

Les modèles climatiques

Journées ECCOREV sur la modélisation

23 février 2010

Vincent MORON

Université de Provence et CEREGE

Plan de la présentation

1. Définitions et bases du système climatique
2. Les modèles climatiques
3. Exemples de modélisation climatique
 1. La réponse de la température moyenne aux forçages climatiques depuis 1880
 2. La représentation des échelles spatiales: le cas des précipitations indonésiennes
 3. Les prévisions saisonnières à partir des TSO
4. Conclusion

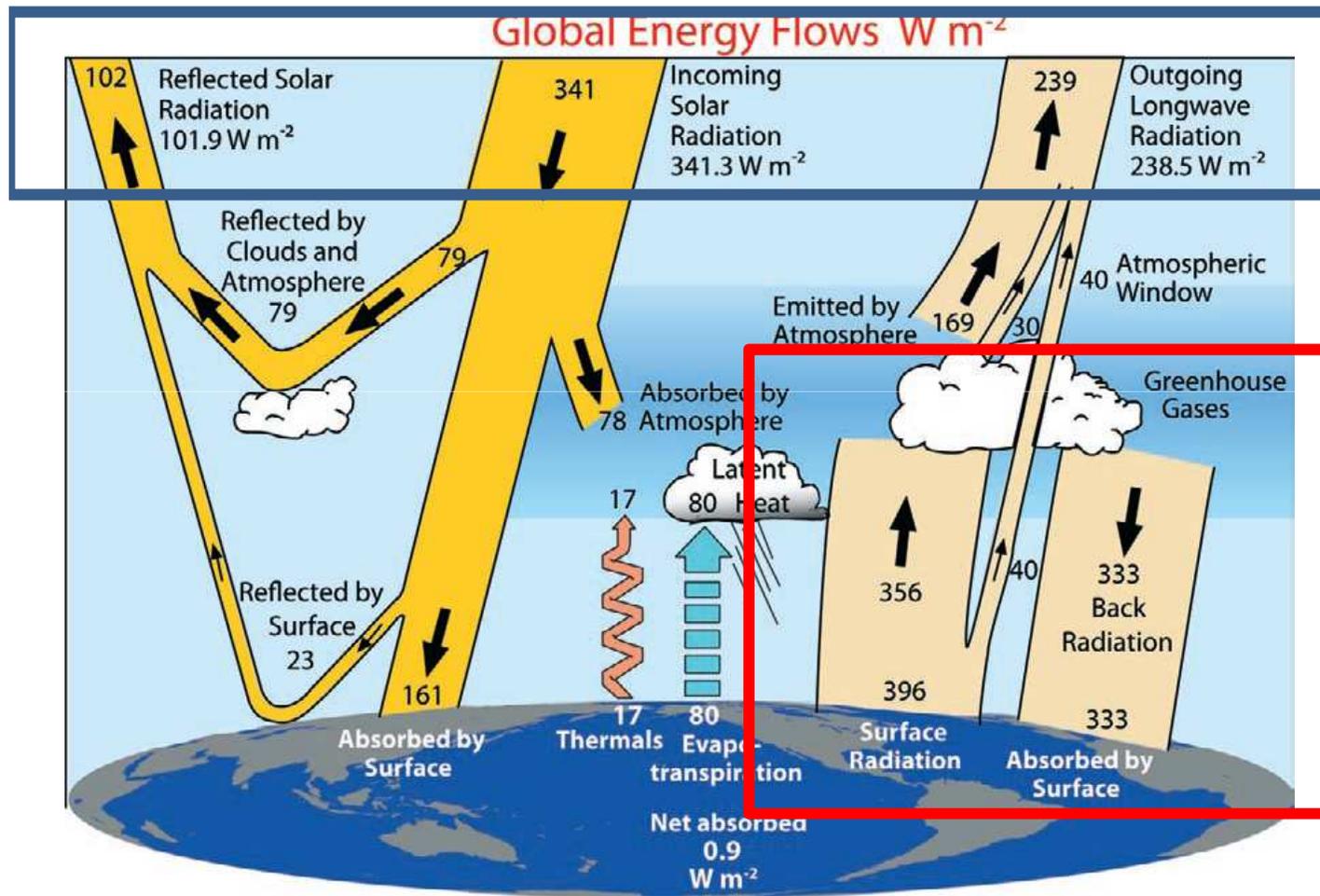
Définitions (1)

- 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 dynamique dissipatif 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 $\sim 342 \text{ W/m}^2$ en moyenne spatiale et annuelle)

Définitions (2)

- La modélisation numérique correspond à une approche **expérimentale** où un analogue formalisé de la réalité peut être initialisé et forcé par des conditions aux limites. Cette approche permet de séparer strictement la cause physique de l'effet (= réponse), mais est limitée par plusieurs contraintes (détaillées ci-après)
- Cette approche est complémentaire de l'approche « **diagnostique** », c'est-à-dire l'analyse des relations statistiques au sein du SC et entre le SC et des paramètres extérieurs. Cette approche ne permet pas de séparer strictement la réponse de la cause, mais est plus « intégrative » dans le sens où une observation à un moment donné correspond en théorie à l'intégration de tous les facteurs impliqués

Bilan énergétique planétaire



GAIN = PERTE en moyenne annuelle et planétaire

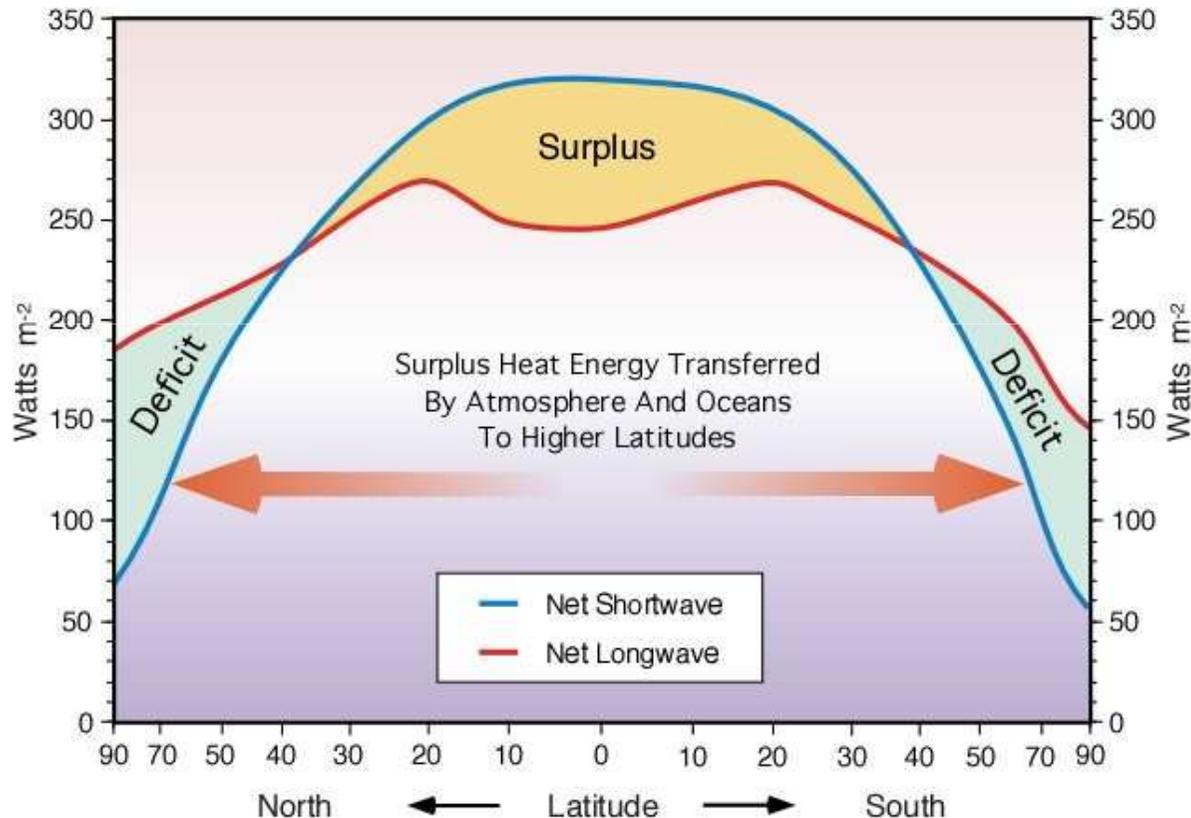
EFFET DE SERRE = apport supplémentaire d'énergie à la surface (= $\sim 2 \times$ le RS) et l'atmosphère (= $\sim 4 \times$ le RS)

- 60-85% = vapeur d'eau + nuage (mais durée de vie atmosphérique < 15 jours)
- 9-25% = CO_2
- < 5% = autres GES

(Source: Trenberth *et al.* 2009)

Les déséquilibres énergétiques

Moyenne annuelle et latitudinale des gains et des pertes radiatives (**ondes courtes** et **IR**)



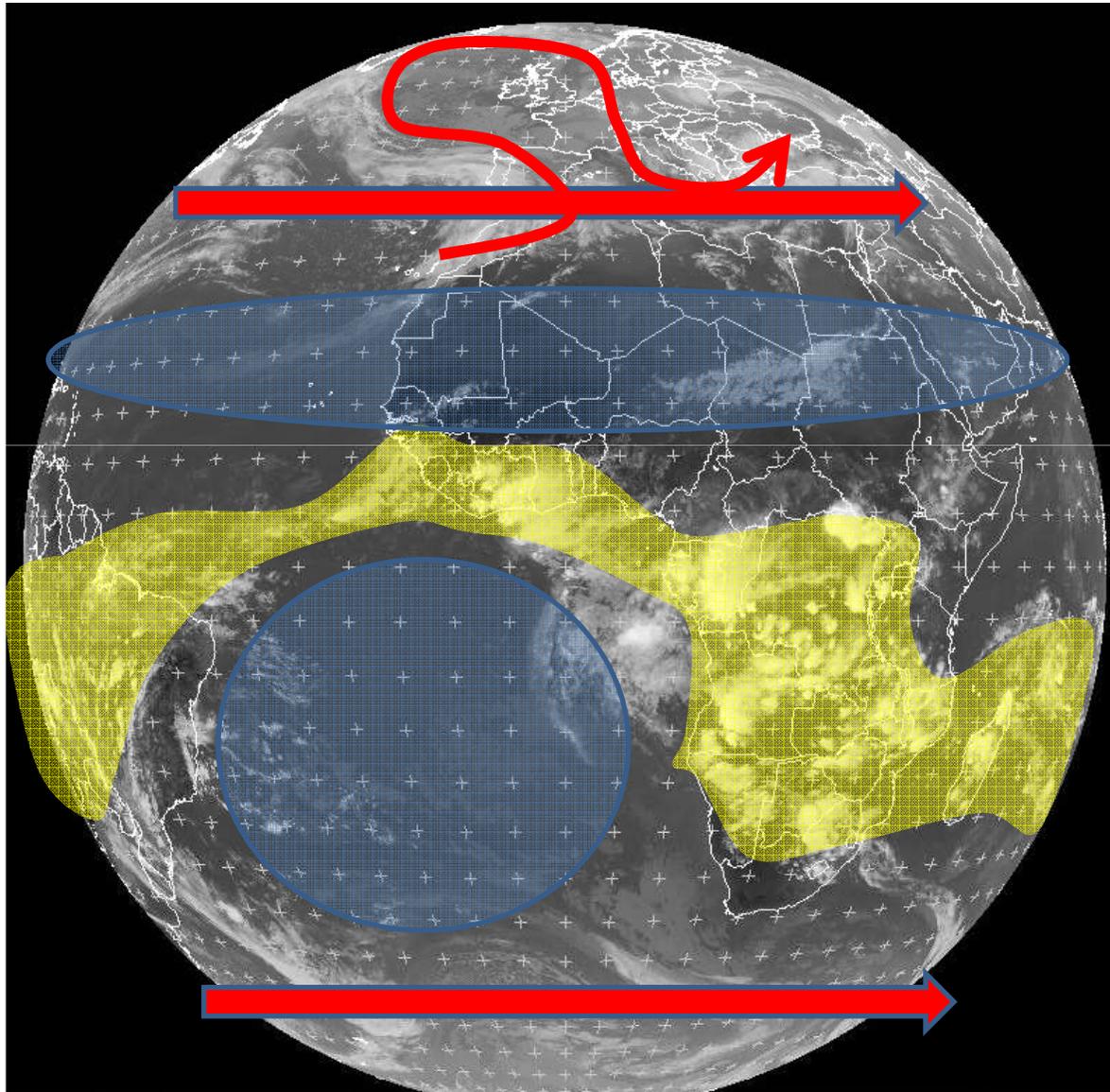
1. Déséquilibre N-S entre ZIT et pôles
2. Déséquilibre vertical entre la surface terrestre et l'atmosphère
3. Déséquilibre saisonnier entre l'hémisphère d'été et d'hiver

= l'échauffement différencié créé des gradients de densité/pression au sein de l'océan et l'atmosphère = **origine thermique de la circulation de l'air et de l'eau**

(Source: http://www.eoearth.org/image/Radiation_balance.jpg)

Les différentes échelles de mouvement de l'atmosphère

1



Perturbations tempérées
transitoires + ondes de Rossby
quasi-stationnaires aux moyennes
latitudes

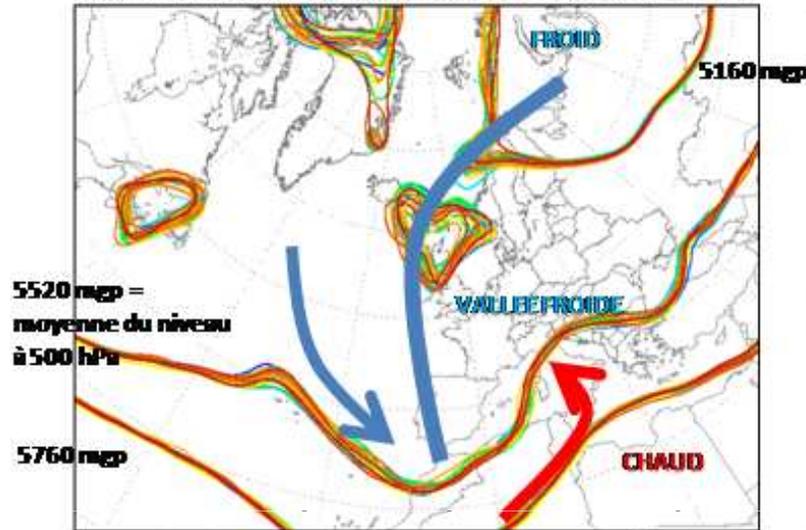
Ceinture anticyclonique tropicale =
branche subsidente de la
circulation de Hadley

Zone de convergence intertropicale
= branche ascendante de la
circulation de Hadley/Walker avec
un fort contrôle du cycle diurne et
des structures nuageuses de
différente taille

7

Illustration de la dynamique chaotique 1

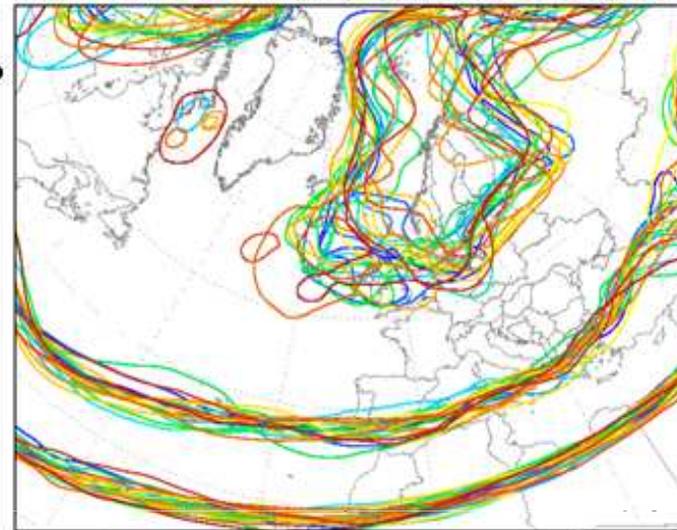
Ini: Thu,18FEB2010 00Z Val: Fri,19FEB2010 00Z
500 hPa Geopotential (Isohypsens: 516 552 576 gpdam)



Daten: Ensembles des GFS von NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

+ 1 jour

Ini: Thu,18FEB2010 00Z Val: Tue,23FEB2010 00Z
500 hPa Geopotential (Isohypsens: 516 552 576 gpdam)



Daten: Ensembles des GFS von NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

+ 5 jours

Ini: Thu,18FEB2010 00Z Val: Sun,28FEB2010 00Z
500 hPa Geopotential (Isohypsens: 516 552 576 gpdam)



Daten: Ensembles des GFS von NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

+ 10 jours

Ini: Thu,18FEB2010 00Z Val: Fri,05MAR2010 00Z
500 hPa Geopotential (Isohypsens: 516 552 576 gpdam)



Daten: Ensembles des GFS von NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

+ 15 jours

Isohypsens (5760, 5520, 5160 mgp) de 20 membres d'un modèle météorologique initialisé le 18/2/2010 à 00h UTC à +1, +5, +10 et +15 jours

Synthèse

- Système climatique : système chaotique dissipatif composé d'éléments en interaction et alimenté en quasi-totalité par le rayonnement solaire
- Les gains énergétiques moyennés à l'échelle planétaire et annuelle sont équilibrés par des pertes équivalentes
- Cet équilibre global cache des déséquilibres (1) entre la zone tropicale et les pôles, (2) entre la surface et l'atmosphère et (3) entre l'hémisphère d'été et d'hiver
- Les mouvements dans l'air et l'eau, au départ initiés par des différences de densité/pression liées à la température et qui contribuent aux échanges 3D au sein du SC se produisent sur des échelles multiples
- La nature chaotique du SC n'interdit pas sa simulation/prévision selon une approche probabiliste car des relations quasi-linéaires existent à certaines échelles spatiales et temporelles

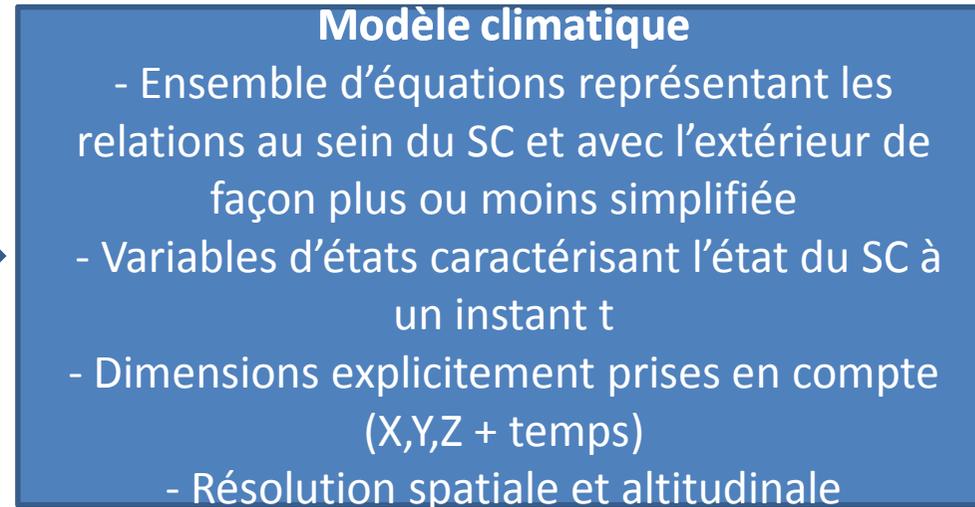
Historique de la modélisation climatique

2

- À partir des 16-17^{ème} : établissement des lois physiques « primitives » (exemples loi de Newton, loi de Boyle, etc.)
- 1896: Arrhenius établit qu'un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ 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 bien inférieur à une heure)
- 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 1.5×10^{15} opérations élémentaires par seconde, le MFlop ayant été dépassé en 1961, le GFlop en 1984 et le TFlop en 1997)

Conditions initiales et forçages

Conditions initiales
= valeurs attribuées
aux variables d'état
à l'instant $t(0)$.



Conditions aux limites (ou forçages)

= variables causant une variation spatio-temporelle des variables d'état. Cela peut-être par exemple le cycle diurne/annuel du rayonnement solaire, les paramètres orbitaux, la concentration atmosphérique en GES, mais aussi les températures de surface océanique dans le cas où le modèle climatique représente l'atmosphère

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 boîtes
- 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 2

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

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

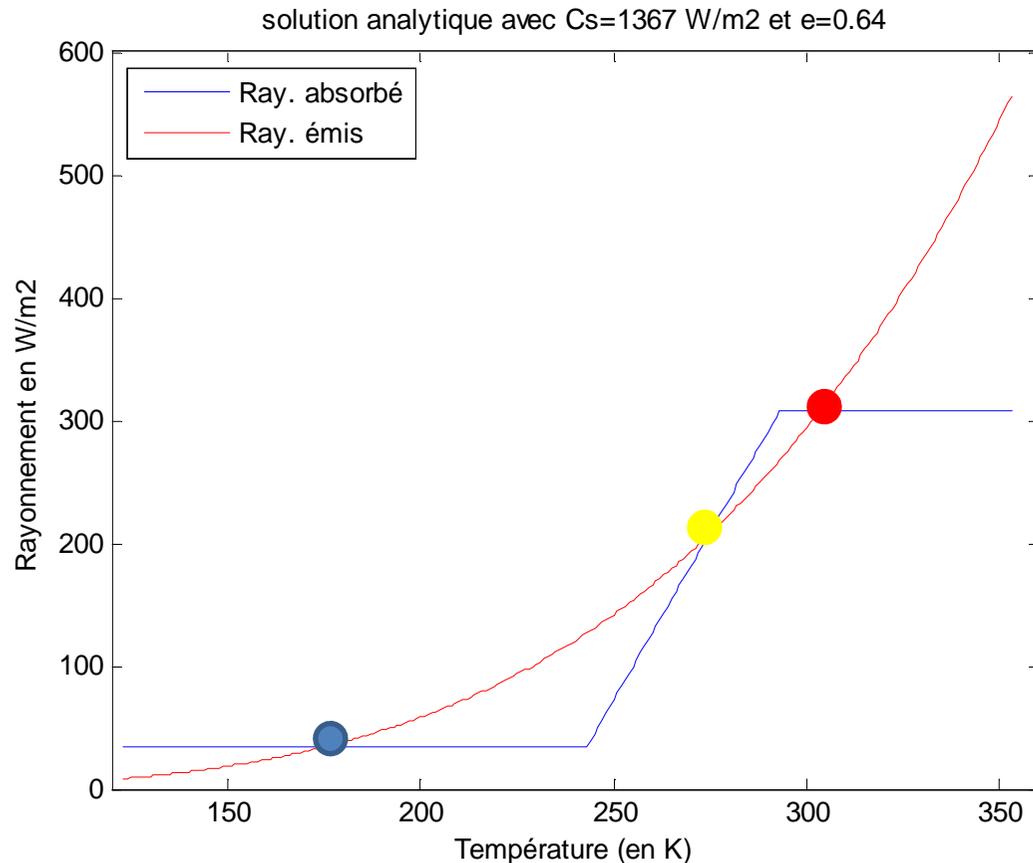
Les variations de la température moyenne du SC peuvent être vues à partir de cette équation comme

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

- **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)
- **une condition aux limites/un forçage** : C_s = constante solaire (= quantité de rayonnement solaire intercepté par un disque de même rayon que la terre)

Solutions analytiques

2



3 solutions à l'équilibre avec une constante solaire \sim actuelle ($= 1367 \text{ W/m}^2$) et une relation paramétrée entre l'albédo et la température

- 2 solution stables (une terre froide avec un albédo très fort = **terre pratiquement totalement englacée** et **une terre chaude avec un albédo très faible**)
- 1 instable avec des **conditions assez proches de l'actuel** (soit $T= 288\text{K}$ en surface, albédo ~ 0.3 avec des glaciers présents aux deux pôles)
- ce type de modèle peut également servir à (1) estimer l'intensité de l'effet de serre, (2) calculer la « sensibilité climatique », c'est-à-dire la quantité de variation du bilan radiatif pour obtenir une hausse unitaire de T ($\sim 3.75 \text{ W/m}^2/\text{K}$ en première approximation)

Éléments d'un MCG

- Équations « primitives » de la mécanique et la thermodynamique des fluides (identiques entre tous les MCGs)
- Code radiatif (transfert de rayonnement au sein du SC et entre l'univers et le SC) et représentation explicite des sources/puits d'énergie au sein du SC
- **Paramétrisations** (= relations empiriques ou semi-empiriques) pour (1) les mécanismes sous-mailles (= dont la taille est inférieure à la résolution de base, c-à-d. le point de grille) comme la convection ou les processus de surface notamment au-dessus des continents et (2) pour des processus encore très mal connus du point de vue physique (par exemple, les caractéristiques physiques et optiques des nuages). Contrairement aux équations primitives, il existe plusieurs paramétrisations possibles pour le même processus

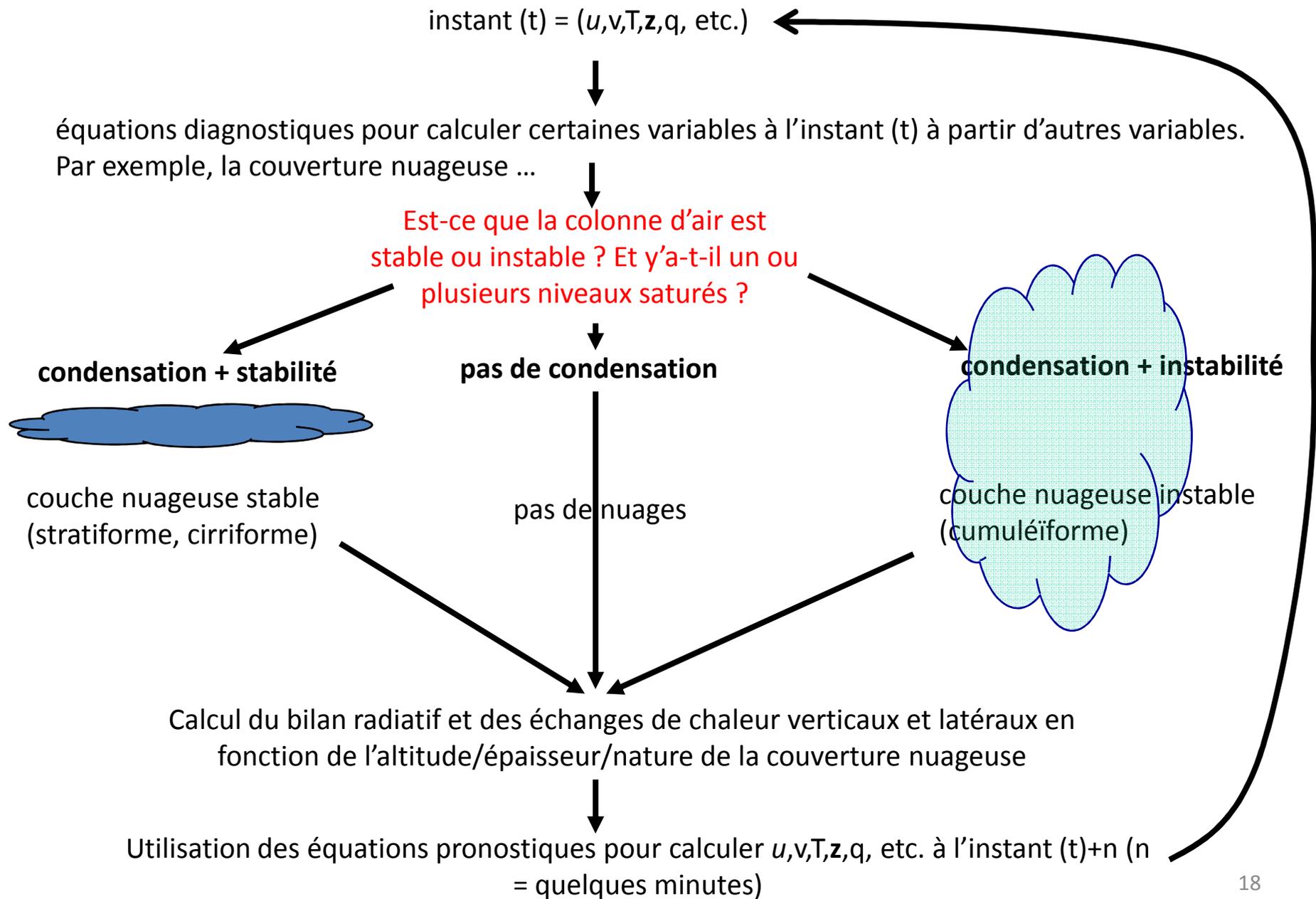
Lois « primitives »

- = Lois représentant les relations entre pression, masse, température, les mouvements 3D sur une sphère, etc. 3 grands types
- Conservation du moment = vitesse x masse (équations de Navier-Stokes)
 - Loi établissant le lien entre température et gain/perte d'énergie
 - Conservation de masse

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

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 certaines sous maille qui ne peuvent pas être représentées explicitement, soit parce qu'on ne le connaît pas encore suffisamment bien
 - 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 (T,q etc.) grâce aux équations diagnostiques.

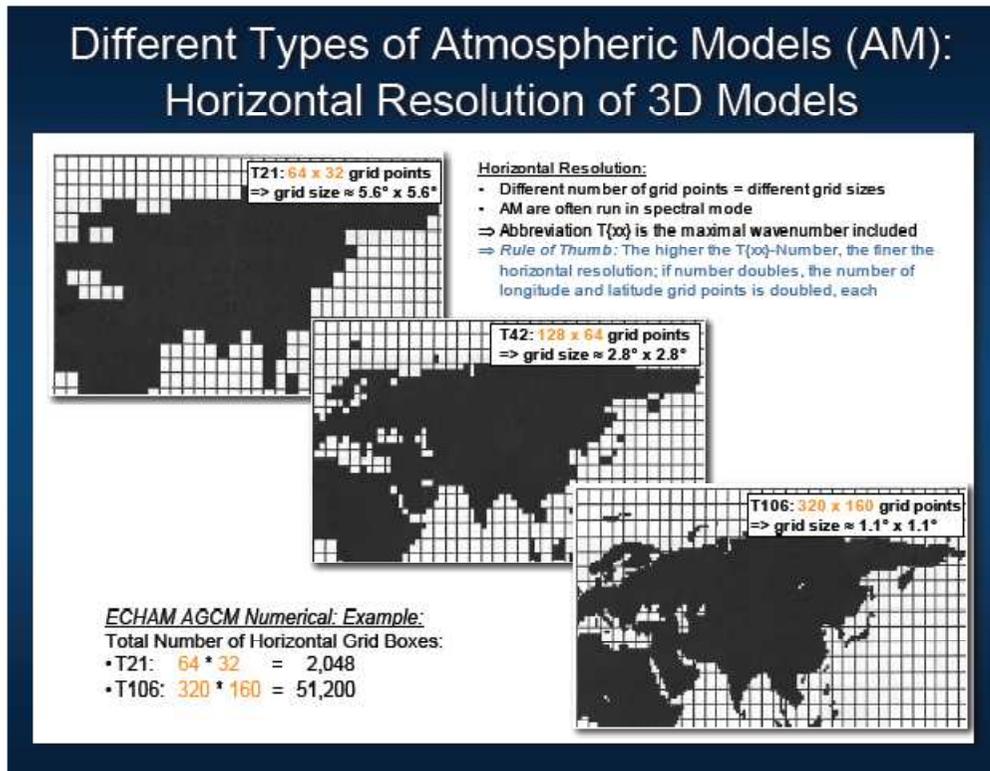


Résolution spatiale (1)

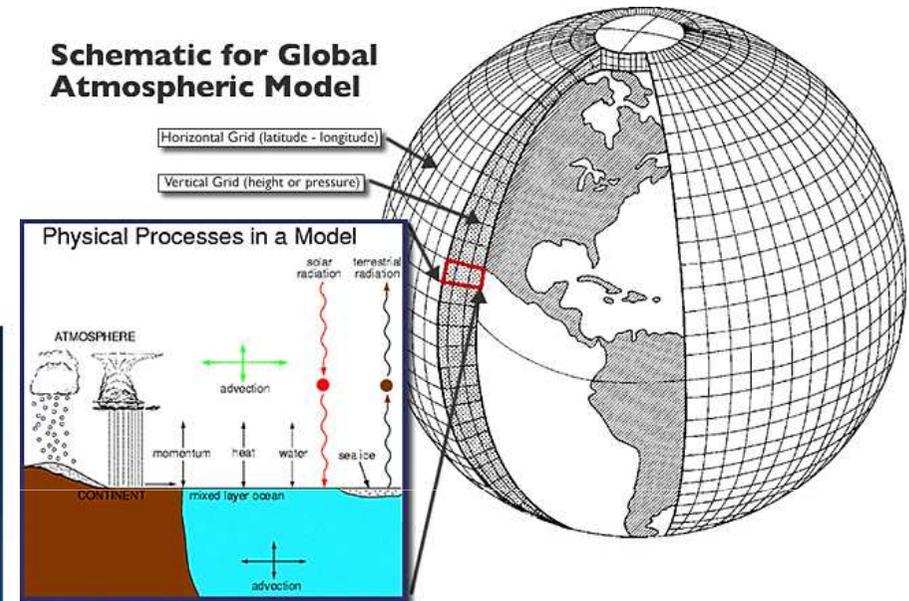
- Un modèle discrétise un milieu 3D continu en unités de base 3D = « points de grille »
- Il faut d'autre part approximer des solutions numériques à des systèmes d'équations non-linéaires sans solution analytique: deux techniques différentes;
 - Approche « locale » = Différences finies: approximations de solutions des équations différentielles grâce aux différences finies (= approximation d'une solution comme une combinaison linéaire de fonctions discontinues). La solution est donnée directement pour une grille régulière
 - Approche « globale » = Méthode spectrale: recherche des solutions des équations différentielles grâce à des décompositions de Fourier (= approximation d'une solution comme une combinaison linéaire de fonctions continues). Plus le nombre de coefficients est grand, plus la solution est approximée avec détails. La solution est donc donnée globalement. Le premier coefficient correspond à la plus grande échelle, puis le second est la longueur totale / 2 etc. Cette solution est correcte dans le cas de champs lissés mais se dégrade dans le cas de champs abrupts (comme par exemple les précipitations). La résolution est alors donnée en nb de coefficients spectraux utilisés (« T21 » = Troncature spectrale avec les 21 premières harmoniques), ce qui correspond à une distance minimale explicitement représentée (T21 = 5.625°)

Résolution spatiale (2)

- Résolution directe (différences finies) ou indirecte via les coefficients spectraux des équations sur chaque points de grille 3D



Schematic for Global Atmospheric Model

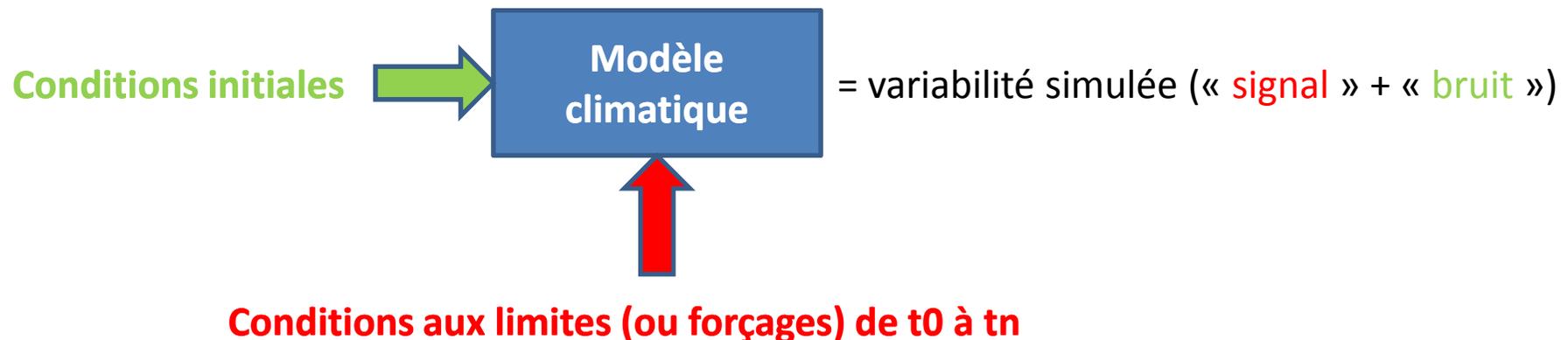


Nb de points ?

- T21 = 64 (en lon) x 32 (en lat)
- ensuite quadruplement des points (sur l'horizontale) avec le doublement des coefficients spectraux pris en compte
- actuellement, la plupart des simulations « climatologiques » planétaires sont réalisées avec une résolution entre le T42 et le T85

Ensemble de simulations

- La variabilité simulée par une expérience numérique quelconque contient **deux informations *a priori* indépendantes**: le « signal » forcé par les conditions aux limites + le « bruit » lié à l'initialisation



- Quelle est la portion de variabilité simulée attribuable au forçage ?
- Deux cas extrêmes
 - Prévision météorologique < 15 jours
 - Simulation climatologique > N mois

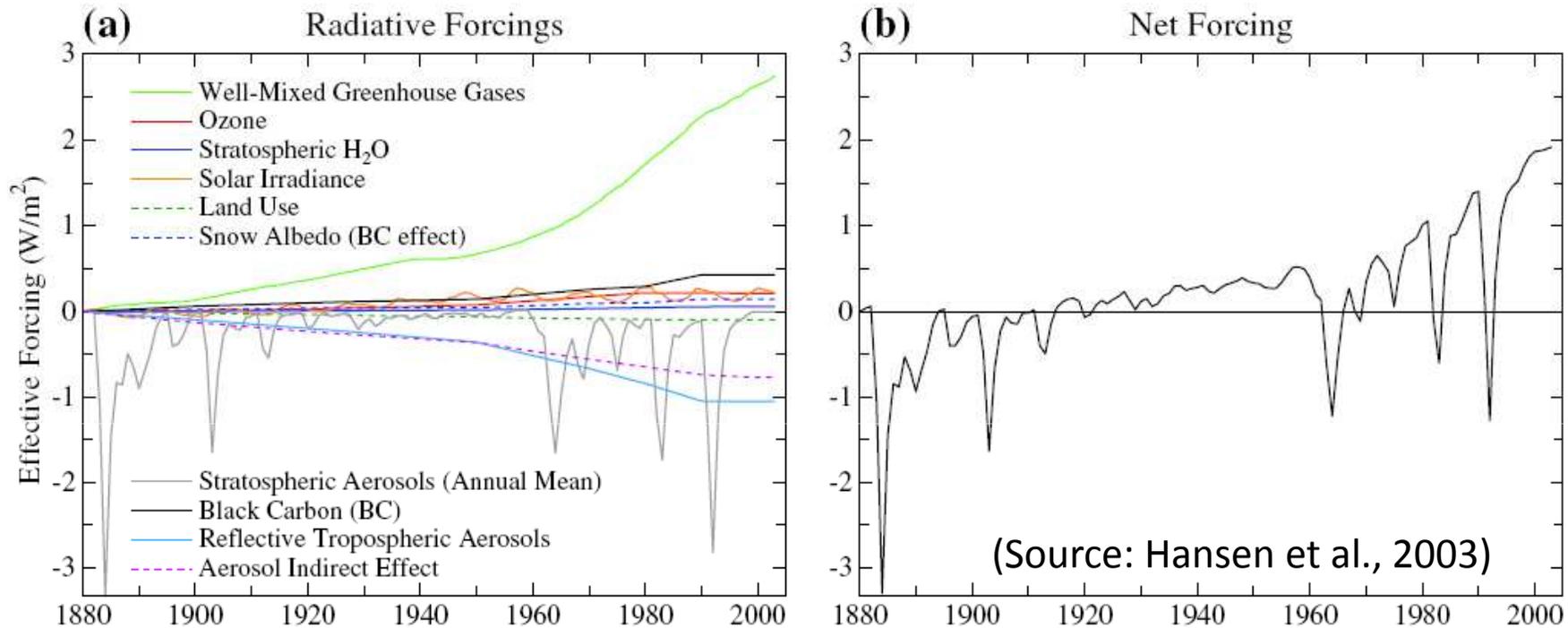
Météo vs climat

- Dans une prévision « météorologique », **l'initialisation est fondamentale**. L'accent est mis sur la connaissance précise des conditions initiales au début de la simulation et le « signal » est alors la portion de variabilité convergente entre différentes dates initiales et on estime que le bruit l'emporte quand la différence entre les simulations est de même ordre de grandeur que celle de la variable analysée
- Dans une prévision/ simulation « climatologique », **l'initialisation n'a aucune importance en tant que telle** puisque l'atmosphère n'a pratiquement pas de mémoire. **Seul le forçage importe ici**, MAIS une seule expérience ne permet pas de discerner la portion de variance liée au « bruit » de celle forcée par les conditions aux limites
- Il est donc nécessaire de réaliser des **ensembles de simulation** en changeant les conditions initiales afin de capturer de façon probabiliste l'espace de phase occupé par le « signal » forcé, qui est **reproductible** d'une expérience à une autre. L'ensemble doit être d'autant plus grand que la portion théorique forcée est faible. Par exemple, la détection du signal atmosphérique dans le Pacifique tropical forcé par l'ENSO dans la zone tropicale est détectable dès 3 simulations. La détection du signal atmosphérique forcé par les TSO au-dessus de l'Atlantique Nord nécessite au moins 25-30 simulations

Synthèse

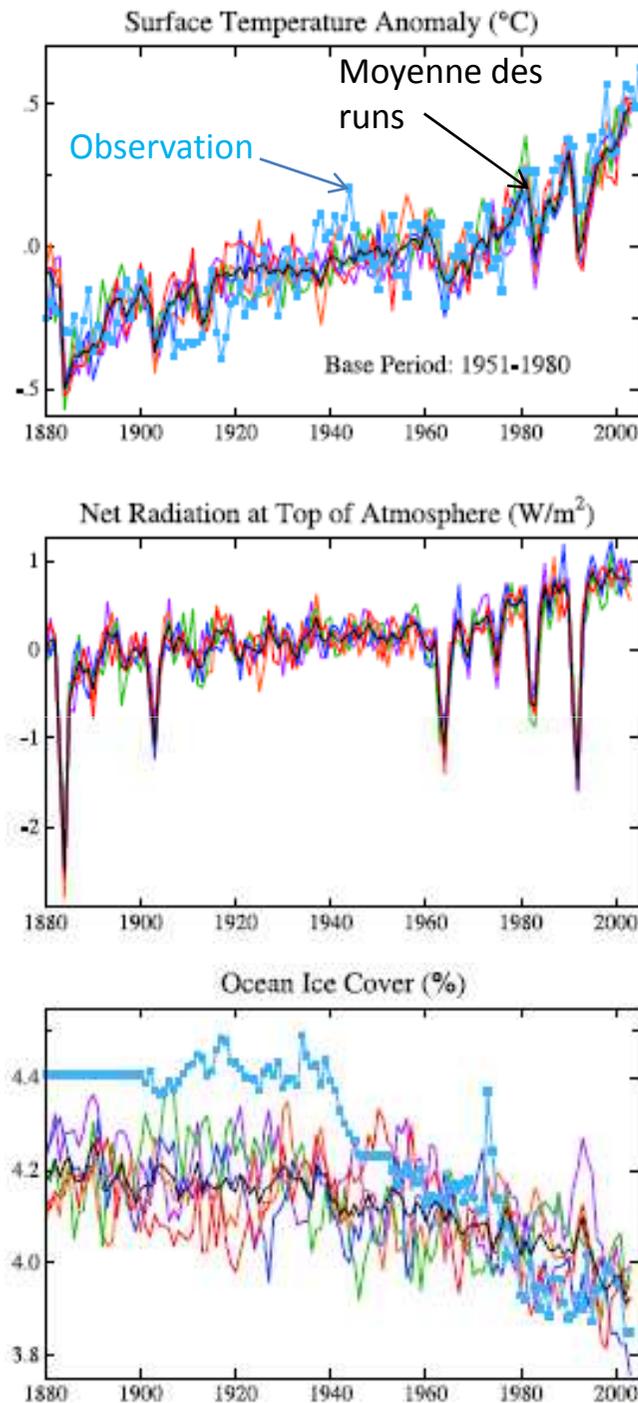
- Modèle climatique: représentation + ou – idéalisée, donc **intrinsèquement imparfaite**, du système climatique
- Deux principales difficultés
 - La mal- ou faible connaissance de certains processus physiques importants (comme par exemple, les propriétés physico-chimiques et optiques des nuages)
 - La nécessaire discrétisation spatiale (troncature) du système climatique: une solution est d'augmenter la résolution, mais cela n'augmente pas nécessairement le « réalisme » du modèle car une échelle spatiale fine explicitement prise en compte peut alors générer des erreurs
- Est-ce que ces difficultés « interdisent » la modélisation ?
 - Bien évidemment NON !
 - ... simplement, il faut garder à l'esprit ses limites et considérer une approche probabiliste, toujours possible même dans le cas d'un système chaotique comme le climat ...
 - ... et ne pas oublier qu'une simulation « climatique » (= impact des conditions aux limites sur le SC) n'est pas la même chose qu'une prévision « météorologique » (= divergence à partir de conditions initiales quasiment semblables)
- Nécessité de réaliser des ensembles de simulation afin de détecter (1) le signal « forcé », c'est-à-dire physiquement induit par les conditions aux limites (dans le cas d'une simulation « climatologique »), et (2) la limite temporelle induite par l'incertitude sur les conditions initiales (dans le cas d'une simulation « météorologique »)

Exemple #1 : réponse climatique aux forçages depuis 1880 3



Problématique : comprendre la variation de la température annuelle depuis ~ 1880

- La variabilité de 1 à 100 ans de la température moyenne annuelle en surface dépend de nombreux facteurs: 3 sont particulièrement importants : GES, constante solaire et éruption volcanique
- les forçages mesurés ou estimés sont utilisés pour forcer un modèle climatique (différentes formes de couplage océan-atmosphère) + rôle de l'utilisation des sols + rôle des poussières sur la couverture neigeuse (dérivées de la pollution atmosphérique)
- 5 simulations initialisées différemment pour chaque simulation

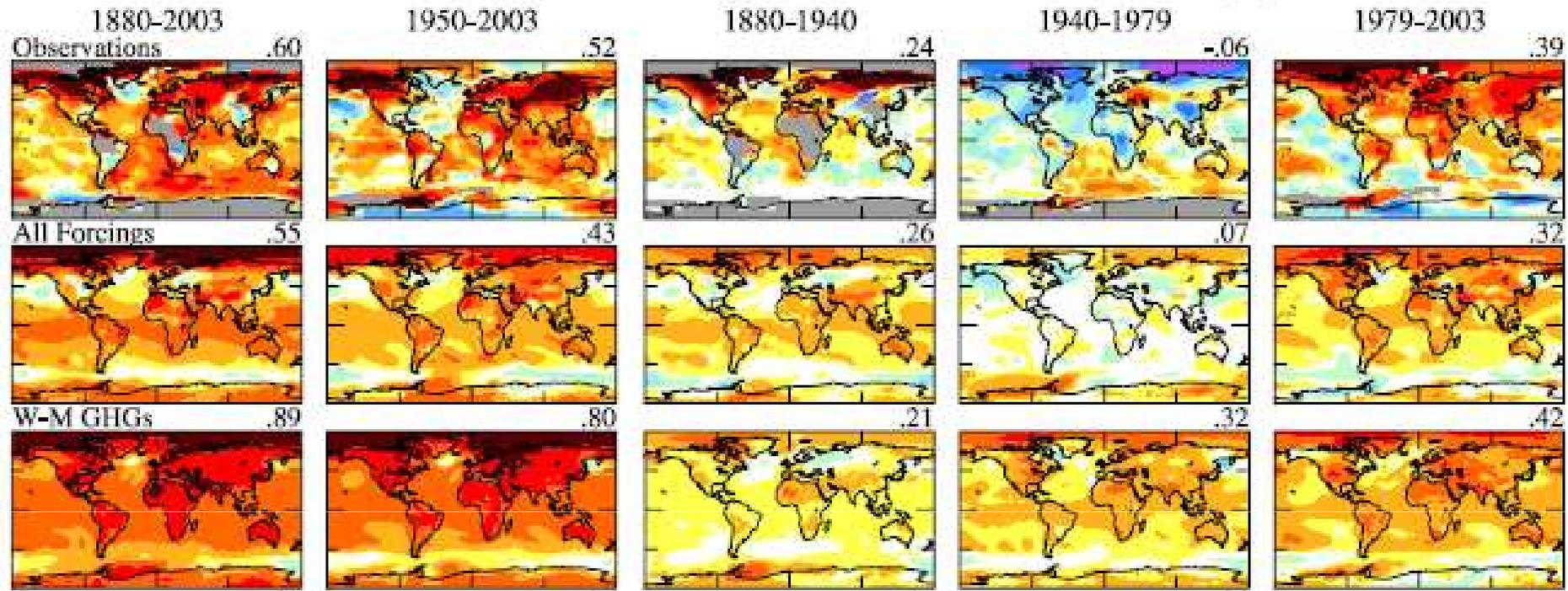


Résultats (runs couplés)

- Moyenne planétaire de la température moyenne annuelle (en °C), du rayonnement net mesuré au sommet de l'atmosphère (en W/m²) et extension de la banquise (en % de la surface)
- la hausse thermique générale est correctement simulée, bien que certains éléments soient mal simulés (mais si l'origine est non-forcée, le MCG ne peut pas reproduire la réponse, tout au moins sa phase, par exemple la hausse correspondante à l'événement chaud ENSO de 1997/98)
- déséquilibre énergétique croissant, ponctuellement inversé par les éruptions volcaniques majeures
- la baisse de la couverture englacée est plus faible que dans les observations

(Source: Hansen et al., 2003)

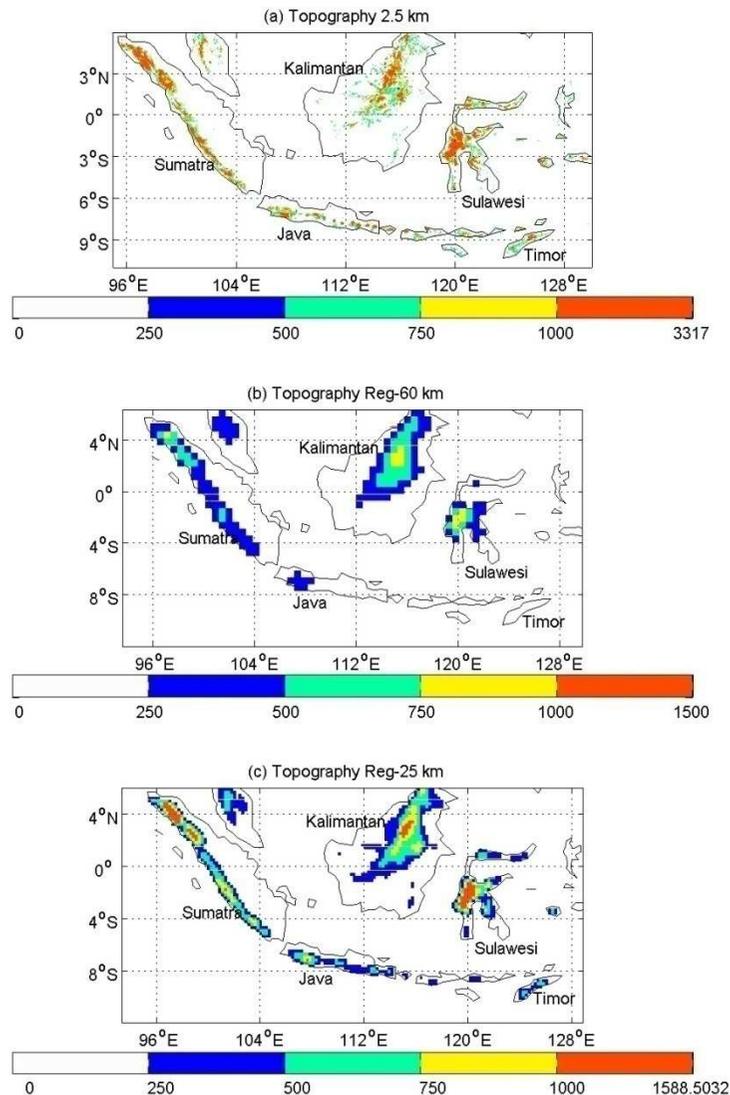
Surface Temperature Change Based on Local Linear Trends (°C)



(Source: Hansen et al., 2003)

- variations spatiales plus cohérentes dans le modèle que dans les observations (en liaison avec la résolution et les échelles spatiales explicitement prises en compte)
- amplitude ~ correcte des variations moyennes
- géographie simulée conforme en général avec celle observée, surtout sur le long terme avec par exemple, une hausse plus intense sur l'Arctique et plus faible sur le nord de l'Atlantique et le pourtour Antarctique.
- différence sur des périodes plus courtes, notamment avant 1979 : origine de ces variations ? Si elles sont non-forcées, il n'y a pas de raison que le MCG en simule la phase et l'amplitude

Exemple #2 : La représentation des échelles spatiales: le cas de l'Indonésie 3



Géographie du « continent » maritime ?

- multitude d'îles de taille différente, souvent montagneuse + eaux chaudes (thermocline < 100 m et TSO de 27°C à 29°C)
- pôle occidental de la circulation de Walker Pacifique

= atmosphère potentiellement instable dans les basses couches avec interaction entre échelles fines (circulation de brise de mer/terre & de montagne/vallée, convection diurne etc.) et grande échelle (circulation de Walker et ENSO)

Un modèle de résolution T42 ou même T85 ne prend pas correctement en compte cette géographie : deux exemples de conséquences ...

(Source: Moron et al., 2010)

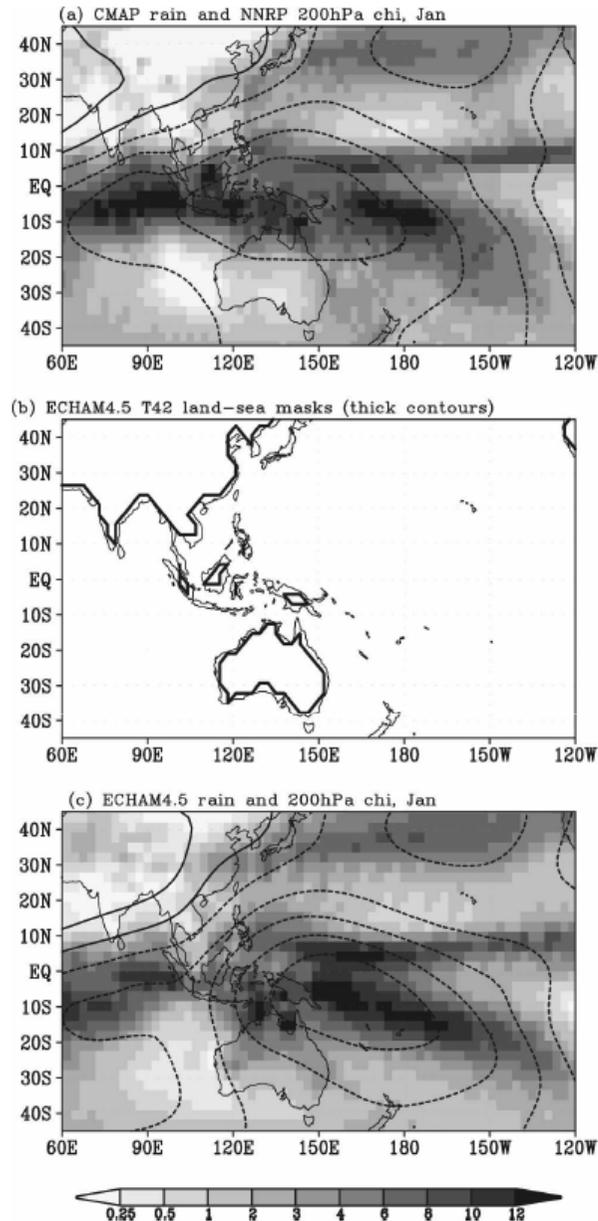


FIG. 10. (a) Climatology (1982–2002) of the observed CMAP monthly precipitation (mm day^{-1} , shaded), and NNRP 200-hPa velocity potential (contour interval of $1 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). (b) Land-sea masks in the ECHAM4.5 T42 model (thick contours). (c) Climatology (1982–2002) of the simulated ECHAM4.5 precipitation (mm day^{-1} , shaded) and 200-hPa velocity potential (contour), which is displaced eastward compared to that in (a).

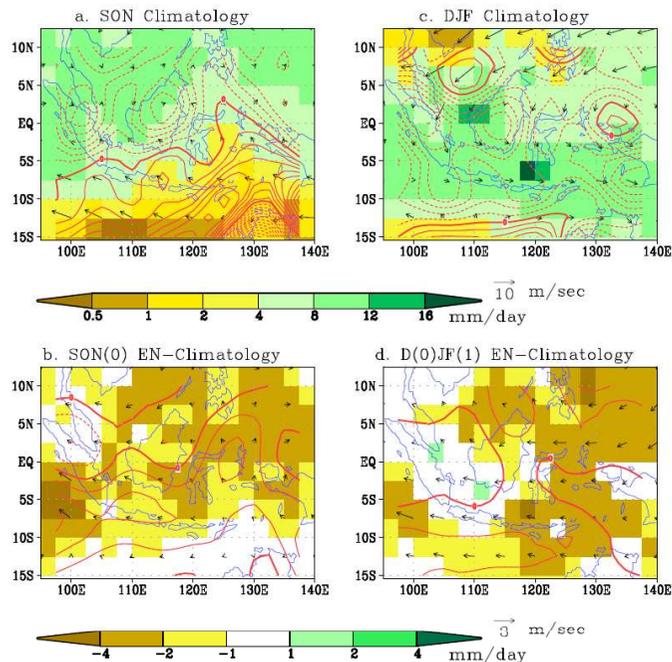
Conséquence #1 : la climatologie moyenne

- Dans l'observation (+ estimation satellite), le maximum pluviométrique sub-équatorial s'étend de l'océan Indien à la Nouvelle Guinée, puis scission en deux branches (ZCIT au nord de l'équateur et ZCPS NW-SE dans le Pacifique SW)
- cela correspond à une divergence en haute troposphère (200 hPa) avec un couplage entre ce qui se passe en bas et en haut via l'ascendance profonde
- une simulation T42 ne simule pas bien le maximum pluvio. sur l'Indonésie, car il est en partie lié à des échelles fines, inaccessibles à cette échelle. Cela décale aussi la divergence à 200 hPa de 20-30° vers l'ESE.
- Or cette divergence est à l'origine de téléconnexions via les ondes atmosphériques
- Toutes les téléconnexions associées aux anomalies d'ascendance/subsidence au-dessus de l'Indonésie risquent d'être (1) trop faibles et/ou (2) mal placées avec cette résolution
- autrement dit, les erreurs à petite échelle ont des conséquences à une échelle beaucoup plus vaste

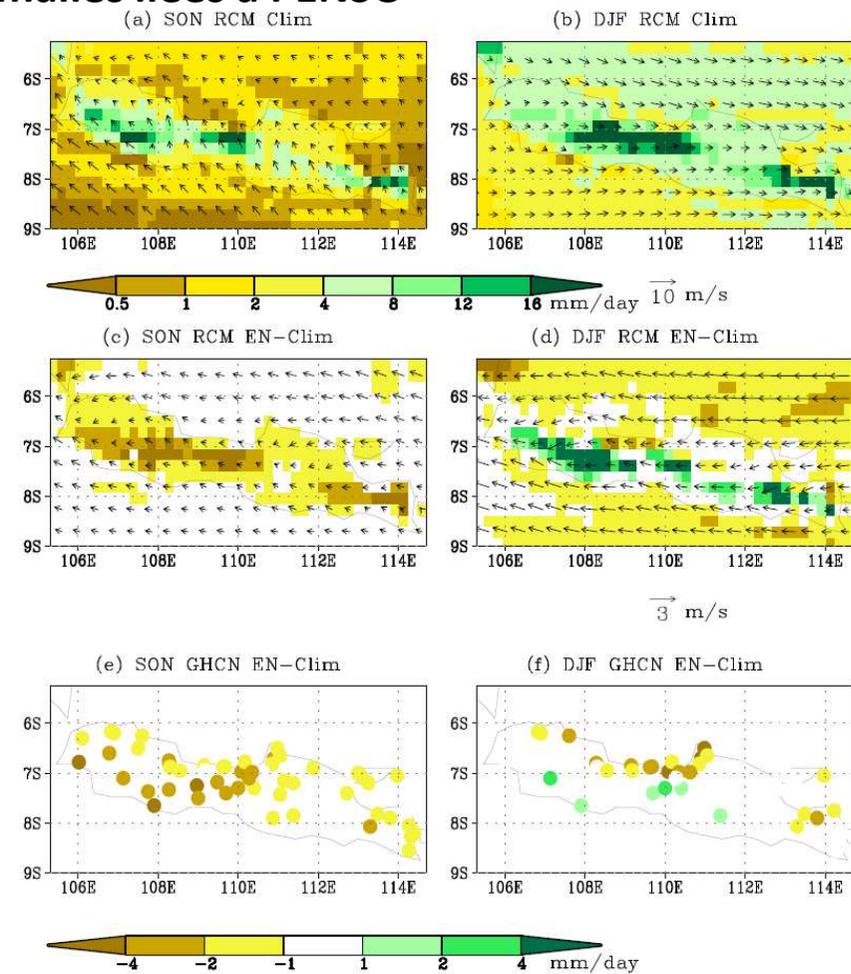
(Source: Qian, 2008)

Conséquence #2 : les échelles spatiales des anomalies liées à l'ENSO

3



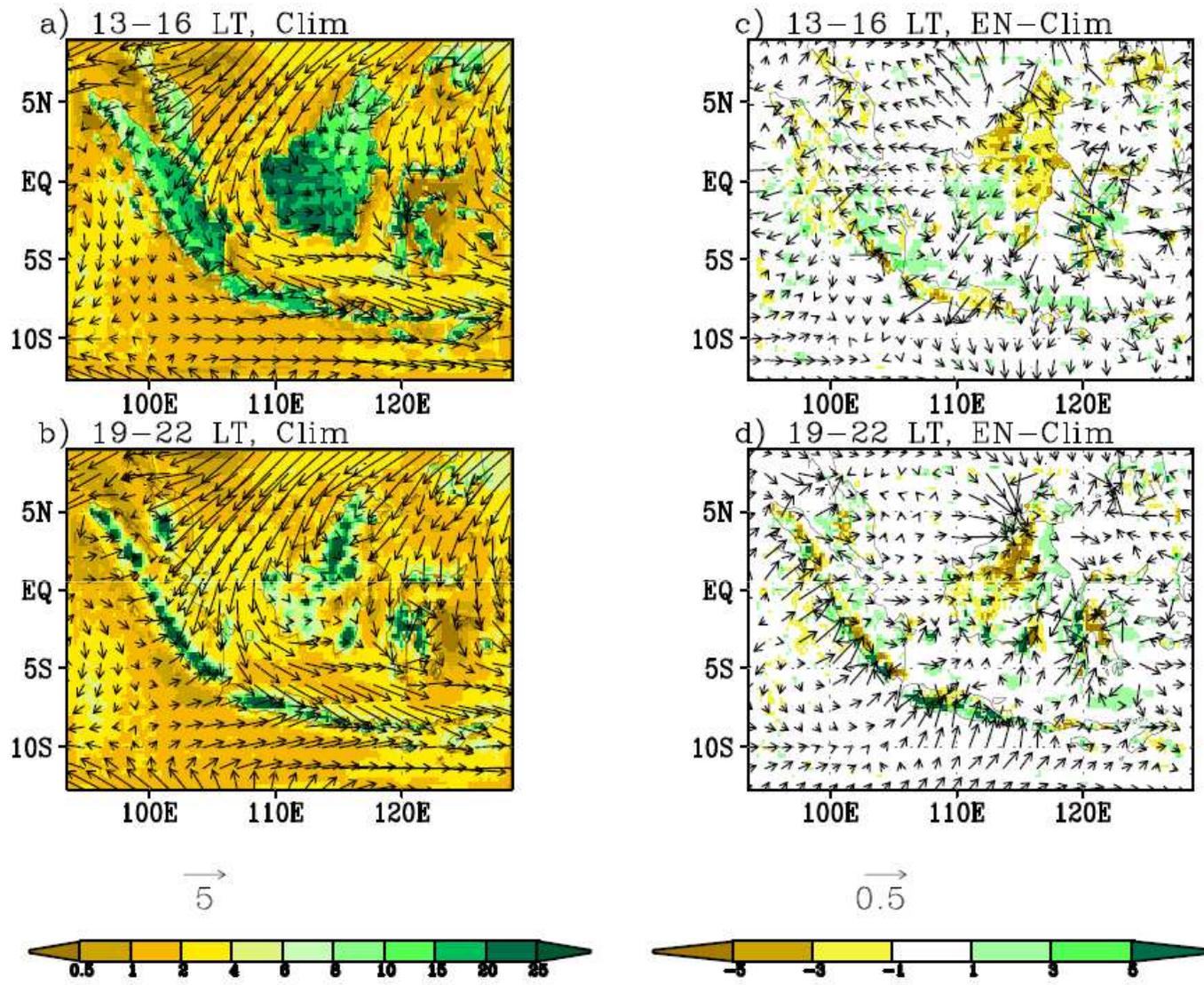
(Source:
Qian et al.,
2010)



- Sept.-Nov. : signal de l'ENSO = - de pluie partout (à cause d'un retard de l'installation de la mousson d'WNW + anomalie de subsidence généralisée) = peu de différences intra-régionales car tous les forçages sont consistents (= subsidence + anomalies froides de TSO et accélération du vent d'ESE)

- Déc.-Février : signal de l'ENSO = fortes différences intra-régionales avec plus de pluie sur certaines parties des îles combinée avec moins de pluies en général. La hausse locale est liée à un renforcement du cycle diurne lors des années ENSO à cause de l'affaiblissement général de la mousson d'WNW

(Source: Robertson et al., 2010)



- renforcement du cycle diurne lors des années ENSO
- cette réponse est inaccessible tant que la géographie/topographie des îles n'est pas suffisamment réaliste (dans ce cas, la résolution doit être largement inférieure à 100 km)

Exemple #3 : Les prévisions saisonnnières à partir des TSO

3

Problématique ?

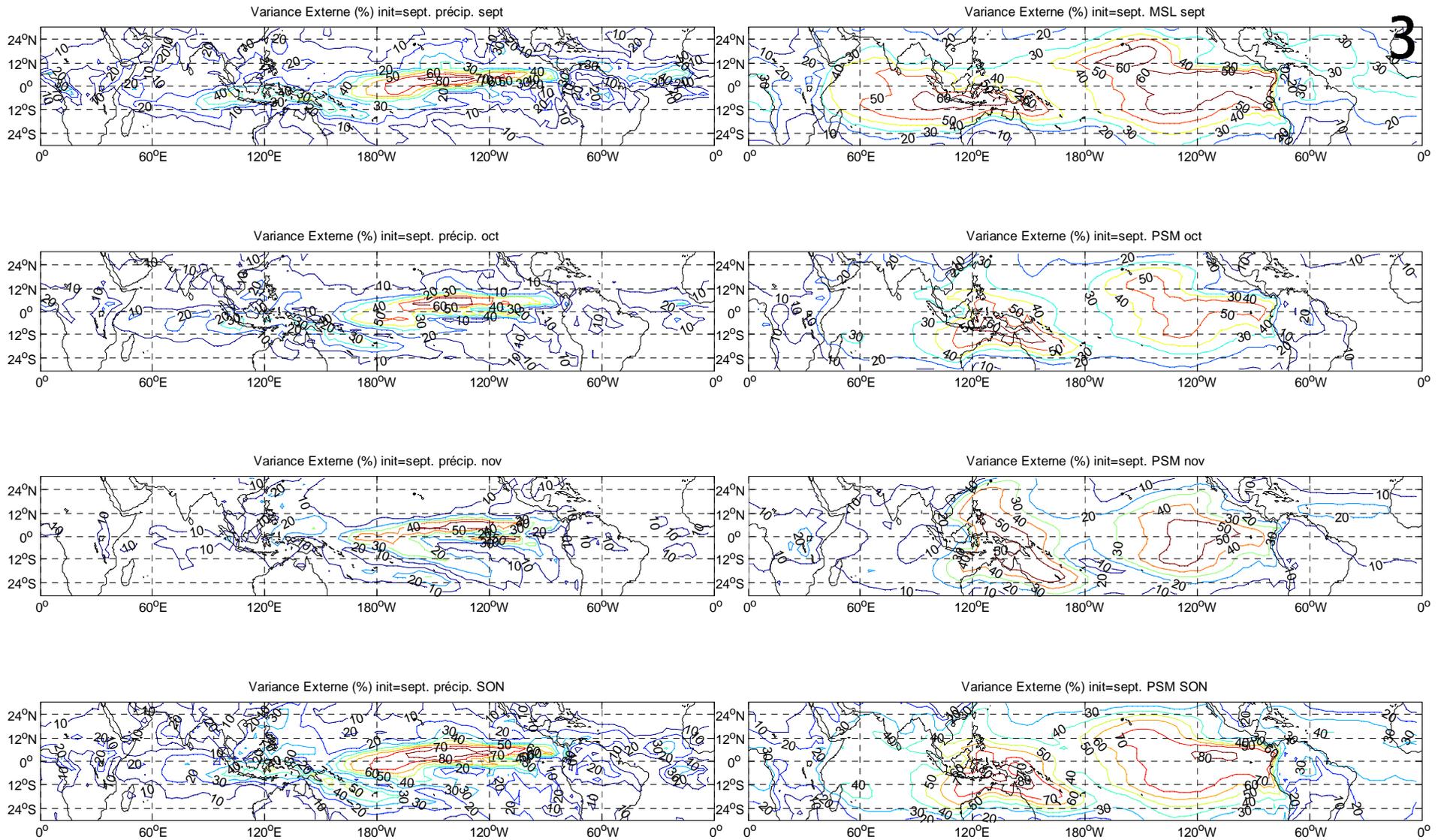
- Utiliser le forçage lent des TSO pour prévoir les conditions atmosphériques à une échéance de 1-6 mois
- le principal forçage de l'atmosphère dans ce cadre est l'ENSO
- ce type de prévision saisonnière est désormais réalisé par de nombreux centres de recherches à travers le monde (dont MétéoFrance)

Stratégie ?

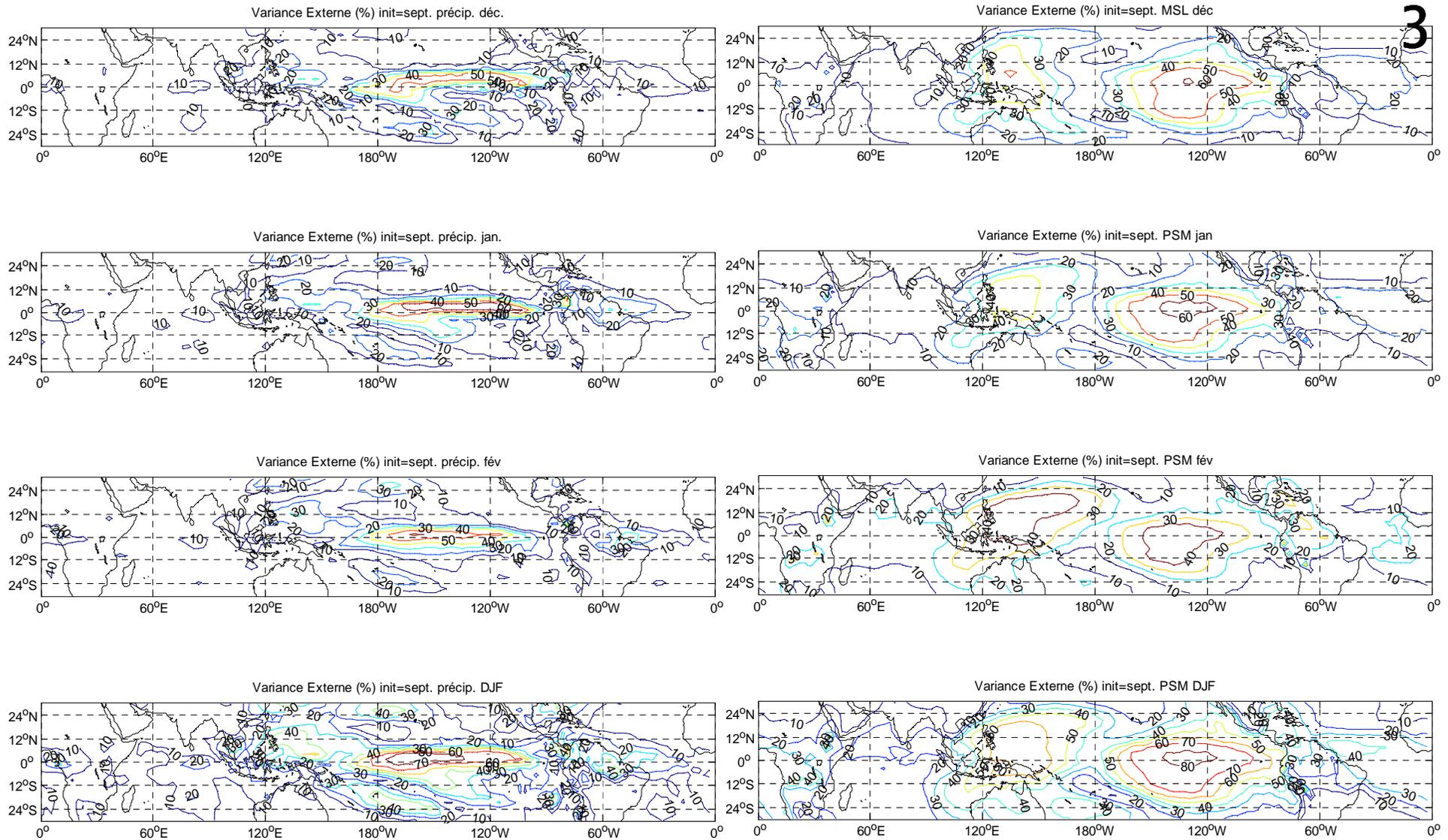
- Prévision purement statistique à partir des TSO à l'instant (t)
- Prévoir statistiquement les TSO (persistance, analogue etc.) et forcer un modèle atmosphérique avec les TSO prévues
- Prévoir les conditions atmosphériques et océaniques à partir d'un modèle couplé océan-atmosphère

Exemple de la deuxième stratégie

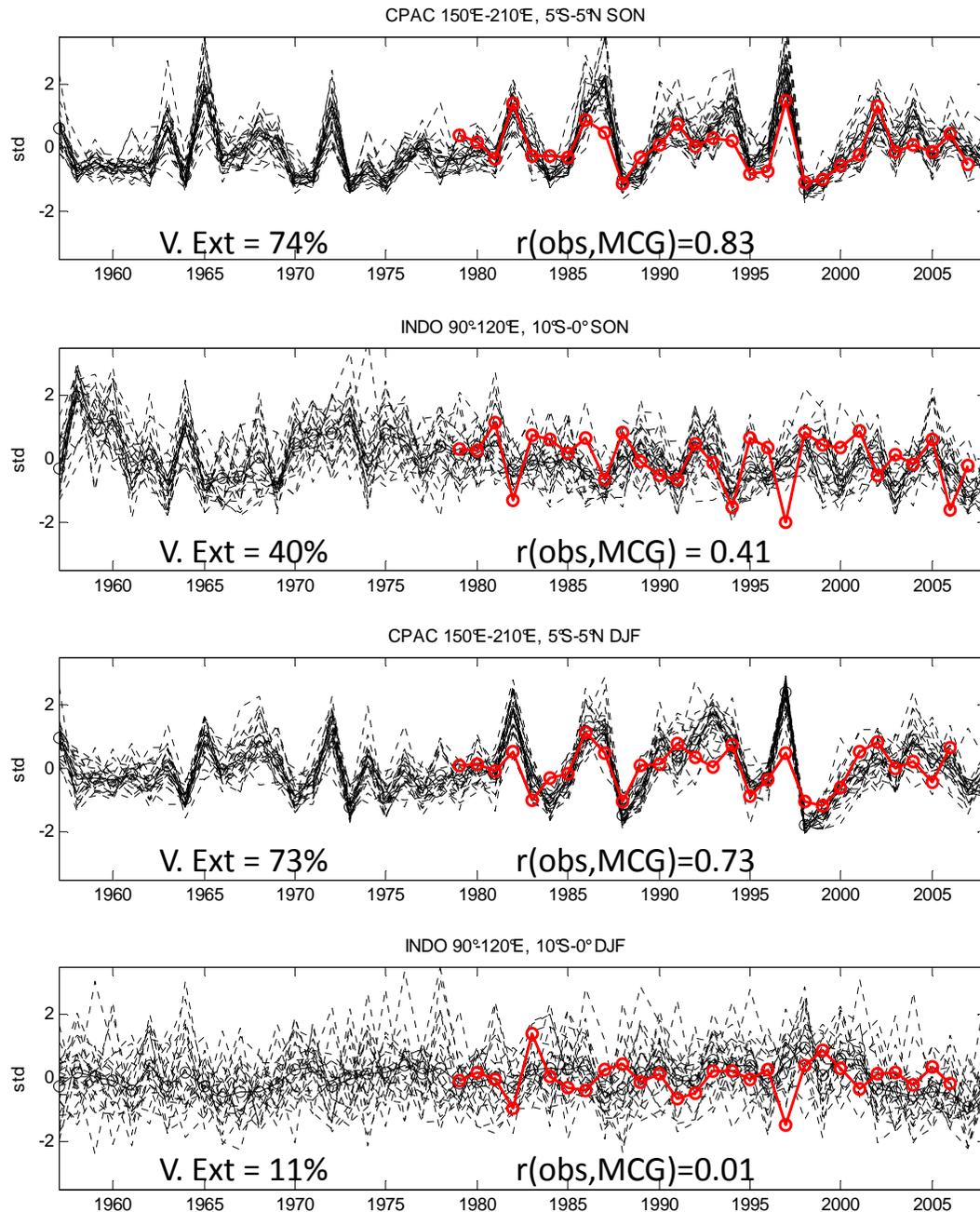
- Un MCG est forcé 7 mois avec les TSO prévues à partir du 1^{er} septembre
- 24 runs sont initialisés différemment



- variance externe = proportion de variance atmosphérique forcée par les TSO
- échelle beaucoup plus large pour les champs de pression vs précipitations (nature des variables + échelles des mouvements impliqués) + importance du lissage temporel
- max. très net dans les deux cas dans le Pacifique équatorial avec décroissance rapide vers les hautes latitudes dans le cas des précipitations



- baisse progressive en s'éloignant de l'initialisation, mais structure spatiale persistante, notamment pour les pression
- forte baisse de la reproductibilité pour les précipitations indonésiennes alors que le score se maintient pour les PSM = déconnexion entre PSM et précip. ? Augmentation de phénomènes de petite échelle pas représentés dans le MCG ?



Comparaison des 24 runs vs **observation** sur deux boîtes régionales (Pac. Central et Indonésie) en SON puis DJF

- Relation entre reproductibilité (% de V. Ext.) et réalisme (corrélation entre MCG et observations) = une anomalie cohérente sur une vaste échelle est plus prévisible
- quasi-stabilité pour Pac. Central de SON à DJF
- scores dégradés pour Indonésie en DJF: prédiction erronée des TSO locales ? Phénomènes de petite échelle (brises ...) mal représentés par le MCG et très important en DJF ?

Synthèse

3

- Simulation rétrospective de la réponse climatique aux forçages connus sur la période contemporaine ?
 - Très bonne simulation de la hausse totale, notamment depuis les années 70s
 - Bonne adéquation dans la géographie des variations (notamment plus forte hausse dans l'Arctique + intérieurs continentaux subpolaires + hausse moins intense au-dessus de l'Atlantique Nord)
 - Inadéquation pour certains événements (ENSO de 1998) mais cela ne pointe pas obligatoirement des erreurs du MCG si cela n'est pas forcé par les éléments intégrés dans la modélisation
 - Ce type de simulation est utilisé en mode prospectif pour simuler la réponse climatique jusqu'en 2100 à partir du forçage jugé comme nettement prédominant (= hausse de la concentration atmosphérique en GES anthropiques)
- Impact de la représentation explicite des échelles spatiales ?
 - Dans le cas d'environnement complexe, la réponse climatique à un forçage donné intègre des échelles multiples qui interagissent entre elles
 - Les conséquences ne concernent pas que l'échelle qui n'est pas explicitement prise en compte, mais aussi la grande échelle
 - La solution est ici clairement d'augmenter la résolution spatiale
- Prévision saisonnière des anomalies atmosphériques à partir des TSO
 - Lien entre nature physique des phénomènes et prévisibilité : précipitations (intermittentes/anisotropes) moins prévisibles que pressions (continues et grande échelle)
 - Le rapport signal/bruit peut être optimisé en (1) augmentant la taille de l'ensemble; (2) lissant dans le temps (saison vs mois) et (3) lissant dans l'espace, si et seulement si le « signal » présente une forme de persistance/récurrance dans ces ensembles
 - Lien entre échelle et prévisibilité: précipitations (associées à des processus multi-scalaires dont certains ne sont pas explicitement intégrés dans les GCM) moins prévisibles que la pression

Conclusion (1)

4

- 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**, mais 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 invisible à des résolutions plus basses. La plus haute résolution passe aussi par des développements théoriques et conceptuels
 - **Représentation paramétrée de certains processus sous-maillles**. Il existe par exemple 3 principales paramétrisations de la convection profonde dans les GCM atmosphériques actuels : y-a-t'il des lois « primitives » spécifiques pour ces processus ?

Conclusions (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 21^{ème} 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 1880-2005 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...