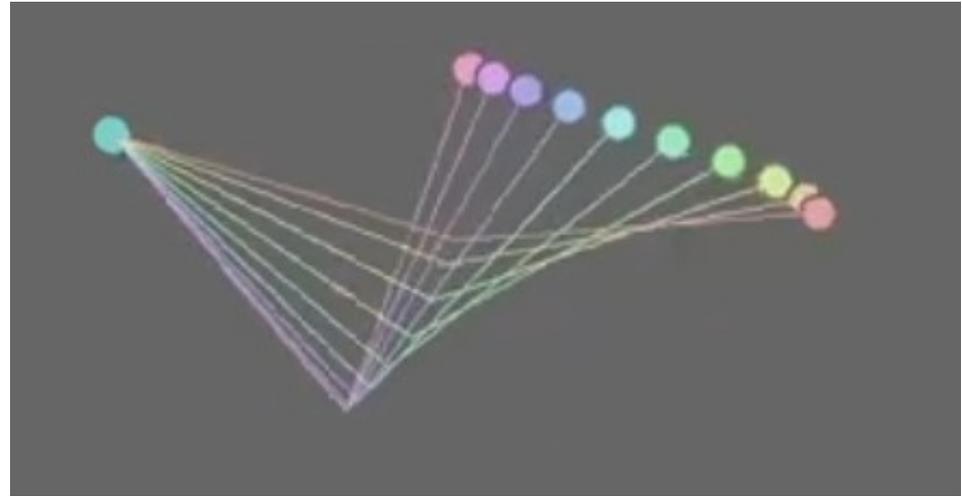
- Sensibilité aux conditions initiales mise en lumière par Poincaré (~1900)
- Une très petite erreur sur la connaissance de l'état initial d'un système va rapidement – exponentiellement – s'amplifier
 - Durée caractéristique = « horizon de Liapounov » = « horizon prédictif » (Système solaire : 50 millions d'années)

Exemple du double pendule

Le « double pendule » a un comportement déterministe (régi par les lois de Newton) mais il est imprédictible car la sensibilité aux conditions initiales provoque une divergence des mouvements



Différence initiale entre 2 pendules : $0,1^\circ$



Un battement d'aile

- 1963 : Edward Lorenz met en évidence le **caractère chaotique de la météorologie**
 - Vraisemblablement pressenti avant par H. Poincaré
- Conférence :
 - « Prédicibilité : le battement d'ailes d'un papillon au Brésil provoque-t-il une tornade au Texas ? »
- Métaphore emblématique du phénomène de **sensibilité aux conditions initiales**
- Souvent interprétée **à tort de façon causale** :
 - ce serait le battement d'ailes du papillon qui déclencherait la tempête
 - plus juste : une différence de cause (battement d'ailes du papillon = conditions initiales) « induit » une différence d'effet (tornade = conditions finales)



- Lorenz :
 - « Si le battement d'ailes d'un papillon peut déclencher une tornade, il peut aussi l'empêcher. »

Météorologie

- Du grec μετέωρος / metéōros (« qui est au-dessus de la terre ») et λογία / logia, « discours », « connaissance »
- Étudie les phénomènes atmosphériques (nuages, vents, précipitations) en fonction de la température, la pression et l'humidité
- S'appuie sur la mécanique des fluides, la thermodynamique, les mathématiques



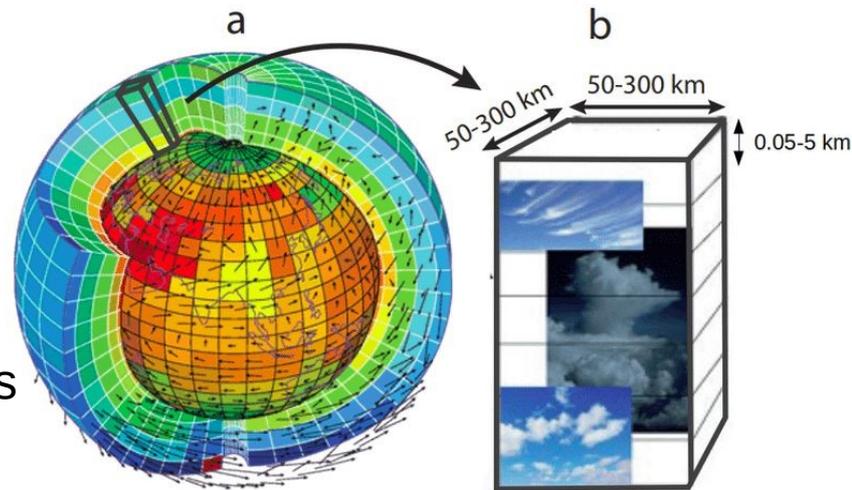
« Morning Glory Cloud », Queensland, Australie (Mick Petroff)



« Fake news » !

Prévisions météo

- Données en entrée = **conditions initiales**
 - Récoltées par satellite (~90%) ou au sol (~10%)
 - Maillage (1 km – 100 km)
- **Modélisation** de l'atmosphère à partir des lois physiques
 - Conservation de la masse totale, équations du mouvement, équation d'état des gaz, équations de la thermodynamique
 - Principaux modèles : GFS, ECMWF, ICON, AROME, NEMS (IA)
- Un supercalculateur **prédit l'évolution** par itérations
 - une échéance est calculée à partir de la précédente
 - → de moins en moins de précision
- Un analyste **interprète les résultats**
- 1998 : l'horizon de prévisions passe de 5j à 7j
 - Apparition d'un « **indice de confiance** » de 1 à 5 (J4 à J7)
 - Représente la **convergence** des résultats de plusieurs scénarios



la chaîne météo

Rechercher une ville, une station, un pays, ...

Paris 10

ALERTE MÉTÉO FRANCE MONTAGNE MONDE VOYAGE PLAGE MARI

Scénario le plus probable
46% de probabilité

Nuages et soleil 9° Température min | 19° Température max

Scénario 2
26% de probabilité

Averses ou pluie intermittente 10° Min | 15° Max

Scénario 3
20% de probabilité

Ensoleillé 8° Min | 22° Max

Tu quoque mi fili !

Quelle est la probabilité que nous respirions une molécule de diazote (N_2) expirée par Jules César en prononçant : « *Tu quoque mi fili* » ?

- Dans une expiration, il y a ~ **2,2 L d'air**
 - Dans 22 L d'air, il y a une mole soit $N_A = 6 \times 10^{23}$ molécules
 - Dans une expiration, il y a **6×10^{22} « molécules d'air »**
 - Donc **$4,8 \times 10^{22}$ molécules d'azote**
- L'atmosphère pèse ~ 5×10^{18} kg
 - Un litre d'air pèse ~ 1,3 g (air ~ 800 fois moins dense que l'eau)
 - → *Volume* de l'atmosphère ~ **4×10^{21} L**
- $4,8 \times 10^{22} / 4 \times 10^{21} =$ **12 molécules de N_2 par litre** → **$p \approx 1 !$**

(Supposition : diffusion uniforme des molécules expirées dans l'atmosphère)



Denier de César émis en 44 avant J.-C