Fluides géophysiques et géodésie

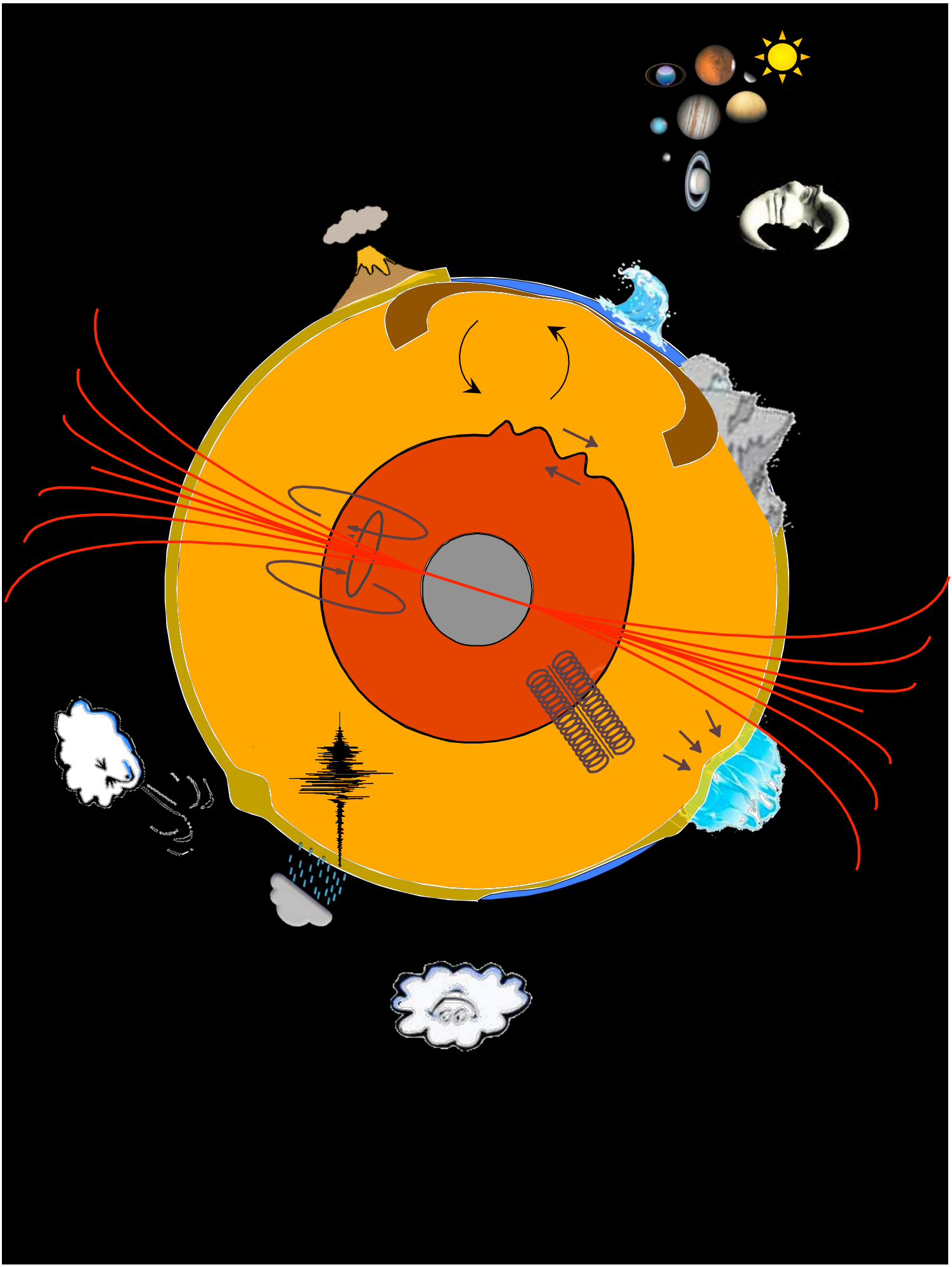
(Un peu de poésie dans un monde de brutes)

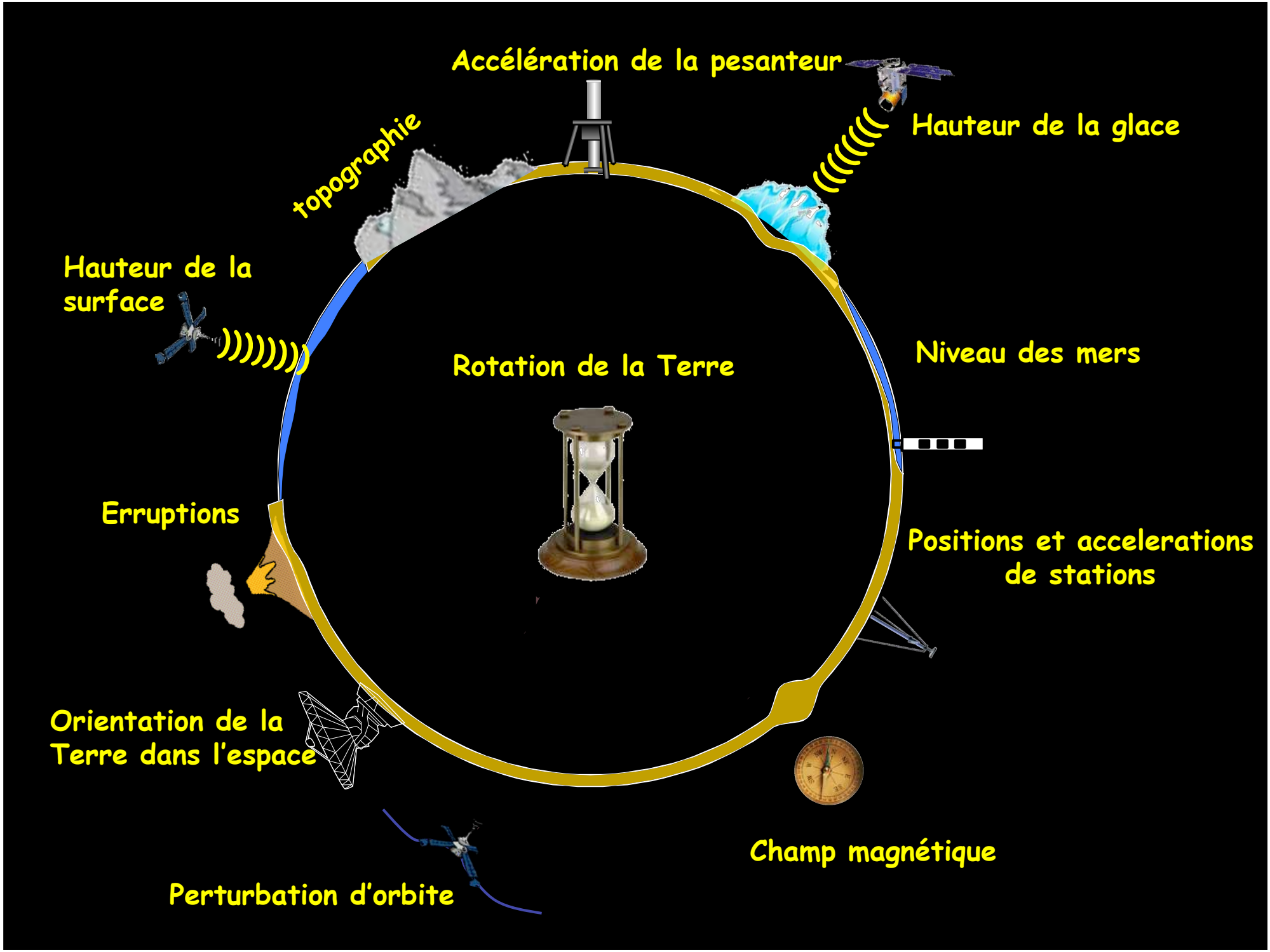
Olivier de Viron

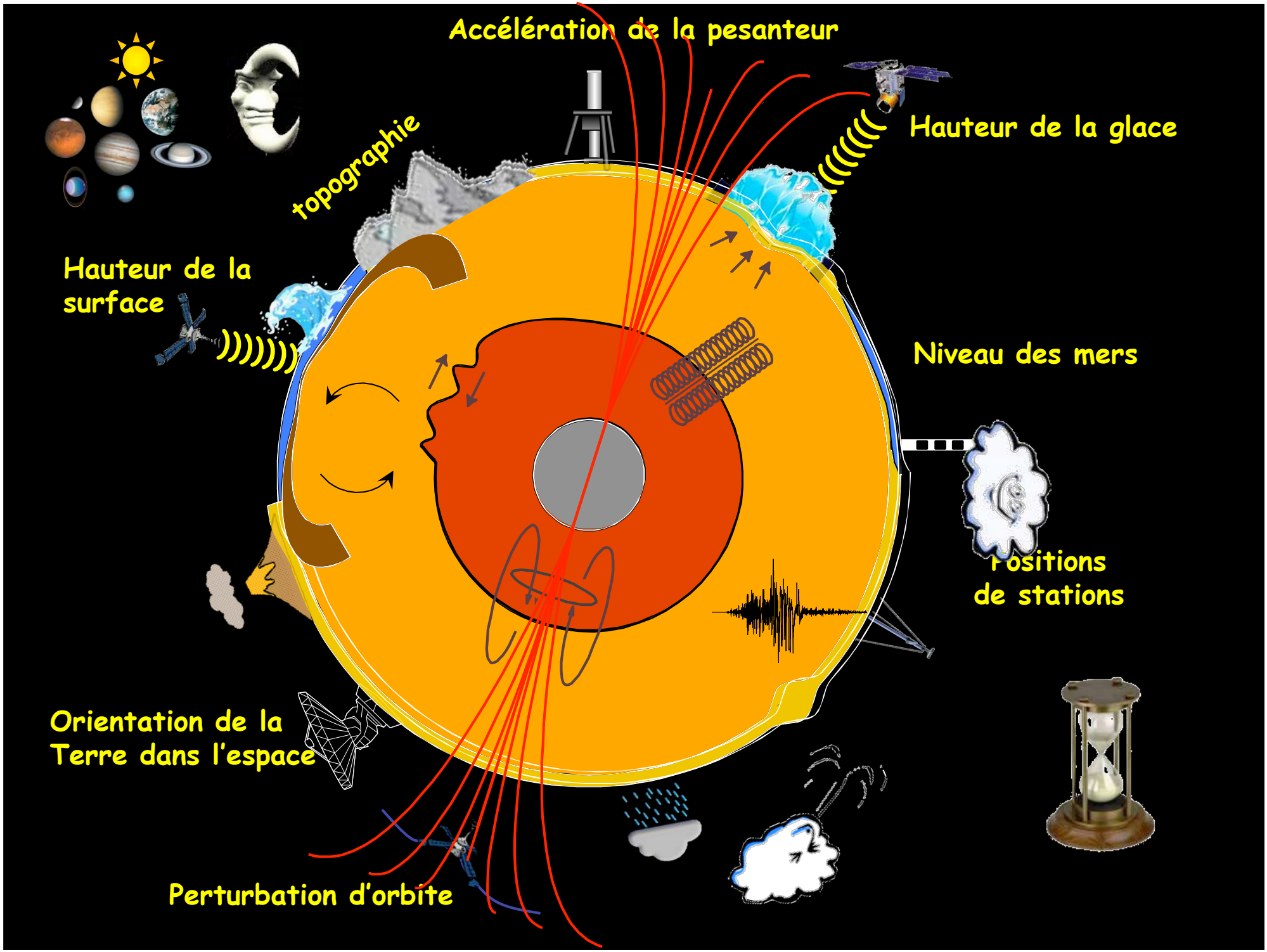
0. Une sorte d’introduction

Ou, en tout cas, un truc qui y ressemble un peu…

Et où, enfin, il est question de l’interaction entre les 3 piliers




Accélération de la pesanteur
Hauteur de la glace
topographie
Hauteur de la surface
Rotation de la Terre
Niveau des mers
Erruptions
Positions et accelerations de stations
Orientation de la Terre dans l'espace
Champ magnétique
Perturbation d'orbite

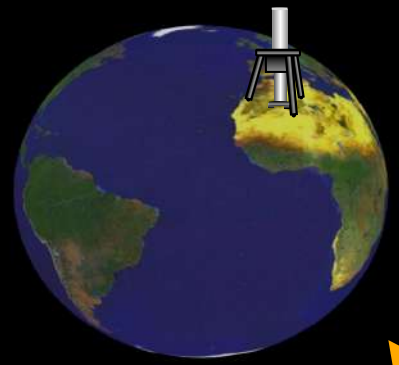

Accélération de la pesanteur
topographie
Hauteur de la glace
Hauteur de la surface
Niveau des mers
Positions de stations
Orientation de la Terre dans l'espace
Perturbation d'orbite

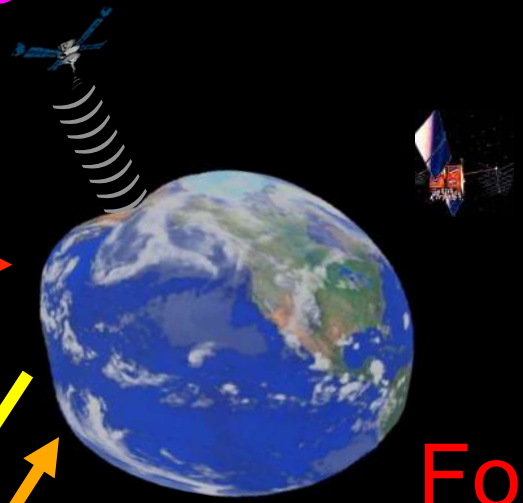
A quoi la géodésie est-elle sensible?

- Distribution de masse
  - ⇨ changement dans la pesanteur
  - ⇨ changement de l'orientation (global)
  - ⇨ déformation (effet de charge)
- Mouvement global
  - ⇨ changement de l'orientation
- Niveau des mers (altimétrie)
- Densités de perturbateurs ionosphériques et troposphériques

Mais encore?

Nombres de Love





Effet de charge

Répartition des masses

Tenseur d'inertie

Tenseur d'inertie *

Effet centrifuge[x]

Forme d'équilibre

Pesanteur

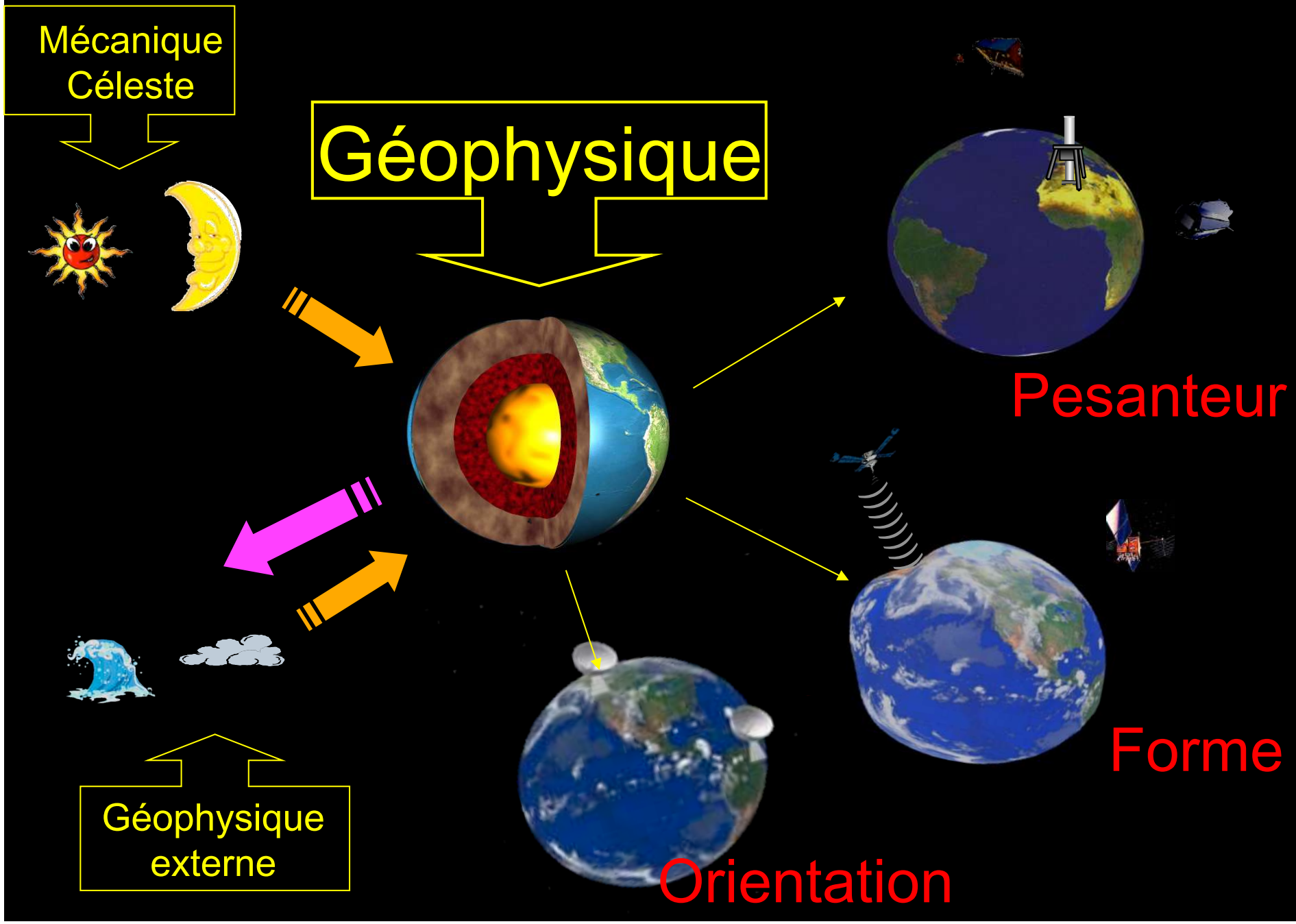
Forme

Orientation

* Effet sur le repère de référence?

[x]Rotation du potentiel

Modèles

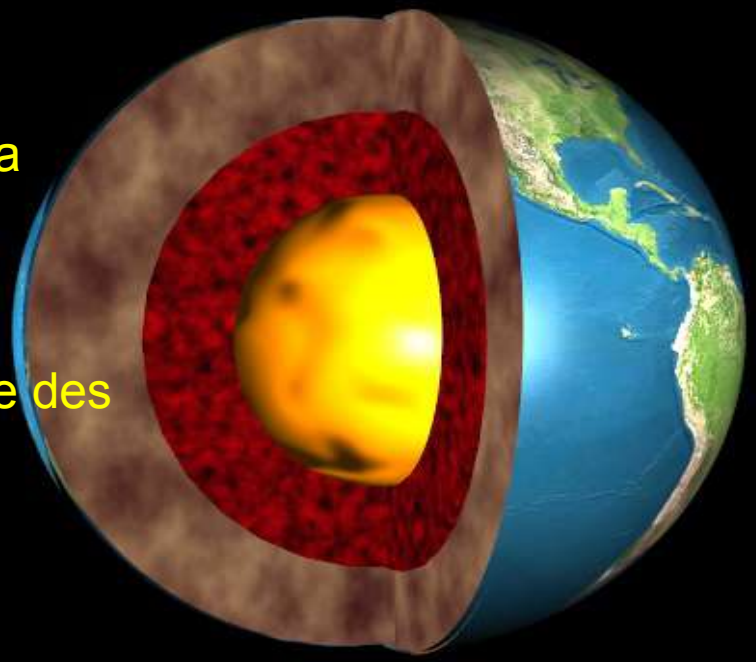

Mécanique Céleste
Géophysique
Pesanteur
Forme
Orientation
Géophysique externe

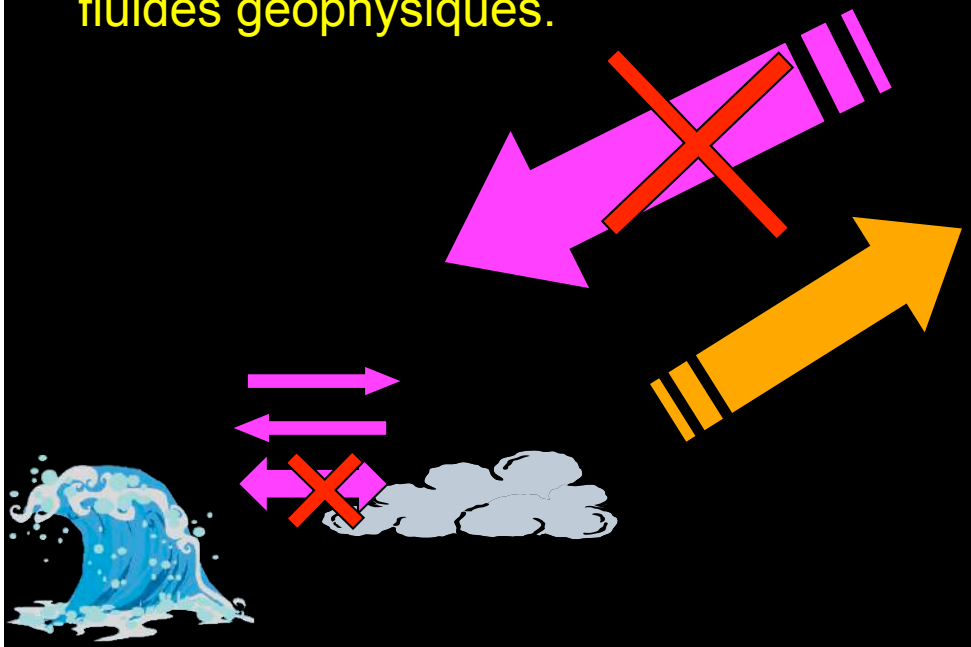
Modèles ?globaux?

Effet des changements de pesanteur sur la dynamique atmosphérique/océanique.

Effet des changements de rotation sur la dynamique des fluides géophysiques (Théorie de Milankovitch du climat)

Effet des déformations sur la dynamique des fluides géophysiques.

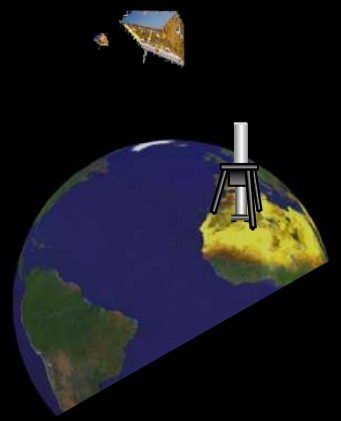




Observations

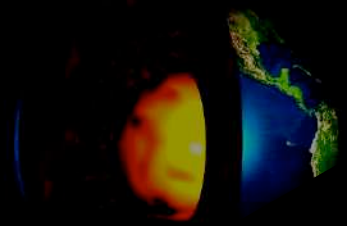
Mécanique Céleste

Géo



Marées
SLR
GRACE
Altimétrie

On compare…



Bien entendu,
Ça ne colle pas…

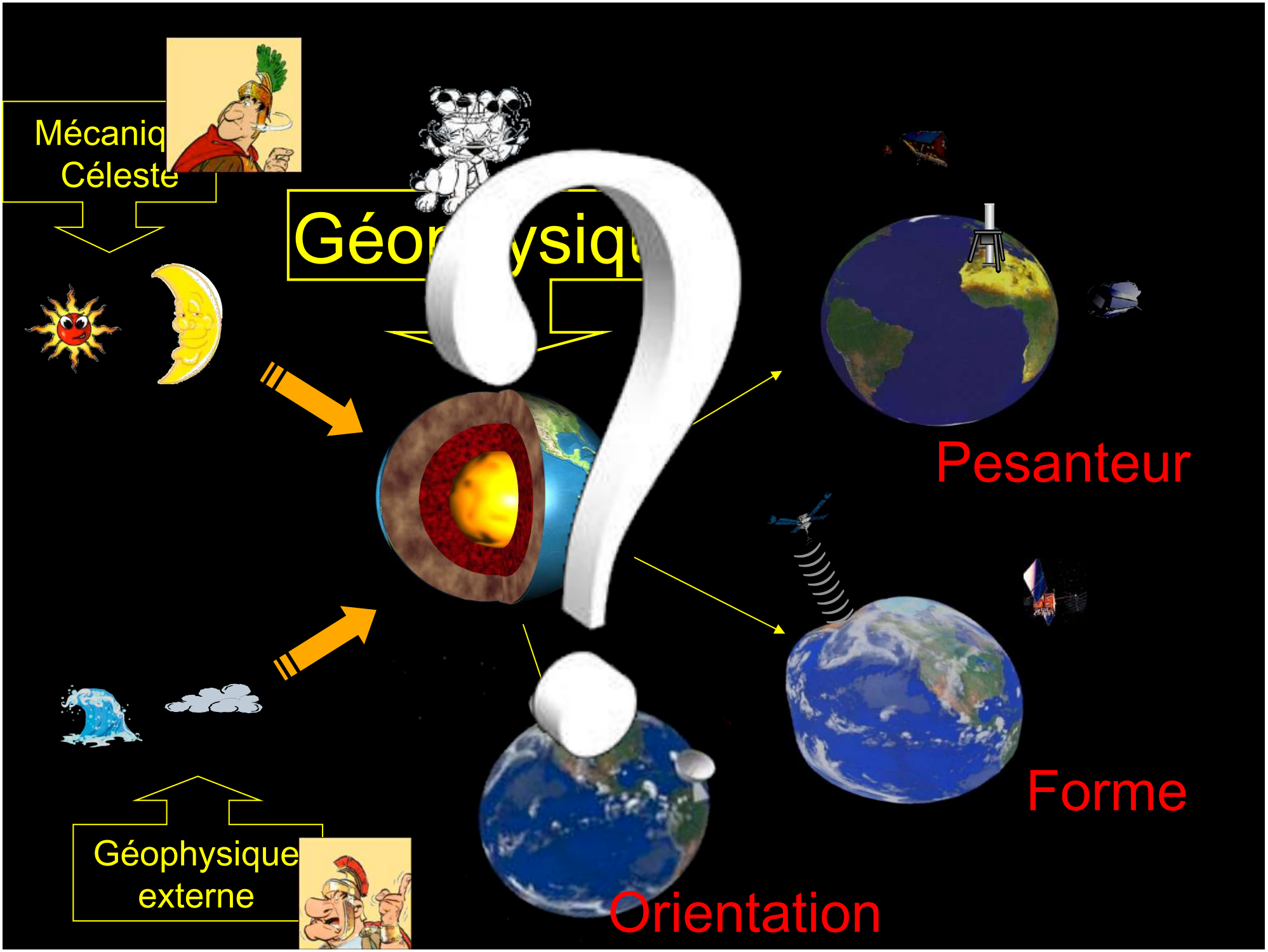
Marées
GPS
Altimétrie

Géophysique externe

VLBI
GPS,
DORIS
SLR, LLR

Orientation

Forme


Mécaniq
Céleste
Géo ysiqu
Pesanteur
Forme
Orientation
Géophysique
externe

0. Une sorte d'introduction

Ou, en tout cas, un truc qui y ressemble un peu…

Et où, enfin, il est question de l'interaction entre les 3 piliers

Et où l'on s'est rendu compte qu'on n'est pas sauvé…

I. Quelques mots sur les modèles de circulation générale atmosphérique

Commençons par un peu d'histoire…

Avant les GCM…

- A partir du XIXe siècle, on essaye d'expliquer les observations météorologiques à partir des lois de la physique. Les tentatives de solutions analytiques des équations résultent toutes en un échec cuisant.
- Début du XXe siècle, Vilhelm Bjerknes développe un système de 7 équations fondamentales pour décrire l'atmosphère (chaleur, mouvements de l'air, humidité). Méthode graphique de résolution (= très lent).
- En 1922, Lewis F. Richardson propose un système d'équations plus complet, pour une atmosphère discrétisée en cellules. Mais cela fait tant de variables que Richardson lui-même ne croît pas en sa méthode. Quelques essais « à la main » se révèlent désastreux, et la méthode est abandonnée.
- Jusqu'aux années 1940, on ne connaît presque rien de la dynamique 3D, simplement la relation entre pression et vent au sol.
- La guerre montre l'importance de la prévision météorologique, et on augmente beaucoup l'observation de l'atmosphère.

Les prémisses

- Pour la création de la bombe atomique, on a développé des ordinateurs « puissants ». Von Neumann lance un petit groupe sur la question, à Princetown (1946).
- Première simulation sur l'Amérique, 2D et 270 points. Il faut 24h de calcul pour 24 de prévision, mais cela marche! (enfin, un peu).
- 1955, Chicago: on reproduit les structures de la circulation atmosphérique dans une casserole d'eau chauffée en rotation.
- 1955, Princetown: modèle 3D cylindrique: 2 couches, 17x16 cellules. Résultats encourageant (courant jet + circulation plausible)

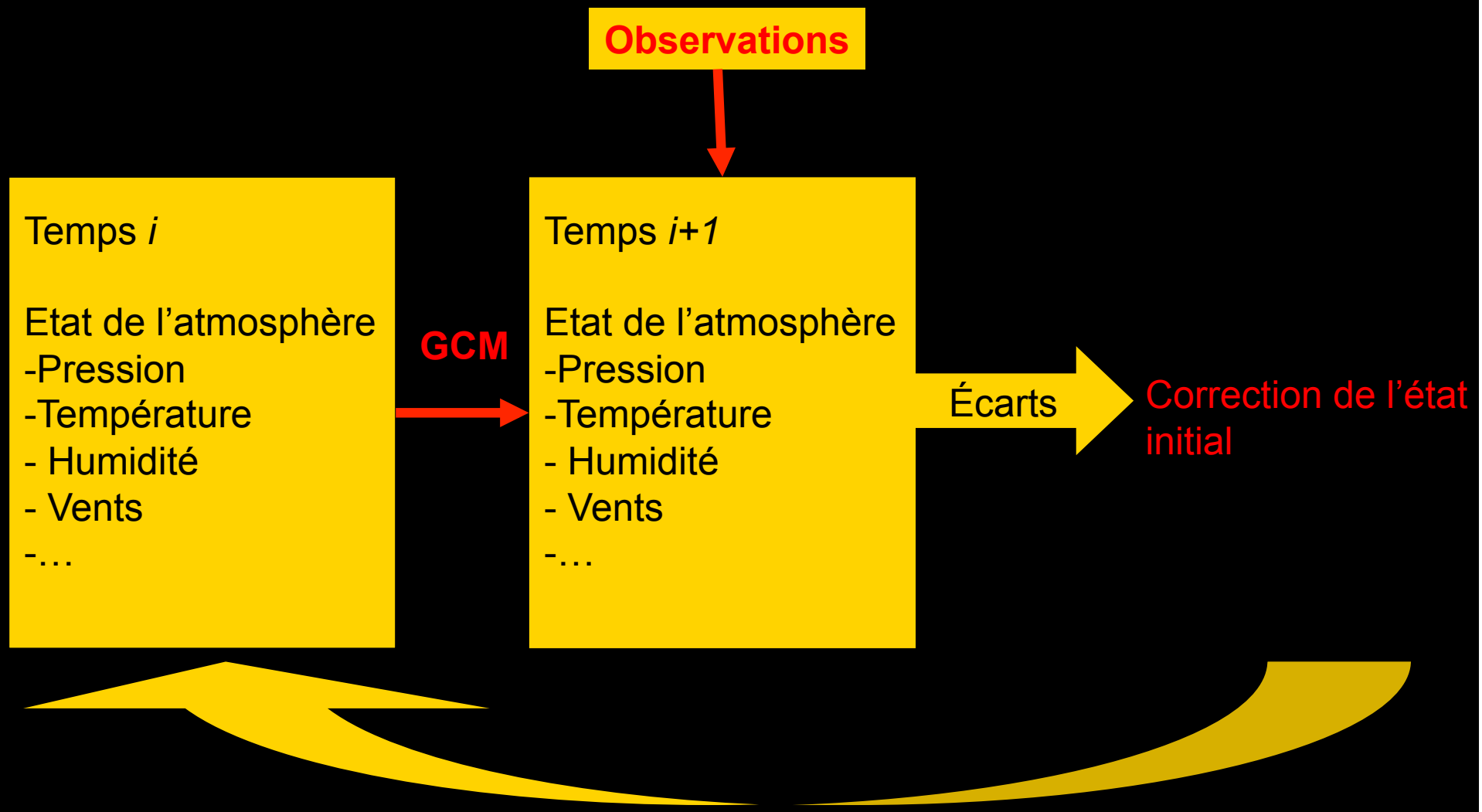
Premiers GCM

- 1955-1965, Joseph Smagorinsky et Syukuro Manabe: premier vrai GCM 3D (9 couches à la surface d'une sphère). Premières simulations d'une atmosphère « réaliste ».
- En parallèle, l'observation s'améliore (satellites), ce qui permet de nourrir les modèles de données, et de les valider.

I. Quelques mots sur les modèles de circulation générale atmosphérique

Et un peu de vocabulaire…

L'assimilation



Observations : environ 100 000 données.
Modèles : de l'ordre de 5 000 000 données

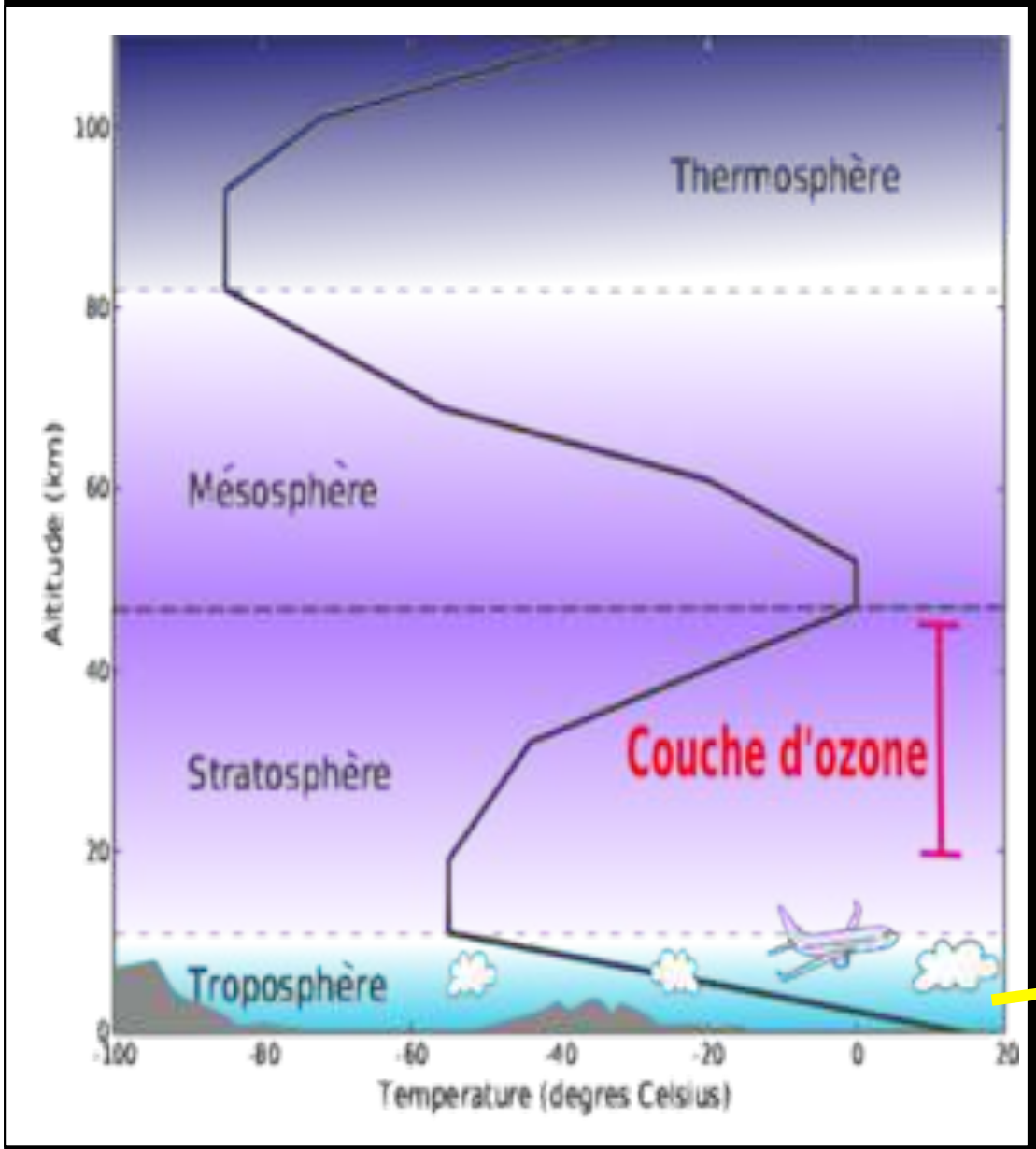
Qui fait quoi?

- La simulation est la sortie d'un modèle basée sur la climatologie, qui n'utilise pas de données d'observation.
- L'analyse est une sortie de modèle qui a été corrigée pour rester proche des données d'observation.
- La réanalyse est une analyse utilisant un modèle ancien pour permettre des études sur le long terme.

II. Quelques mots sur la dynamique de l'atmosphère

Quelques généralités…

Quelques chiffres



Au sol: $P=10^5$ Pa.

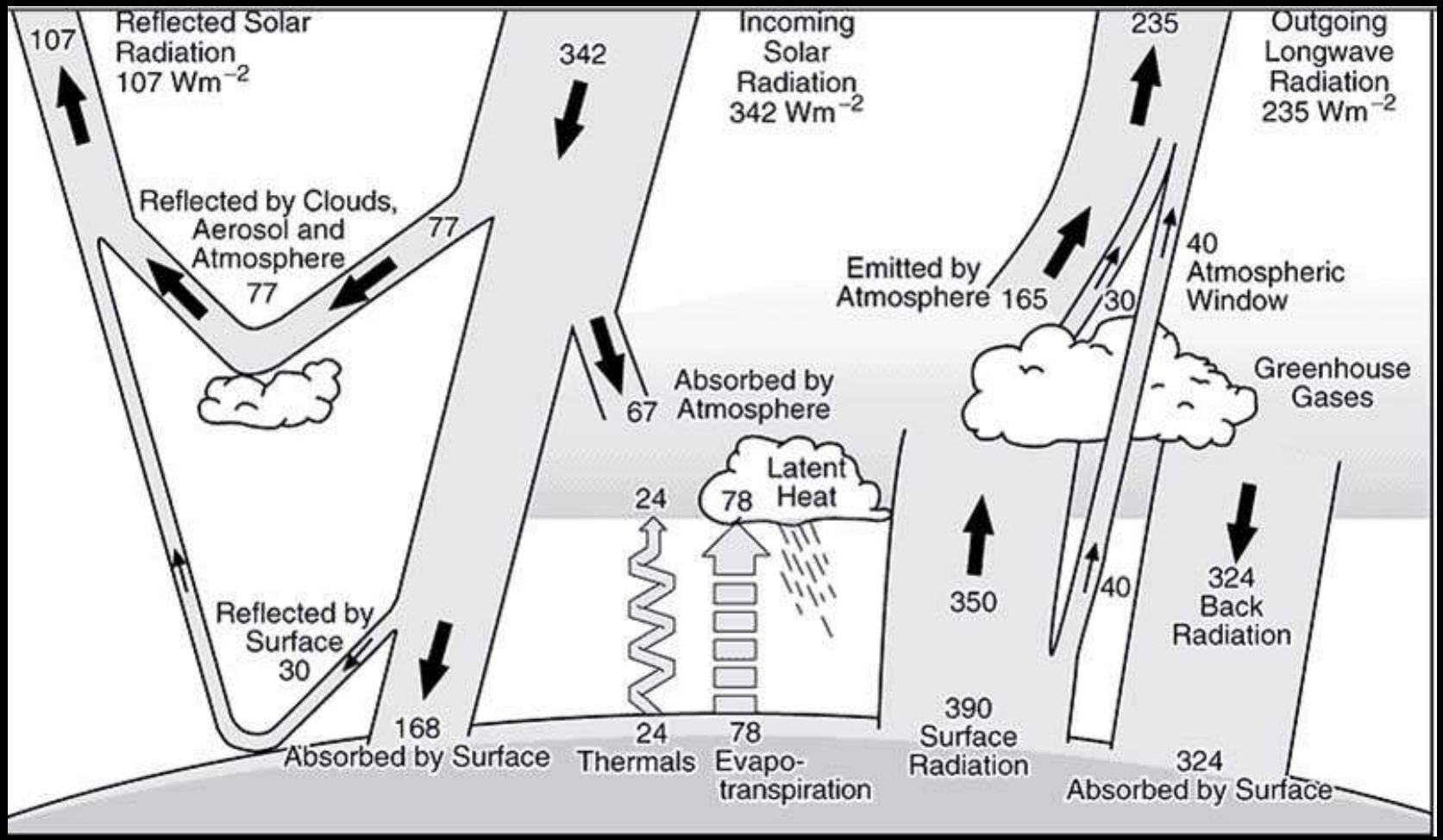
$\Rightarrow 10^4$ kg/m².

$\Rightarrow M \sim 5\ 10^{18}$ kg ($M_T \sim 6\ 10^{24}$).

$\Rightarrow \rho_{sol} \sim 1{,}2$ kg/m^3

80-90% de la masse

Le chauffage de l'atmosphère



II. Quelques mots sur la dynamique de l’atmosphère

Un peu d’équations…

(hop, au tableau!)

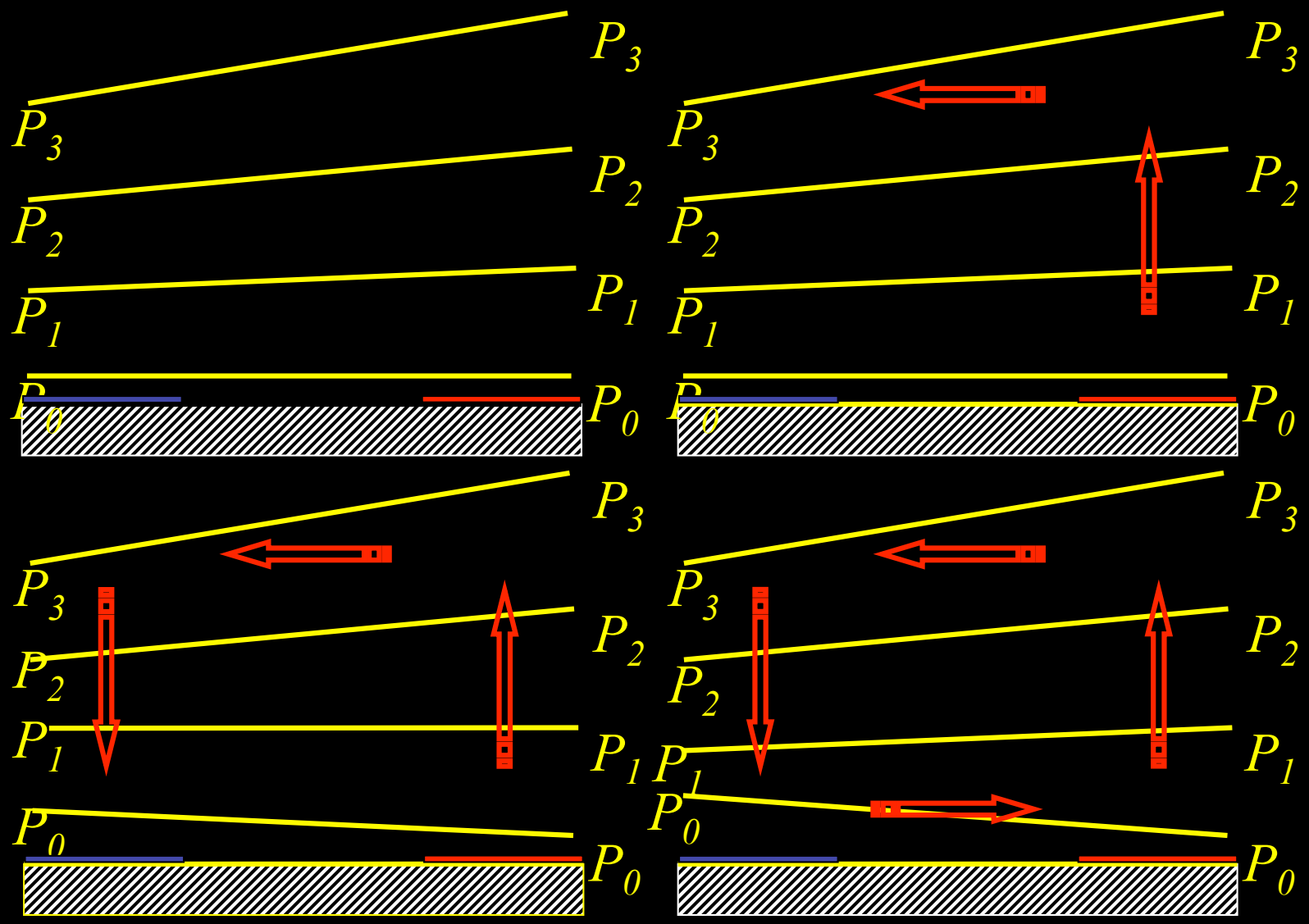
L'équilibre hydrostatique vertical

$$\cancel{\frac{d}{dt}} = -\frac{1}{\rho}\frac{d}{dz} - \quad + \cancel{\quad}$$

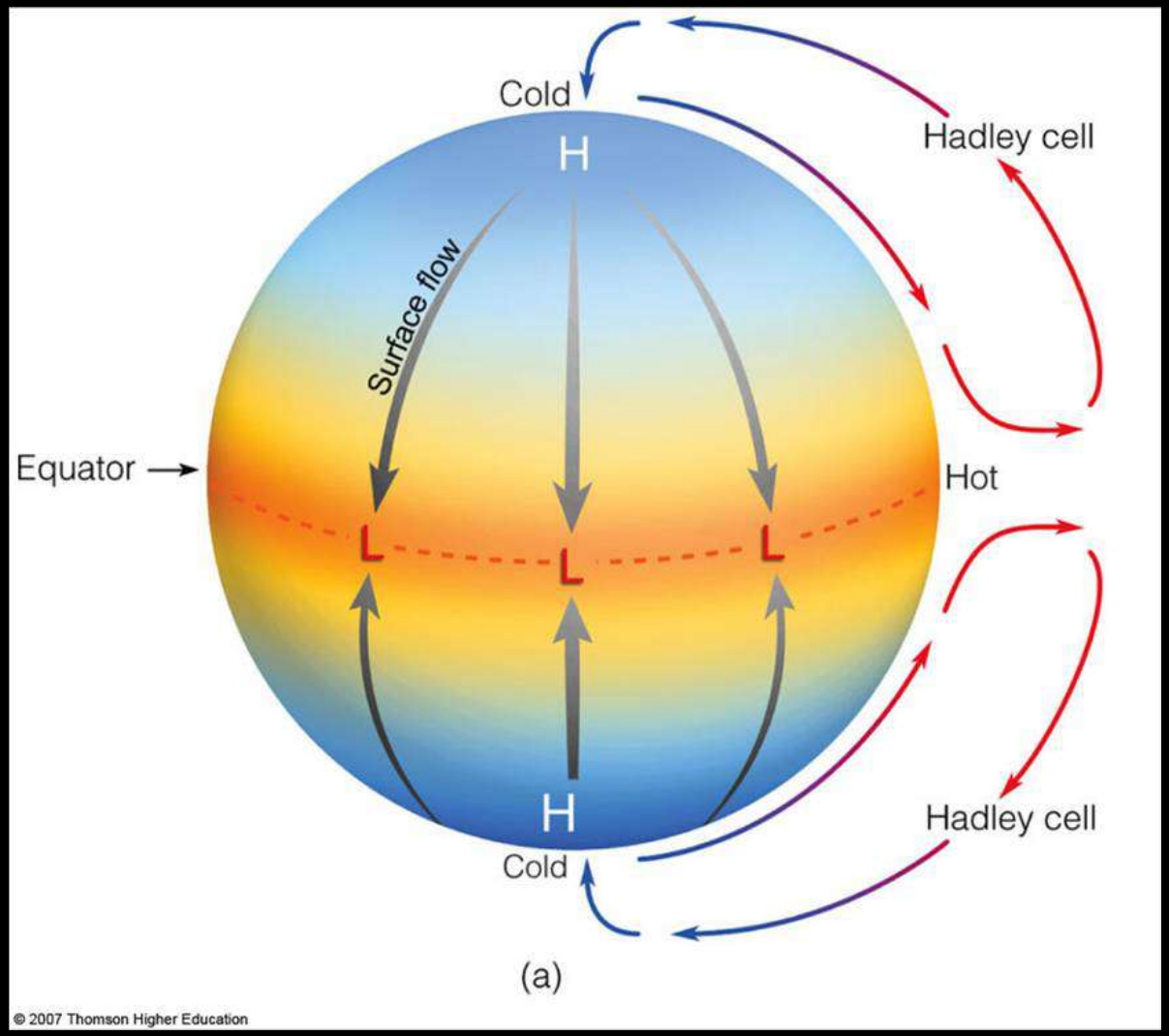
$$\frac{1}{\rho}\frac{d}{dz} + \quad = 0$$

Approximation meilleure que 99%

Le vent thermique



Le vent thermique

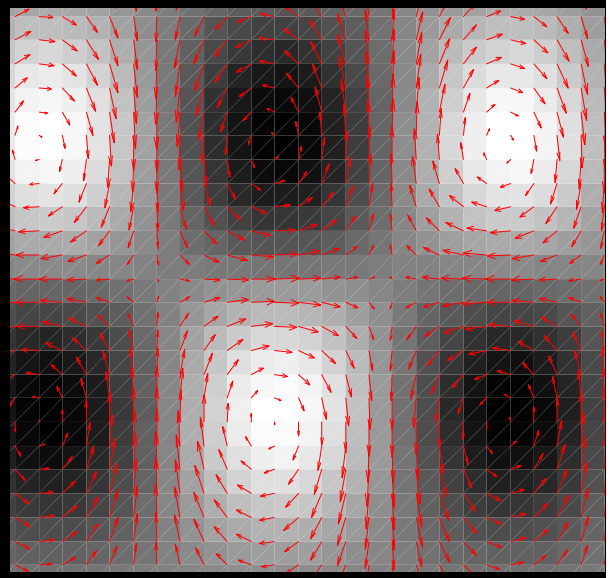


Mouvement sphéroïdal

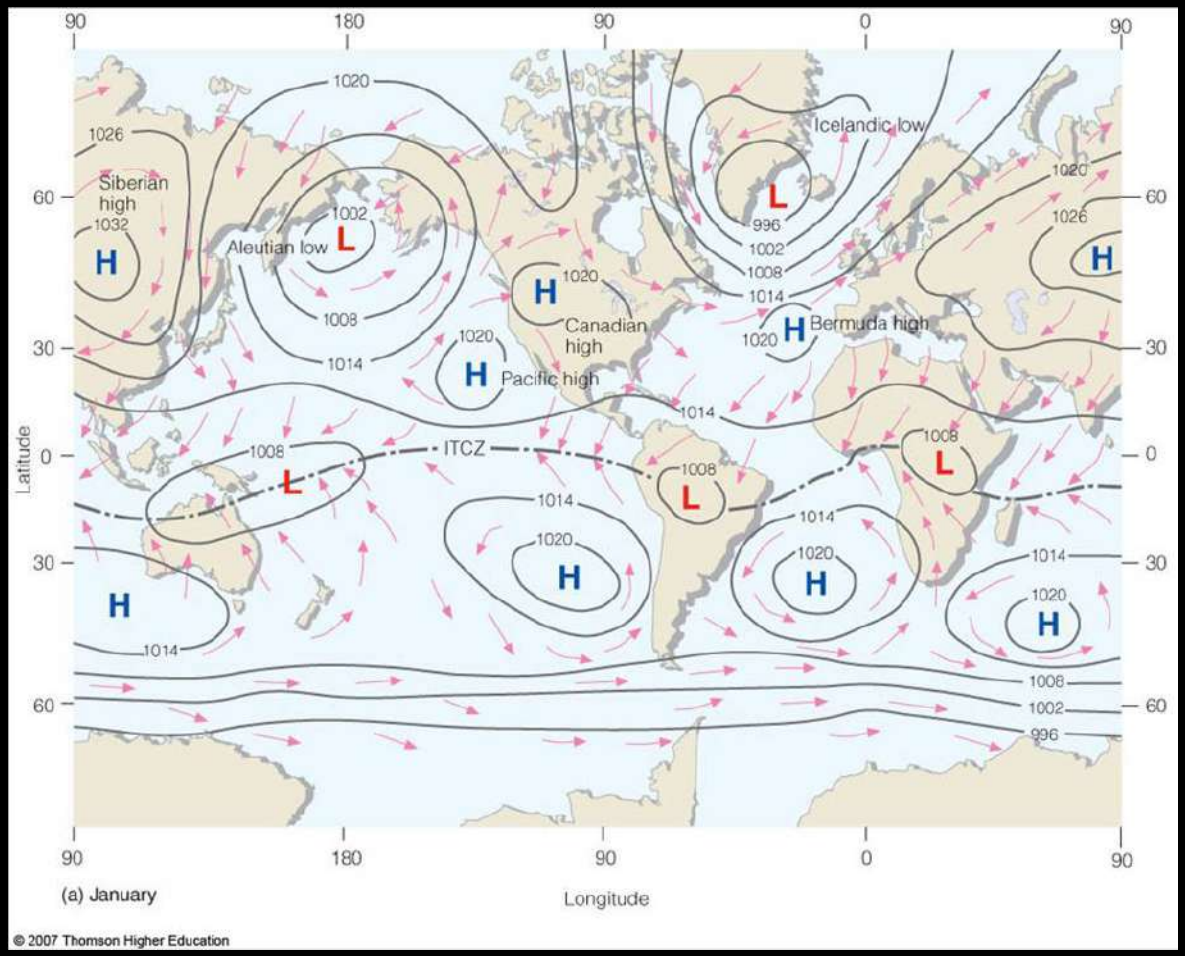
Le mouvement géostrophique

$$\cancel{\frac{d}{dt}} + 2\,\Omega \times = -\frac{1}{\rho}\nabla_h \; + \cancel{}$$

$$2\,\Omega \times = -\frac{1}{\rho}\nabla$$



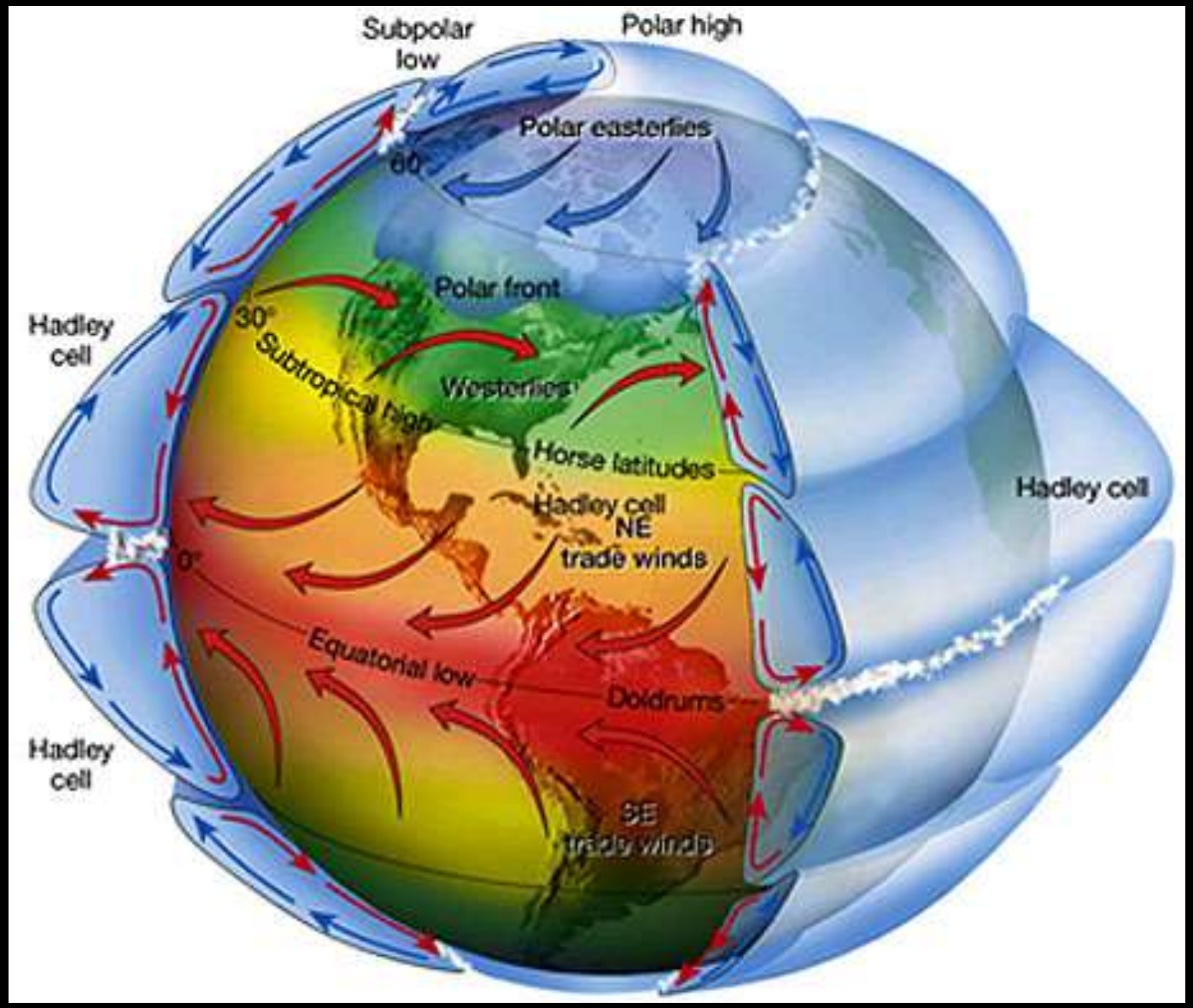
Le mouvement géostrophique



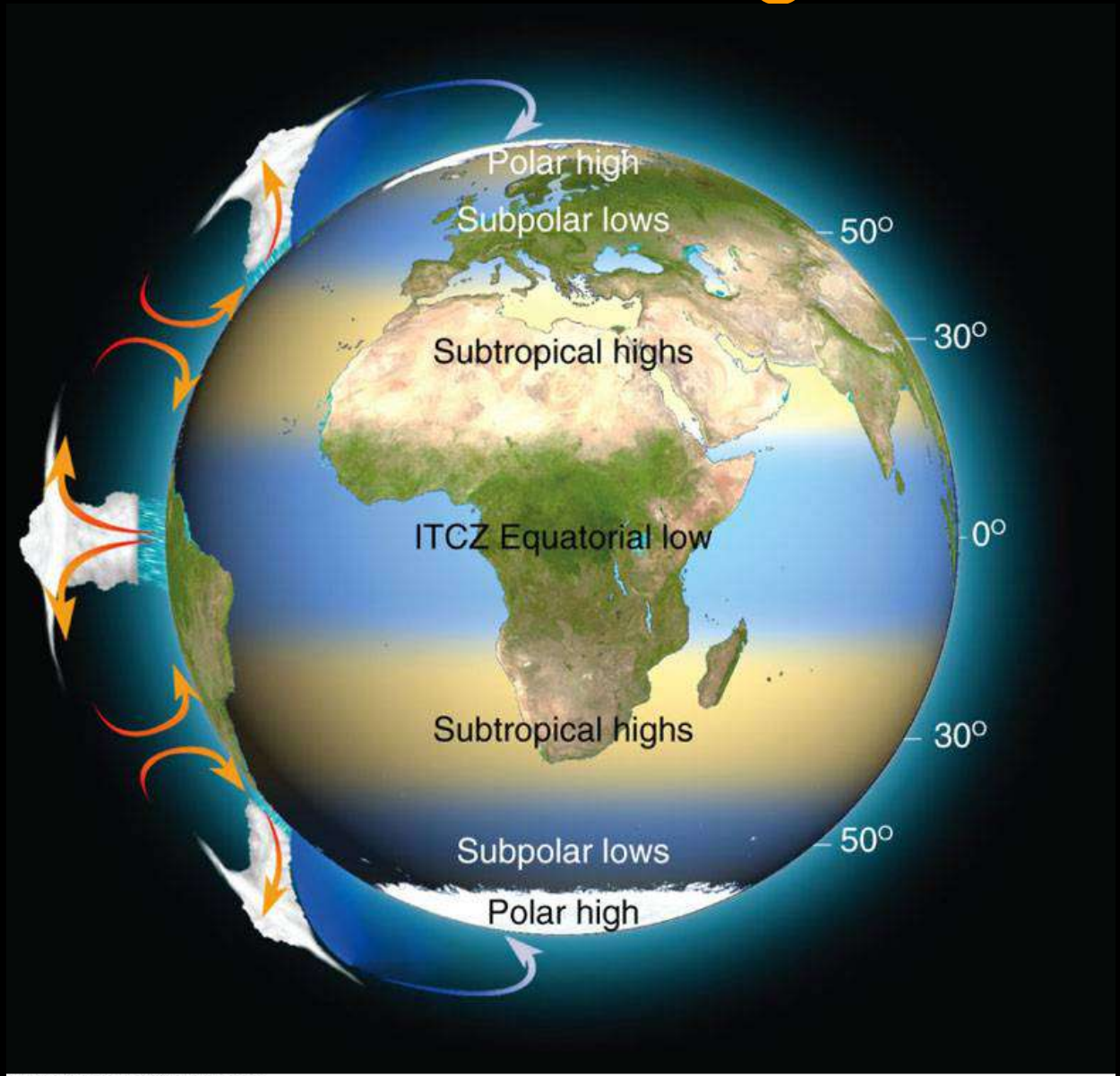
Mouvement toroïdal

Circulation observée en Janvier

La circulation générale



La circulation générale



© 2007 Thomson Higher Education

III. L’interaction Terre-atmosphere et la rotation de la Terre

Un peu d’équations…

Retour au tableau…

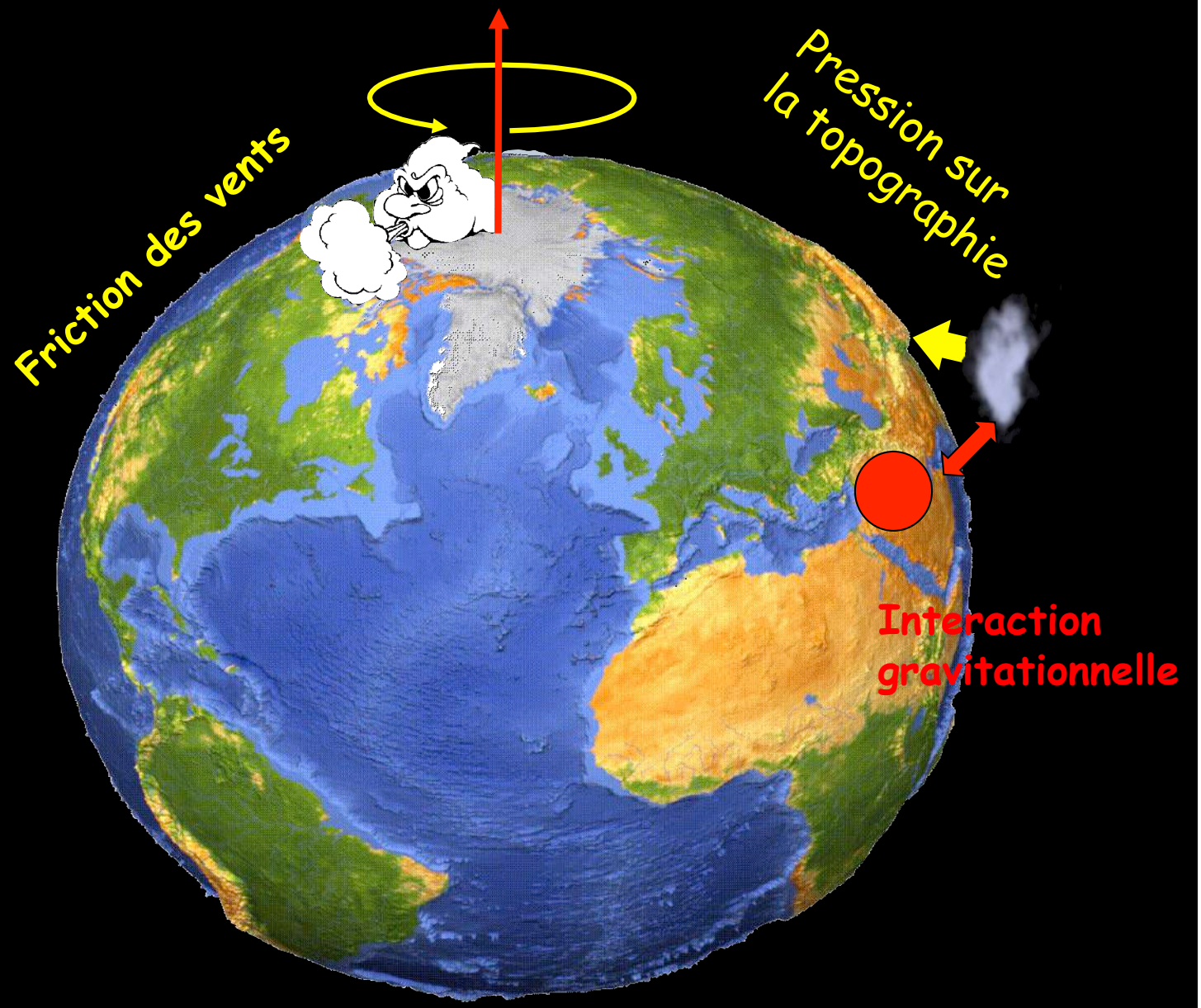
La méthode du moment cinétique

La méthode du moment cinétique

La méthode des moments de force

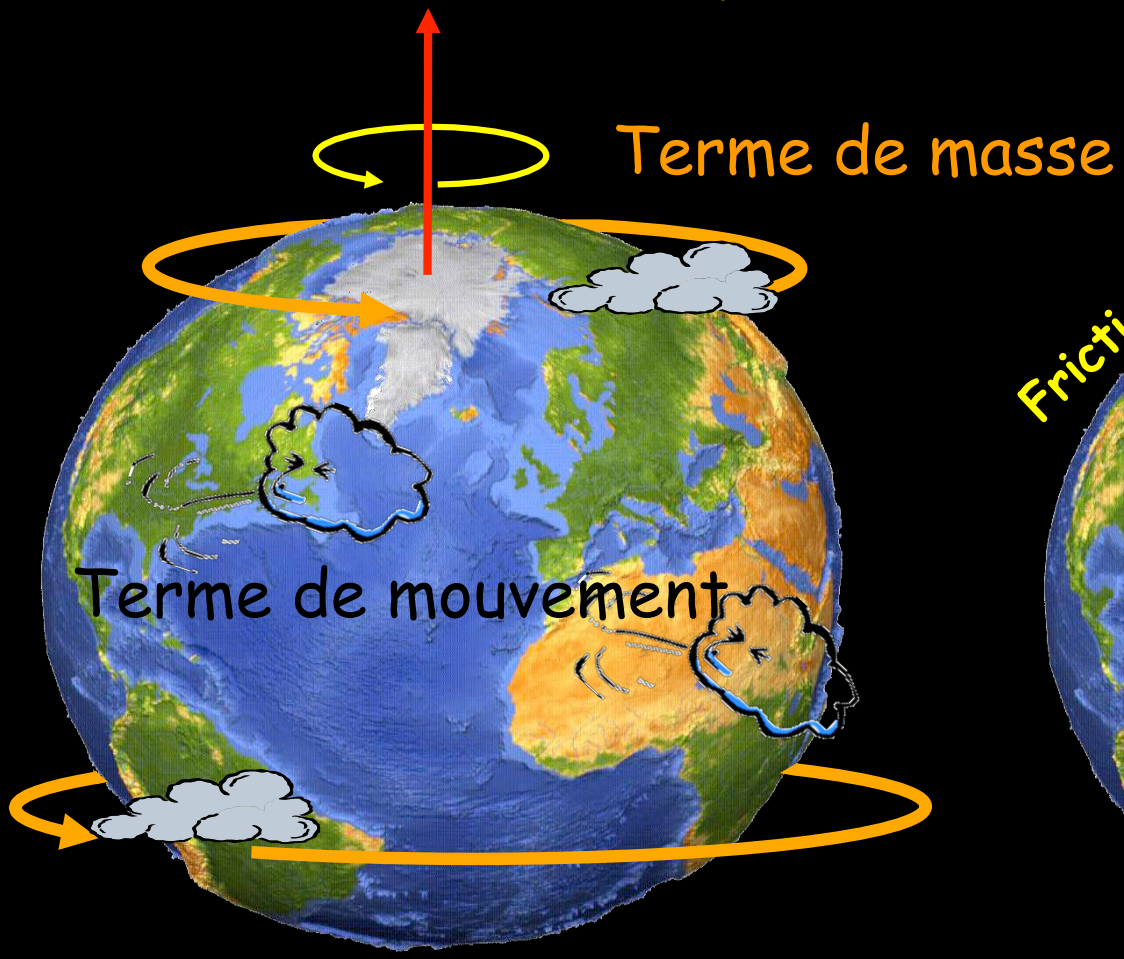
La méthode des moments de force

L'interaction Terre/Atmosphère

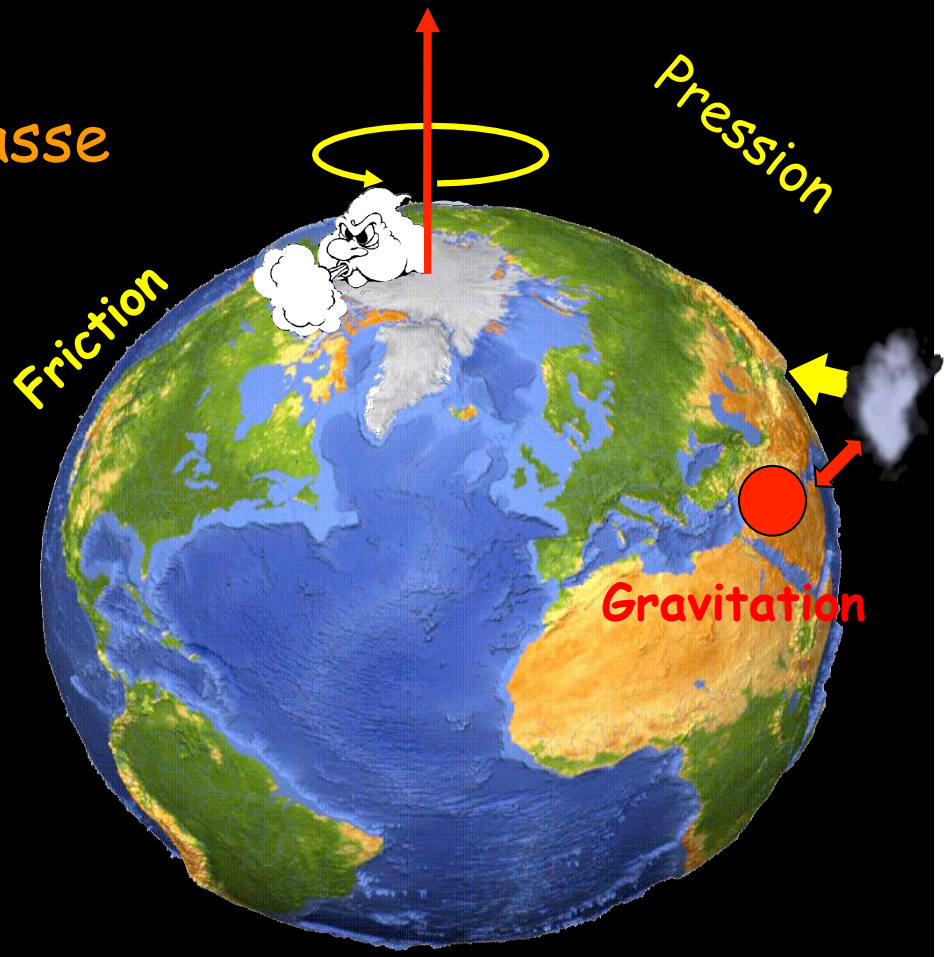


L'interaction Terre/Atmosphère

Moment cinétique

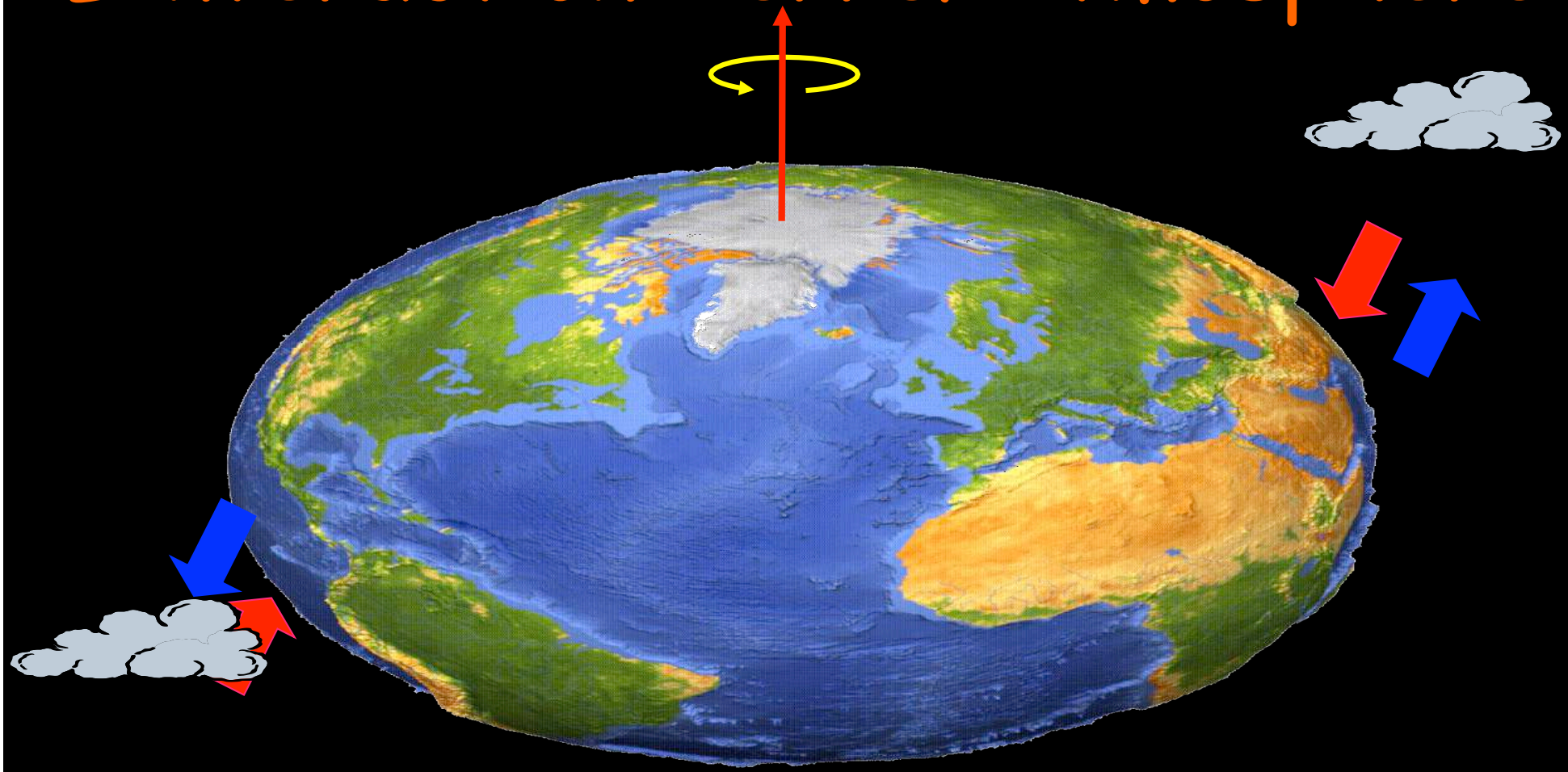


Moments de force



Moment cinétique **Moment de force**

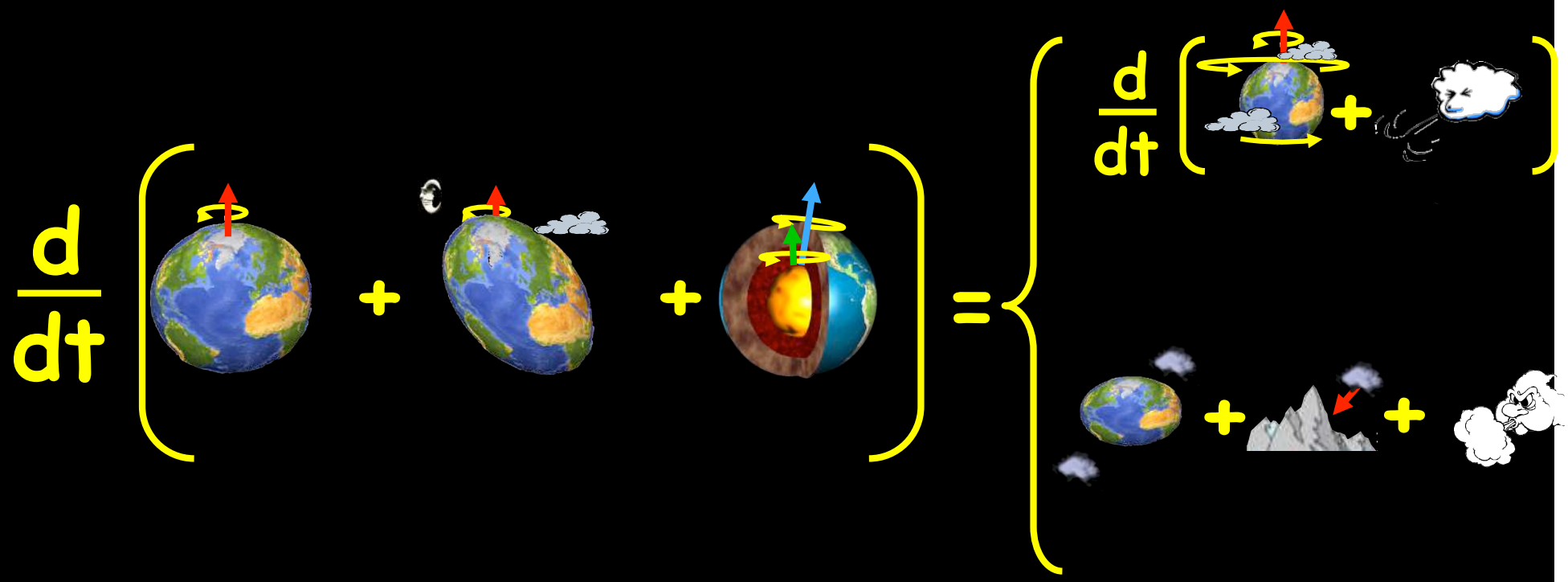
L'interaction Terre/Atmosphère



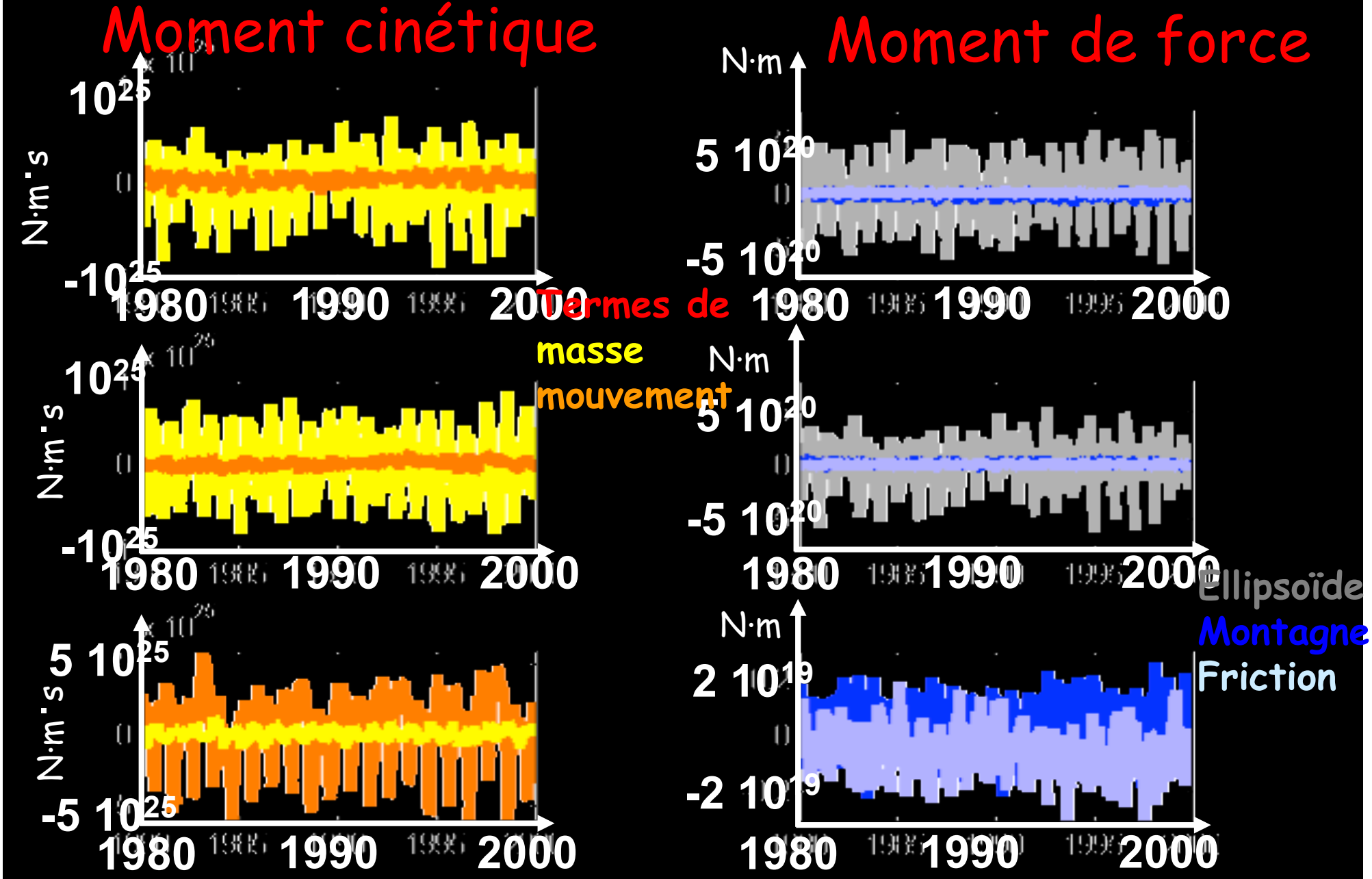
$$G_{ellipsoid} = G_{pressure \rightarrow ell} + G_{gravitation \rightarrow ell}$$
$$= \Omega \times H_{matter}$$

L'interaction Terre/Atmosphère

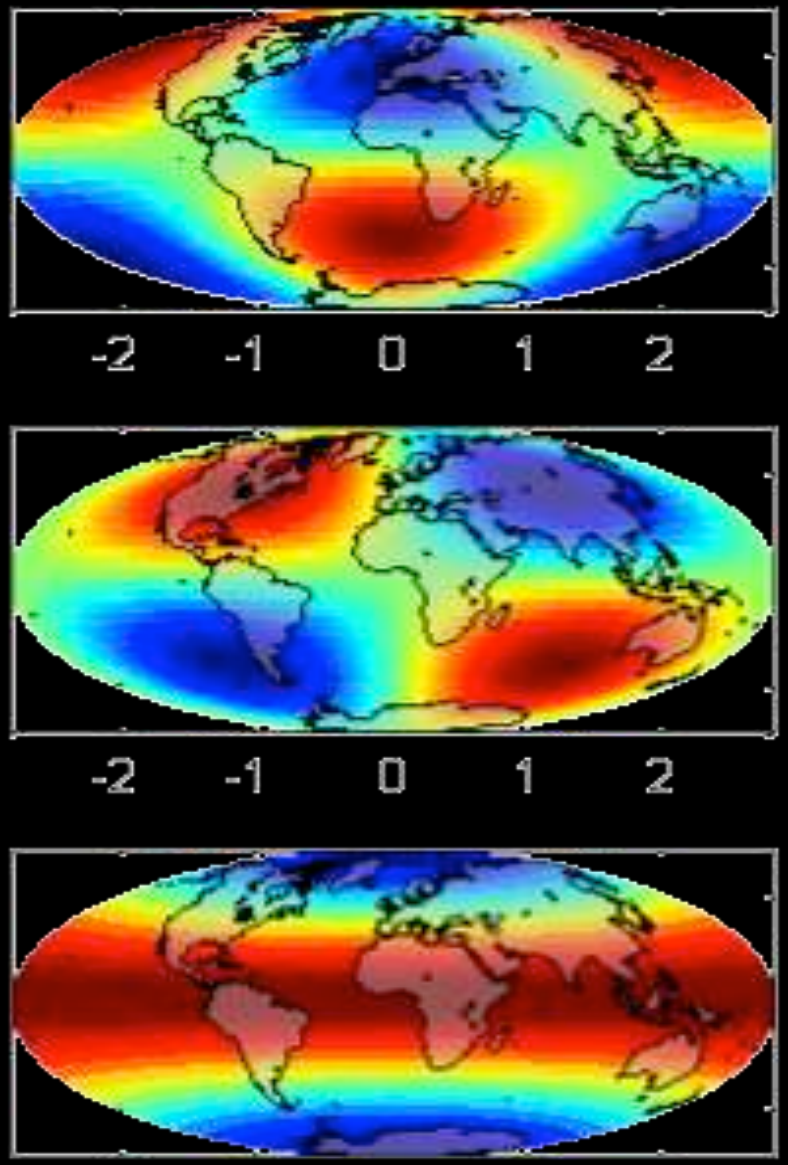
Equations de Liouville



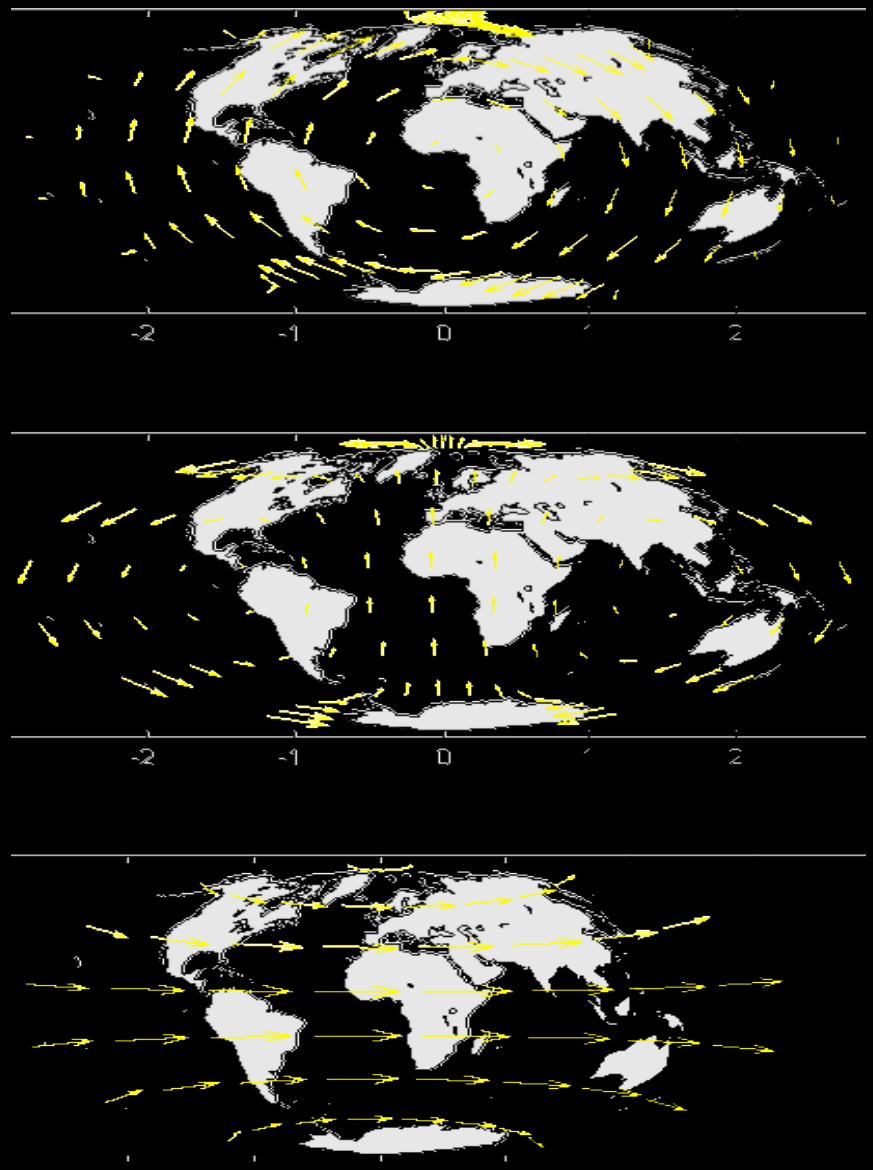
Bilan de moment cinétique



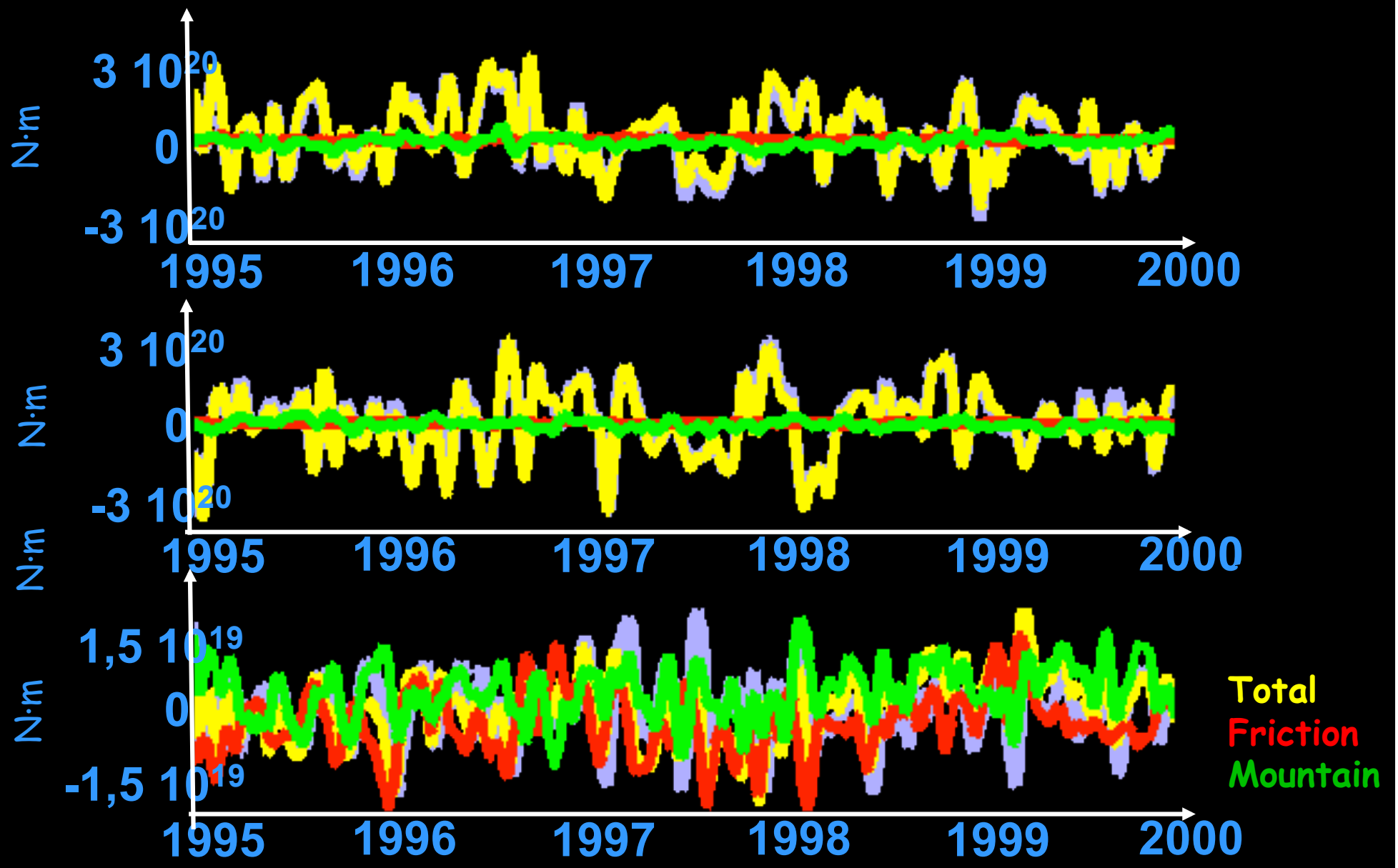
Terme de masse



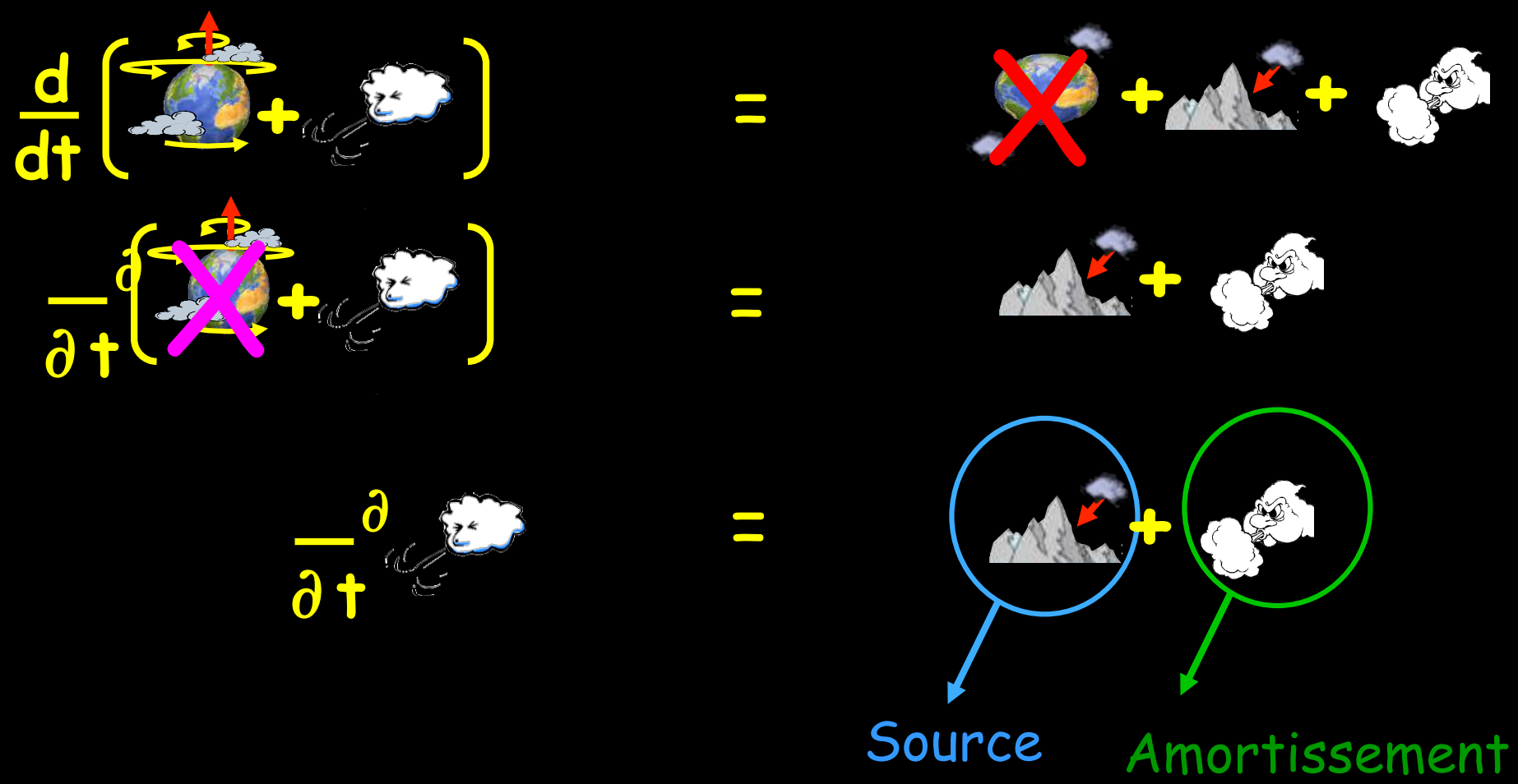
Terme de mouvement



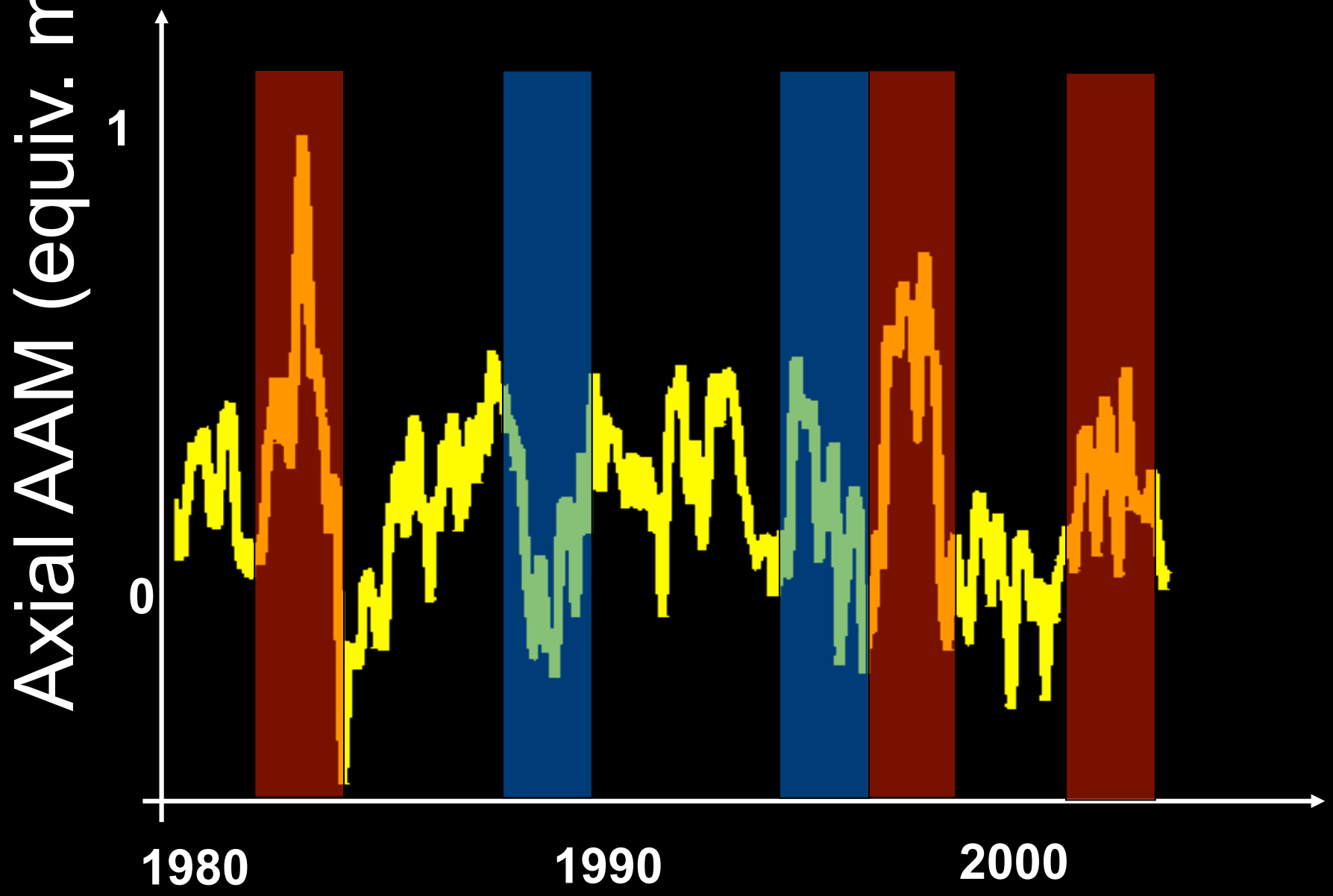
Bilan de moment cinétique



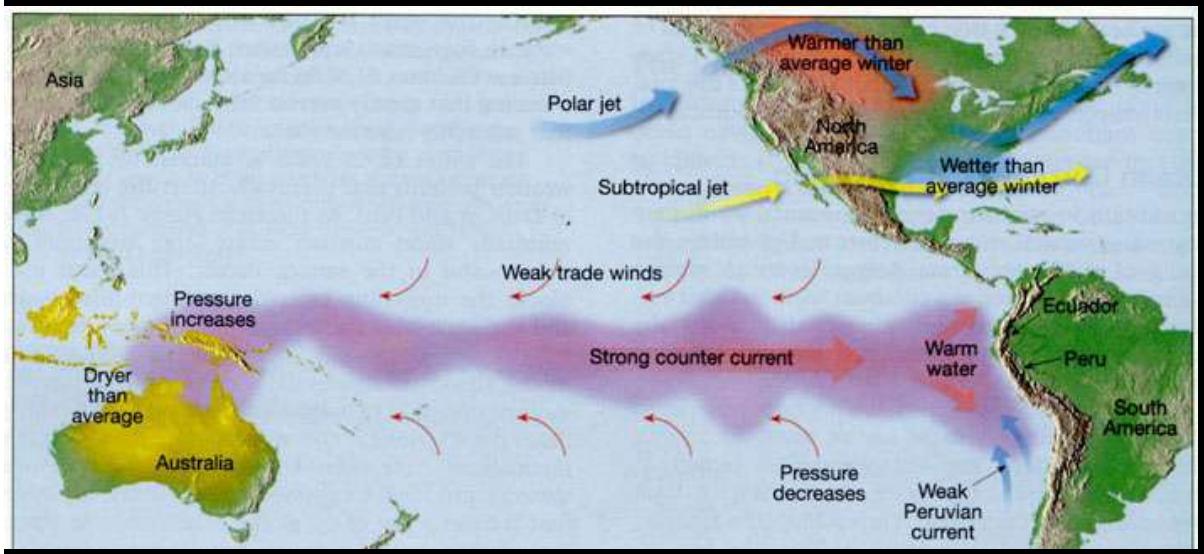
Bilan de moment cinétique



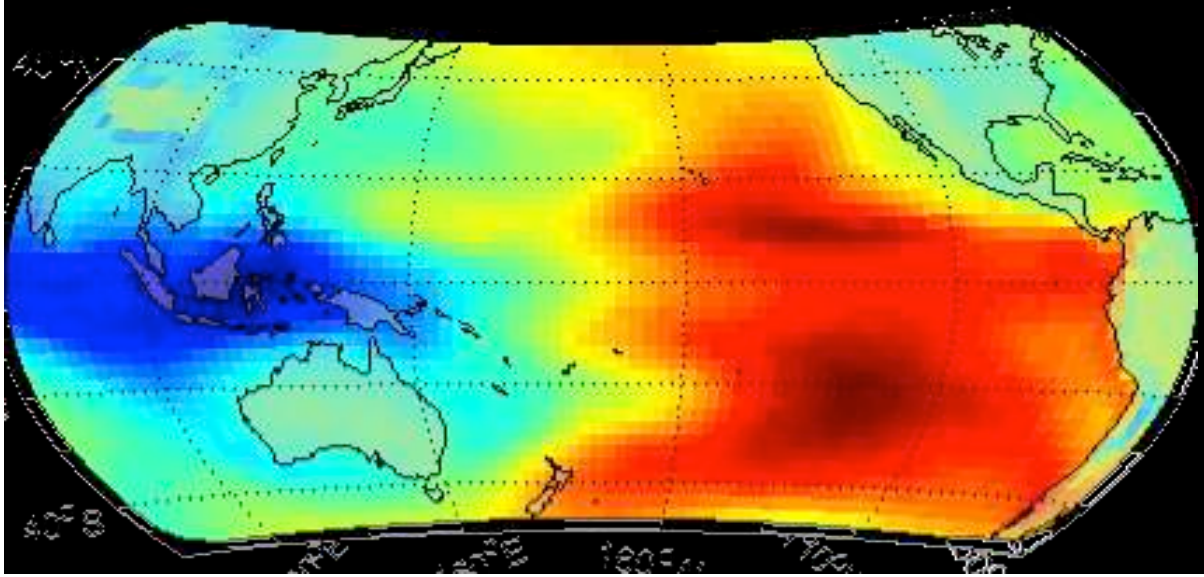
Cas d'école: l'effet du El-Nino



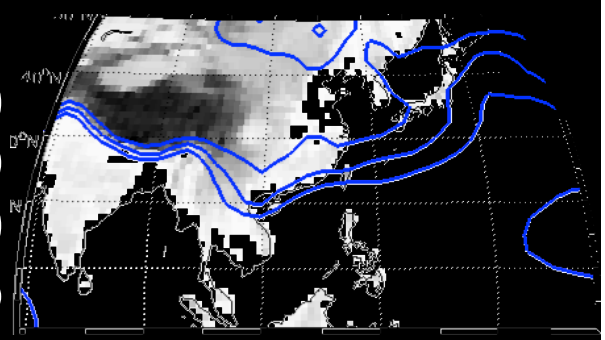
Cas d'école: l'effet du El-Nino



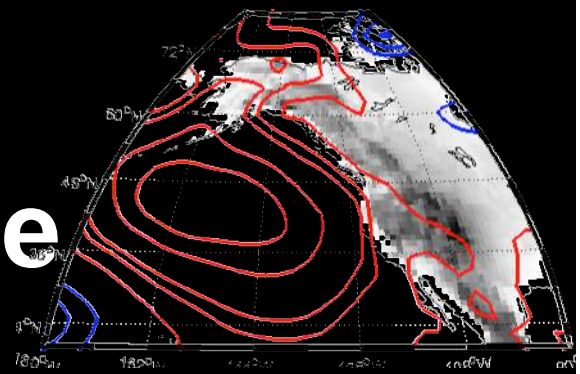
Pression en surface



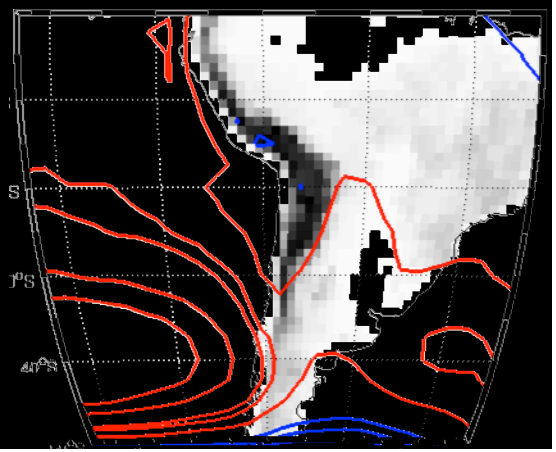
Himalayas



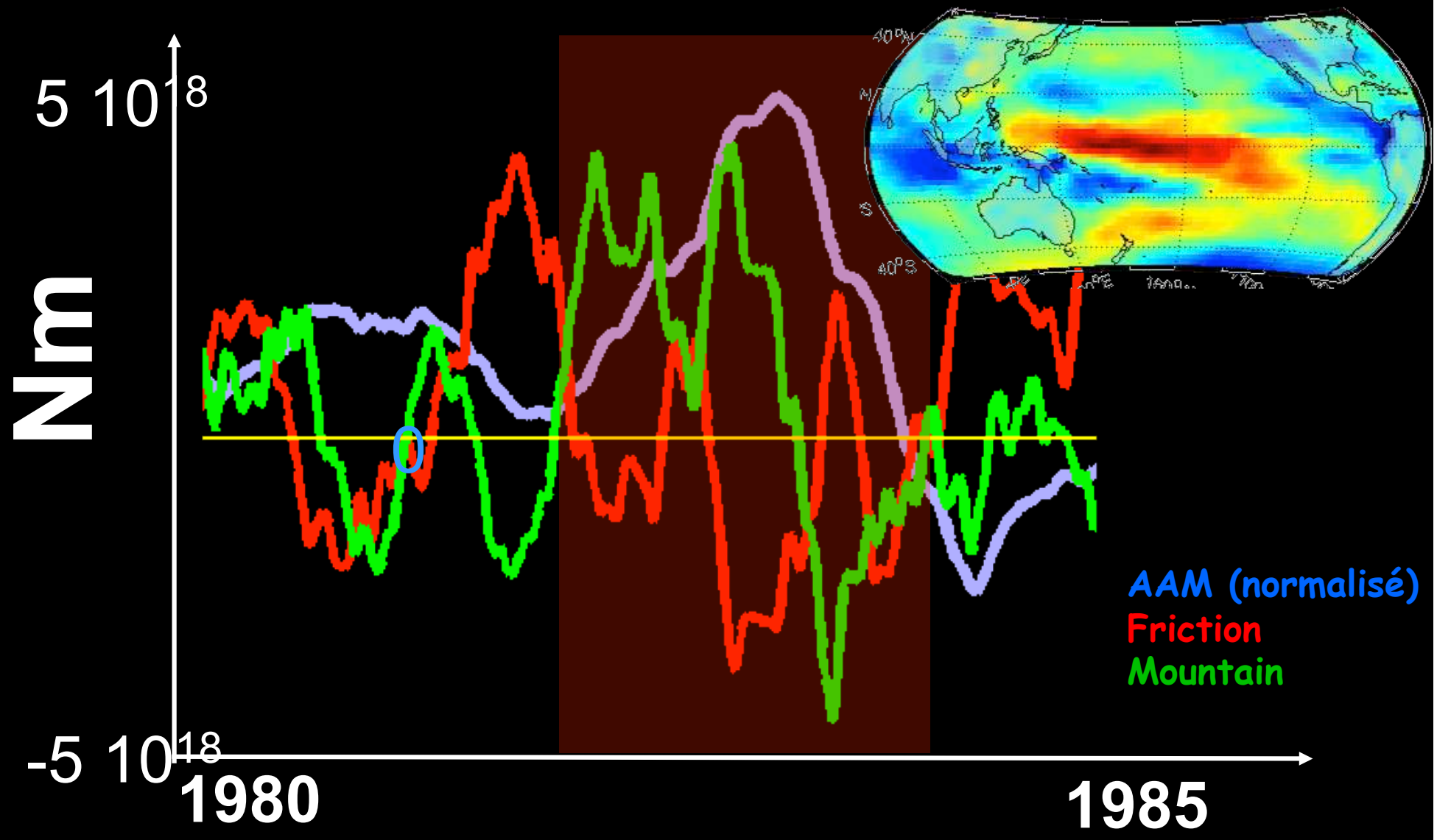
Rocheuses



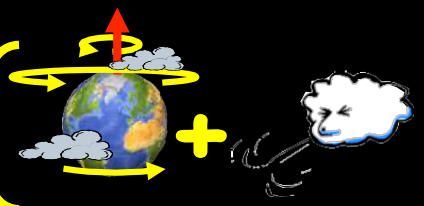
Andes

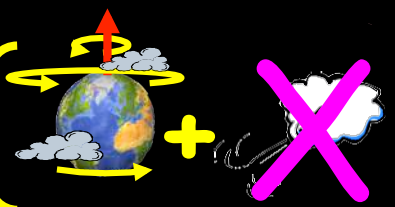
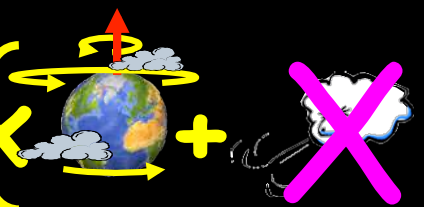
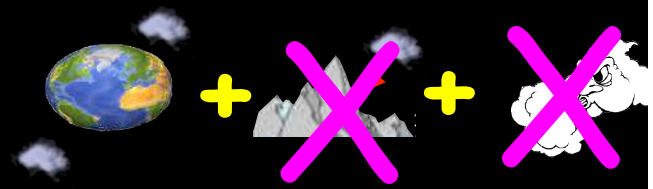


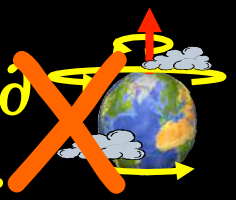
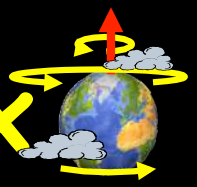
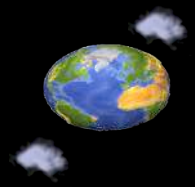
Cas d'école: l'effet du El-Nino



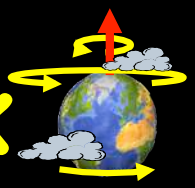
Bilan du moment cinétique équatorial

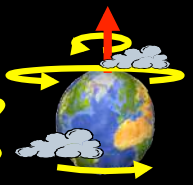
$\frac{d}{dt}$ () =

$\frac{\partial}{\partial t}$ () + W x () = 

$\frac{\partial}{\partial t}$  + W x  = 

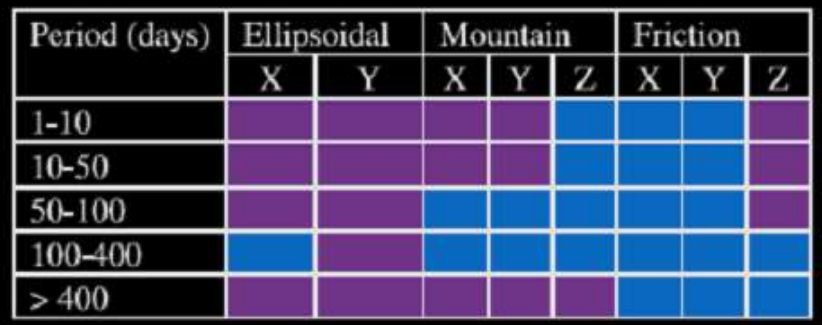
A échelle synoptique

W x  =

W x = W x 

Bilan de AAM Spectres Séries temporelles

Bilan du moment cinétique



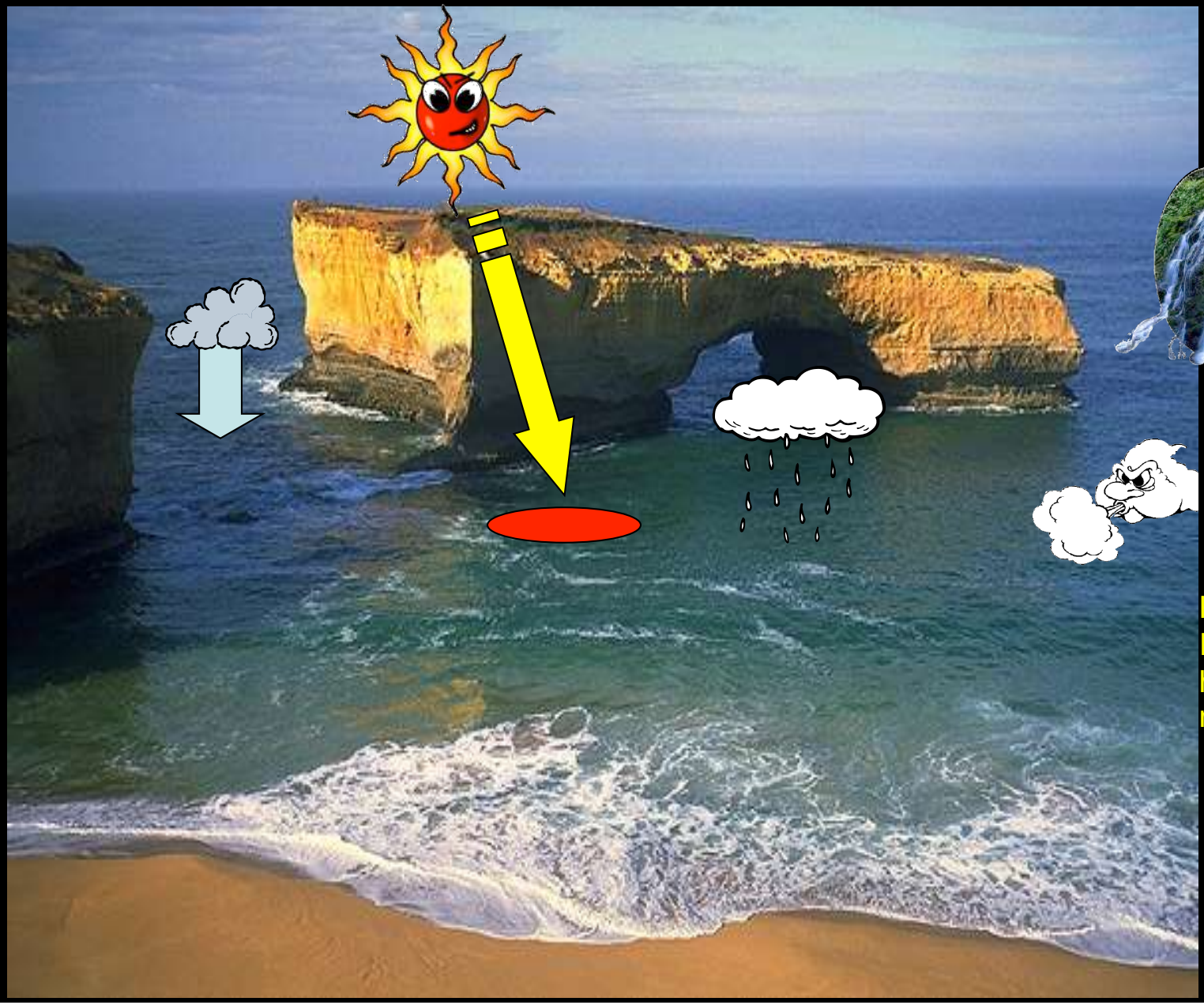
- 3 modèles en accord
- 2 modèles en accord
- Modèles en désaccord

- 3 modèles conservent le AAM
- 2 modèles conservent AAM
- 1 modèle conserve le AAM
- Pas de conservation du AAM

IV. Les modèles océaniques

Comment ça marche…

Modèles océaniques



Pression atmosphérique (6h)

Vent
Température de surface

1 jour

Precipitations
Input hydro
humidité
nébulosité

1 month (climat.)

Les équations de base

- Continuité (conservation de la masse)
- Conservation de l'énergie
- Conservation de la salinité
- Conservation de la quantité de mouvement
- Condition aux limites:
  - Surface libre ou toit rigide
  - Imperméabilité des interfaces

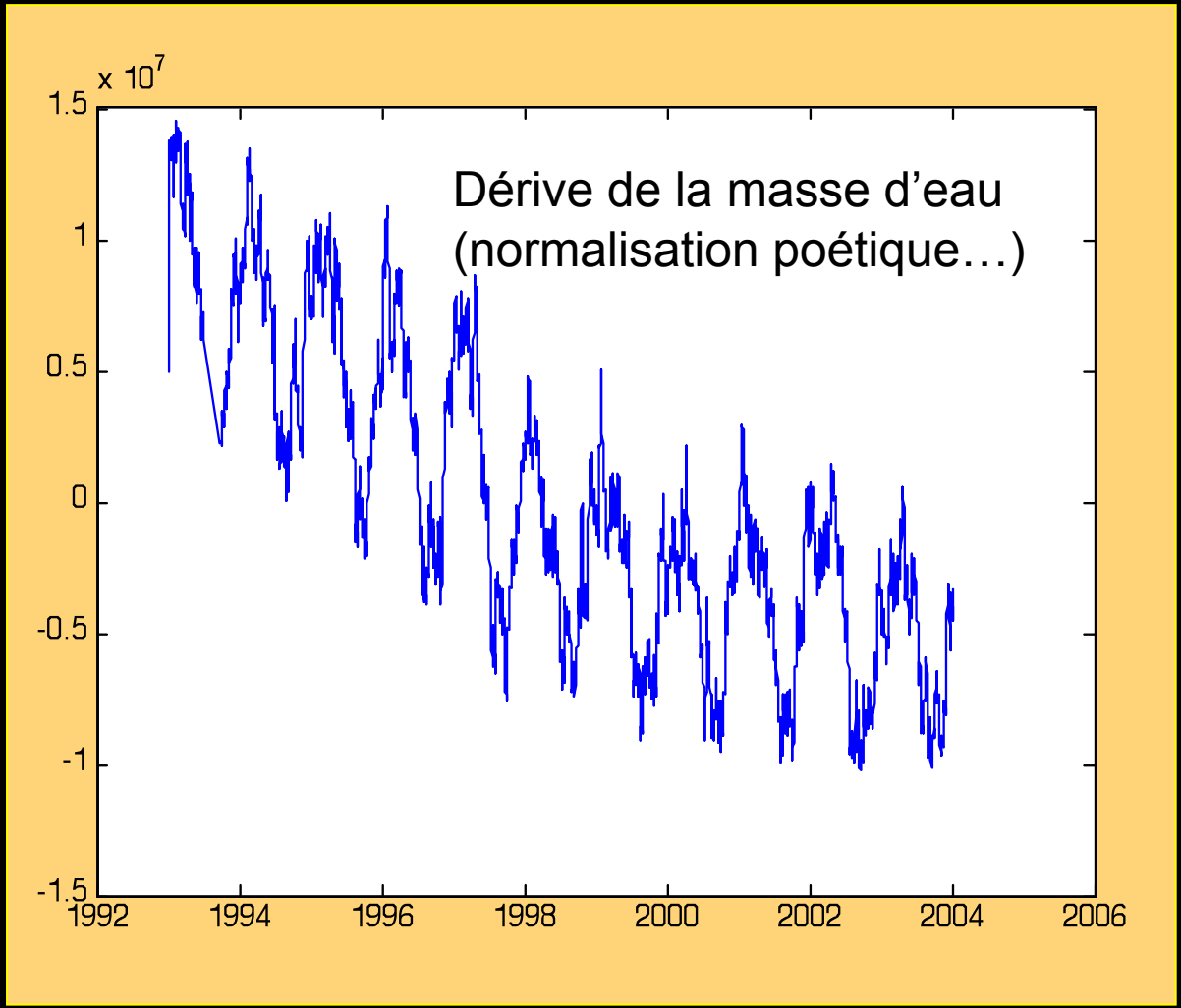
Les modes des modèles océaniques

- Mode rapide
  - La densité de l'eau est supposée constante
  - Mouvement 2D barotrope
  - Pas de temps très court (peut aller jusqu'à la minute ou moins)
- Mode lent
  - On calcule tout.
  - Pas de temps long (de l'heure à quelques jours).
- Le mode lent remet à jour les variables du mode rapide tous les quelques jours.

L’approximation de Bousinesq

"il faut savoir que dans la plupart des mouvements provoqués par la chaleur sur nos fluides pesants, les volumes ou les densités se conservent à très peu près, quoique la variation correspondante du poids de l'unité de volume soit justement la cause des phénomènes qu'il s'agit d'analyser . De là résulte la possibilité de négliger les variations de la densité, là où elles ne sont pas multipliées par la gravité g, tout en conservant, dans les calculs, leur produit par celle-ci"

L'approximation de Bousinesq



Conséquence, c'est la volume qui est conservé, et non la masse…

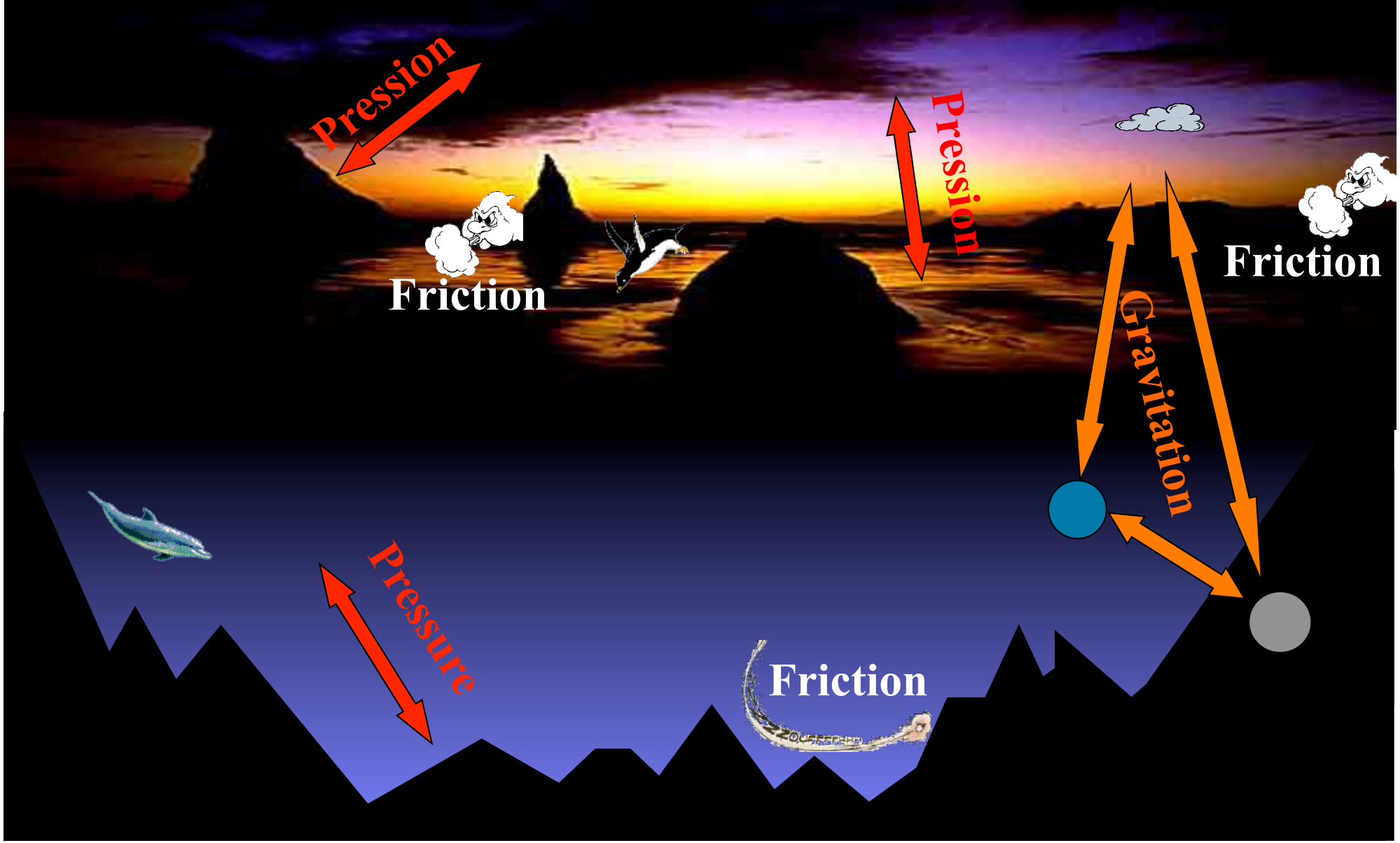
Correction classique : on impose une masse constante, ce qui n'est pas top.

IV. Les modèles océaniques

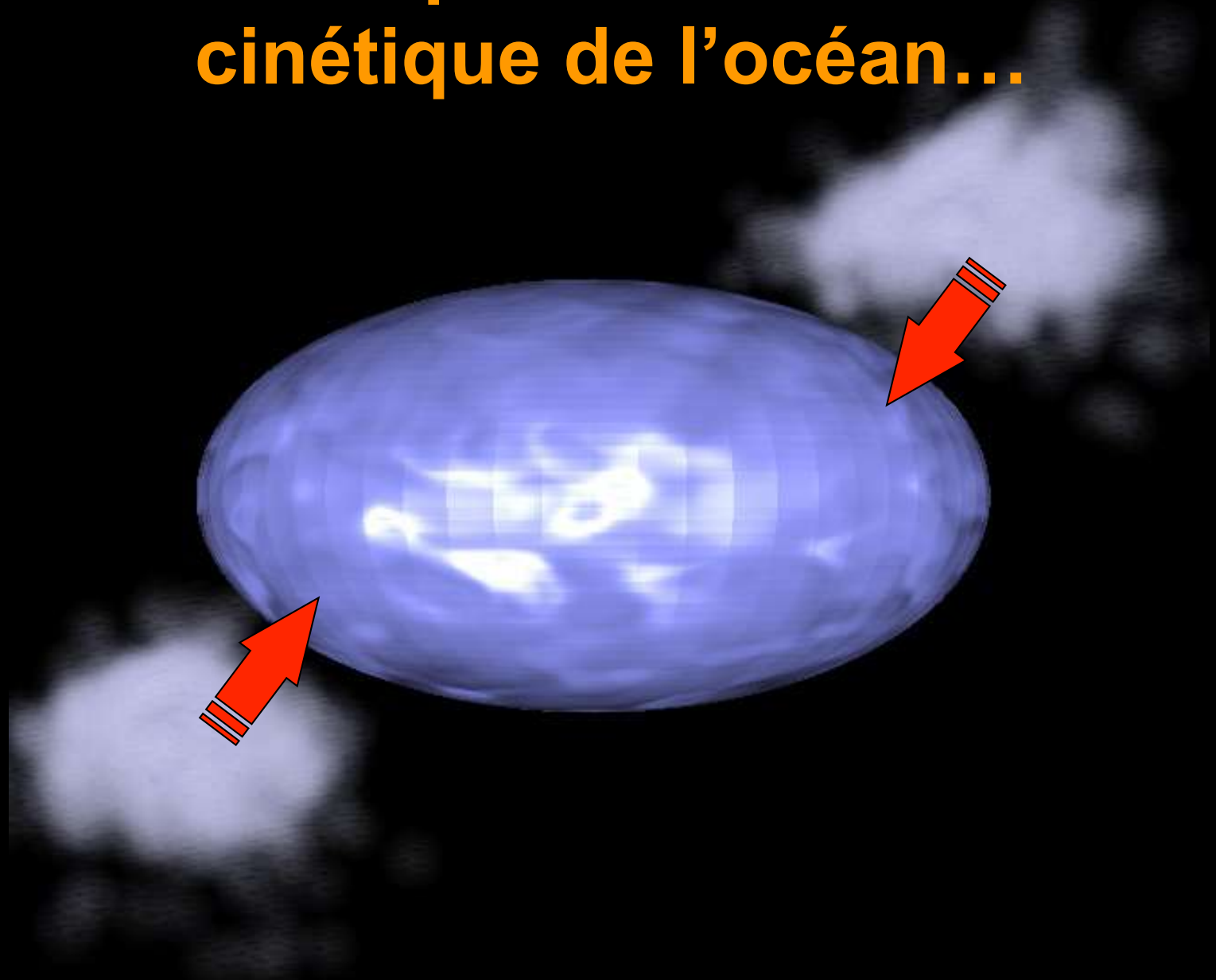
L'excitation par la pression…

Il y a un peu plus d'équations, je vous les met?

Interaction Terre océan atmosphère



Effet très important sur le moment cinétique de l'océan…



Mais n'est pas intégré dans le modèle

Bilan du moment cinétique de l'océan

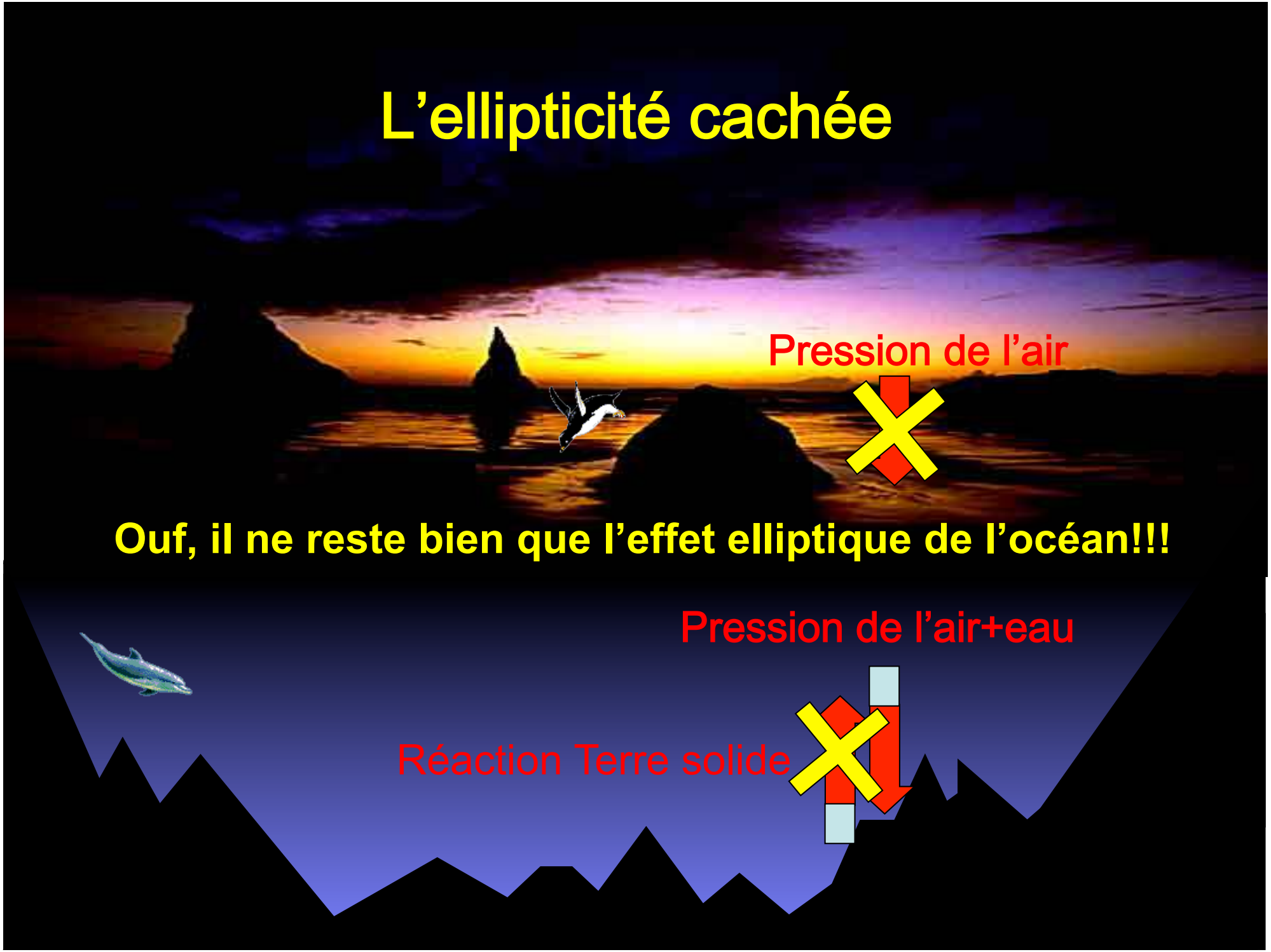
Terre solide

pression

friction

Problème: les modèles d'océan ignorent que l'océan est elliptique dans l'effet de la pression atmosphérique.

L'ellipticité cachée



La réponse à la pression atmosphérique

- Les modèles d'océan ne considèrent pas le forçage par la pression atmosphérique.
- On prend généralement l'hypothèse du baromètre inversé.. Ou pas…

La réponse à la pression atmosphérique

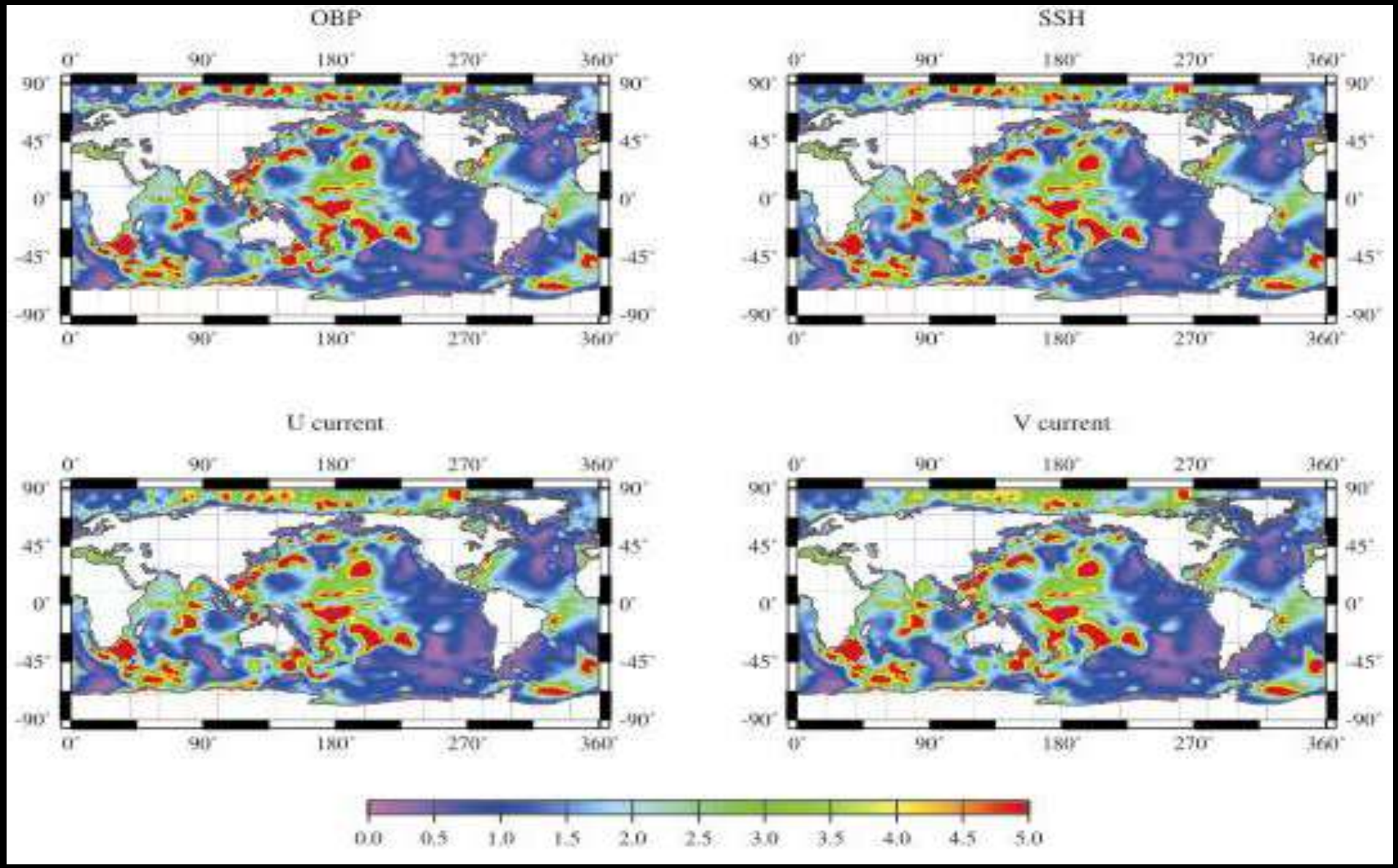
La réponse à la pression atmosphérique

!!! Cela ne veut PAS dire que la pression est constante au cours du temps !!!

La réponse à la pression atmosphérique

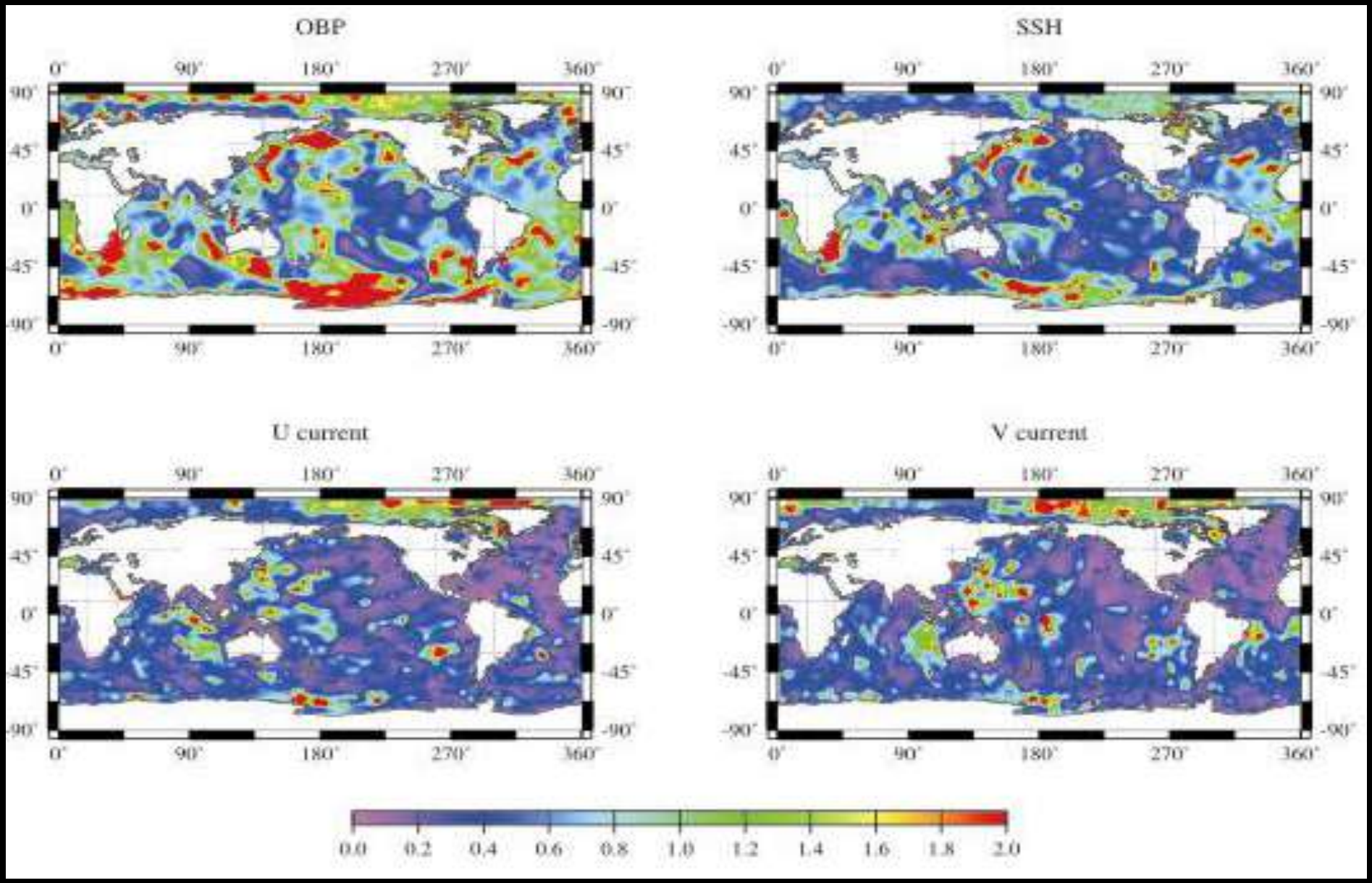
!!! Cela ne veut PAS dire non plus que la pression est constante au cours du temps !!!

Ecarts au baromètre inversé



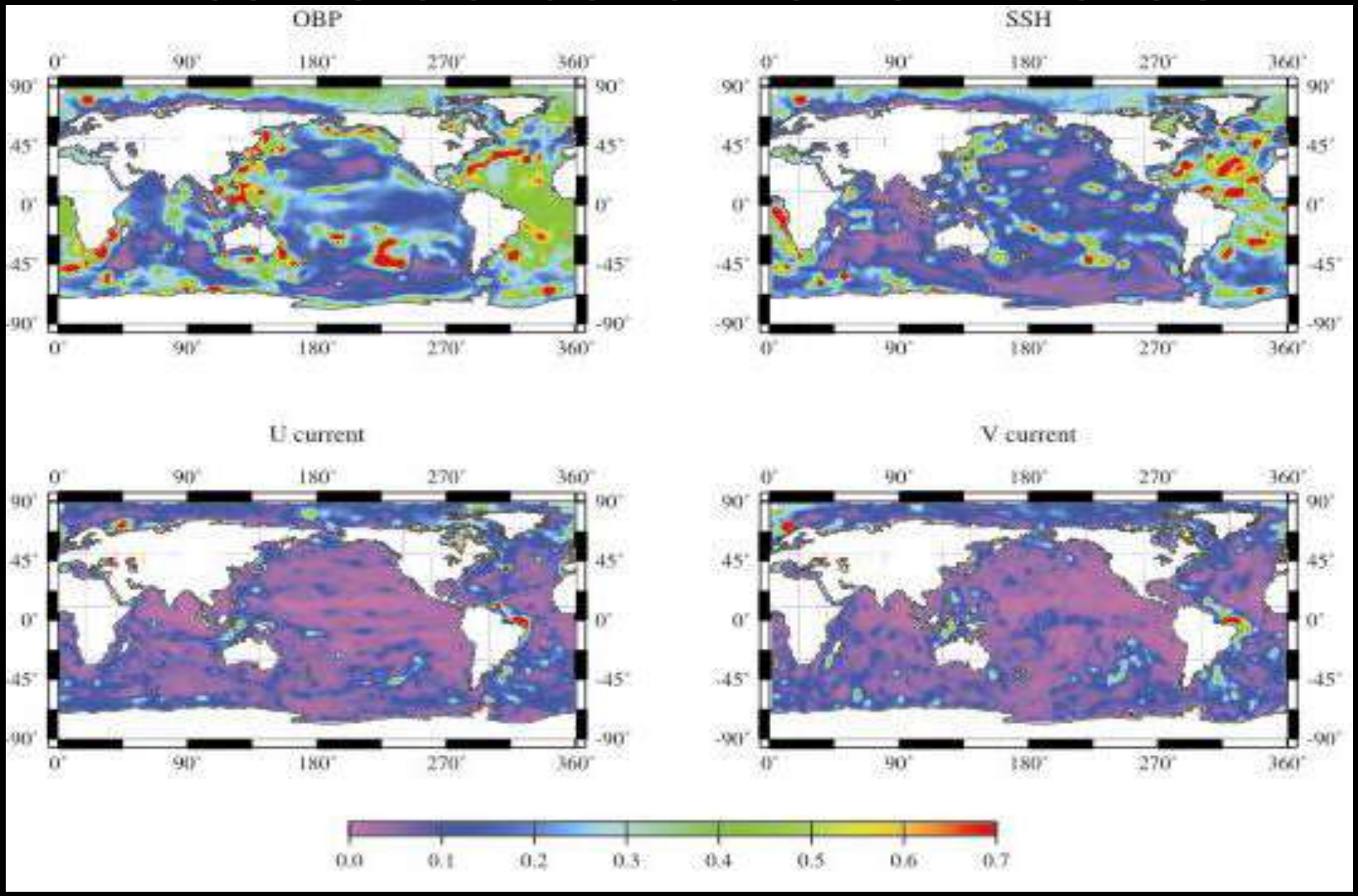
1 jour

Ecarts au baromètre inversé



10 jour

Ecarts au baromètre inversé



60 jour

Baromètre inversé et rotation de la Terre: le moment cinétique

- Le but est d'estimer l'effet de l'océan et de l'atmosphère en n'utilisant uniquement des données atmosphériques.
- Comme seule la pression est considérée, cette méthode peut être utilisée en plus d'un modèle océanique qui n'inclut pas le forçage « pression ».

Baromètre inversé et rotation de la Terre: le moment cinétique

- La pression sur chaque point de l'océan est la pression moyenne sur l'océan.
- La pression sur les continents est inchangée.

Terme de masse

- Il n'y a pas de mouvement dans l'océan associé au forçage de pression.

Terme de mouvement

Et pour le moment de force?

Pression moyenne sur les océans

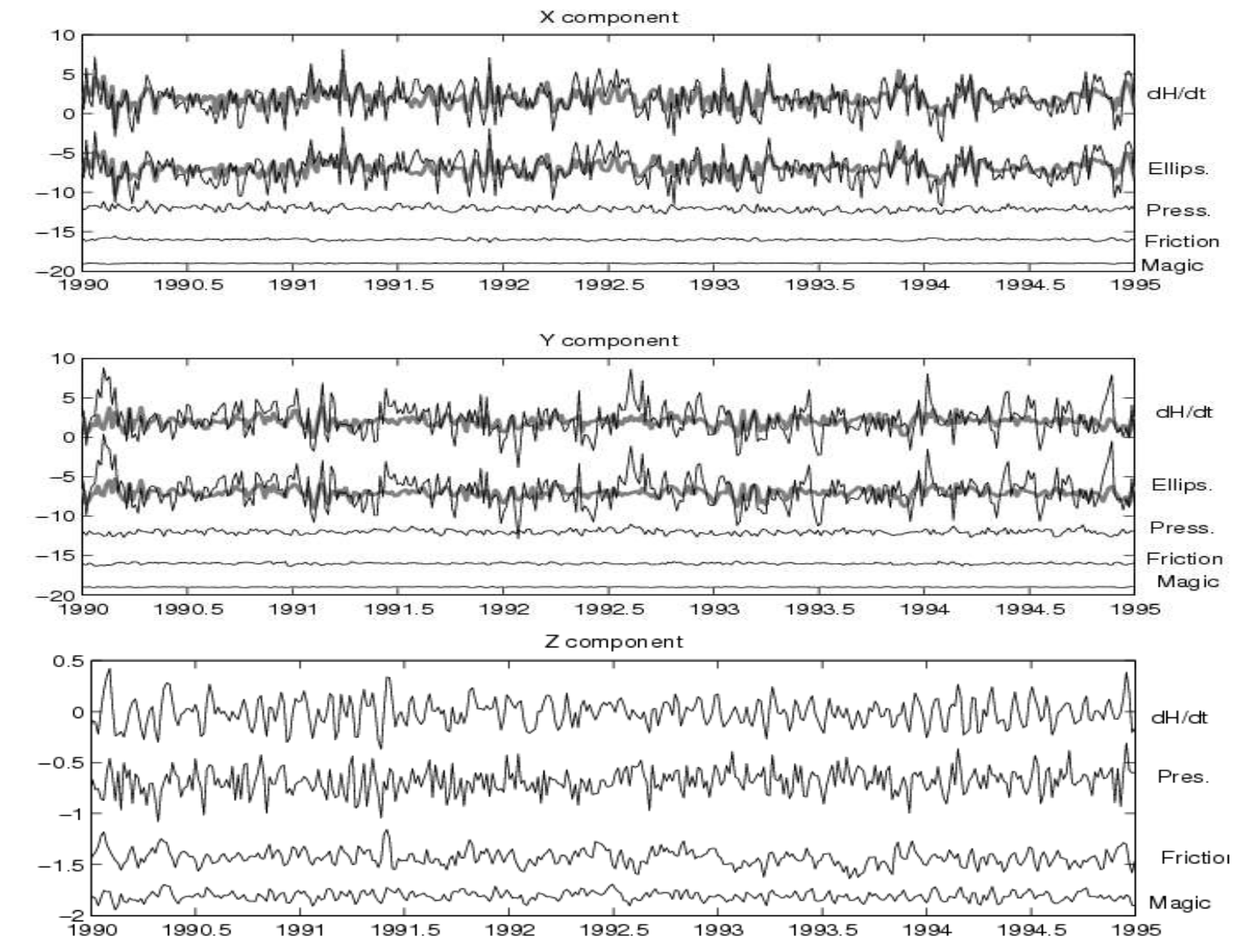
Non modifié
L'océan finira bien par transmettre…

Ben oui, c'est de la triche… Et alors?

Problème!!! Cela ne conserve pas le moment cinétique…

Uniquement sur les continents

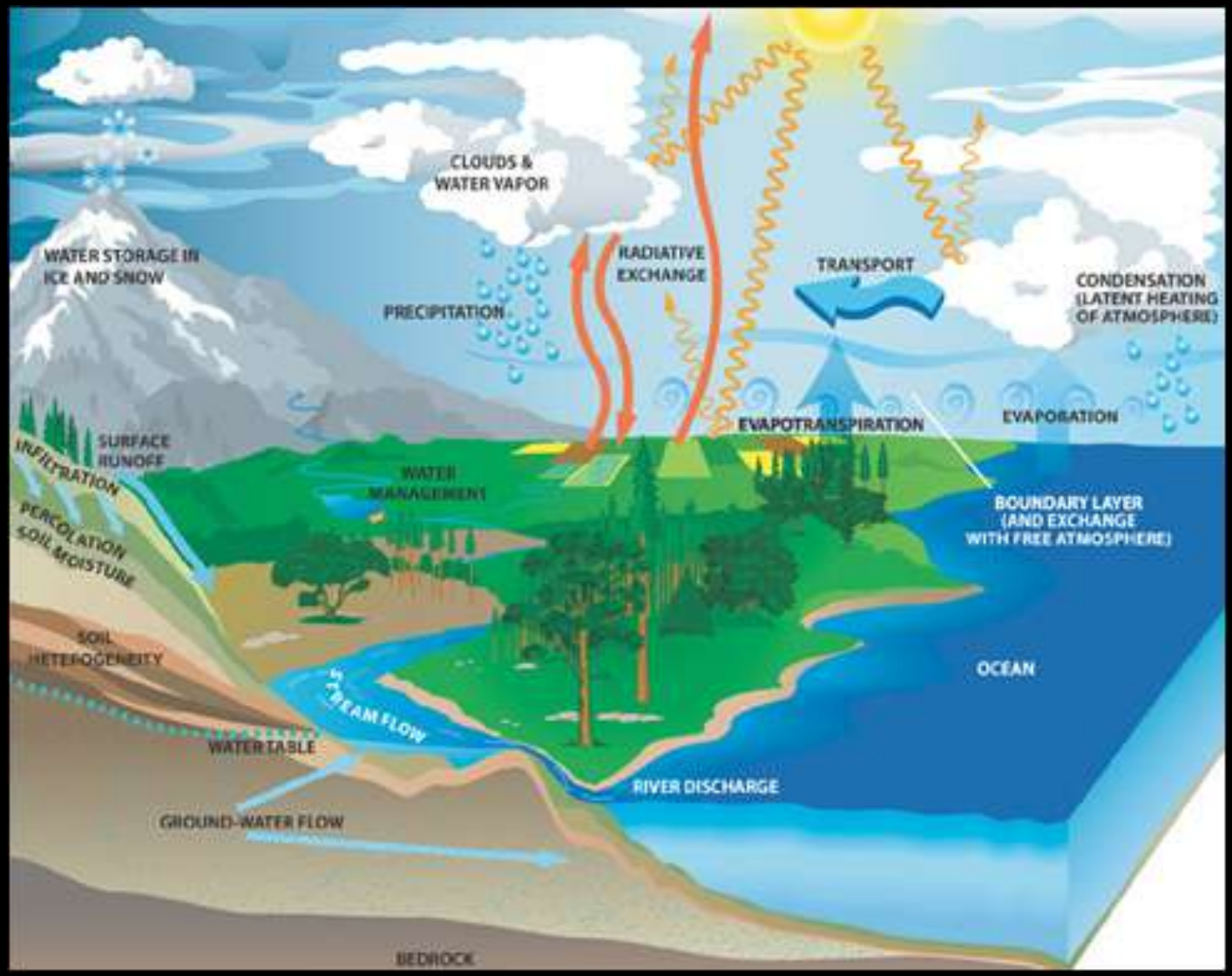
Baromètre inversé et rotation de la Terre: le moment de force



IV. Les modèles hydrologiques

Juste quelques mots…

Le cycle de l'eau



Nappes phréatiques
Humidité du sol
Eau de surface
- lac
- mers
- riviers

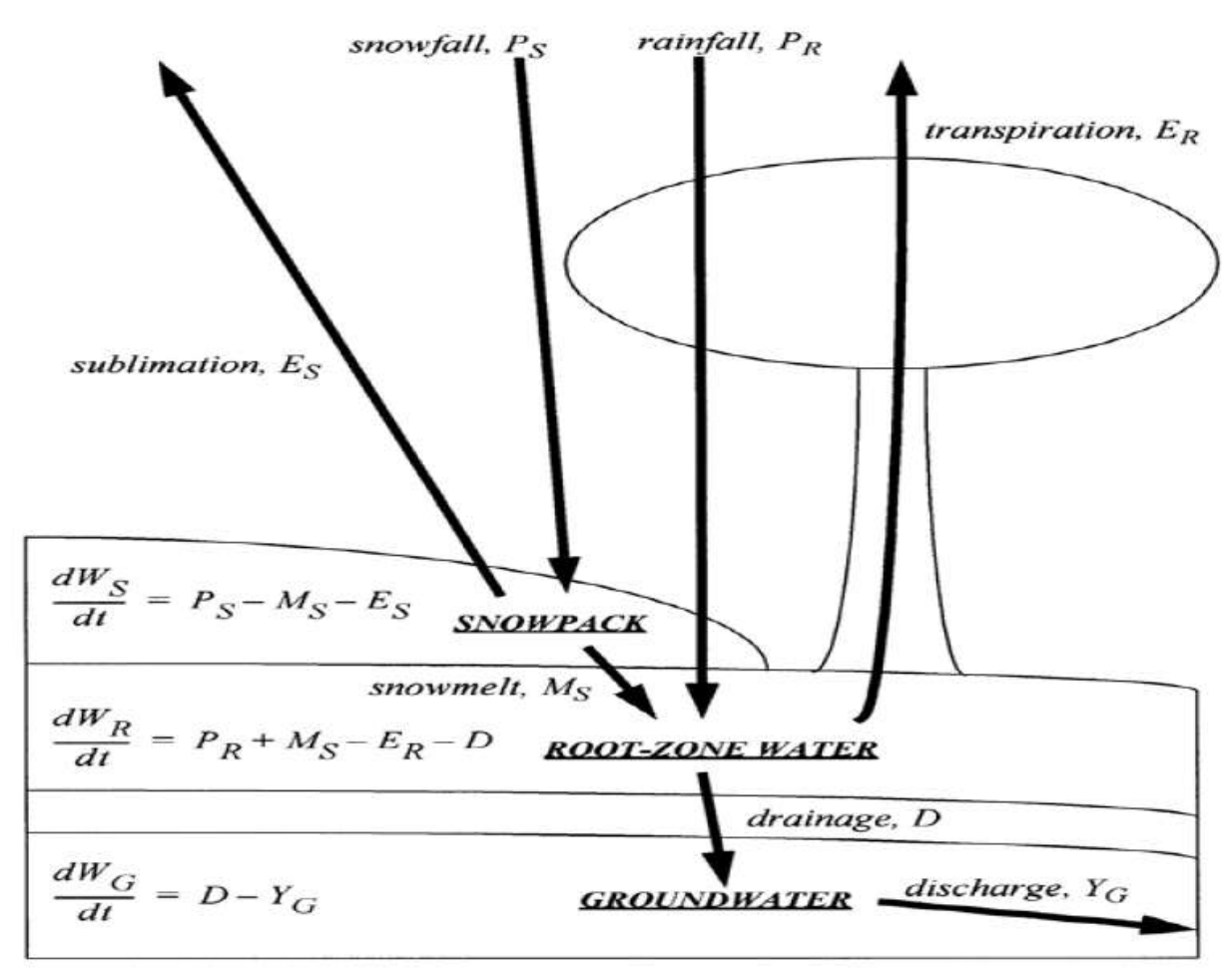
Neiges
Glaciers
(Végétation)

Deux types de données

- Sorties de modèles atmosphériques.
  - Bonne résolution temporelle
  - cohérent avec les modèles atmosphériques
- Modèles hydrologiques externes
  - Données mensuelles
  - Mieux contraints par les données hydrologiques.

Le modèle LAD

Conservation de la masse
Conservation de l'énergie



Merci à un donateur inconnu…

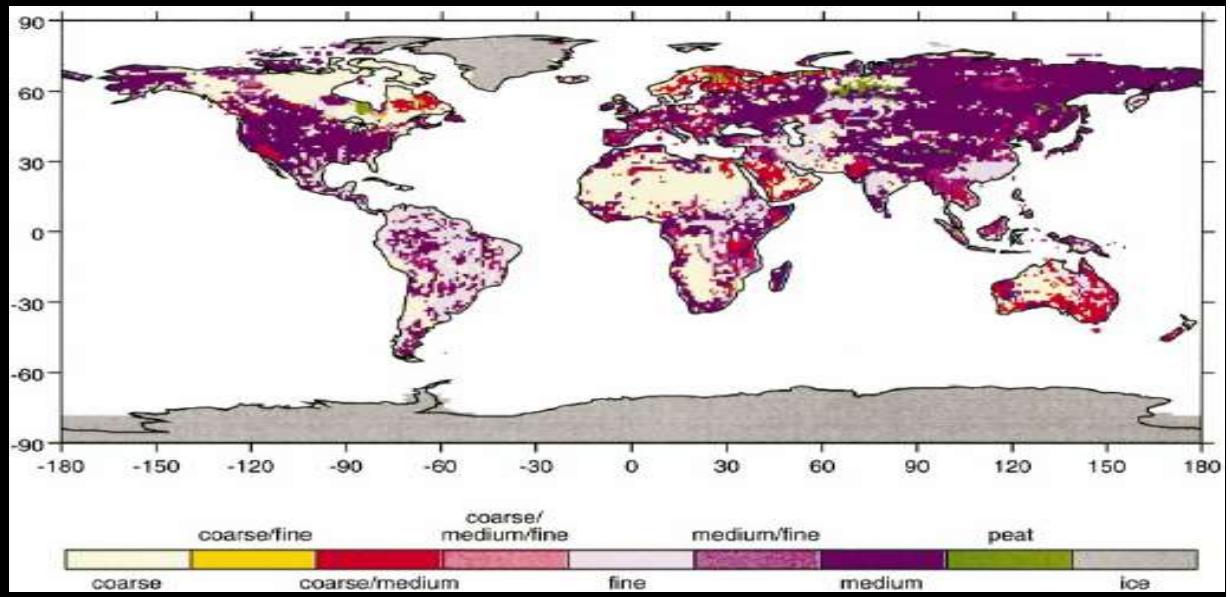
Le modèle LAD

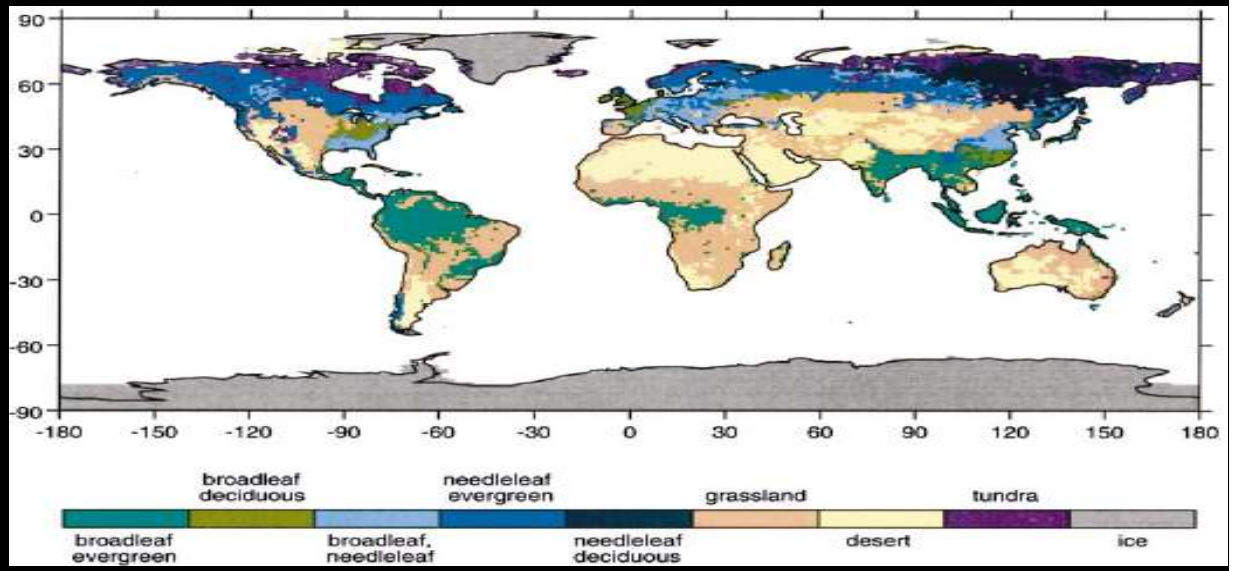
Paramètres:

- Modèle de sol
- Modèle de couvert végétal

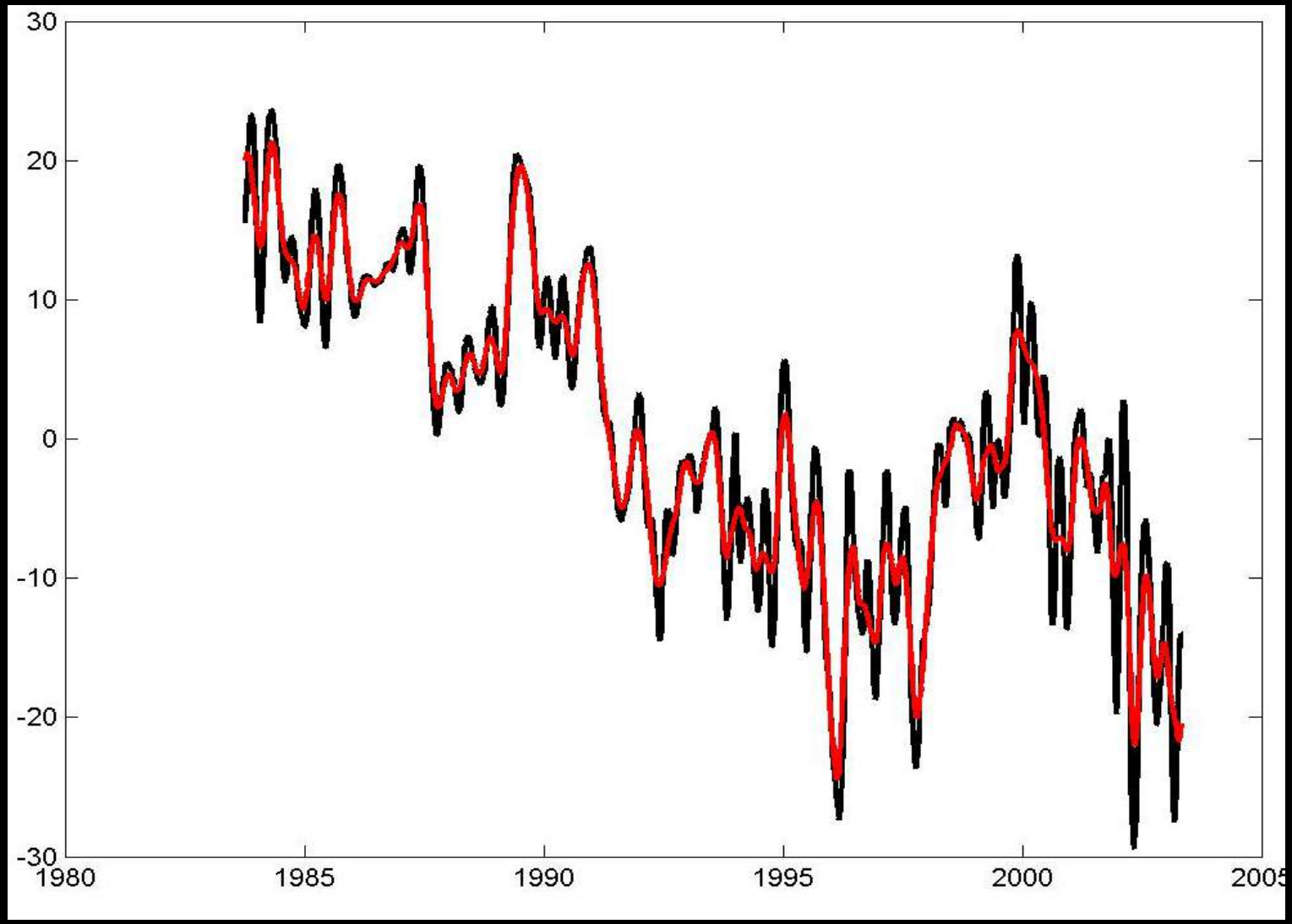
Input:

- Modèles météo
- Données hydrologiques (assimilation)

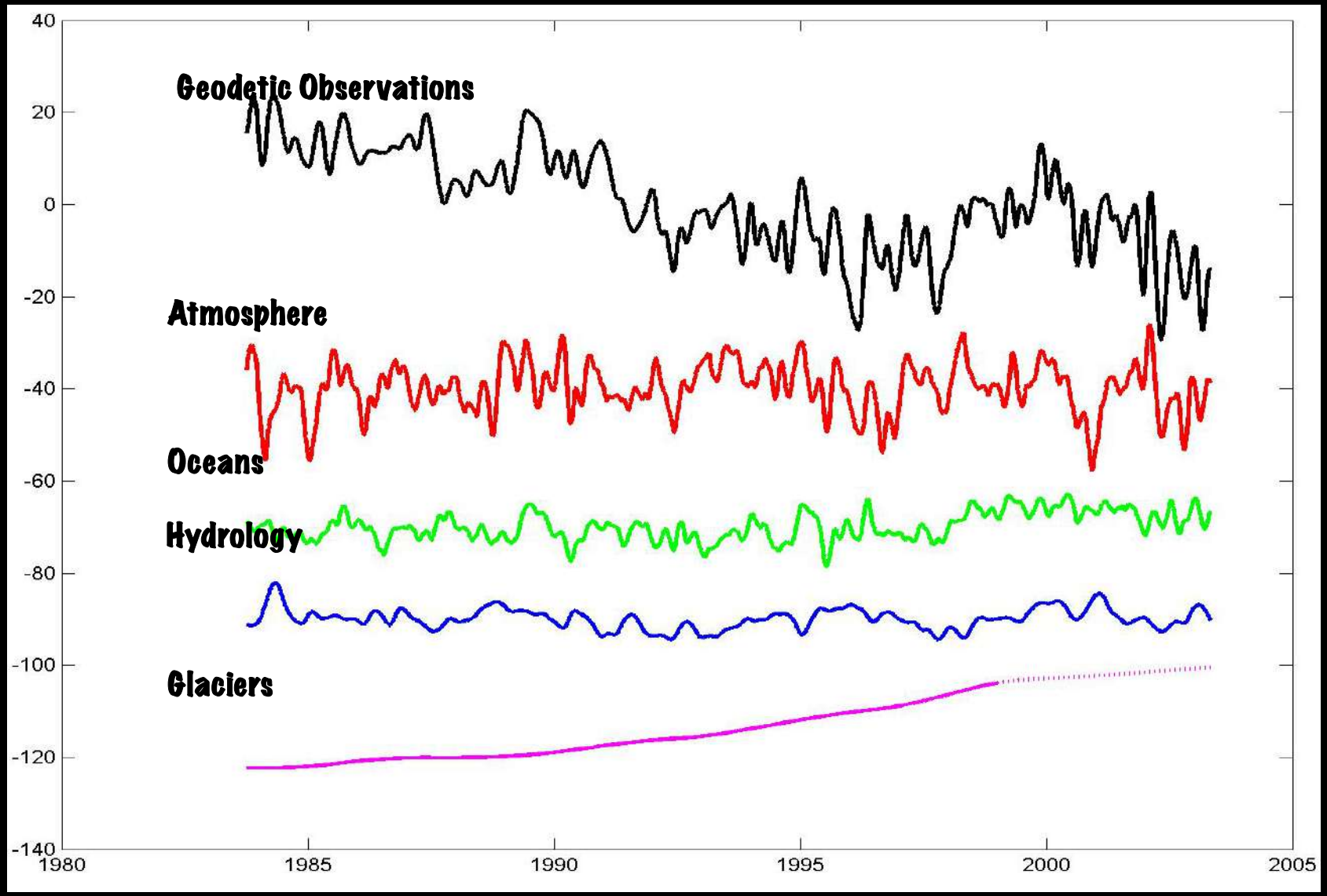




Les variations de J_2



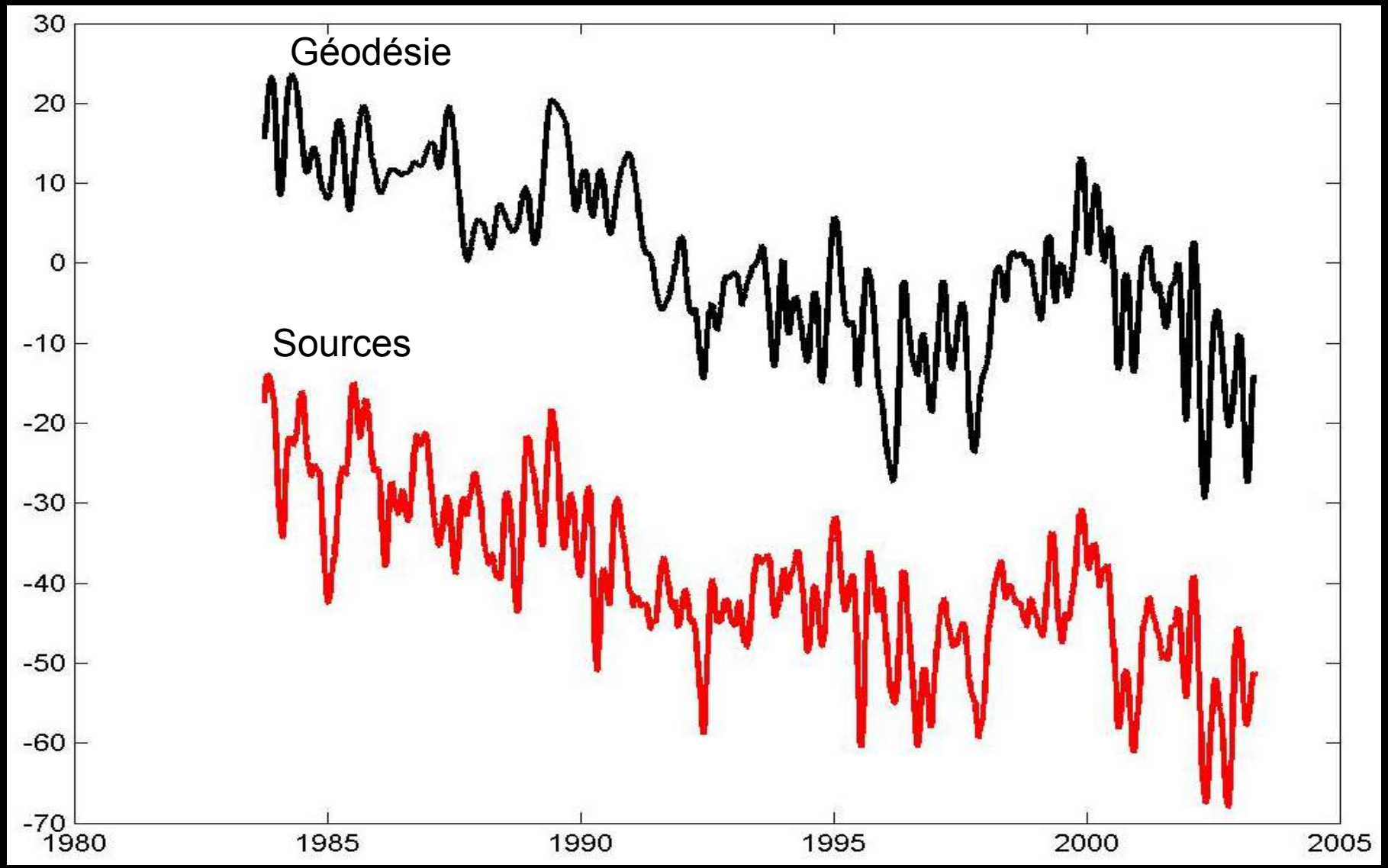
Les termes «sources»



contributions au J_2 (10^{-11})

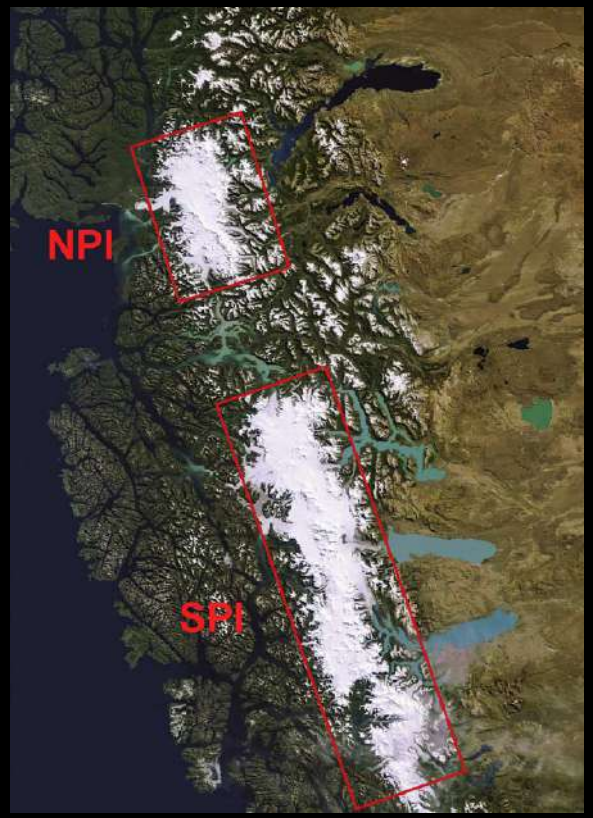
temps (années)

Comparaison



temps (années)

Glaciers de Patagonie



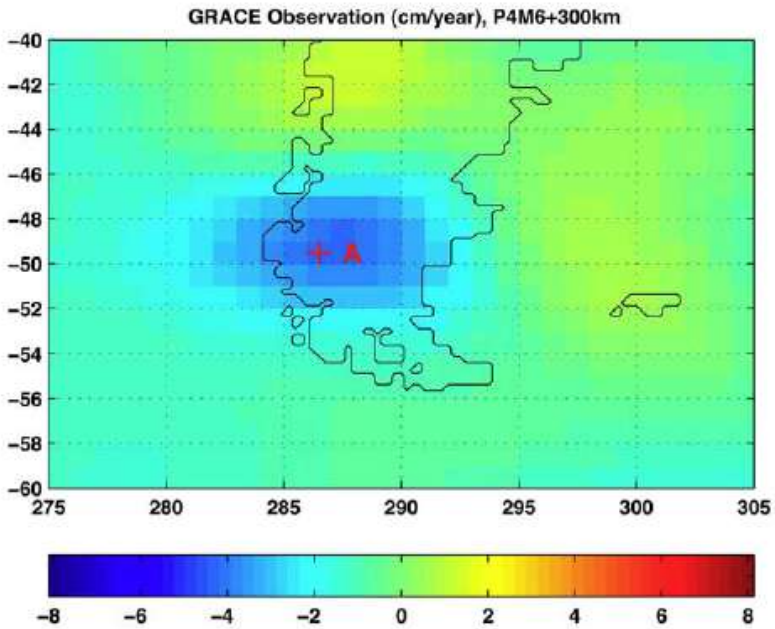


Figure 2. GRACE linear mass rates (in units of cm of equivalent water height change per year, cm/yr) for April 2002 to December 2006, in the PIF region. The 2-step filtering involves application of a decorrelation filter to remove noise stripes at certain SH orders, followed by 300 km Gaussian smoothing. Mass rates are estimated from the 53 time series values at each grid point using least squares to fit the linear trend, seasonal, and tidal alias sinusoids.

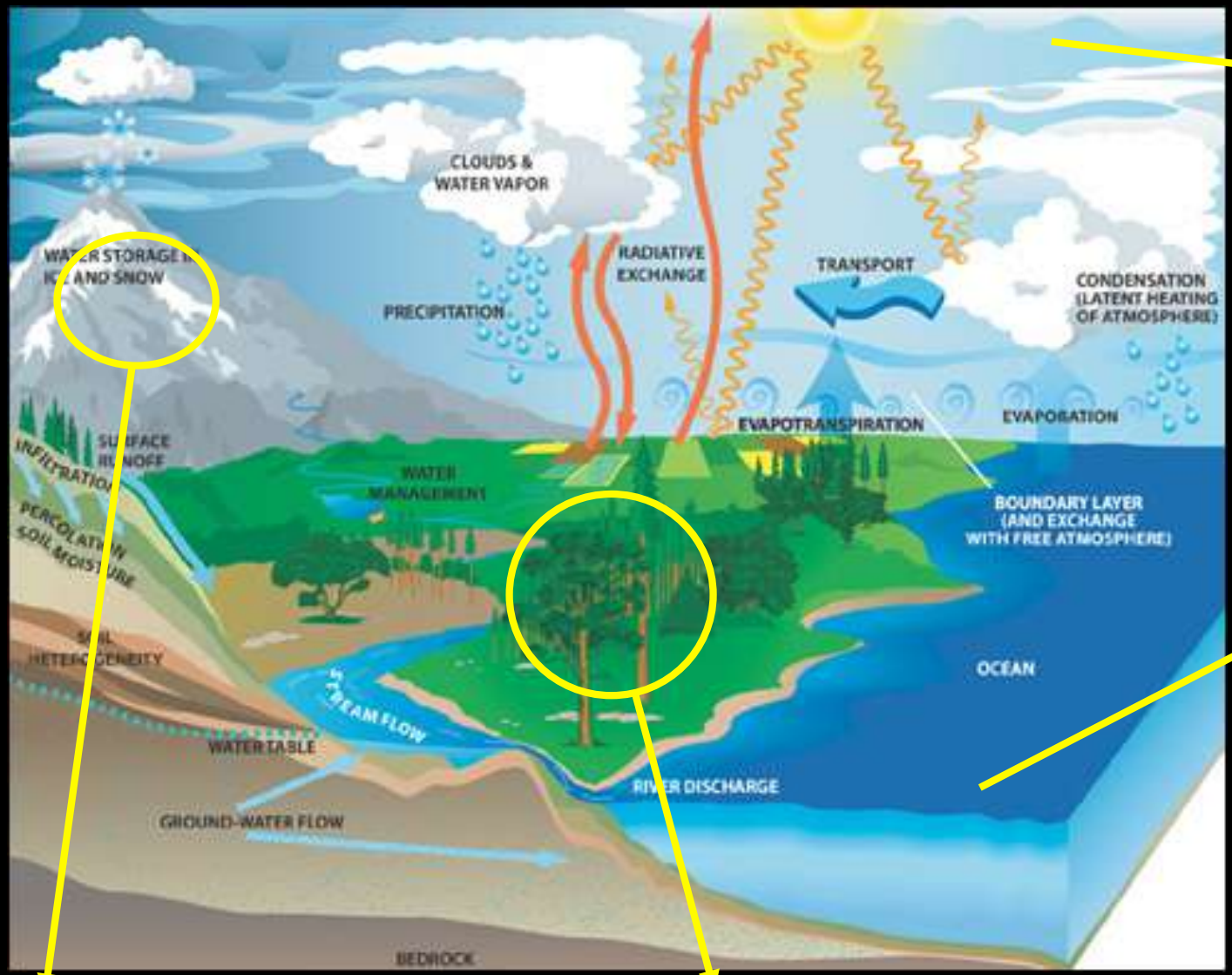
Chen et al., 2007.

V. Les problèmes de cohérence

Conservation de la masse…

Et encore, ici, on est sage, on ne parle que du système climatique…

Le cycle de l'eau



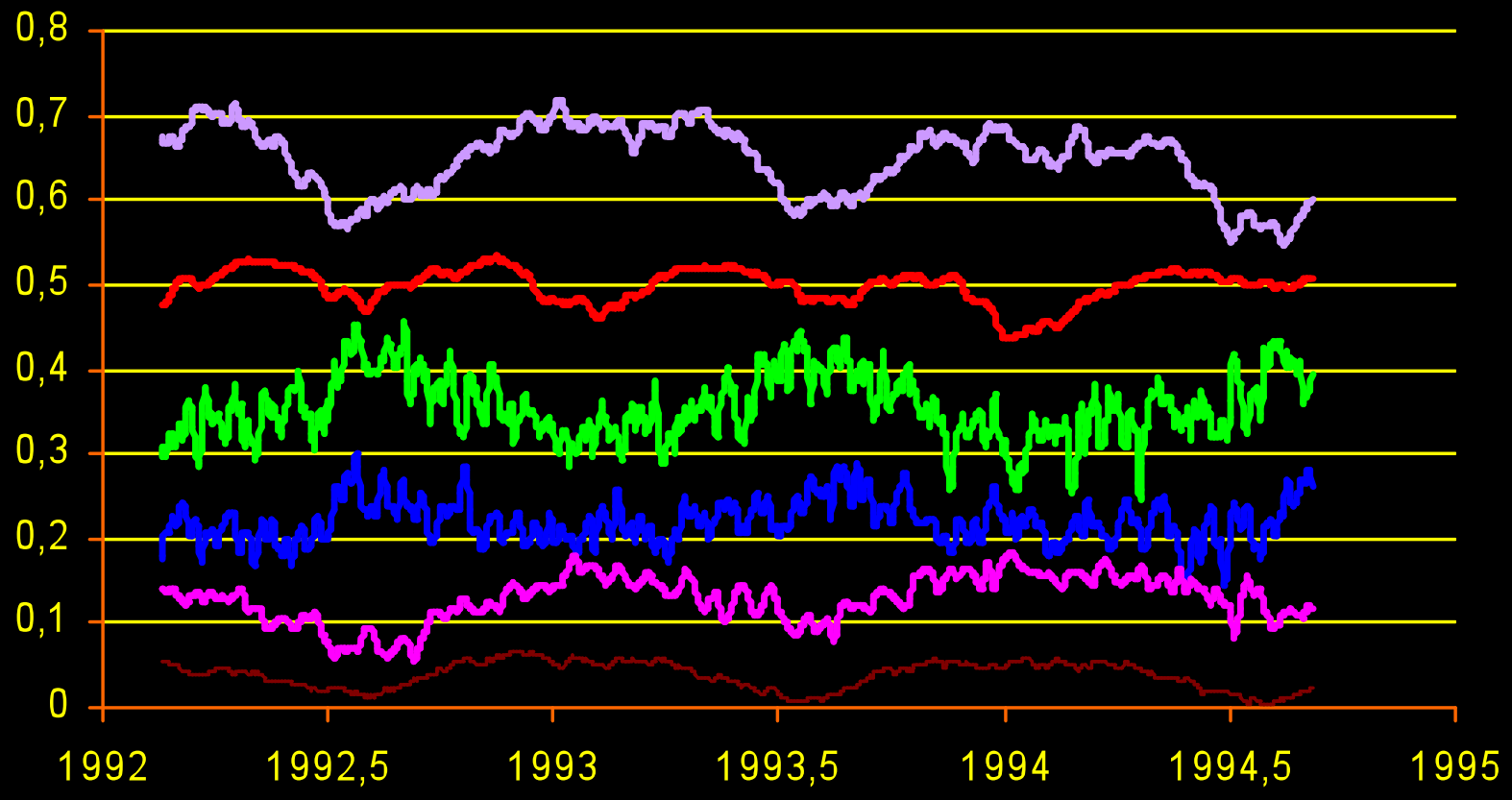
Perd de la masse

Boussinesq: masse non conservée

Mal connu

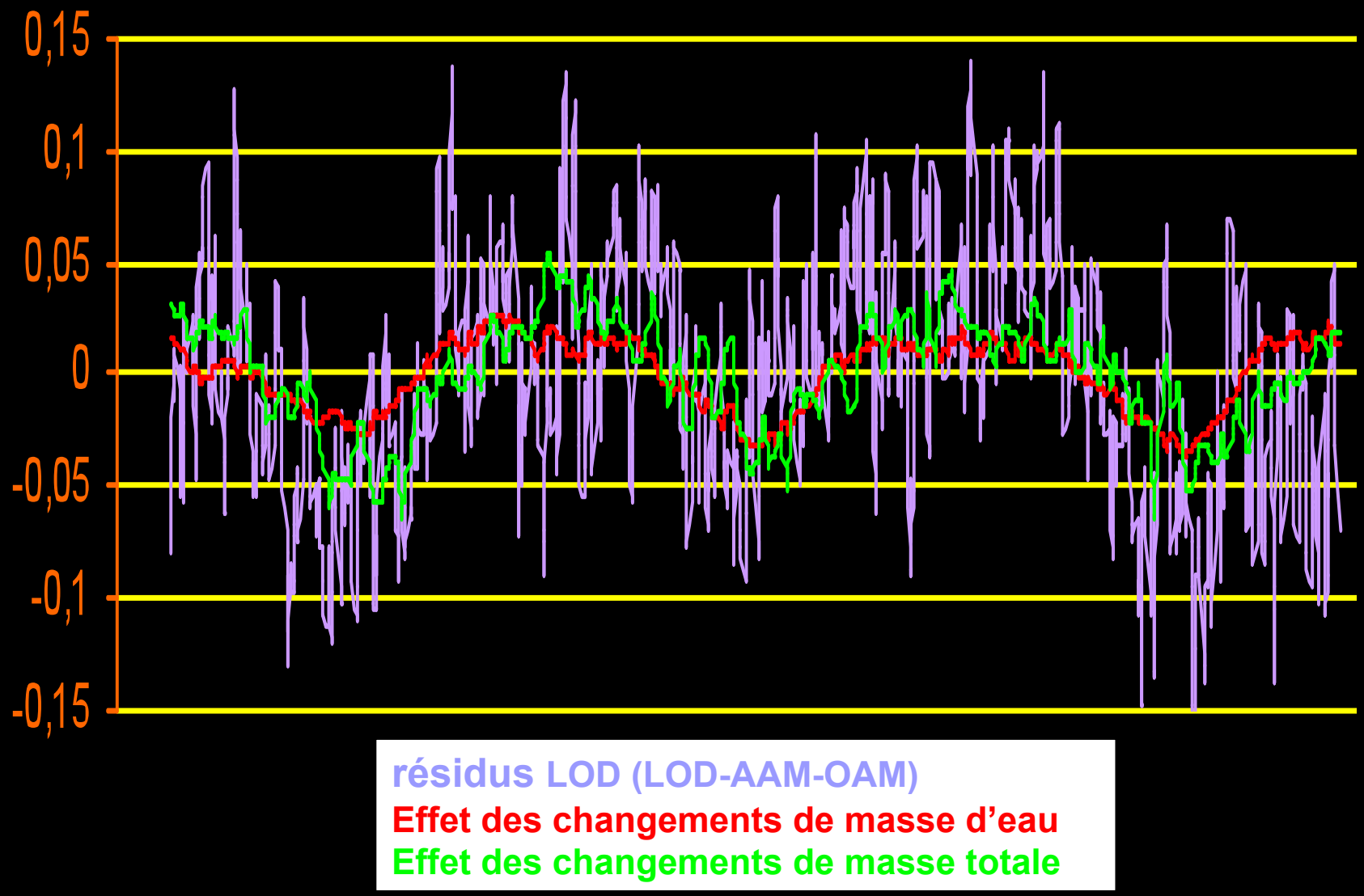
Pour ainsi dire non considéré

Problèmes de conservation de masse

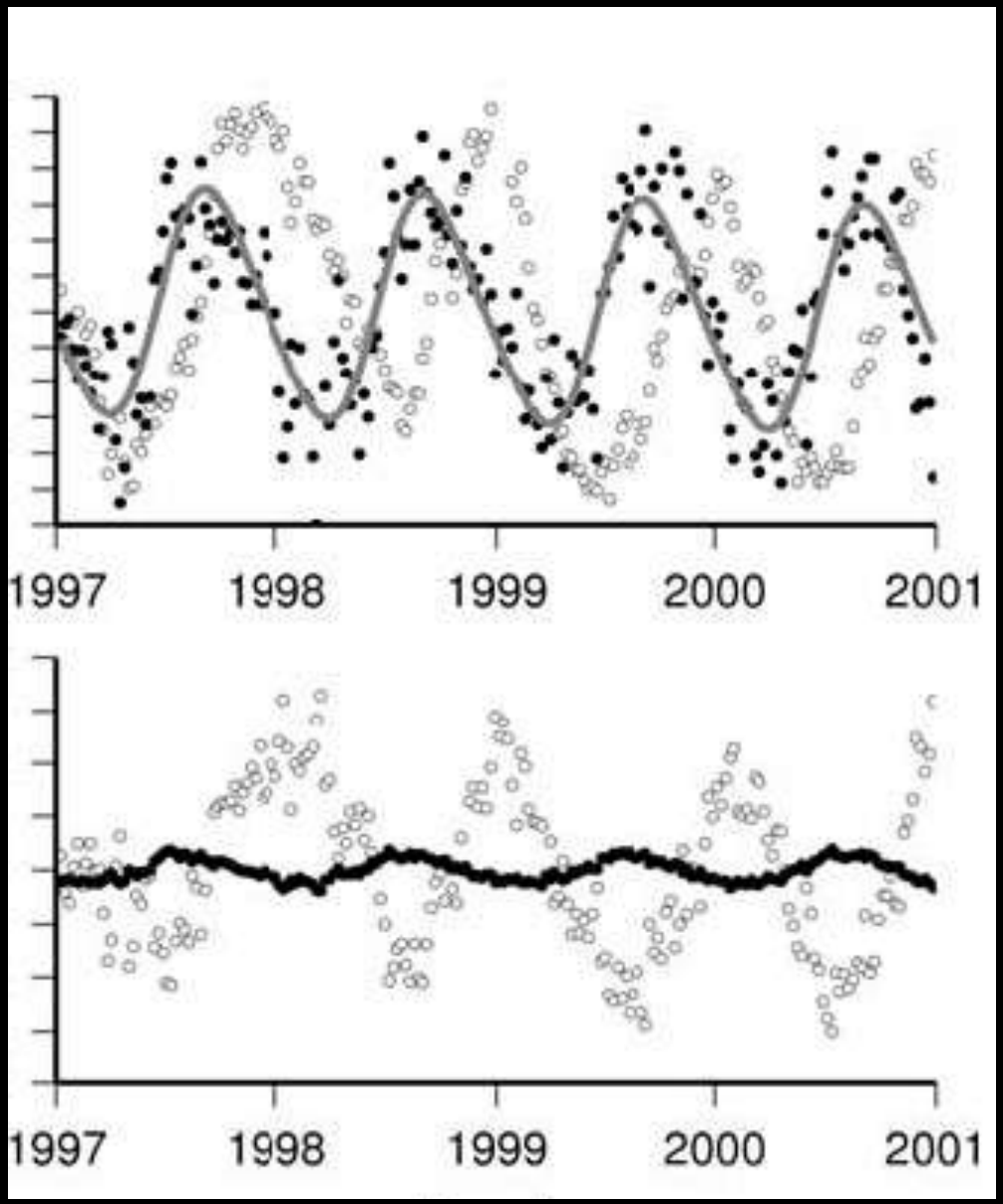


AAM Motion term (up to 10 mB)
AAM stratospheric × 10
AAM Matter term × 10
OAM × 10
Change in atmospheric mass × 10
Change in atmospheric water content × 10

Problèmes de conservation de masse



Autre effet: le niveau moyen des mers

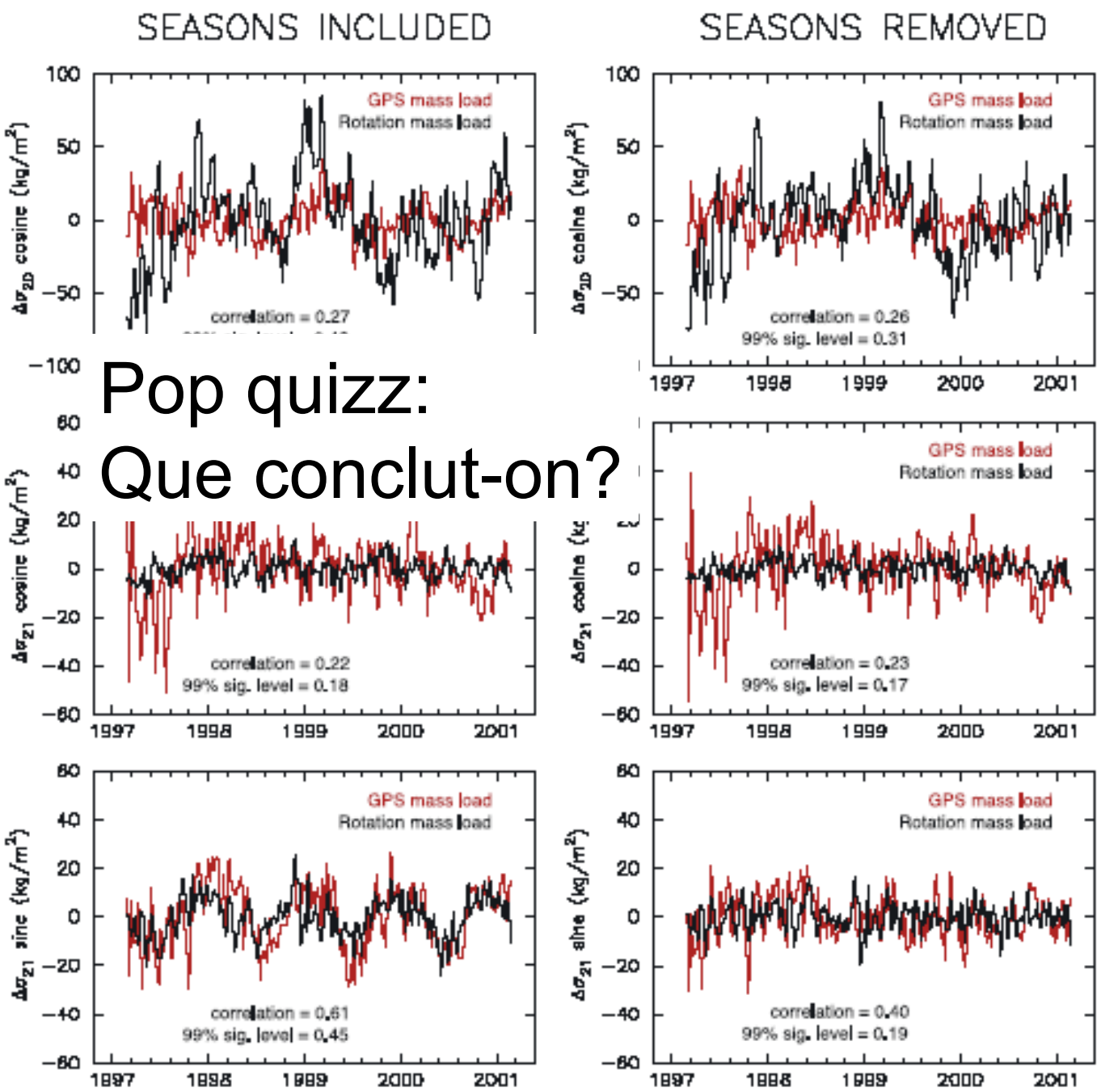


o sans correction de masse
• avec correction de masse
- observations(TOPEX/GRACE)

Clarke, P. J., D. A. Lavalle´e, G. Blewitt, T. M. van Dam, and J. M. Wahr (2005), Effect of gravitational consistency and mass conservation on seasonal surface mass loading models, Geophys. Res. Lett., 32, L08306, doi:10.1029/2005GL022441

Et si on prenait la masse de la gravimétrie?

- Mauvaise idée…
  - la dynamique est « forcée » par les différences de pression
  - introduire une masse indépendante violerait la conservation du moment cinétique
- par contre, les masses pourraient être assimilées dans les modèles.
- mais il faudrait pouvoir séparer…

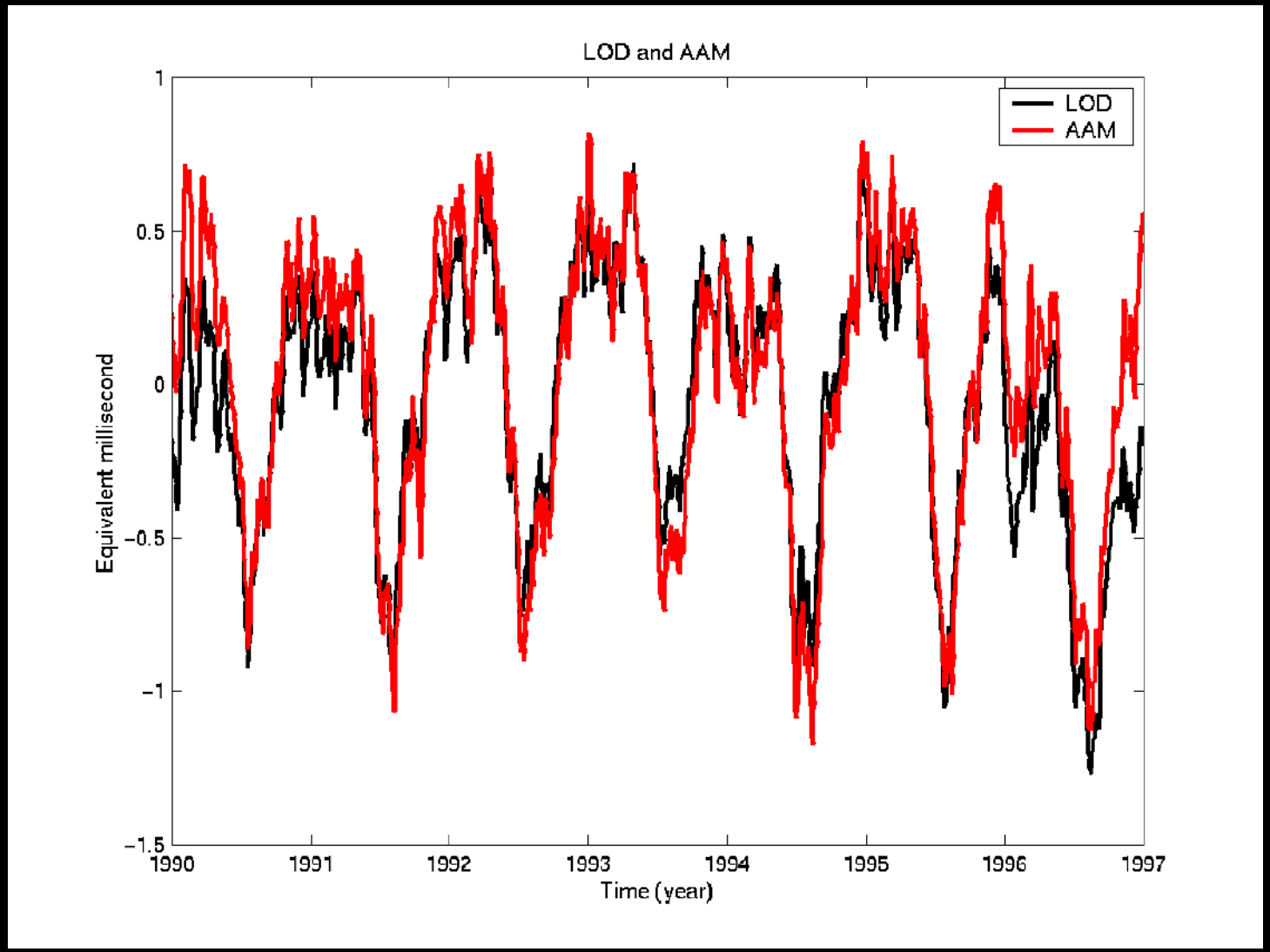


Pop quizz:
Que conclut-on?

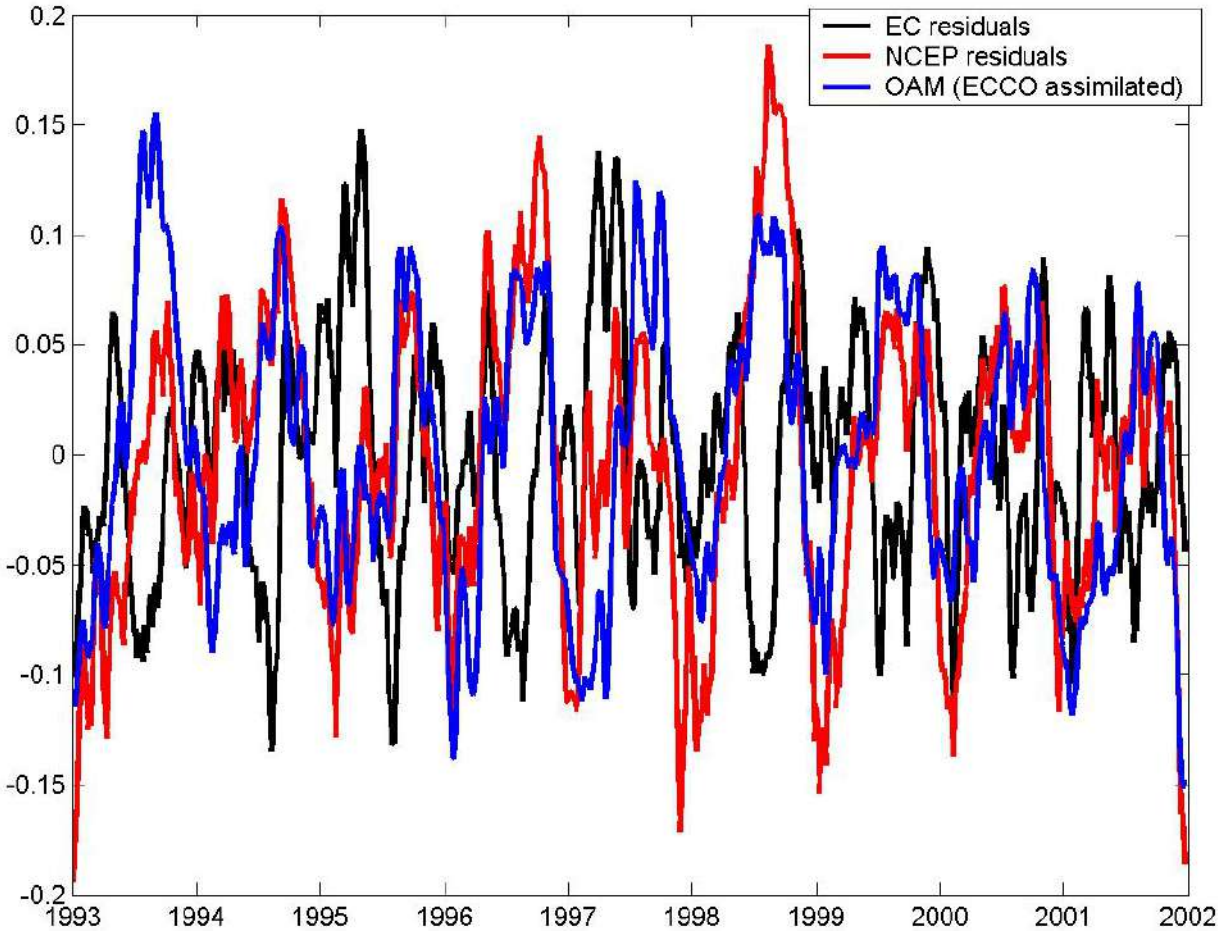
V. Les problèmes de cohérence

Conservation de l'impulsion…

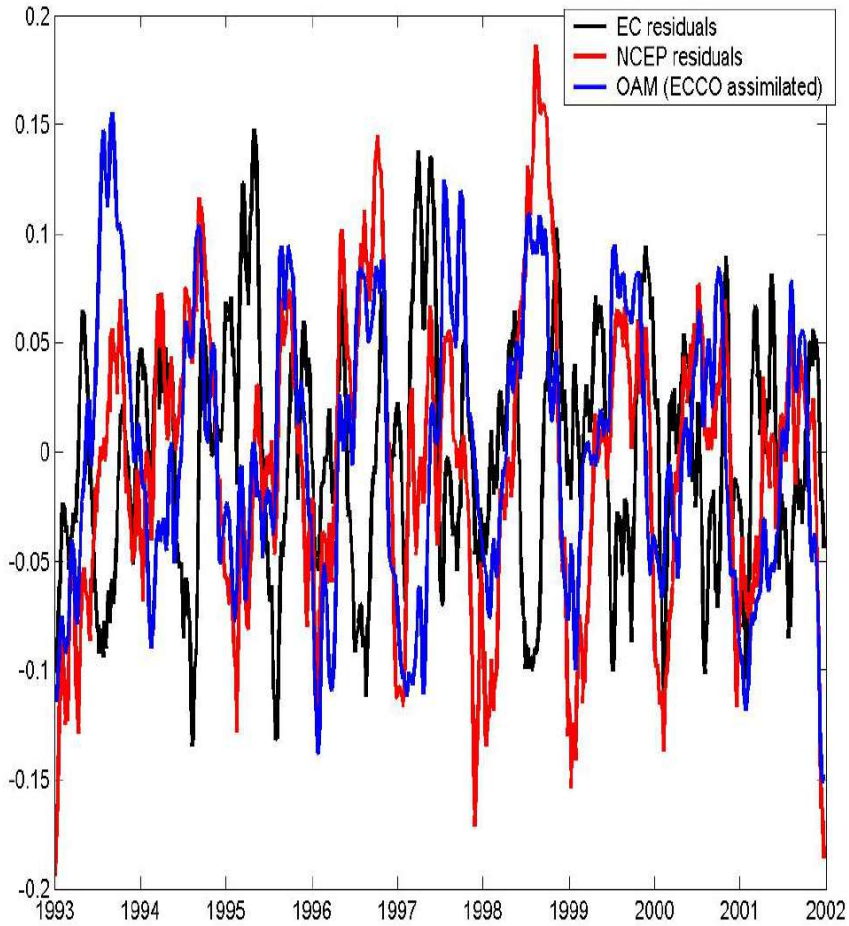
Conservation de l'impulsion



Conservation de l'impulsion



Conservation de l'impulsion



$$LOD - AAM_{EC} < LOD - AAM_{NCEP}$$

$$r(LOD - AAM_{NCEP}, OAM) >> r(LOD - AAM_{EC}, OAM) \cong 0$$

$$LOD - AAM_{EC} < LOD - AAM_{NCEP} - OAM$$

Le modèle océanique utilise est « forcé » par l'atmosphère du NCEP

Qui doit-on croire?

V. Petit quizz

On y est presque!!!

Quelques vrai/faux, pour résumer

- Les modèles fluides ne tiennent pas compte de l'ellipticité de la Terre.
- La pesanteur est une constante (sur la verticale) dans les modèles d'océan
- La pesanteur est une constante (horizontale) dans les modèles d'océan
- La pesanteur est une constante (temporelle) dans les modèles d'océan
- Les variations fluides de l'ellipticité dynamique perturbent la rotation de la Terre.
- Il faut corriger les modèles d'océan, d'atmosphère et d'hydrologie pour qu'ils conservent la masse et la quantité de mouvement.

VI. Conclusions

Est-ce que la plus grande interaction n’est pas qu’ils ont les mêmes ennuis? Mais aussi les mêmes solutions possibles

Plus que 5 transparents!!!

Conclusions

- La Terre est un système complexe, et la géodésie mesure des quantités qui sont la somme du multiples effets. Les séparer n'est pas chose aisée.
- En particulier, les fluides géophysiques, internes et externes, ont une influence importante sur ces quantités.
- Les modèles de ces fluides (à l'exception peut-être du noyau) n'ont pas pour but de faire de la géodésie, et présentent donc des inconvénients qui, pour mineurs qu'ils soient dans leur discipline respective, sont au moins gênant pour la géodésie.

Conclusions encore

- A l'heure actuelle, un modèle global de Terre, qui décrit à la fois le comportement de la Terre solide et le système climatique est non seulement inaccessible, mais probablement aussi inutile (au niveau de précision des modèles fluides).
- Cependant, on commence à envisager des modèles totalement couplés du système climatique, ce qui est un pas utile dans la bonne direction

Conclusions toujours

- Un modèle unique pour les déformations, la rotation et le champ de pesanteur est lui assez simple à envisager, mais il y a des problèmes importants de validation et de contraintes.
- Question philosophique: le problème n'est-il pas le manque de question à résoudre qui est le frein principal au développement d'un tel modèle?

Conclusions enfin

La géodésie est une approche unique de l'étude du système Terre, qui permet des observations de très haute précision à la fois pour les grandes et les courtes échelles de distance. Elle permet également d'étudier la Terre dans sa globalité.

Pour être modélisées/comprises, ces observations nécessitent une prise en considération raisonnable de chacune des parties du système, de façon cohérente, ce qui passe par une approche interdisciplinaire du problème.