La modélisation numérique du climat

Journées ECCOREV sur la modélisation

7 Octobre 2014

Vincent MORON
Département SGAE
Aix-Marseille Université
CEREGE

Bref historique

- À partir des 16-17ème : établissement des lois physiques primitives (loi de Newton, loi de Boyle, etc.)
- 1896: Arrhenius établit qu'un doublement de la concentration atmosphérique en CO_2 doit augmenter la température moyenne de 4°-6°C d'après une simulation de l'effet de serre
- 1922: Richardson réalise la première prévision numérique du temps en Europe avec une échéance de 6 heures. C'est un échec, car l'horizon temporel est beaucoup trop lointain pour l'atmosphère terrestre (l'intégration doit se faire avec un pas de temps de l'ordre de quelques minutes)
- Années 50: premières expériences numériques avec des modèles atmosphériques simplifiés pour les moyennes latitudes. Ces modèles sont les précurseurs des modèles météorologiques actuels
- Années 60: première modélisation climatique 3D planétaire par l'équipe de Syukuro Manabe (GFDL) aux USA
- Aujourd'hui intégration de + en + réaliste des éléments du SC poussée par l'inflation exponentielle de la puissance des ordinateurs parallèles (ENIAC en 1946 = 50 KFlops ; Jaguar de CRAY en 2009 > 1.5 PFlops soit 1.5 x 10^{15} opérations élémentaires par seconde, le MegaFlop (10^6) ayant été dépassé en 1961, le GigaFlop (10^9) en 1984 et le TéraFlop (10^{12}) en 1997, L'Exaflop (10^{18}) devrait être atteint avant 2018 ...

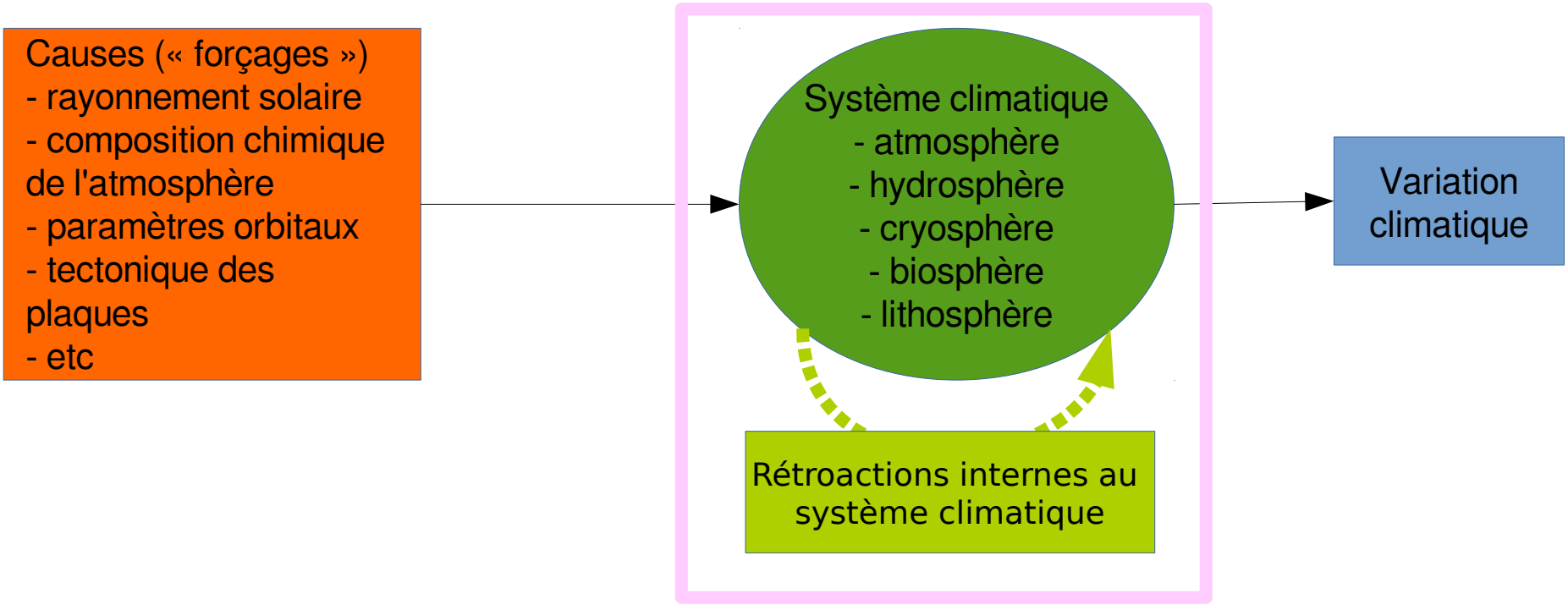
Définitions (1)

- Modèle climatique ? = représentation + ou - idéalisée (et donc tronquée) du ***système climatique***, basée sur des équations mathématiques appliquées à une sphère en rotation

- ***Système climatique*** (SC) ? = système thermodynamique composé de l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la biosphère et la lithosphère (au moins sa surface) en interaction et alimenté en énergie par le rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère (actuellement ~ 342 W/m^2 en moyenne spatiale et annuelle)

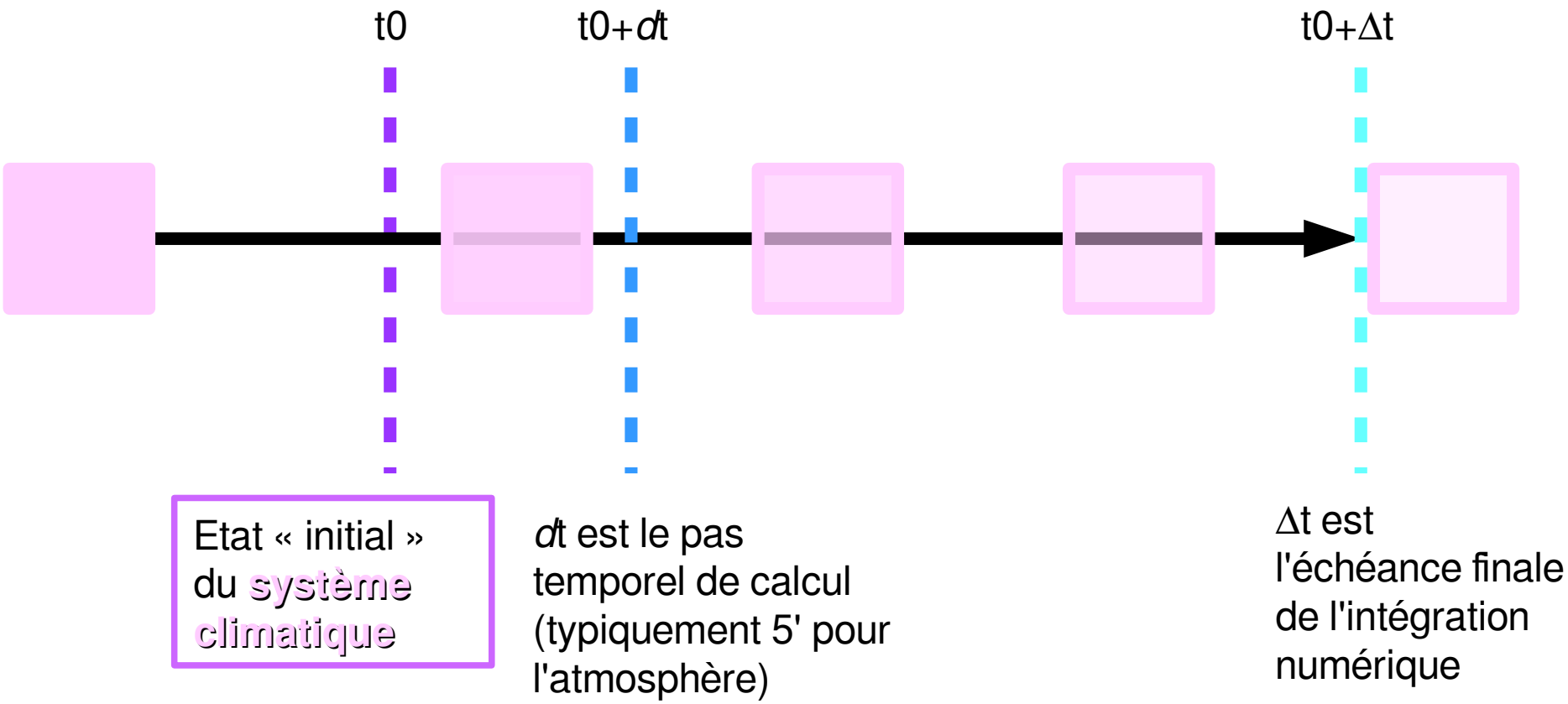
Définitions (2)

Comme n'importe quel système thermo-dynamique, le système climatique (SC) est contraint par des lois déterministes et les variations climatiques peuvent alors être interprétées comme l'ajustement vis-à-vis de causes (forçages) externes



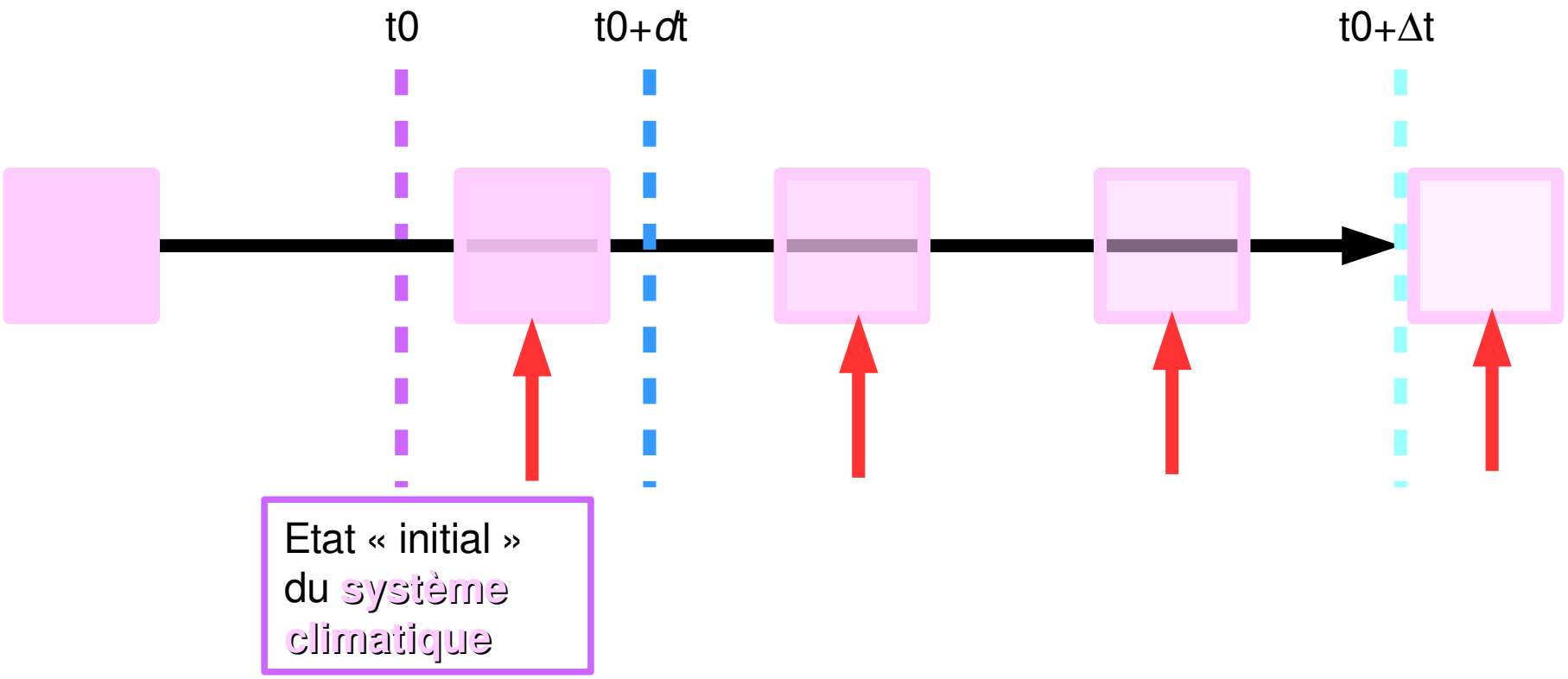
Le **modèle climatique** est la représentation formalisée et idéalisée du SC. Il permet d'expérimenter la réponse à une (ou plusieurs) cause(s) et de comprendre ainsi l'origine des variations climatiques

Définitions (3)



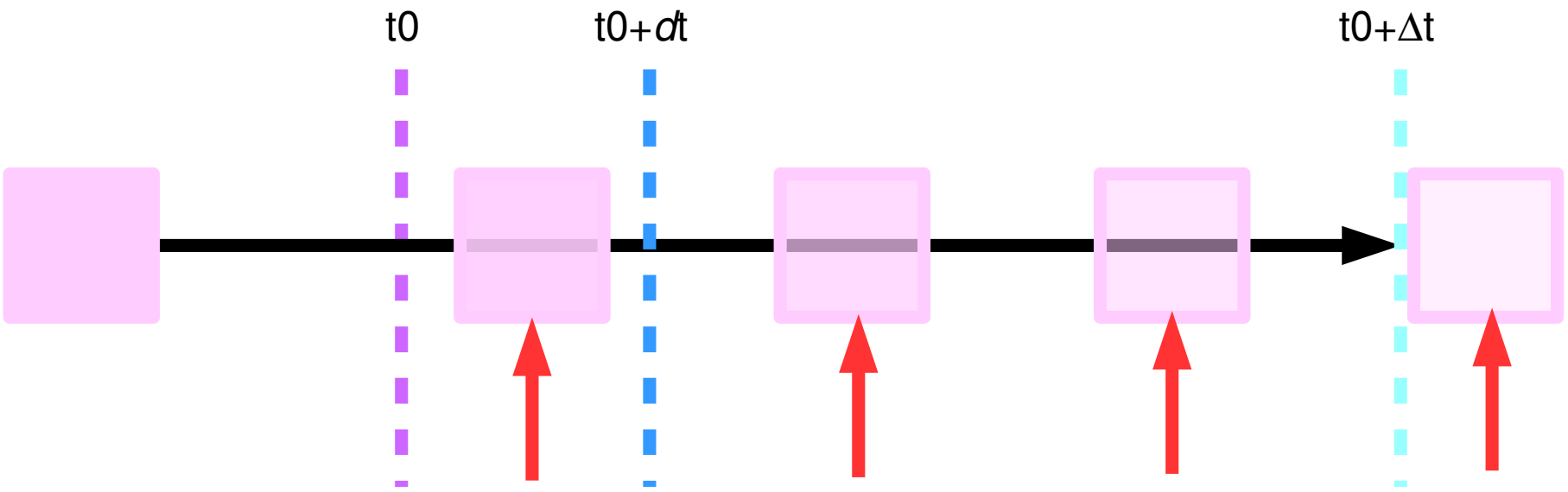
La modélisation climatique vise à calculer le comportement du système climatique (ou d'un élément précis comme l'atmosphère) à partir d'un état initial de façon itérative jusqu'à une échéance finale.

Définitions (4)



L'intégration peut se faire (i) de façon « libre » uniquement à partir des conditions initiales (les variations ne proviennent alors que des rétroactions internes et de l'état initial) ou (ii) de façon « contrainte » par un (ou des) **forçage(s) externe(s)**, soit fixe(s), soit variable(s) (les variations proviennent alors de l'ajustement par rapport aux forçages ainsi que les rétroactions internes et l'état initial). Les expériences s'appellent en général des « scénarios » climatiques

Définitions (5)



t0 peut être situé dans le passé ce qui permet de reconstruire la variabilité climatique observée ou paléoclimatique à partir d'un (ou des) forçage(s) combinés (par exemple, modélisation de la réponse climatique aux variations orbitales) ou bien correspondre au présent (par exemple, modélisation de la réponse climatique à l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre ou **prévision météorologique**)

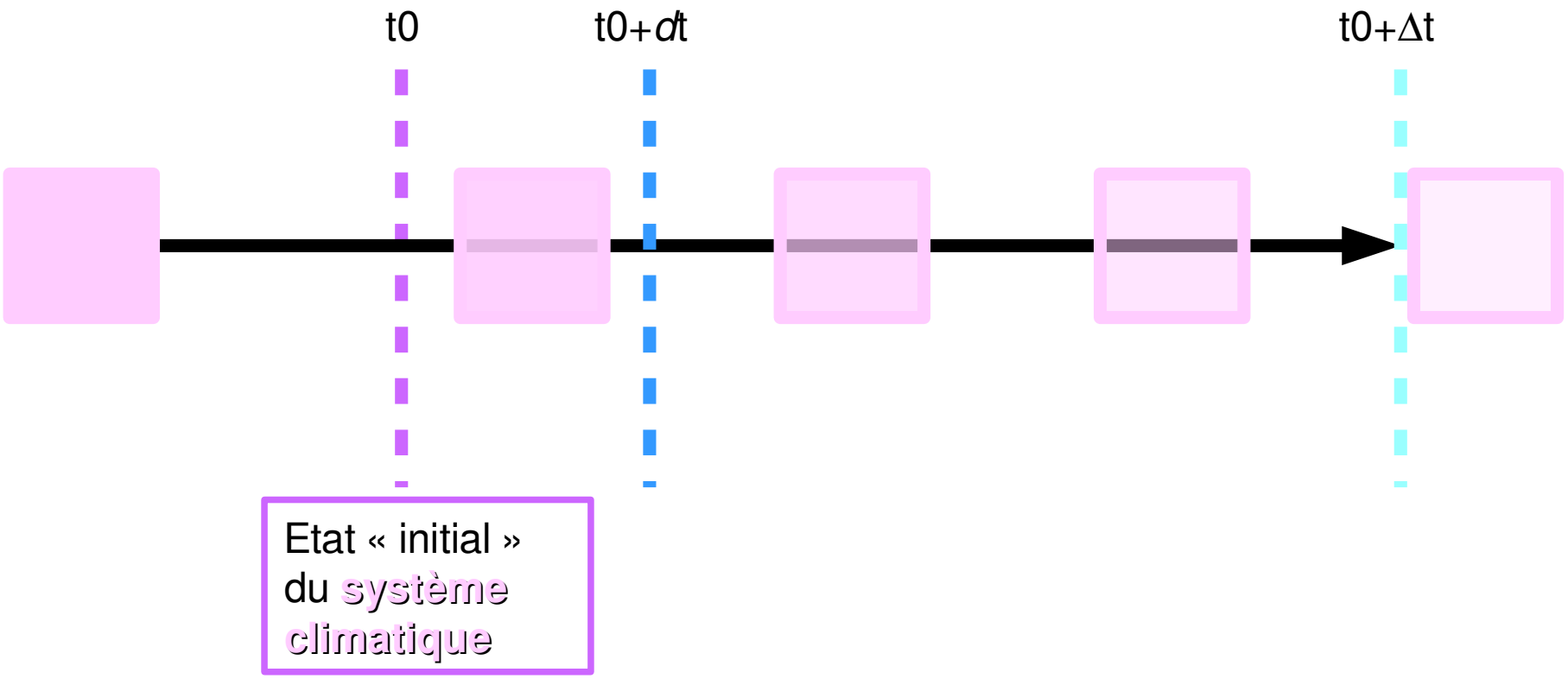
Définitions (6)

Outre la connaissance imparfaite des forçages externes et des lois physiques qui régissent le fonctionnement du SC, il y a deux limites fondamentales à la modélisation climatique

- la **précision de la connaissance de l'état initial t0** (= car le système climatique est chaotique et donc très sensible aux conditions initiales)

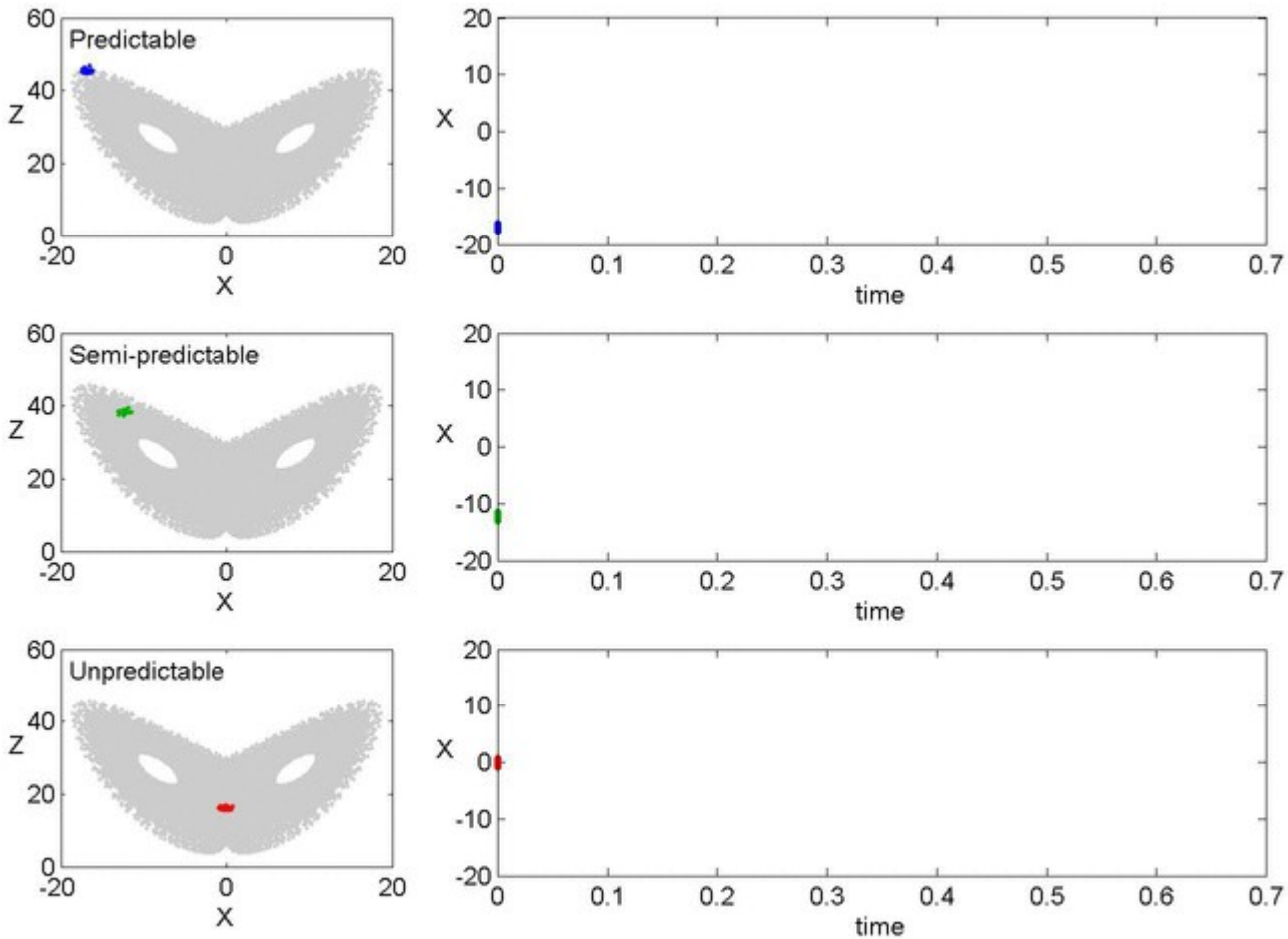
- la **discrétisation spatiale** (troncature de la réalité) et la **nécessaire paramétrisation** de certains processus (passage d'un système continu à un système discret et représentation empirique ou semi-empirique de certains processus physiques)

La prévision météorologique (1)



Les premiers exercices de modélisation (dés les années 20s) concerne la **prévision météorologique** jusqu'à une échéance finale au départ de quelques heures (désormais, au moins deux semaines). La prévision météorologique permet d'illustrer le comportement chaotique de l'atmosphère (= sa sensibilité aux conditions initiales)

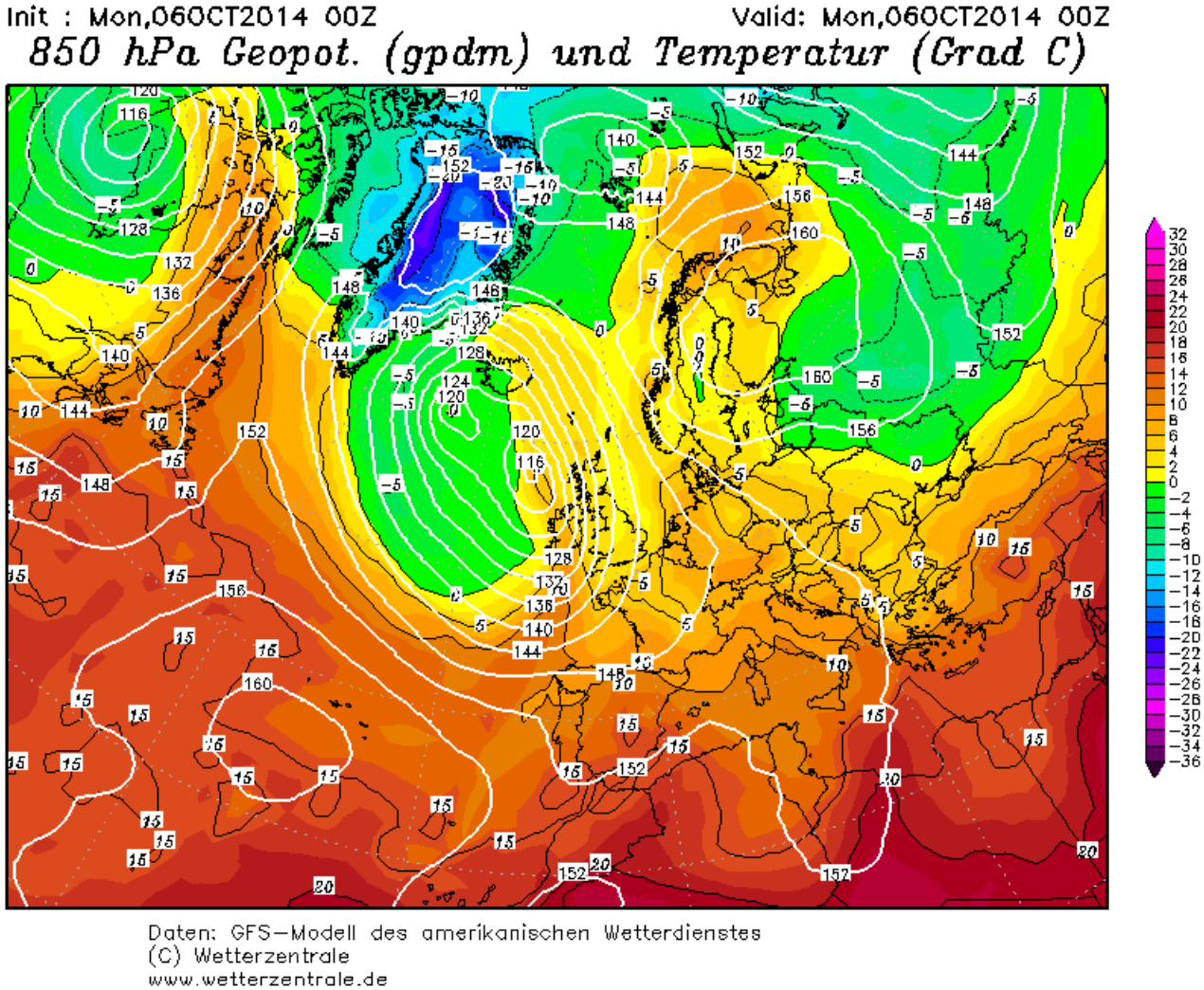
La prévision météorologique (2)



https://www2.physics.ox.ac.uk/research/predictability-of-weather-and-climate

Evolution temporelle sur le système de Lorenz (3 équations différentielles couplées censées représenter la convection à grande échelle, dimension ~ 2.7)

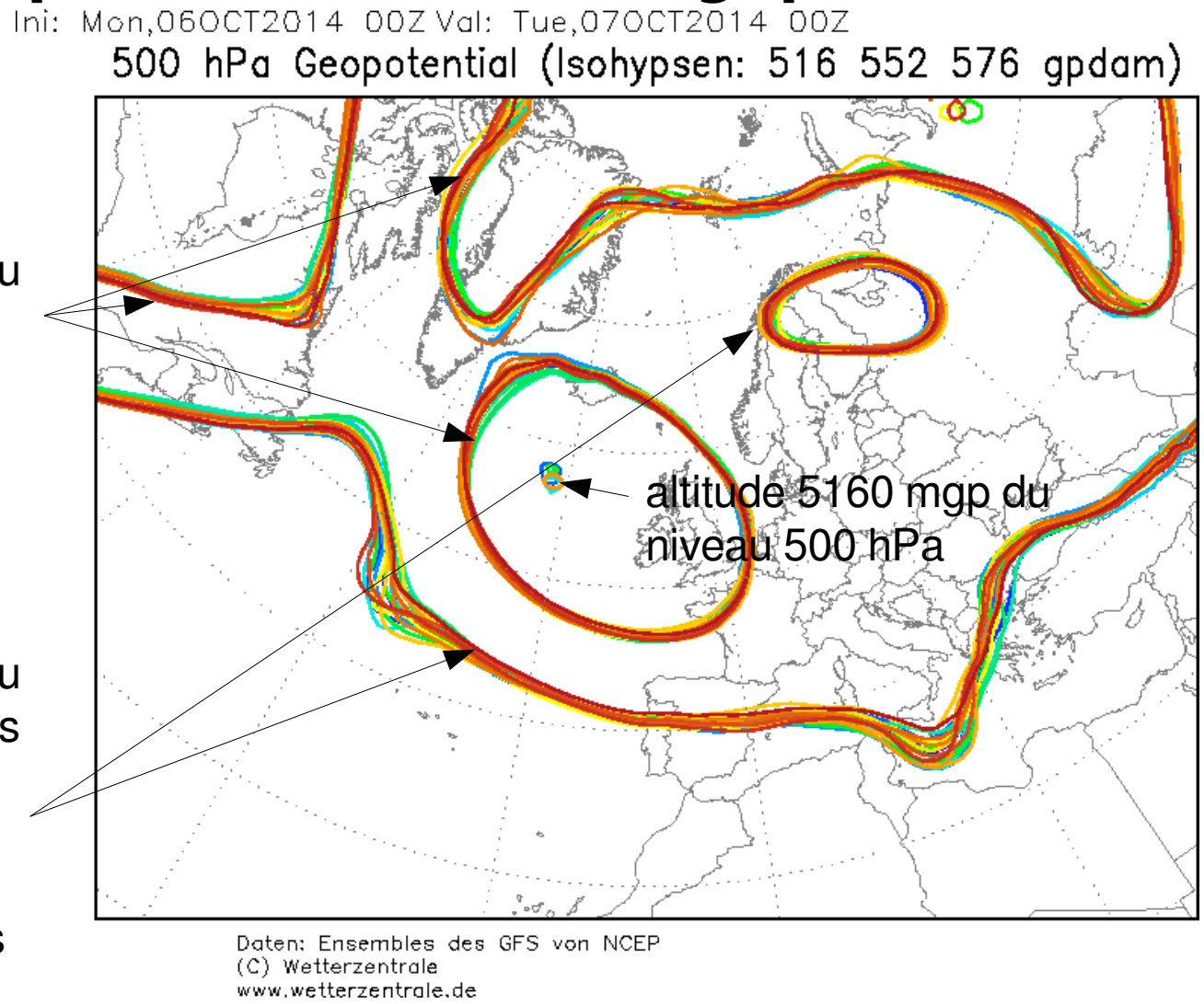
La prévision météorologique (3)



couleurs = températures au niveau 850 hPa en °C ; lignes blanches = altitude du niveau 850 hPa en décamètres géopotentiels ; 160 dmgp ~ 1550 m

t0 = le 6/10/2014 à 00h TU

La prévision météorologique (4)

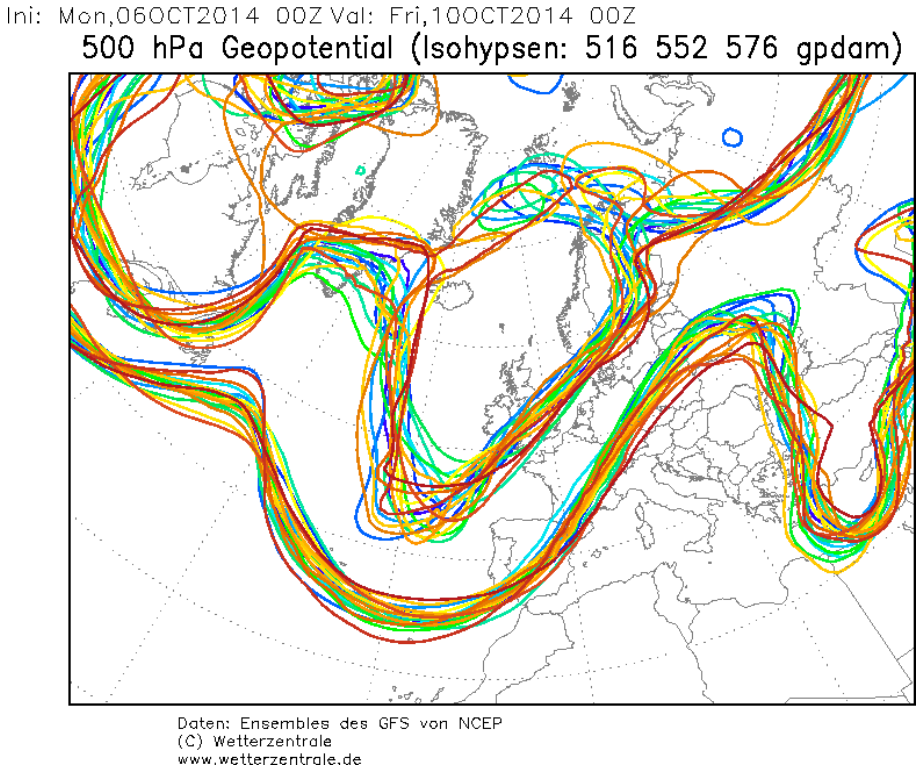


altitude 5520 mgp du niveau 500 hPa

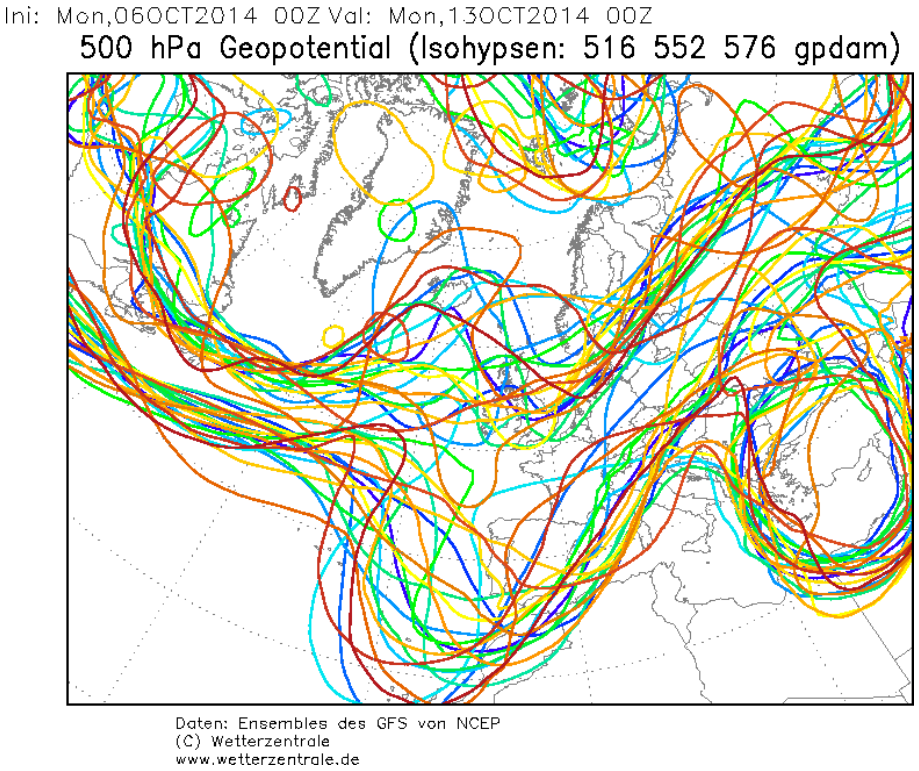
altitude 5760 mgp du niveau 500 hPa dans 20 expériences numériques initialisées différemment depuis t0

(échéance : t0 + 24 heures)

La prévision météorologique (5)

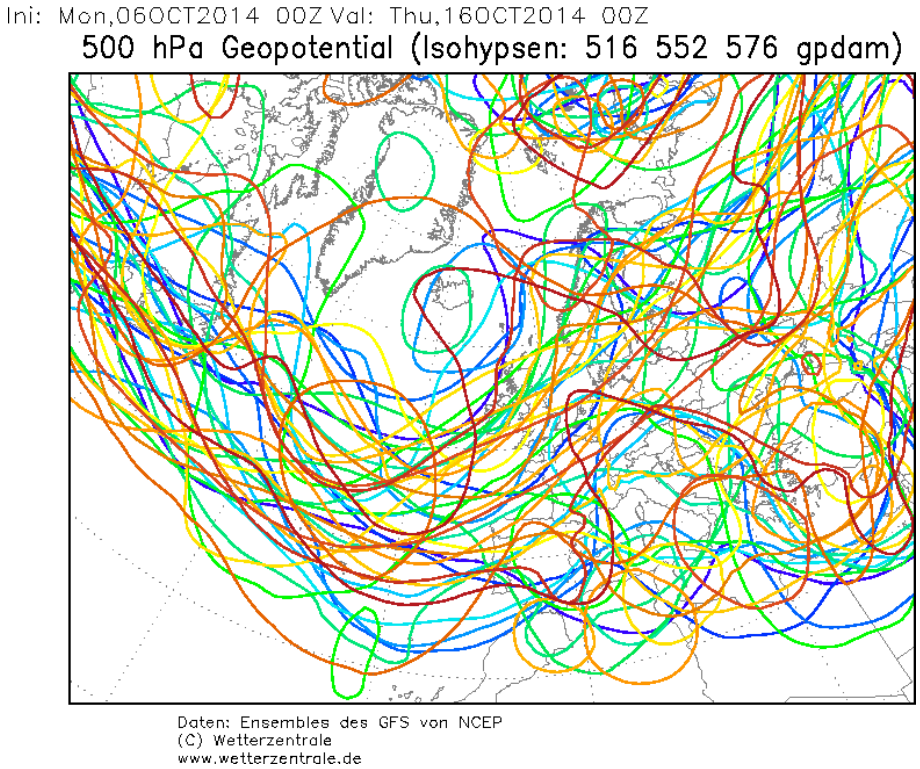


(échéance : t0 + 96 heures)

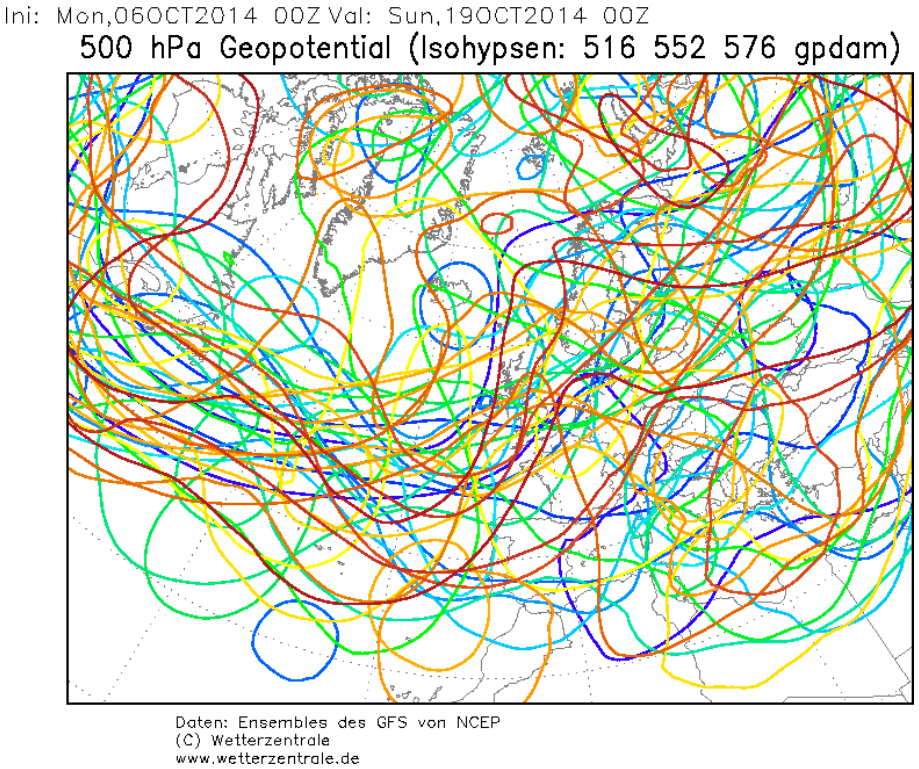


(échéance : t0 + 168 heures)

La prévision météorologique (6)

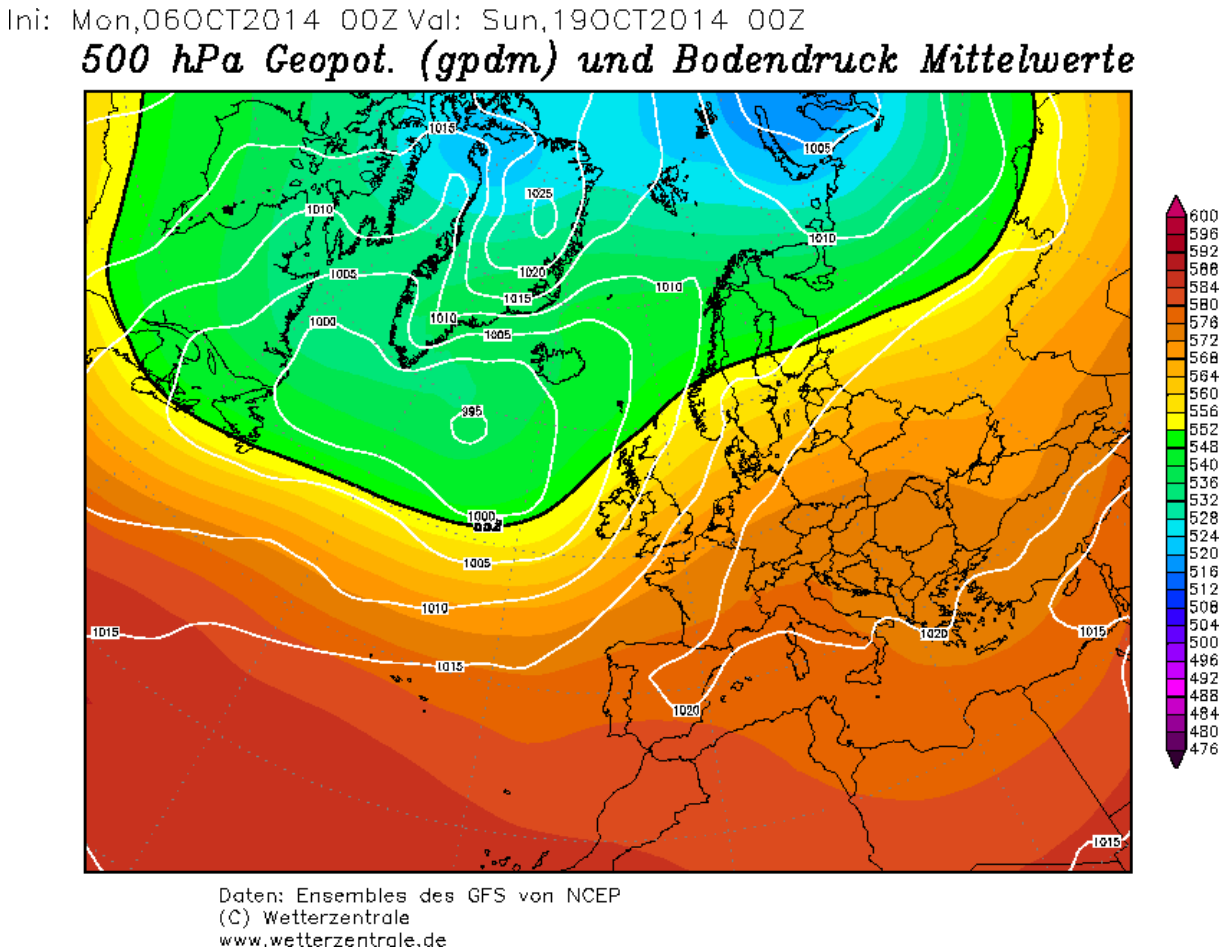


(échéance : t0 + 240 heures)



(échéance : t0 + 312 heures)

La prévision météorologique (7)



Couleurs = altitude du niveau 500 hPa en décamètres géopotentiels ; lignes blanches = pression en surface en hPa. Moyenne d'ensemble des 20 expériences numériques

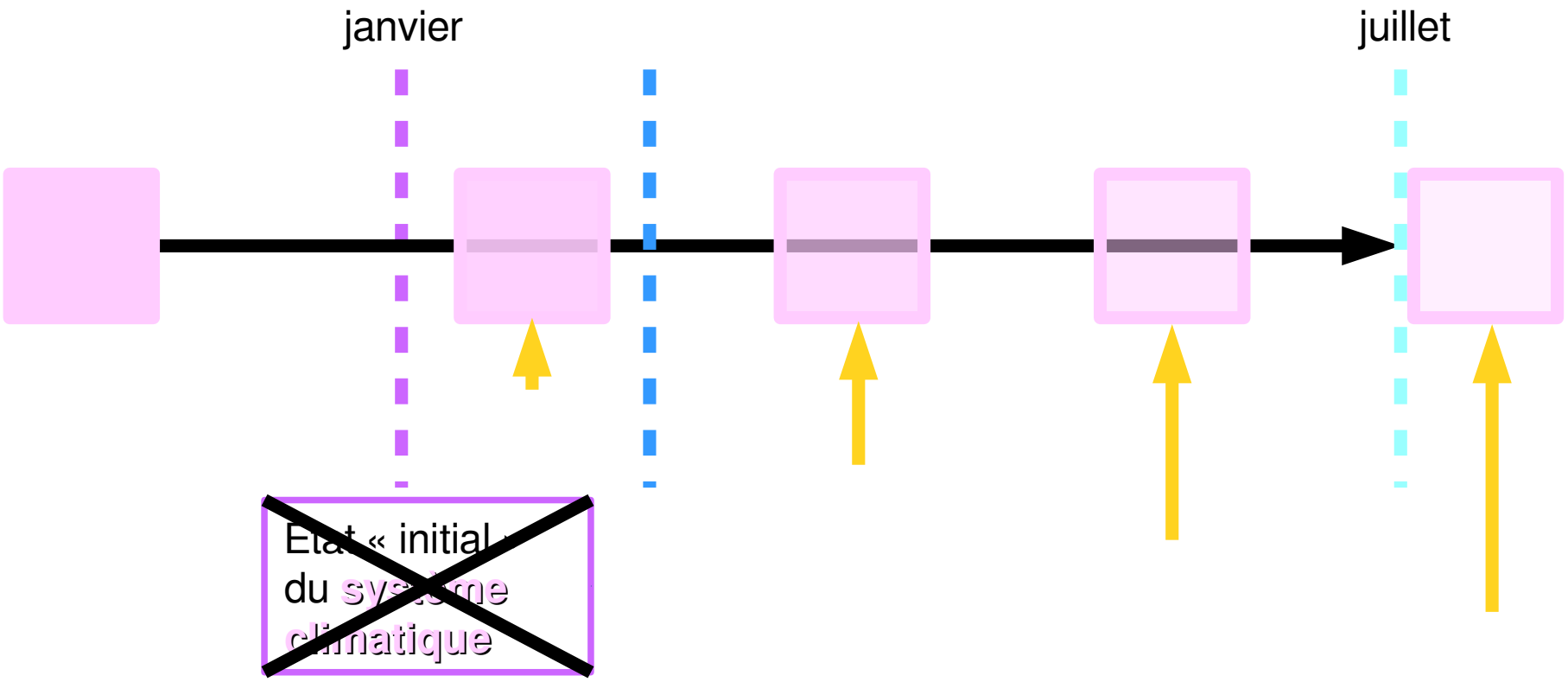
A l'échéance finale, la **prévision tend vers la climatologie moyenne** = HP dans la zone tropicale/tempérée et BP dans la zone polaire et sub-polaire qui répond au forçage du rayonnement solaire absorbé qui décroit en latitude, ce qui est en soi une information, bien que la prévisibilité météorologique ait disparu ...

La prévision météorologique vs prévision climatique

Dans le cas précédent, la réponse moyenne au forçage (rayonnement solaire absorbé) finit par être la seule information puisque celle, induite par les conditions initiales, finit par s'annihiler formellement (pas dans la réalité évidemment)

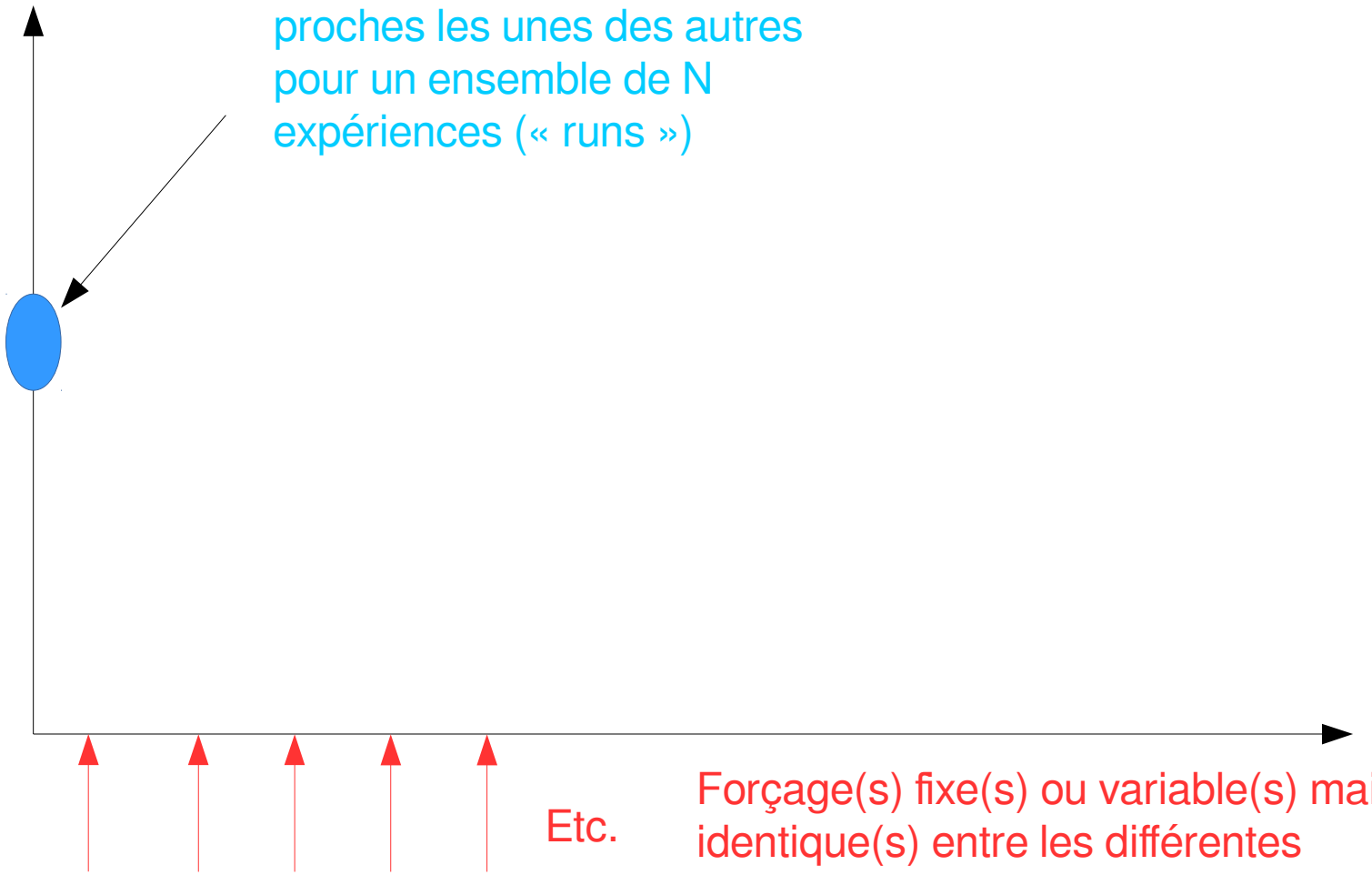
De façon plus générale, un forçage peut induire une prédictabilité au-delà de « l'horizon » météorologique (~ 15 jours) dés que son impact est quasi-linéaire et que son amplitude est comparable, ou dépasse, celle induite par d'autres sources à un horizon temporel précis

Le rôle des forçages quasi-linéaires du système climatique : l'exemple du rayonnement solaire

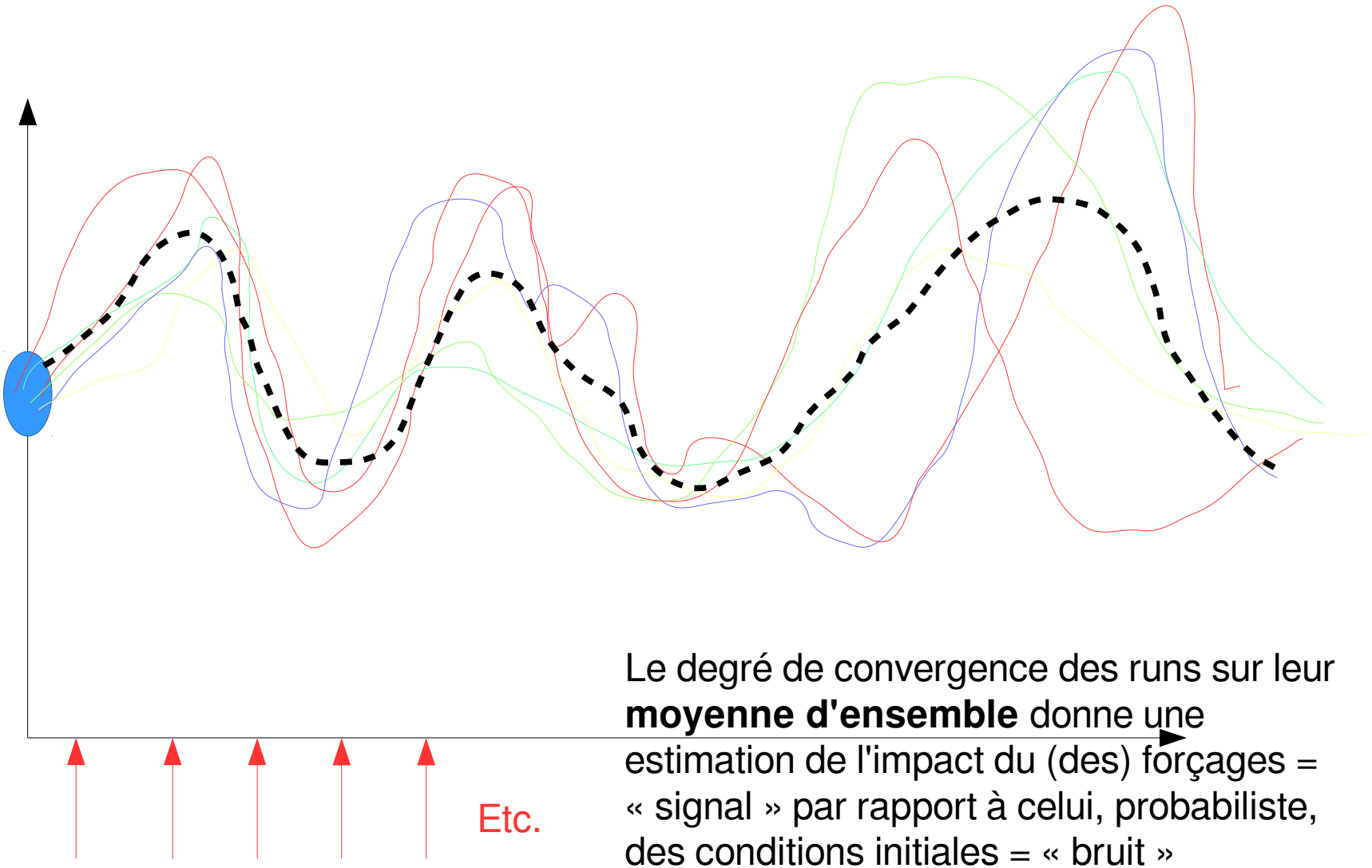


Prévoir la température à Aix de janvier à juillet est possible malgré le comportement chaotique car à cette échéance de 6 mois, les conditions initiales sont négligeables et ce qui compte est la réponse quasi-linéaire à la variation semi-annuelle du **rayonnement solaire incident vers 43.5°N** qui est presque parfaitement prévisible (car dépendant de l'obliquité de la terre). Comme les conditions initiales, les éventuels autres forçages agissant à cette échelle peuvent aussi être négligés

Stratégie de simulation et séparation «signal » vs « bruit » (1)



Stratégie de simulation et séparation «signal » vs « bruit » (2)



Le degré de convergence des runs sur leur **moyenne d'ensemble** donne une estimation de l'impact du (des) forçages = « signal » par rapport à celui, probabiliste, des conditions initiales = « bruit »

Exemples de prévisions climatiques

- forçage des variations des paramètres orbitaux (entre 10000 et 100000 ans) sur le système climatique avec initiation/déclin des glaciations au quaternaire

- forçage des températures de surface océanique tropicale (entre 15 jours et un an) sur les circulations atmosphériques quasi-divergentes tropicales (C. de Hadley/Walker)

- forçage des variations de la constante solaire, des éruptions volcaniques et des variations de la composition chimique de l'atmosphère (cf. ci après)

- etc.

Hiérarchie des modèles climatiques

- Modèle de balance énergétique à 0 dimension ou 1 (latitude) dimension + temps. Un exemple de ce type de modèle à 0 dimensions est développé ci-après
- Modèle radiatif/convectif à 1 (altitude) ou 2 dimensions (altitude + latitude) + temps
- Modèle en boites
- Modèles de complexité intermédiaire (par exemple atmosphère statistique couplé à un océan dynamique)
- Modèle de circulation générale (MCG) à 3 dimensions + temps = modèle a priori le plus réaliste du SC

= d'abord examen d'un modèle de balance énergétique à 0 dimension puis le MCG…

Un modèle ultra-simplifié du système climatique

Un modèle basique à 0 dimension relie les variations de la chaleur ou l'énergie thermique (= E) au sein du SC comme la différence entre les gains et les pertes radiatives mesurées au sommet de l'atmosphère

$$\frac{dE}{dt} = \text{rayonnement entrant net} - \text{rayonnement sortant}$$

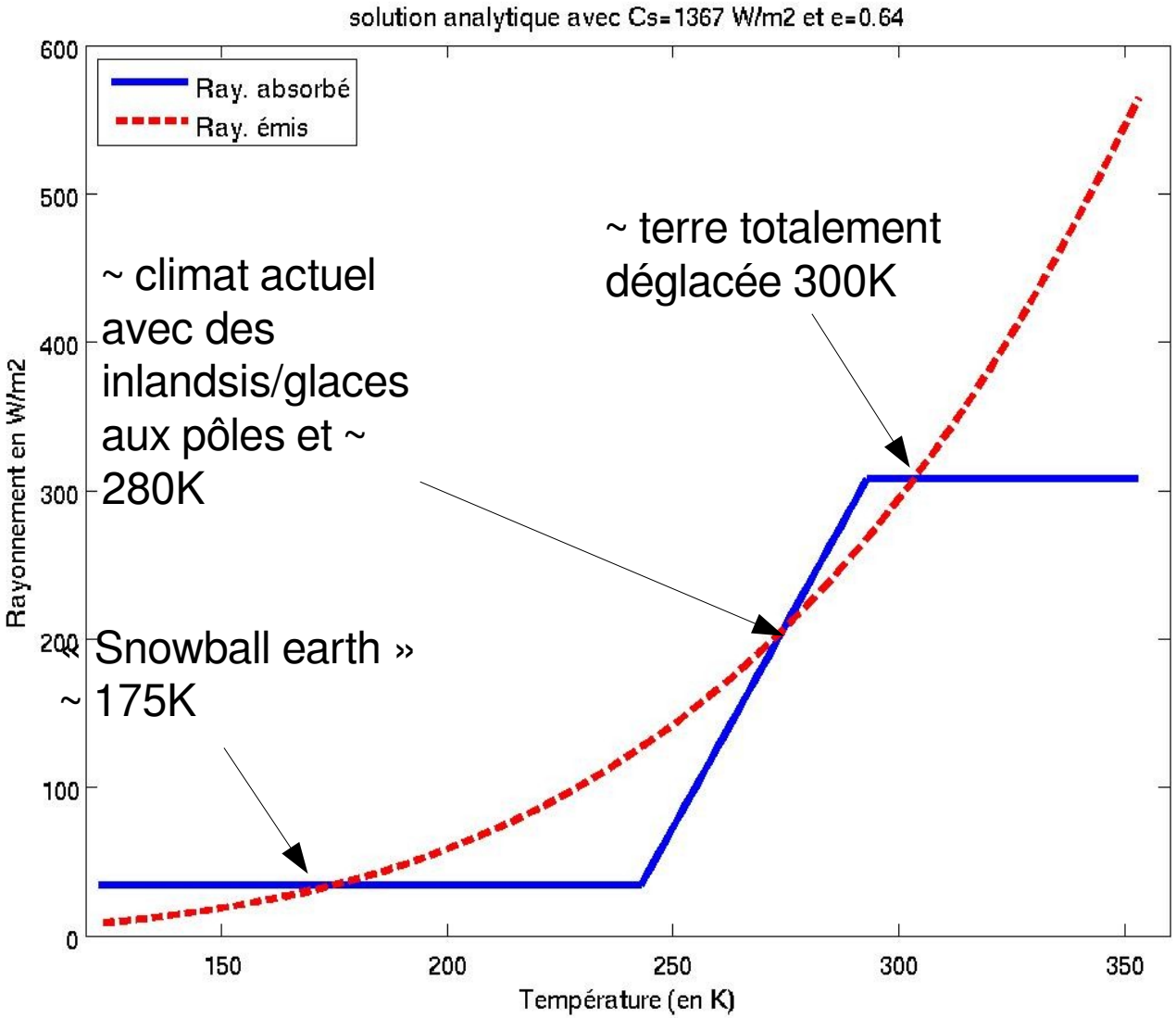
Les variations de la température moyenne du SC peuvent être vues à partir de cette équation comme

$$C \times \frac{dT}{dt} = \boxed{(C_s/4) \times (1-\alpha)} - \boxed{\varepsilon \times \sigma \times T^4}$$

4 variables d'état du SC: T = température moyenne, C = chaleur spécifique (c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour élever de 1 °C la température moyenne du système climatique qui dépend presque exclusivement de l'océan), α = albédo moyen (= 0.3 pour le système climatique actuel), ε = émissivité (= 0.6/0.7 pour le système climatique actuel).

- une constante physique : $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ (constante de Stefan-Boltzman)
- un forçage externe : C_s = constante solaire (= quantité de rayonnement solaire intercepté par un disque de même rayon que la terre)

Solutions analytiques de l'EBM à 0 dimension



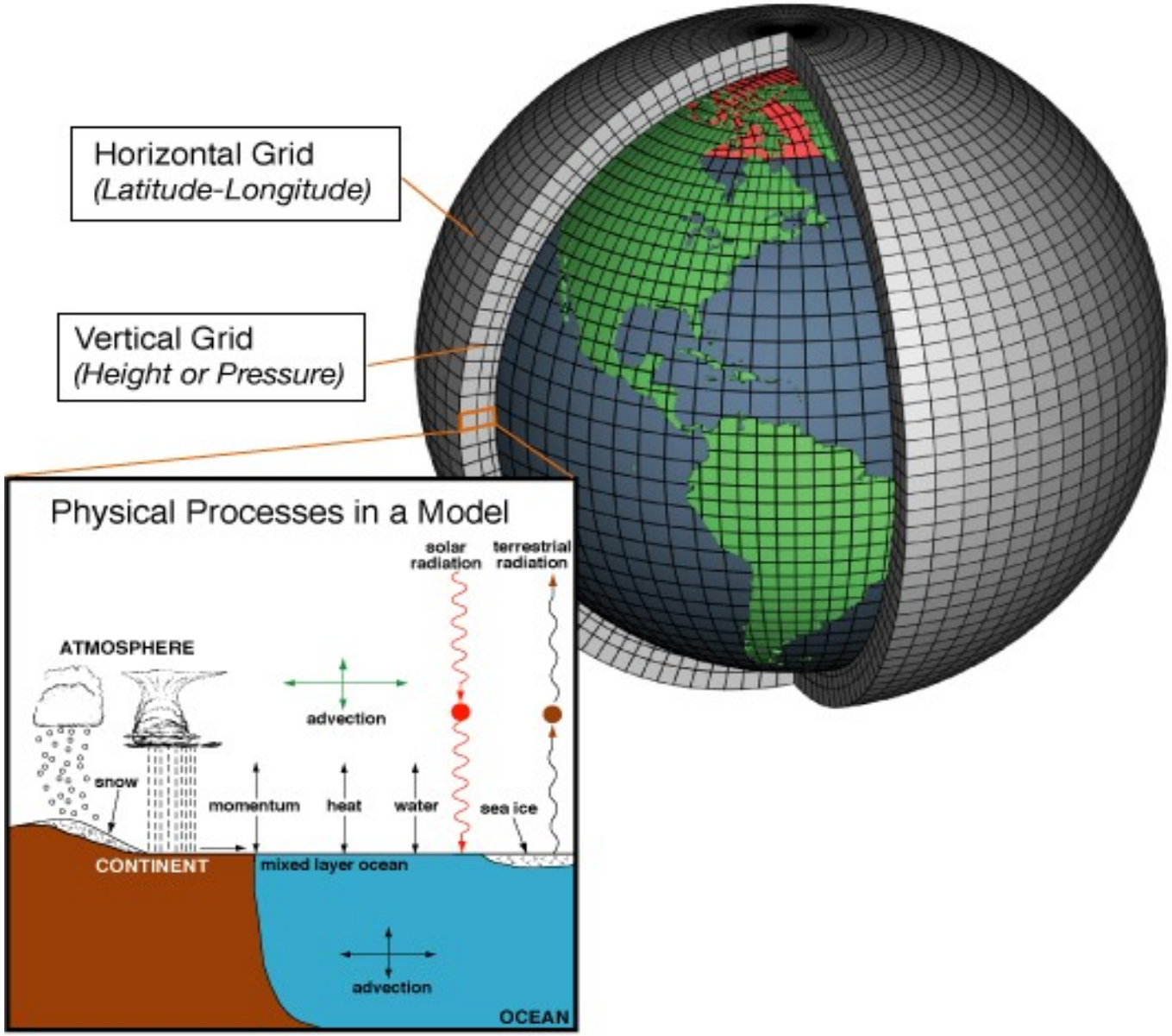
Eléments d’un MCG

Équations « primitives » de la mécanique et la thermodynamique des fluides (identiques entre tous les MCGs) = lois représentant les relations entre pression, masse, température, les mouvements 3D sur une sphère, etc.

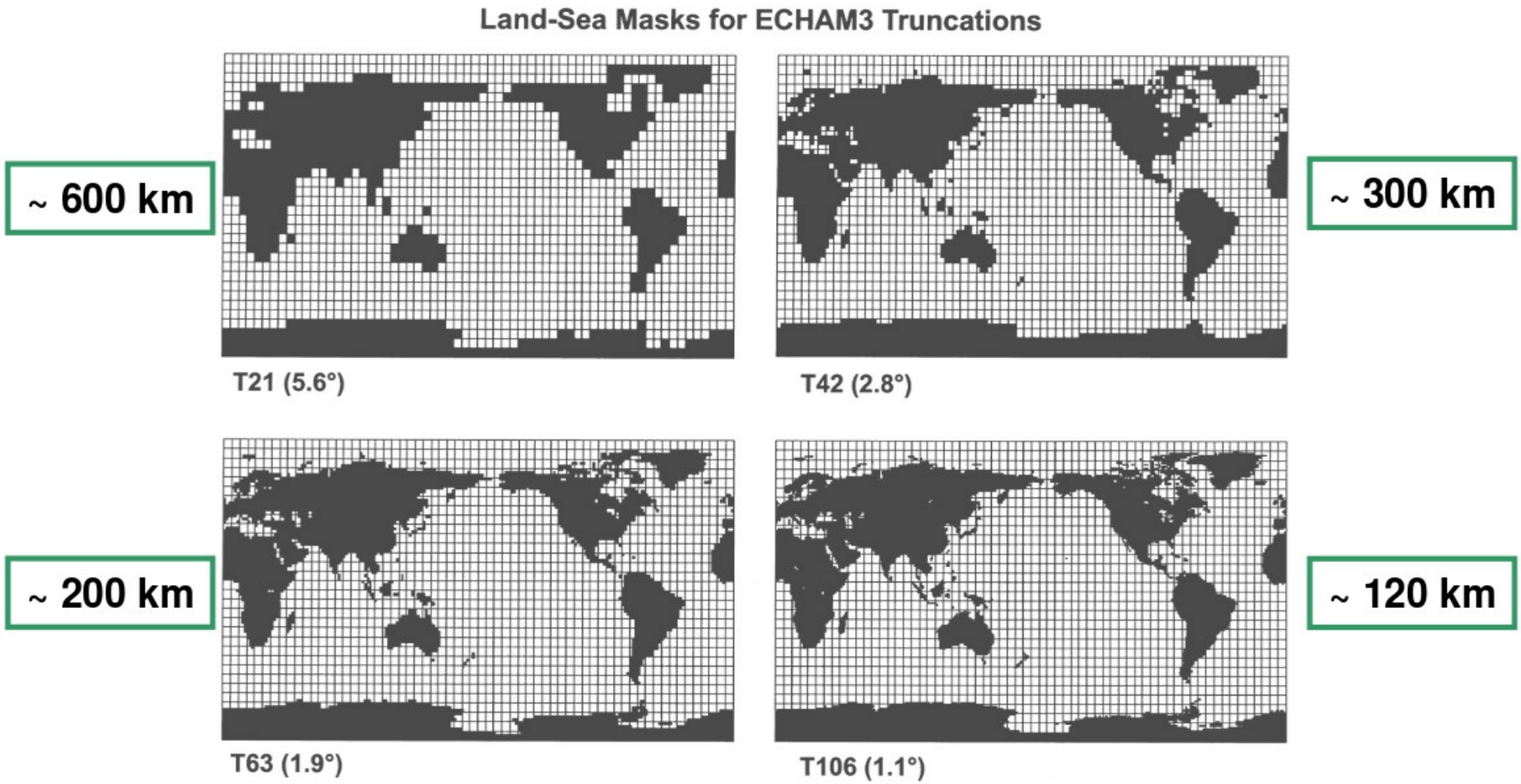
- conservation de l'énergie totale (première loi de thermodynamique)
- conservation du moment cinétique
- conservation de la masse
- loi des gaz parfaits
- hypothèse hydrostatique

Les équations primitives relient notamment 5 variables fondamentales, appelées variables *pronostiques* (**T**: température, *u* et *v*: composante zonale et méridienne du vent, *w* : vitesse verticale sur une surface isobare, *z* : hauteur géopotentielle, et **W**: eau précipitable) et leurs variations dans l’espace et dans le temps.

Discrétisation sur une grille 3D (1)



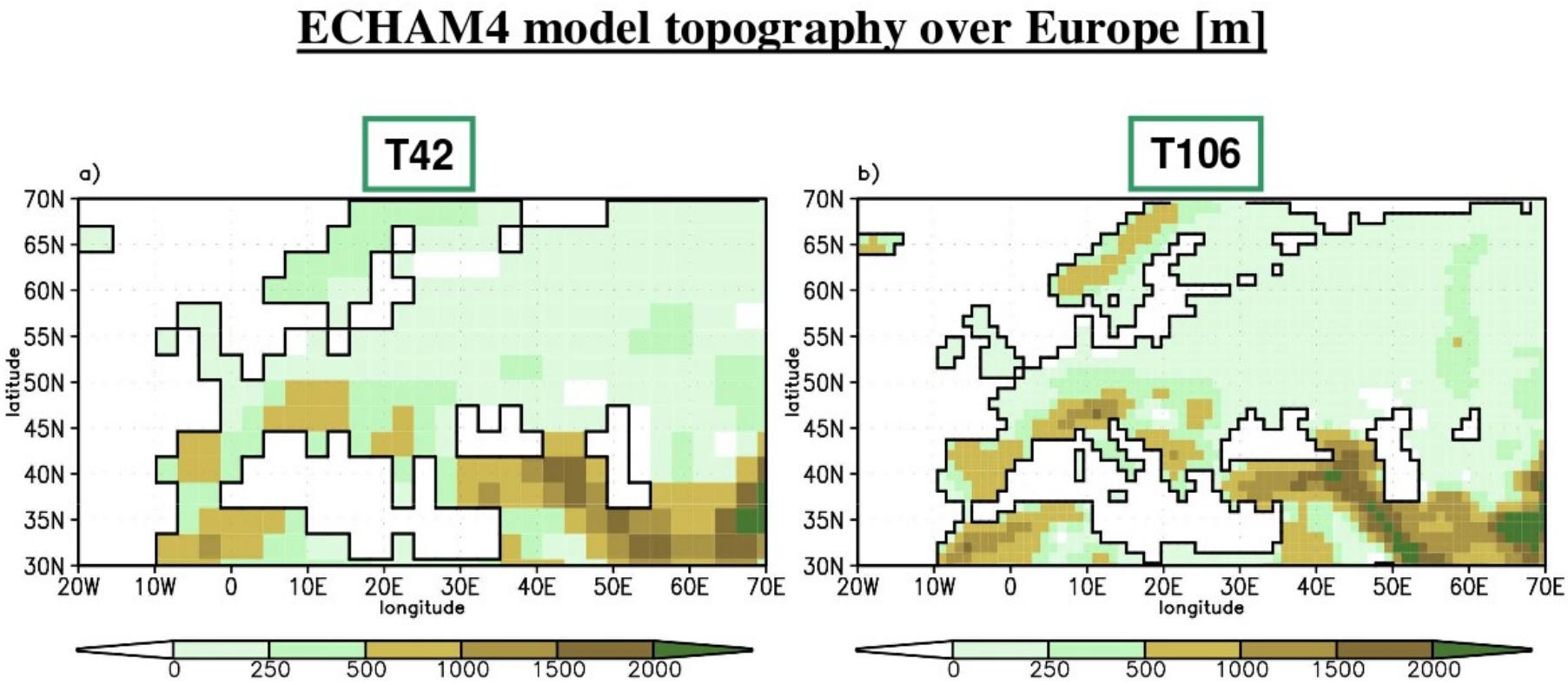
Discrétisation sur une grille 3D (2)



T31 simulations about 25 times faster than T106

http://www.geo.uni-bremen.de/~apau/ecolmas_modeling2/atmos_modelling.umerkel.partA.pdf

Discrétisation sur une grille 3D (3)



http://www.geo.uni-bremen.de/~apau/ecolmas_modeling2/atmos_modelling.umerkel.partA.pdf

La considération des phénomènes sous-grilles

Guadalupe island (ile volcanique de 35 x 9.5 km à 29°N) et 118°W – image Landsat datant de 2000. La taille de l'image correspond ~ à un surface de 350 x 175 km environ soit un peu plus d'un seul point de grille à une résolution T42

http://www.wired.com/2010/05/gallery-clouds/all/

La paramétrisation

- Les lois primitives établissent les relations physiques entre de nombreuses variables à un instant (t) et également la variation temporelle de ces variables entre l'instant (t) et l'instant (t+n) où n est l'échéance du modèle (n=quelques minutes) grâce aux équations pronostiques.
- Certains processus ne peuvent pas être représentés par des lois universelles, soit à cause d'une question d'échelles multiples en jeu, notamment ceux qui ne peuvent pas être représentées explicitement à l'échelle du point de grille
  - Échanges entre atmosphère et surface
  - Convection
  - Cycle de l'eau et notamment précipitations qui dépendent simultanément de l'échelle micrométrique (condensation/solidification de l'eau) et de l'échelle > 100 km (secteur de convergence de l'air)
  - etc.
- Ces processus sont donc paramétrés = fonctions de transfert empiriques ou semi-empiriques qui relient à un instant (t) des variables comme les précipitations avec d'autres variables pronostiques (T,q etc.) grâce aux équations diagnostiques.

Itération d'un pas temporel dans un MCGA

instant (t) = (*u*,v,T,**z**,q, etc.)

équations diagnostiques pour calculer certaines variables à l'instant (t) à partir d'autres variables. Par exemple, la couverture nuageuse …

Est-ce que la colonne d'air est stable ou instable ? Et y'a-t-il un ou plusieurs niveaux saturés ?

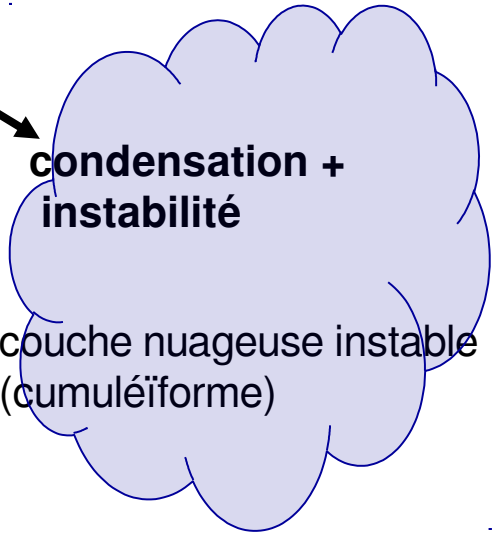
condensation + stabilité

couche nuageuse stable (stratiforme, cirriforme)

pas de condensation

pas de nuages

condensation + instabilité

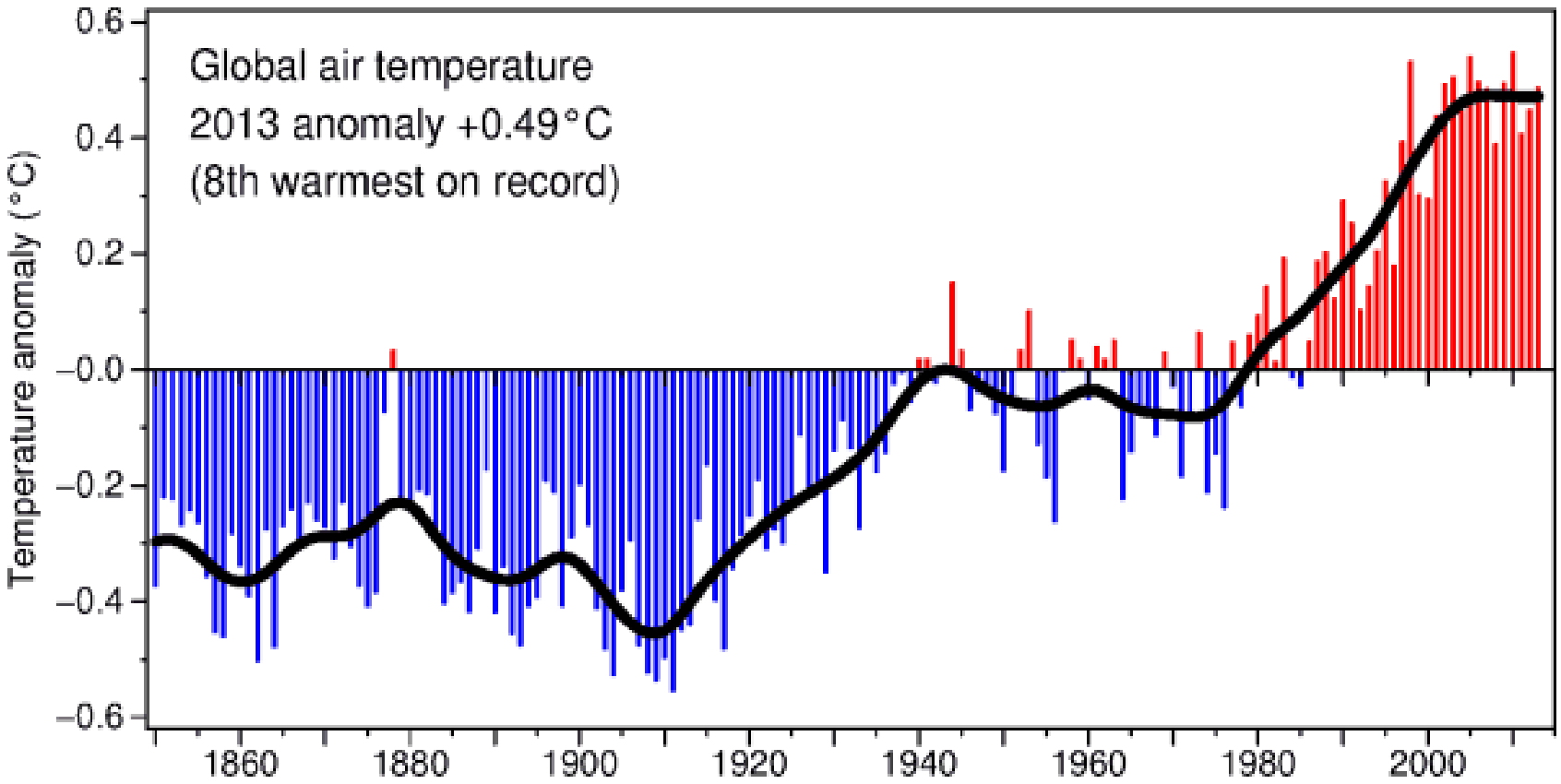


couche nuageuse instable (cumuléïforme)

Calcul du bilan radiatif et des échanges de chaleur verticaux et latéraux en fonction de l'altitude/épaisseur/nature de la couverture nuageuse

Utilisation des équations pronostiques pour calculer *u*,v,T,**z**,q, etc. à l'instant (t) +n (n = 5')

La reconstruction de la variabilité climatique contemporaine (1)



(Climatic Research Unit)

La reconstruction de la variabilité climatique contemporaine (2)

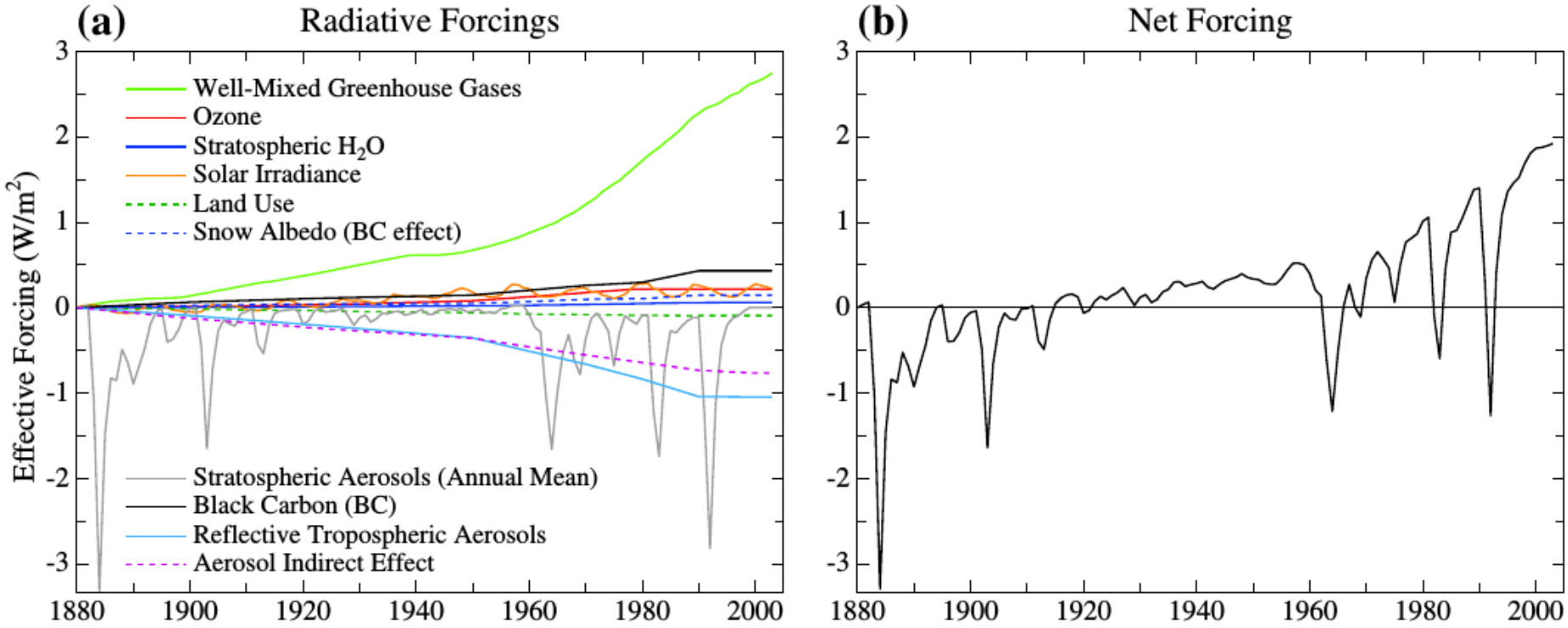
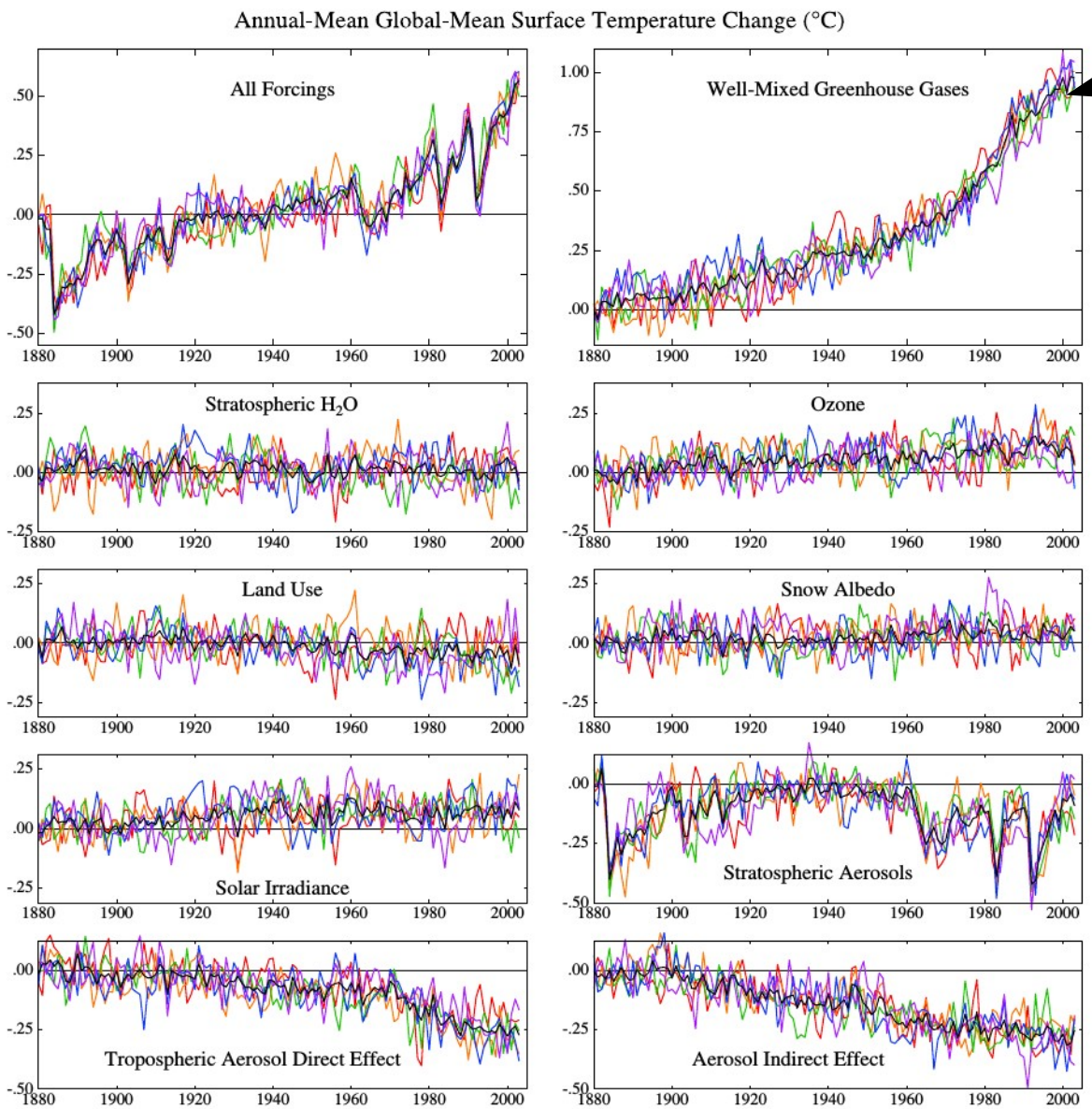


Fig. 5 Effective global climate forcings employed in our global climate simulations, relative to their values in 1880

(Hansen et al., 2007)

La reconstruction de la variabilité climatique contemporaine (3)



5 runs en couleur et moyenne d'ensemble en noir

Fig. 8 Simulated global temperature response to all climate forcings of Fig. 5 operating at once, and the response to individual forcings. Five runs for each forcing were initiated at 25- or 30-year intervals of the control run. Small model drift was removed by subtracting the control run year-by-year. Response to the aerosol indirect forcing is obtained as the difference between runs with direct and indirect forcings and runs with only the direct aerosol forcing. Climate model is the model III version of GISS modelE with the Russell ocean model

(Hansen et al., 2007)

La reconstruction de la variabilité climatique contemporaine (4)

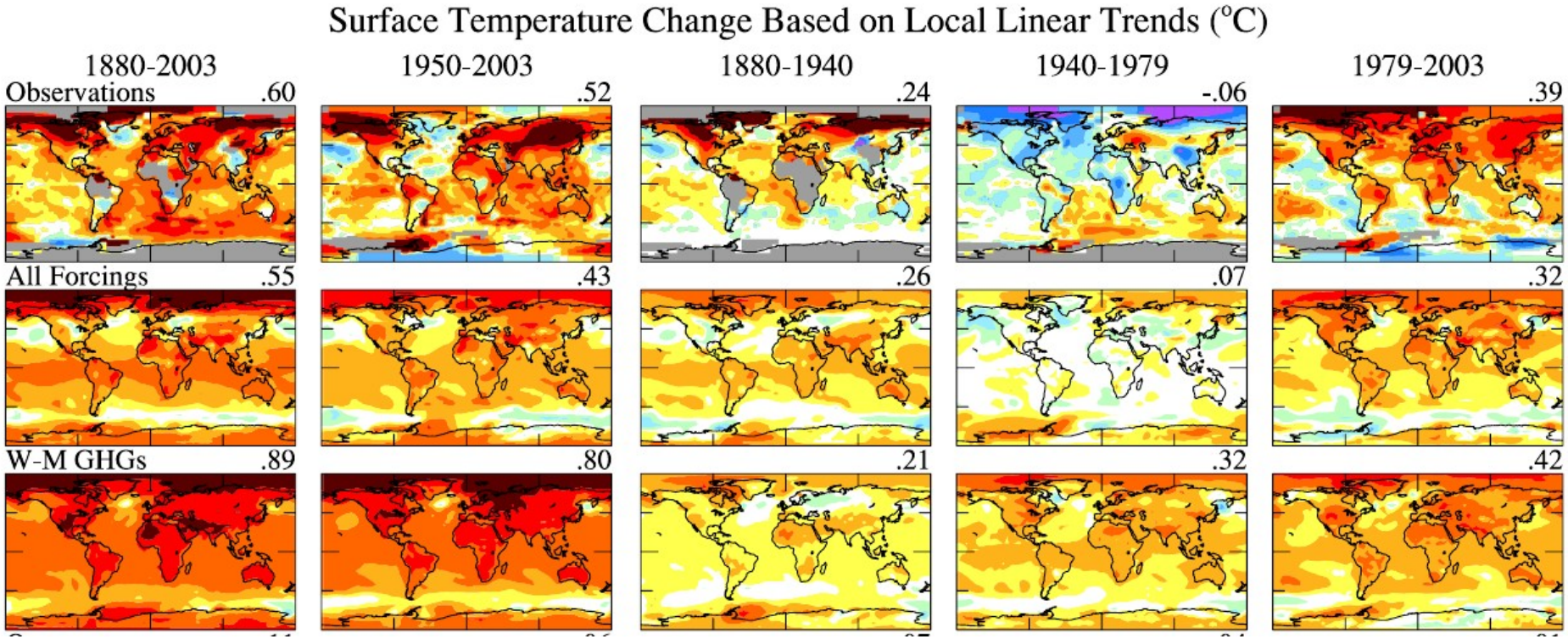


Fig. 9 Global maps of temperature change in observations (*top row*) and in the model runs of Fig. 8, for 1880–2003 and several subperiods. Observations are based on analysis of Hansen et al. (2001), which uses urban-adjusted meteorological station measurements of surface air over land and SST data of Rayner et al. (2003) over the ocean

(Hansen et al., 2007)

La reconstruction de la variabilité climatique contemporaine (5)

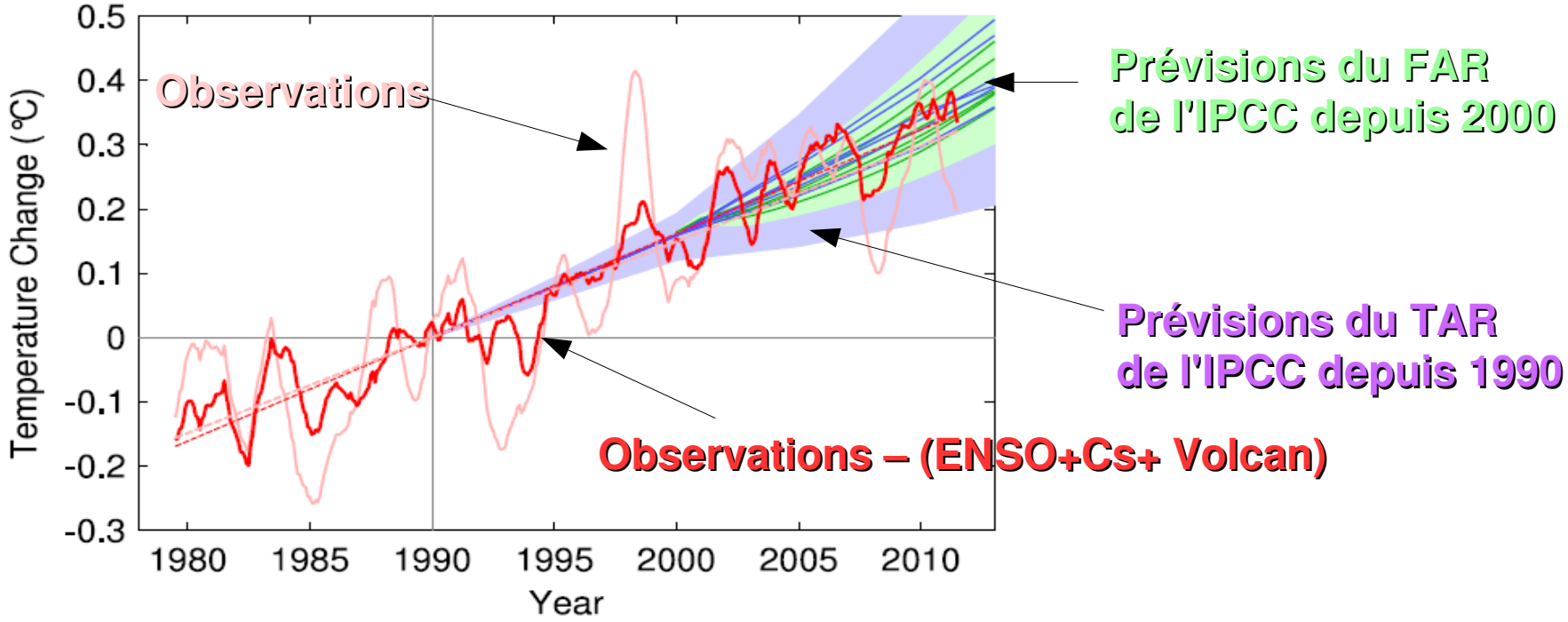


Figure 1. Observed annual global temperature, unadjusted (pink) and adjusted for short-term variations due to solar variability, volcanoes and ENSO (red) as in Foster and Rahmstorf (2011). 12-months running averages are shown as well as linear trend lines, and compared to the scenarios of the IPCC (blue range and lines from the third assessment, green from the fourth assessment report). Projections are aligned in the graph so that they start (in 1990 and 2000, respectively) on the linear trend line of the (adjusted) observational data.

(Rahmstorf et al., 2011)

Conclusion (1)

- Les modèles climatiques numériques reposent sur une représentation formalisée du SC et représentent donc une approche expérimentale
- **Une limite indépassable = nature chaotique du SC**, mais une approche probabiliste permet de s'en affranchir, mais évidemment cela limite l'utilité des modèles en mode prévision dans les cas où la dynamique chaotique n'a pas une grande importance vis-à-vis de mécanismes quasi-linéaires ou au moins non chaotiques
- Des limites sans doute franchissables (dans une certaine mesure !) =
  - **troncature et discrétisation d'un système continu** : aujourd'hui « runs » globaux à des résolutions de 50-100 km & résolution régionale de l'ordre de 10 km. La principale limite est ici d'ordre technique (= puissance du calcul parallèle) mais une plus forte résolution intègre aussi des sources d'erreurs invisibles à des résolutions plus basses. La plus haute résolution passe aussi par des développements théoriques et conceptuels
  - **représentation paramétrée de certains processus sous-mailles**. Il existe par exemple 3 principales paramétrisations de la convection profonde dans les GCM atmosphériques actuels : y-a-t'il des lois primitives universelles possibles pour ces processus ?

Conclusion (2)

- **Modèles = seul & unique outil pour diagnostiquer/prévoir la réponse du SC à un forçage original dans sa forme et/ou son intensité**, c'est-à-dire où nous n'avons aucun analogue passé (par exemple: la hausse contemporaine des GES et son impact climatique)
- Le résultat d'une simulation numérique doit tenir compte de l'échelle spatio-temporelle (1) du phénomène considéré (ex: précip. vs pression) et (2) de l'analyse (ex: une moyenne saisonnière est plus prévisible qu'une moyenne mensuelle dans le cas des prévisions saisonnières; la tendance thermique au 21ème siècle est plus prévisible que la différence entre 2045 et 2046; etc.) et des mécanismes impliqués dans la détermination de la variable analysée, notamment si elle est essentiellement paramétrée. Autrement dit, **l'analyse d'une simulation numérique n'est pas un exercice trivial et univoque** mais nécessite un cadre conceptuel
- La reconstruction rétrospective et/ou vérifiable des anomalies climatiques (comme par exemple sur la période contemporaine ou certains succès de la prévision saisonnière) démontre la **qualité des modèles**, malgré la nature chaotique du système climatique. De même, les prévisions climatiques réalisées en 1990 dans le cadre de l'IPCC encadrent remarquablement bien les observations depuis cette date…