

**Modélisation minimale du climat tropical :
aspects théoriques
et
implications pour le changement climatique futur**

La sensibilité du climat tropical aux perturbations

Importance : la moitié la plus ensoleillée de la surface du globe.

De faibles variations de température à différentes échelles de temps :

Époque	il y a	Différence de température avec le présent	
		dans les Tropiques	aux latitudes plus élevées
Crétacé	100 Ma	+5°	+10 à +20°
Dernier Maximum Glaciaire	20 000 ans	-2°	-5 à -10°
Optimum Médiéval	800 ans	Inférieure à +1°	+ qqs degrés
Petit Age Glaciaire	400 ans	Inférieure à -1°	- qqs degrés

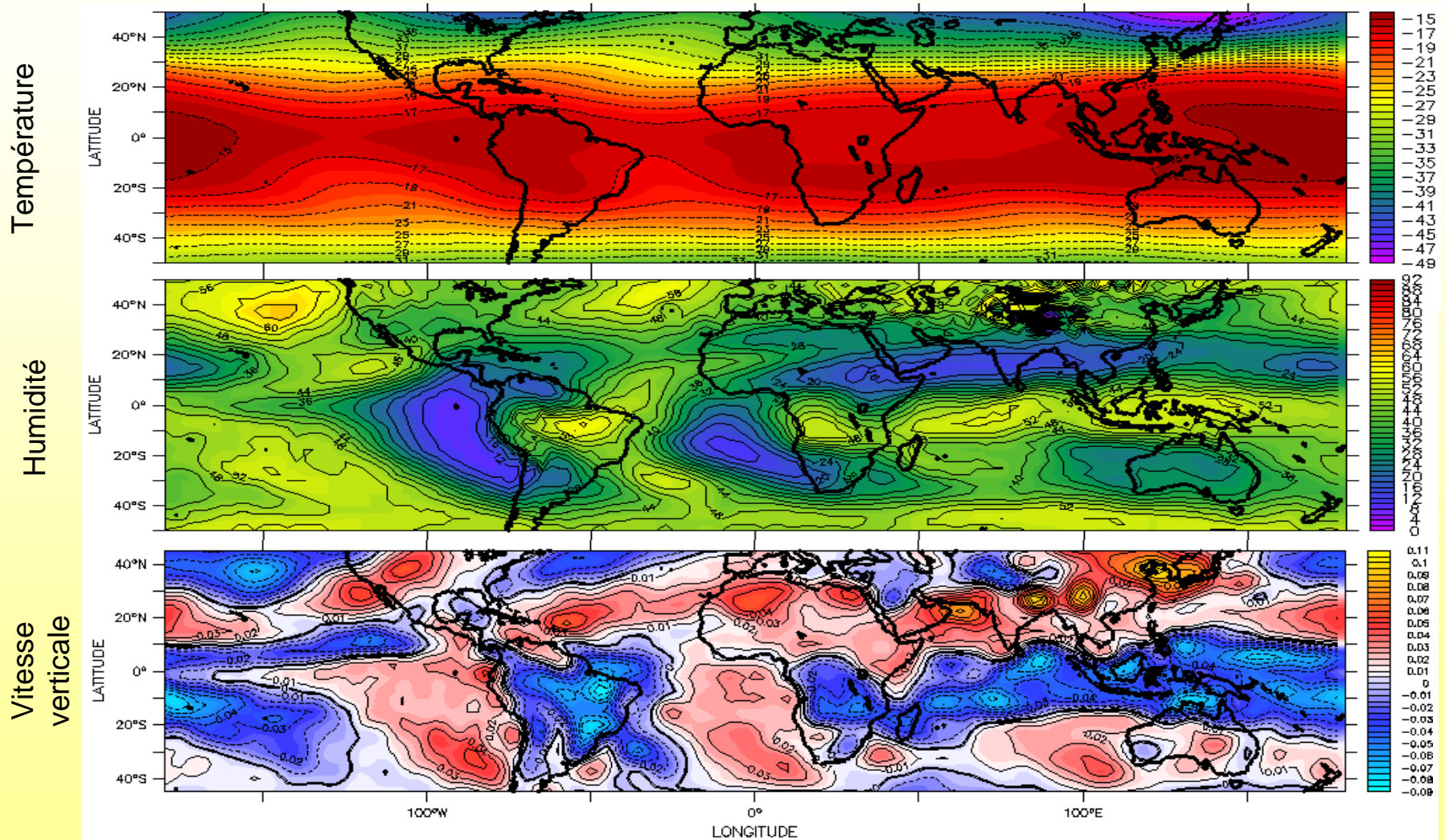
Variation interannuelle

Cadre de la thèse

Quels mécanismes expliquent la faible sensibilité du climat tropical?

- Identification des principales rétroactions dans le climat tropical,
- Étude des processus-clefs en jeu dans ces rétroactions,
avec une approche de modélisation simplifiée.

Traits saillants de l'atmosphère tropicale

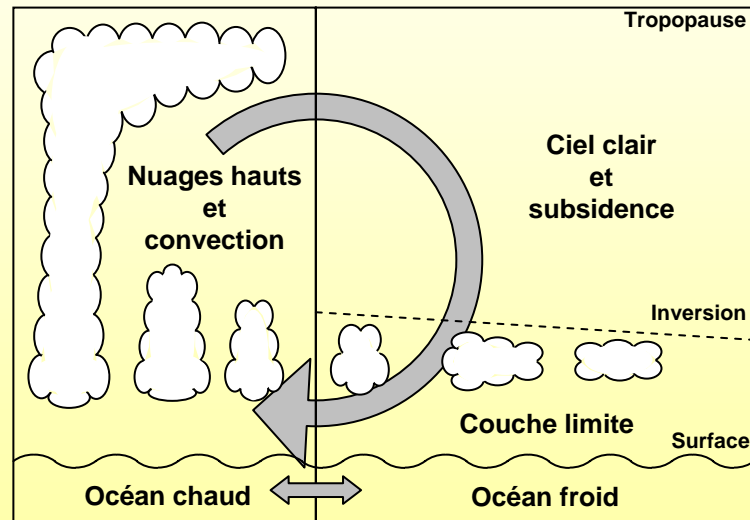


Réanalyses NCEP, climatologie de janvier, à 400mb

Modèle en boîtes

Modèle de l'équilibre climatique reposant sur :

- l'homogénéité du profil de température dans l'atmosphère libre ;
- l'alternance géographique de régions sèches en subsidence et de régions humides en convection.



- Pierrehumbert (1995);
- Larson *et al.*, (1999).

Équilibre dynamique :

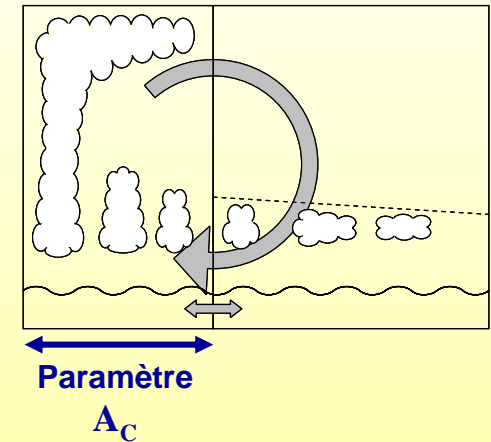
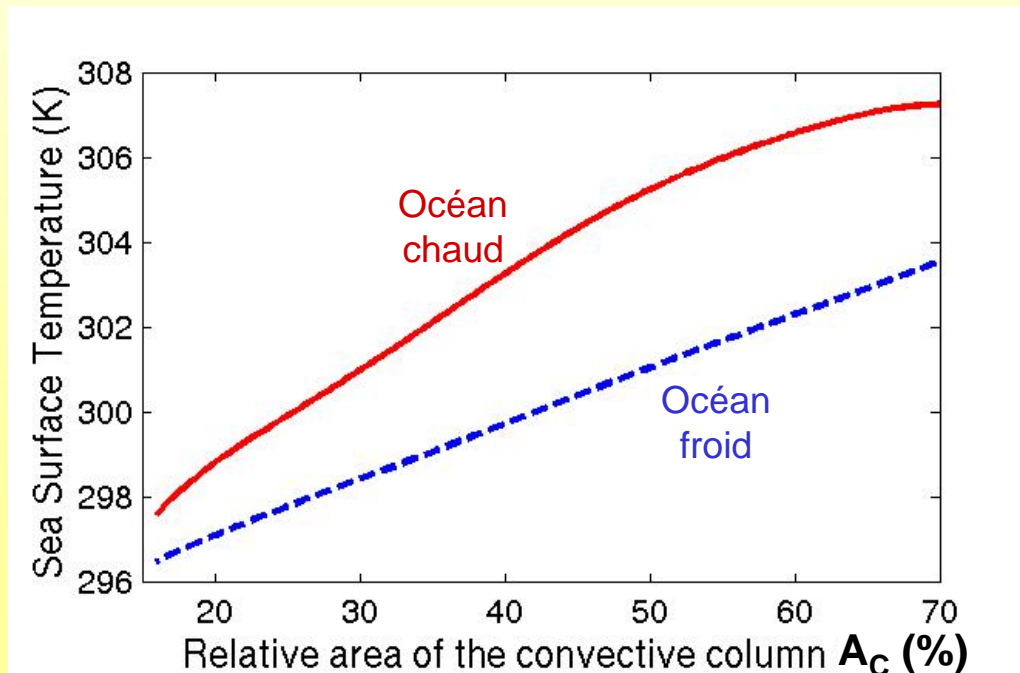
La circulation de grande échelle couple les deux modes radiatifs-convectifs

Principales sensibilités

Sensibilité à l'humidité dans la troposphère libre

Sensibilité à la nébulosité de couche limite

Sensibilité à l'aire relative A_C de la colonne humide :



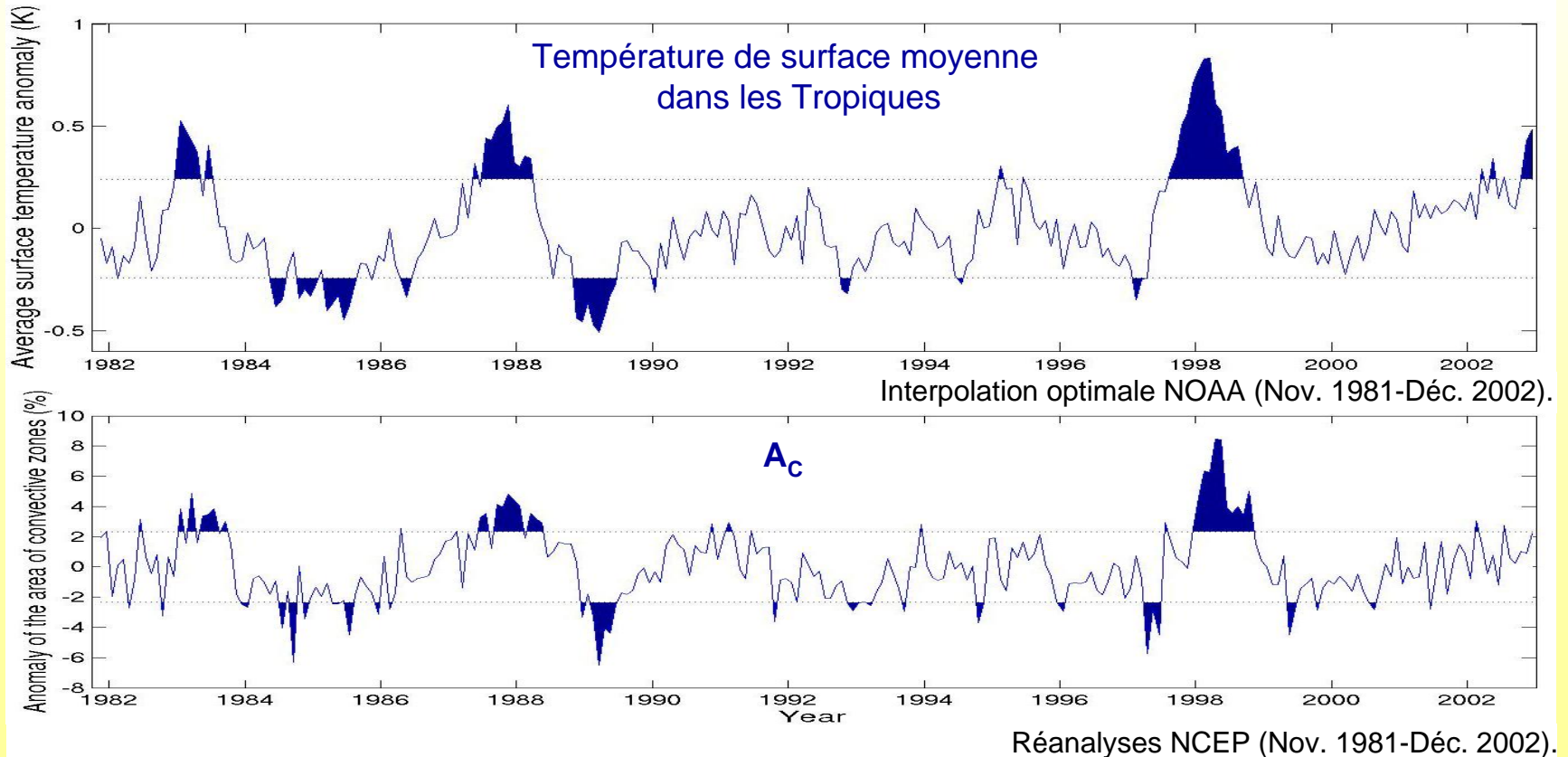
Sensibilité de la température moyenne:
0,1K/ % de A_C

Relation entre température et A_C dans les réanalyses

Définition de A_C : fraction des tropiques où l'eau précipitable est supérieure à 45kgm^{-2} .

Anomalies mensuelles au cycle annuel moyen :

corrélation: **0.65**



La variabilité interannuelle de la température est liée à celle de A_C .

Problématique de la thèse

Quel est le rôle de l'aire relative des zones humides ?

- Comprendre la sensibilité du climat tropical, notamment à A_C ;
- Évaluer les potentielles rétroactions impliquant une variation de A_C ;
- Analyser les mécanismes contrôlant la taille des régions humides.

avec une approche de modélisation simplifiée.

Plan de la thèse

I. **Rétroactions dans un modèle en boîtes du climat tropical**

Bellon, Le Treut & Ghil, 2003 : Feedbacks in a box model of the tropical climate,
Geophysical Research Letters,

Le Treut & Bellon, 2004 : Radiative feedbacks and monsoon circulations: a view from simplified models,
Pure and Applied Geophysics, sous presse.

II. **Distribution spectrale des régions humides**

Bellon, Ghil & Le Treut, 2004 : Scale separation for humidity-bimodal systems,
en préparation pour *Science*.

III. **Modèles simples de la convection peu profonde**

Bellon & Stevens, 2004 : On bulk models of the shallow cumulus convection,
Journal of the Atmospheric Sciences, sous presse.



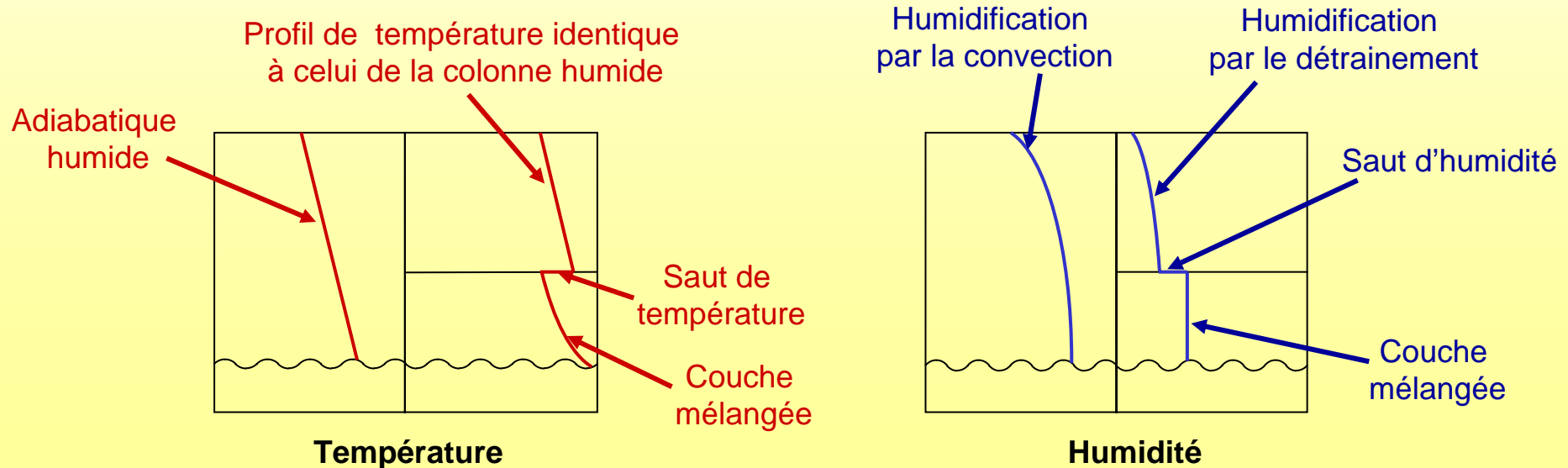
I. Rétroactions dans un modèle en boîtes du climat tropical

I. Rétroactions dans un modèle en boîtes du climat tropical

Description du modèle (a)

Structure thermodynamique simplifiée : Hypothèses

- Température : gradient vertical fixé, gradients horizontaux nuls dans la troposphère libre.
- Humidité : humidités relatives indépendantes de l'altitude dans la colonne convective et la troposphère libre sèche.
- Couche limite mélangée : énergie statique humide $H = C_p T + Lq$ et eau totale $q_t = q + q_l$ indépendantes de l'altitude .
- Océan : couche mélangée



Description du modèle (b)

Circulation de grande échelle :

Intensité $m = (1 - A_c) \frac{\omega_{inv}}{g}$ déterminée par le bilan énergétique de la troposphère libre sèche (équilibre entre le chauffage par la subsidence et le refroidissement radiatif).

Une représentation simple du rayonnement :

Flux de surface :

$$C_p F = \rho_S C_d V_S C_p [T_S - T(0)] \quad LE = \rho_S C_d V_S L [q_*(T_S) - q(0)]$$

Le vent dépend de la circulation de grande échelle : $V_S = (1 - \lambda) V_S^o + \lambda V_S^m \quad V_S^m = \eta m$

Équations du modèle

Bilans :

Bilans d'énergie et d'eau
dans les boîtes océaniques, la colonne convective, la troposphère libre sèche et sa couche limite.

Fermetures :

- Entraînement de masse au sommet de l'inversion :
proportionnel à l'évaporation divisée par l'amplitude du saut de température à l'inversion.
Sarachik (1985)
- Flux convectif d'humidité entre la couche limite et la troposphère libre dans la colonne humide :
proportionnel au transport de grande échelle.
Larson *et al.* (1999)

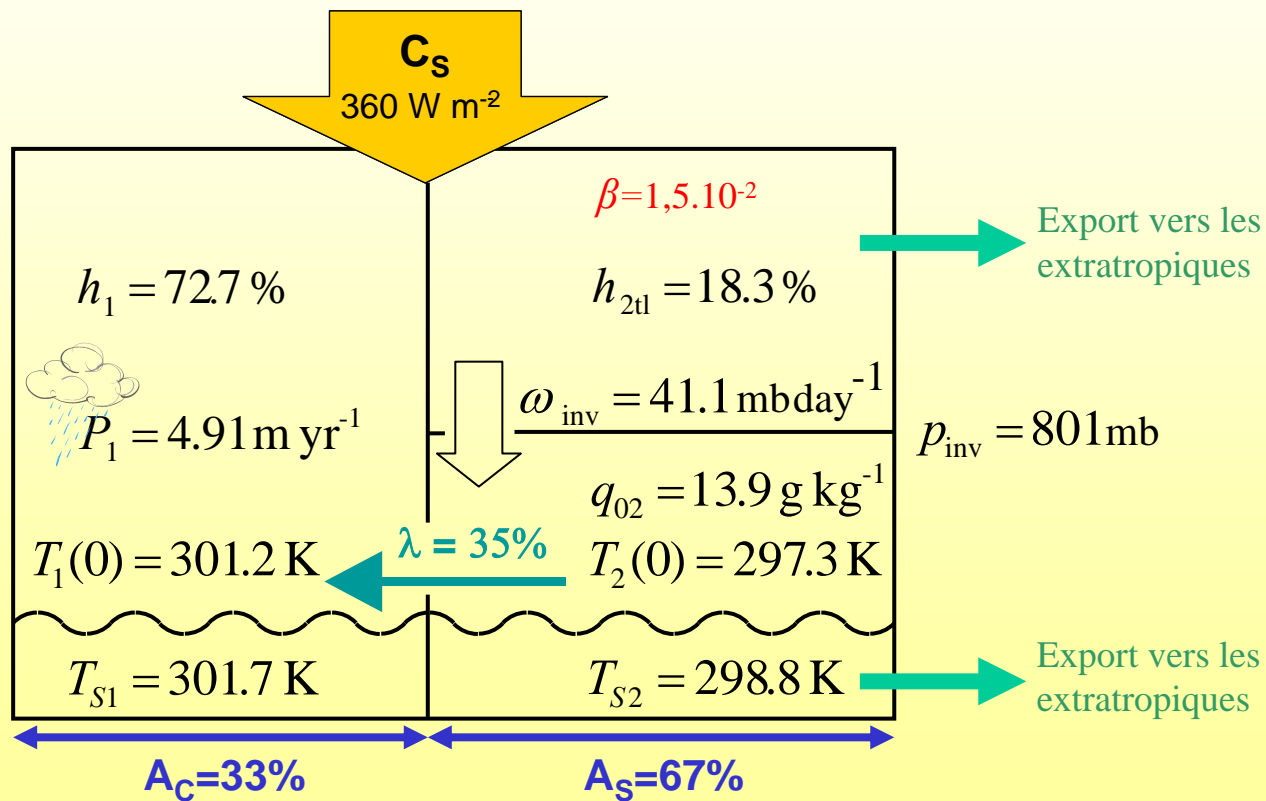
Variables :

- Pronostiques : T_{S1} T_{S2} $T_1(0)$ $T_2(0)$ h_1 h_{2tl} $q_2(0)$ p_{inv}
- Diagnostiques : P_1 ω_{inv}

Principaux paramètres de contrôle : A_c C_s λ β

I. Rétroactions dans un modèle en boîtes du climat tropical

Équilibre de référence



Sensibilités comparées du modèle

Étude de 3 cas :

- Cas A_C+5 : une augmentation de 5% de l'aire de la colonne convective.
- Cas $2xCO_2$: un doublement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone.
- Cas C_s+5 : une augmentation de $5Wm^{-2}$ du flux solaire incident.

Résultats :

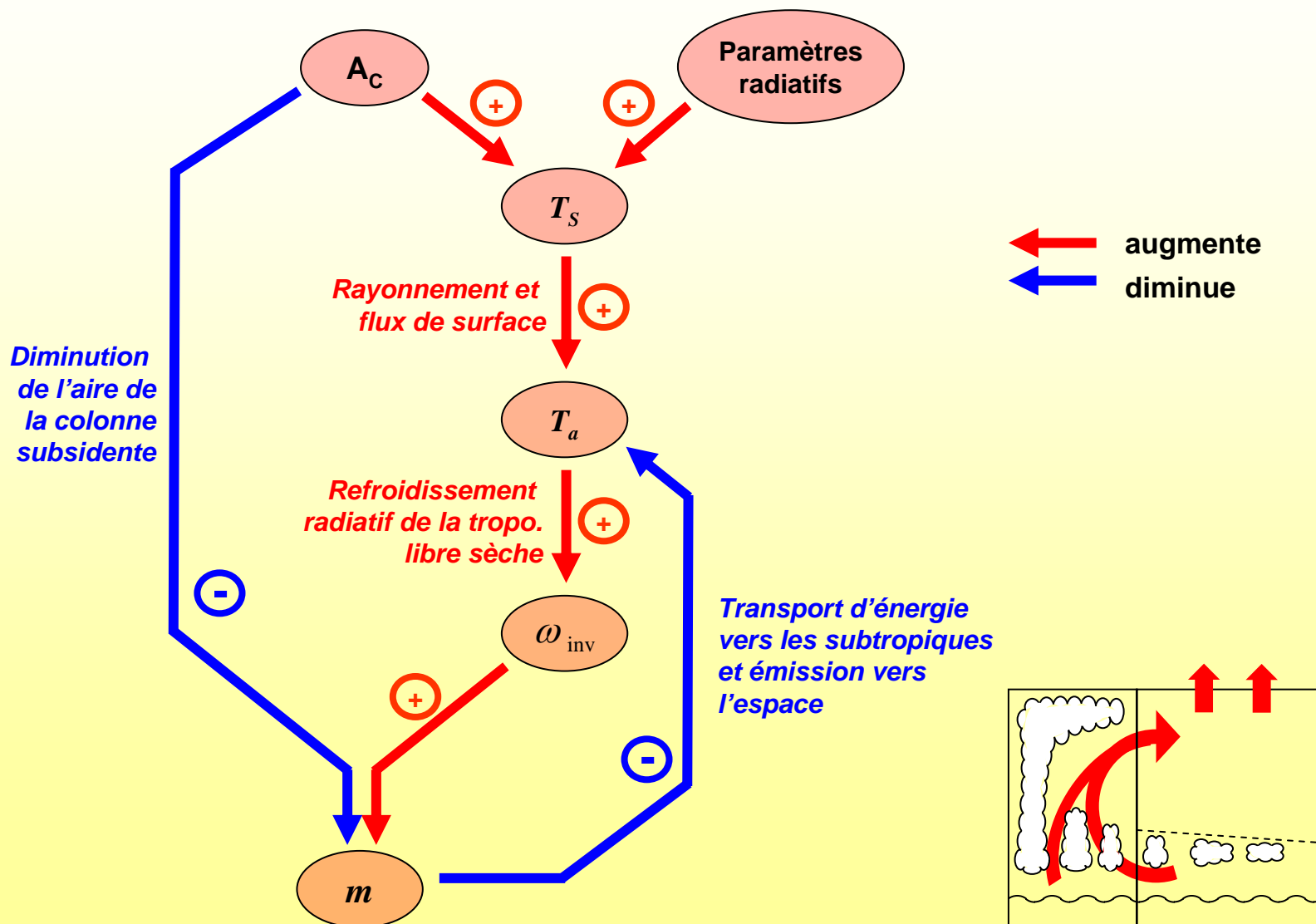
- Variation de la SST moyenne :
 - Cas A_C+5 : + 0,9 K
 - Cas $2xCO_2$: + 1,3 K
 - Cas C_s+5 : + 1,0 K

La variation de l'aire A_C pourrait donc entraîner une rétroaction significative.

- La réponse de la dynamique est primordiale dans la modulation de la sensibilité du modèle, via le transport d'énergie vers la colonne subsidente: variation de la circulation de grande échelle :
 - Cas A_C+5 : - 5 %
 - Cas $2xCO_2$: + 14 % de $m = (1 - A_C) \frac{\omega_{inv}}{g}$ dans l'équilibre de référence
 - Cas C_s+5 : + 5 %

I. Rétroactions dans un modèle en boîtes du climat tropical

Rétroactions dynamiques : transport de grande échelle



I. Rétroactions dans un modèle en boîtes du climat tropical

Influence de la dépendance des vents de surface à la circulation de grande échelle

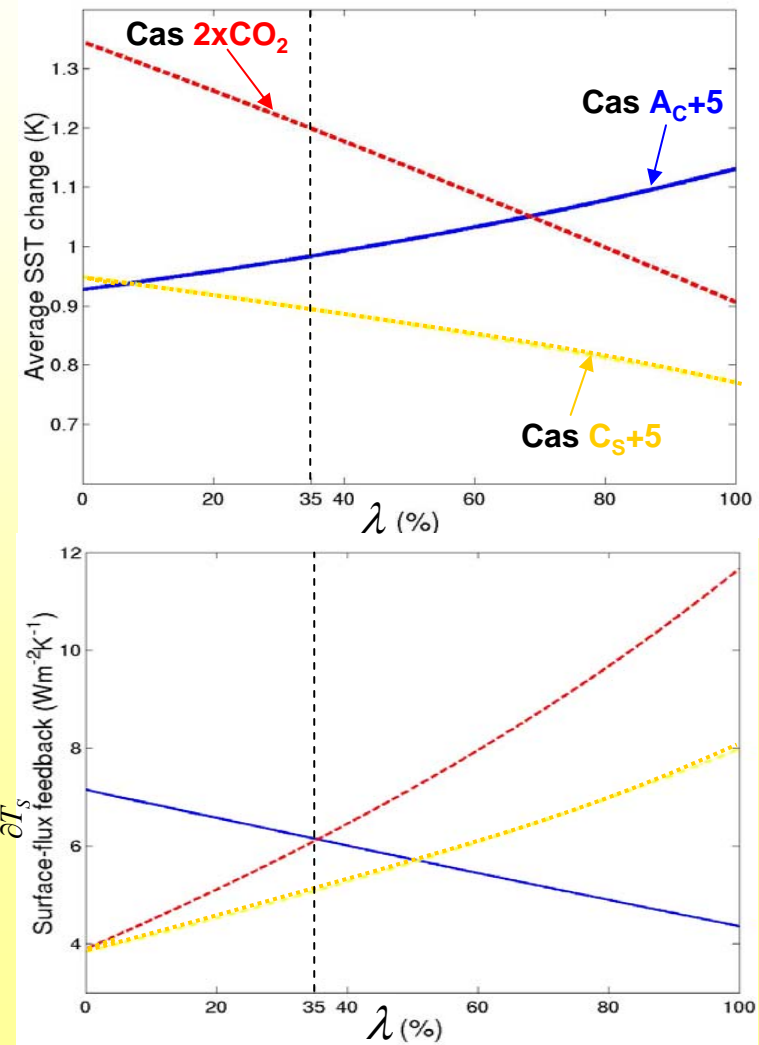
$$V_S = (1 - \lambda) V_{S0} + \lambda \eta m$$

λ = fraction du vent de surface dépendant de la grande échelle

- La dépendance du vent de surface à la circulation de grande échelle atténue la sensibilité du modèle aux perturbations radiatives et accentue celle à une variation de A_C :
- Cette dépendance modifie la rétroaction du flux turbulent de chaleur en surface :
(rétroaction négative sur la température de l'océan Hartman & Michelsen, 1993).

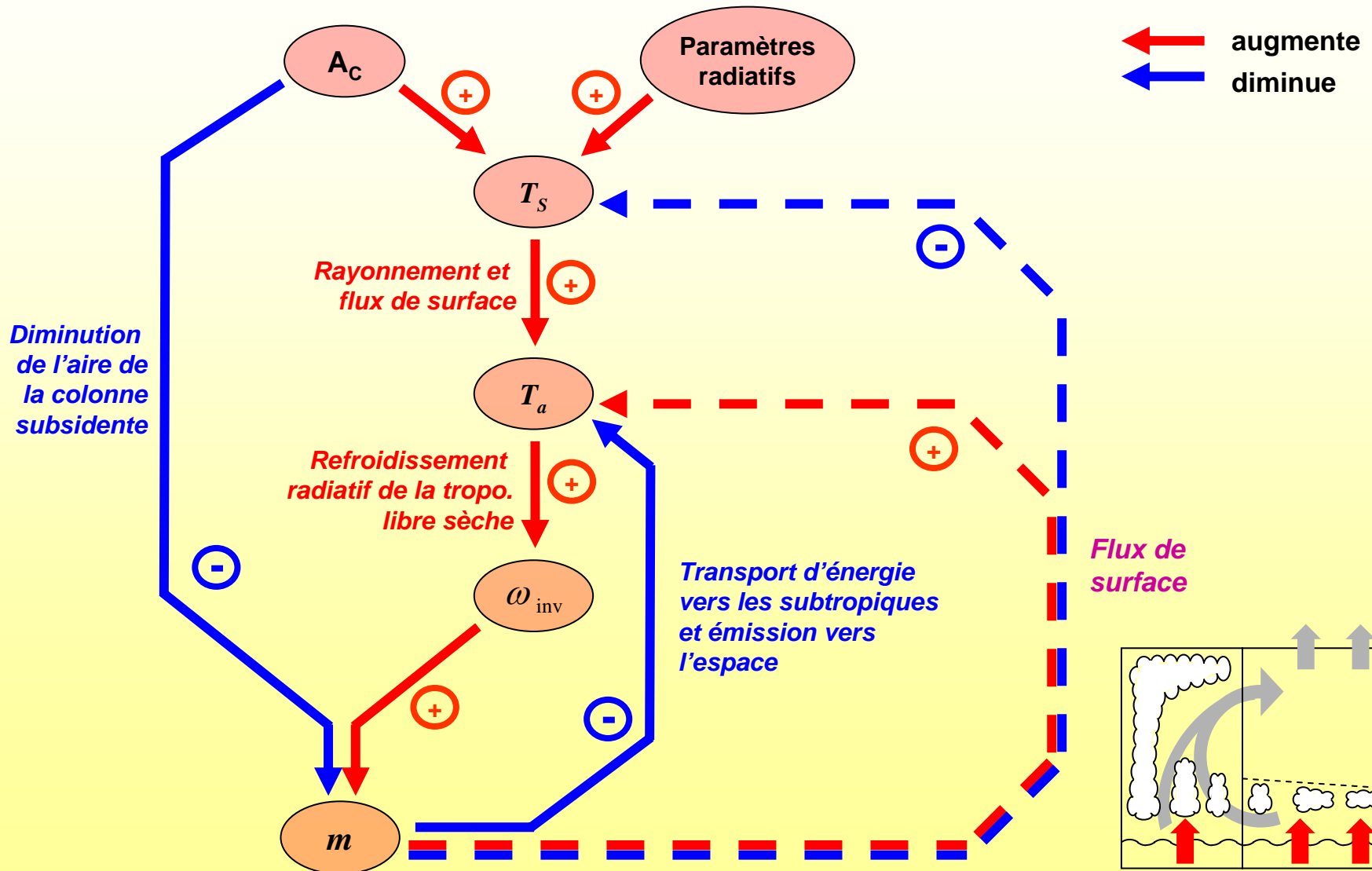
Quantification :
$$\frac{\partial(L E + C_p F)}{\partial T_s}$$

$$\frac{\partial(L E + C_p F)}{\partial T_s}$$



I. Rétroactions dans un modèle en boîtes du climat tropical

Rétroactions dynamiques : vent-flux de surface



Contrôle dynamique de l'aire relative des zones humides

Comment la dynamique peut-elle participer au contrôle de A_C ?

- La convergence d'humidité en surface conditionne la convection.
- La vitesse verticale 'radiative' et la dynamique de surface doivent être cohérentes.

Paramétrisation de la dynamique dans les basses couches :

La convergence dans la couche limite est contrôlée à l'ordre 0 par les gradients de SST.

Lindzen & Nigam (1987)

➡ Paramétrisation simple : $V_S^m = \nu \Delta T_S$

$$m = \frac{p_S - p_{inv}}{g} \nu \Delta T_S$$

En ajoutant cette équation supplémentaire à notre modèle, on peut déterminer A_C (variable pronostique).

Rétroaction de l'aire relative des zones humides

Sensibilité du modèle modifié au doublement de CO₂ :

- Le réchauffement augmente : **+ 1.9 K** (contre +1.3 K dans le cas où A_C est fixé) ;
- A_C augmente (**+ 2,5 %**) ;
- ΔT_S et m diminuent par rapport au cas où A_C est fixé.

Dans ce modèle, la rétroaction dynamique au doublement de CO₂ est positive

Résultat sensible :

- Au contraste des réponses radiatives des colonnes sèche et humide.
- A la paramétrisation de la couche limite

Discussion

➤ Potentielle rétroaction impliquant A_C .

➤ Facteurs contrôlant A_C dans un modèle deux colonnes :

Compétition entre la dynamique horizontale et la circulation de grande échelle qui est conditionnée par le refroidissement radiatif de la troposphère libre sèche.

Une meilleure compréhension de :

- ✓ la dynamique de surface/hauteur de la couche limite.
- ✓ la réponse radiative de la troposphère libre sèche.

est nécessaire pour évaluer cette rétroaction potentielle.

➤ Étude des mécanismes contrôlant A_C dans les observations.

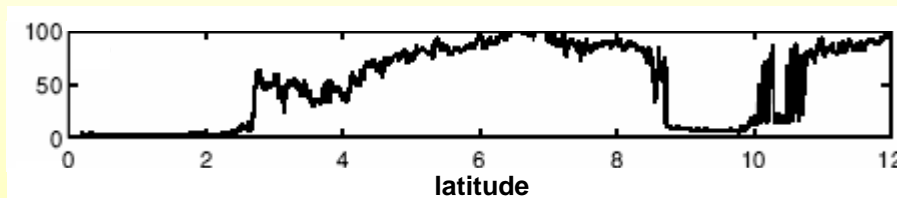
An aerial photograph of a tropical coastline, showing a dark blue ocean on the right and a light-colored, sandy or vegetated landmass on the left. The landmass features a prominent, dark, irregularly shaped area, possibly a lagoon or a dense forest. The text "II. Distribution spectrale des régions humides" is overlaid in yellow in the center of the image.

II. Distribution spectrale des régions humides

II. Distribution spectrale des régions humides

Motivations supplémentaires :

- Étudier la distribution des zones humides et sèches est une approche alternative de l'étude de la rétroaction de la vapeur d'eau.
- Comprendre cette distribution permet d'avancer dans la compréhension de l'interaction entre zones convectives et zones subsidentes.
- La bimodalité humide/sèche de la distribution de la vapeur d'eau s'observe à des échelles diverses:



Humidité mesurée par avion
à 5500m d'altitude
(95°W, le 09/10/2001);
d'après Zhang *et al.* (2003).

Étude existantes :

- Études de la distribution de tailles des nuages (Machado et al., 1992; Roca & Ramanathan, 2000; etc) .
- Études des propriétés géométriques (Lovejoy, 1982; Cahalan & Joseph, 1988) : théories fractales.

Pas d'études analogues des structures spatiales humides (ou sèches).

II. Distribution spectrale des régions humides

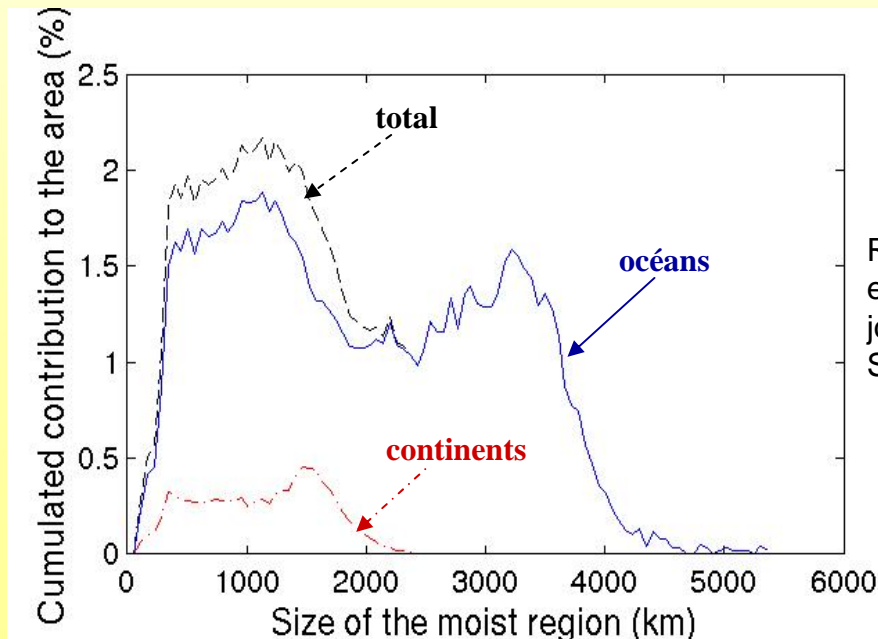
Distribution des tailles des régions humides

Définitions :

- **Région humide** : ensemble de points connectés d'humidité supérieure à un seuil donné.
- **Taille caractéristique** : rayon du disque de même surface.

La distribution moyenne des tailles est bimodale:

- Mode synoptique et mésoéchelle + Mode de grande échelle ;
- Séparation d'échelle autour de 2000km.



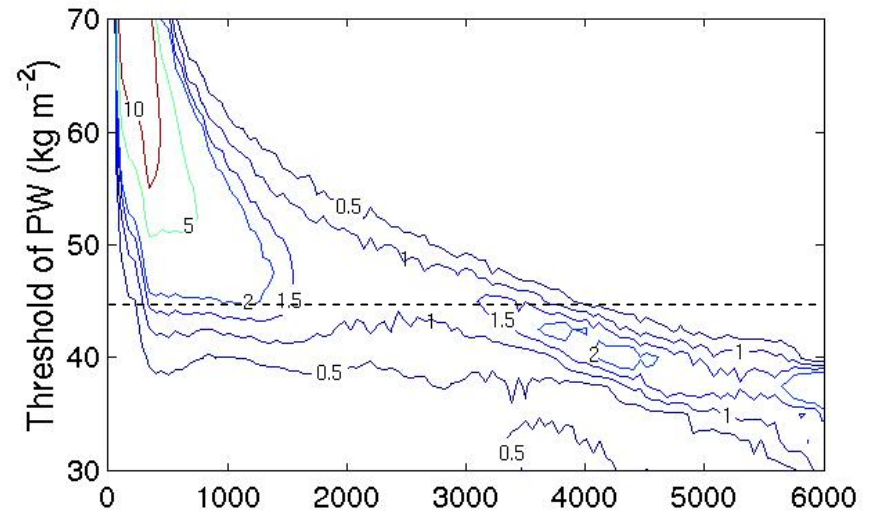
Réanalyses NCEP (2,5°x2,5°),
eau précipitable,
journalières (1979-2002).
Seuil : 45 kg m⁻².

II. Distribution spectrale des régions humides

Détail des deux modes

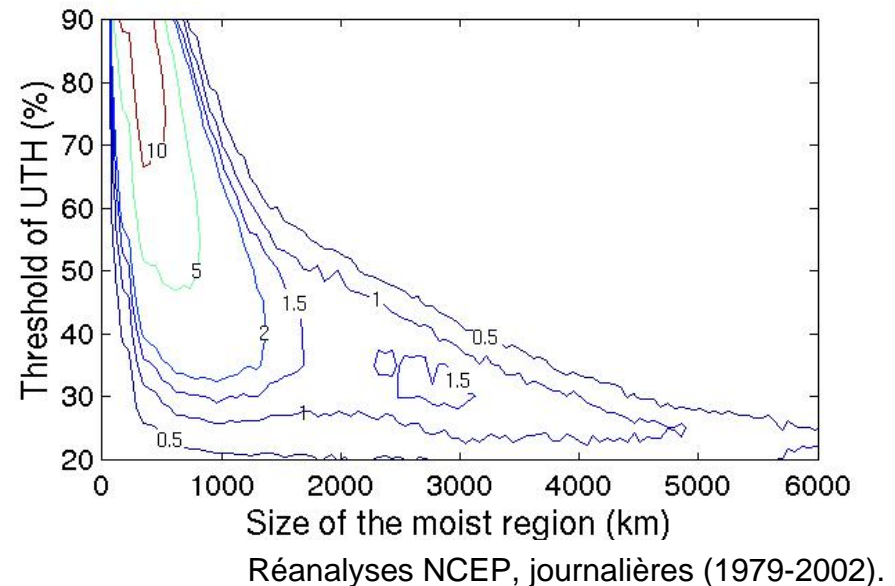
Variation du seuil :

Eau précipitable :



Changement de la variable considérée :

Humidité de la haute troposphère :



Mécanisme potentiel de sélection d'échelles

La dynamique peut-elle opérer une sélection d'échelle?

- Analyse dimensionnelle de la dynamique de surface ;
- Introduction d'une paramétrisation de cette dynamique dans notre modèle.

Équation du mouvement :

Linéaire, état stationnaire :
Gill (1980), Lindzen and Nigam (1987)

$$\varepsilon_d \vec{u} + f \vec{k} \wedge \vec{u} = -\vec{\nabla} \Phi$$

↑ vitesse horizontale moyennée sur la verticale
↑ friction
↑ Coriolis
↑ forçage de pression moyenné sur la verticale

Divergence de la vitesse :

β -plan :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \underbrace{-\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_d^2 + f^2} \nabla^2 \Phi}_{\text{Convergence Laplacienne} \sim \frac{\Delta \Phi}{\ell^2}} + \underbrace{\frac{\beta_c \vec{j}}{(\varepsilon_d^2 + f^2)^2} \cdot \left[2\varepsilon_d f \vec{\nabla} \Phi + (\varepsilon_d^2 - f^2) \vec{k} \wedge \vec{\nabla} \Phi \right]}_{\text{Convergence } \beta \sim \frac{\Delta \Phi}{\ell}}$$

↑ Laplacien
↑ gradient

Paramétrisation de la dynamique

Divergence dans les zones sèches :

$$\frac{\omega_{inv}}{p_s - p_{inv}} = \overline{\vec{\nabla} \cdot \vec{u}} = -\mu \left(\frac{\Delta\Phi}{R^2} - k \frac{\Delta\Phi}{R} \right)$$

différence entre les deux colonnes

extension horizontale du système

Forçage de pression Φ :

Modèle de gravité réduite : couche limite mélangée sous une inversion d'amplitude fixée.
Battisti *et al.* (1999), Lindzen & Nigam (1987)

$$\Phi' = g' H' - \Gamma_{cl} T_S'$$

variation de la profondeur de la couche limite 'back pressure' → H'

→ T_S' variation de la température de surface

Relaxation de H' à une échelle de temps τ dépendant de la présence de convection :

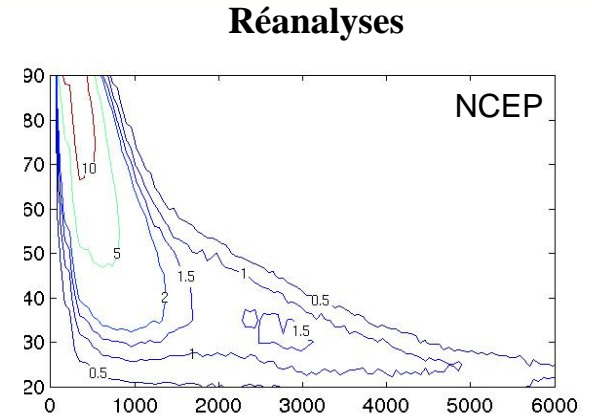
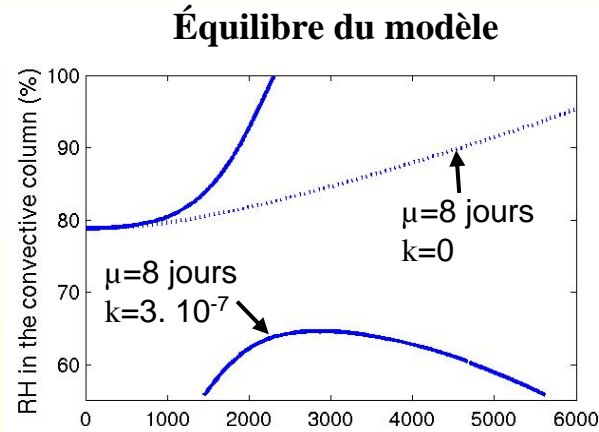
$$\partial_t H' = -\frac{H'}{\tau} \left(-H_{ref} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \right)$$

En ajoutant cette équation supplémentaire à notre modèle, on peut déterminer A_c (variable pronostique). L'extension R du système devient un nouveau paramètre de contrôle du modèle.

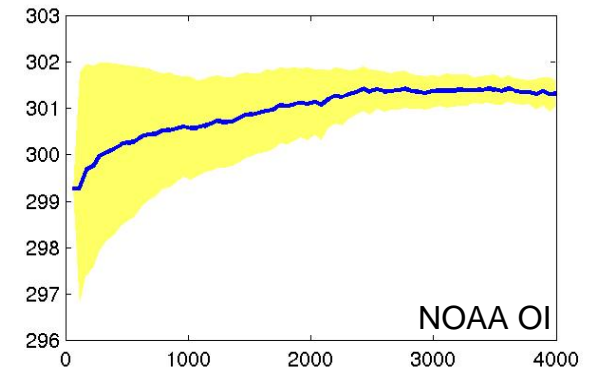
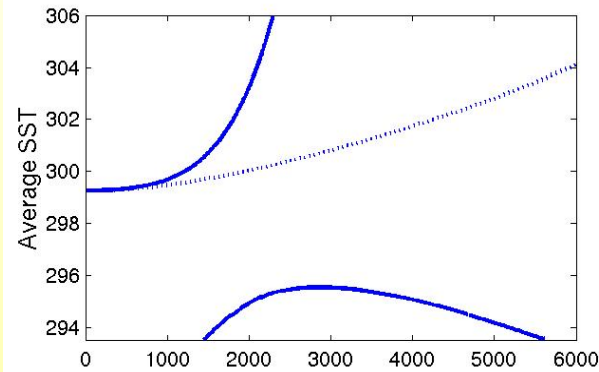
II. Distribution spectrale des régions humides

Résultats

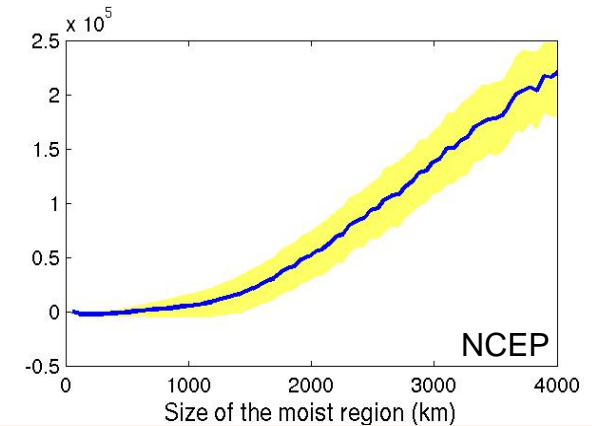
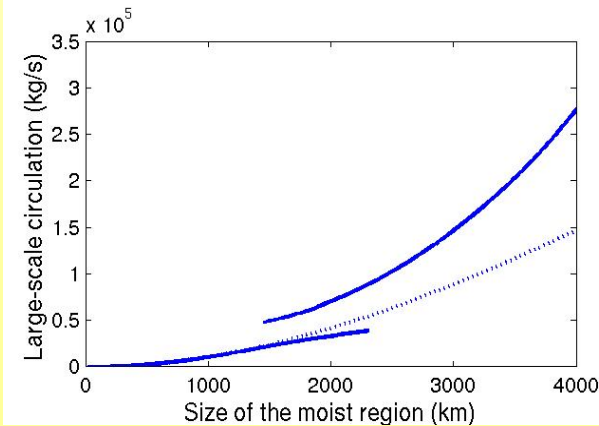
Humidité :



Température de surface :



Dynamique :



Discussion

- Séparation d'échelles observée :
 - ✓ Deux modes caractérisés par des humidités et des régimes dynamiques différents.
 - ✓ Processus distincts à des échelles différentes dans l'organisation de la convection.

- Modélisation simplifiée:
 - ✓ Bimodalité reproduite par le modèle en boîtes.
 - ✓ Sélection d'échelles par la compétition entre convergences Laplacienne et 'Beta'.

- Limites
 - ✓ Paramètres mal contraints ;
 - ✓ États stationnaires ;
 - ✓ Forçage de la pression.

An aerial photograph of a coastal region, likely a bay or inlet, showing a mix of land and water. The land is a light, sandy or greyish color, and the water is a dark blue-grey. The word "Conclusions" is written in a bold, yellow, sans-serif font in the center of the image. The text is slightly tilted to the right. The background shows a complex coastline with various inlets and peninsulas.

Conclusions

Rétroactions et processus

Rétroactions dynamiques dans le climat tropical

- Transport vers les subtropiques,
- Flux de surface,
- Régulation de l'aire relative des régions humides. Comment?

Rétroaction indirecte de la vapeur d'eau

- Réponse radiative de la troposphère libre sèche : circulation verticale ;
- Inhomogénéité horizontale de la réponse des conditions de surface : dynamique horizontale.

Distribution spectrale de A_c

- Sélection d'échelles par la dynamique de surface.
- Processus distincts à différentes échelles : interaction entre zones sèche et humide?

Qu'apporte la modélisation simplifiée?

Identification et analyses de rétroactions

- Rétroaction vent-flux de surface ;
- Rétroaction de l'extension des régions convectives.

Identification de processus

- Sélection d'échelles.

Analyse de notre compréhension des processus

Perspectives

Hierarchie de modèles pour évaluer les rétroactions

- Modèles contenant une meilleure représentation de la dynamique;
- Meilleure paramétrisation de la convection.

Analyse de la circulation en surface dans les réanalyses

- Sélection d'échelles?

Systèmes tricolonnes

- Compétition entre colonnes convectives (mousson indienne, double ITCZ);
- Régimes nuageux subtropicaux (stratus, petits cumulus).



Merci

Description du modèle (annexe)

Circulation de grande échelle :

- Profil linéaire décroissant (en $-lnp$) dans la troposphère libre.
- Intensité $m = (1 - A_c) \frac{\omega_{inv}}{g}$

Une représentation simple du rayonnement :

- Surface = corps noir, atmosphère = corps gris d'absorption $a = \rho(\alpha q + \beta)$.
- Effet des nuages :
 - ✓ Albédo additionnel dans les zones sèches (θ, I).
 - ✓ Forçage net des nuages convectifs au sommet de l'atmosphère négligé; ces nuages redistribuent la chaleur entre l'océan et l'atmosphère : $CRF_{atm} = -CRF_{oc} \propto P_1$

Flux de surface :

Le vent dépend de la circulation de grande échelle : $V_S = (1 - \lambda) V_S^o + \lambda V_S^m$ $V_S^m = \eta m$