
Introduction au fonctionnement du système Terre

Histoire, milieux, processus

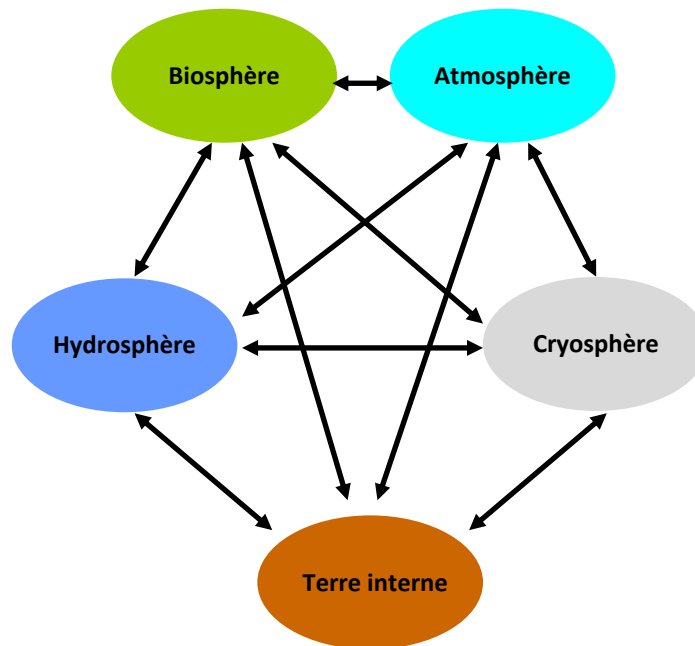
1. Présentation du système Terre (milieux, forçages, rétroactions, ...)
2. Les quatre temps de la valse terrestre
3. Processus de transport et transfert

PLAN

1. Présentation du système Terre (milieux, forçages, rétroactions)
2. Les quatre temps de la valse terrestre
3. Processus de transport et transfert

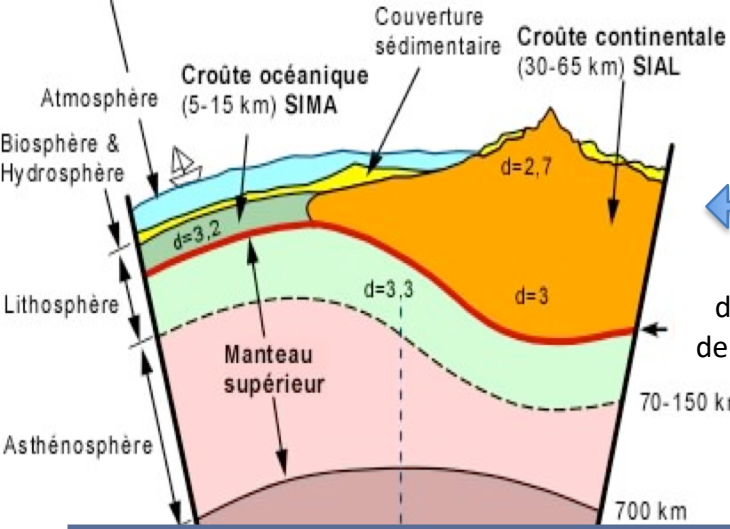
Le système Terre : des acteurs en permanentes interactions

LE SYSTEME TERRE
(Interactions Internes)

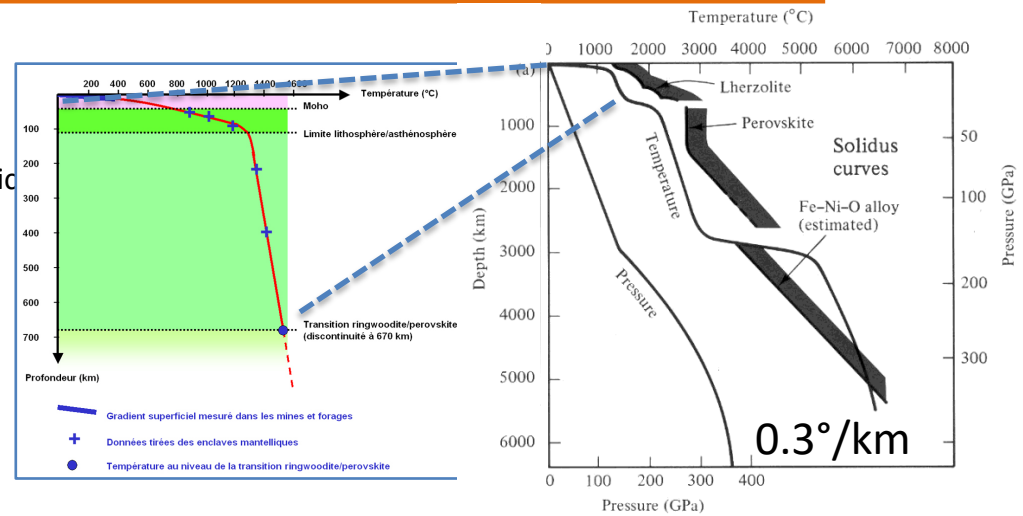


Source : adaptation de Ruddiman, 2007

La Terre interne



discontinuité de MOHOrovicic



Lithosphère (1% du volume)

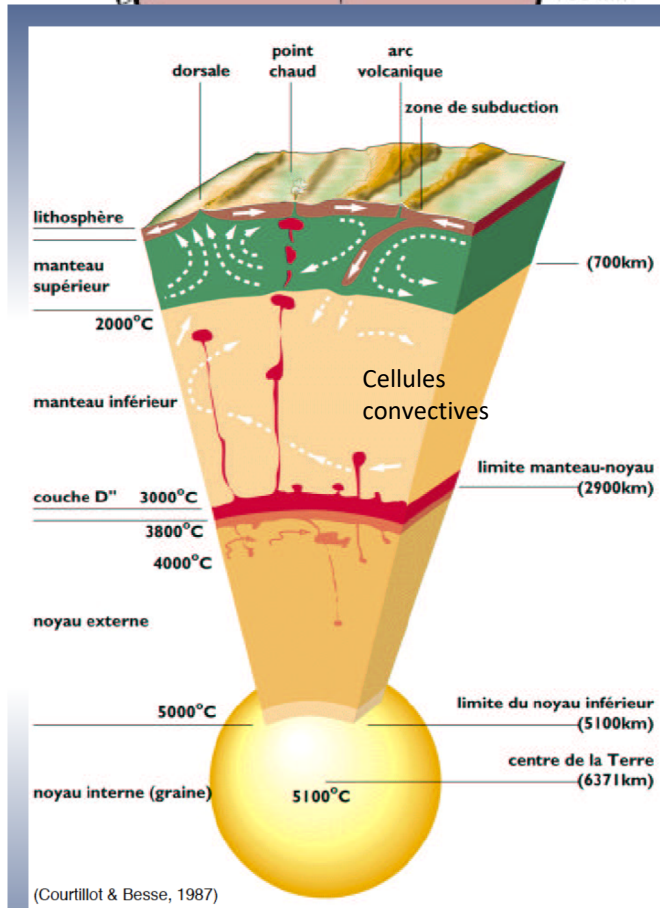
- Croûtes océaniques (~basaltiques) et continentales (~granitiques) + partie du manteau supérieur
- Composée de plaques tectoniques (~15 majeures) en mouvement (0-100 mm/an) sur l'asthénosphère.

Manteau (84% du volume) :

- Roches solides, sauf zones de fusion partielle (volcans)
- Comportement fluide sur des temps géologiques

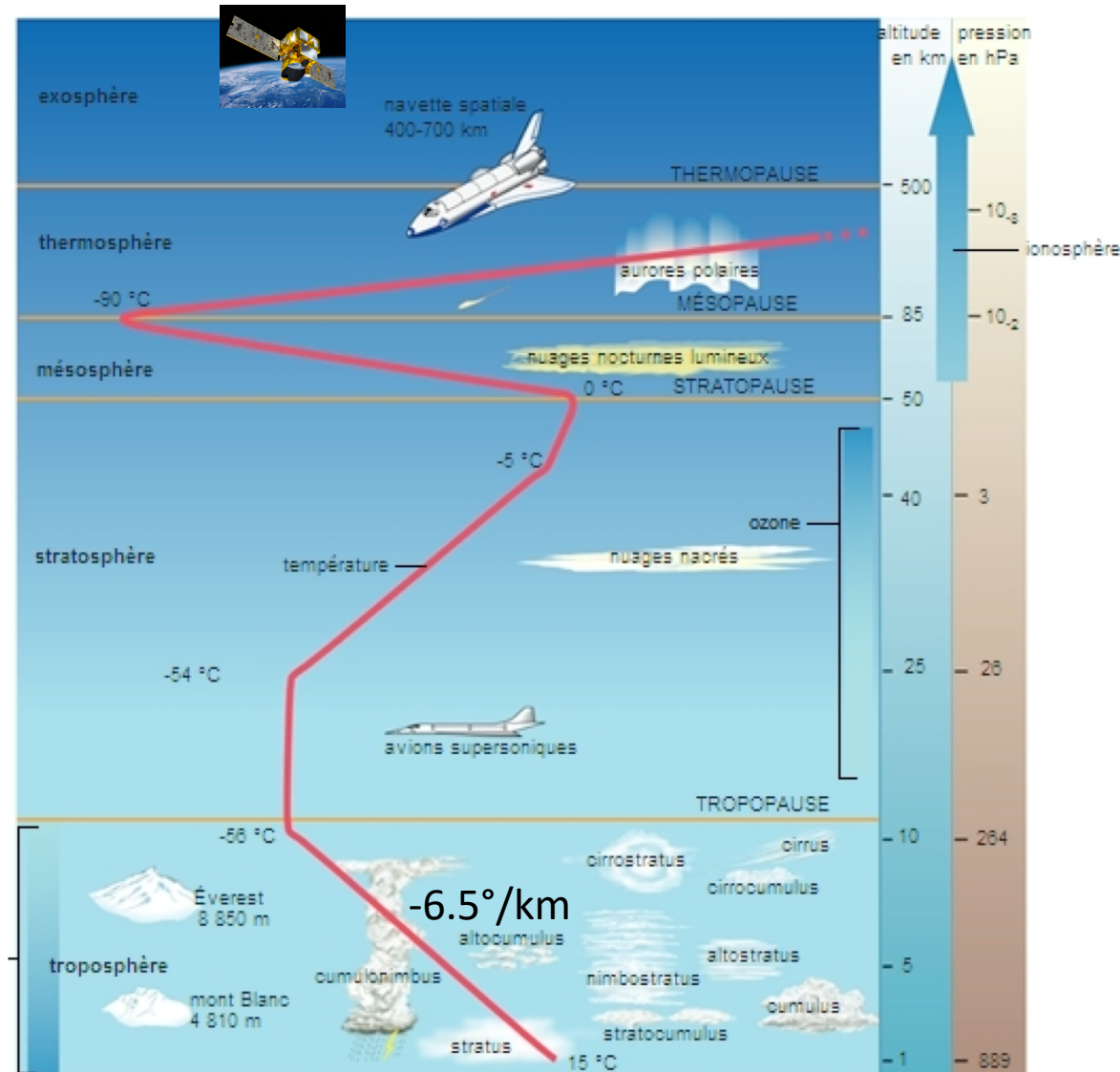
Noyau (15% du volume) :

- Alliage de Fer et Nickel + S, O, Si
- Solide (noyau interne) ou liquide (noyau externe)
- Mouvements fluides à l'origine du champ magnétique terrestre



Les enveloppes superficielles : l'atmosphère

- Fluide dilué stratifié mélange d'air sec et d'eau (trois phases)
- Variables : P , T , ρ , humidité
- Lois des gaz parfaits applicable
- Instabilité intrinsèque (chauffage par le bas)
- Circulations générales dues au déséquilibre du bilan énergétique régional
- Importance de l'effet de serre et de la pollution atmosphérique
- 80% de la masse dans la troposphère
- $-6.5 \text{ }^\circ\text{/km}$ dans la troposphère



Source : Larousse

Les enveloppes superficielles : les océans

- Fluide stratifié (eau et sels minéraux + autres composés)
- Variables : P, T, ρ , salinité
- Loi d'état spécifique linéaire ou non (selon l'application)
- Stabilité intrinsèque (chauffage par le haut)
- Courants superficiels (vents) et profond (thermohalins)

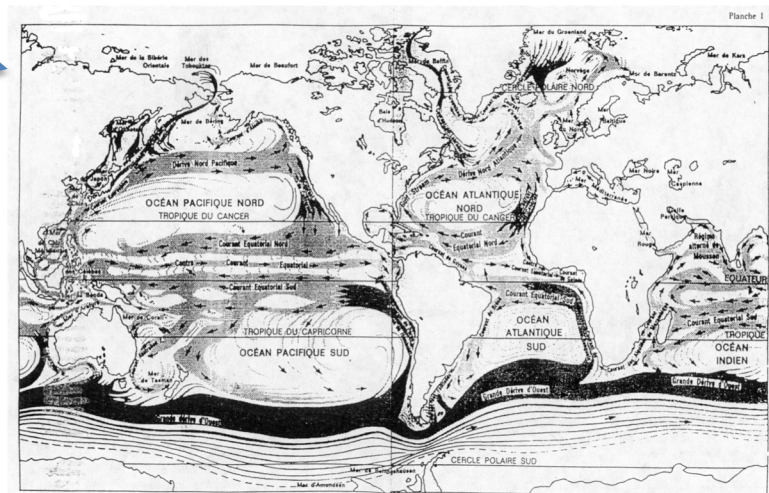
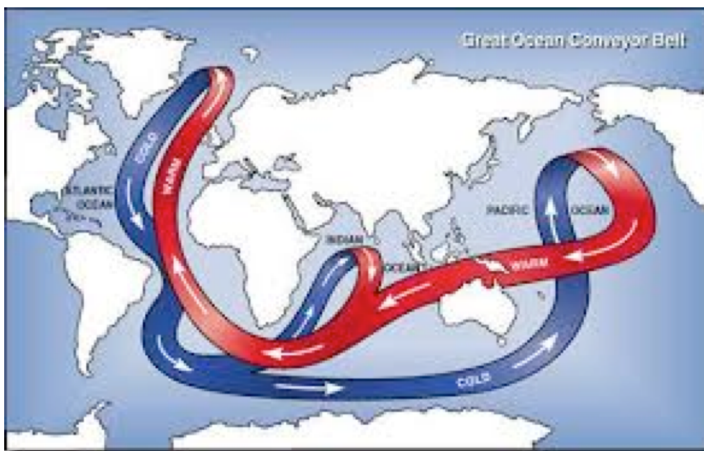
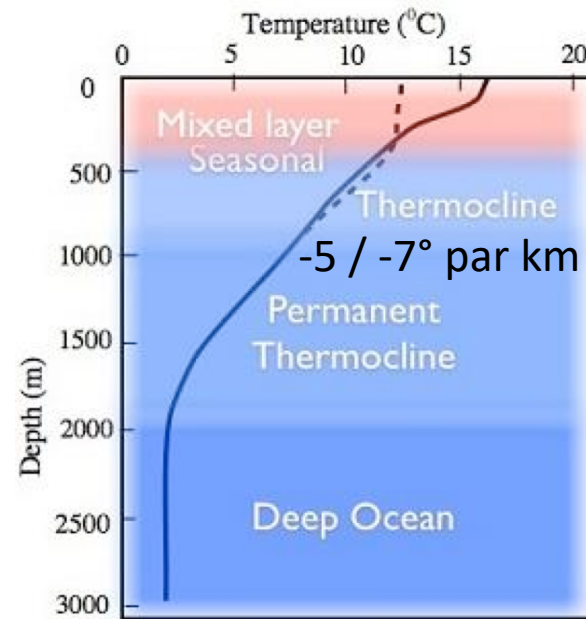
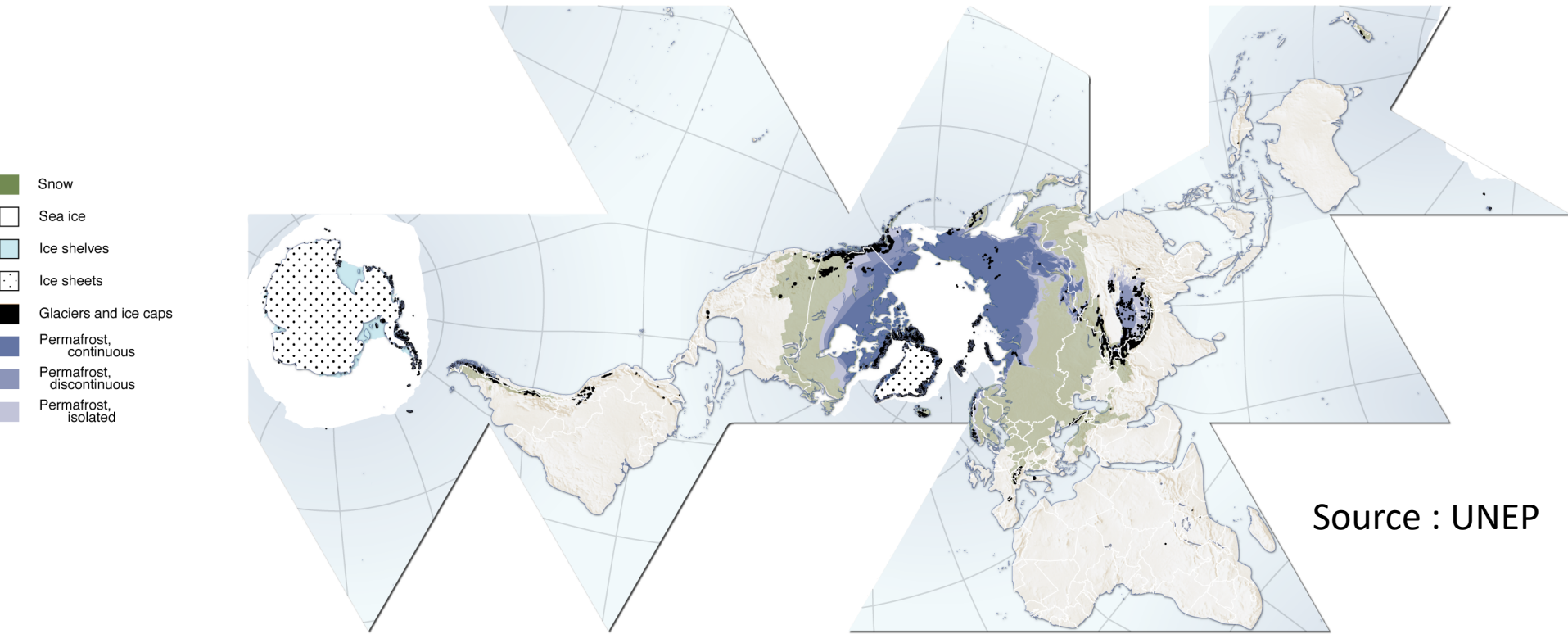


SCHÉMA DE LA CIRCULATION GÉNÉRALE DE L'OcéAN MONDIAL (JUILLET)

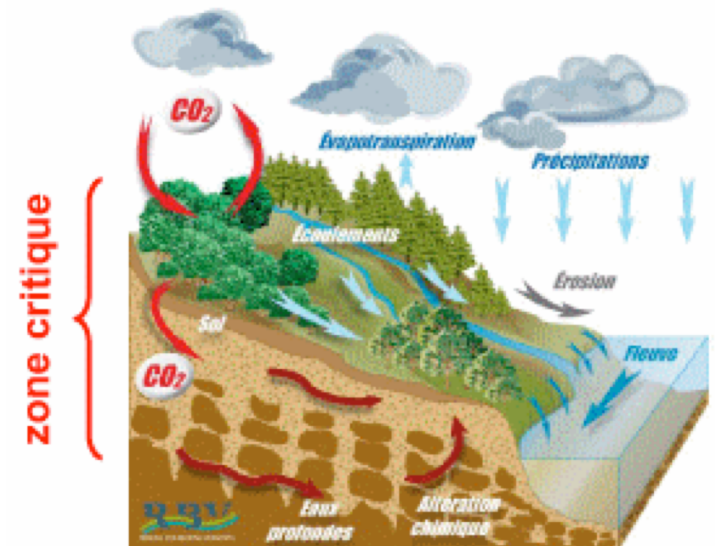
Les enveloppes superficielles : la cryosphère

- Portions de la surface de la Terre où l'eau est présente à l'état solide
- Inclut : banquises, lacs et rivières gelés, neige, glaciers, calottes polaires, sols gelés temporaires ou permanents (pergélisol)
- Zone Arctique : très sensible au changement climatique
- Antarctique ⇔ 60 m de niveau des mers (Groenland ⇔ 7m)

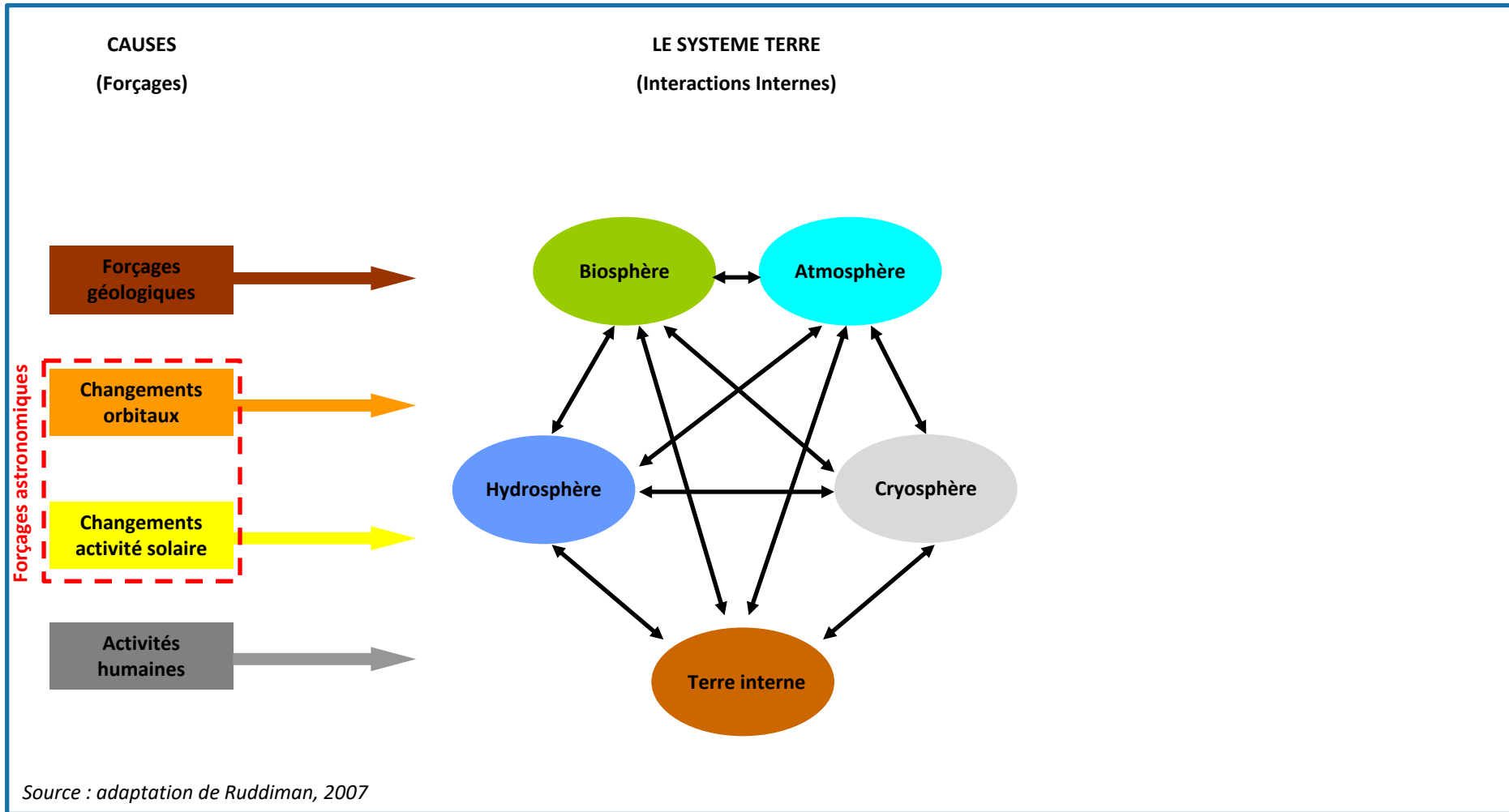


Les enveloppes superficielles : la zone critique

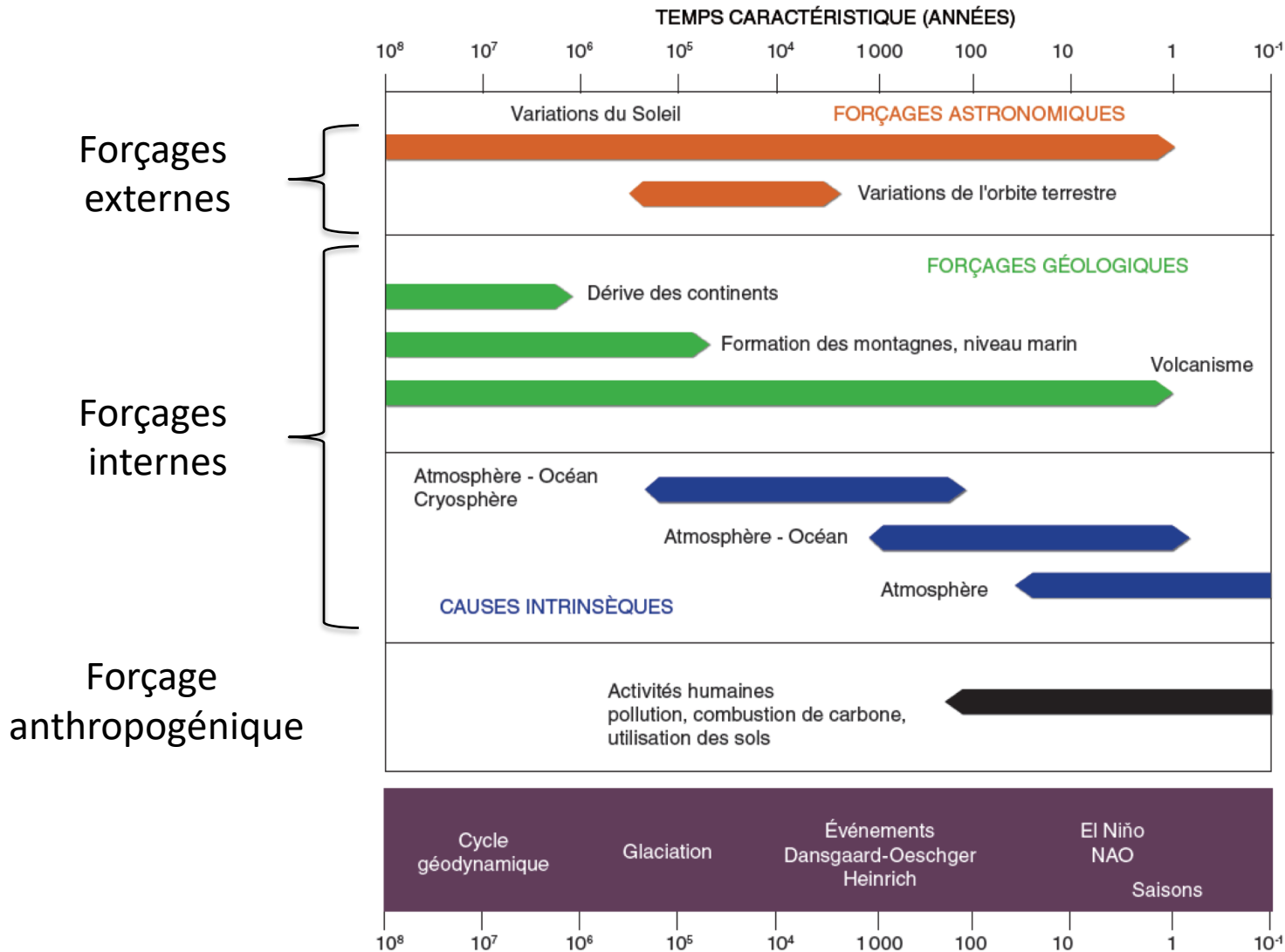
- Zone allant de la base du sol (roche mère) au sommet de la végétation (canopée).
- Carrefour d'échanges complexes entre sol, eau, air et organismes vivants.
- Nécessite une approche pluridisciplinaire entre hydrologie, hydrogéologie, pédologie, écologie, agronomie, et physico-chimie des milieux
- Importance des transferts d'eau et de matière dans des milieux complexes (ex : milieux poreux)
- Importance de l'utilisation des sols dans un contexte de pression anthropique et climatique
- Importance de la biodiversité (GS Biosphera)



Le système Terre : des acteurs en permanentes interactions



Les principaux forçages du système Terre

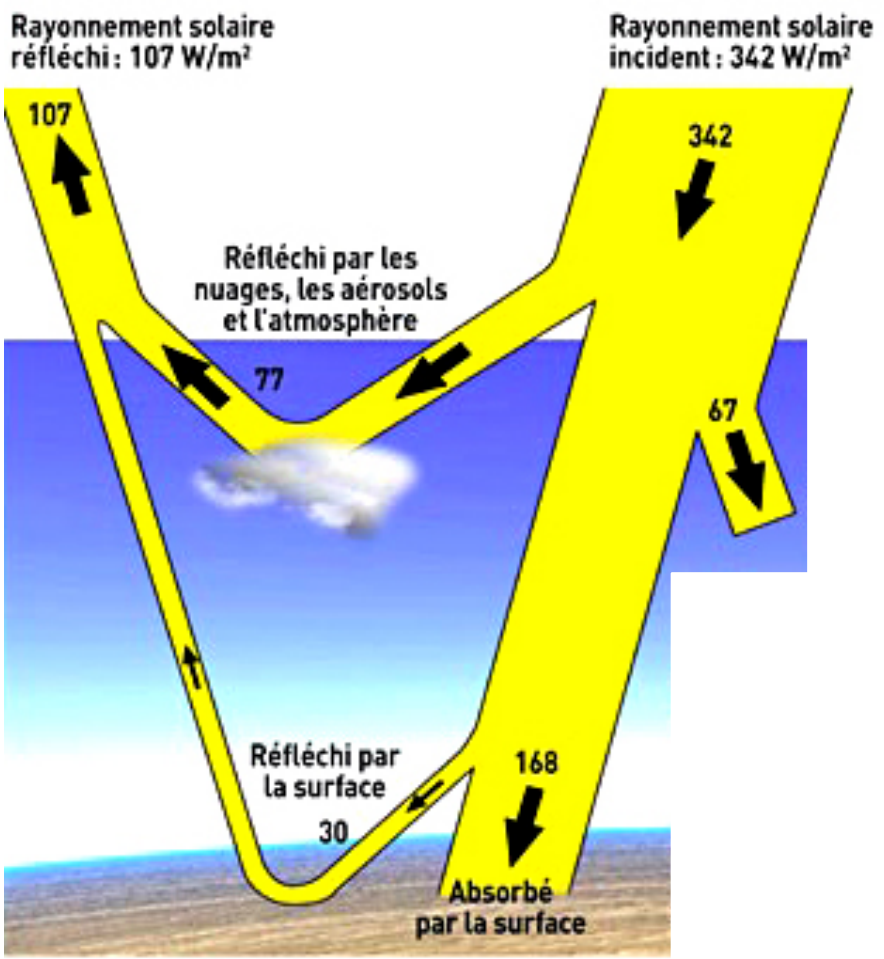


Source : Edouard Bard, Collège de France

Des forçages couvrant une grande gamme de constantes de temps

Systeme Terre : une machine thermique à la recherche de son équilibre

Le bilan énergétique planétaire ...



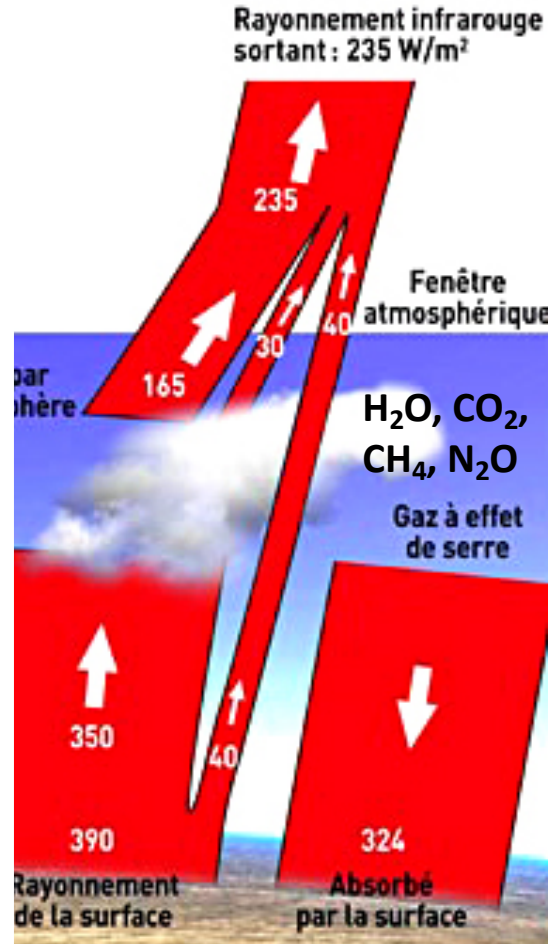
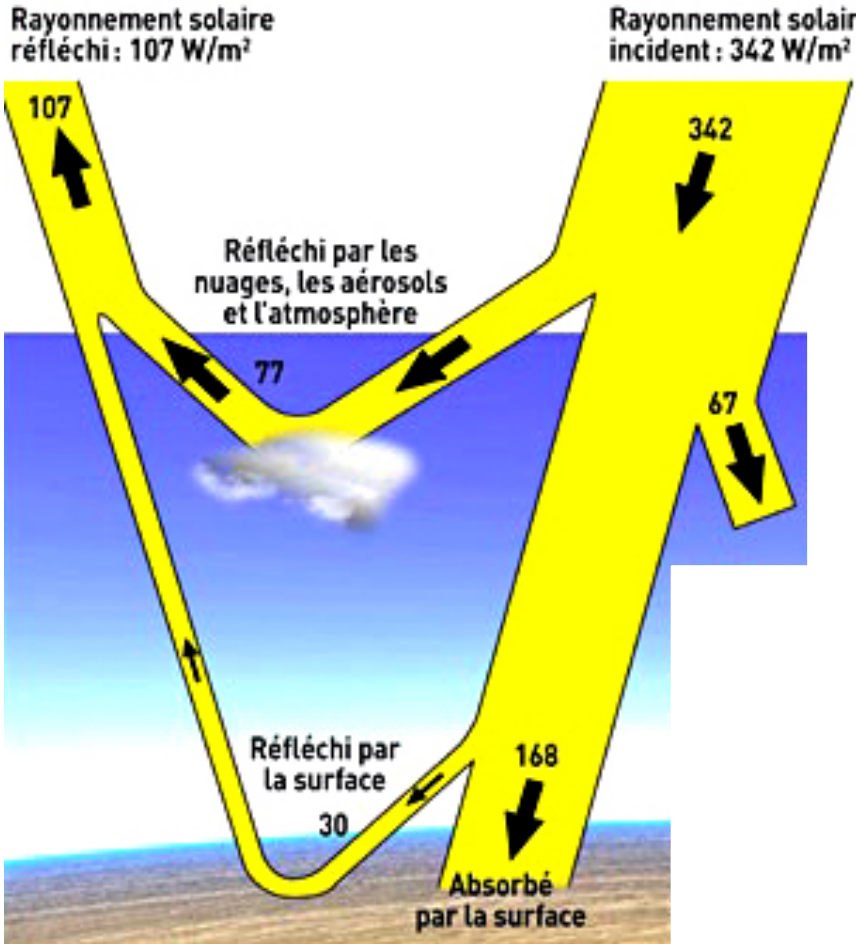
Source : IPCC, 2007

Systeme Terre : une machine thermique à la recherche de son équilibre



Le bilan énergétique planétaire ...

... est équilibré



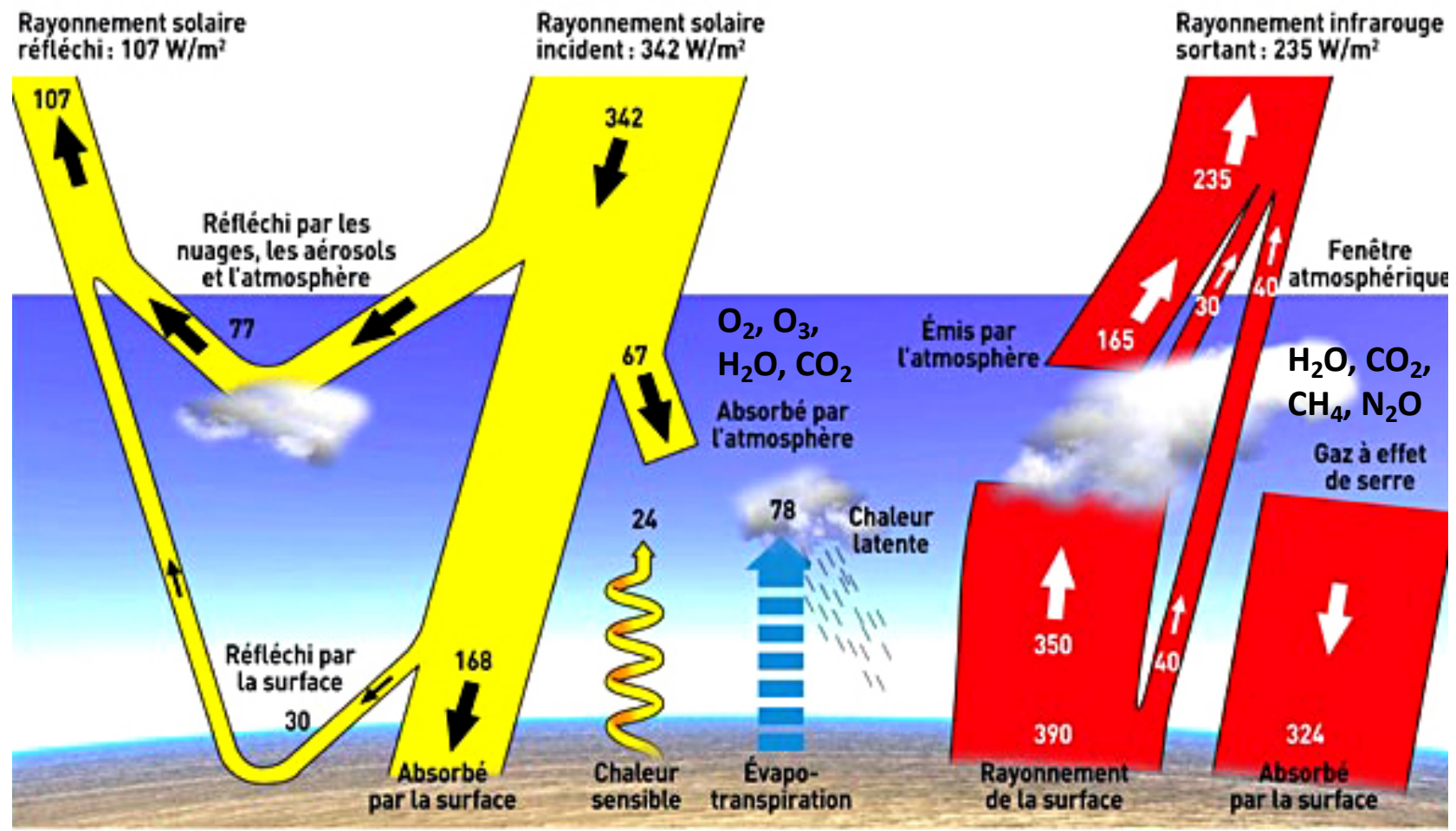
Source : IPCC, 2007

Systeme Terre : une machine thermique à la recherche de son équilibre

Le bilan énergétique planétaire ...



... est équilibré

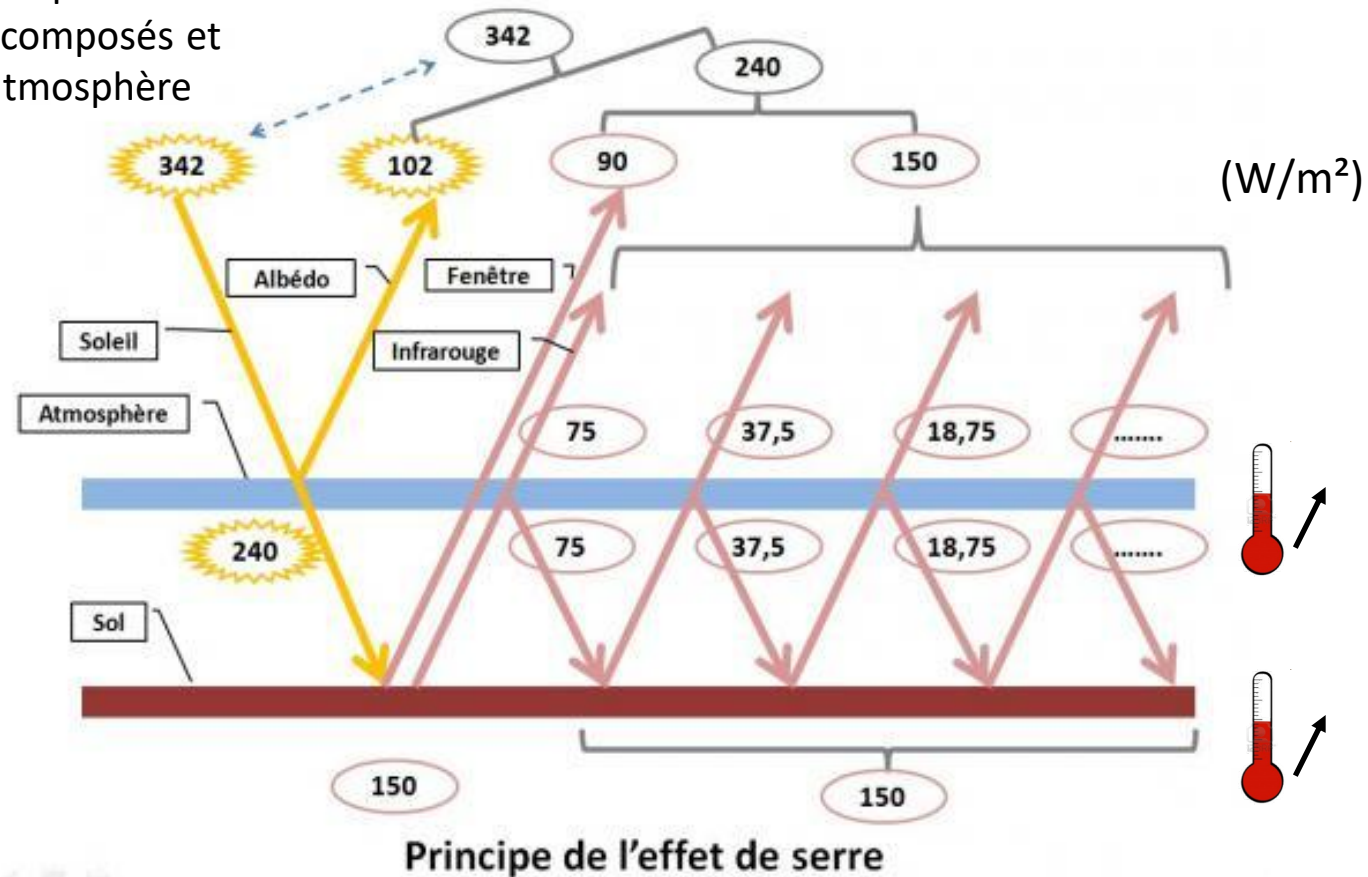


Source : IPCC, 2007

Rayonnement solaire et Effet de serre

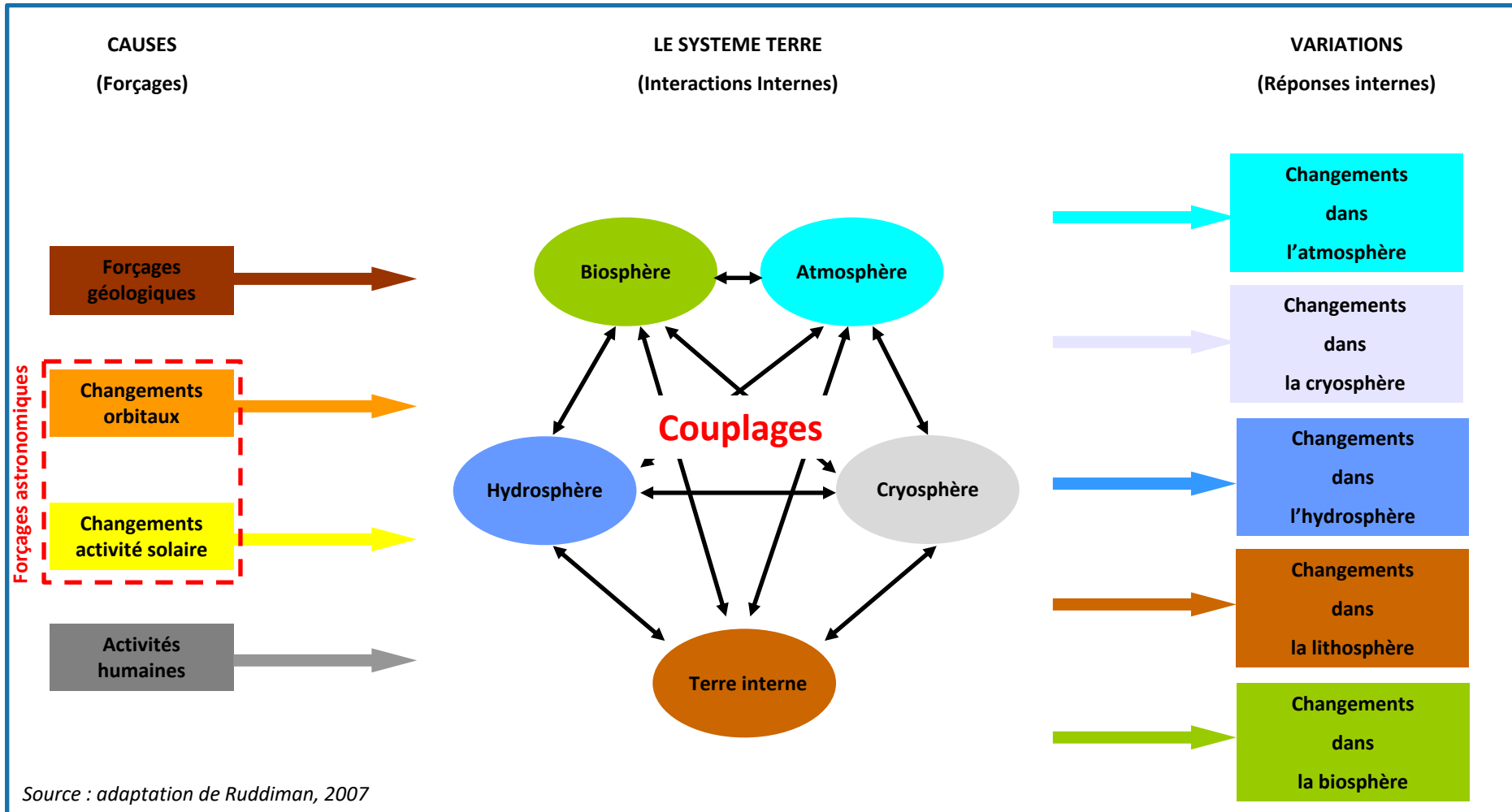
La présence de l'atmosphère engendre une **température d'équilibre** plus importante grâce à l'absorption de rayonnement par certains composés et à la nature convective de l'atmosphère

Effet de serre - principe

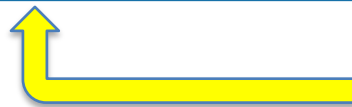


- Effet de serre = piégeage d'énergie infrarouge dans les basses couches de l'atmosphère
- Effet naturel permettant une température tempérée à la surface de la Terre
- Amplification par les activités humaines (émissions de gaz à effet de serre)

Le système Terre : des acteurs en permanentes interactions



Source : adaptation de Ruddiman, 2007



Rétroactions possibles



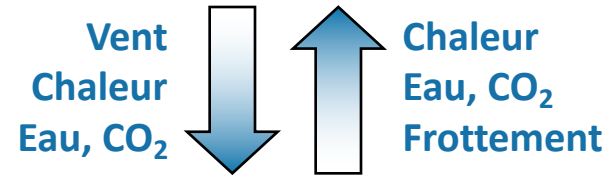
Définitions

Qu'est-ce qu'un couplage?

C'est le transfert d'informations, au travers de certaines variables, entre deux réservoirs. Exemple : couplage océan-atmosphère



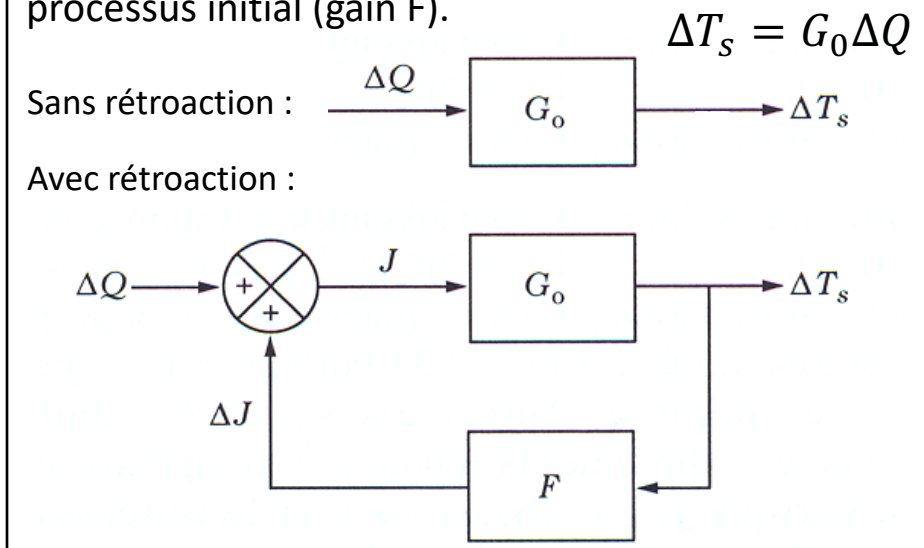
- Rapide (jour – 3 semaines)
- Peu de mémoire
- Chauffe par le bas
- Semi-transparent



- Lent (saison – 1000 ans)
- Inertie thermique
- Chauffe par le haut
- Opaque

Qu'est-ce qu'une rétroaction?

Le résultat d'un processus initial (ΔQ) déclenche des changements (ΔT_s), avec un gain à vide G_0 , dans un second processus, qui peut en retour influencer le processus initial (gain F).

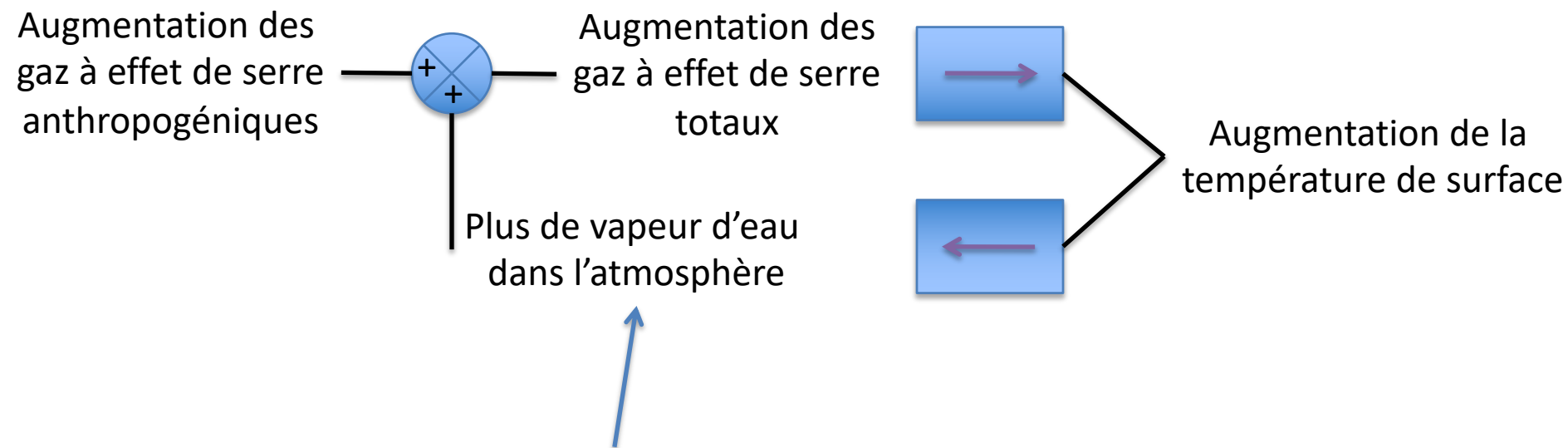


On trouve :
$$\Delta T_s = \frac{G_0}{1 - FG_0} \Delta Q$$

Une rétroaction positive ($F > 0$) intensifie le processus, une rétroaction négative l'atténue ($F < 0$).

Exemple de rétroaction liée à la vapeur d'eau

Boucle de rétroaction positive



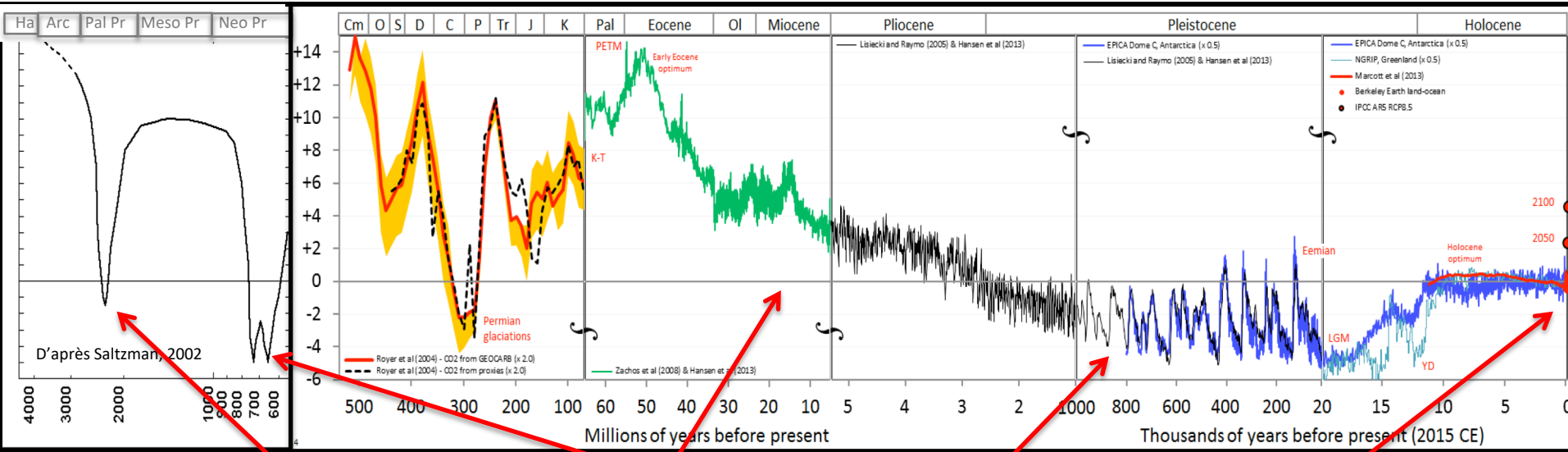
- Une masse d'air plus chaude peut contenir plus de vapeur d'eau (sans condensation), d'après la loi physique de Clausius-Clapeyron.
- La vapeur d'eau étant le principal gaz à effet de serre, cela accélère le réchauffement. On obtient donc une rétroaction positive

PLAN

1. Présentation du système Terre (milieux, forçages, rétroactions)
2. Les quatre temps de la valse terrestre
3. Processus de transport et transfert

Les quatre temps de la « valse » Terrestre

Reconstruction de la température de la Terre (écart à l'actuel)



10⁹ ans
Soleil, gaz à effet de serre, vie

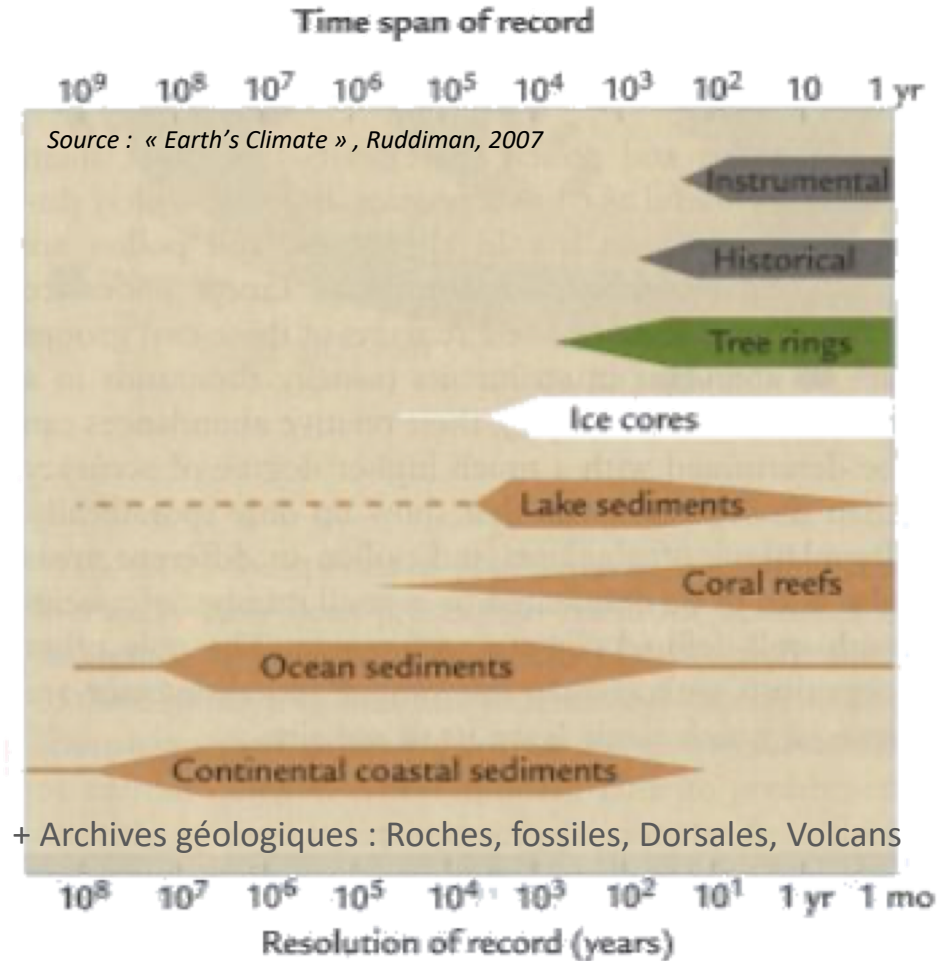
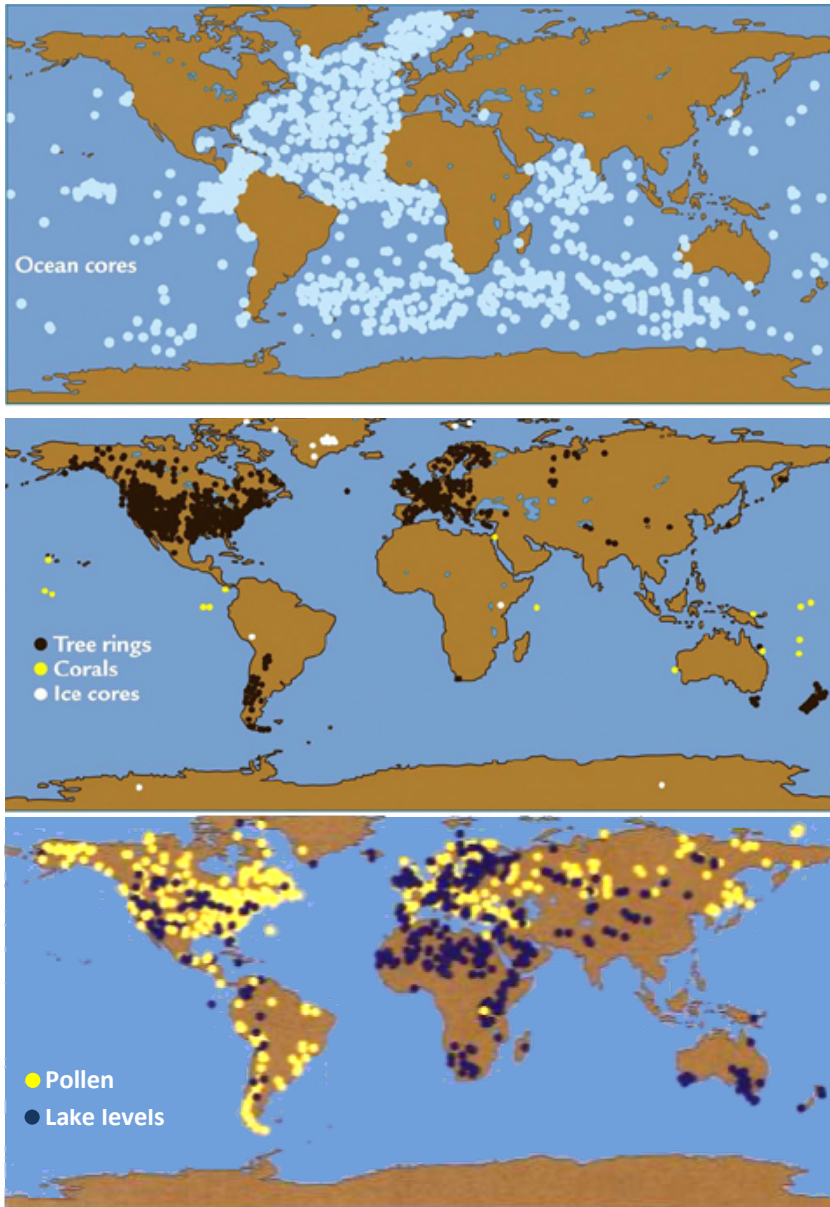
10⁶-10⁸ ans
Tectonique orogénèse, CO₂

10⁴-10⁵ ans
Paramètres orbitaux

1-100 ans
Activités humaines

4500 Ma – 541 Ma : Estimation d'après Saltzman 2002
541 Ma – Présent : Courbe de Glen FERGUS (http://gergs.net/?attachment_id=1014)

Des archives de l'Histoire de la Terre



+ Analyse isotopiques (proxies) : O, Si, C, H, B, U, Th , Ar, ...

^{18}O (silice)
Température
(diatomées)

^{18}O (O_2)
Photosynthèse,
respiration

^{13}C (CO_2)
Sources du CO_2
(océanique, anthro-
pique, volcanique)



^{17}O (H_2O) ou **D**eutérium ET **^{18}O** (H_2O)
Température et humidité à la source des pluies

Deutérium ou **^{18}O** (H_2O)
Température de l'air (glaces polaires)
Précipitation (glaces tropicales)

^{18}O (cellulose)
Température ou humidité

^{18}O et **^{13}C** (calcite)
Conditions environnementales (spéléothèmes)
Température, volume des glaces (foraminifères)

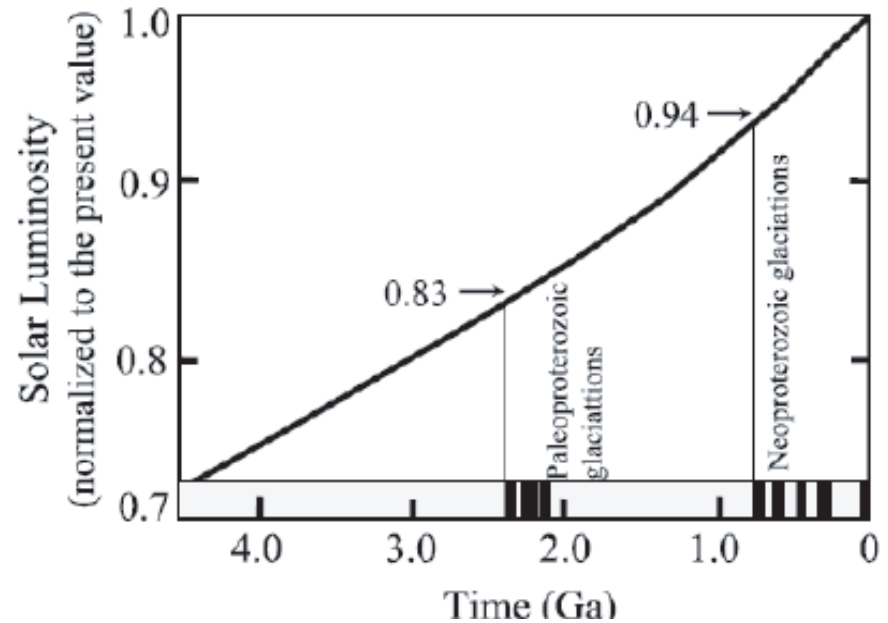
➔ *Cours isotopes dans l'environnement*

1^e temps : le milliard d'année

-30% 4,6 Ga ago

Des températures de la Terre reconstruites qui ne sauraient être expliquées par une activité solaire réduite à ses débuts.

- 6% 750 Ma ago



Formule de Gough (1981),

$$S = S_0 / (1 + 0.4t/t_0)$$

S_0 représente la constante solaire actuelle (1368 W/m²)
 $t_0 = 4.6$ Ga, et t = temps (en Ga) avant l'époque présente.

Il y a 0.7 Ga, notre Soleil était 6% moins intense qu'aujourd'hui
constante solaire Néoprotérozoïque = 1286 W/m²

► La Terre aurait du s'englacer totalement

1^e temps : le milliard d'année

Pourtant, pendant 2 Ga, aucune trace de glaciation sur Terre :

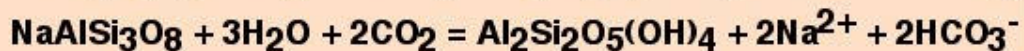
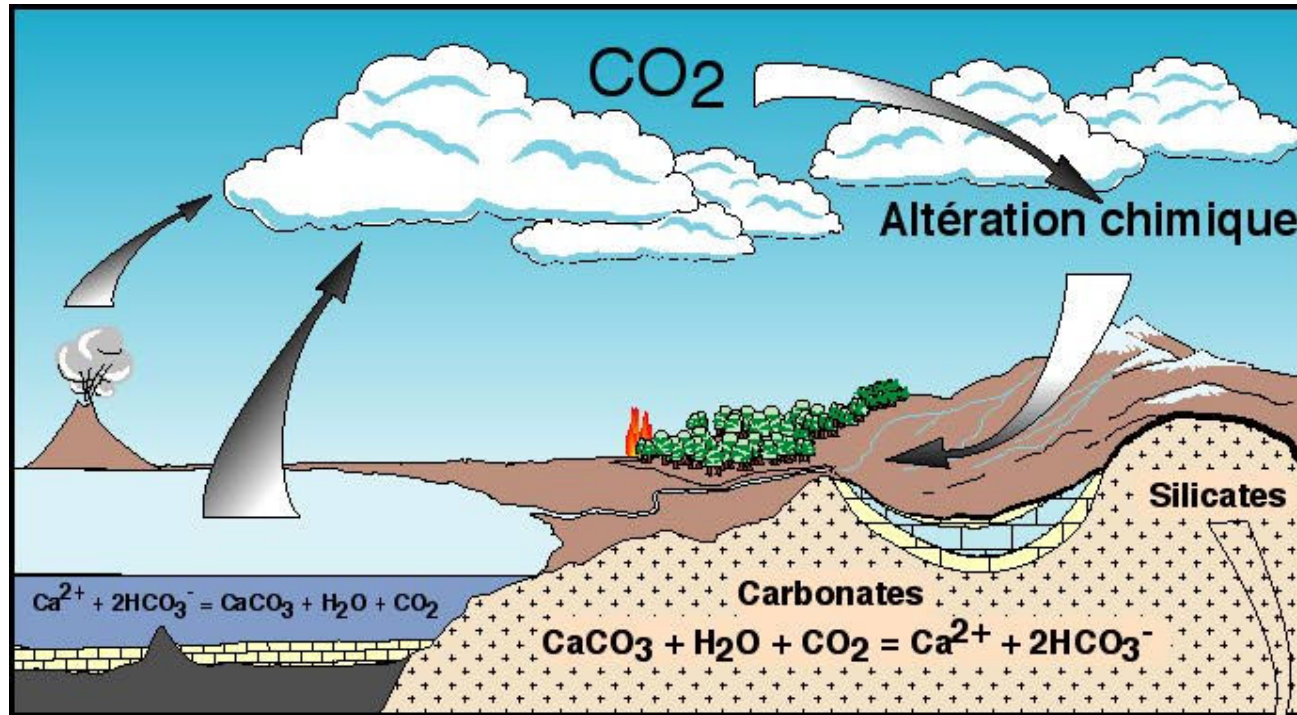
Les gaz à effet de serre ont probablement préservé la Terre d'une glaciation totale (hypothèses toujours débattues) et régulé la température

- **Un premier candidat : le gaz carbonique (CO₂)**

- Quantité telle qu'il produirait de la sidérite (FeCO₃) dans les paléosols
- Pas de sidérite dans les vieux cratons, donc nécessité d'un candidat supplémentaire

1^e temps : le milliard d'année

Cycle géologique du CO₂



Sources : Volcanisme et océans

Puits : Altération chimique

1^e temps : le milliard d'année

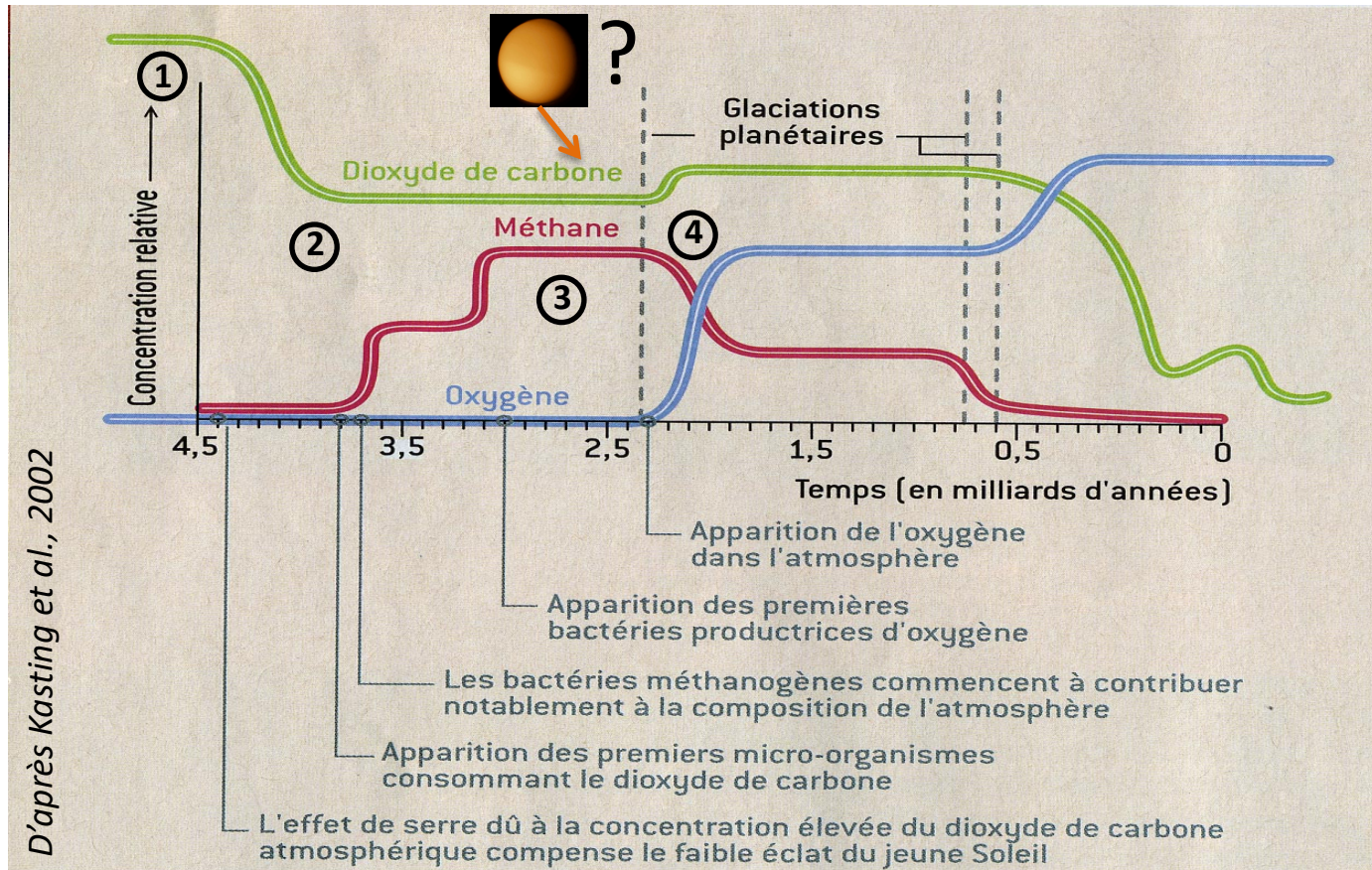
Pourtant, pendant 2 Ga, aucune trace de glaciation sur Terre :

Les gaz à effet de serre ont probablement préservé la Terre d'une glaciation totale (hypothèses toujours débattues) et régulé la température

- **Un premier candidat : le gaz carbonique (CO₂)**
 - Quantité telle qu'il produirait de la sidérite (FeCO₃) dans les paléosols
 - Pas de sidérite dans les vieux cratons, donc nécessité d'un candidat supplémentaire
- **Un second candidat, le méthane (CH₄), d'origine organique principalement (archées méthanogènes)**
- **Autre hypothèse : effet de l'albédo** (une aqua-planète réfléchit moins le rayonnement solaire qu'aujourd'hui)

1^e temps : le milliard d'année

Décroissance du CO₂ atmosphérique, Croissance du méthane
Régulation possible par le rapport CH₄/CO₂
Rupture de la régulation au moment du grand événement d'oxydation

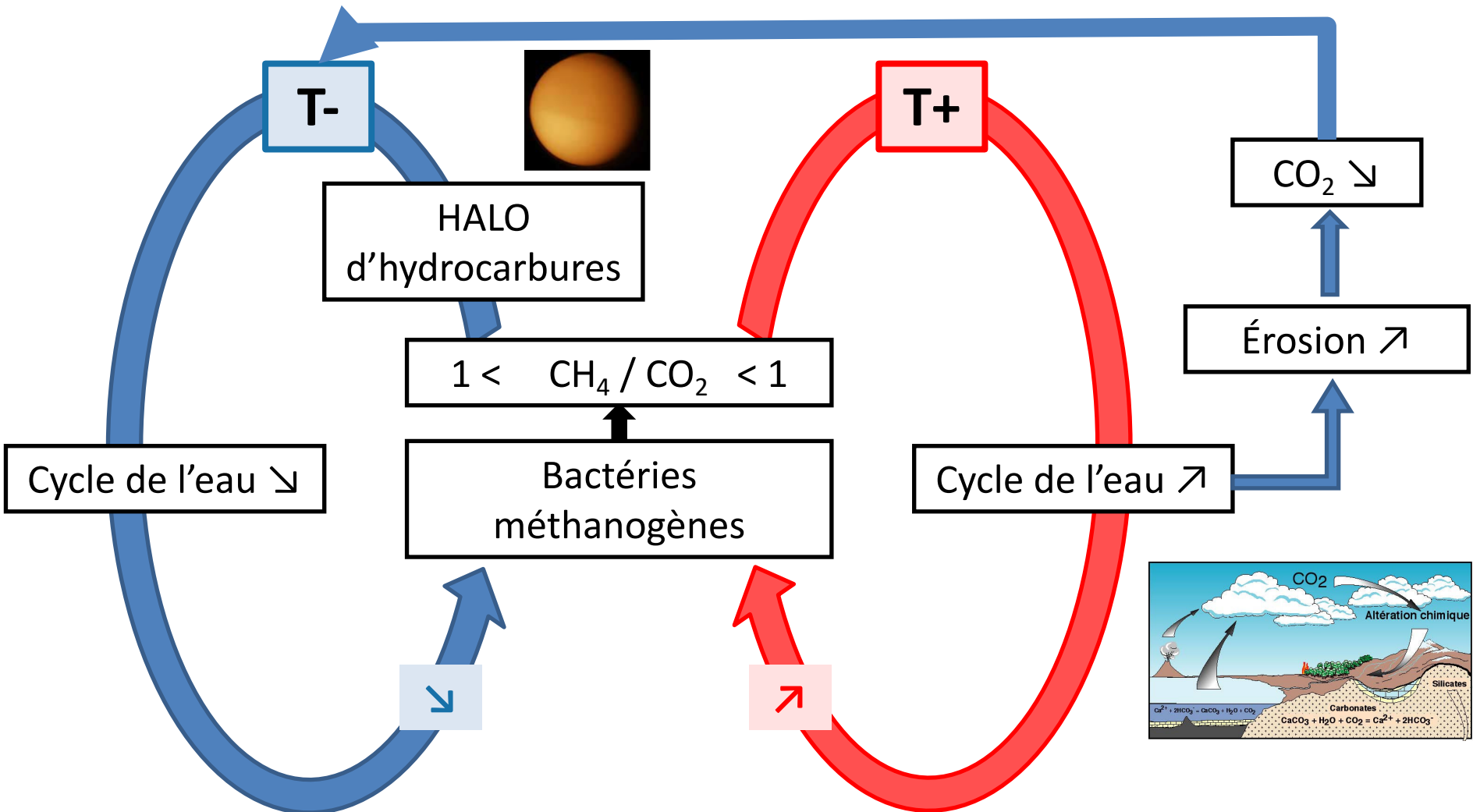


D'après Kasting et al., 2002

Principaux Forçages : Soleil, GES, océans, Vie

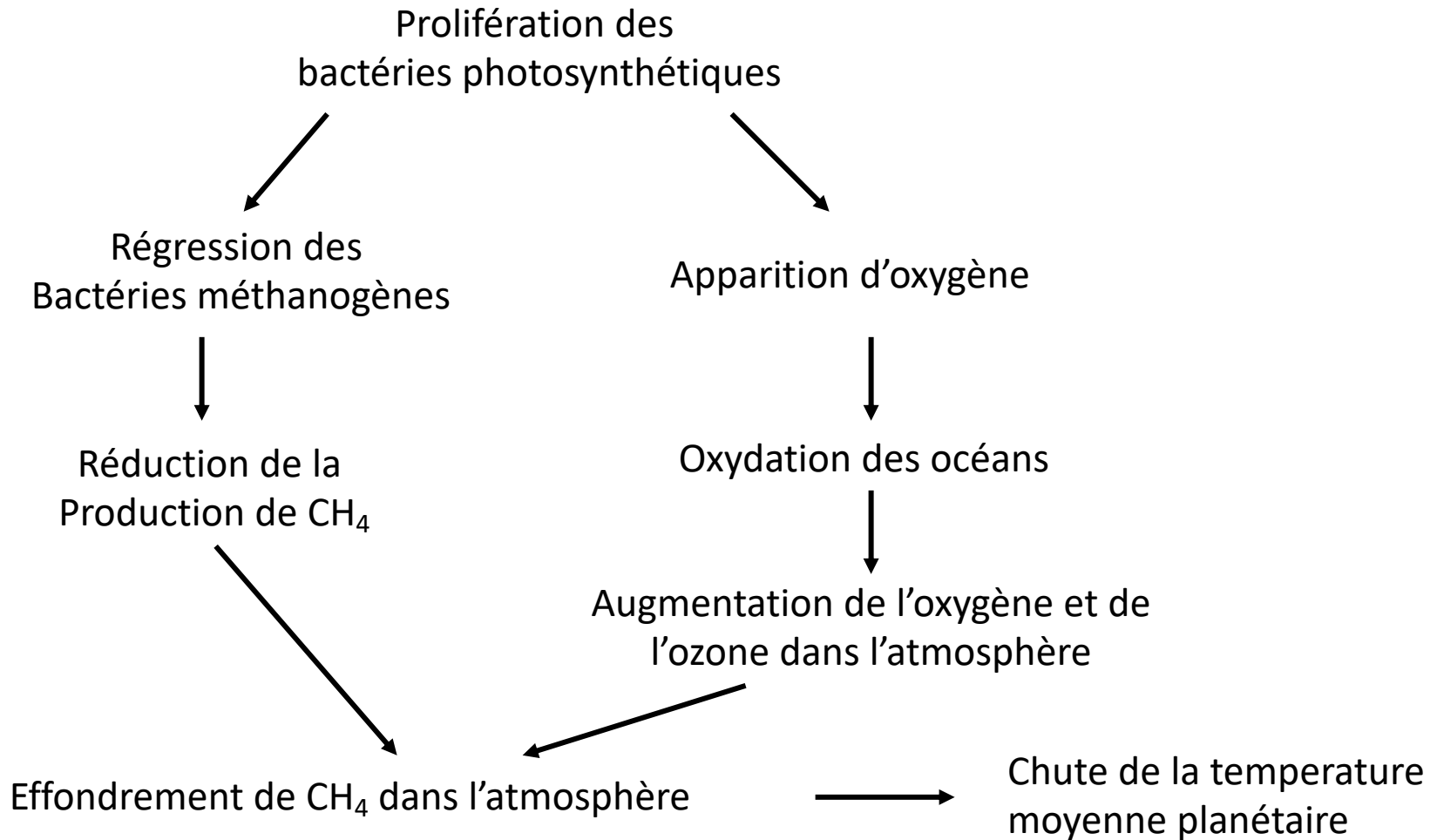
Les 4 premiers milliards d'années

Mécanisme de stabilisation de la température (rétroactions encore discutées)



Théorie possible de la glaciation Huronienne

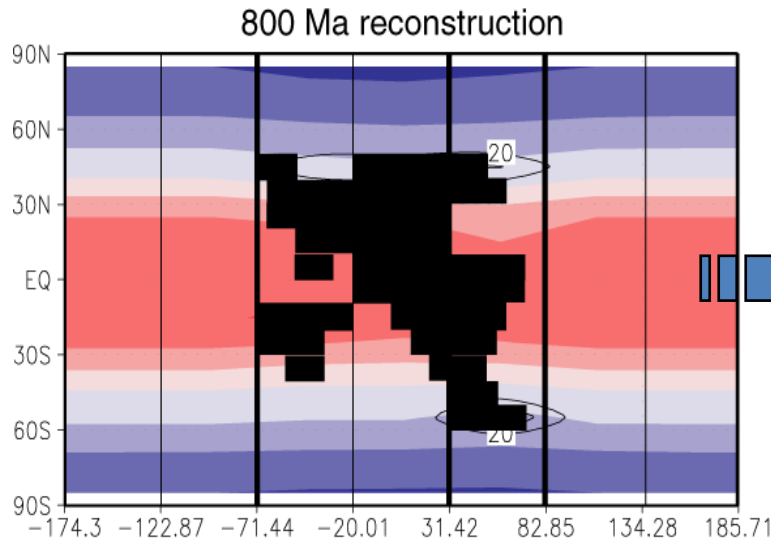
GEO : Grand événement d'oxydation



2^e temps : la dizaine de millions d'années

*Glaciations au Néoprotérozoïque (~730Ma et ~650 Ma):
Résultat d'un modèle de climat*

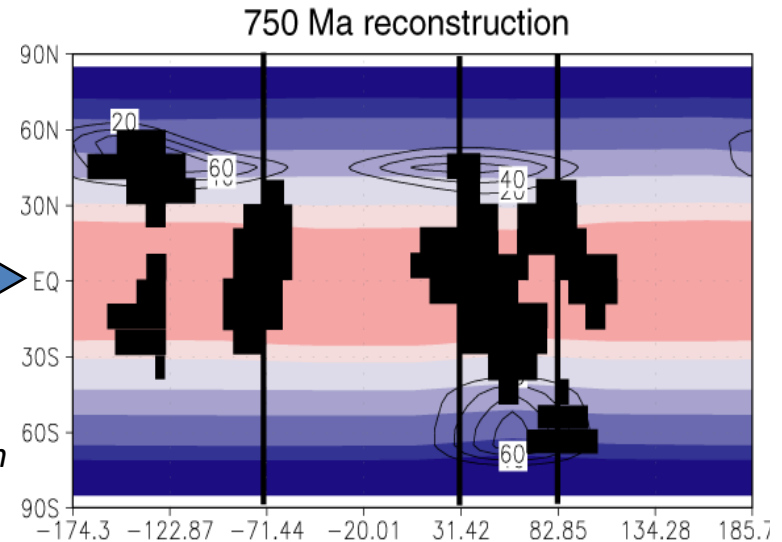
RODINIA



pCO₂ d'équilibre à 1800ppm
Température moyenne globale : 10,2°C

**Position tropicale des continents
condition non favorable à la formation
de calottes de glace continentales**

Source :
G. Ramstein



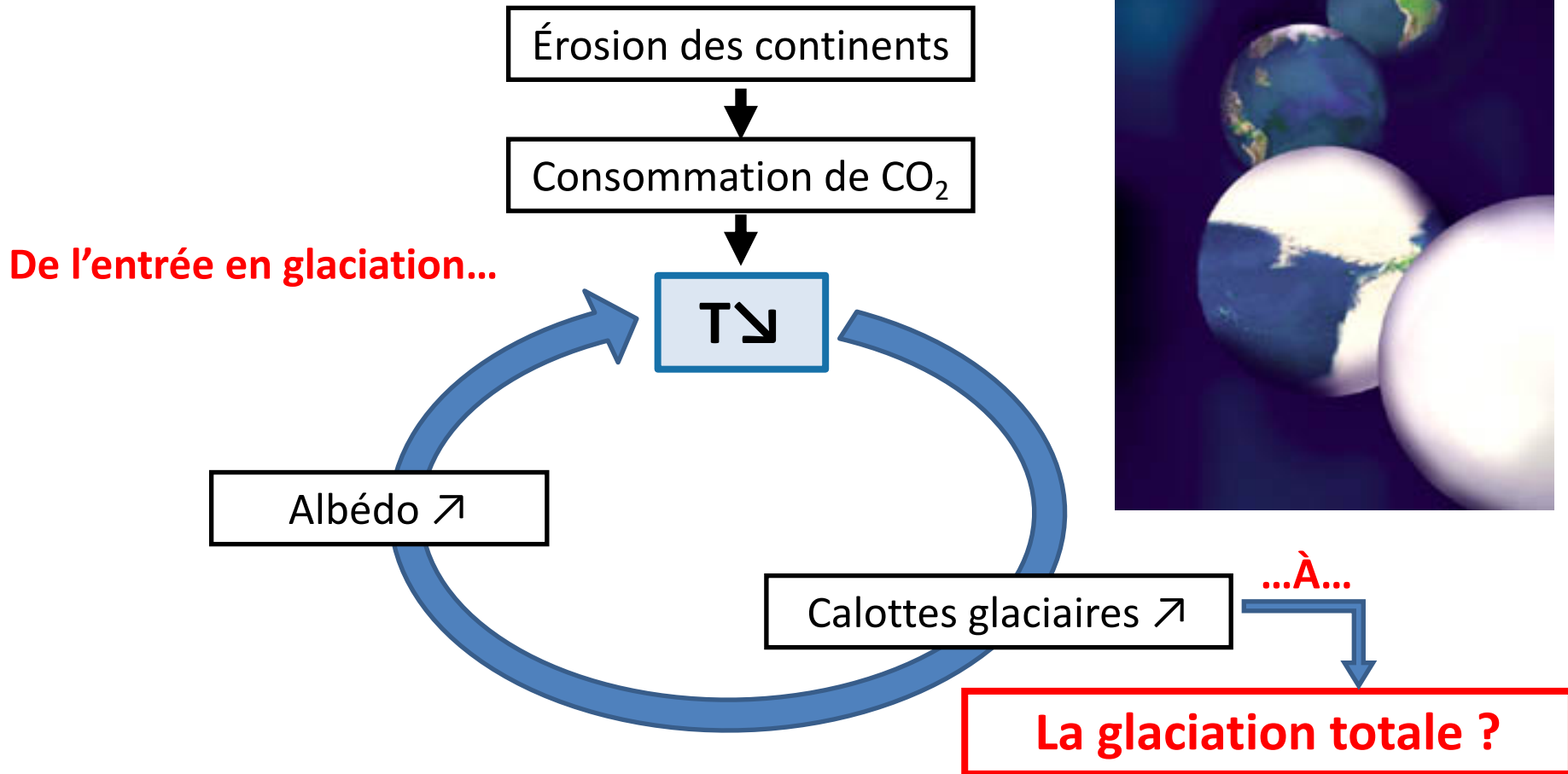
pCO₂ d'équilibre à 500ppm
Température moyenne globale : 2°C

**Configuration fragmentée
très favorable au déclenchement
d'une glaciation importante**

Principaux forçages = tectonique des plaques et volcanisme

2^e temps : la dizaine de millions d'années

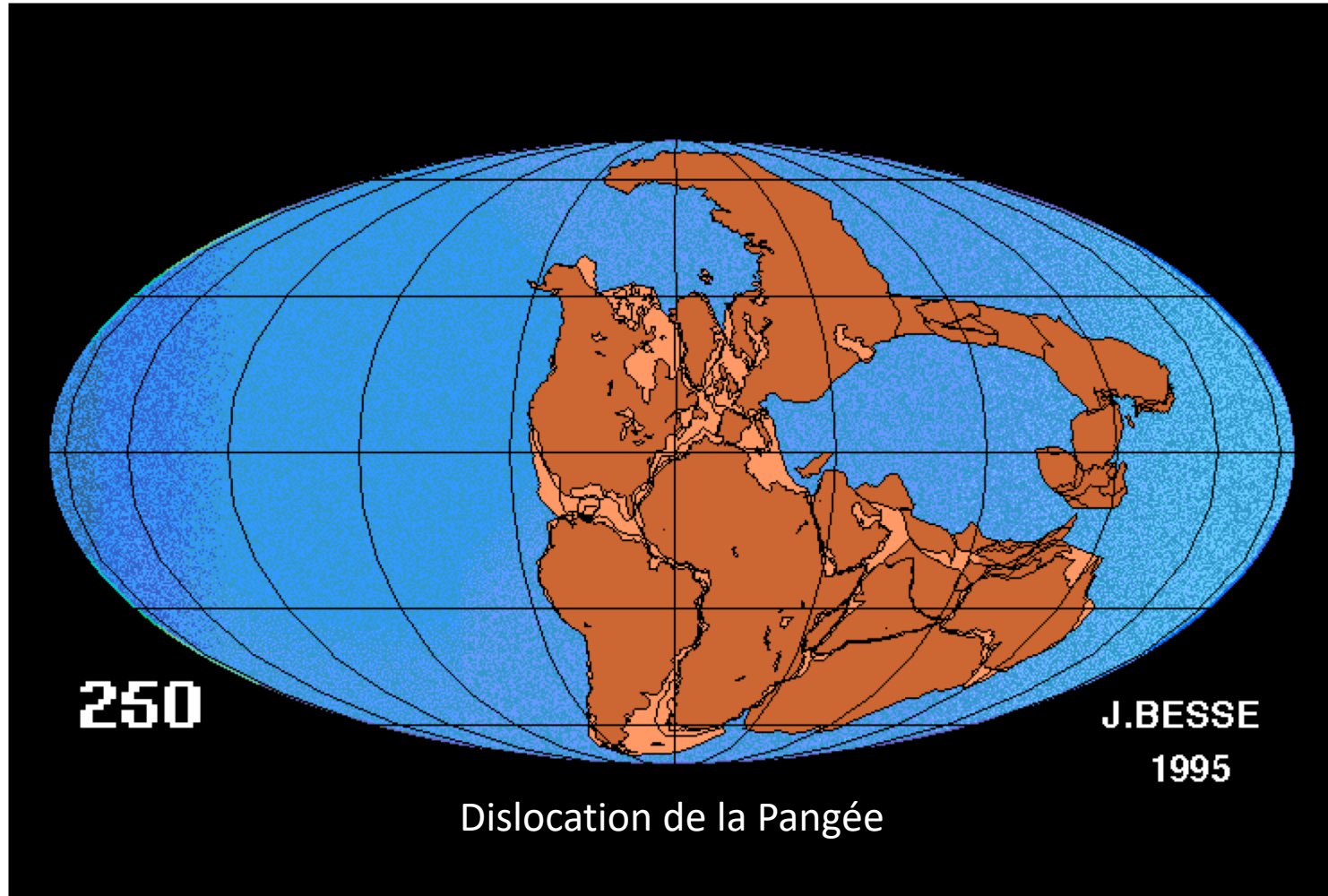
Mécanisme d'englacement total (encore discuté)



Hypothèse toujours discutée !

2^e temps : la dizaine de millions d'années

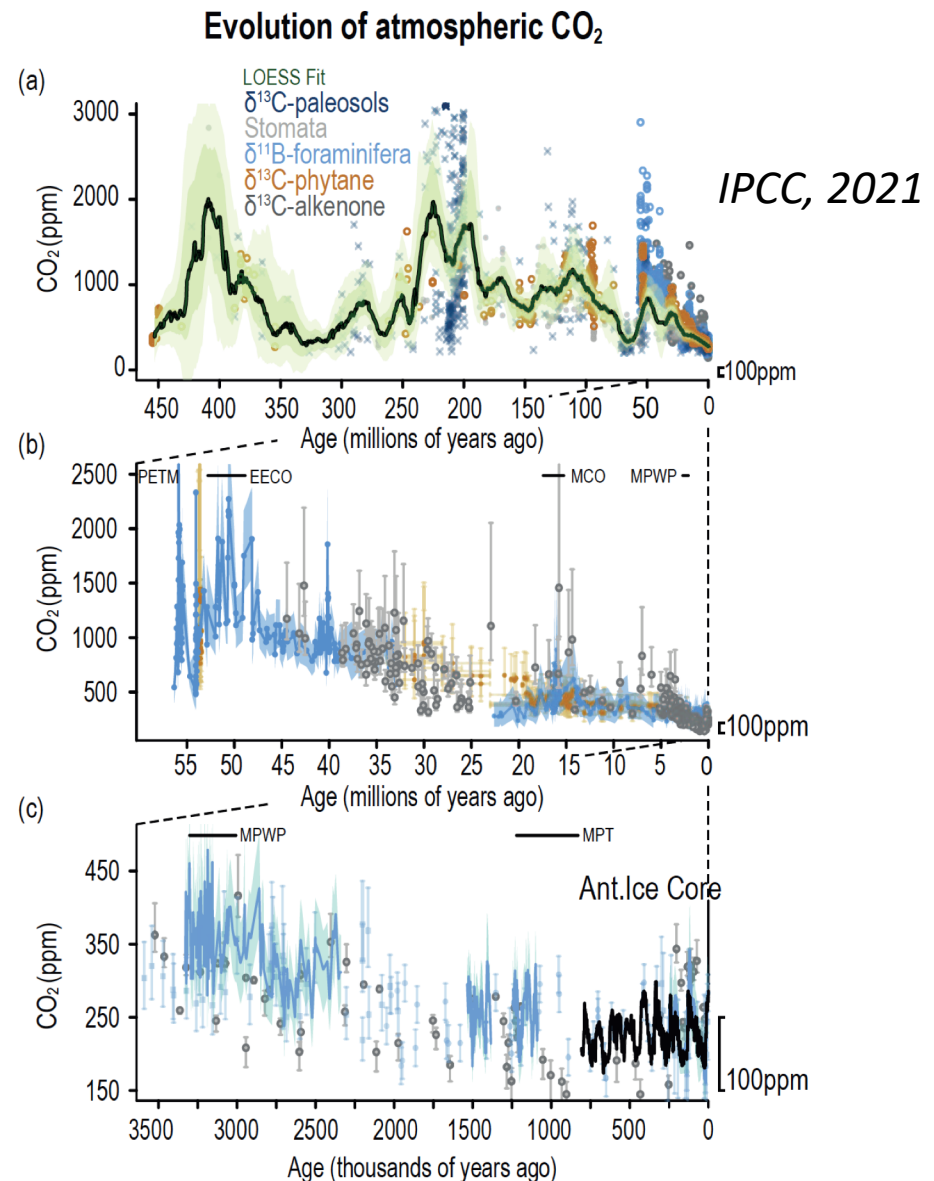
Le temps de la tectonique de plaques et de la dérive des continents



2^e temps : la dizaine de millions d'années

**Depuis 65 Ma :
décroissance
progressive des
températures et du CO₂**

- Maximum du CO₂ à l'Eocène encore discuté. Hypothèse actuelle sur la subduction de la Thetys, puis accroissement volcanisme
- Diminution ensuite par accroissement de l'érosion (surrection de l'Himalaya)
- Apparition de la calotte de glace Antarctique (34 Ma) et Groenland (2.6 Ma)



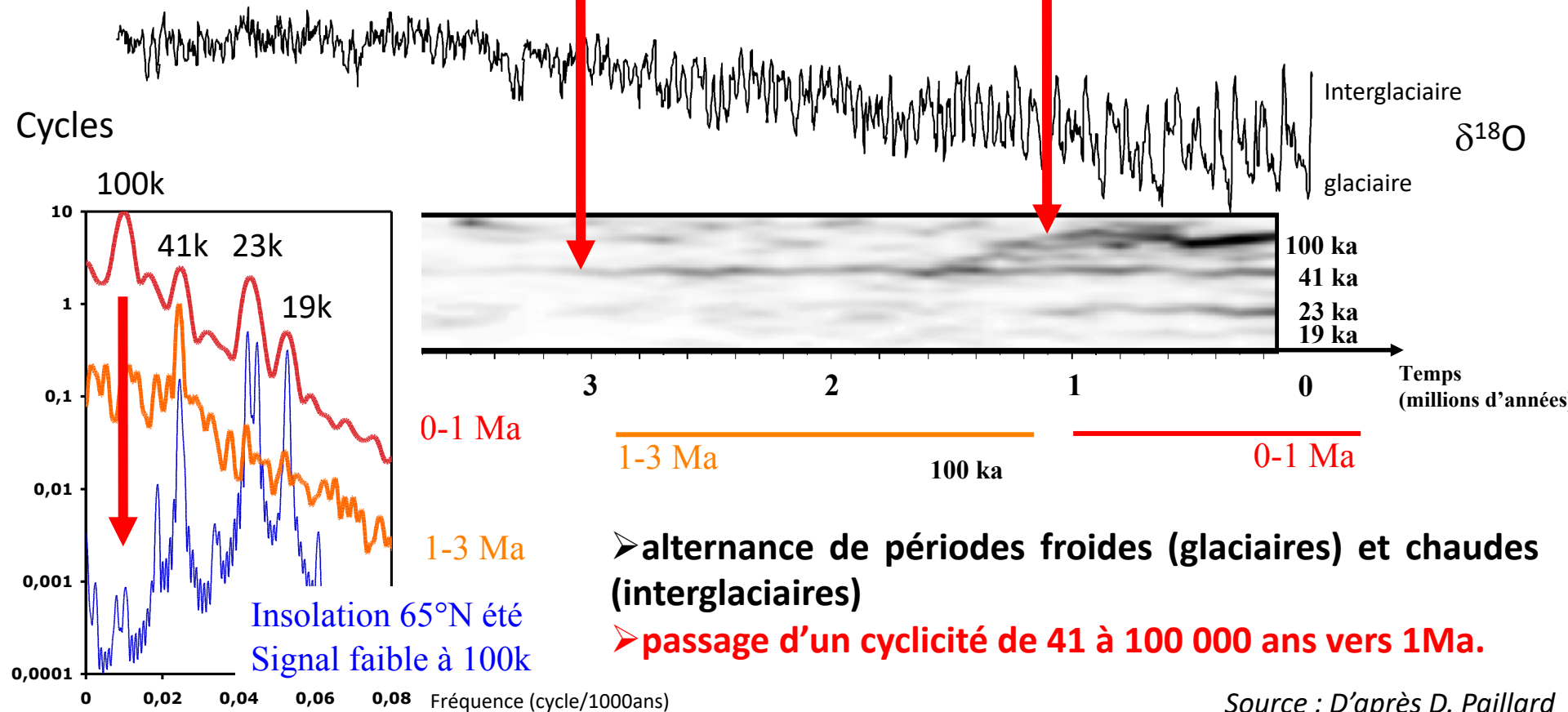
3^e temps : la dizaine de milliers d'années

Des cycles apparaissent dans des signaux physiques (ex : $\delta^{18}\text{O}$ /température)

Pas de grande calotte dans l'hémisphère Nord

Apparition des cycles de 41 000 ans

Apparition des cycles de 100 000 ans

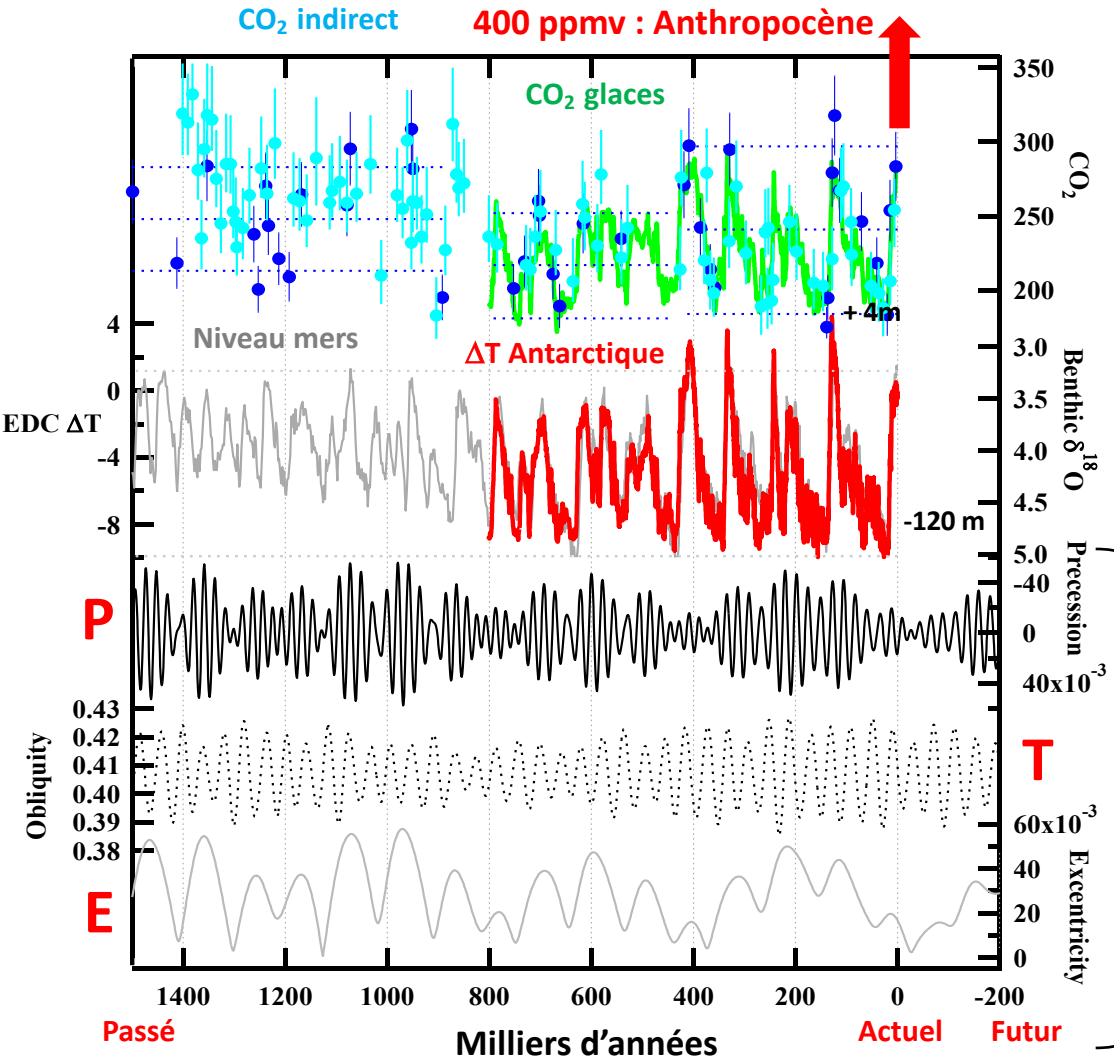


Source : D'après D. Paillard

3^e temps : la dizaine de milliers d'années

Des cycles apparaissent dans des signaux physiques (ex : CO₂, niveau des mers, ...)

Principaux Forçages : paramètres orbitaux de la Terre



Théorie de M. Milankovitch

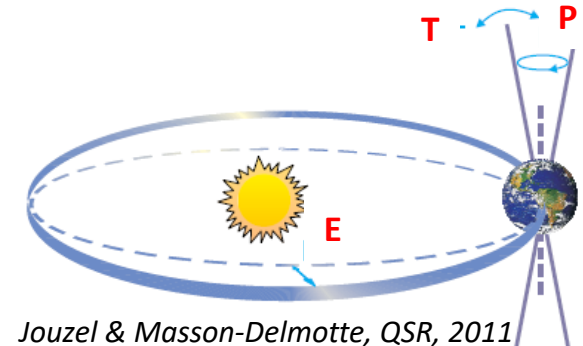


Paramètres orbitaux contraignent les calottes glaciaires (+albédo) qui déterminent la température.

Interactions fortes avec la circulation océanique et le cycle du carbone



Signal moteur : Insolation d'été à 65°N



Jouzel & Masson-Delmotte, QSR, 2011

3^e temps : la dizaine de milliers d'années

Des cycles apparaissent dans des signaux physiques (ex : CO₂, niveau des mers, ...)

Principaux Forçages : paramètres orbitaux de la Terre

Périodicité

E Variations de l'excentricité. Modifie la quantité d'énergie reçue par la Terre (moins de 1%).

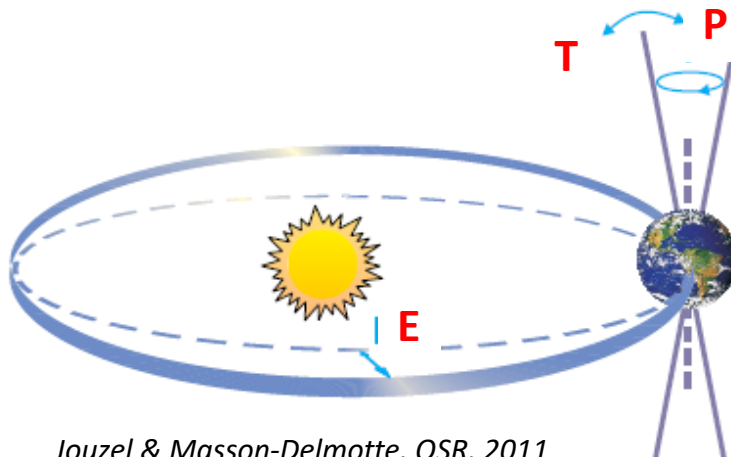
100 000 ans

T Obliquité de l'écliptique : Varie entre 22.1° and 24.5°. Modifie l'amplitude relative des saisons

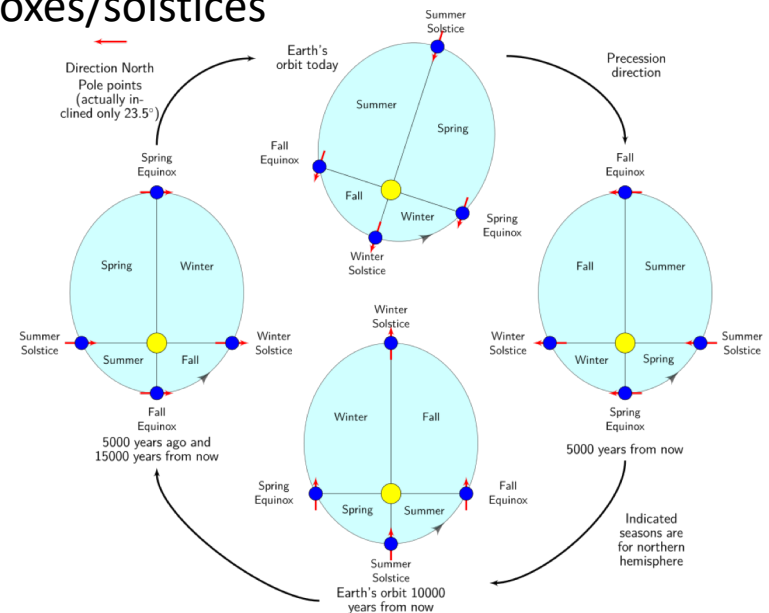
41 000 ans

P Précession des équinoxes : provoquée par le couple qu'exercent les forces de marées de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre. Modifie le position des équinoxes/solstices sur l'orbite et donc l'amplitude des saisons.

19 000 et 23 000 ans



Jouzel & Masson-Delmotte, QSR, 2011



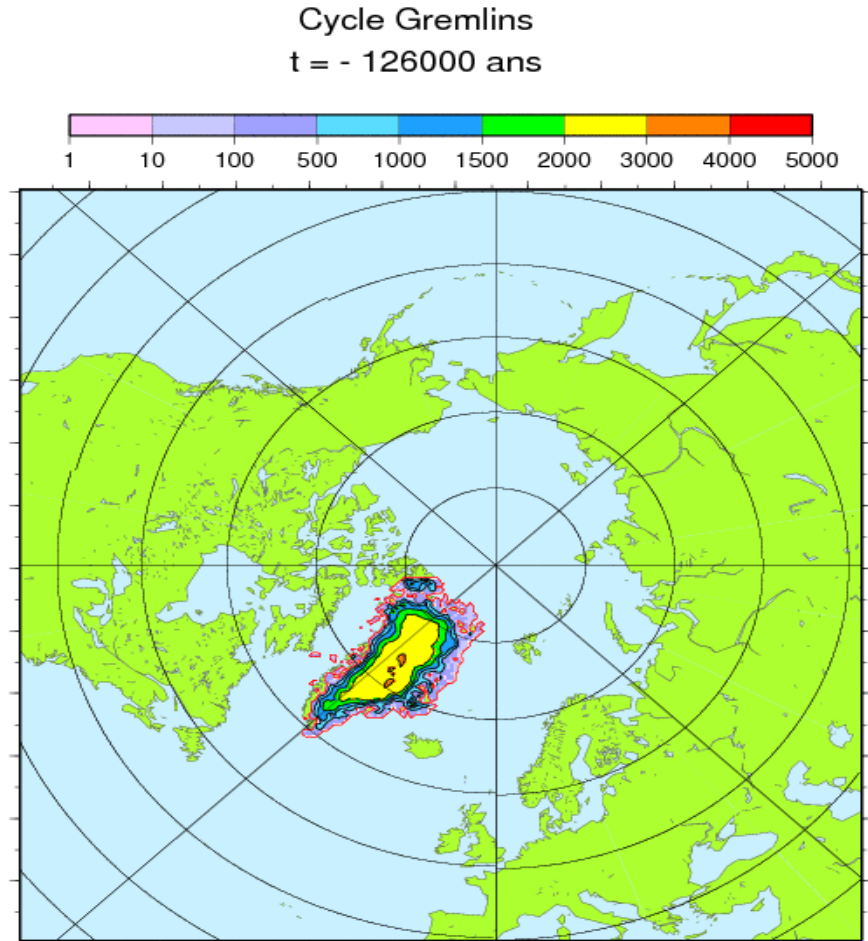
3^e temps : la dizaine de milliers d'années

Source : G. Ramstein

Un monde oscillant entre
2 calottes de glace et 4
calottes de glace

Cycles glaciaires inter-
glaciaires

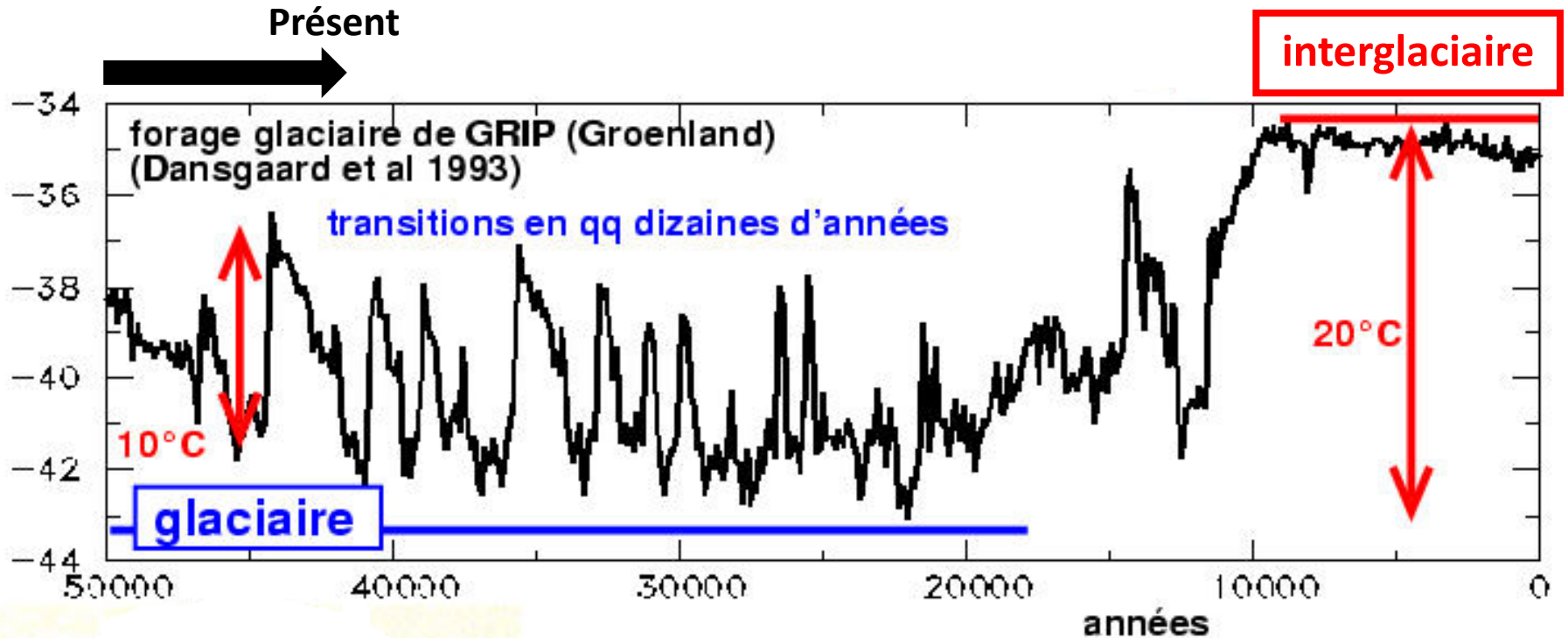
Initiés par les variations
des paramètres orbitaux
de la Terre



---> Oscillations rendues possibles par la baisse du CO₂ depuis 65 Ma

3^e temps : la dizaine de milliers d'années

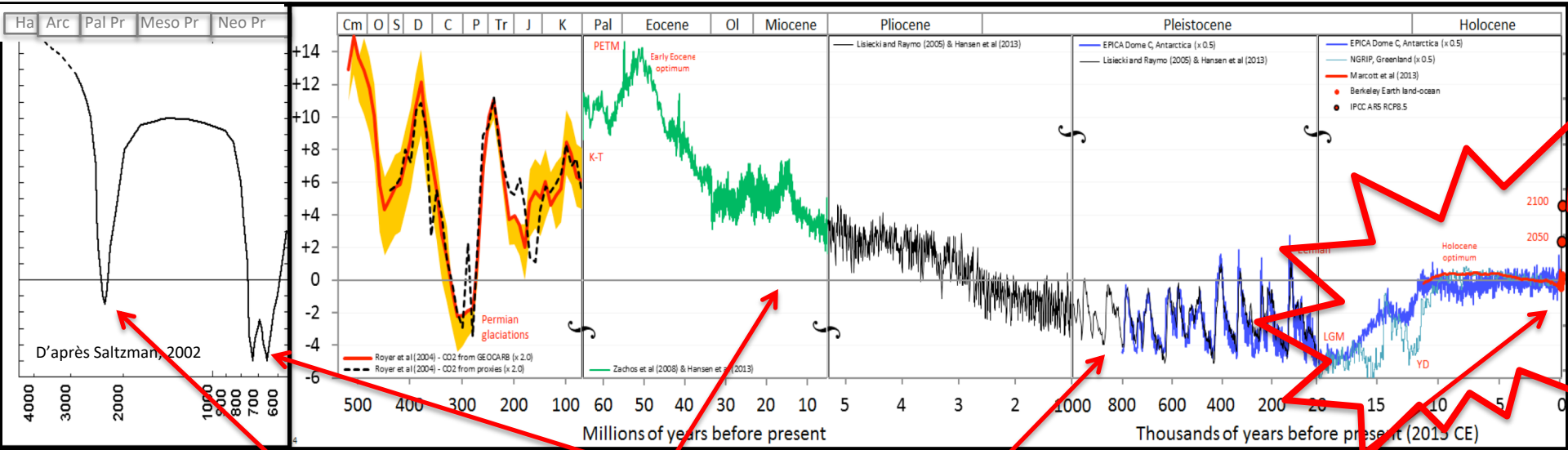
Regard de plus en plus précis sur la variabilité climatique pendant la dernière période glaciaire grâce à l'amélioration des mesures et de la chronologie



- Un climat plus instable pendant les périodes glaciaires que pendant les périodes interglaciaires (exemple du Groenland ci dessus)
- Des amplitudes de variations pouvant atteindre 10°C en quelques centaines d'années au Groenland pendant l'interglaciaire.

Les quatre temps de la « valse » Terrestre

Reconstruction de la température de la Terre (écart à l'actuel)



10^9 ans

Soleil, gaz à effet de serre, vie

10^6 - 10^8 ans

Tectonique orogénèse, CO_2

10^4 - 10^5 ans

Paramètres orbitaux

1-100 ans

Activités humaines

4500 Ma – 541 Ma : Estimation d'après Saltzman 2002

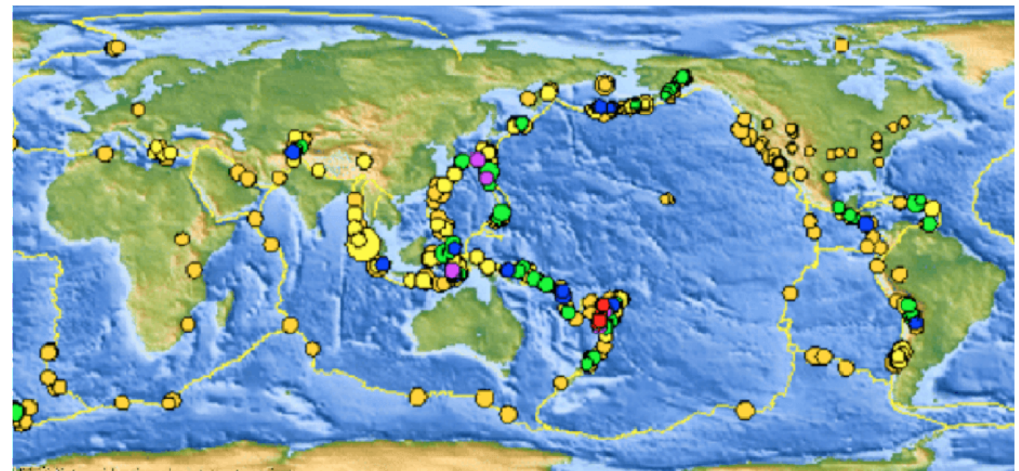
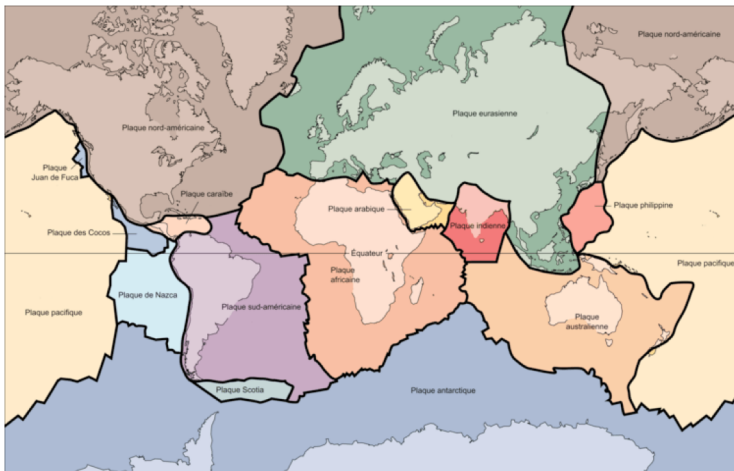
541 Ma – Présent : Courbe de Glen FERGUS (http://gergs.net/?attachment_id=1014)

4^e temps : le temps de l'anthropocène

- Il y a toujours des séismes !
- Rupture rapide résultant de l'accumulation lente de contraintes aux interfaces entre plaques
- Difficulté intrinsèque de prévision à court terme.
- Estimations moyen-long terme à partir des temps de retour, d'observations des zones d'accumulation, du développement de nouvelles méthodes (largement à faire) pour détecter d'éventuelles phases d'initiation plus rapide que la lente accumulation des contraintes tectoniques



Amatrice, Italie, 2016



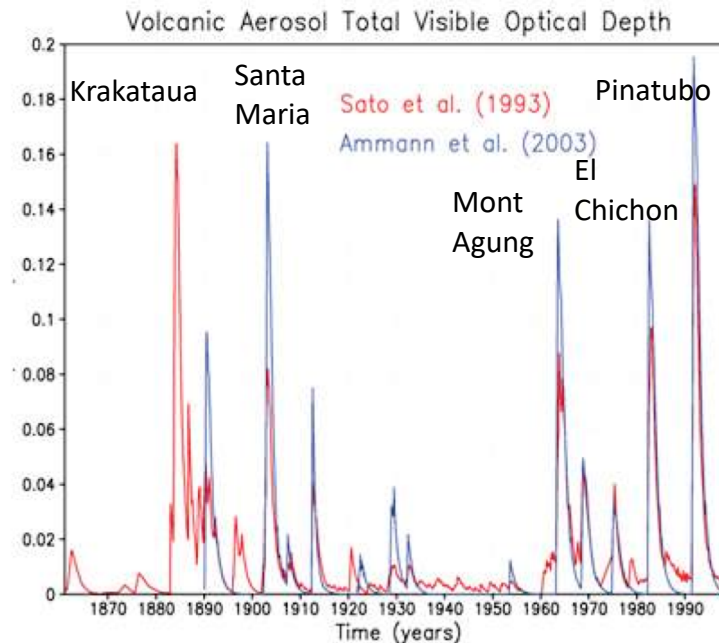
Plaques (gauche) et Événements sismiques sur une courte période 8-30 jours, carte de 2010 (droite). The conversation, USGS/Wikipédia

4^e temps : le temps de l'anthropocène

- Il y a toujours des éruptions volcaniques !
- Rôle ponctuel (dans le temps) significatif sur le bilan radiatif mais rôle mineur sur le cycle du carbone contemporain et pour expliquer le changement climatique en cours
- Prévisibilité à court terme a fait de gros progrès notamment grâce à l'observation continue (séismes, coulées, fumées)

Eruptions troposphériques (impact local)

Eruptions stratosphériques (impact climatique)



4^e temps : le temps de l'anthropocène

- Mais aussi d'autres évènements extrêmes !

Canicules et sécheresses



1947, 1976, 1983, 2003, 2006, 2018, 2019, 2022, 2023 (France)



Paris, 2016



Episode Cévenol 2021 : 360 mm en 3h



Feux au Canada (2023)

Liens avec le changement climatique ?



Cyclones 2017 en Atlantique Nord (Katia, Irma, José)



Destruction de la Bérarde (Alpes, 2024)



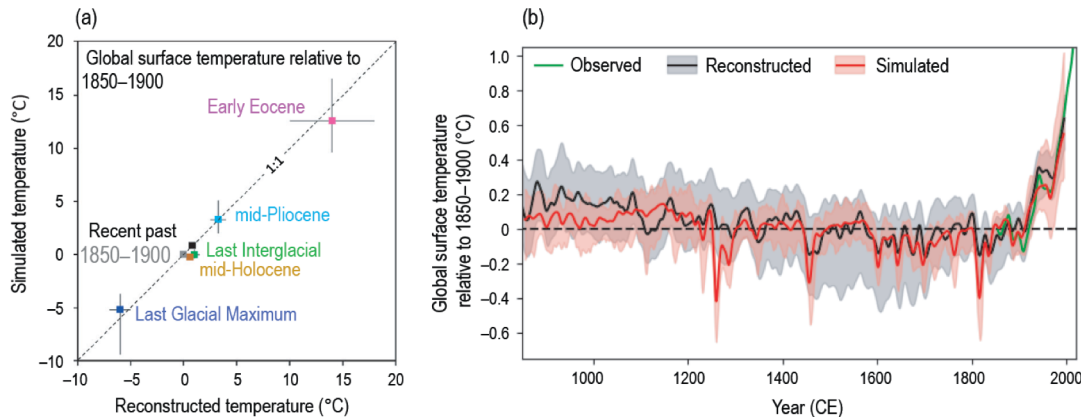
Pluies et Inondations en Grèce (2023)

--> Attribution sur le site CLIMAMETER

4^e temps : le temps de l'anthropocène

Température et GES depuis 1000 ans

Proxy-based and model-simulated estimates of global surface temperature agree across multiple reference periods

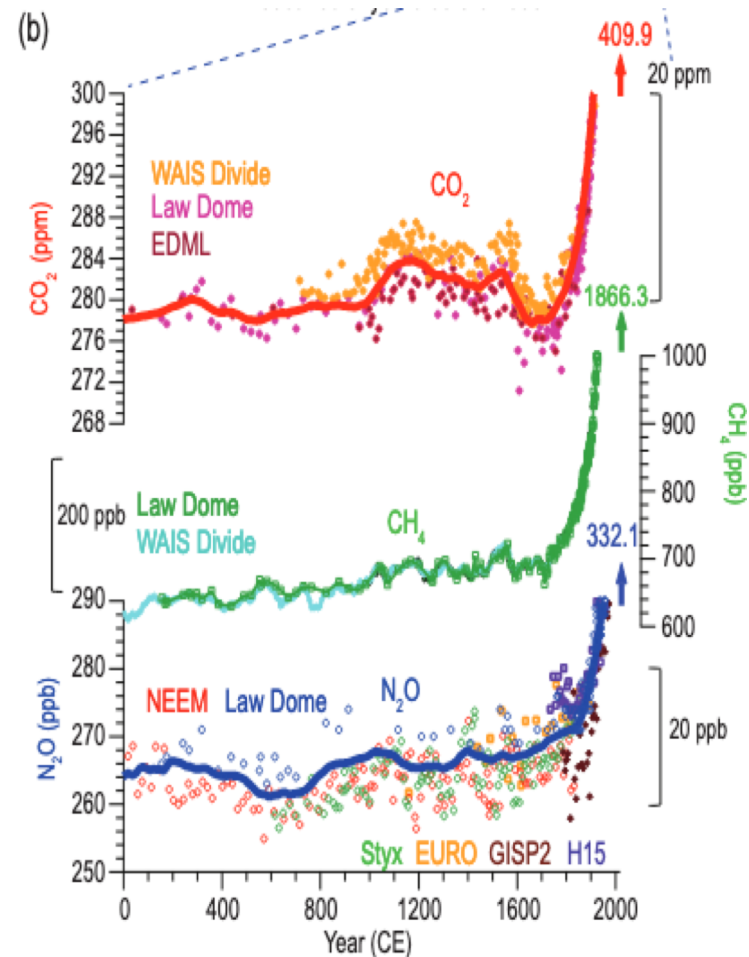


Une augmentation des GES sans équivalent pendant un interglaciaire, depuis l'avènement du quaternaire

IPCC 2001 : « ... L'essentiel du réchauffement mesuré sur les 50 dernières années est lié à l'action de l'homme » (IPCC, 2001).

IPCC 2013 : « Le réchauffement climatique est lié à l'action de l'homme avec une probabilité de 95% »

IPCC 2022 : “ Il est incontestable que les activités humaines sont à l'origine du changement climatique, qui rend les phénomènes climatiques extrêmes, notamment les vagues de chaleur, les fortes précipitations et les sécheresses, plus fréquents et plus graves” .



Source : IPCC

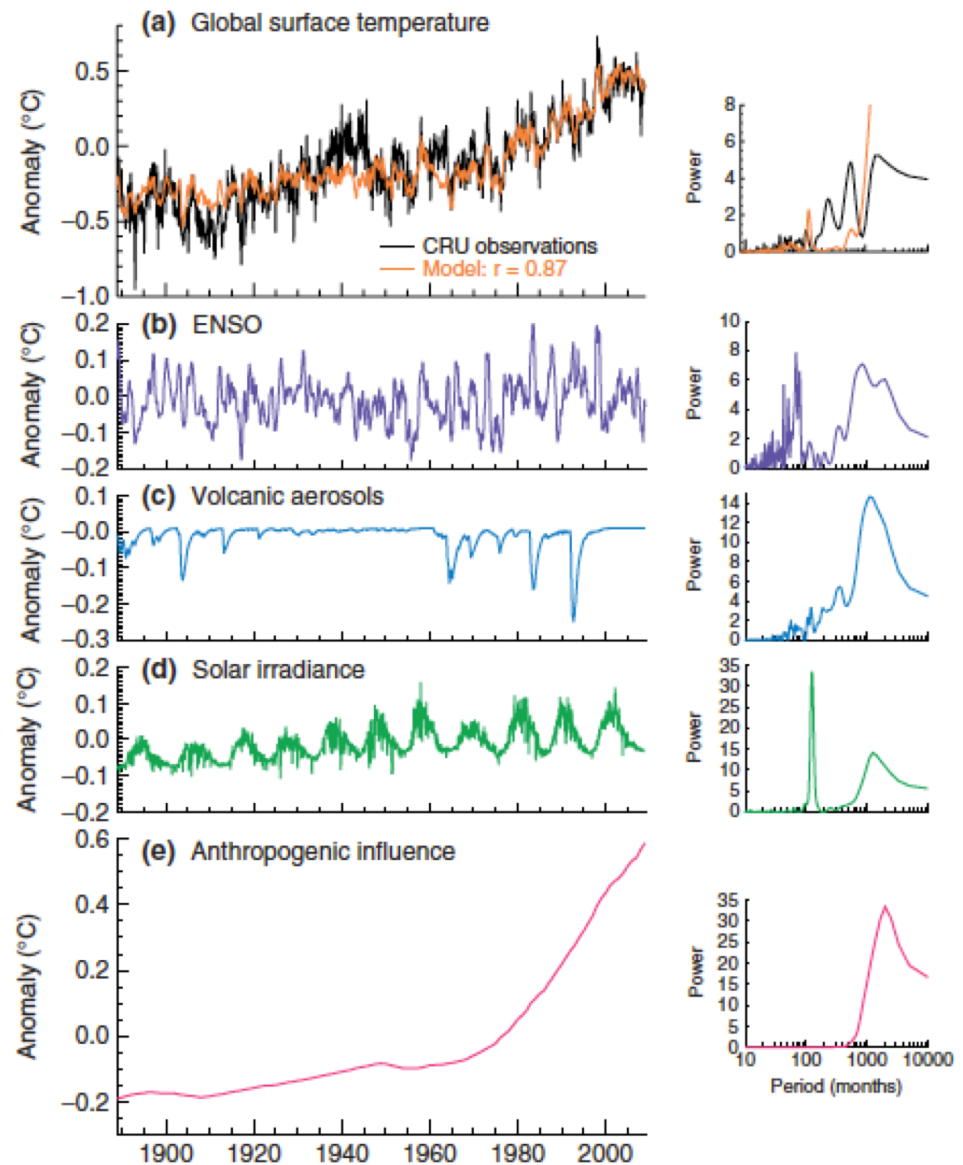
4^e temps : le temps de l'anthropocène

Affectation du changement climatique

Modèle empirique à partir d'observations

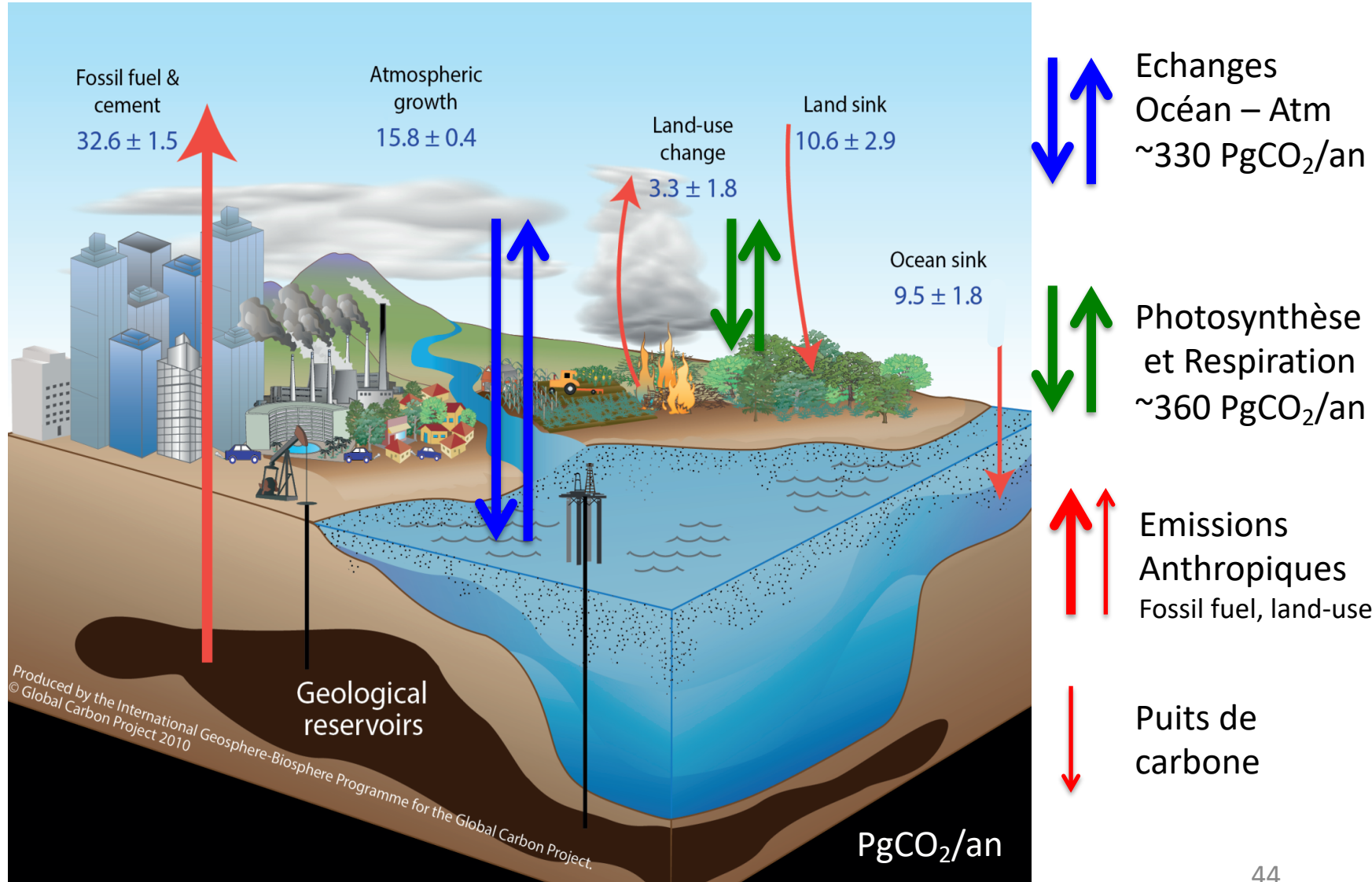
FIGURE 6 | Compared with the CRU monthly mean global temperature time series (hadcrut3vcgl) in (a) is an empirical mean global temperature time series (hadcrut3vcgl) is an empirical model obtained from multiple regression for the period from 1889 to 2008, inclusive.²² The value of r is the correlation coefficient for the global temperature observations and empirical model.

Reconstructions of the contributions to the monthly mean global surface temperatures by individual (b) ENSO, (c) volcanic, (d) solar, and (d) anthropogenic influences (at appropriate lags) are also shown. The periodograms on the right illustrate cycles present in the monthly mean values of each of the four sources of global temperature variance.



4^e temps : le temps de l'anthropocène

Cycle du CO₂ actuel



4^e temps : le temps de l'anthropocène

- Des activités humaines variées, émettant de nombreux composés dans les milieux (eaux, air, sols) avec des temps de résidence très variés et de nombreuses conséquences

Pollution de l'air

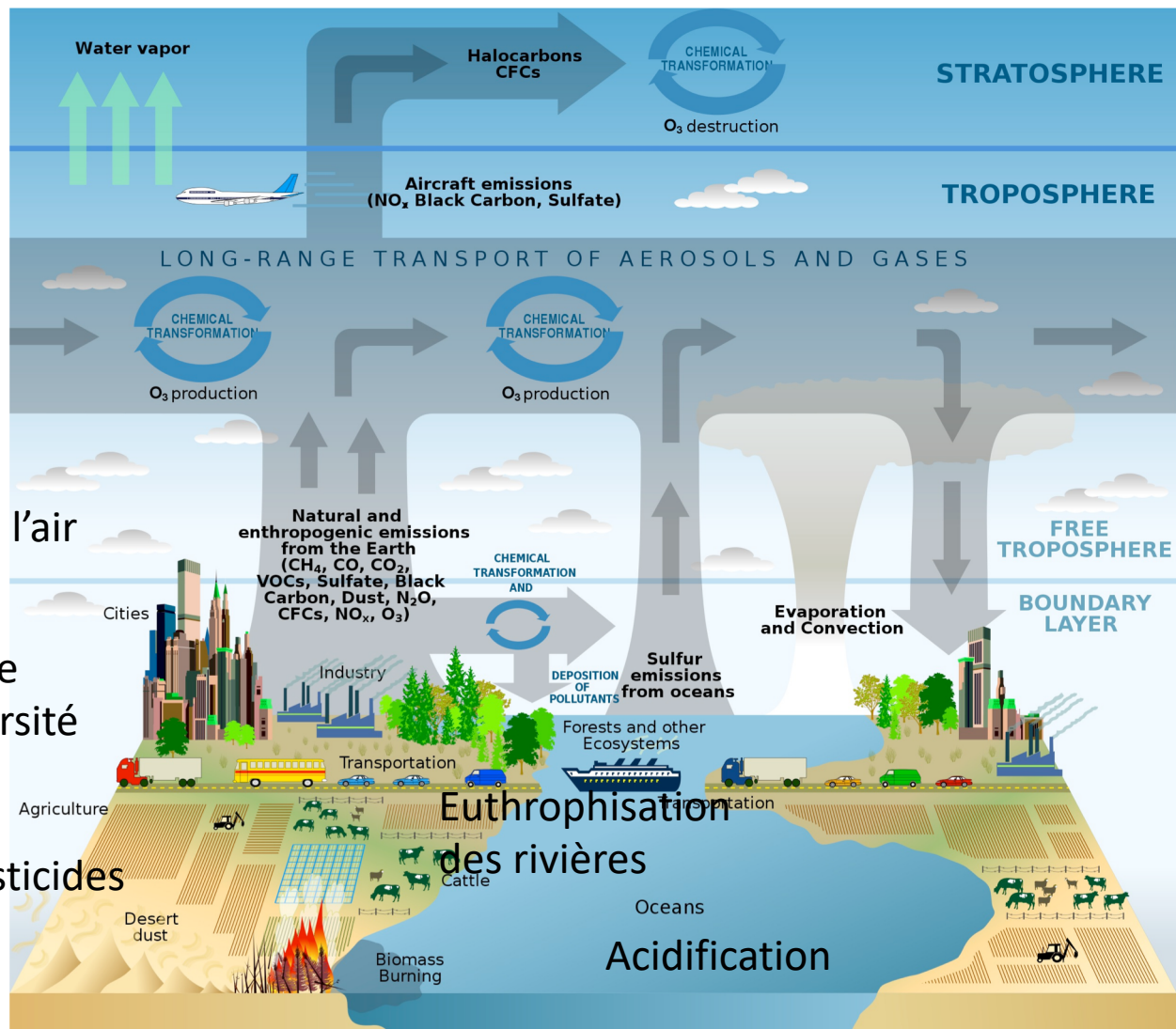
Perte de biodiversité

Pesticides

Euthrophisation des rivières

Ressources halieutiques

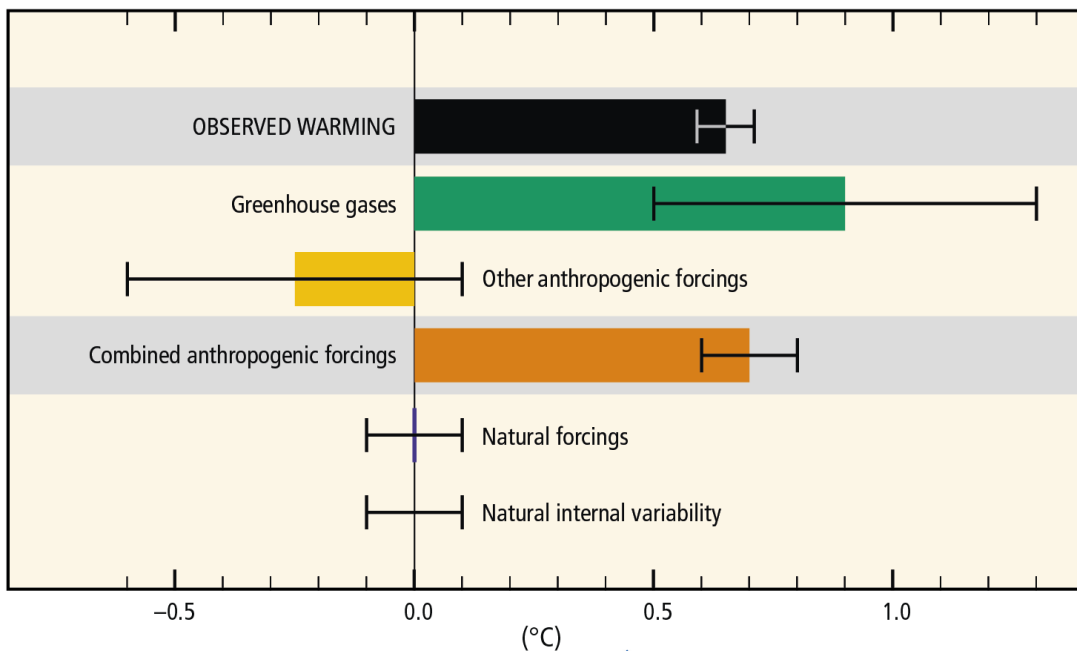
Plastiques



4^e temps : le temps de l'anthropocène

Changements climatiques réalisés et à venir

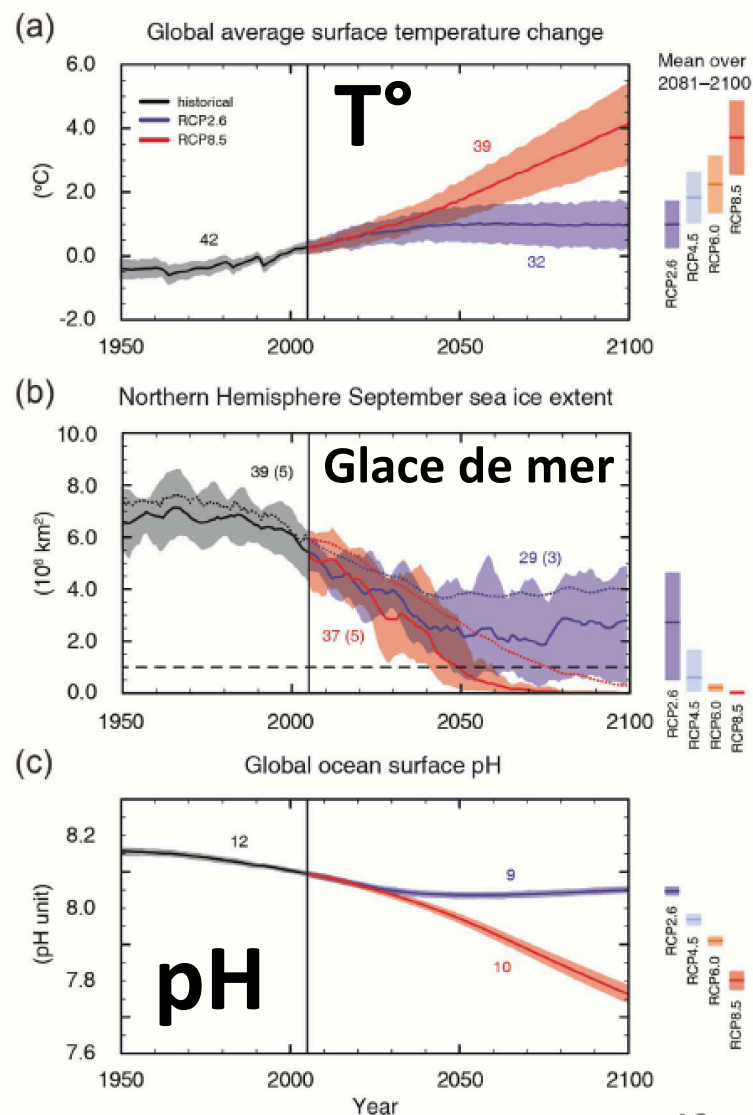
Contributions to observed surface temperature change over the period 1951–2010



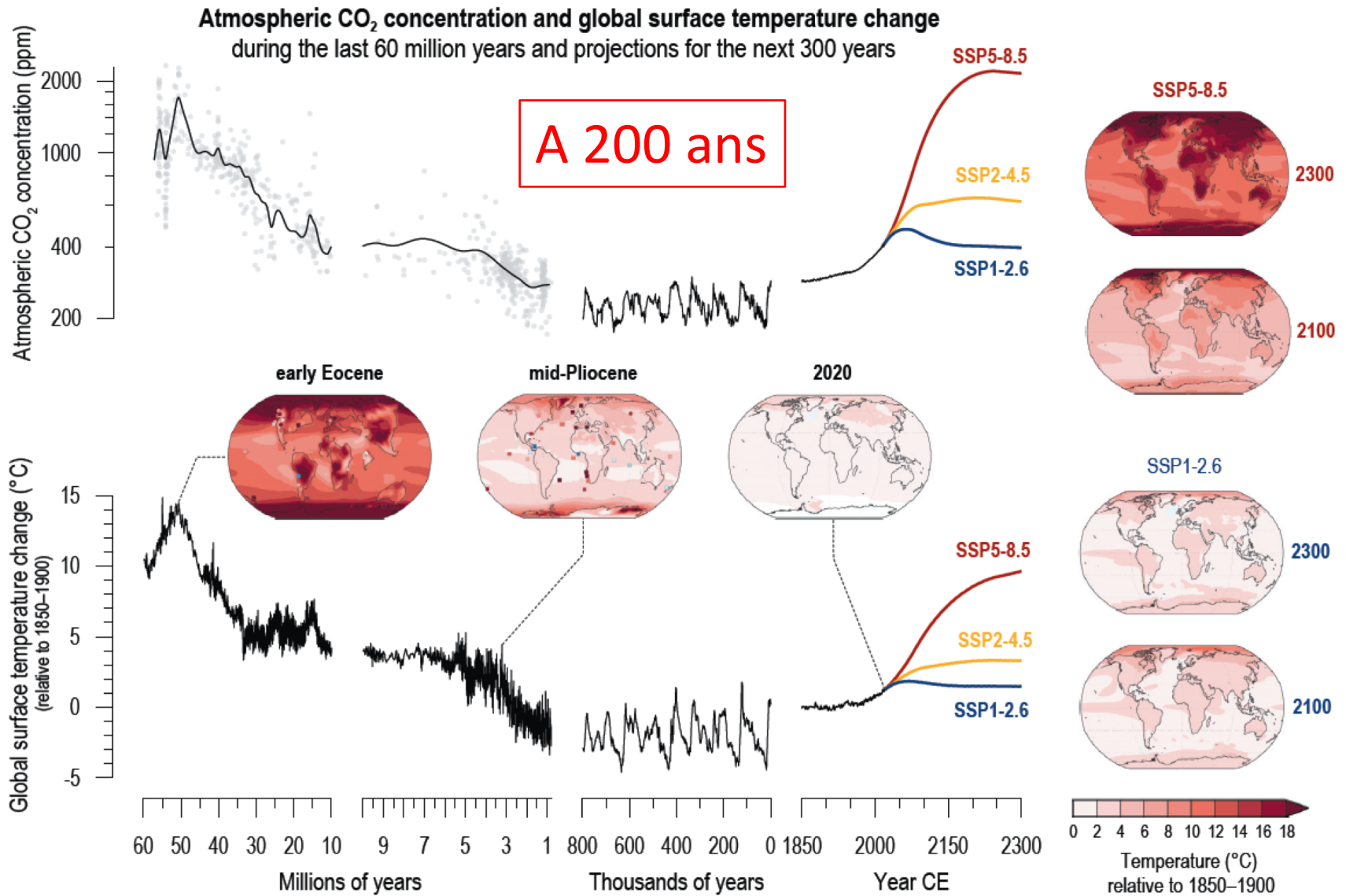
Réalisé depuis 1951



Projeté jusqu'à 2100



4^e temps : le temps de l'anthropocène



4^e temps : le temps de l'anthropocène

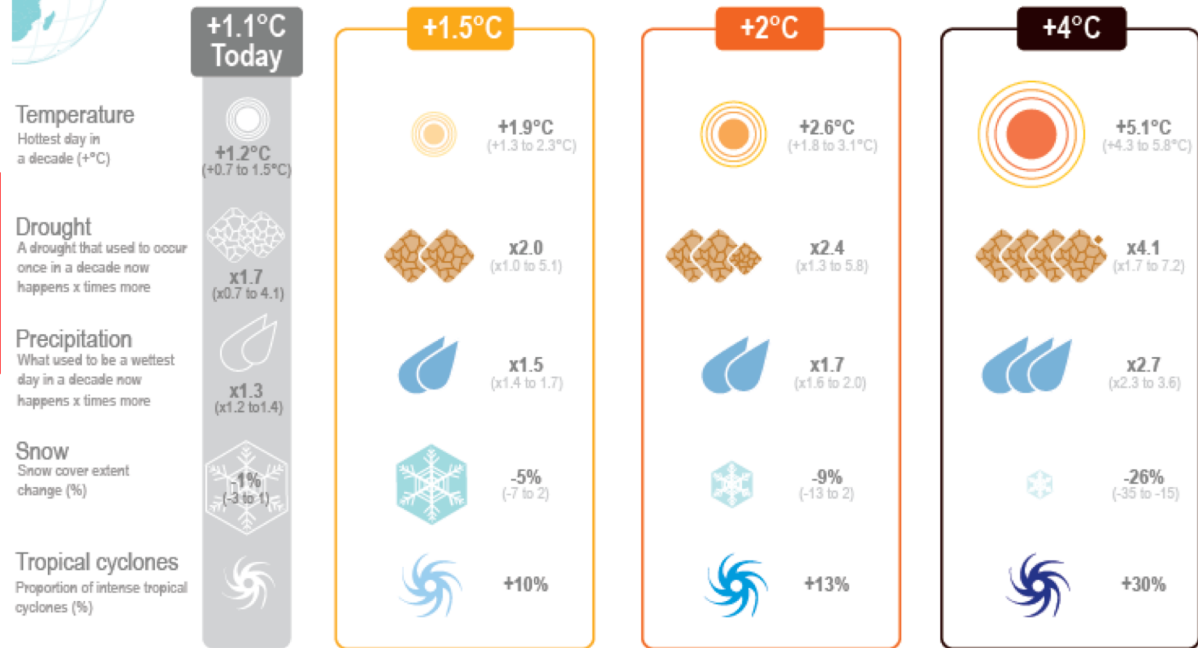
Impacts en fonction du réchauffement



Response of the climate system relative to 1850–1900

Many aspects of the climate system react quickly to temperature changes.

At progressively higher levels of global warming there are greater consequences (min/max range shown).

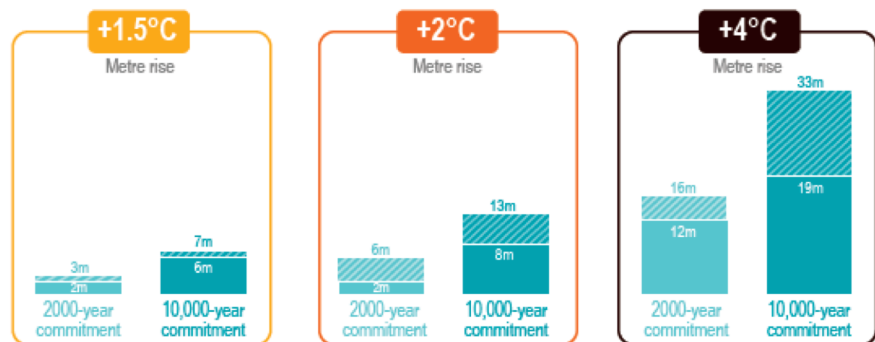


A 2000 ans

Long-term consequences: Sea level rise

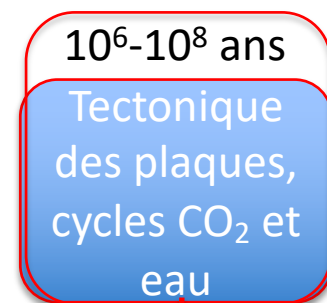
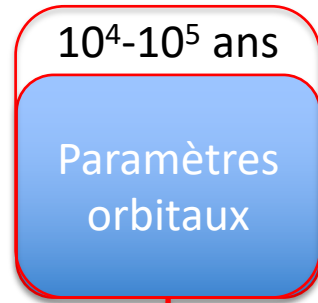
Today, sea level has already increased by 20 cm and will increase an additional 30 cm to 1 m or more by 2100, depending on future emissions.

Sea level reacts very slowly to global warming so, once started, the rise continues for thousands of years.



Source : IPCC, TS WGI 2022

Et après ?



Prochains siècles

Montée des eaux (mètres)
Poursuite hausse température
Possibilité rétroactions positives
Possibilité d'irréversibilité

Prochains 100kan

- Possibilité de perte des calottes Groendland et Antarctique ouest
- Possibilité de sauter une ou plusieurs glaciations
- Reprise probable ensuite des cycles

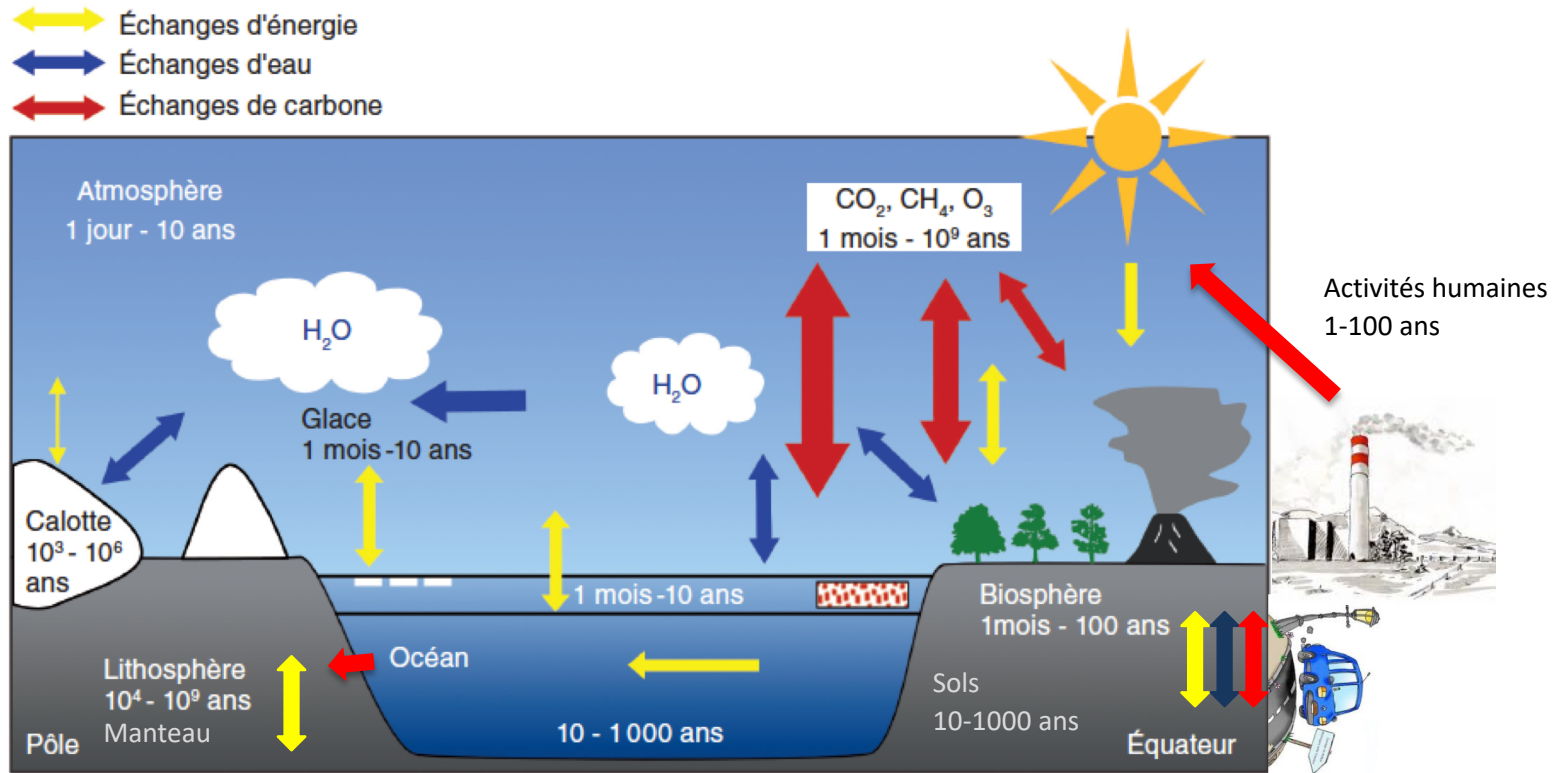
Dizaines de millions à milliards d'année

- Diminution du CO₂ (↗ érosion, ↘ volcanisme)
- Arrêt de la photosynthèse (10 - 150 ppm ?)
- Suite de la montée en puissance du Soleil (centaines de degrés en surface à terme)
- Perte de l'eau (super effet de serre ?)
- Arrêt de la tectonique
- Possible destruction de la planète ou planète « morte » sans eau

PLAN

1. Présentation du système Terre (milieux, forçages, rétroactions)
2. Les quatre temps de la valse terrestre
3. **Processus de transport et transfert**

Echanges et constante de temps du système Terre



- Une grande variété de constantes de temps, du jour au milliard d'années
- **Comment sont transportés matière et énergie ?**

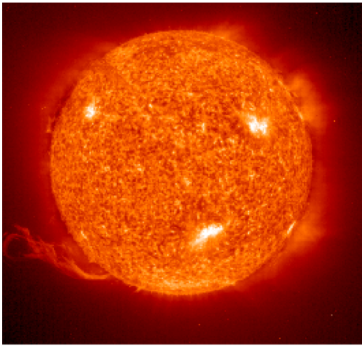
Processus de transport et de transfert

- La Terre est un système en recherche permanente de son équilibre énergétique et dynamique
- Les redistributions d'énergies nécessaires à la recherche de l'équilibre induisent des mouvements permanents ou temporaires, pouvant parfois être violents
- Pour comprendre le système Terre, il faut étudier de plus près les processus de transport et de transfert à l'oeuvre



En 2018, le cyclone tropical Florence, vu depuis la *Station spatiale internationale*

Différents processus de transfert et transport



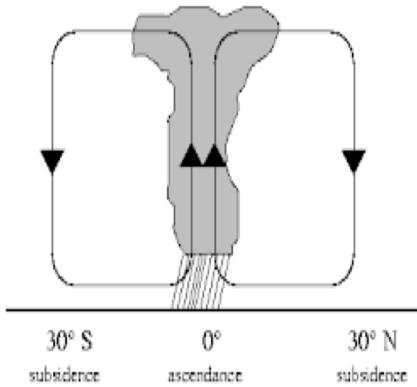
Rayonnement

Advection

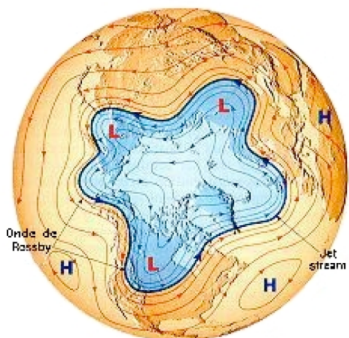


Convection

Diffusion



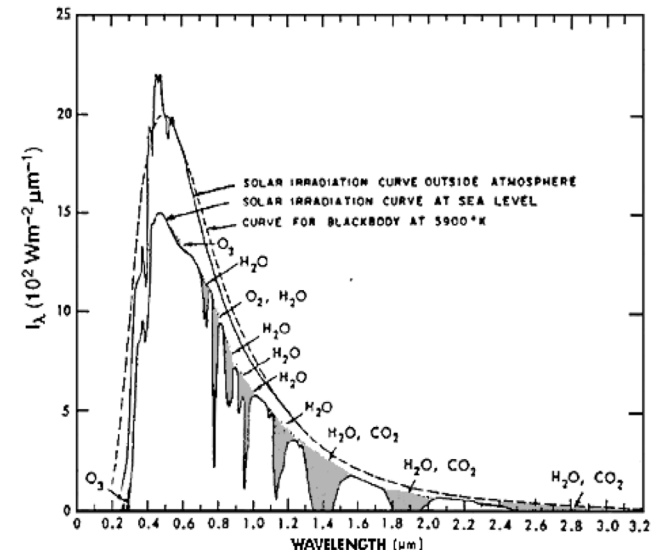
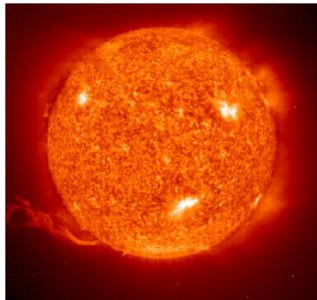
Ondes



Différents processus de transfert et transport

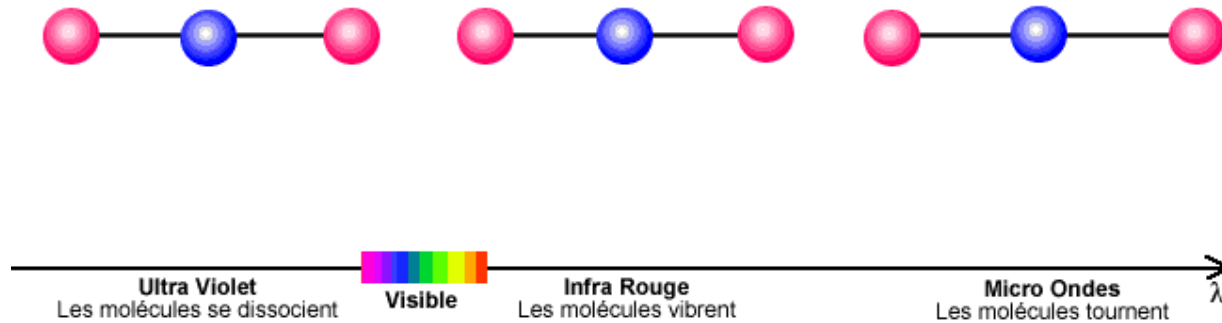
Rayonnement

- L'absorption/émission de photons est un processus de transfert d'énergie
- Une molécule possède des niveaux énergétiques discrets ou quantifiés associés à des états de rotation (micro-onde), de vibration (IR-visible) ou de configuration électronique (UV). Un photon peut être absorbé lorsque son énergie ($E=h\nu=hc/\lambda$) correspond à une transition entre deux niveaux.
- Tout corps à une température T rayonne de l'énergie (émission de photons). Pour le soleil, ce rayonnement est centré sur la partie visible du spectre électromagnétique ($0.55 \mu\text{m}$). Pour la Terre, ce rayonnement est centré dans l'infra rouge ($10 \mu\text{m}$).



Spectre d'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère

Absorption/émission de photons dans l'atmosphère



Photons “énergétiques”. Les molécules sont dissociées. Essentiellement dans l'UV. Processus de recombinaison

Moins énergétiques: Vibration ou rotation des molécules. Dans le visible ou l'IR.

Les molécules possèdent des niveaux d'énergie discrets. Le passage d'un niveau à un autre correspond à une énergie donnée, donc à une longueur d'onde donnée $E = h\nu = hc/\lambda$

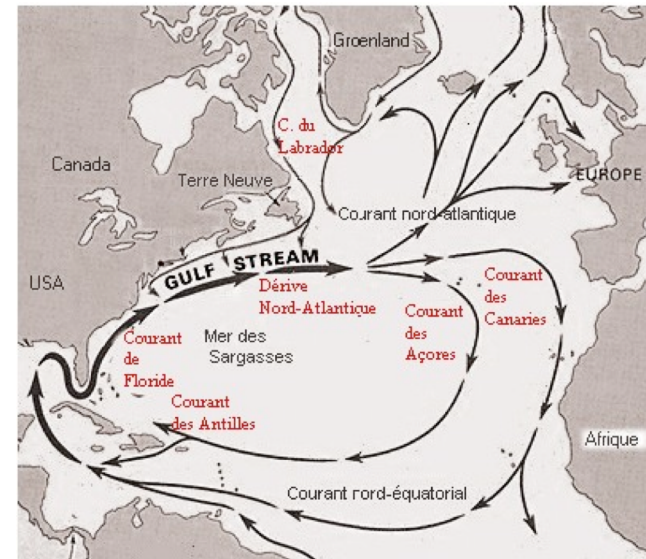
Différents processus de transfert et transport

Advection

- Transport d'une quantité scalaire (ex : T, Conc., chaleur) ou vectorielle (ex : qté de mvt) par un champs vectoriel (ex : vitesse).
- Dans l'atmosphère ou l'océan, on parle d'advection pour le transport horizontal de certaines propriétés du fluide, comme le transport par le vent ou les courants : advection de vapeur d'eau, de chaleur, de salinité, *etc.*



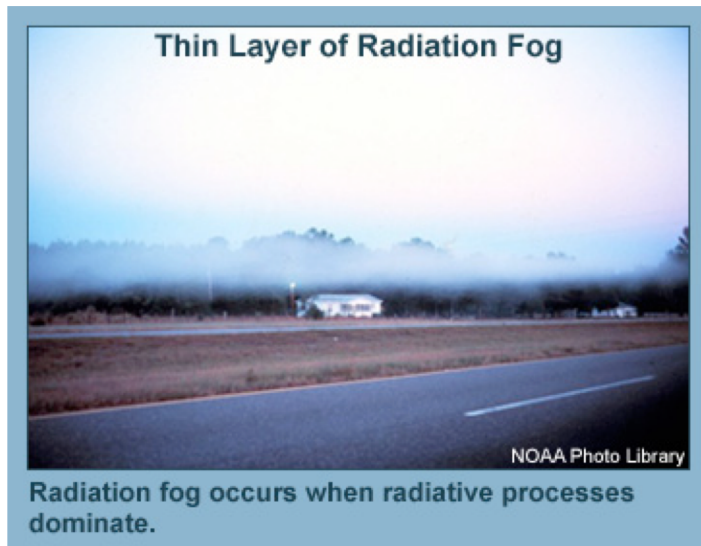
© 2007 Thomson Higher Education



Rayonnement versus advection : deux formes de brouillard

Brouillard radiatif

- Refroidissement d'une masse humide près de la surface par rayonnement infra-rouge
- Généralement < 24h
- Plutôt fin de nuit / petit matin



Brouillard advectif

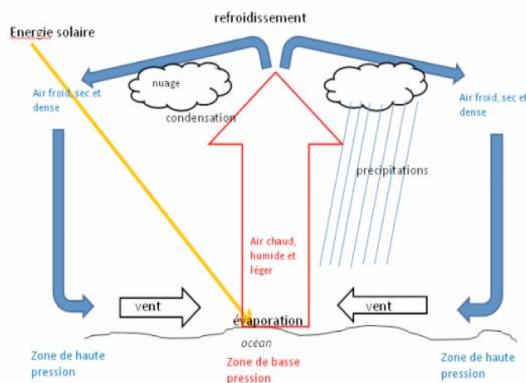
- Advection d'une masse plus chaude et humide sur un terrain plus froid
- Peut durer plusieurs jours
- Peut se produire à tout moment mais souvent fin de journée / début de nuit



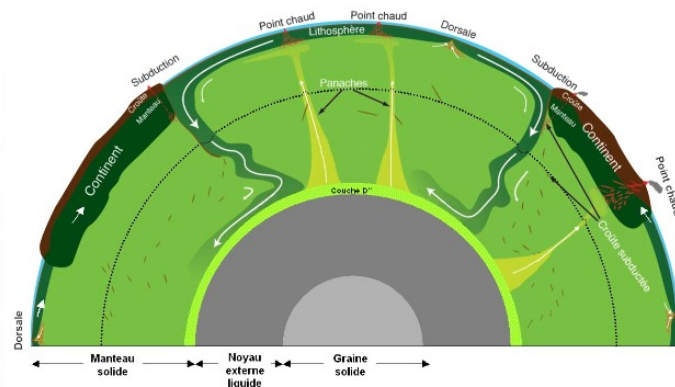
Différents processus de transfert et transport

Convection

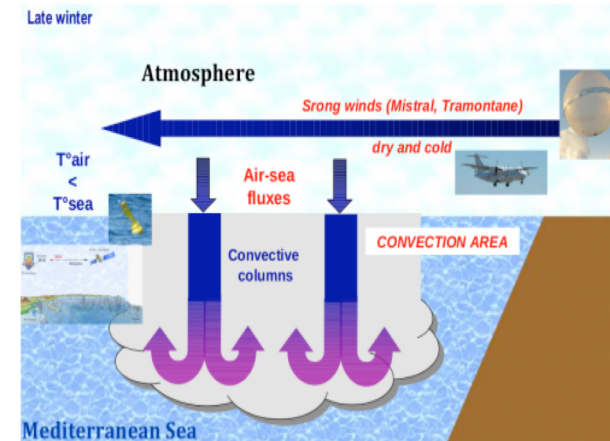
- Transport de chaleur et de masse résultant d'une instabilité gravitaire causée par un changement de densité à l'intérieur d'un système déformable
- Convection libre : un gradient (température, concentration, salinité) induit un changement de masse volumique provoquant un mouvement via la poussée d'Archimède à laquelle s'oppose le poids et/ou la viscosité (selon milieu).
- Convection forcée : provoquée par la circulation artificielle (pompe, turbine) d'un fluide (ex : chauffage soufflant)



Atmosphère



Manteau (modèle)

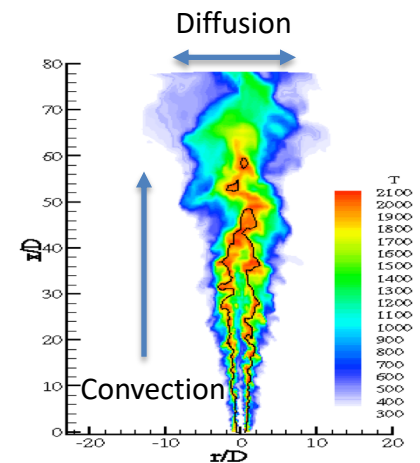


Océans

Différents processus de transfert et transport

Diffusion

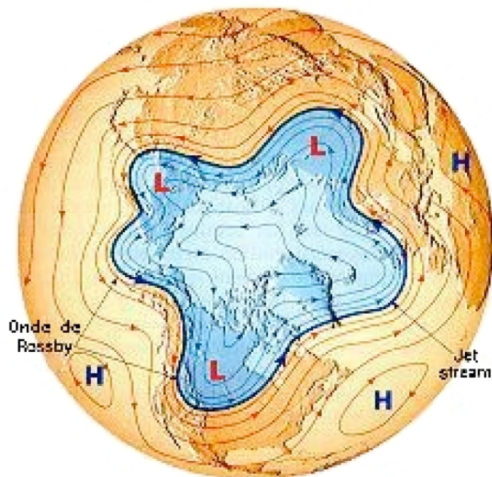
- Tendence naturelle et irréversible d'un système à homogénéiser les gradients (température, concentration, vitesse)
- Diffusion de matière : Sous l'effet de l'agitation thermique, les constituants se déplacent des zones de forte concentration vers celles de faible concentration.
- Diffusion thermique : transfert de chaleur par vibration de la matière de proche en proche, sans transport appréciable de matière. On parle aussi de conduction thermique.



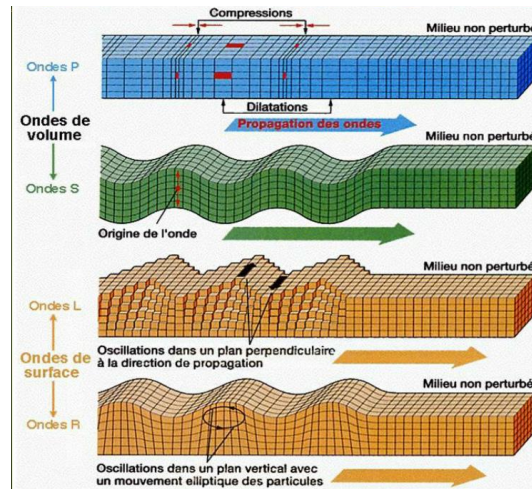
Différents processus de transfert et transport

Ondes

- Phénomène de propagation ordonnée d'énergie, sans transport de matière.
- Repose sur un mécanisme de rappel vers la position d'équilibre (ex : poussée d'Archimède/gravité, variations de la force de Coriolis)
- Provoque une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu
- Solution périodique des lois de conservation linéarisées autour d'un état moyen



Ondes de Rossby (inertielles)



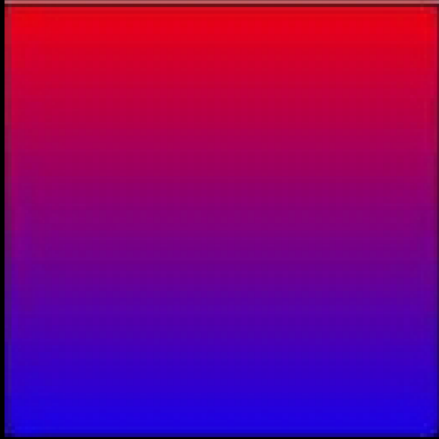
Ondes sismiques



Houle (onde de gravité)⁶⁰

Oscillations versus instabilités

Chaud (peu dense)



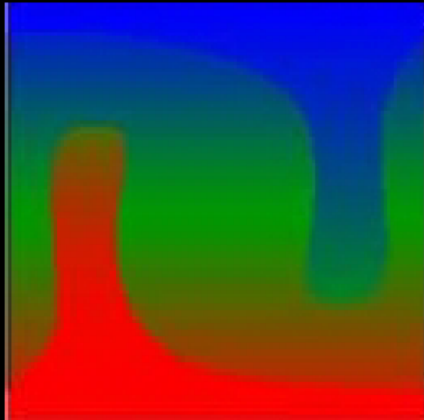
Photographie : Pierre Thomas

Froid (dense)

Situation stable :

- le chaud peu dense surmonte le froid plus dense.
- Un petit mouvement engendrera un retour à l'équilibre via des oscillations amorties (ondes)

Froid (dense)



Attention, toutes les causes de gradient de densité inverse peuvent provoquer de la convection



Chaleur, salinité, T° , ...

Situation instable :

- le chaud peu dense est en dessous du froid plus dense.
- Un petit mouvement entrainera une instabilité convective, avec selon le milieu, de la turbulence

Chaud (peu dense)



Photographie : Pierre Thomas

La suite ...

- **Comment s'expriment les processus de transport ?**
- Comment savoir quels processus sont dominants dans les différents milieux du système Terre ?

Lois de conservation

S'appliquent dans les différents milieux

Masse



**Equation
d'advection-diffusion**



**Quantité
de mouvement**



**Equation
de Navier-Stokes**

Energie

Energie
thermique



Equation de la chaleur

Energie
cinétique



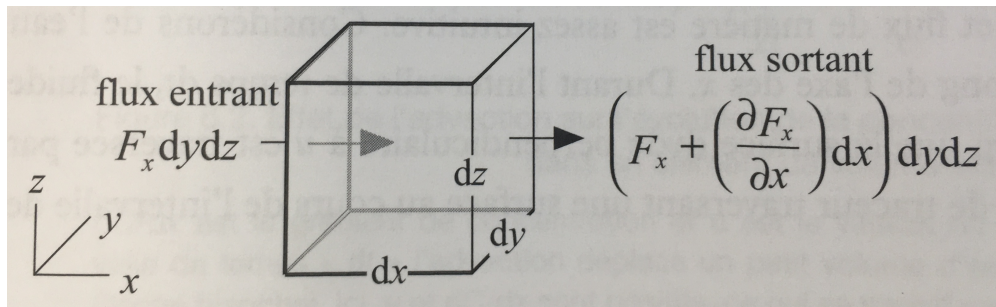
Lois de Bernoulli

Opérateurs algébriques

- **Gradient** : $\overrightarrow{\text{grad}} f$ ou $\vec{\nabla} f$
 - Vecteur indiquant la façon dont une grandeur physique f varie dans les trois dimensions de l'espace
 - En coordonnées cartésiennes :
$$\vec{\nabla} f = \begin{pmatrix} \partial f / \partial x \\ \partial f / \partial y \\ \partial f / \partial z \end{pmatrix}$$
- **Divergence** : $\text{div}(\vec{F})$ ou $\nabla \cdot \vec{F}$
 - scalaire indiquant la déformation d'un champ de vecteur
 - Un champ à divergence nulle conserve le volume
 - En coordonnées cartésiennes : $\nabla \cdot \vec{F} = \partial F_x / \partial x + \partial F_y / \partial y + \partial F_z / \partial z$
- **Laplacien** : $\Delta f = \vec{\nabla}^2 f = \nabla \cdot (\vec{\nabla} f) = \text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} f)$
 - C'est la divergence du gradient d'un scalaire f .
 - Le laplacien mesure la différence entre la valeur de f en un point quelconque et la valeur moyenne autour de ce point
 - C'est la courbure moyenne locale de f (fait intervenir les dérivées secondes)

Notations & unités

- Masse molaire : M en kg/mol
- Concentration : C en kg/m³
- Flux : F en kg/m²/s
- Source : s en kg/m³/s
- Puits : p en kg/m³/s
- Particule fluide : Volume qui est :
 - Suffisamment grand pour que les propriétés sont insensibles aux fluctuations moléculaires
 - Suffisamment petit pour être insensible aux fluctuations macroscopiques
- Pour un flux de matière unidirectionnel F_x au travers d'un petit volume $dV = dx.dy.dz$ (*grand nombre de particule fluides*) on montre que :



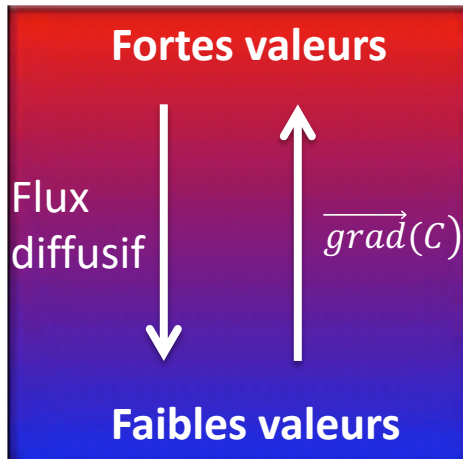
$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F_x}{\partial x} + s - p$$

Conservation de la masse

- Pour la concentration d'une espèce en trois dimensions : $\frac{\partial C}{\partial t} = -div(\vec{F}) + s - p$
- $div(\vec{F})$ est la divergence du flux de masse de l'espèce étudiée. Elle se décompose en deux termes : la partie advection et la partie diffusion :

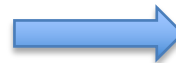
- On peut alors écrire :

$$\vec{F} = -K \overrightarrow{grad}(C) + C \vec{v}$$



Flux diffusif =
- moléculaire
- turbulent

Flux advectif



Cours Advection diffusion

- Et donc : $\frac{\partial C}{\partial t} = -div(-K \overrightarrow{grad}(C) + C \vec{v}) + s - p$

Equation d'advection diffusion ou conservation de la masse

Conservation de la masse

- Pour un fluide incompressible ($div(\vec{v})=0$) et une diffusion isotrope et constante (K), on obtient :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}(C) = K \vec{\nabla}^2 C + s - p$$

- avec $\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}(C)$ dérivée particulière (tenant compte des changements dues aux changements de concentrations dans le champs de vitesse)
- Sans écoulement ($\vec{v} = \vec{0}$), ni réactivité ($s=p=0$), on obtient la **seconde loi de FICK** avec seulement la diffusion :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \vec{\nabla}^2 C = K \Delta C$$

$$\vec{\nabla}^2 () = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} () = \Delta ()$$

Laplacien

- Le champs de concentration doit satisfaire à l'équation de d'advection-diffusion et aux conditions aux limites.

- De la même façon pour l'énergie $\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T$ et pour la qté de mouvement $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \nu \Delta \vec{v}$

- Cas particulier des milieux poreux : il faut modifier l'équation pour tenir compte de la porosité et de la densité de la fraction mobile

Diffusion : Bilan sur les coefficients de diffusion

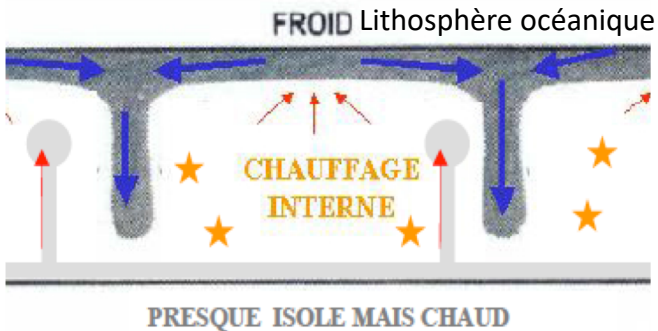
- On peut construire un bilan des phénomènes de diffusion pour les trois grandeurs des lois de conservation : masse, énergie, quantité de mouvement :

	Masse	Energie	Qté de mvt
Grandeur X	C	T	\vec{v}
Coefficient (m ² /s)	Diffusivité moléculaire	Diffusivité thermique	Viscosité dynamique
Symbole	K	κ	ν
Eau	10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶
Air	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁵	1.4x10 ⁻⁵
Magma	10 ⁻¹³ – 10 ⁻¹⁰	2x10 ⁻⁶	10 ² - 10 ⁴
Manteau	10 ⁻¹³ – 10 ⁻¹⁰	2x10 ⁻⁶	10 ¹⁹
$\partial X / \partial t$	$K \Delta C$	$\kappa \Delta T$	$\nu \Delta \vec{v}$

- Gros écart entre les milieux pour la viscosité (25 ordres de grandeurs)
- La diffusion moléculaire reste faible sauf dans l'air où cependant la turbulence peut engendrer une diffusion beaucoup plus efficace que la diffusion moléculaire.

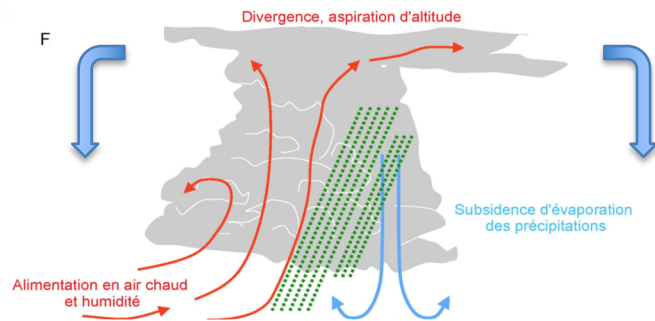
Convection : Régimes selon le milieu

La convection est favorisée par une instabilité gravitaire provoquant la dilatation du milieu



Manteau terrestre (refroidit par le haut)

- Subsidences froides motrices
- Alimentées par la lithosphère océanique (source froide)
- Chauffage interne dans le manteau (points chauds)
- Remontées passives (compensatoires) et actives (points chauds, limite manteau/noyau)

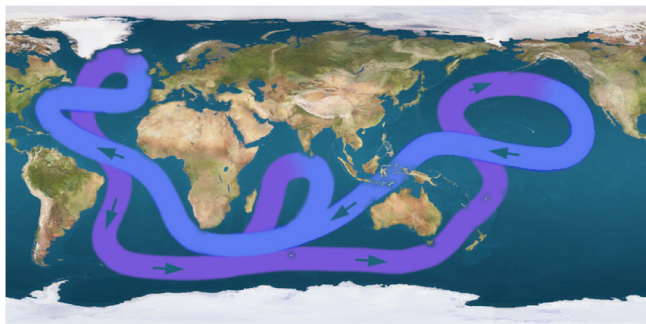


Atmosphère (chauffée par le bas)

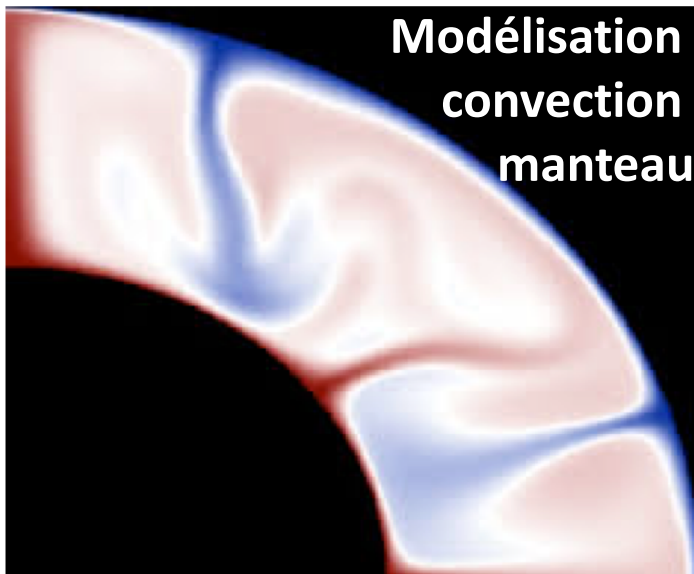
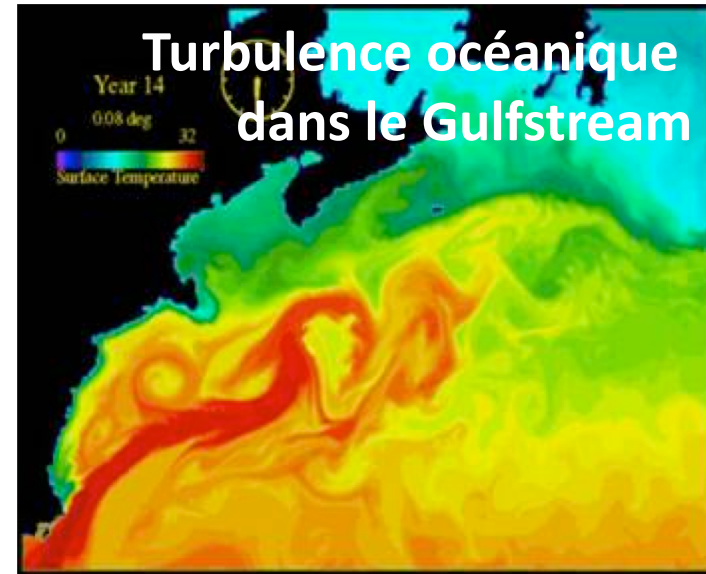
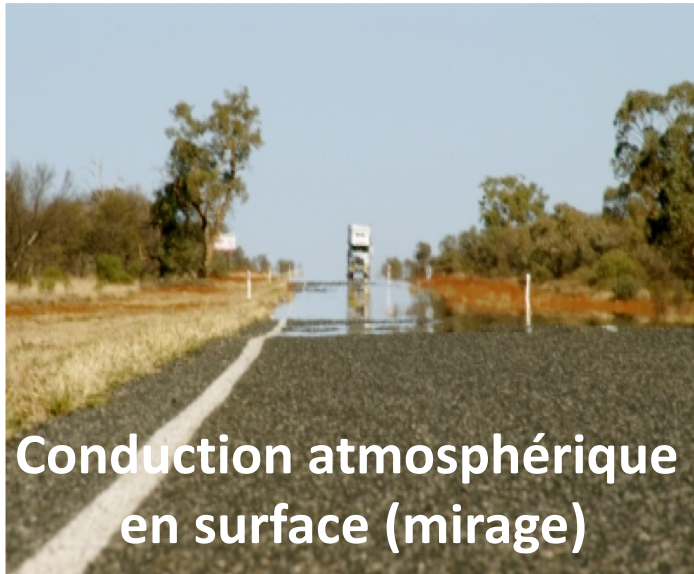
- Ascendances chaudes motrices
- Alimentées par les gradients de température et d'humidité en surface (source chaude)
- La condensation de l'eau renforce les ascendances
- Subsidences froides passives (compensatoires) et actives (précipitantes)

Océan (chauffé par le haut)

- Intrinsèquement stable verticalement
- Vents, gradients de densité (dépendant de T et salinité), continents, et force de Coriolis provoquent la création de courants marins horizontaux et verticaux convectifs



Images de diffusion / convection



Bilan de quantité de mouvement : Forces en présence

Force de pesanteur : combinaison de la force d'attraction terrestre et de la force d'inertie centrifuge, correspond au poids

$$\frac{\vec{P}}{m} = \frac{\vec{F}_g}{m} - \vec{\Omega} \wedge \vec{u}_e = \vec{g}$$

(\mathbf{g} dépend de l'altitude de la parcelle fluide considérée)

Force de pression : bilan des forces de pression appliquées à un élément de volume

$$\frac{\vec{F}_P}{m} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P$$

Force de viscosité : force s'opposant à la vitesse, liée à la viscosité du fluide. Souvent négligées pour l'air et l'eau, sauf dans les couches limites

$$\frac{\vec{F}_v}{m} = \nu \Delta \vec{v}$$

Force de Coriolis : pseudo-force dont l'existence est due à la rotation du référentiel; elle n'existe que lorsque la parcelle fluide est en mouvement. **Elle est toujours perpendiculaire à la vitesse, à sa droite dans l'hémisphère nord et à sa gauche dans l'hémisphère sud.**

$$\frac{\vec{F}_c}{m} = -2\vec{\Omega} \wedge \vec{u}$$



La suite ...


- Comment s'expriment les processus de transport ?
- **Comment savoir quels processus sont dominants dans les différents milieux du système Terre ?**

Nombres sans dimension : Principe général

- Pour comparer deux processus de transport/transferts on calcule le rapport entre leurs expressions dans les équations de conservation (masse, qté de mvt, énergie)
- On écrit donc des nombre sans dimension dont la valeur donne l'importance relative des deux processus
- Pour calculer ces nombres on se donne des ordres de grandeurs caractéristiques des phénomènes étudiés et du milieu:

- Longueur caractéristique L
- Vitesse caractéristique U
- Temps caractéristique $\tau=L/U$

- Pour les opérateurs classiques cela donne :


$$\begin{aligned} \textit{Gradient} (\vec{\nabla}) &\text{ ---> } \frac{1}{L} \\ \textit{Divergence} (\vec{\nabla} \cdot) &\text{ ---> } \frac{1}{L} \\ \textit{Laplacien} (\Delta) &\text{ ---> } \frac{1}{L^2} \end{aligned}$$

- On applique cette approche pour les différents processus deux à deux

Exemple conservation de la masse : Advection de la masse versus diffusion de masse

Nombre de PECLET

- Pour comparer l'advection et la diffusion de masse, on utilise le nombre sans dimension appelé **nombre de PECLET massique** pour un composé de concentration ρ_a :

$$Pe_M = \frac{\text{Flux advectif}}{\text{Flux diffusif}} = \left| \frac{\rho_a \vec{v}}{D \cdot \vec{\nabla} \rho_a} \right| \approx \frac{\rho_a U}{D \rho_a / L} = \frac{LU}{D}$$

en se donnant un échelle caractéristique de longueur L et de vitesse U.

- Exemples : Dans l'atmosphère pour les mouvements verticaux de l'air aux moyennes latitudes dans la couche limite atmosphérique via de petits tourbillons (L=20m, U=1m/s)
 - Pour la **diffusion moléculaire** : $D=2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ soit $Pe_M = 10^5$
---> Diffusion moléculaire négligeable par rapport à l'advection
 - Pour la **diffusion turbulente dans la couche limite en situation instable** :
 $D=K_z=20 \text{ m}^2/\text{s}$ soit $Pe_M = 1$
---> Rôle important de la diffusion turbulente

Exemple 1 qté de mvt : Advection versus diffusion visqueuse

Nombre de Reynolds

- On forme le rapport entre l'advection de quantité de mouvement et la diffusion visqueuse pour obtenir le **nombre de REYNOLDS** :

$$Re = \frac{\textit{flux advectif}}{\textit{flux diffusif}} = \left| \frac{\vec{v} \cdot \vec{\nabla}(\vec{v})}{\nu \Delta \vec{v}} \right| \approx \frac{U^2 / L}{\nu U / L^2} = \frac{UL}{\nu}$$

- Re représente le rapport entre terme advectif (inertiel) et terme diffusif (viscosité) dans les variations de la quantité de mouvement
- C'est l'équivalent, pour la dispersion de quantité de mouvement, du nombre de Peclet pour la dispersion de masse.
- Pour Re petit ($< \sim 1$)**, les forces visqueuses dominent l'écoulement (basses vitesses, systèmes de petite taille, fluides très visqueux) avec les forces de pression.
- Pour **Re grand ($> \sim 2000$)**, le transport de quantité de mouvement par convection domine. Les écoulements sont moins stables et une transition vers la turbulence est possible (fortes vitesses, systèmes de grande taille, fluides peu visqueux).

Exemple 1 qté de mvt : Advection versus diffusion visqueuse

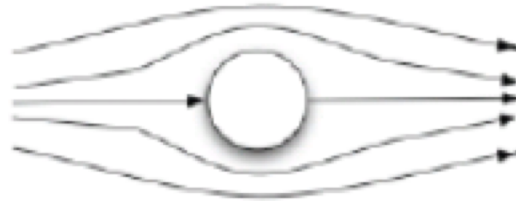
Nombre de Reynolds

- Valeurs :
 - **Vent dans une dépression**: $\nu=1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $L=1000\text{km}$, $U=10 \text{ m/s}$
---> **$Re= 6,7 \times 10^{11}$** – écoulement convectif turbulent.
 - Dans le courant du **Gulf Stream** dans l'océan : $\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $L=100\text{km}$, $U=1 \text{ m/s}$
---> **$Re= 10^{11}$** - écoulement convectif turbulent.
 - Dans un **milieu poreux** : $\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $L=1\text{mm}$, $U=0.1 \text{ mm/s}$
---> **$Re= 10^{-1}$** – écoulement où viscosité et convection peuvent jouer un rôle.
 - **Particule microscopique** se déplaçant dans l'eau de mer : $\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $L=10^{-6} \text{ m}$, $U=10 \text{ } \mu\text{m/s}$ ---> **$Re= 10^{-5}$** – écoulement dominé par la viscosité
 - **Écoulement de lave** : $\nu=10^8 \text{ m}^2/\text{s}$, $L=100\text{m}$, $U= 1 \text{ cm/s}$.
---> **$Re= 10^{-8}$** – écoulement dominé par la viscosité
 - **Écoulement d'un glacier** : $\nu=3.5 \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$, $L=500\text{m}$, $U=100 \text{ m/an}$.
---> **$Re= 4 \times 10^{-14}$** – écoulement largement dominé par la viscosité
 - En **tectonique des plaques** : $\nu=10^{20} \text{ m}^2/\text{s}$, $L=100\text{km}$, $U=10^{-8} \text{ m/s}$ (qq cm/an)
---> **$Re= 10^{-23}$** – écoulement largement dominé par la viscosité.
- Mouvements dans l'atmosphère et les océans souvent dominés par la convection (et la turbulence) par rapport à la viscosité : on néglige alors souvent la viscosité (hypothèse fluides parfaits).
- Par contre, rôle clef de la viscosité pour la Terre interne et les glaciers.

Exemples d'écoulement pour différents Re

$Re \sim 1$

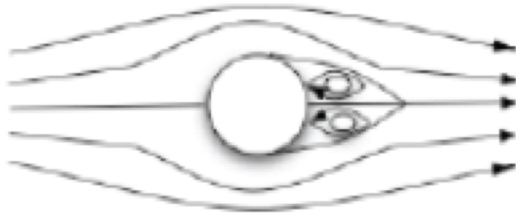
1)



Laminaire

$Re \sim 10$

2)



$Re \sim 10^2$

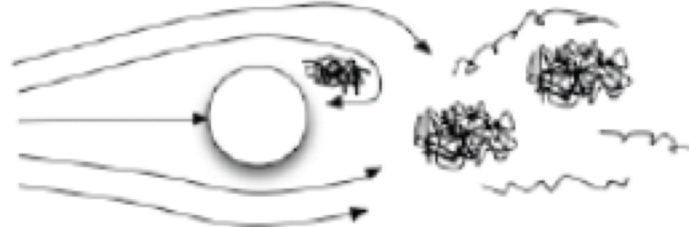
3)



(Allée de
Von Karman)

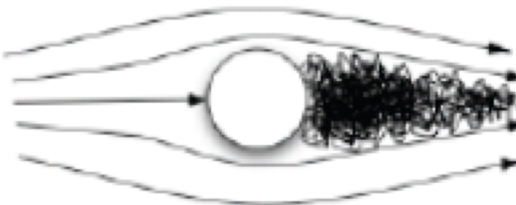
$Re \sim 10^3$

4)



$Re \sim 10^4$

5)



Pleinement
turbulent

Exemples d'écoulement pour $Re \ll 2000$

- **Écoulements laminaires** dans lesquels les particules fluides proches à un instant t le restent les instants suivants.
- Les lignes de courant sont souvent parallèles.
- Transition possible vers la turbulence si le nombre de Reynolds augmente dans l'écoulement (e.g. présence d'obstacles)

Écoulement de glacier



Écoulement de lave



Exemples d'écoulement pour $Re \sim 100$

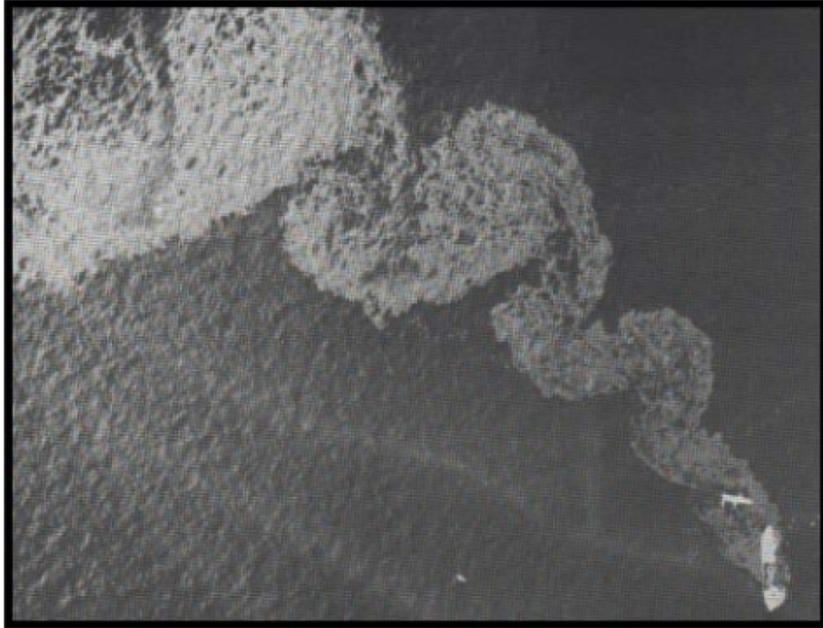
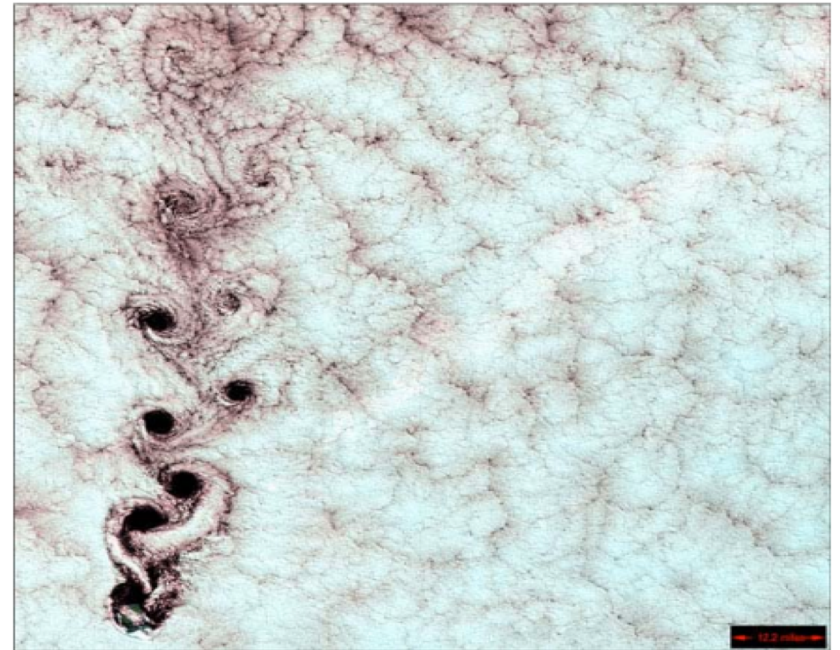


Figure.1 : Sillage derrière un bateau échoué

Allées de Von Karman : Transition entre un écoulement laminaire et turbulent



Karman Vortices

Source :

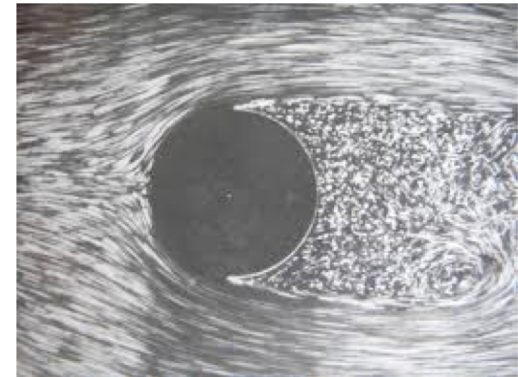
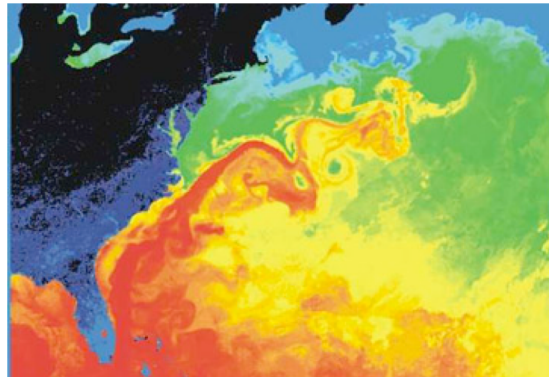
http://www.daniel-huilier.fr/Enseignement/IUFM/Documents_Pedagogiques/TP2_3_Physique/Reynolds_Magique.pdf

Chacun de ces nuages tourbillonnants est le résultat d'un phénomène météorologique connu sous le nom d'allée de Von Karman (ou vortex de Karman). Ces vortex apparaissent ici sur l'île Alexander Selkirk, dans le Pacifique sud. Emergeant abruptement de l'océan, le point culminant de l'île atteint presque 1600 m au-dessus du niveau de la mer. Les nuages s'écoulant autour de cet obstacle forment ces grands remous tourbillonnants

Exemples d'écoulement pour $Re \gg 2000$

- **Écoulement Turbulent** : Etat d'un fluide caractérisé par une imbrication de tourbillons d'échelles différentes, un caractère aléatoire et non prévisible des mouvements, et une dimension mélange importante. Écoulement à fort nombre de Reynolds ($Re \gg 10^3$).
- Cascade d'énergie de Kolmogorov : la division des grands tourbillons en tourbillons plus petits permet le transfert de l'énergie des grandes échelles vers les petites échelles où elle se dissipe par viscosité
- Pour l'atmosphère, la transition vers la turbulence est mieux représentée par le nombre de Richardson qui contrairement au nombre de Reynolds tient compte du changement de masse volumique du fluide. Un nombre de $Ri < 1$ indique un écoulement turbulent

$$Ri = \frac{\text{énergie potentielle}}{\text{énergie cinétique}} = \frac{\Delta\rho gL}{\rho_0 U^2} = \frac{\rho_0 \beta \Delta T gL}{\rho_0 U^2} = \frac{\beta \Delta T gL}{U^2}$$



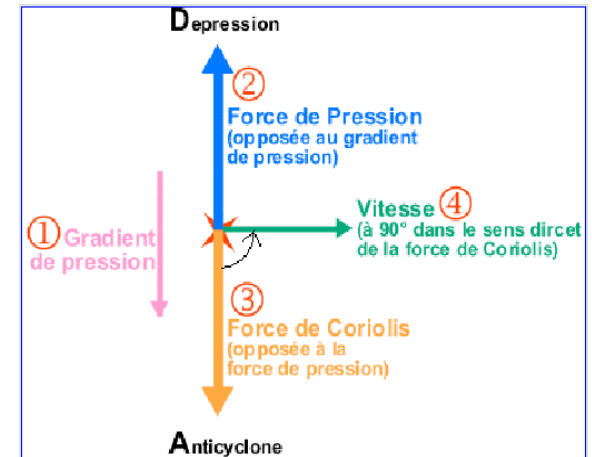
Exemple 2 qté de mvt : Advection de qté de mvt versus Coriolis

Nombre de Rossby

- Sur Terre, la rotation de la planète à la vitesse Ω (7.5×10^{-5} rd/s) fait apparaître une force quand on exprime l'équation de la quantité de mouvement dans le repère géocentré. C'est la force de Coriolis qui agit perpendiculairement au déplacement du fluide :

$$\frac{\vec{F}_c}{m} = -2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}$$

- C'est une force inertielle qui n'existe que parce que l'observateur se trouve dans le référentiel géocentré en rotation (non galiléen). Elle provoque la déviation des masses d'air vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.



- On introduit le **nombre de Rossby** :
($f=2\Omega \sin \phi$, facteur de Coriolis, ϕ latitude)

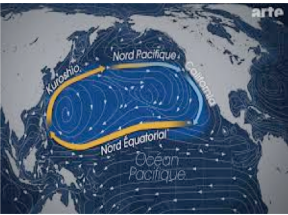
$$Ro = \left| \frac{(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}}{2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}} \right| \approx \frac{U^2 / L}{fU} = \frac{U}{fL}$$

- Traduit le rapport entre l'accélération inertielle et Coriolis.
- Un faible nombre de Rossby traduit une forte influence de la rotation de la Terre sur l'écoulement.

Exemple 2 qté de mvt : Advection de qté de mvt versus Coriolis

Nombre de Rossby

Exemples valeur de nombres de Rossby : $Ro = \frac{U}{fL}$



- **Gyres océaniques** : $U=1\text{m.s}^{-1}$, $L=3000\text{km}$, $f=2 \times 7.3 \times 10^{-5} \times \sin(20) \sim 0.5 \times 10^{-4}$,
 ---> $Ro=10^{-4} \ll 1$
 Effet dominant de la rotation de la Terre



- **Système atmosphérique dépressionnaire des moyennes latitudes** :
 $U=10\text{m.s}^{-1}$, $L=1000\text{km}$, $f=2 \times 7.3 \times 10^{-5} \times \sin(45) \sim 10^{-4}$,
 ---> $Ro=0.1 \ll 1$
 Effet dominant de la rotation de la Terre



- **Tornado des moyennes latitudes** : $U=20\text{m.s}^{-1}$, $L=100\text{m}$, $f=2 \times 7.3 \times 10^{-5} \times \sin(45) \sim 10^{-4}$,
 ---> $Ro=2000 \gg 1$
 Faible influence de la rotation de la Terre. L'équilibre se fait entre les forces de pression et les termes inertiels (force centrifuge)



- **Evacuation d'un lavabo** : $U=0.5\text{m.s}^{-1}$, $L=5\text{cm}$, $f=2 \times 7.3 \times 10^{-5} \times \sin(45) \sim 10^{-4}$,
 ---> $Ro=5 \times 10^5 \gg 1$
 La rotation de la Terre n'influence pas l'écoulement du lavabo !!

Importance de la convection : nombre de Rayleigh

- La convection est favorisée par une instabilité gravitaire provoquant à la dilatation du milieu (β = coefficient de dilatation thermique) :

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad \text{soit} \quad \Delta\rho = \rho_0\beta\Delta T$$

- La convection est freinée par les forces visqueuses (qui ralentit les mouvements) et limitée par la diffusion thermique qui tend à lisser les différences thermiques l'initiant.
- Pour établir l'importance relative de la convection par rapport aux processus la limitant, on forme le nombre de Rayleigh comme le rapport entre le temps caractéristique de la diffusion par le temps caractéristique de la convection (lié à la gravité et pondéré par la viscosité) :

$$Ra = \frac{L^2}{\kappa} / \frac{\mu}{\Delta P} = \frac{L^2}{\kappa} / \frac{\mu}{gL\Delta\rho} = \frac{L^2}{\kappa} / \frac{\mu}{gL\rho_0\beta\Delta T}$$

Soit :

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T \cdot L^3}{\kappa\nu}$$

- **La convection dominera d'autant plus facilement la diffusion que le système est grand, facilement dilatable, peu visqueux, et peu conducteur de chaleur.**

Importance de la convection : nombre de Rayleigh

Exemples de nombre de Rayleigh :

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T.L^3}{\kappa\nu}$$

- **Convection dans le manteau terrestre** : $g=10 \text{ m.s}^{-2}$, $\Delta T=3000^\circ\text{C}$, $L=3000\text{km}$, $\kappa= 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu= 3\times 10^{17} \text{ m}^2/\text{s}$, $\beta= 3\times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. ---> **Ra ~ 10⁸ >> 2000.**
La grande épaisseur du manteau implique que le manteau terrestre convecte
- **Convection dans la croûte terrestre** : $g=10 \text{ m.s}^{-2}$, $\Delta T=100^\circ\text{C}$, $L=10\text{km}$, $\kappa= 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu= 3\times 10^{17} \text{ m}^2/\text{s}$, $\beta= 3\times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. ---> **Ra ~ 0.1 << 2000.**
l'épaisseur faible de la croûte implique que la conduction thermique domine dans la croûte terrestre
- **Convection atmosphérique** : $g=10 \text{ m.s}^{-2}$, $\Delta T=6.5^\circ\text{C}$, $L=1\text{km}$, $\kappa= 2\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu= 1.5\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\beta= 3\times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. ---> **Ra ~ 10¹⁹ >> 2000.**
La troposphère (basse atmosphère) est particulièrement convective
- **Conduction atmosphérique** : $g=10 \text{ m.s}^{-2}$, $\Delta T=5^\circ\text{C}$, $L=1\text{cm}$ (près de la surface), $\kappa= 2\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu= 1.5\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\beta= 3\times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. ---> **Ra ~ 240 < 2000.**
Importance de la conduction près de la surface (effet mirage).

Pour finir : Généricité des Lois de conservation

- Les différents termes de transport vus jusqu'ici s'insèrent dans les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et de l'énergie
- Ces lois de conservations peuvent être écrites de façon générique pour un domaine D de frontière δD (cadre général de la thermodynamique des processus irréversibles) :

Variation temporelle = terme de flux (densité J_a) + terme de création interne (densité φ_a)

$$\frac{d}{dt} \int_D a dV = - \int_{\delta D} J_A dS + \int_D \varphi_A dV$$

Soit sous forme locale :

$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{a}{\rho} \right) = - \vec{\nabla} \cdot (J_A) + \varphi_A$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{a}{\rho} \right) = \rho \left(\frac{1}{\rho} \frac{da}{dt} - \frac{a}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} \right)$$

soit
$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{a}{\rho} \right) = \frac{da}{dt} + a \nabla \cdot \vec{v}$$

Avec :

	a	J_A	φ_A
masse	ρ	0	0
qtt mvt	$\rho \underline{u}$	$-\underline{\underline{\sigma}}$	\underline{f}
énergie	$\rho(e + \frac{1}{2}u^2)$	$\underline{q} - \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{u}$	$\underline{f} \cdot \underline{u} + r$

et : u vitesse, $\underline{\underline{\sigma}}$ tenseur des contraintes, q flux de chaleur, f et r sources, e énergie interne, ρ masse volumique.

Pour finir : Généricité des Lois de conservation

- Comme on l'a vu, la loi de Fourier fournit une expression de q utilisée pour la plupart des situations :

$$q = -k\vec{\nabla}T$$

avec k conductivité thermique en W/m/K. On exprime aussi la diffusivité thermique κ en m²/s avec $\kappa = k/\rho c_p$.

- Le tenseur des contraintes σ s'exprime de façons différentes selon les milieux (solide ou fluide) et les hypothèses faites (solide élastique, fluide Newtonien, ...)

- On obtient alors le problème complet :

si on y ajoute :

- la loi d'état du milieu $P(\rho, T)$
- les différents coefficients
- les conditions aux limites

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\vec{\nabla} \cdot (\vec{v}) = 0$$

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\underline{\underline{\sigma}}) + f$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (k\vec{\nabla}T) + r$$

Conclusions

- Le système Terre est un système complexe dans lequel les différents milieux sont en interactions permanentes sur de nombreuses échelles de temps et d'espace.
- L'analyse relative des processus (en formant des rapports sans dimension) permet de déterminer les termes de transfert/transport prépondérants en fonction des caractéristiques du milieu et des phénomènes étudiés. Les nombres sans dimensions peuvent aussi être obtenus aussi à partir de l'adimensionnement des équations de conservation.
- Pour l'atmosphère et l'océan, on négligera souvent la viscosité (sauf couche limite) qui par contre joue un rôle important pour la Terre interne et les écoulements dans les sols (milieux poreux).
- La convection est présente dans les différents milieux avec des causes différentes d'instabilité : chaleur et humidité pour l'atmosphère, salinité et eaux froides pour l'océan, conduction dans la lithosphère et points chauds pour le manteau. Les zones convectives sont généralement associées à des couches limites minces dans lesquelles la conduction thermique joue un rôle important.
- La turbulence est omniprésente dans l'atmosphère, présente dans les océans, mais peu présente dans le manteau terrestre (par contre on la trouve dans le noyau liquide)
- Les lois de conservations (masse, quantité de mouvement, énergie) s'appliquent dans les différents milieux à partir d'une forme générique commune fournie par la mécanique des milieux continus. Ces équations donnent un cadre robuste à l'étude de la planète Terre et de ses différents milieux.