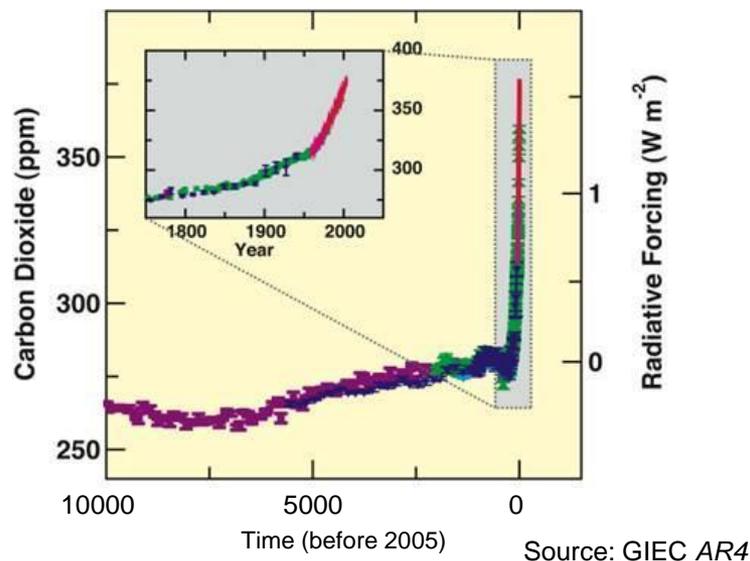


Changements de la circulation atmosphérique tropicale et conséquences lors du changement climatique

Thèse de doctorat de l'université Paris 6

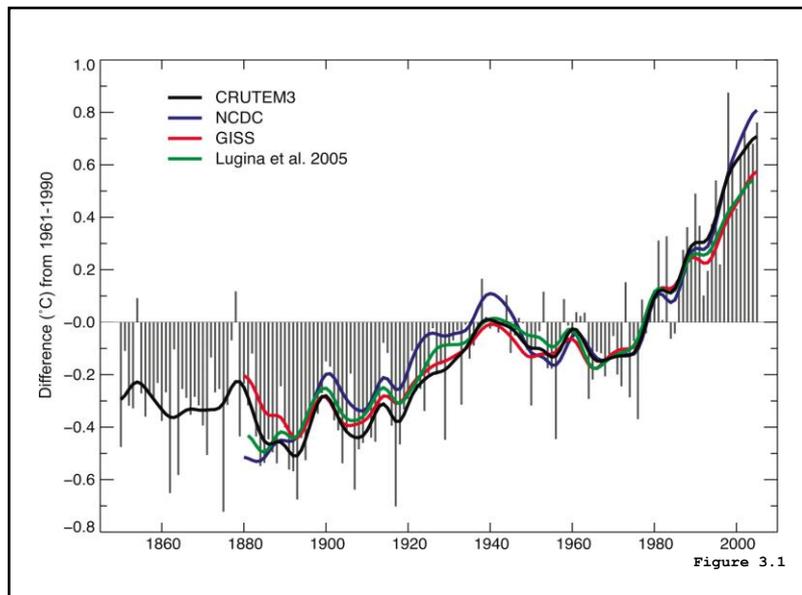
présentée par :

Guillaume Gastineau



Le réchauffement climatique

- La concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, NO_x et CFC) a fortement augmenté depuis l'époque préindustrielle,
- Il est *probable* que le réchauffement des 2 dernières décennies soit induit par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre,
- Pour établir des études d'impact, il est important de comprendre comment le climat va changer.



Source: GIEC AR4

Introduction sur la circulation générale de l'atmosphère dans les tropiques

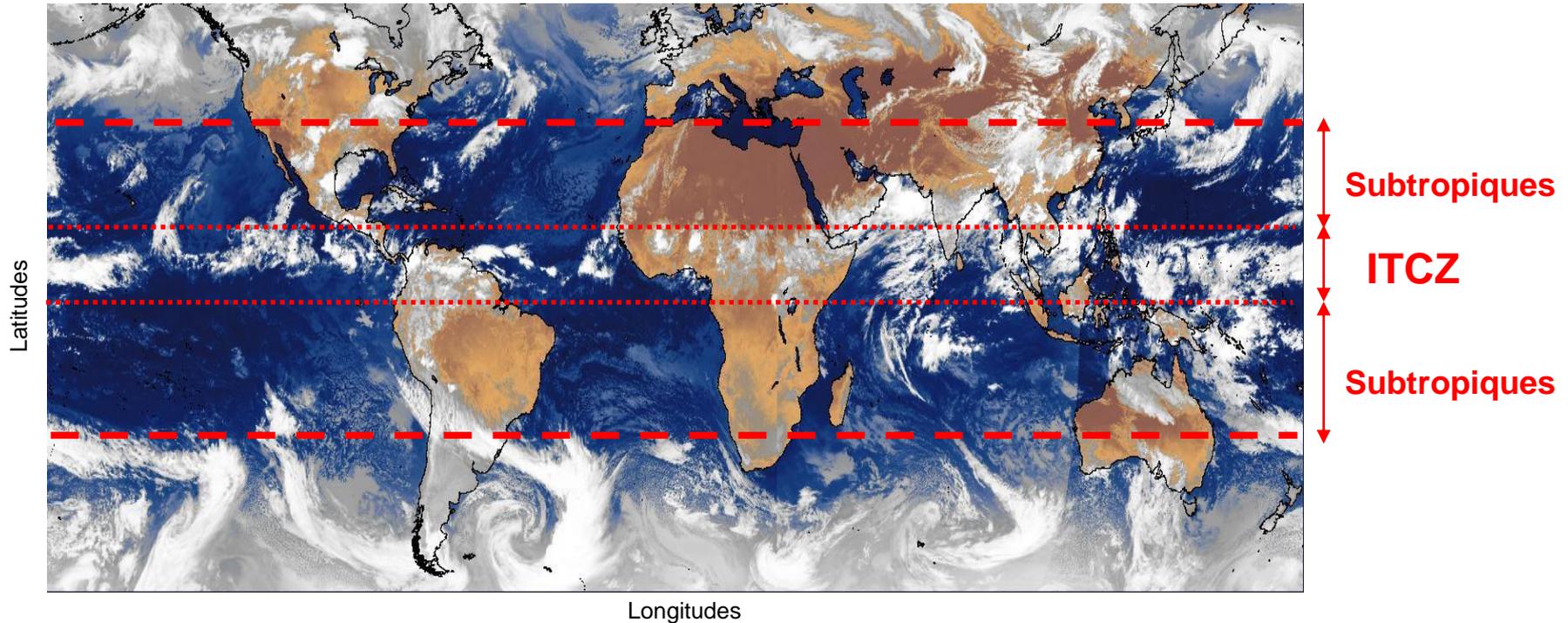
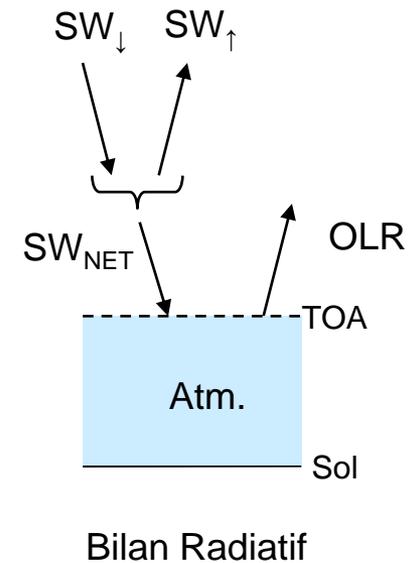
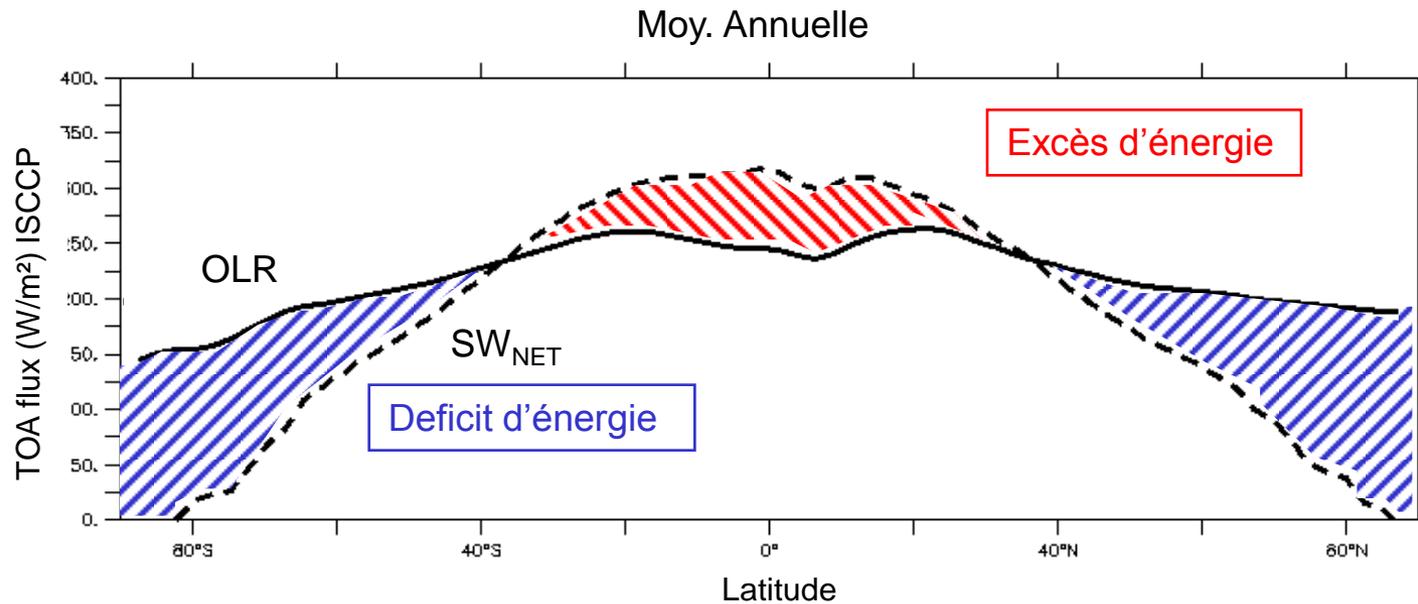


Image composite Infrarouge du 24/06/2007 06 UTC
(à partir de *Satmos Website*)

Origine des circulations atmosphériques

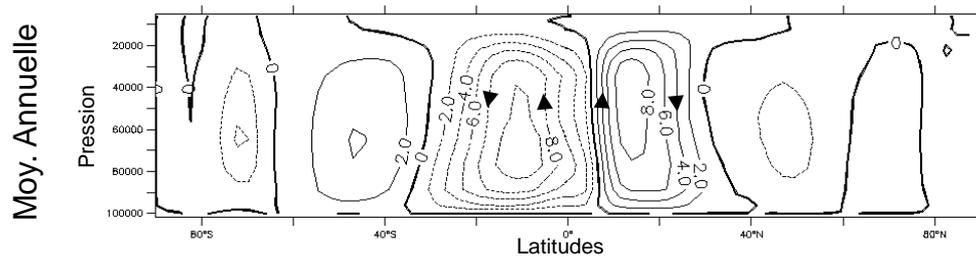


- Les zones tropicales reçoivent un excès d'énergie,
- Mise en mouvement de l'atmosphère et de l'océan,
- La circulation générale de l'atmosphère décrit l'ensemble de ces mouvements.

Circulation de grande échelle dans les tropiques

Circulation de Hadley

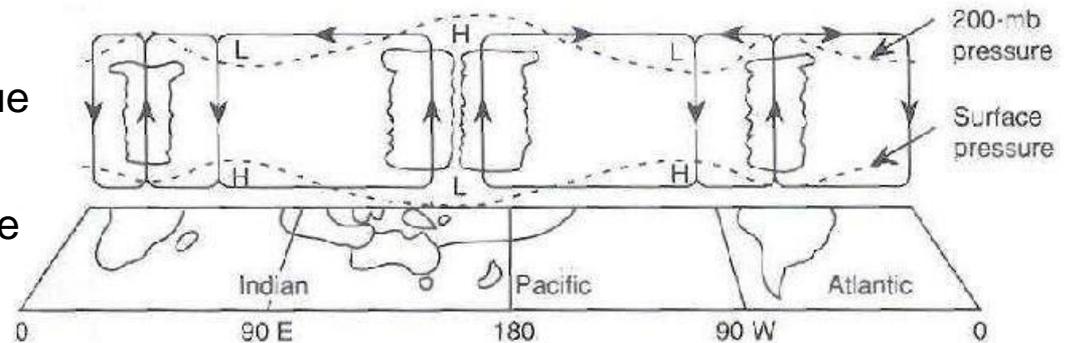
Fonction de courant méridienne (10^{10} kg/s), ERA40



- Ascendance au niveau de l'ITCZ
- Subsidence au niveau des subtropiques
- Une cellule dans l'hémisphère d'hiver lors des saisons DJF/JJA.

Circulation de Walker

- Ascendance au niveau du Pacifique Ouest
- Subsidence au niveau du Pacifique Est

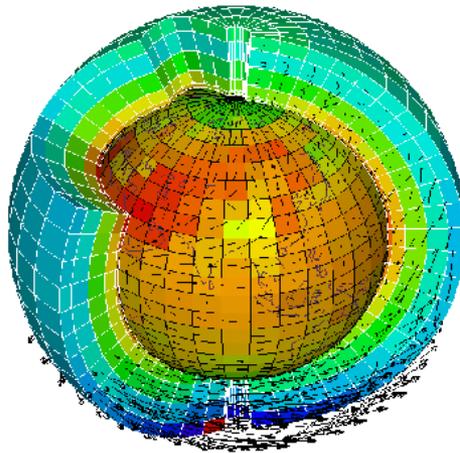


Webster (1983)

Problématique:

Comment la circulation générale de l'atmosphère tropicale est susceptible de changer en réponse au changement climatique d'origine anthropique?

Utilisation de modèles de circulation générale (GCM Global Circulation Model).



L. Fairhead

1. Modèles couplés
Océan/Atmosphère

2. Modèles idéalisés
permettant de simplifier
le système climatique

Plan de la soutenance de thèse :

Introduction

I. Contexte: le changement climatique et la circulation générale de l'atmosphère

II. La circulation atmosphérique de grande échelle et ses changements dans les GCMs

III. Mécanismes à l'origine des circulations grandes échelles dans des simulations idéalisés

III.1. Impacts des changements de SST sur les circulations de grande échelle

III.2. La circulation générale de l'atmosphère dans un GCM aqua-planète

Conclusion et Perspectives

Plan de la soutenance de thèse :

Introduction

I. Contexte: le changement climatique et la circulation générale de l'atmosphère

II. La circulation atmosphérique de grande échelle et ses changements dans les GCMs

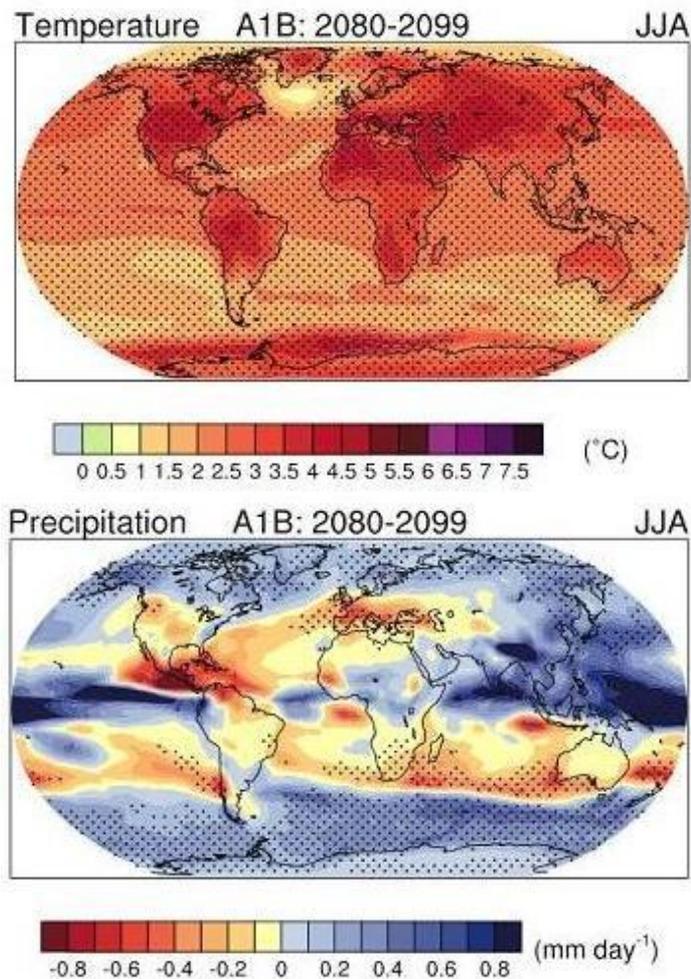
III. Mécanismes à l'origine des circulations grandes échelles dans des simulations idéalisés

III.1. Impacts des changements de SST sur les circulations de grande échelle

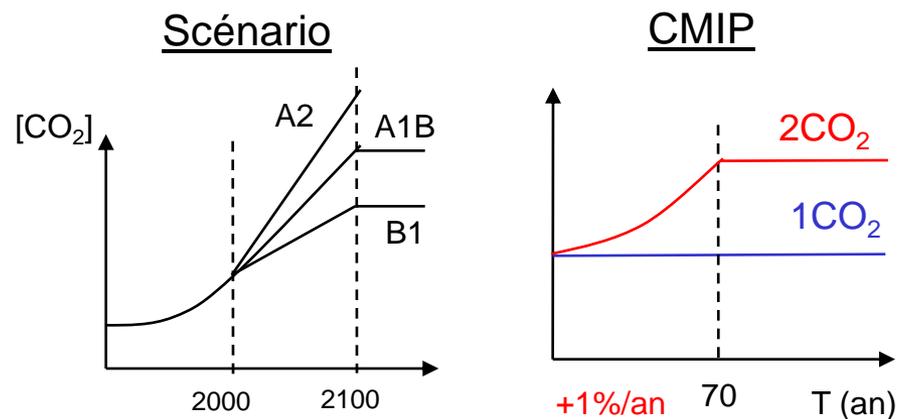
III.2. La circulation générale de l'atmosphère dans un GCM aqua-planète

Conclusion et Perspectives

Le changement climatique des GCMs couplés

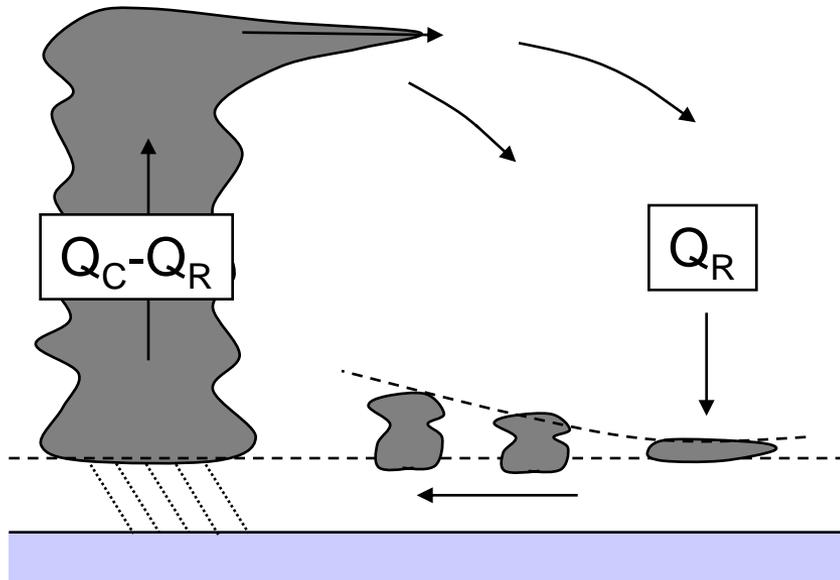


Augmentation des gaz à effet de serre



Prédiction de changement climatique

Le changement climatique des GCMs couplés



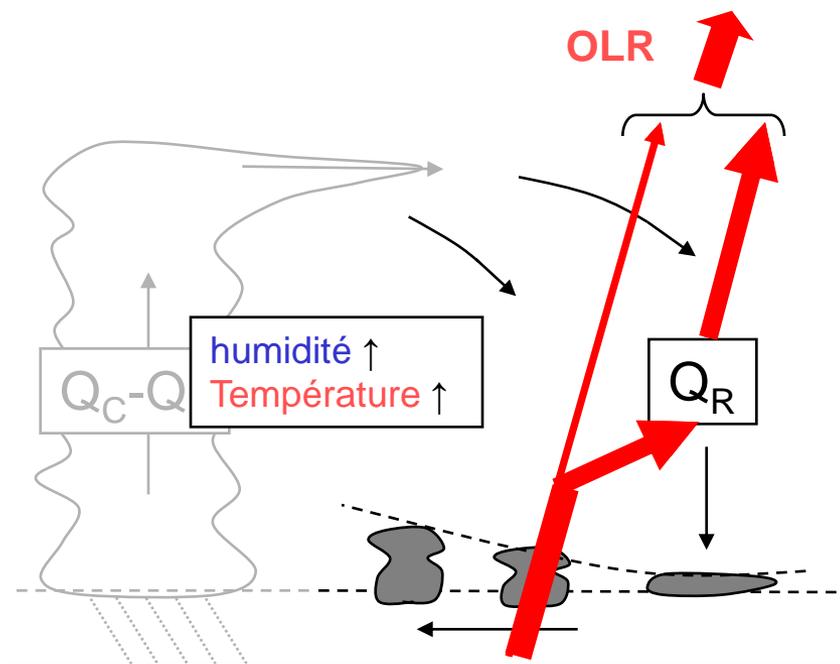
Équation thermodynamique:

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Derivé temporelle}} + \underbrace{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}}_{\text{Advection horizontale}} - \underbrace{\omega S_p}_{\text{Advection verticale}} = \underbrace{Q_c - Q_r}_{\text{Réchauffement Diabatique}}$$

avec,

$$S_p = - \underbrace{\frac{T}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p}}_{\text{Stabilité Statique}}$$

Le changement climatique des GCMs couplés



Équation thermodynamique:

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Dérivée temporelle}} + \underbrace{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}}_{\text{Advection horizontale}} - \underbrace{\omega S_p}_{\text{Advection verticale}} = \underbrace{\frac{1}{C_p} (Q_c - Q_r)}_{\text{Réchauffement Diabatique}}$$

avec,

$$S_p = - \underbrace{\frac{T}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p}}_{\text{Stabilité Statique}}$$

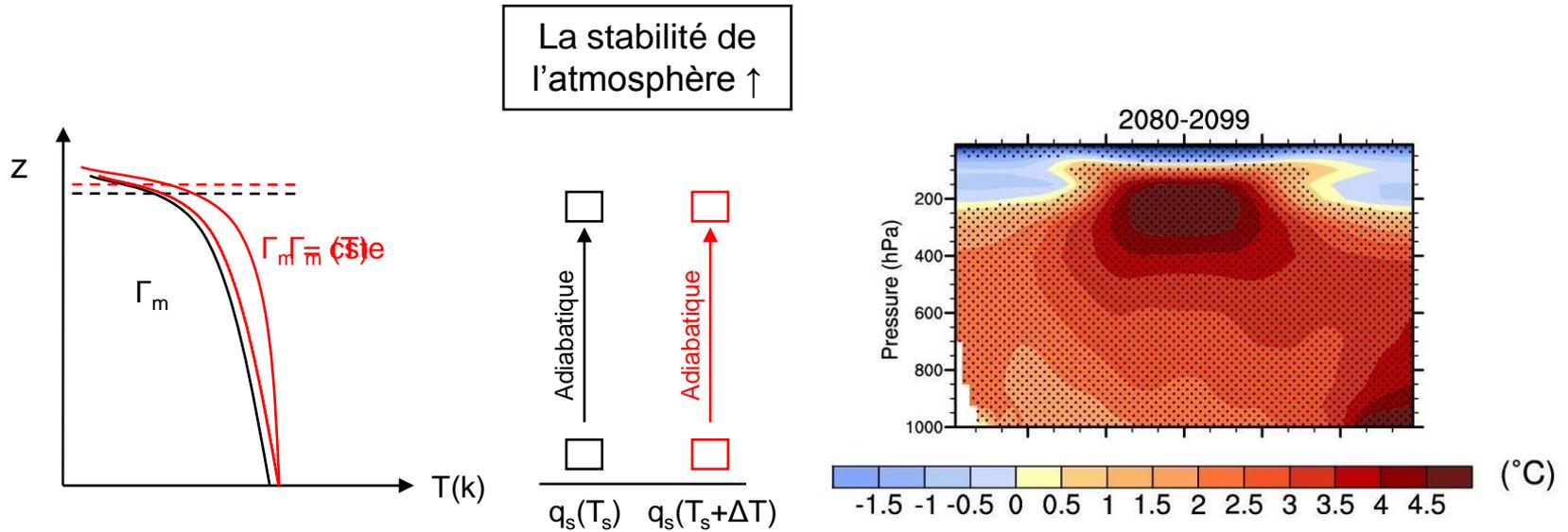
$$\omega = \frac{1}{C_p} \frac{Q_r}{S_p}$$

Augmentation de +6% (IPSL-CM4) \leftarrow Q_r
 Augmentation de +12% (IPSL-CM4) \leftarrow S_p

$\left. \begin{array}{l} \text{Augmentation de +6\% (IPSL-CM4)} \\ \text{Augmentation de +12\% (IPSL-CM4)} \end{array} \right\} \omega \downarrow \Rightarrow$

Diminution de la circulation tropicale

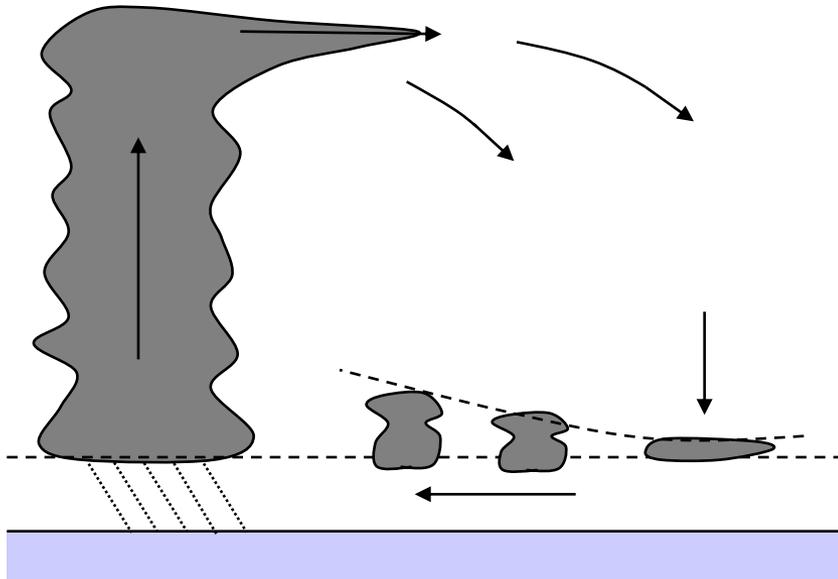
Le changement de la stabilité verticale des GCMs



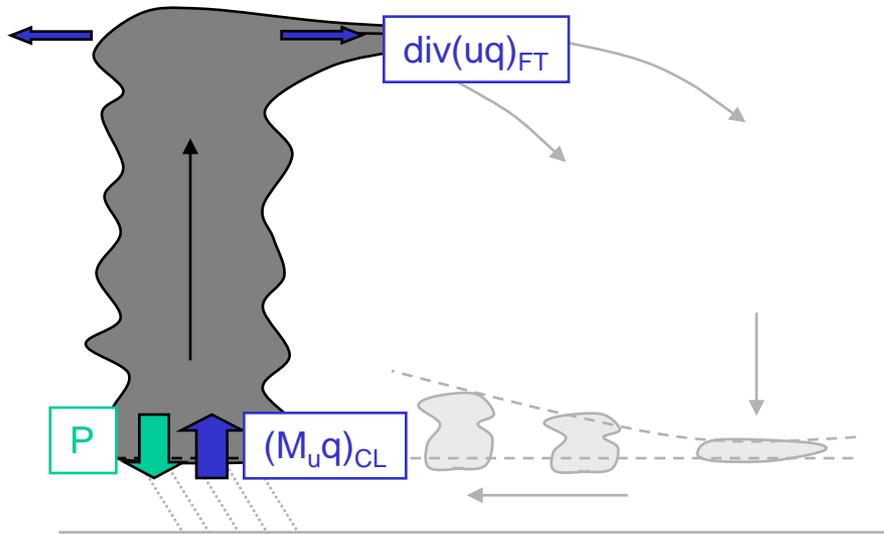
Source: GIEC AR4

- L'atmosphère est plus stable dans un climat réchauffé,
- La circulation diminue en moyenne pour transporter la même quantité d'énergie statique sèche.

Les Variations du cycle hydrologique des GCMs couplés



Les Variations du cycle hydrologique des GCMs couplés



Bilan d'eau au niveau des branches ascendantes des circulations de Hadley et Walker (Held et Soden, 2005 dans *J. Climate*):

$$(M_u q)_{CL} - \cancel{(\text{div}(\vec{u}q))}_{FT} = P$$

$$\text{Or : } q \approx \text{RH } q_s(T)$$

Clausius
Clapeyron

Pour 1K de
réchauffement en
surface

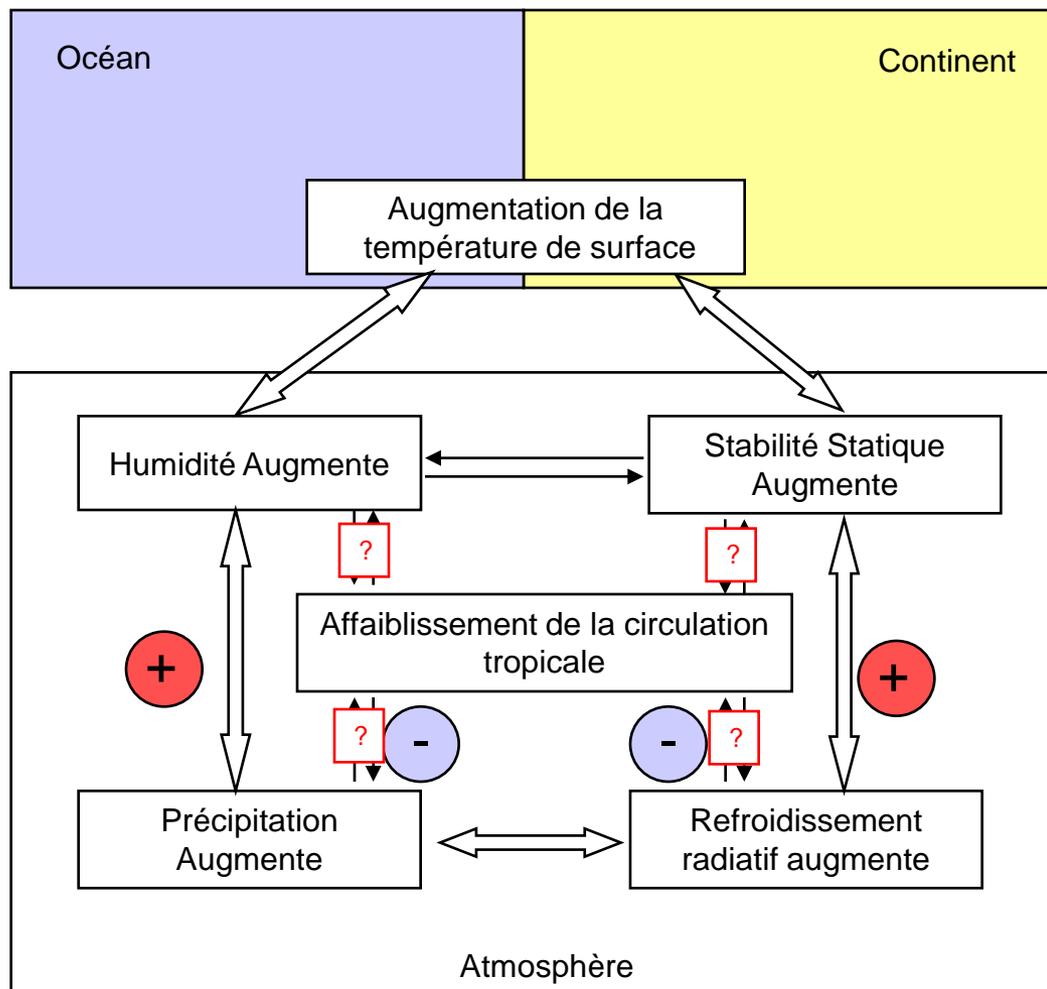
$$\Delta \text{RH} \approx 0$$

$$\Delta q_s = +7\%/K$$

$$\text{On a : } M_u q \approx P$$

- A cause des arguments précédents, le flux de masse convectif $M_u \downarrow$, or $q \uparrow$,
- \Rightarrow L'augmentation des précipitation des GCMs lors du changement climatique est de **+1 à 3 %/K**.

Bilan des mécanismes responsable des changements de circulation



Questions ouvertes:

- Quel est l'intensité de ces mécanismes? Peut-on quantifier leurs influences respectives sur la circulation tropicale?
- Ces mécanismes sont-ils applicables pour la circulation de Hadley?
- L'aire relative entre zones convectives/subsidentes change-t-elle?
- Et le transport de chaleur dans les tourbillons?

Plan de la soutenance de thèse :

Introduction

I. Contexte: le changement climatique et la circulation générale de l'atmosphère

II. La circulation atmosphérique de grande échelle et ses changements dans les GCMs

III. Mécanismes à l'origine des circulations grandes échelles dans des simulations idéalisés

III.1. Impacts des changements de SST sur les circulations de grande échelle

III.2. La circulation générale de l'atmosphère dans un GCM aqua-planète

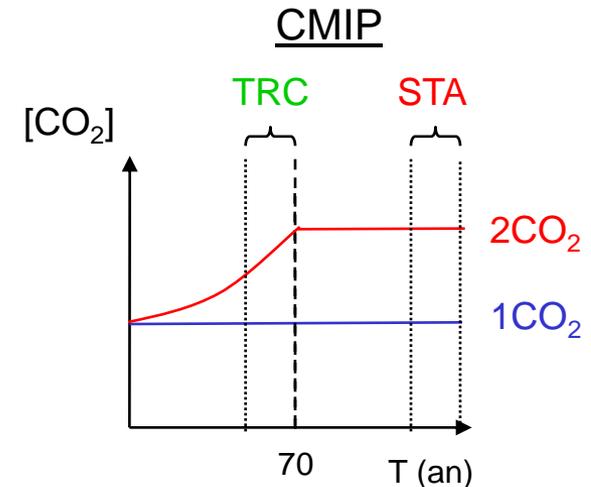
Conclusion et Perspectives

Les changements de la circulation de Hadley dans les GCMs

- Comment change la circulation de Hadley dans les modèles couplés?

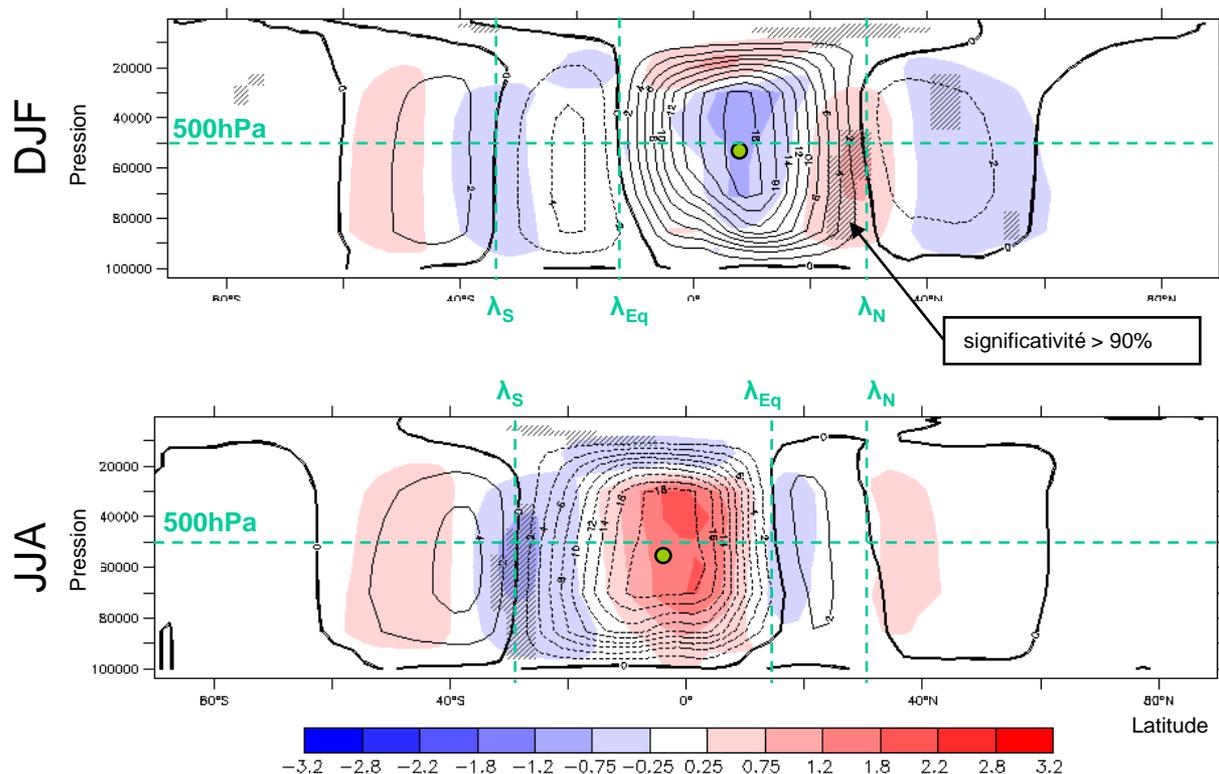
Données : 18 modèles couplés de la base de données AR4

- 1CO₂ contrôle préindustriel
- 2CO₂ doublement du CO₂
 - 2CO₂ TRC: changement transitoire
 - 2CO₂ STA: changement stabilisé



Changement de circulation de Hadley lors du changement climatique

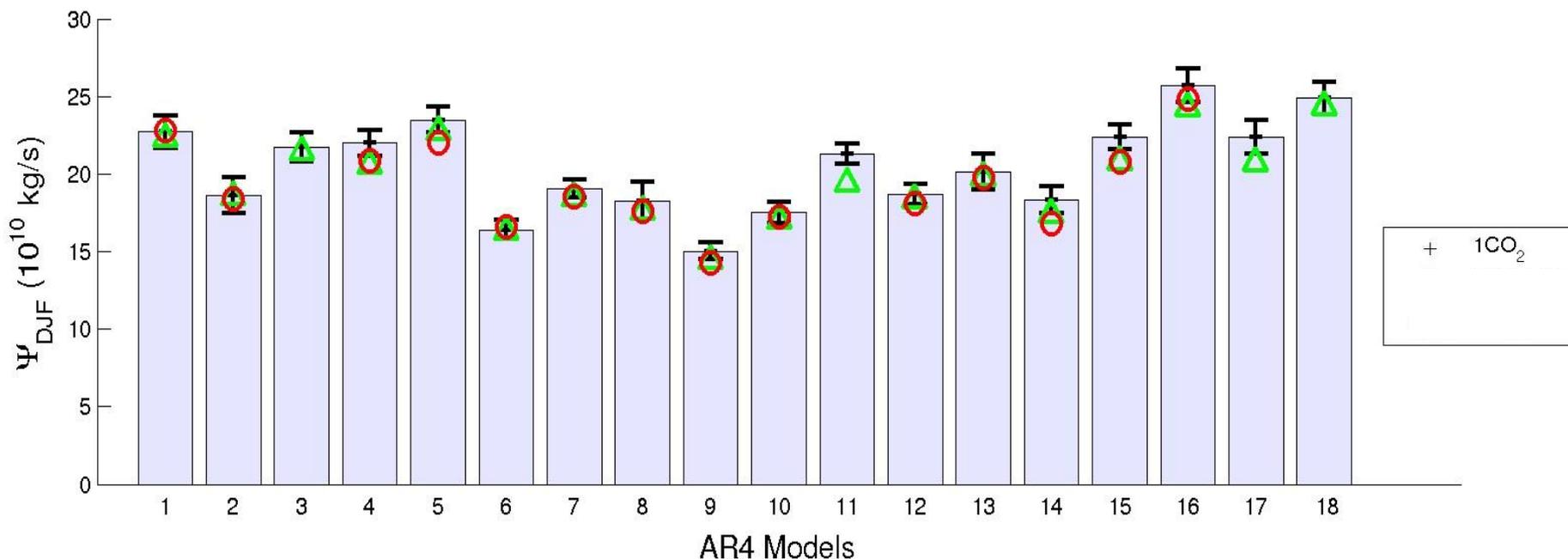
Fonction de courant méridienne (10^{10} kg/s),
Moyenne Multi-modèle



- Déplacement en altitude de la cellule de Hadley \Rightarrow déplacement de la tropopause,
- Déplacement significatif vers les pôles des branches subsidentes des cellules,
- Affaiblissement de la circulation de Hadley (non significatif).

On choisit deux indicateurs des cellules de Hadley : $\max(|\psi|)$ et $\psi|_{\psi=0}$

Intensité de la circulation de Hadley



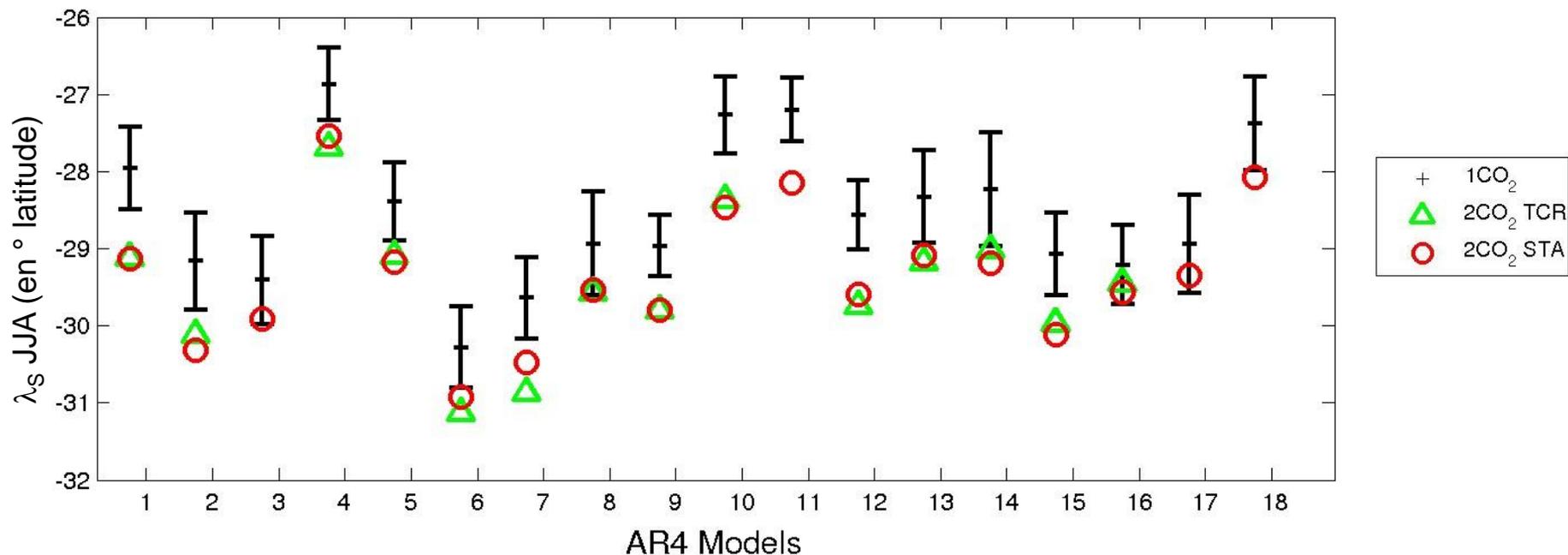
- Peu d'accord entre les modèles couplés dans l'intensité des circulations de Hadley,
- Affaiblissement des modèles lors de 2CO₂.

Bilan:

Saison	$\Delta\max(\psi)$
JJA	-7.2%
DJF	-12.4%

Tableau: Changement Intensité des cellules de Hadley (moyenne AR4)

Extension de la circulation de Hadley



- Déplacement vers les pôles des branches subsidentes, confirme résultat des simulations scénarios (Iu et al., 2007, *GRL*),
- Les cellules de Hadley s'élargissent en moyenne, car peu de déplacement des branches ascendantes.

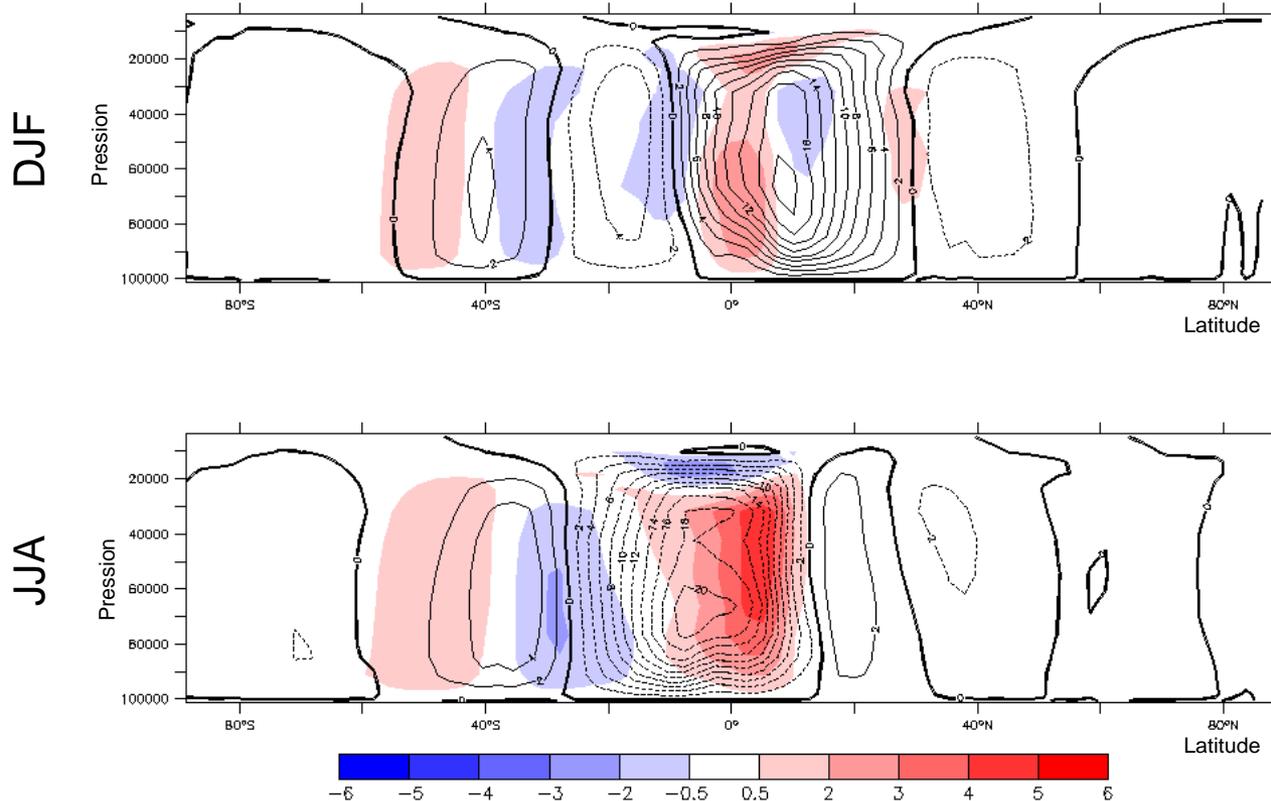
λ_N DJF	1.1° vers le N
λ_S JJA	1.0° vers le S
$ \lambda_N - \lambda_{Eq} $ DJF	+0.9° de largeur
$ \lambda_S - \lambda_{Eq} $ JJA	+1.4° de largeur

Tableau: Déplacement des cellules de Hadley (moyenne AR4)

Mécanismes des changements de circulation tropicale

On utilise les sorties détaillées du modèle IPSL-CM4 :

Fonction de courant ψ (10^{10} kg/s), modèle IPSL-CM4



- Pour DJF, intensification de la cellule de Hadley et peu de déplacement vers les pôles.

- Pour JJA, Changement conforme aux GCMs couplés de l'AR4,

Vitesse verticale diagnostiquée par l'équation thermodynamique

L'équation thermodynamique s'écrit:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} - \omega S_p = Q_c - Q_r \quad \text{avec,} \quad S_p = -\frac{T}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

On peut montrer que :

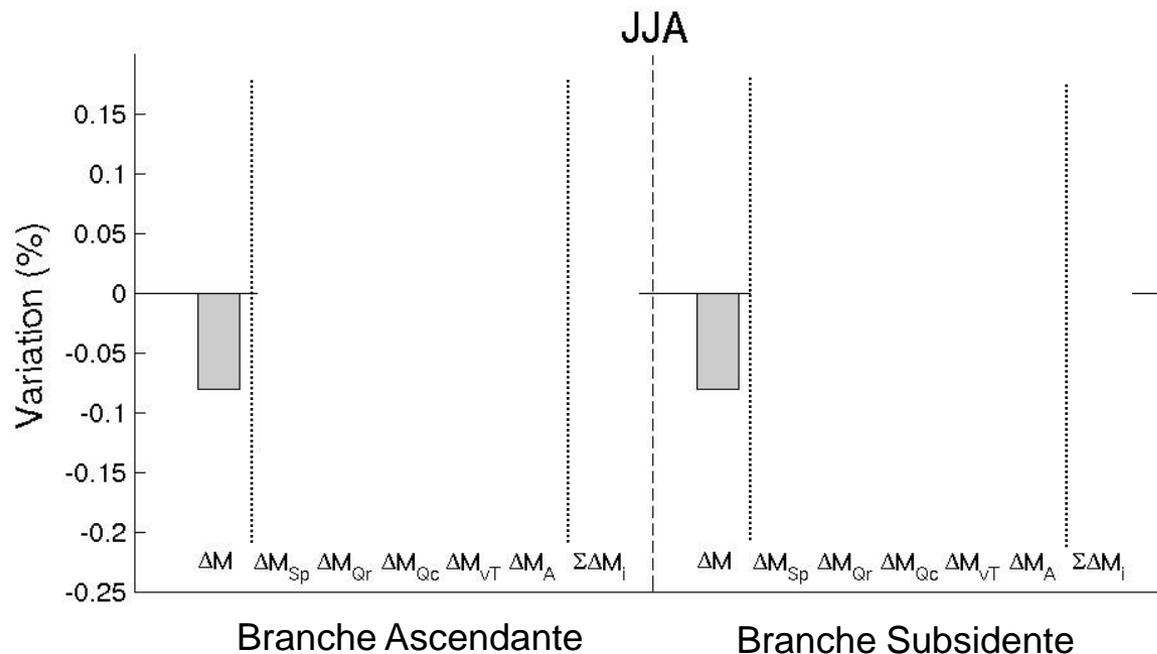
$$M_{u(d)} = \left(\overline{Q_c}^{u(d)} - \overline{Q_r}^{u(d)} - \overline{\left(\frac{\partial [v'T']}{\partial y} + \frac{\partial [\omega'T']}{\partial p} \right)}^{u(d)} \right) \frac{A_{u(d)}}{g S_p^{u(d)}}$$

On décompose alors la variation du flux de masse par une linéarisation:

$$\Delta M = \Delta M_{S_p} + \Delta M_{Q_c} + \Delta M_{Q_r} + \Delta M_{v'T'} + \Delta M_A$$

Avec : $\Delta M_x = \frac{\partial M}{\partial x} \Delta x$ Par exemple : $\Delta M_{S_p} = -\frac{\overline{\Delta S_p}^{u(d)}}{S_p^{u(d)}} M_{u(d)}$

Vitesse verticale diagnostiquée par l'équation thermodynamique



Décomposition:

$$\Delta M = \underbrace{\Delta M_{Sp} + \Delta M_{Qc} + \Delta M_{Qr} + \Delta M_{vT} + \Delta M_A}_{\Sigma \Delta M_i}$$

Pour JJA, l'affaiblissement de la circulation de Hadley est expliqué par l'augmentation de la stabilité statique.

Calcul à partir de sorties à 500hPa

BILAN:

- Les GCMs couplés de l'AR4 montrent lors de la simulation $2xCO_2$ en régime stabilisé ou transitoire:
 - ❑ Un affaiblissement de la circulation de Hadley,
 - ❑ Un élargissement des cellules de Hadley.
- Des diagnostics sur les modèles couplés montrent :
 - ❑ Augmentation SST \Rightarrow Stabilité statique $\uparrow \Rightarrow$ Hadley \downarrow ,
 - ❑ Les changements d'aire relative entre zones ascendantes et subsidentes et de flux de chaleur tourbillonnaire ont peu de conséquences sur la circulation de Hadley.

Plan de la soutenance de thèse :

Introduction

I. Contexte: le changement climatique et la circulation générale de l'atmosphère

II. La circulation atmosphérique de grande échelle et ses changements dans les GCMs

III. Mécanismes à l'origine des circulations grandes échelles dans des simulations idéalisés

III.1. Impacts des changements de SST sur les circulations de grande échelle

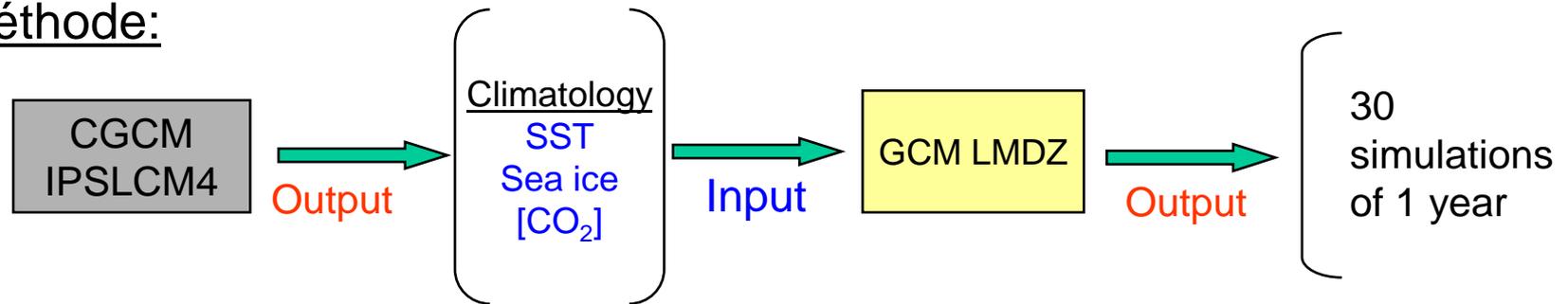
III.2. La circulation générale de l'atmosphère dans un GCM aqua-planète

Conclusion et Perspectives

Étude de l'influence isolée des changements de SST sur l'atmosphère

- On met en place de simulations atmosphériques forcées mimant le modèle couplé IPSL-CM4:

Méthode:

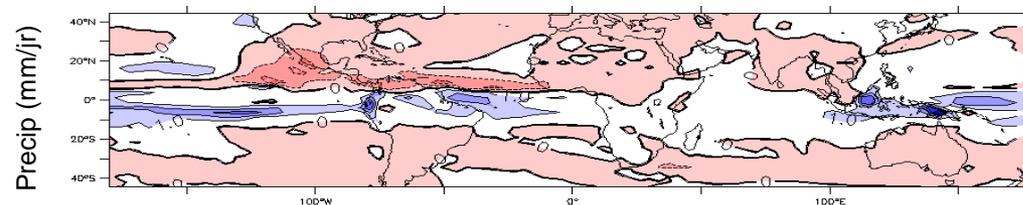


- Étudions le rôle du changement de SST isolément des changements de glace de mer et de CO₂:

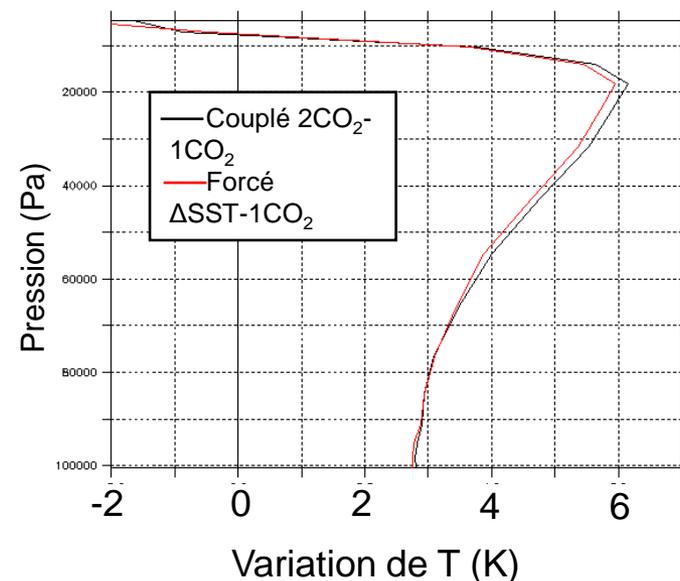
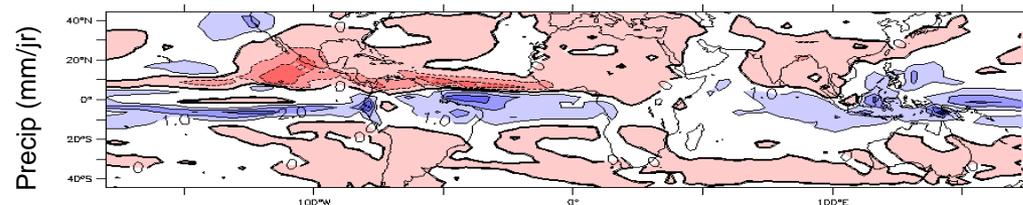
Simulation	Glace de mer	[CO ₂]	SST
1CO2	A partir du Couplé 1x[CO ₁]	1x[CO ₁]	A partir du Couplé 1x[CO ₁]
2CO2	A partir du Couplé 2x[CO ₁]	2x[CO ₁]	A partir du Couplé 2x[CO ₁]
ΔSST	A partir du Couplé 1x[CO ₁]	1x[CO ₁]	A partir du Couplé 2x[CO ₁]

Validation du protocole expérimental

Couplé 2CO₂-1CO₂



Forcé ΔSST – 1CO₂



ΔSST représente les changements les plus robustes donnés par le modèle couplé dans la zone tropicale:

- changement des précipitations,
- changement de stabilité statique,
- changement des circulations Hadley.

Décomposition du réchauffement des SSTs en composante Globale, Longitudinale et Méridionale

$$\Delta SST(x, y) = \Delta SST_0 + \Delta SST_y(y) + \Delta SST_x(x, y)$$

 ΔSST

GM

*Global
Mean*

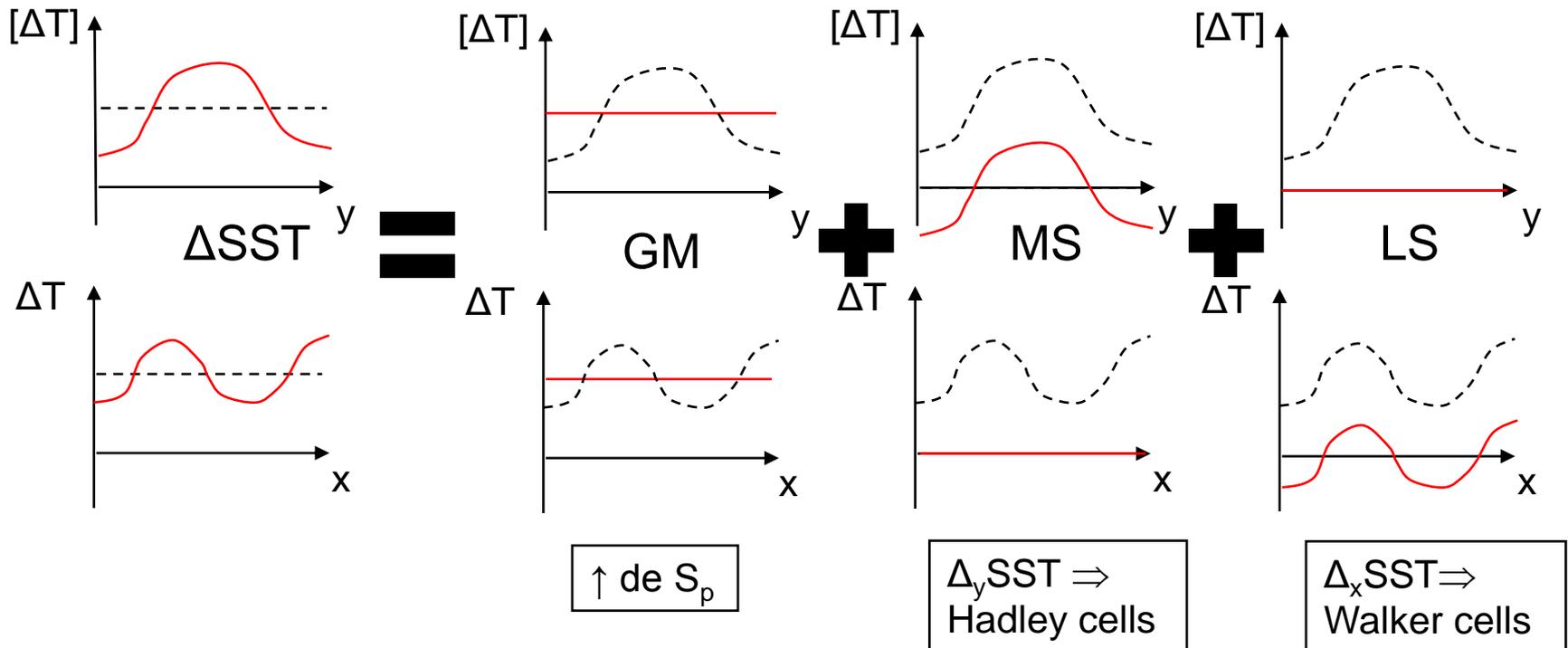
MS

*Meridian
Structure*

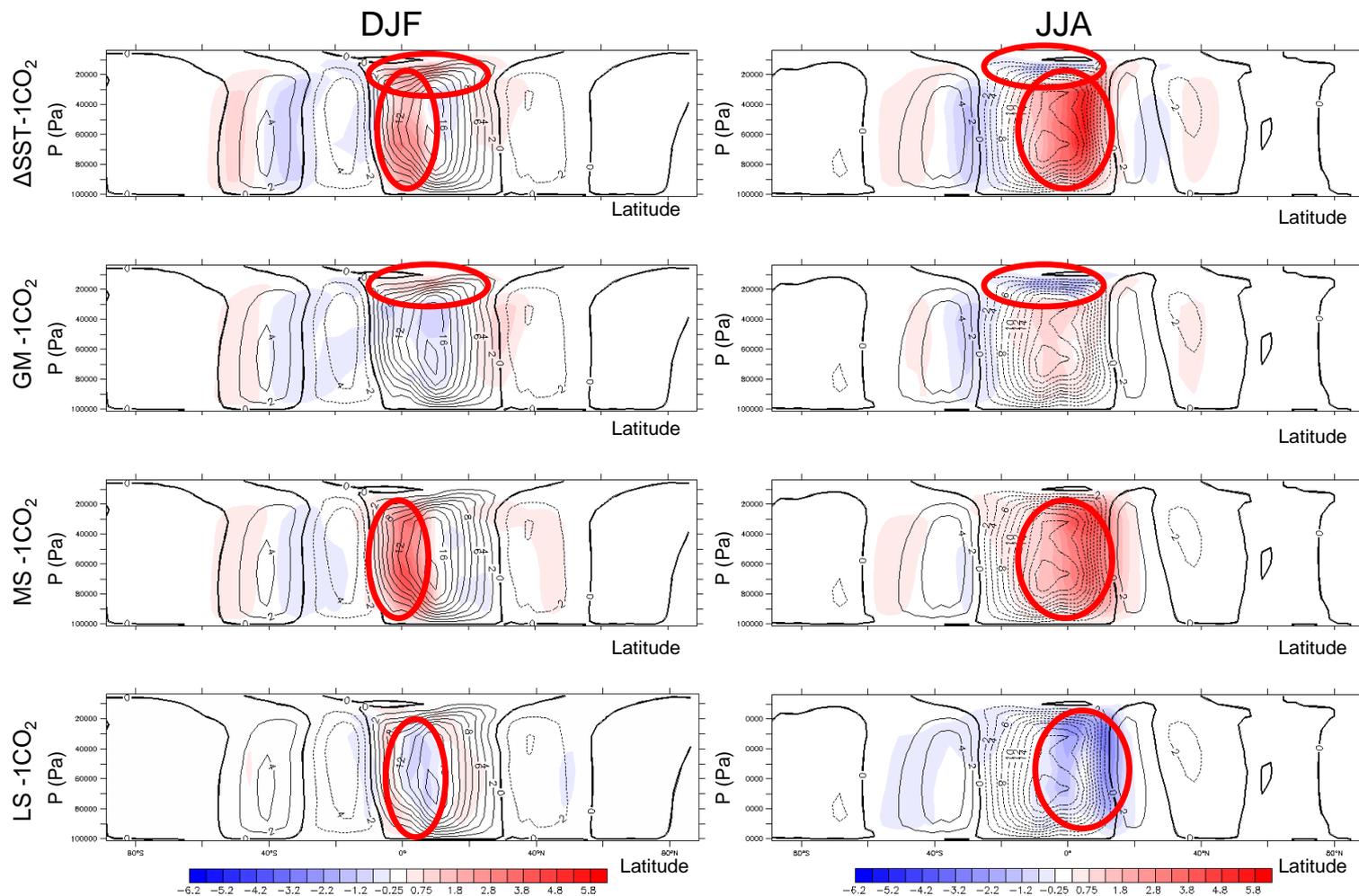
LS

*Longitudinal
Structure*

Simulations



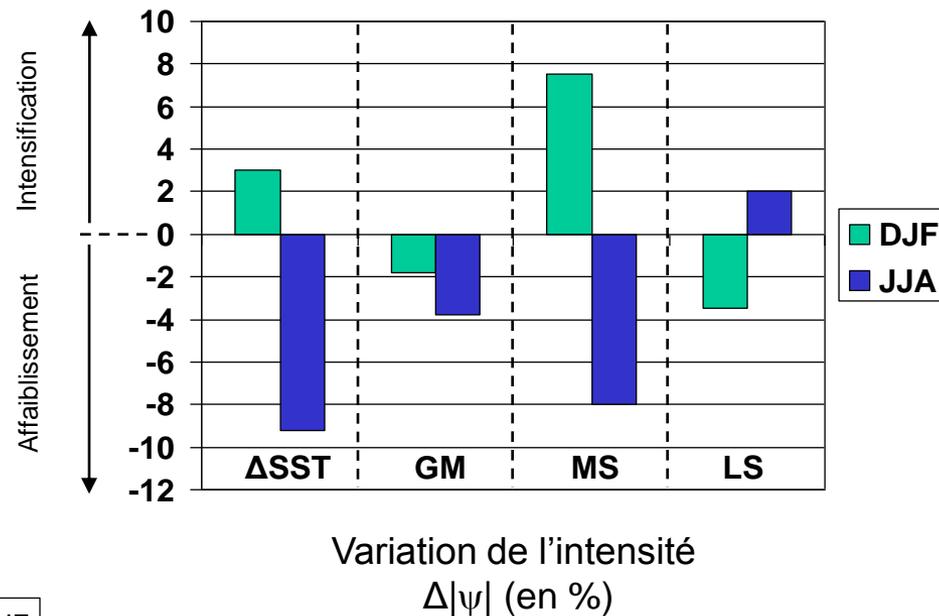
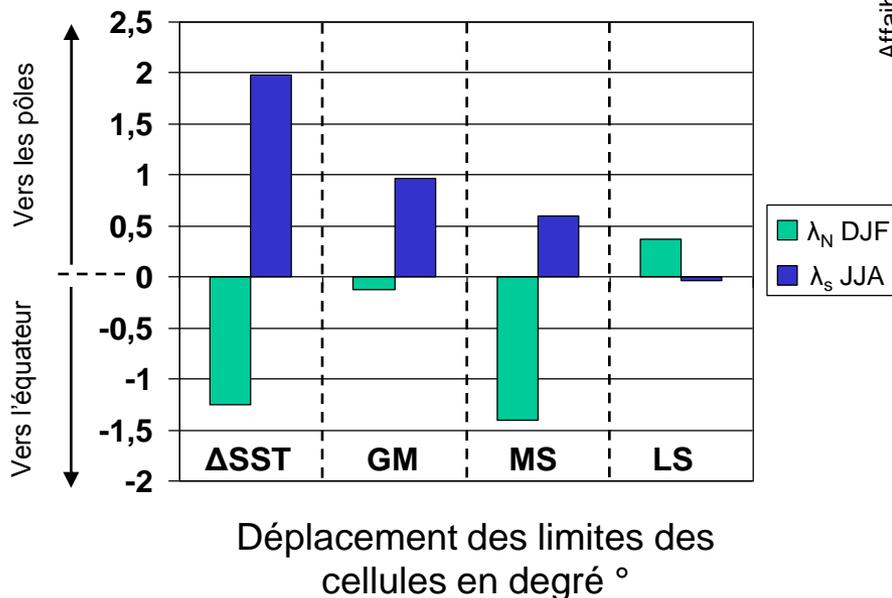
Variation de la circulation de Hadley dans les simulations idéalisées



Fonction de courant méridienne ψ (10^{10} kg/s)

Variation de l'intensité et de l'extension des cellules de Hadley

- Les variations de l'intensité des cellules de Hadley sont gouvernées par les gradients de SST,
- L'augmentation uniforme de SST diminue les cellules.



- L'extension des cellules semble liée aux changements de SST uniforme mais surtout aux gradients de SST.

BILAN

- Les changements robustes de la circulation de grande échelle des GCMs couplés sont modélisés par une augmentation uniforme des SSTs, via les changements de stabilité statique,
- Les gradients méridiens de SST ont une influence sur la circulation de Hadley. $\Delta_y \text{SST} \uparrow \Rightarrow \psi_{\max} \uparrow$. Ces changements déplacent l'ITCZ dans la simulation MS,
- La compréhension de l'influence des changements longitudinaux reste à déterminer pour des études futures. Ces changements ont peu d'influence sur les structures méridiennes.

Plan de la soutenance de thèse :

Introduction

I. Contexte: le changement climatique et la circulation générale de l'atmosphère

II. La circulation atmosphérique de grande échelle et ses changements dans les GCMs

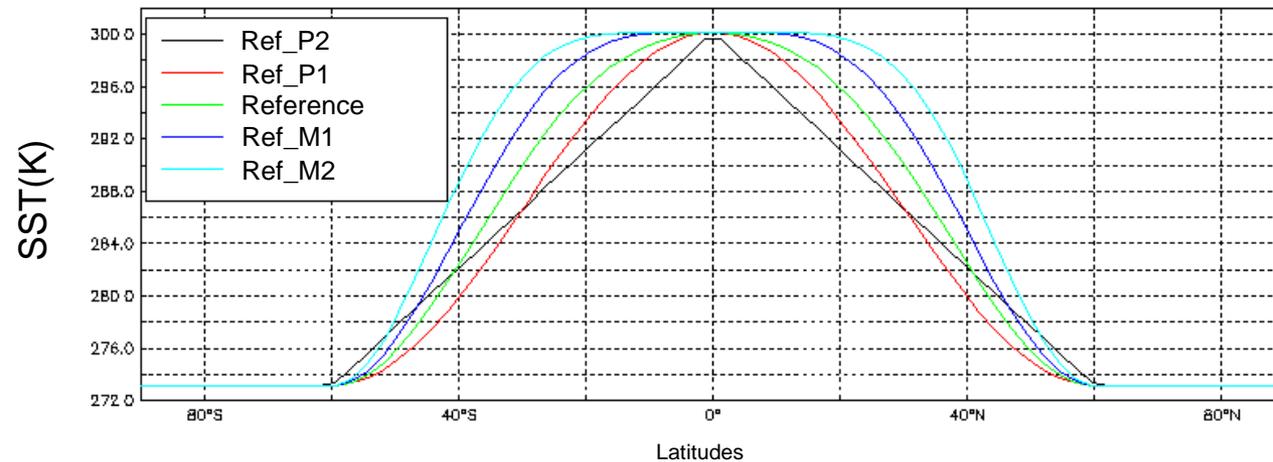
III. Mécanismes à l'origine des circulations grandes échelles dans des simulations idéalisés

III.1. Impacts des changements de SST sur les circulations de grande échelle

III.2. La circulation générale de l'atmosphère dans un GCM aqua-planète

Conclusion et Perspectives

Étude de l'influence des gradients méridiens de SST dans des simulations aqua-planètes



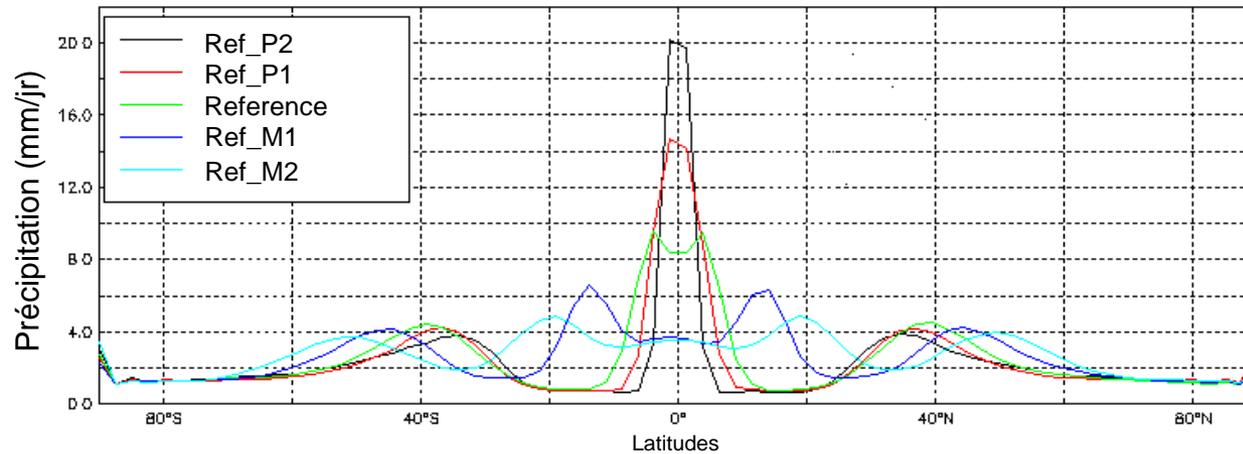
GCM atmosphérique
 LMDZ version standard:

- Sans “continent” ni “glace de mer”.
- Équinoxe de printemps perpétuel, (sans cycle saisonnier).

Simulation	SST(°C)	
REF_P2	$27(1-3\varphi/\pi)$	ou 0 si $\varphi > 60^\circ$
REF_P1	$27(1-\sin^2(3\varphi/2))$	ou 0 si $\varphi > 60^\circ$
REFERENCE	Moyenne entre FLAT et CONTROL	
REF_M1	$27(1-\sin^4(3\varphi/2))$	ou 0 si $\varphi > 60^\circ$
REF_M2	$27(1-\sin^6(3\varphi/2))$	ou 0 si $\varphi > 60^\circ$

Tableau: Présentation des simulations aqua-planètes

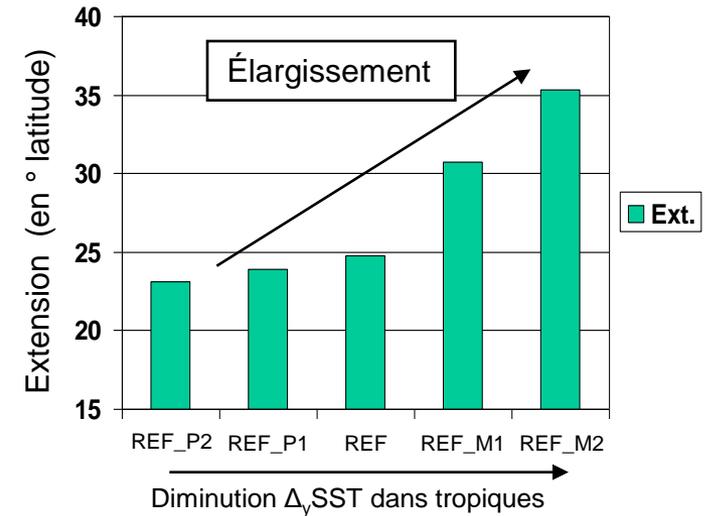
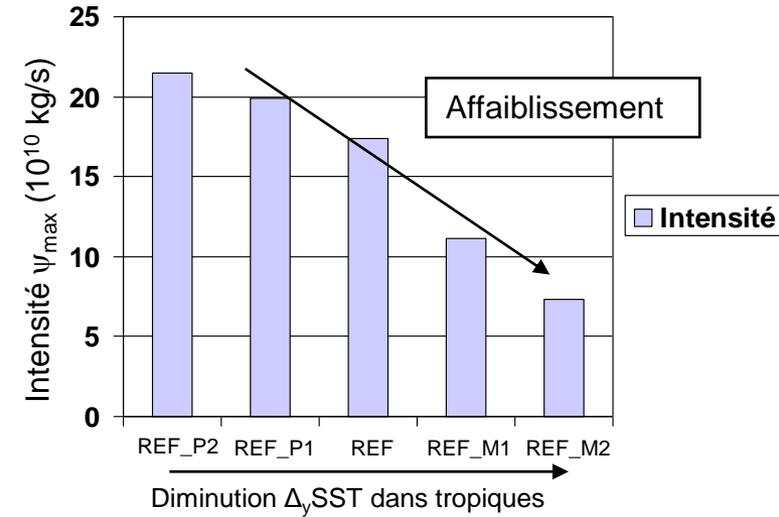
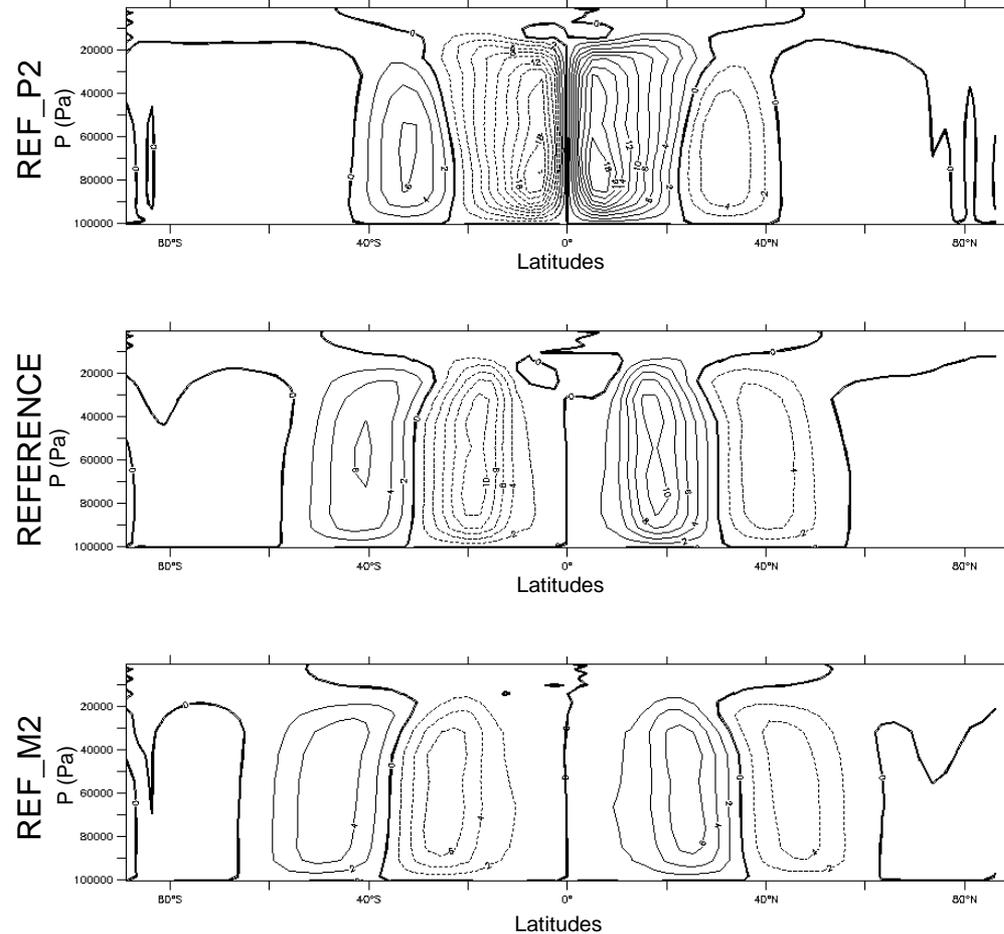
Precipitation des simulations Aqua-planètes



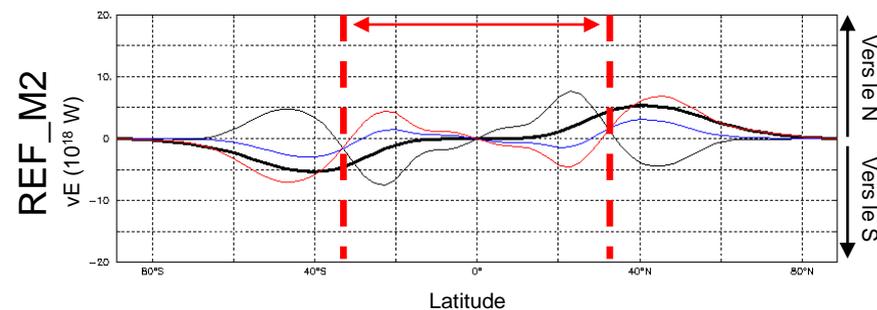
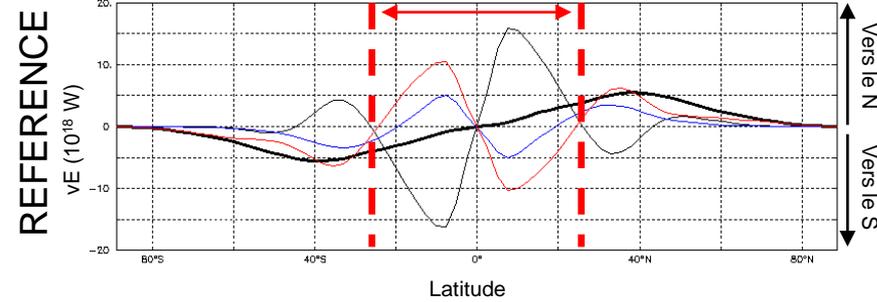
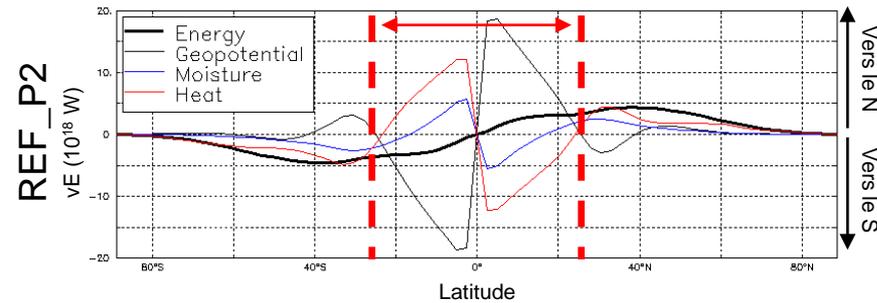
- REF_P2 et REF_P1 : simple ITCZ très forte,
- REFERENCE : début de double ITCZ, valeur réaliste des précipitations,
- REF_M1 et REF_M2 : double ITCZ, faibles précipitations équatoriales.

Circulation de Hadley dans les simulations Aqua-planètes

Fonction de courant méridienne ψ (contour) en 10^{10} kg/s



Transport d'énergie vE



Transport d'énergie

On calcule le transport d'énergie dans l'atmosphère:

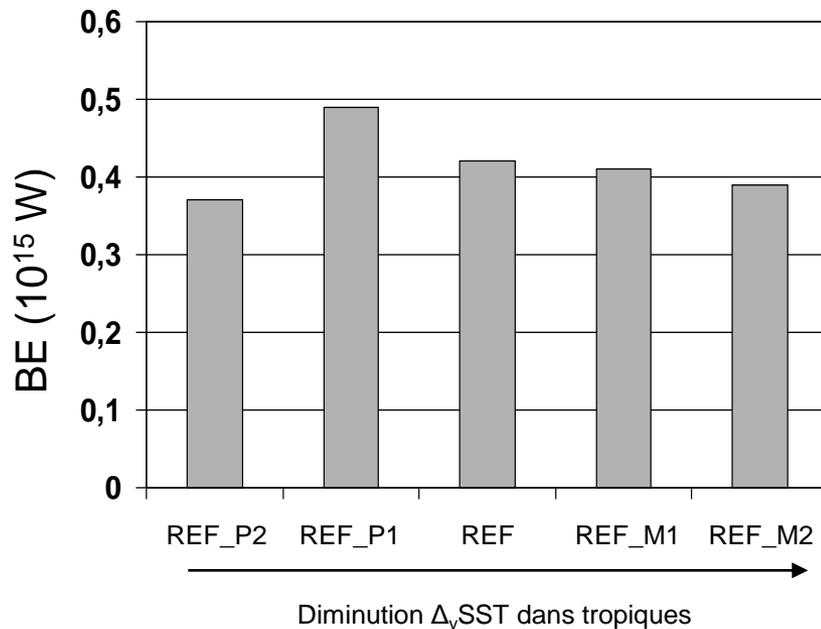
$$\underbrace{\rho [\overline{vE}]}_{\text{Energie}} = \underbrace{\rho C_p [\overline{vT}]}_{\text{Chaleur}} + \underbrace{\rho g [\overline{vz}]}_{\text{Géopotential}} + \underbrace{\rho L_v [\overline{vq}]}_{\text{Humidité}}$$

Énergie Massique efficace : $ESE = [\overline{vE}] / \psi_{\max}$ (en J/kg)

Efficient Specific Energy

Bilan d'énergie

BE Bilan d'énergie au niveau de la circulation de Hadley (10^{15} W)



Bilan d'énergie de l'atmosphère:

$$\text{div}(ve) = \underbrace{BR_{TOA} - BR_{Sol} + L_v E + H}_{\text{BE (sources - puits d'énergie)} \approx \text{cste}}$$

Dans les simulations, on constate que la somme des sources et puits d'énergie varient peu \Rightarrow transport d'énergie $[vE]$ constant. Or, la circulation de Hadley \downarrow , donc ESE \uparrow .

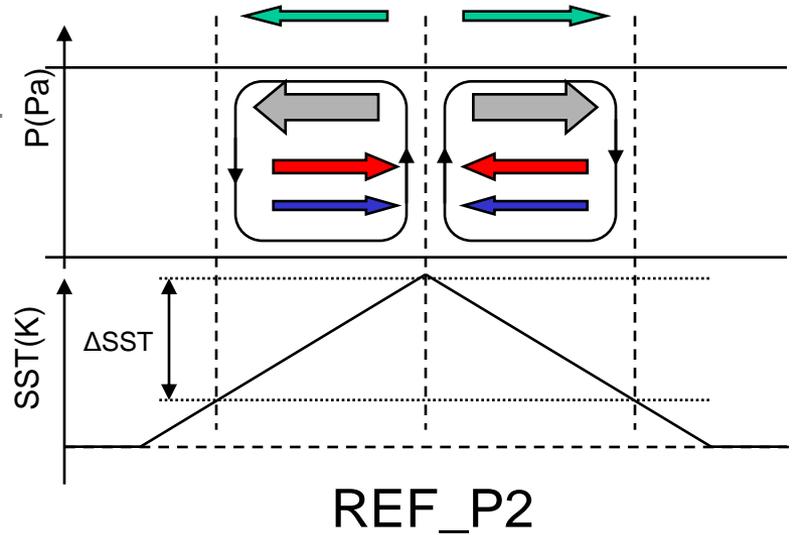
BILAN (1/2)

Energie

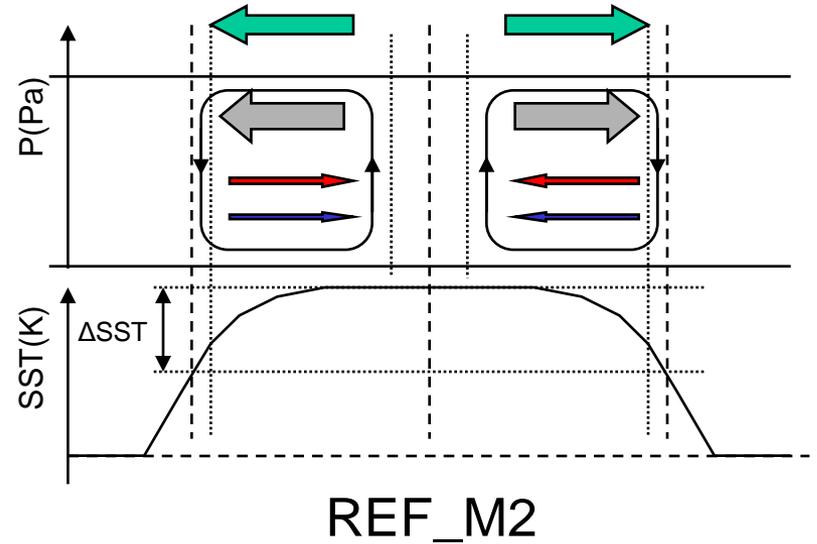
Géop.

Heat

Moist

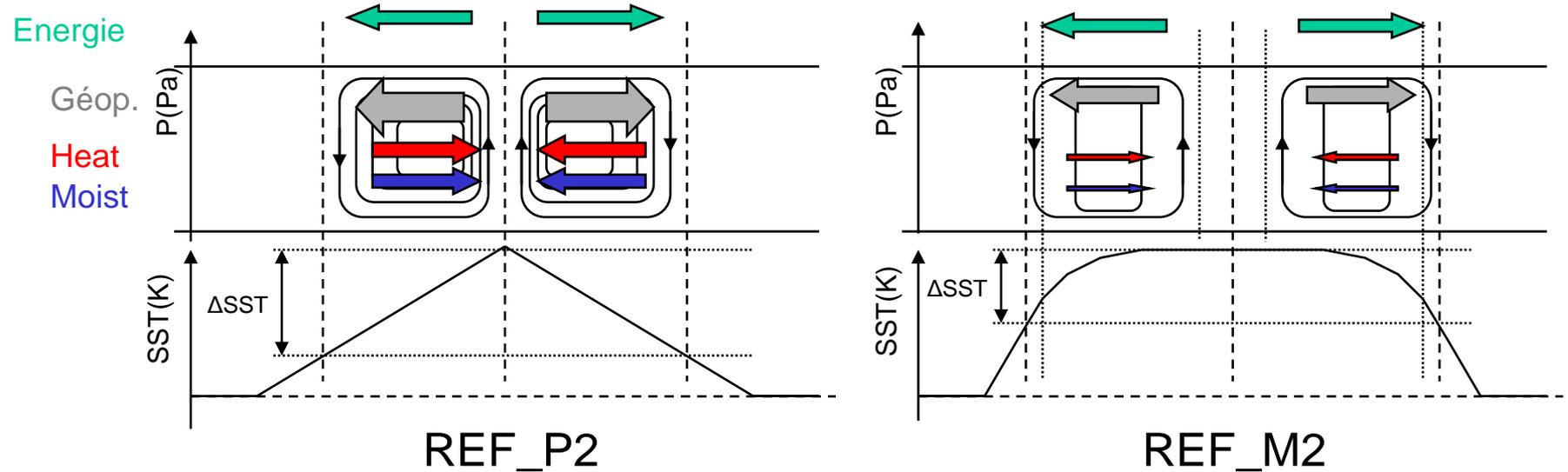


REF_P2



REF_M2

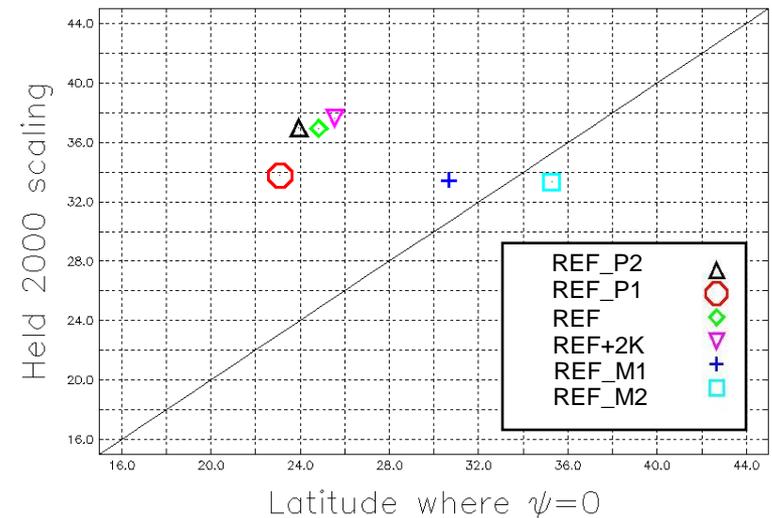
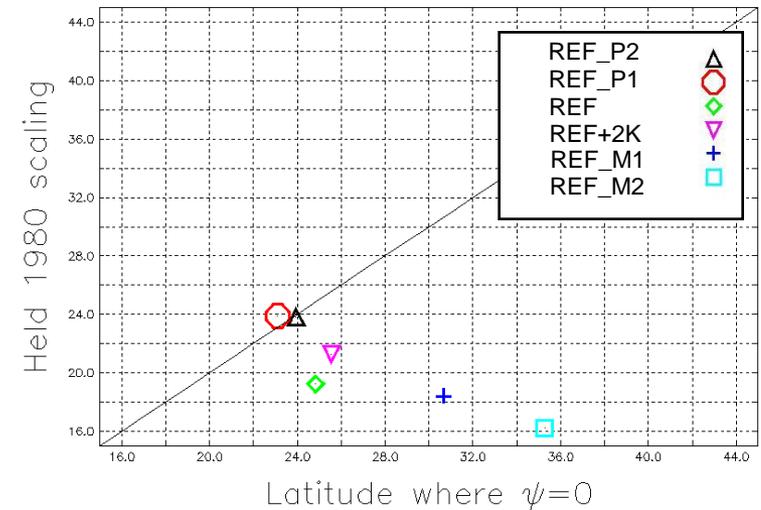
BILAN (1/2)



- Une diminution du gradient méridien de SST modifie la répartition entre les différentes composantes du transport énergétique, \Rightarrow si $\Delta_y S_{ST} \downarrow$ alors ESE \uparrow ,
- Les cellules de Hadley modulent leur intensité pour réaliser le transport d'énergie vers les pôles, \Rightarrow si ESE \uparrow alors Hadley \downarrow .

Largeur des cellules de Hadley dans les simulations Aqua-planètes

- Théorie classique des cellules de Hadley (Held et Hou, 1980, *JAS*):
 $\Rightarrow \varphi_{HH}$: extension donnée par la latitude où l'équilibre radiatif convectif est possible.
- Plus récemment, des modèles alternatifs ont été construits (Held 2000):
 $\Rightarrow \varphi_{BC}$: extension donnée par la latitude où les jets subtropicaux deviennent instables barocliniquement.
- REF_P1 et REF_P2 : donnés par φ_{HH}
- REF_M1 et REF_M2 : donnés par φ_{BC}
- REF : donné ni par φ_{HH} ni par φ_{BC}



Plan de la soutenance de thèse :

Introduction

I. Contexte: le changement climatique et la circulation générale de l'atmosphère

II. La circulation atmosphérique de grande échelle et ses changements dans les GCMs

III. Mécanismes à l'origine des circulations grandes échelles dans des simulations idéalisés

III.1. Impacts des changements de SST sur les circulations de grande échelle

III.2. La circulation générale de l'atmosphère dans un GCM aqua-planète

Conclusion et Perspectives

Conclusion

• **Un affaiblissement et un élargissement de la circulation de Hadley sont diagnostiqués lors d'un doublement de CO₂ dans les modèles couplés de l'AR4:**

- Conséquence robuste de l'augmentation de stabilité statique,
- Les variations des tourbillons et des aires relatives entre zones subsidentes et ascendantes ont peu d'incidences sur la circulation de Hadley.

• **Pour isoler les processus expliquant les changements de circulation mis en évidence, on utilise d'un GCM atmosphérique mimant un modèle couplé:**

- Les changements de la circulation de Hadley (intensité et en extension) sont principalement donnés par les changements de gradients méridiens de SST,
- Les variations longitudinales des SSTs ont un impact faible sur les structures méridiennes (circulation de Hadley, ITCZ).

• **Des simulations aqua-planètes ont alors été utilisées pour expliquer l'influence des gradients méridiens de SST:**

- Les gradients méridiens de SST changent l' «Énergie massique efficace » (ESE) du transport d'énergie ⇒ circulation de Hadley change,
- Les modèles conceptuels simples ne donnent pas une bonne position pour les limites des cellules et leurs déplacements.

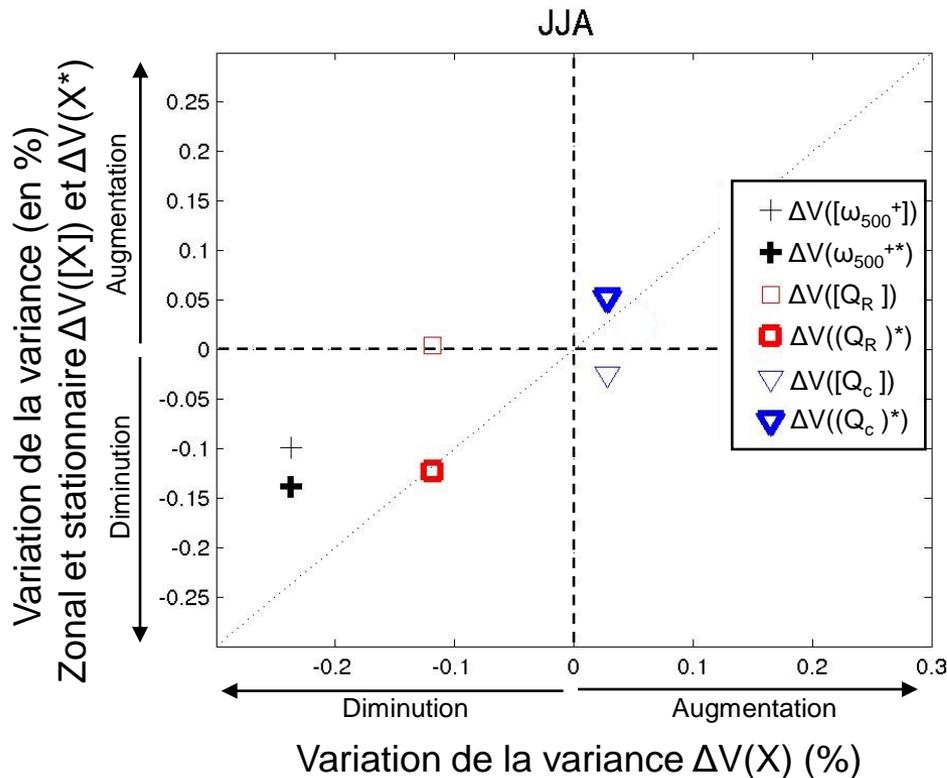
Perspectives

- Comprendre les biais des modèles couplés en terme de circulation de Hadley ⇒ Quel processus physique est à l'origine des biais de la circulation de Hadley. Nuages? Convection?
- Relier les changements de circulation tropicale aux changements du cycle hydrologique ⇒ analyse des transports d'eau dans les régions de mousson (campagne AMMA).
- Expliquer plus en profondeur les déplacements vers les pôles des cellules de Hadley, des jets ou de la course des tempêtes ⇒ trouver une théorie.
- L'extension vers les pôles de la cellule de Hadley permet de définir des régions sensibles. Impact sur climat régional? Exemple : la Méditerranée (270 M habitants).
- Relier les changements de circulation de grande échelle aux changements d'humidité relative (chapitre 4).
- Utiliser des simulations aqua-planètes pour diagnostiquer les paramétrisations dans les GCMs.

FIN

Merci de votre attention

Structure spatiale des changements atmosphériques



Modèle IPSL-CM4

On décompose une variable X suivant:

$$X = [X] + X^*$$

$$\Delta X \approx \underbrace{2\Delta V(X)}_{\text{Totale}} = 2(\underbrace{\Delta V([X])}_{\text{Méridienne}} + \underbrace{\Delta V(X^*)}_{\text{Stationnaire/Tourbillonnaire}})$$

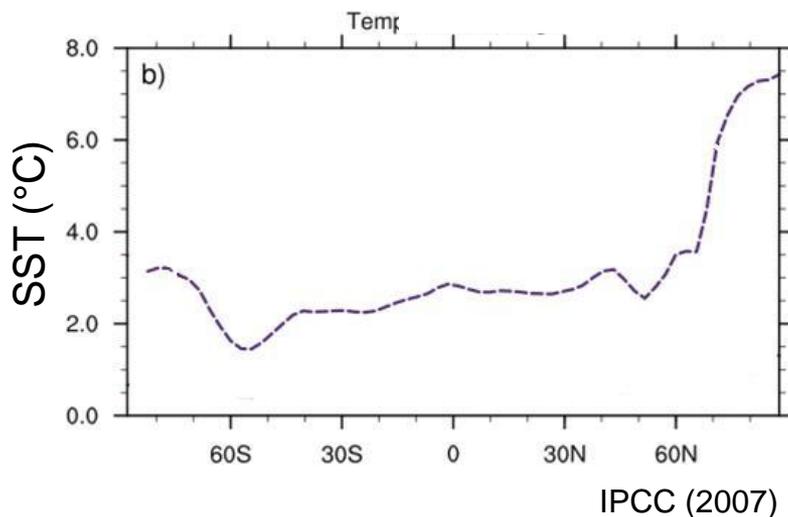
Équation thermodynamique:

$$-\omega S_p = Q_c - Q_r$$

⇒ Les changements radiatifs sont plus longitudinaux, ce qui diminue plus les circulations longitudinales (Walker) que méridiennes (Hadley).

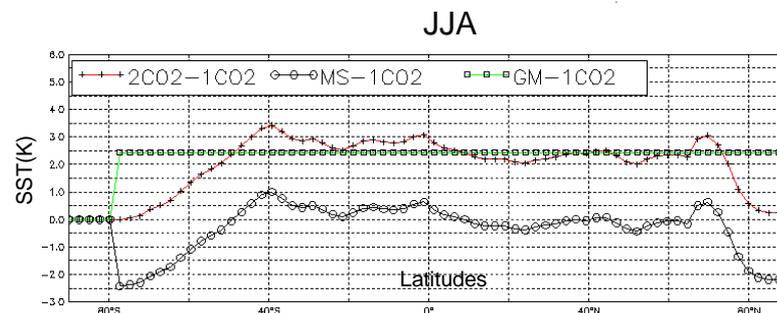
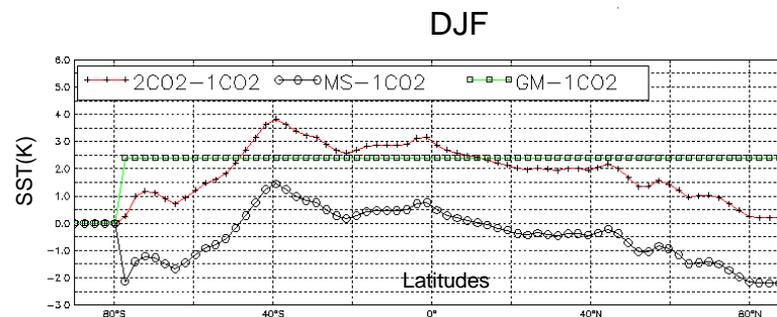
Changement des gradients de SST dans les modèles couplé de l'AR4

Changement SST moyenne multi-modèle AR4 (A2)



Les changements de gradients méridiens de IPSL-CM4 sont opposés à la moyenne multi-modèle.

Changement SST IPSL-CM4 simulation CMIP3 stabilisé

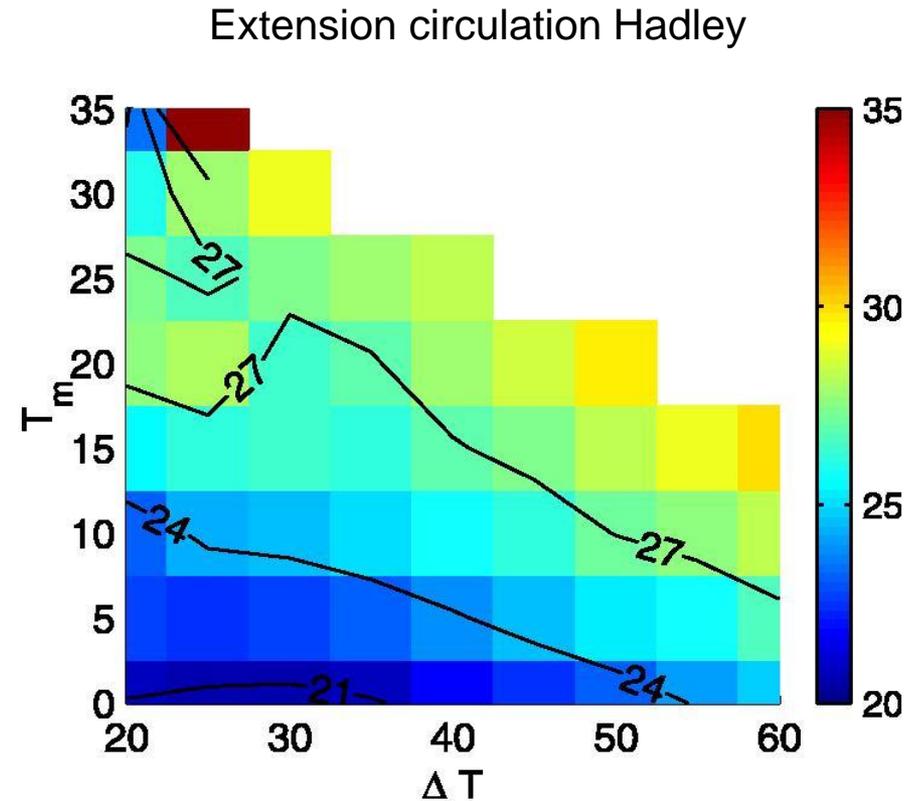


Limite de la circulation de Hadley dans les simulations aqua-planètes

- GCM Aquaplanète avec pour forçage:

$$T(\varphi) = T_m - \Delta T(3 \sin^2 \varphi - 1) / 3$$

- Si $T_m \uparrow \Rightarrow \lambda_{S(N)} \uparrow$,
- Si $\Delta T \uparrow \Rightarrow \lambda_{S(N)} \uparrow$.



Frierson (2007) in GRL

Tendance dans les précipitation tropicales

Modèles:

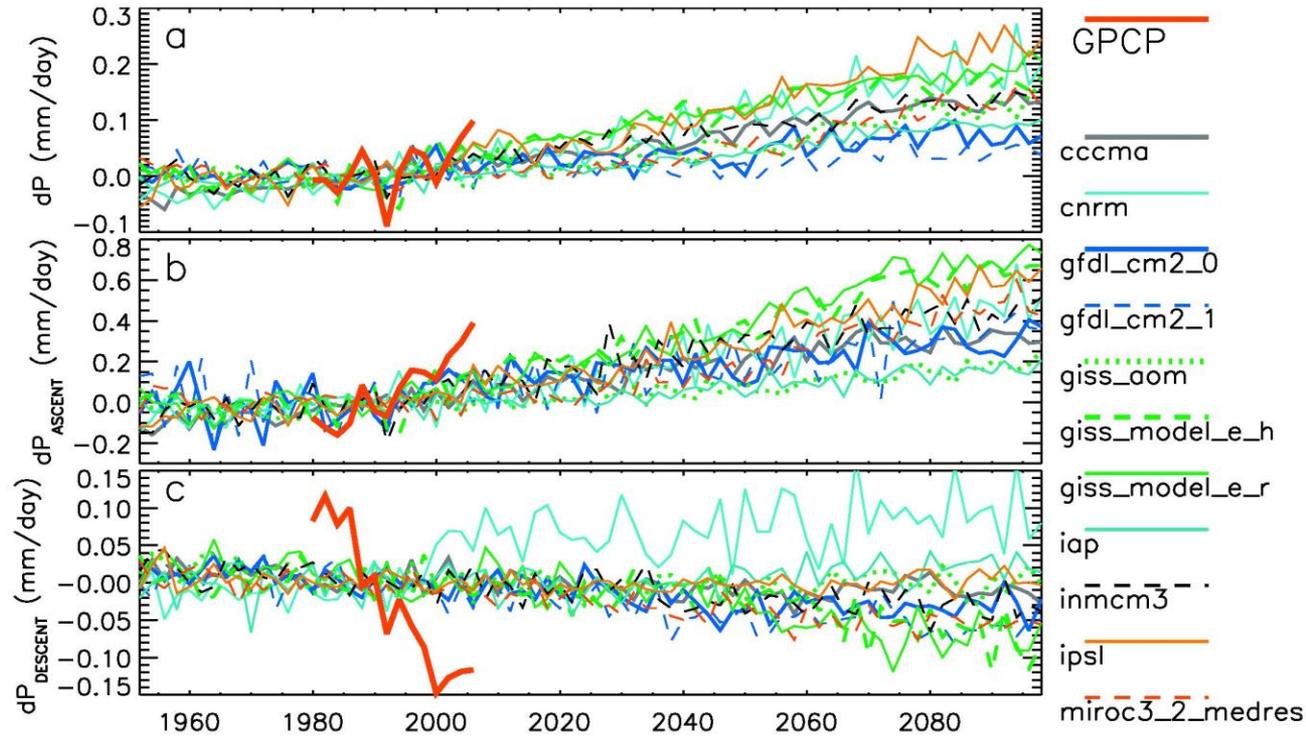
- $q \uparrow$ de 7%/K (relation CC)
- Precip \uparrow de 1-3%/K

Observation Precip. : (GPCP/CMAP/SSMI)

- $q \uparrow$ de 7%/K
- $P \uparrow$ de 7%/K

Explications:

- calibration/algo.
- Satellites faux
- refroidissement rad.
- des modèles
- (nuage/aérosol)



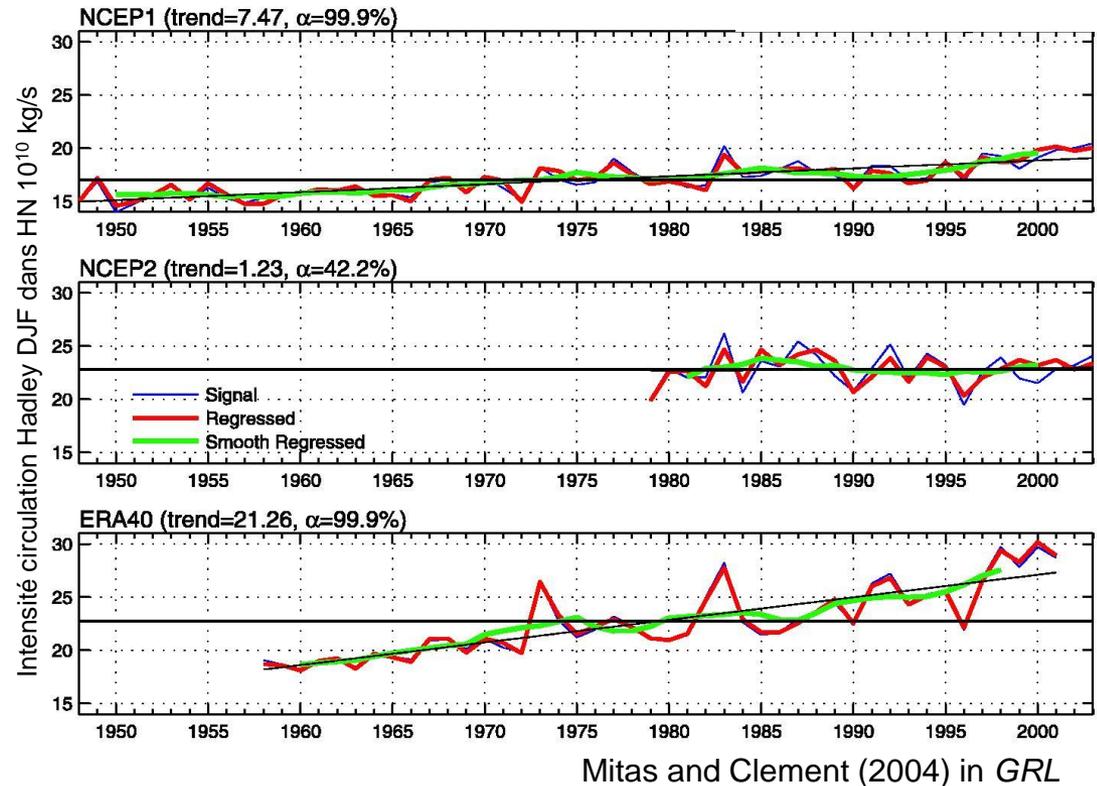
Allan (2007) in *GRL*

Variations récentes de l'intensité des cellules de Hadley

Variations interannuelles liées à ENSO.

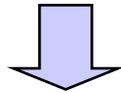
Sur la période récente:

- Intensification de la circulation de Hadley dans les jeux de réanalyse.
- l'intensification ne semble pas liée à ENSO.

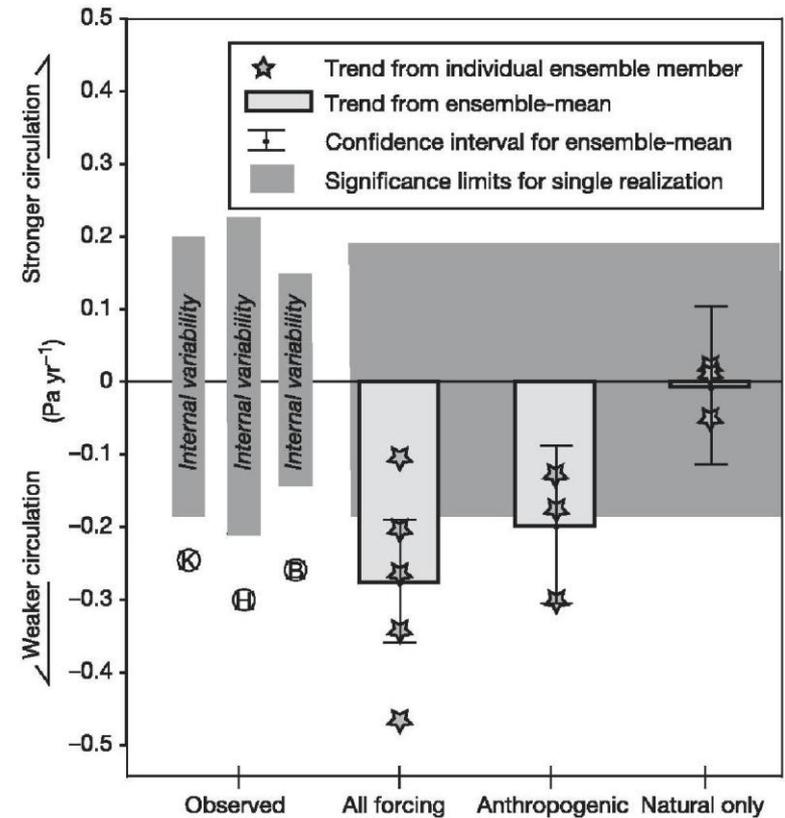


Variations récentes de la circulation de Walker

- On observe : $SLP \propto$ Intensité Walker



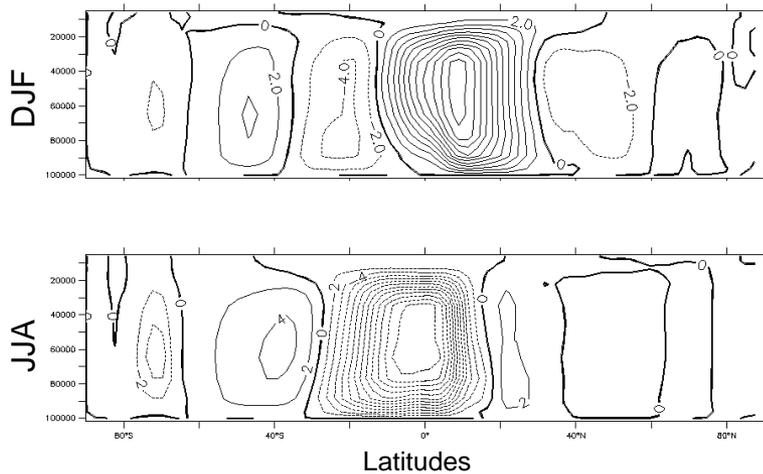
Affaiblissement de la circulation de Walker



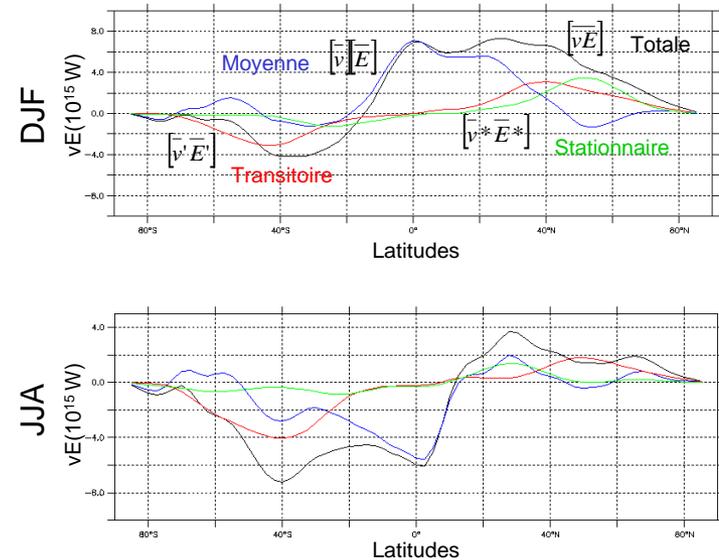
Vecchi et al. (2006), in *Nature*

Circulation de Hadley et transport d'énergie

Fonction de courant méridienne (10^{10} kg/s) - ERA40



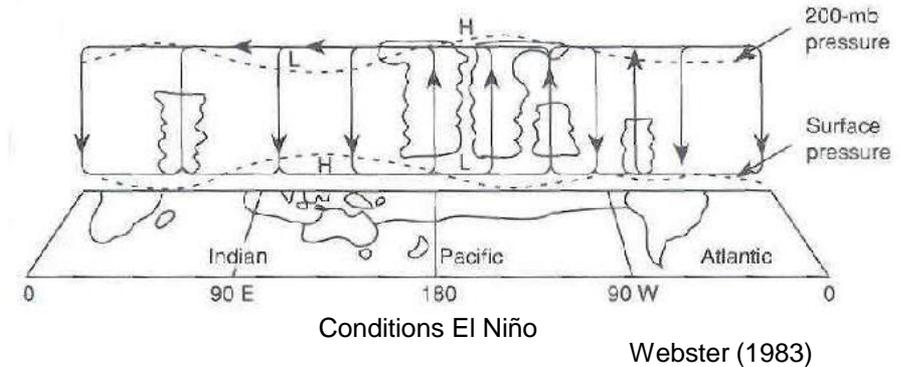
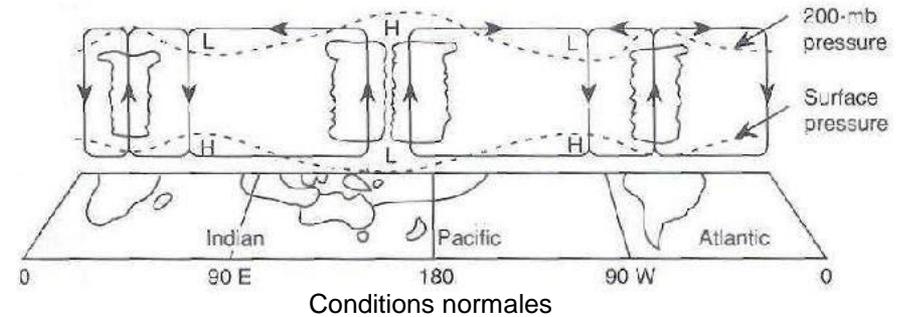
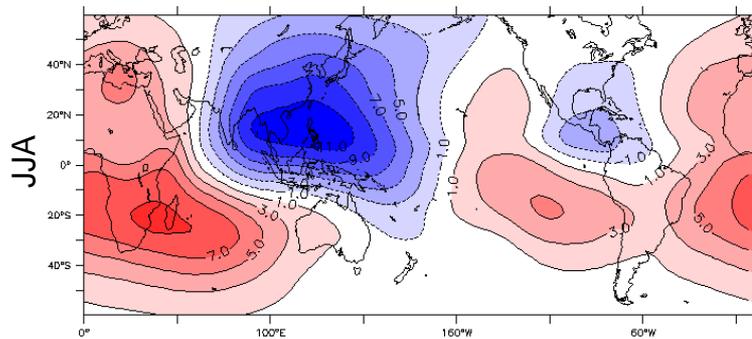
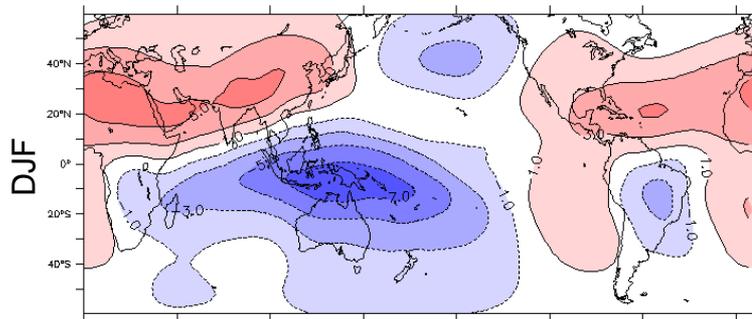
Transport de E (J) NCEP2



- Dans les tropiques, la circulation moyenne de l'atmosphère est forte,
- Dans les moyennes latitudes les ondes baroclines transitoire et stationnaire sont actives.

Circulation de Walker et ses variations interannuelles

ERA40 φ_{200} : Velocity Potential 200hPa

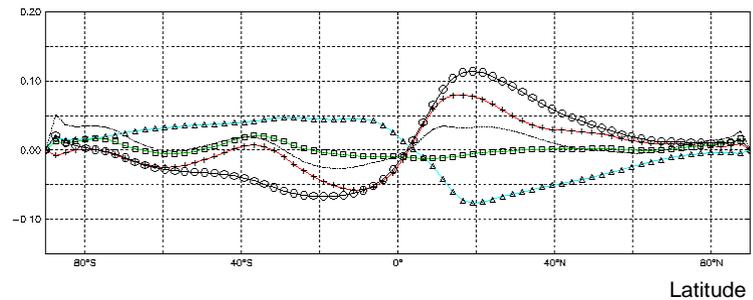
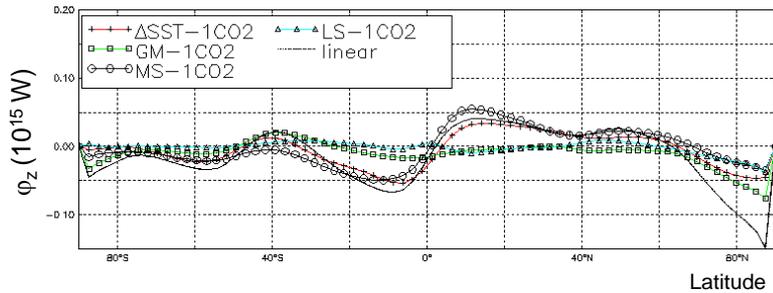
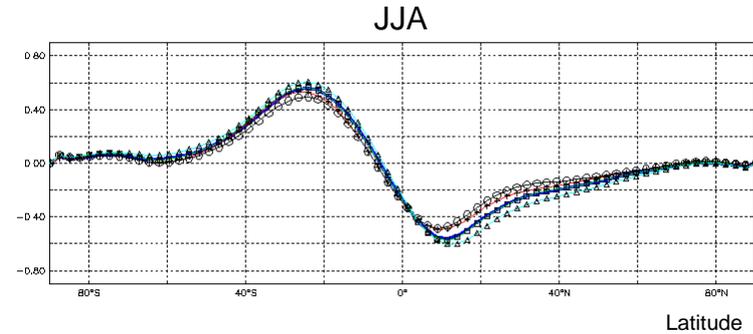
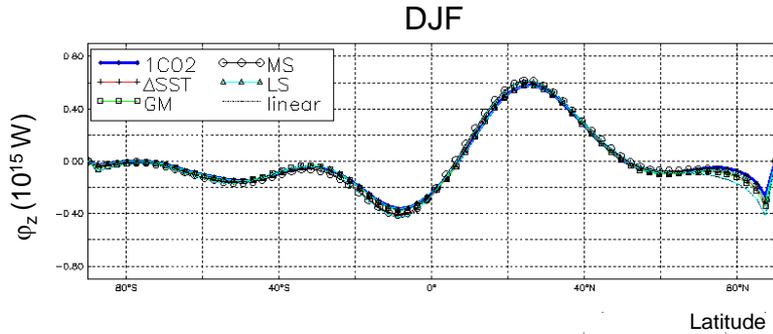


$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \nabla^2 \varphi$$

Le potentiel des vitesses mesure les divergences et convergence d'air.

- La circulation de grande échelle tropicale est constituée de plusieurs composantes : circulation de Hadley, circulation de Walker, circulation de mousson (Tanaka et al., 2004).

Variation des circulations de Hadley par l'étude du potentiel de vitesse



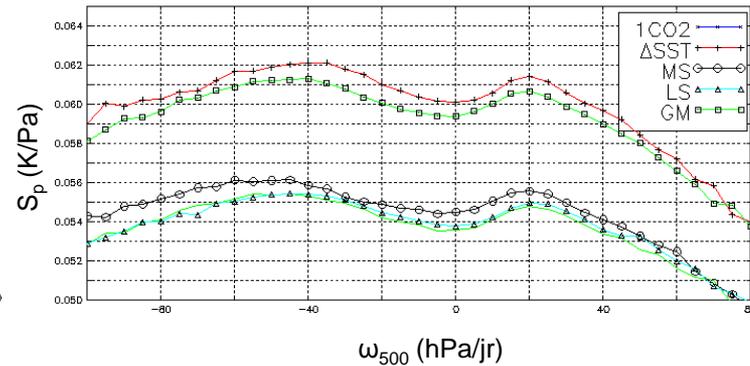
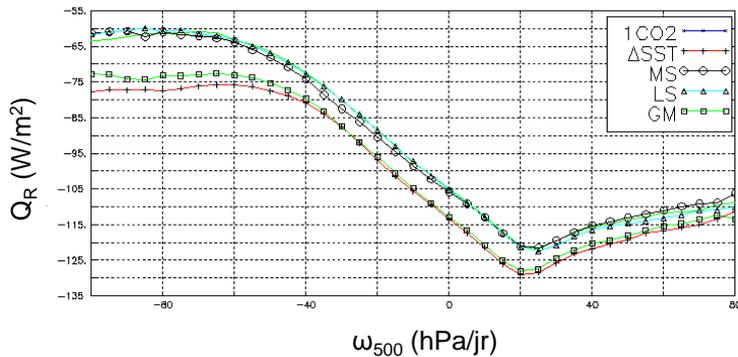
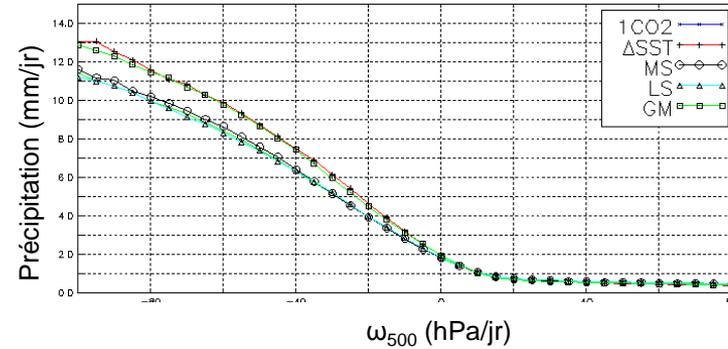
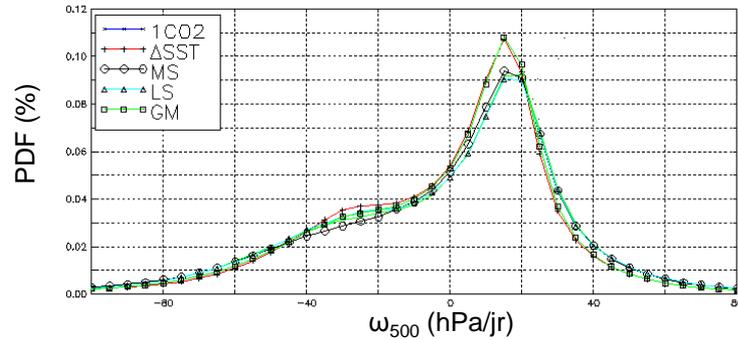
On étudie le potentiel de vitesse pondéré par z (Hourdin, 2006):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \nabla^2 \varphi \quad \varphi_z = \int_0^{p_s} z \varphi dp$$

Bilan:

On confirme les résultats précédents...

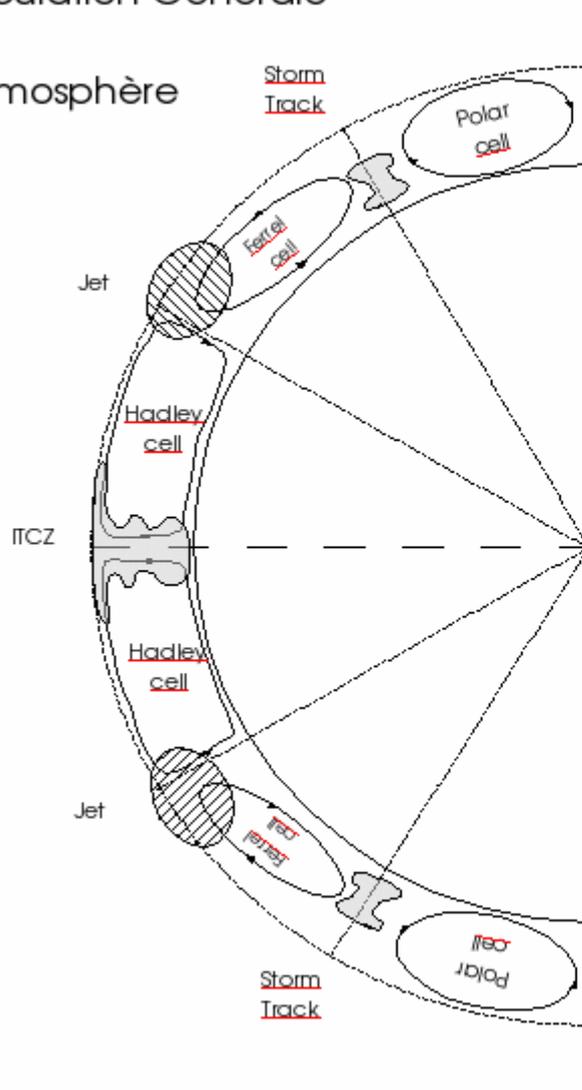
Décomposition en régimes dynamiques



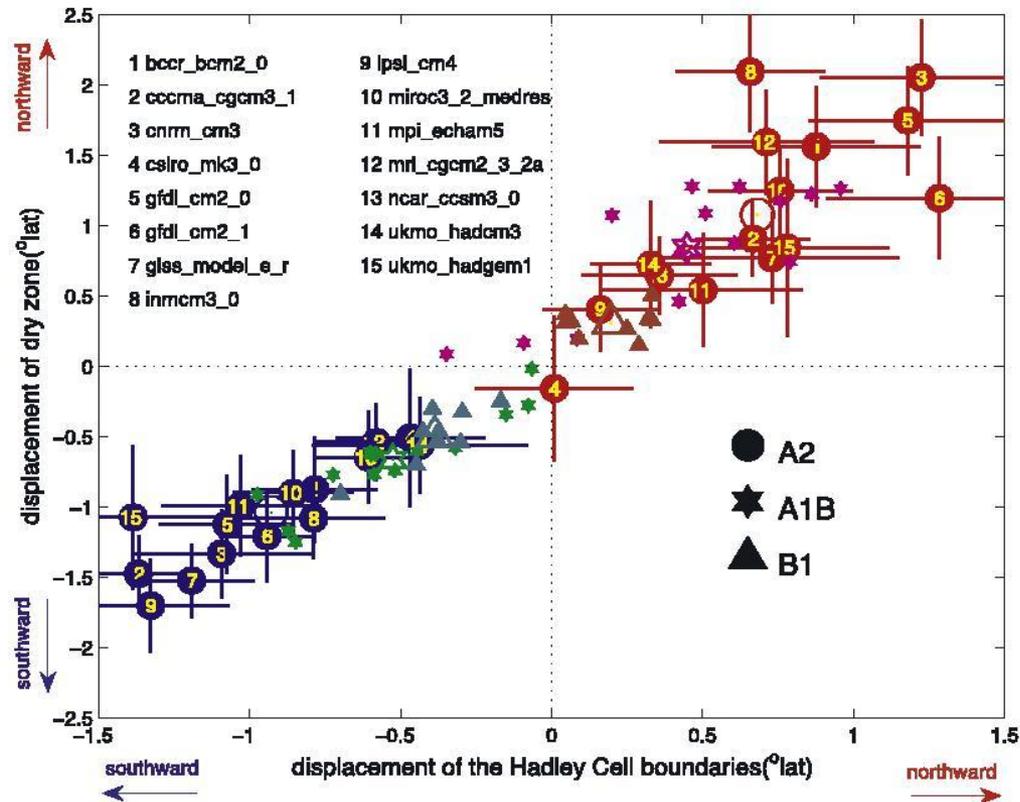
Équation thermodynamique:
$$\omega = \frac{Q_R - Q_C}{S_p}$$

Les changements de stabilité statique S_p causés par les changements globaux de SST (dans GM), sont les changements prépondérants.

Circulation Générale
de
l'atmosphère

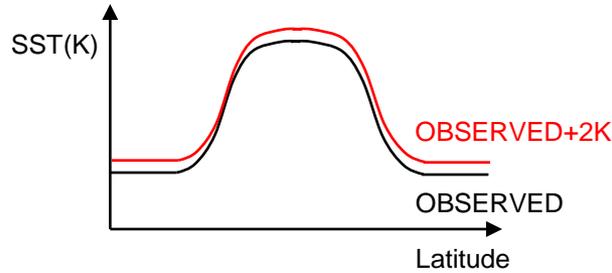


Le déplacement des cellules de Hadley

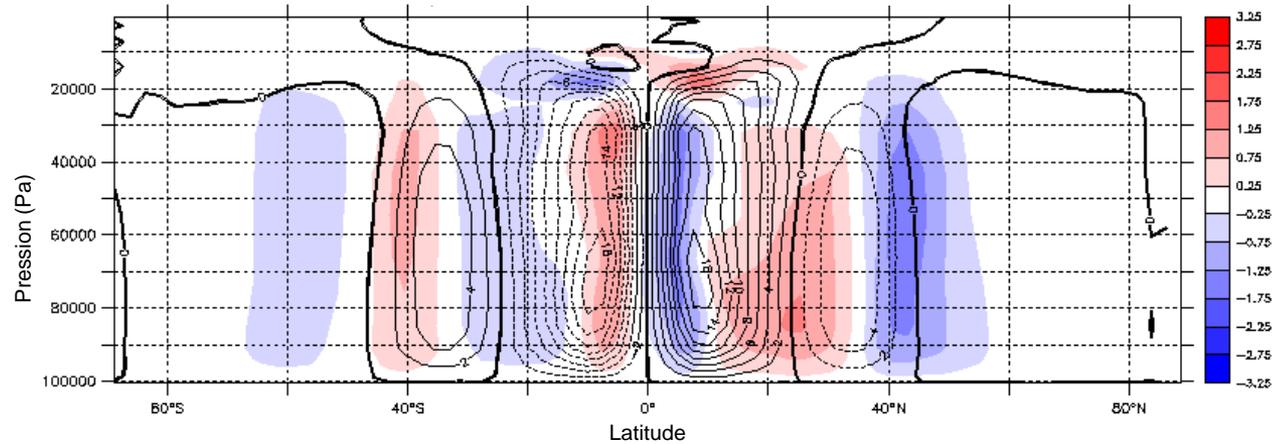


Lu et al. (2007) in *GRL*

Étude d'un réchauffement uniforme



Fonction de courant méridien ψ (10^{10} kg/s)



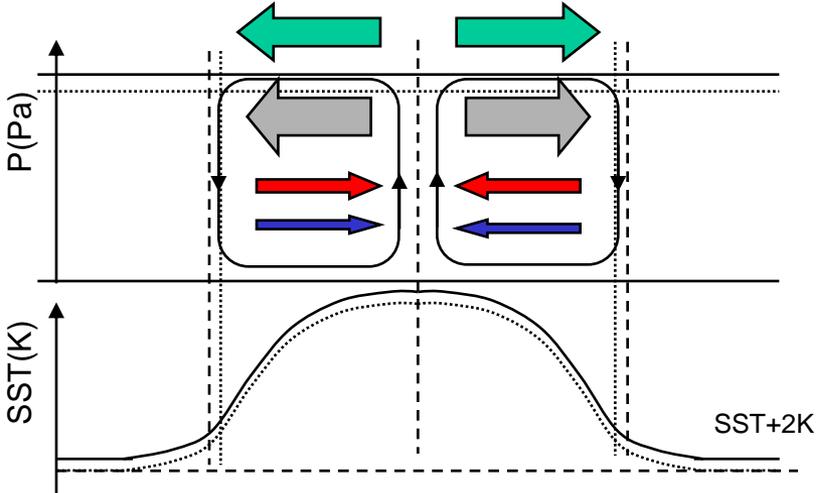
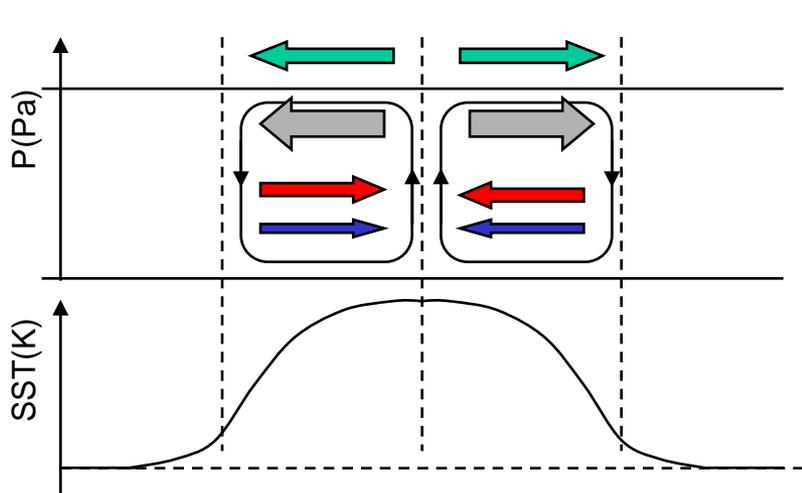
Expérience:

- OBSERVED (contour)
- OBSERVED+2K (couleurs)

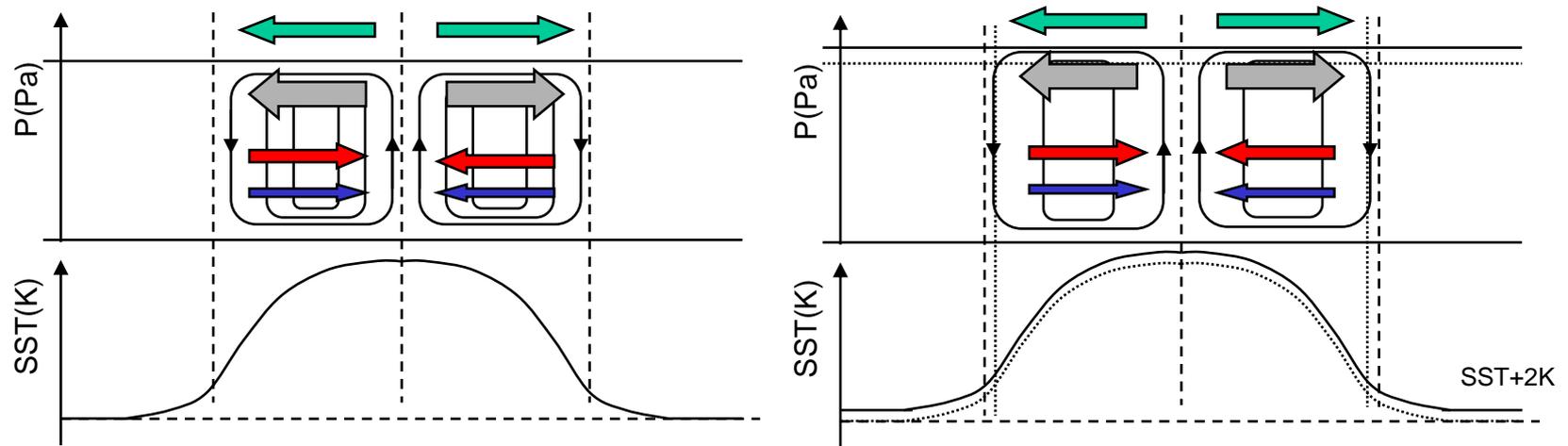
	Intensité ψ_{\max} 10^{10} kg/s	Extension $\lambda_{N(S)}$ en $^{\circ}$
OBSERVED	17.4	24.8
OBSERVED+2K	16.8	25.5

- Intensité circulation de Hadley ↓,
- Élargissement circulation de Hadley ↑.

BILAN (2/2)



BILAN (2/2)



- Lors d'une augmentation uniforme de SST:
 - la tropopause s'élève \Rightarrow $vgz \uparrow \Rightarrow$ la circulation de Hadley diminue,
 - la circulation de Hadley s'étend vers les pôles,