

Linéarisation d'un schéma de convection

pour le modèle GEM global



Jean-François Mahfouf

MRB/RPN

Merci à Stéphane Laroche, Ayrton Zadra, Luc Fillion, Monique Tanguay, Bernard Bilodeau, Claude Girard, Gérard Pellerin



Plan de l'exposé

- Considérations générales sur la physique linéarisée humide
- Description du schéma Kuo symétrique
- Evaluation du comportement non-linéaire
- Evaluation de l'approximation linéaire-tangente dans GEM et dans l'IFS
- Poursuite des développements



Rôle de la physique linéarisée (1)

- Versions linéaire-tangente (TL) et adjointe (AD) des modèles de prévision numérique utilisées pour :
 - L'assimilation variationnelle de données
 - Le calcul des vecteurs singuliers
 - Les études de sensibilité (key analysis errors)
- On ne peut pas se contenter des versions TL/AD *adiabatiques*
- Les processus dissipatifs (turbulence) doivent être introduits pour empêcher le développement de perturbations irréalistes près de la surface



Rôle de la physique linéarisée (2)

- Pourquoi s'intéresser à la linéarisation des processus humides ?
 - Pour améliorer l'analyse du champ d'humidité
 - Pour pouvoir assimiler des observations informatives sur les nuages et la pluie
- Rôle connu des processus humides sur la dynamique atmosphérique:
 - Aux latitudes moyennes: renforcement des systèmes dépressionnaires générés par instabilité barocline
 - Aux latitudes tropicales: ingrédient indispensable pour le développement des cyclones tropicaux (instabilités de type CISK)

Illustration : vecteurs singuliers extra-tropicaux humides (1)

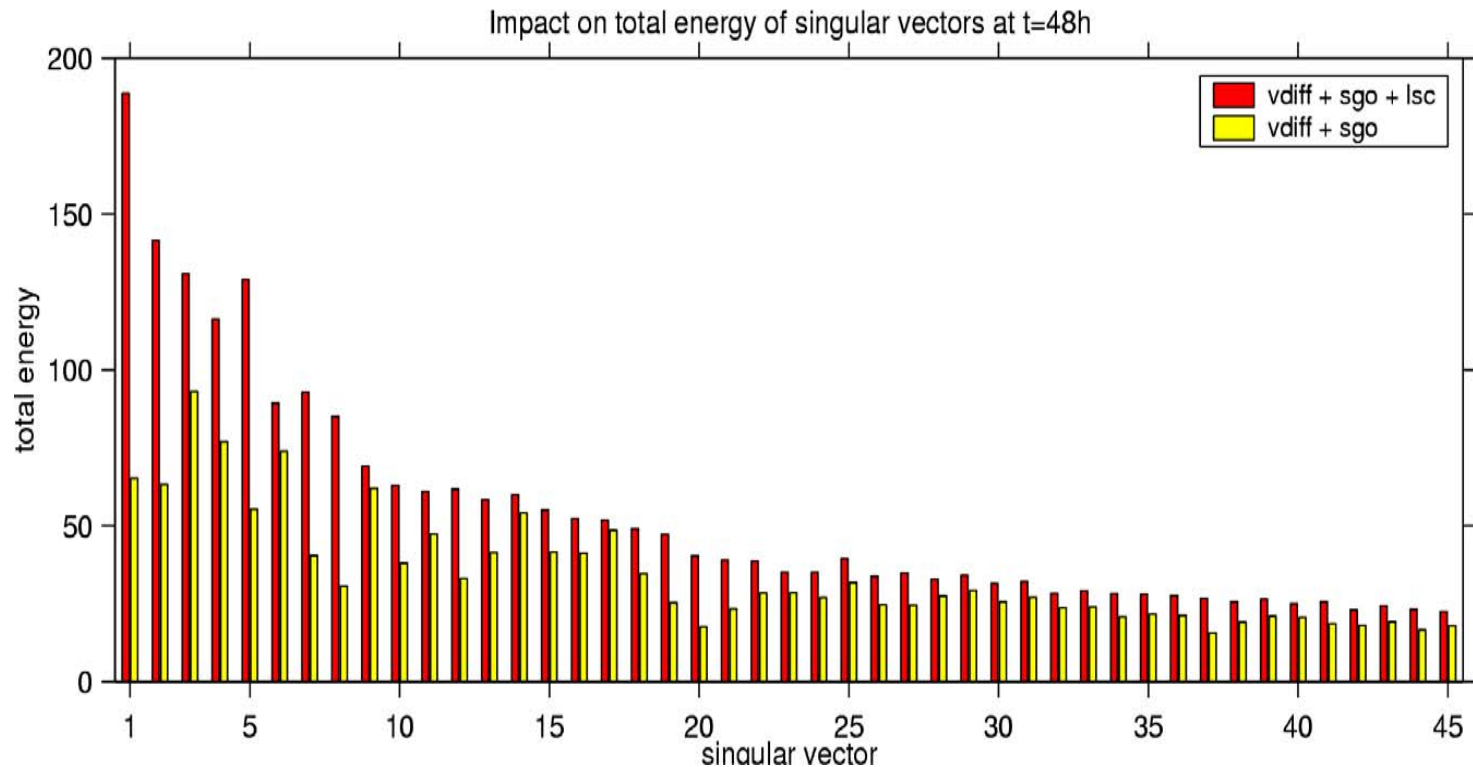
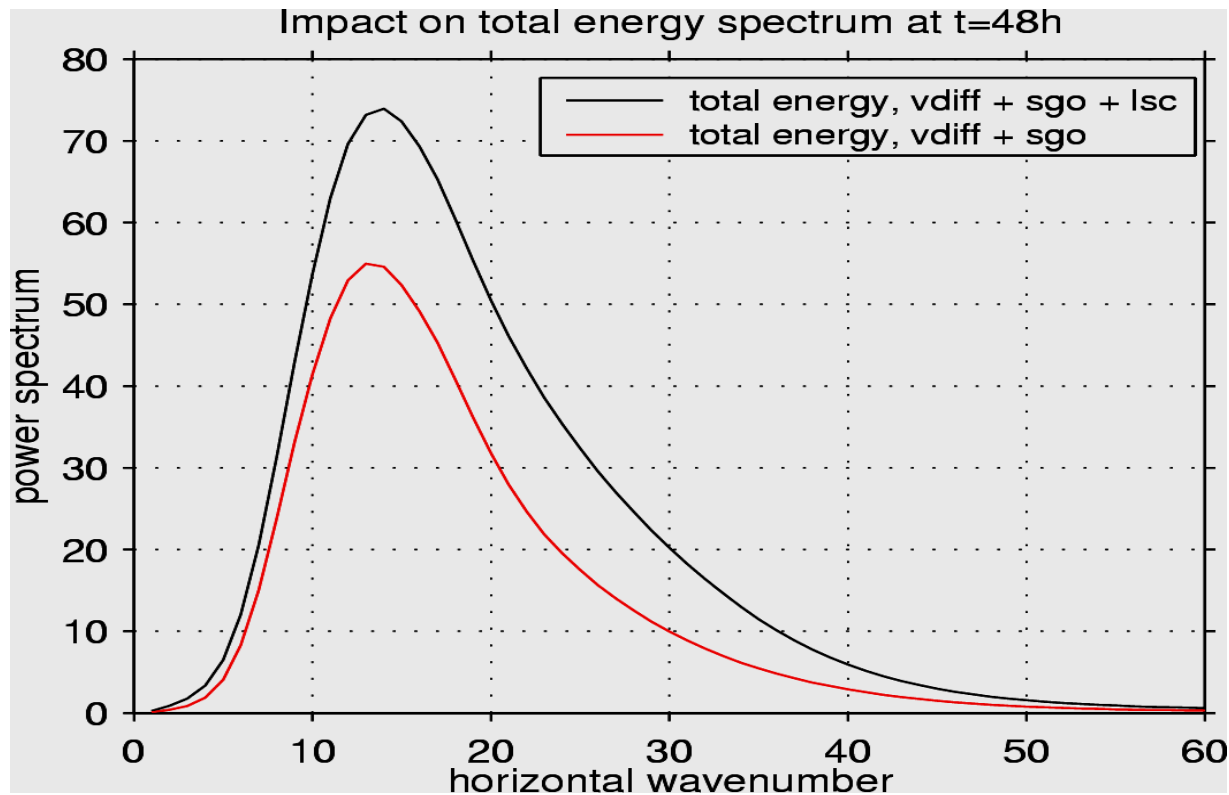
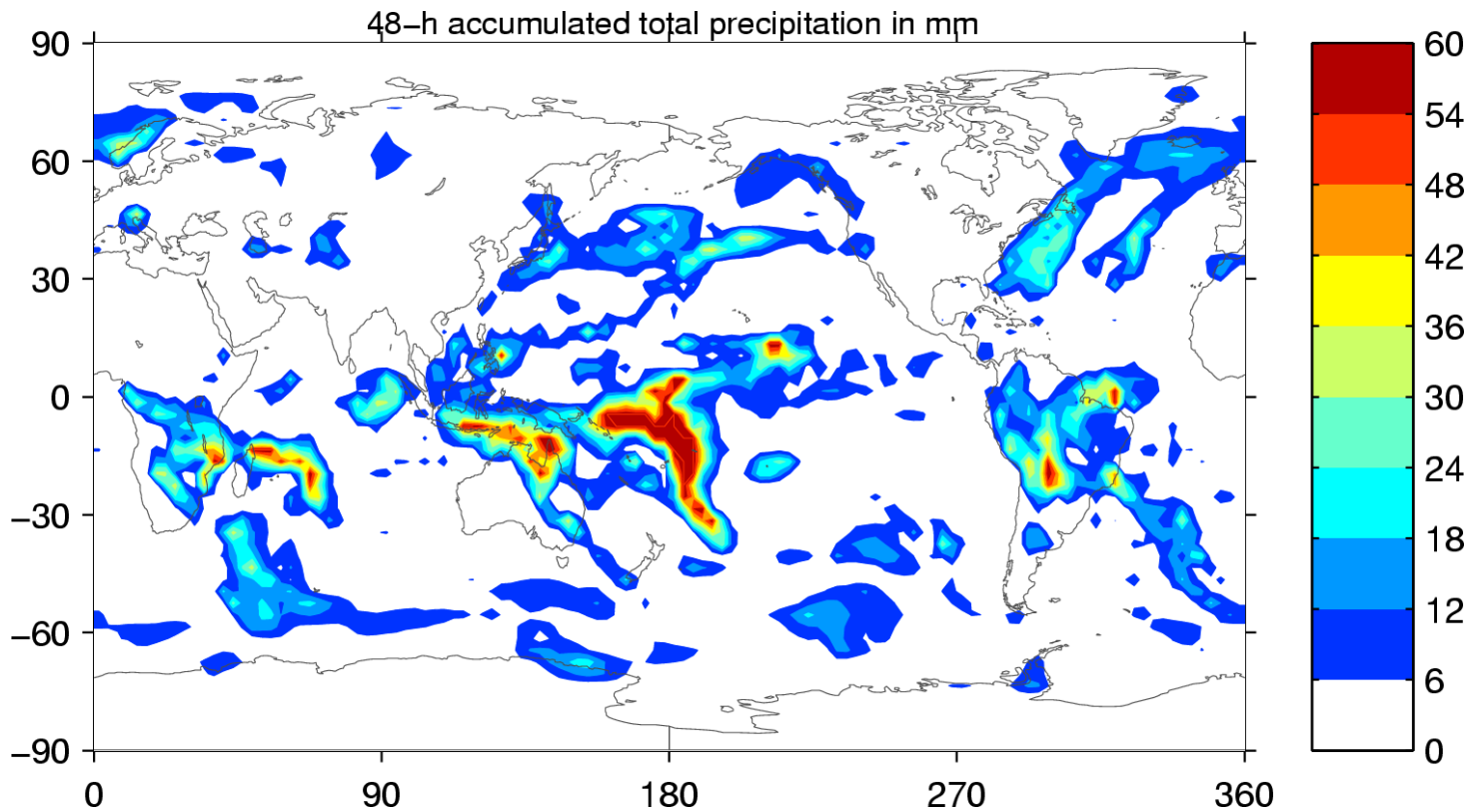


Illustration : vecteurs singuliers extra-tropicaux humides (2)

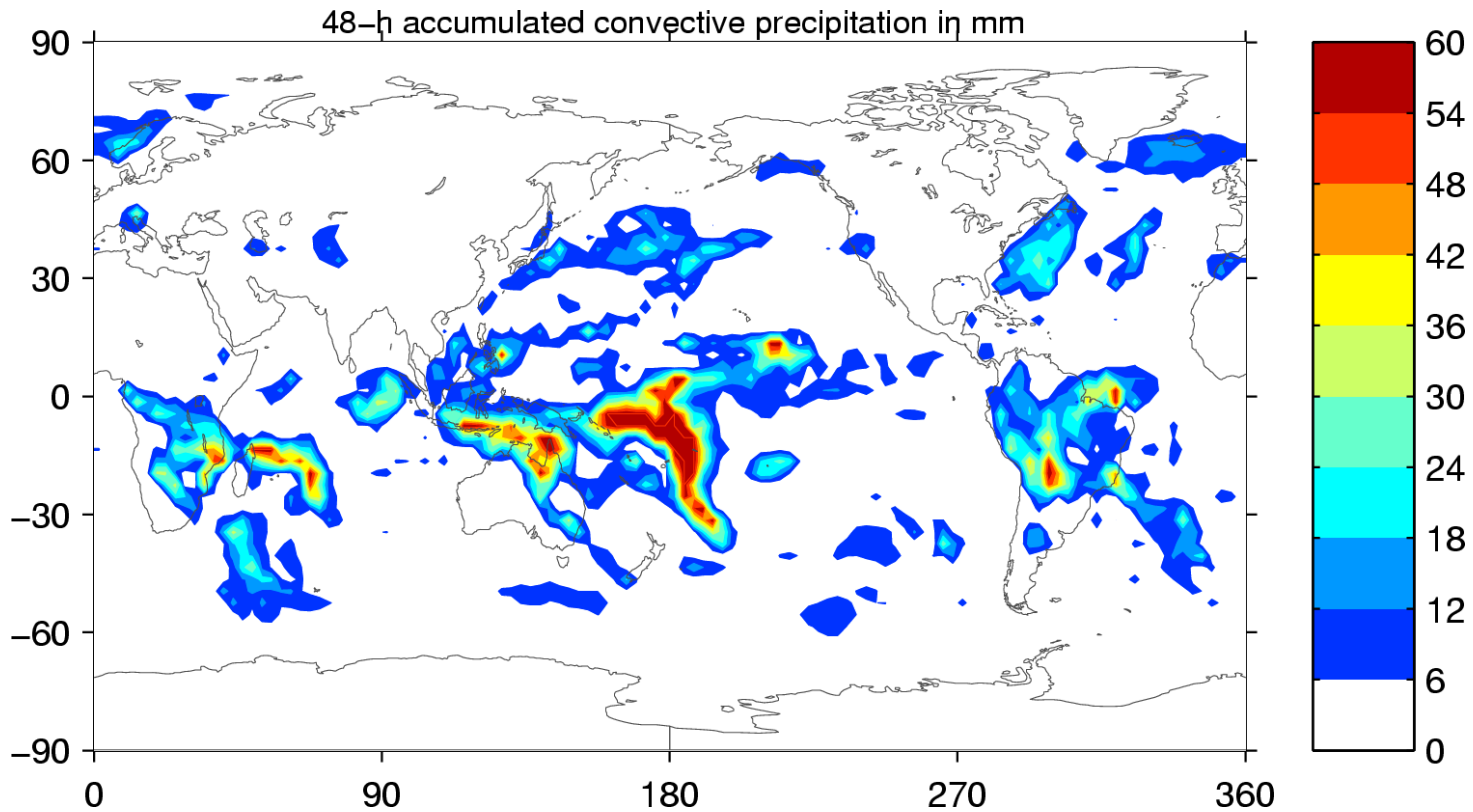


Importance de la convection



Précipitation **totale** (16/02/2002) cumul sur 48h

Importance de la convection



Précipitation **convective** (16/02/2002) cumul sur 48 h

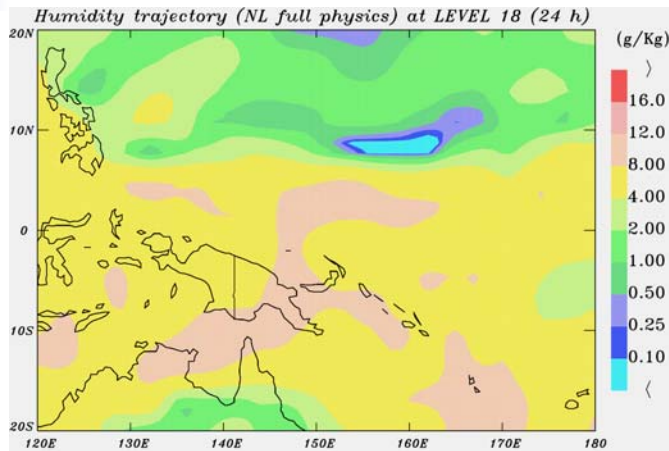


Contexte expérimental

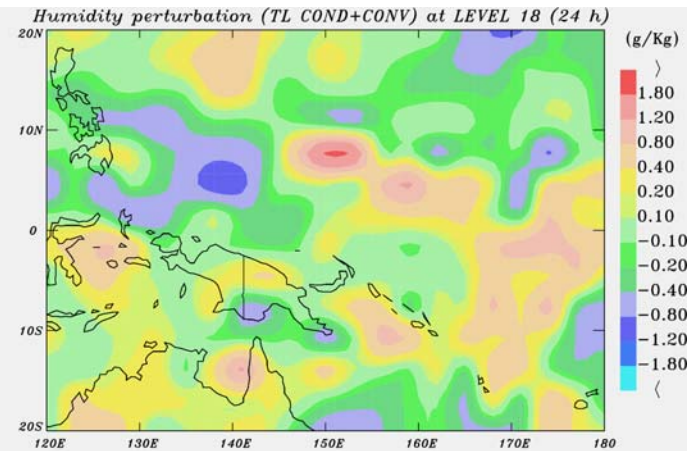
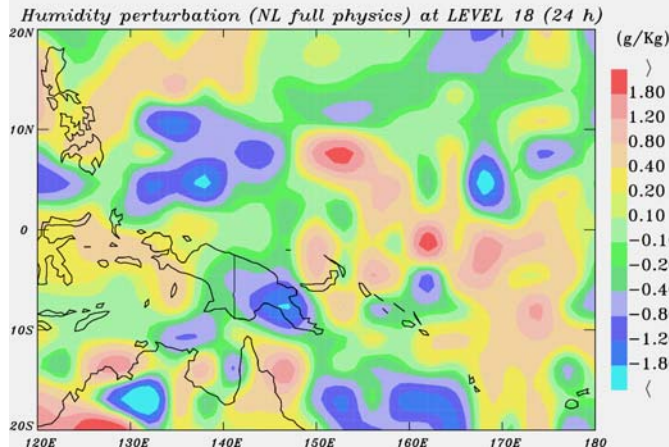
- Version GEM global (v_3.0.2)
- Résolution horizontale : 120 x 60
- Résolution verticale : 28 niveaux (jusqu'à 10 hPa)
- Pas de temps : 1 heure
- Evolution temporelle d'incréments d'analyse jusqu'à 24 heures (partant du 7 Février 2001 a 12 Z)

Propagation d'incréments d'humidité dans les tropiques

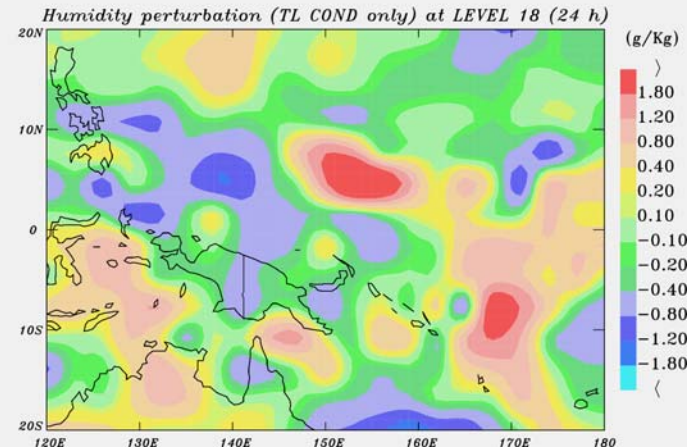
NL
traj



NL
pert

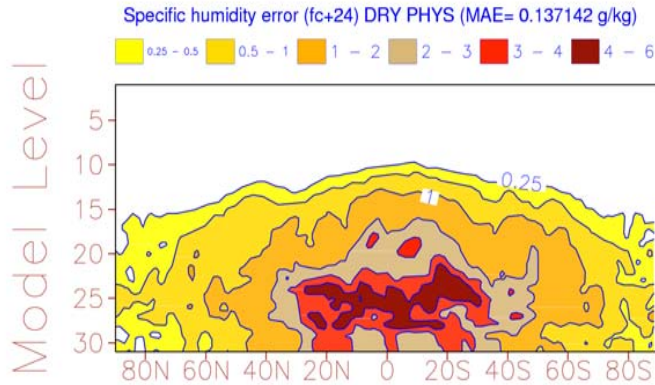


TL
avec
conv

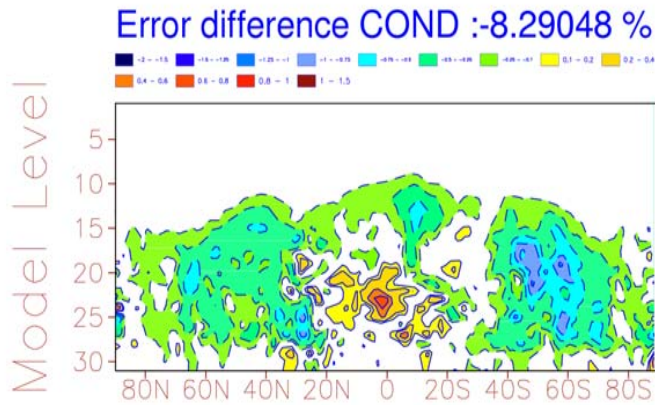


TL
sans
conv

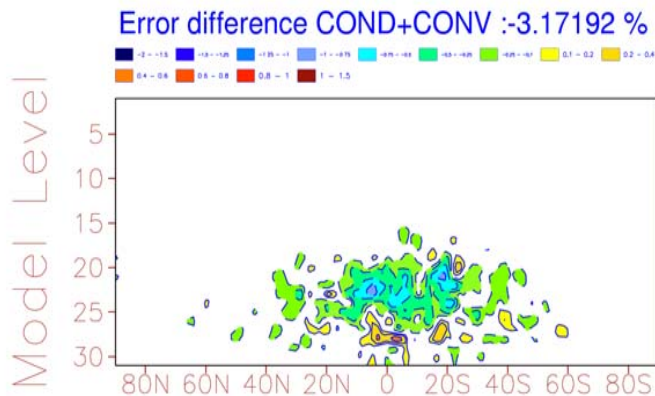
Erreur entre
 $NL(x+\delta x)-NL(x)$
et $TL_sec(\delta x)$
pour l'humidité
spécifique (24h)

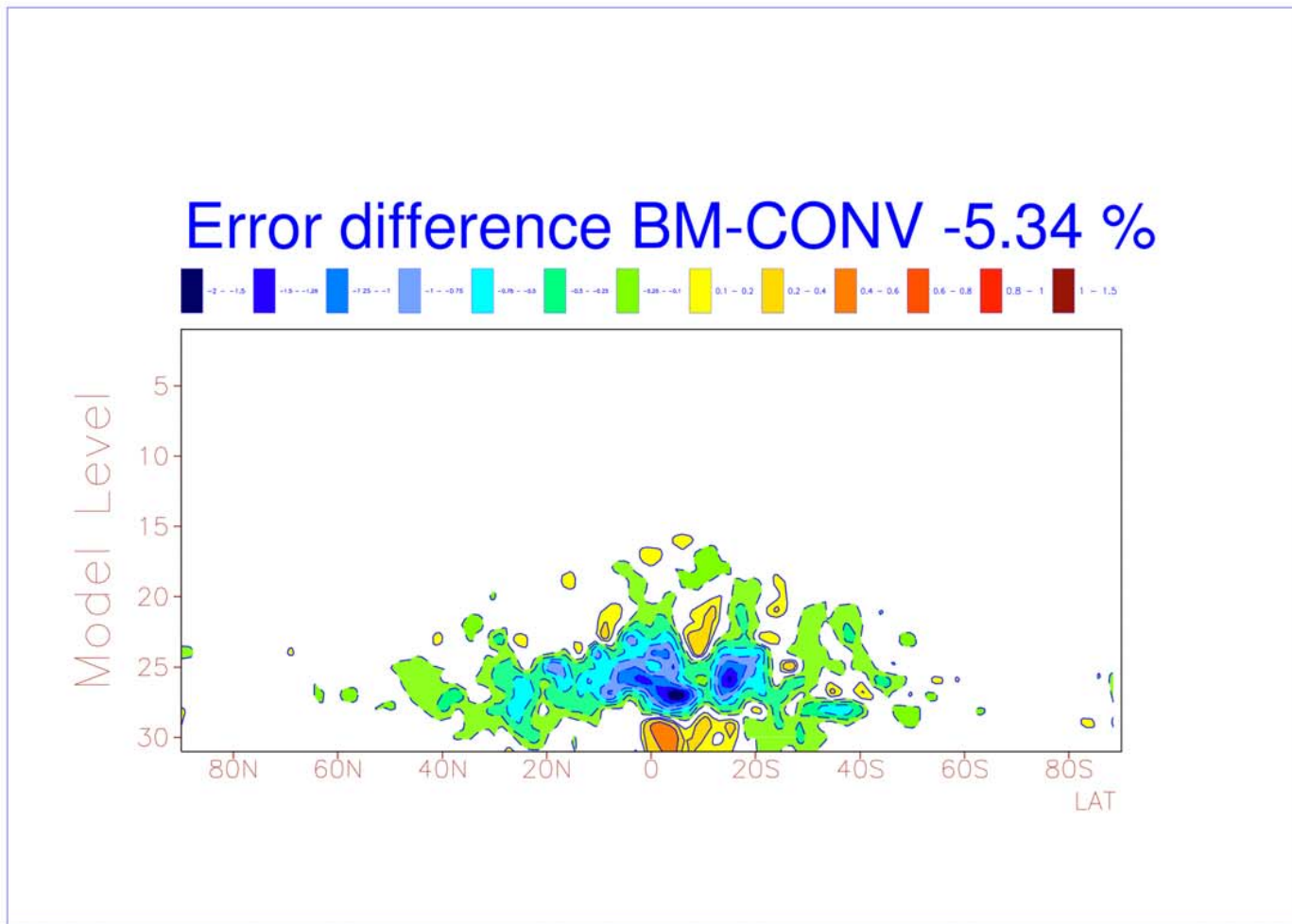


Réduction d'erreur
quand TL inclus
COND



Réduction
(additionnelle)
d'erreur
quand TL inclus
COND + CONV





Cohérence des paramétrages entre les modèles NL et TL/AD

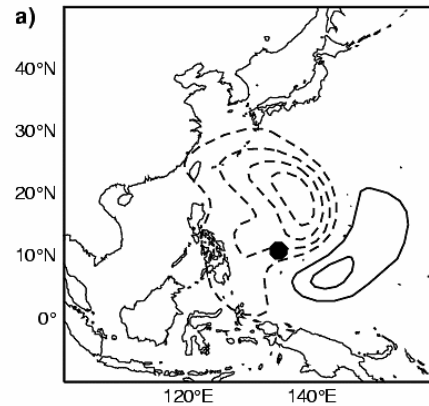
NL = schéma flux de masse - TL = schéma Betts-Miller

Illustration : vecteurs singuliers tropicaux humides

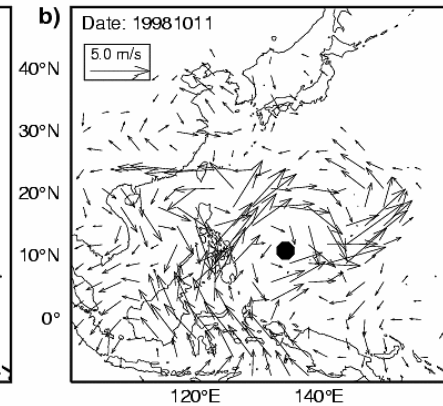
VS
avec convection



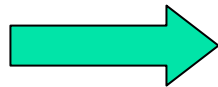
Tropical SV 1, Full physics Date: 981011



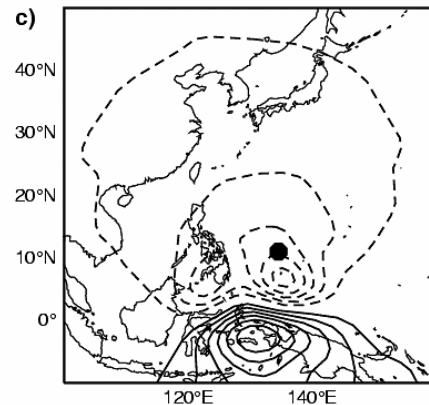
w500 Perturbation, Full physics,



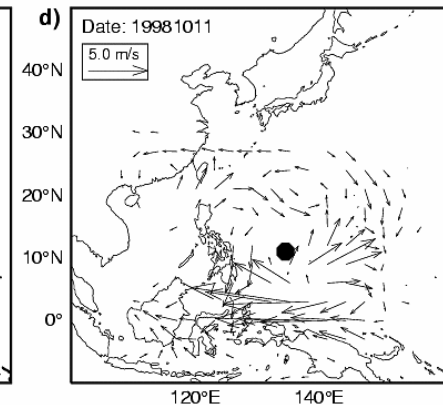
VS
sans convection



Tropical SV 1, Simplified physics, Date: 981011



w500 Perturbation, Simplified physics,





Complexité d'un schema de convection linéarisé

- Nombreux schémas linéarisés depuis 10 ans:
 - Schémas de type Kuo
 - Schémas d'ajustement : Betts-Miller
 - Schémas flux de masse : RAS, Tiedtke, Bougeault, Kain & Fritsch
- Besoin de simplifications dans le 4D-Var :
 - Coût numérique + instabilités (perturbations flux de masse négligées)
 - Limitations de la validation de l'approximation TL : seuils de déclenchement (L. Fillion, communication personnelle)
- Besoin de réalisme physique pour assimiler des radiances en zones nuageuses et précipitantes :
 - opérateur d'observation = transfert radiatif sensible aux hydrométéores



Linéarisation d'un schéma de convection simple

- Choix :
 - Kuo symétrique (C. Girard)
- Justifications
 - Schéma de convection dans le modèle GEM global : Kuo
 - TL version du schéma Kain-Fritsch disponible mais coûteuse et la validité de l'approximation TL est limitée (Fillion & Belair, 2003) + schéma adapté à des résolutions horizontales < 100 km
 - Résolution actuelle de la boucle interne du 4D-Var: 150 km
 - Simplifications de la linéarisation qui pourraient être adaptées à n'importe quel schéma de convection
 - Kuo symétrique possède d'importantes analogies avec le schéma flux de masse de Bougeault
 - Simple et peu coûteux mais contient les ingrédients physiques de base utilisés pour décrire la convection humide dans les modèles de grande échelle (fonction de déclenchement, propriétés nuageuses déduites d'une adiabatique humide)



Tendances convectives (1)

- Schéma de type Kuo (Kuo, 1965)

$$Q_1 - Q_R = \frac{1}{C_p} \times K (s_c - s)$$
$$Q_2 = \left[- \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{LS} + K (q_c - q) \right]$$

- Schéma flux de masse (Bougeault, 1985)

$$Q_1 - Q_R = \frac{1}{C_p} \left[\omega^* \frac{\partial s}{\partial p} + K (s_c - s) \right]$$
$$Q_2 = \left[\omega^* \frac{\partial q}{\partial p} + K (q_c - q) \right]$$



Tendances convectives (2)

- Schéma Kuo symétrique

$$Q_1 - Q_R = \frac{1}{C_P} \left[- \left(\frac{\partial s}{\partial t} \right)_{LS} + K (s_c - s) \right]$$
$$Q_2 = \left[- \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{LS} + K (q_c - q) \right]$$

- K est déduit de la conservation de l'énergie statique humide dans la colonne convective



Validation préliminaire

- Evaluation pour divers régimes convectifs (profils ECMWF utilisés par Fillion & Mahfouf, 2003)
- Réponse réaliste en régime de convection profonde: assèchement de l'atmosphère (précipitation) et stabilisation thermique des profils
- Convection restreinte traitée de la même manière au lieu de déstabiliser le sommet de la couche limite nuageuse et transporter l'humidité à travers l'inversion

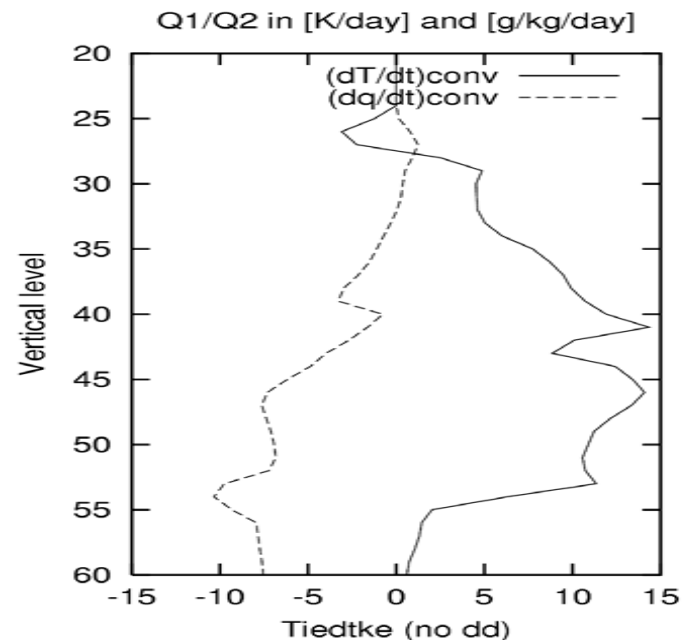
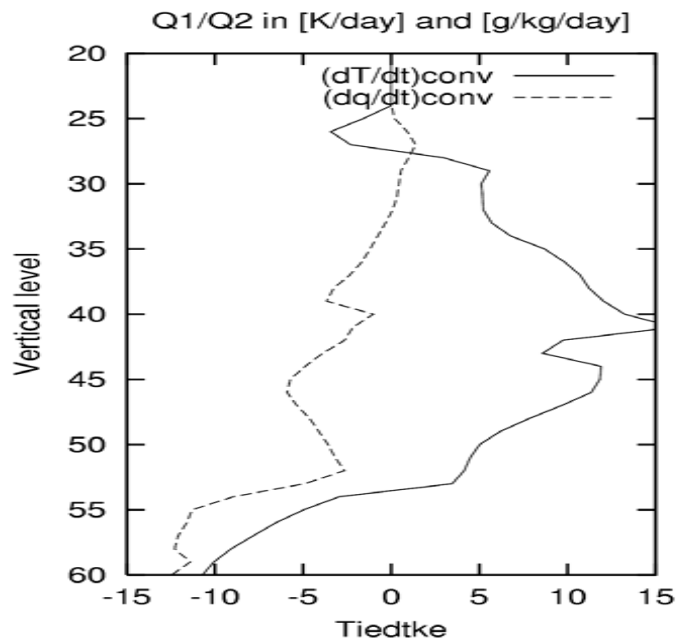
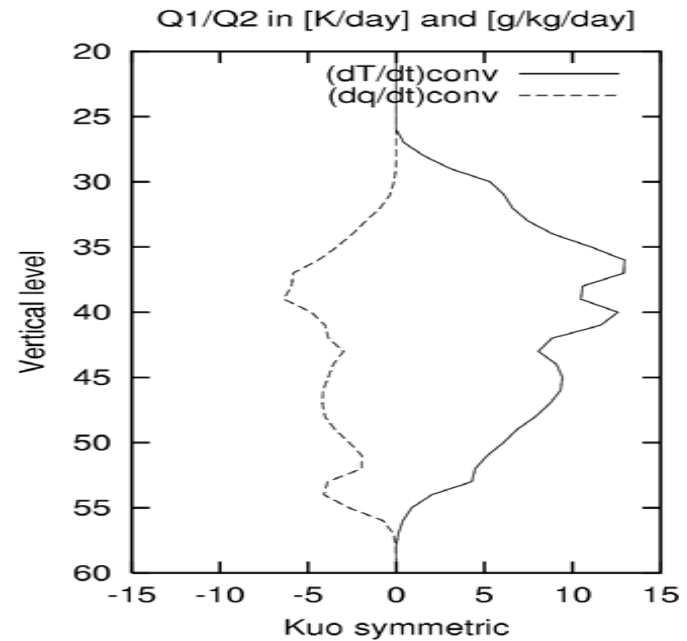
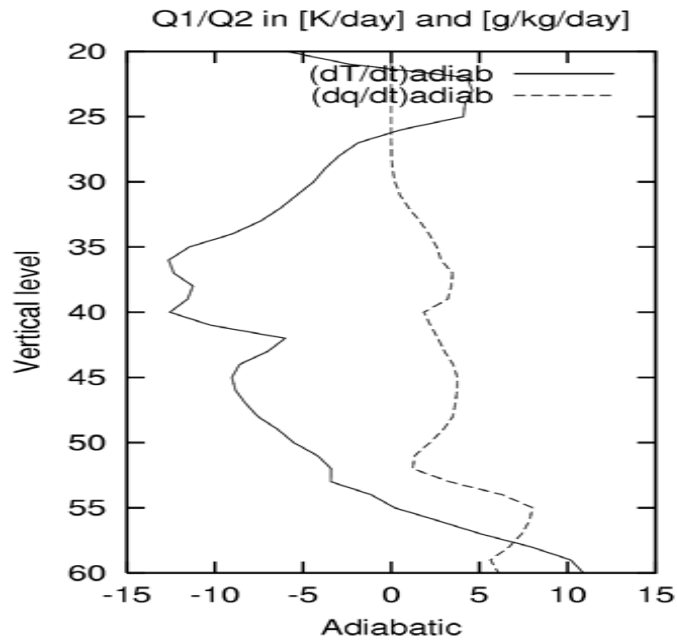
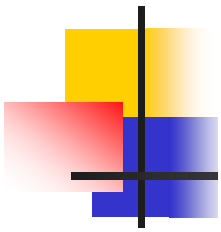




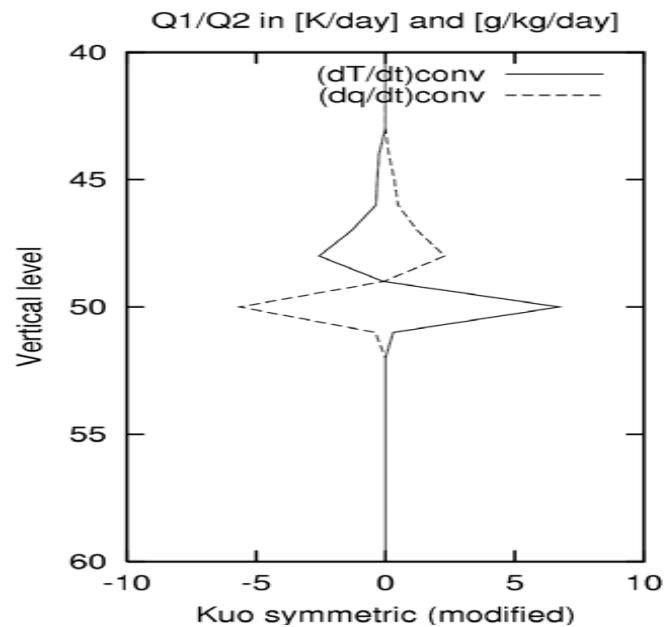
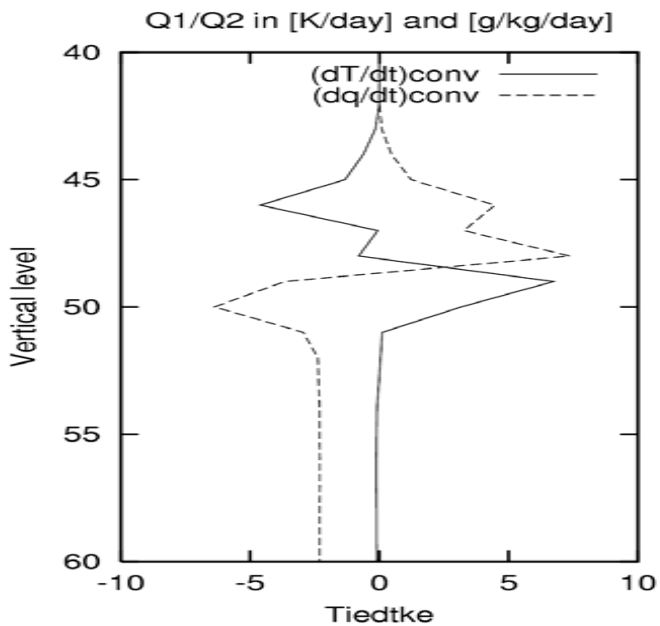
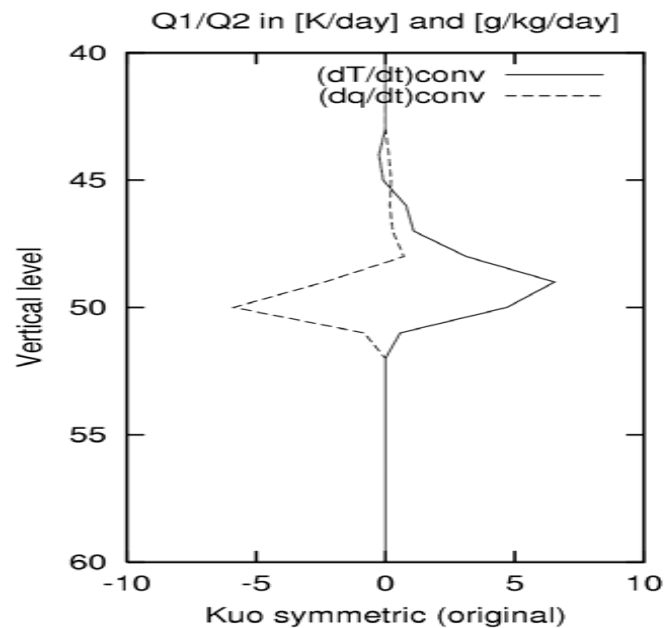
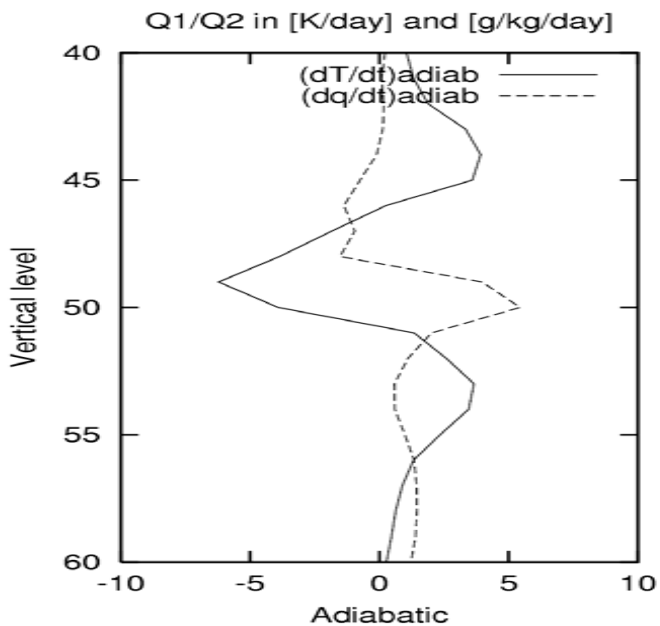
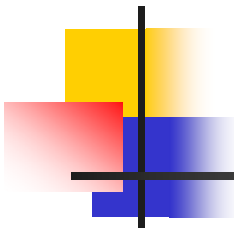
Schéma de convection restreinte simplifié

- Empêche la génération de précipitation quand l'épaisseur du nuage est inférieure à 200 hPa
- Tendance d'humidité (K_q déduit de la conservation de l'humidité)

$$Q_2 = \left[- \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{LS} + K_q (q_c - q) \right] \quad K_q = \frac{\int_{p_b}^{p_t} \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{LS} dp}{\int_{p_b}^{p_t} (q_c - q) dp}$$

- Taux de réchauffement (contribution locale aux processus de condensation/évaporation – pour éviter de définir K_T)

$$Q_1 = -0.5 \times Q_2$$





Schémas linéarisés

Schéma
complet

$$Q'_1 - Q'_R = \frac{1}{C_P} \left[- \left(\frac{\partial s'}{\partial t} \right)_{LS} + K'(s_c - s) + K(s'_c - s') \right]$$

$$Q'_2 = \left[- \left(\frac{\partial q'}{\partial t} \right)_{LS} + K'(q_c - q) + K(q'_c - q') \right]$$

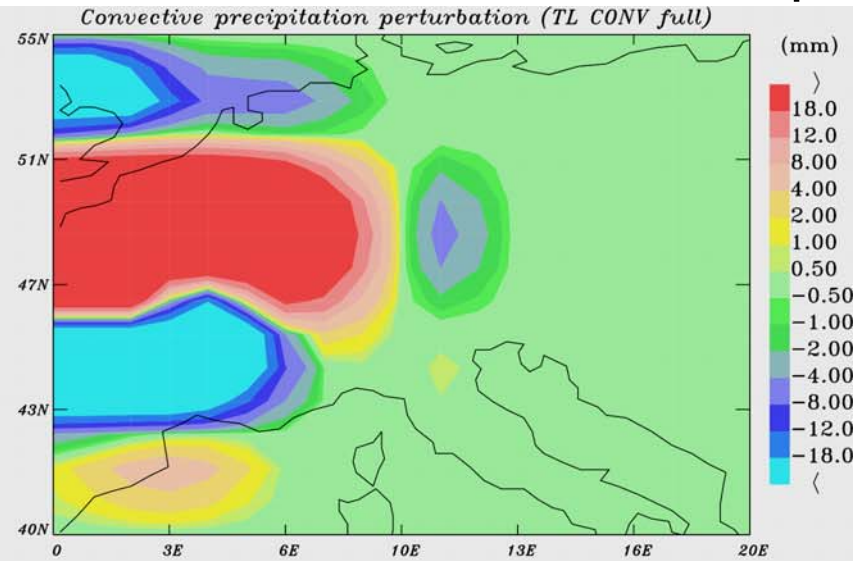
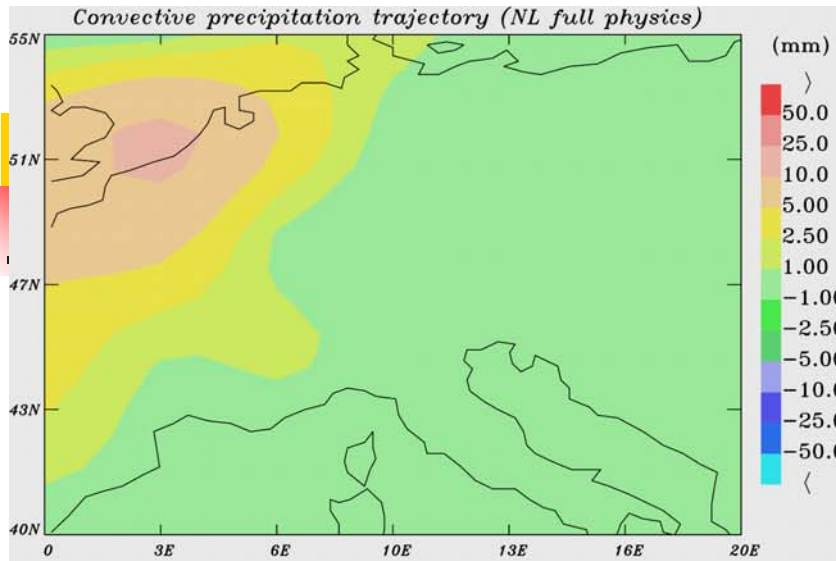
Version simplifiée

$$Q'_1 - Q'_R = \frac{1}{C_P} \left[- \left(\frac{\partial s'}{\partial t} \right)_{LS} \right]$$

$$Q'_2 = \left[- \left(\frac{\partial q'}{\partial t} \right)_{LS} \right]$$

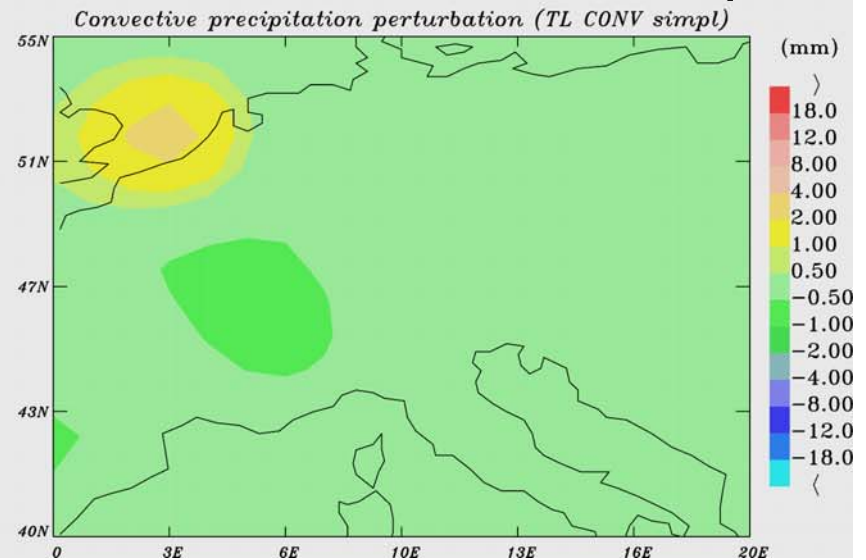
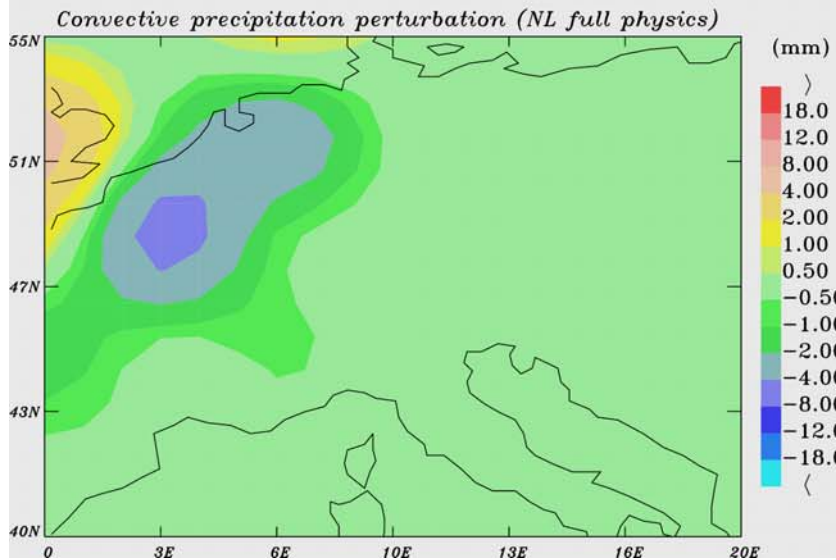
Trajectoire NL

Perturbation TL – conv. complète



Perturbation NL

Perturbation TL – conv. simplifiée



Précipitation convective accumulée sur 24 h



Expériences

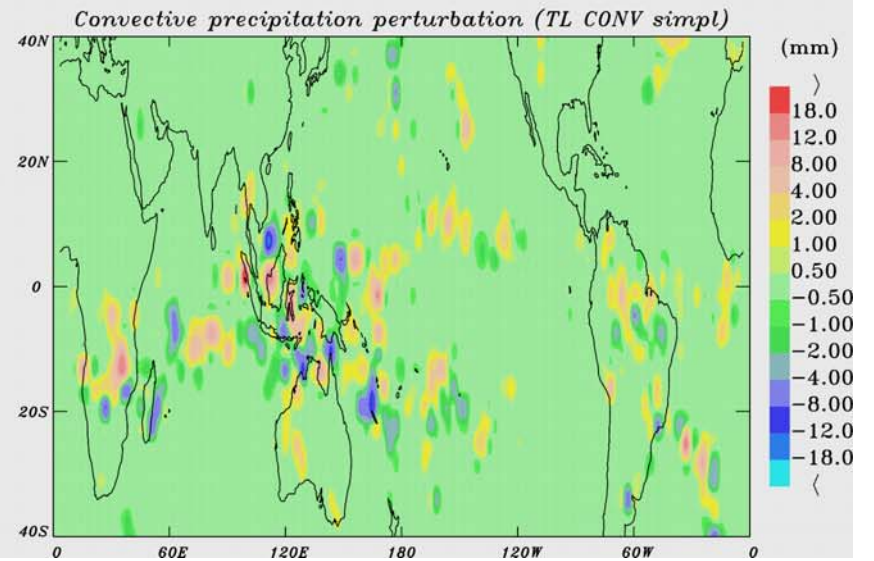
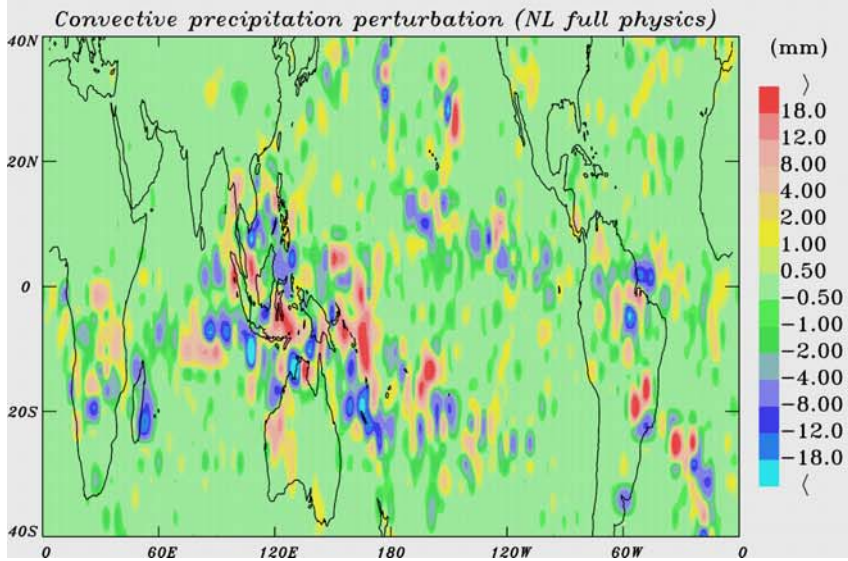
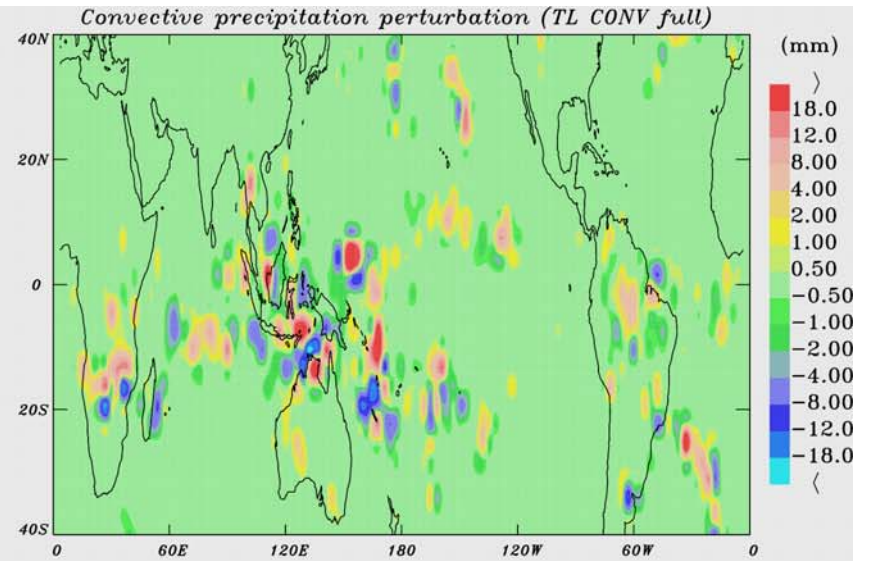
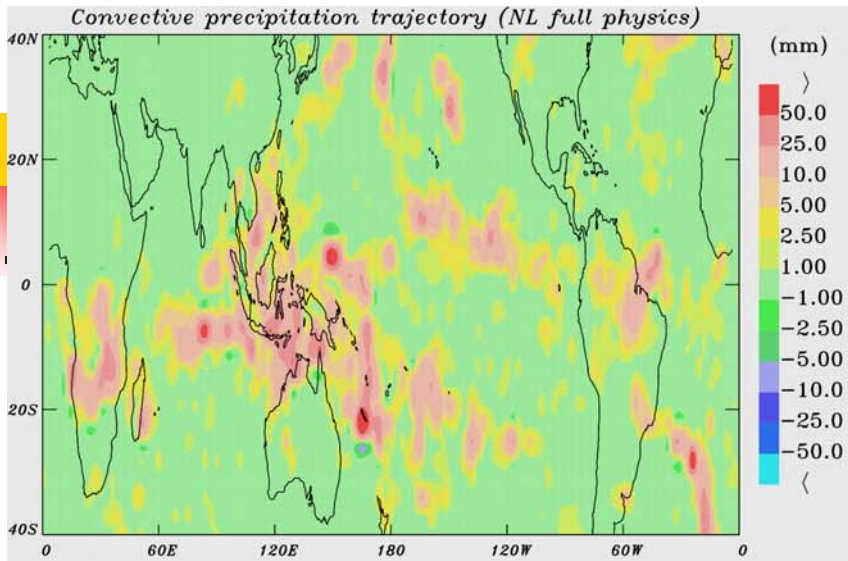
1. Schéma de convection complet
2. TL tendances bornées

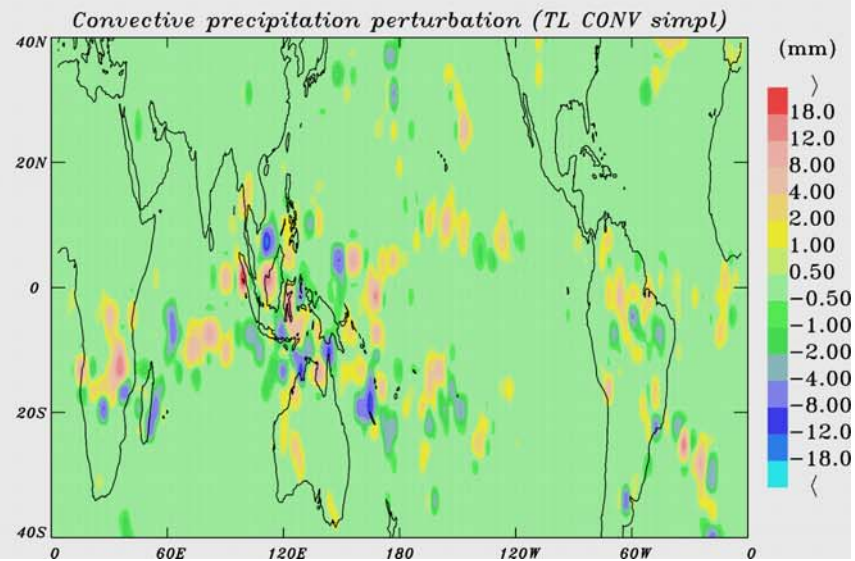
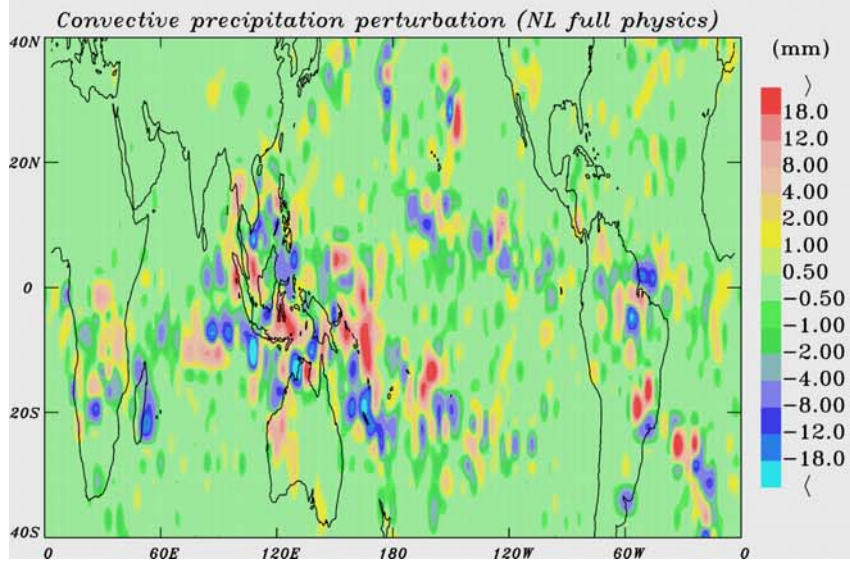
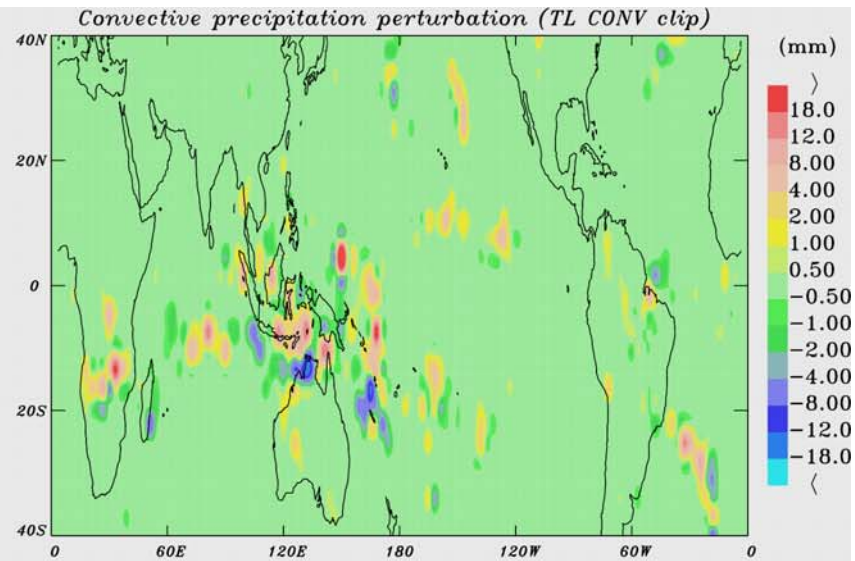
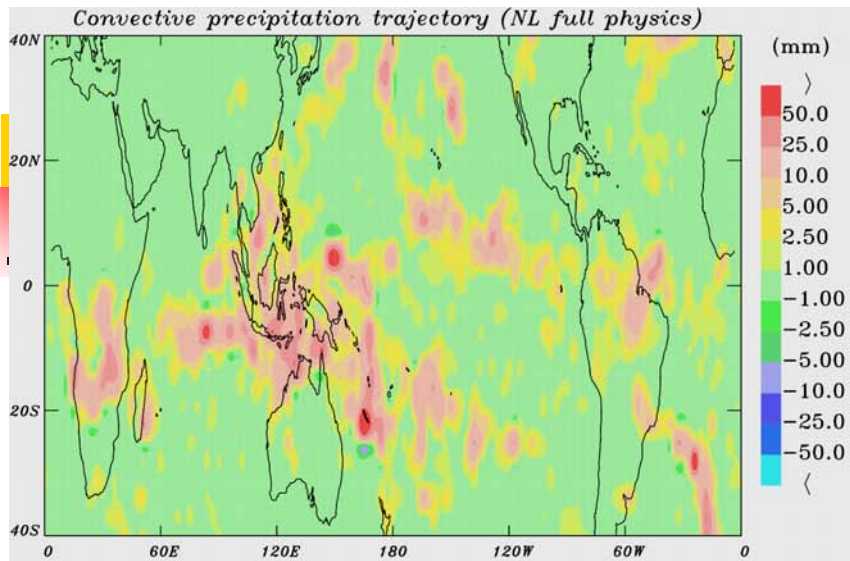
$$\left| \left(\frac{\partial x'}{\partial t} \right)_{\text{conv}} \right| > \left| 2 \times \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_{\text{conv}} \right| \Rightarrow \left(\frac{\partial x'}{\partial t} \right)_{\text{conv}} = 0$$

3. Version simplifiée

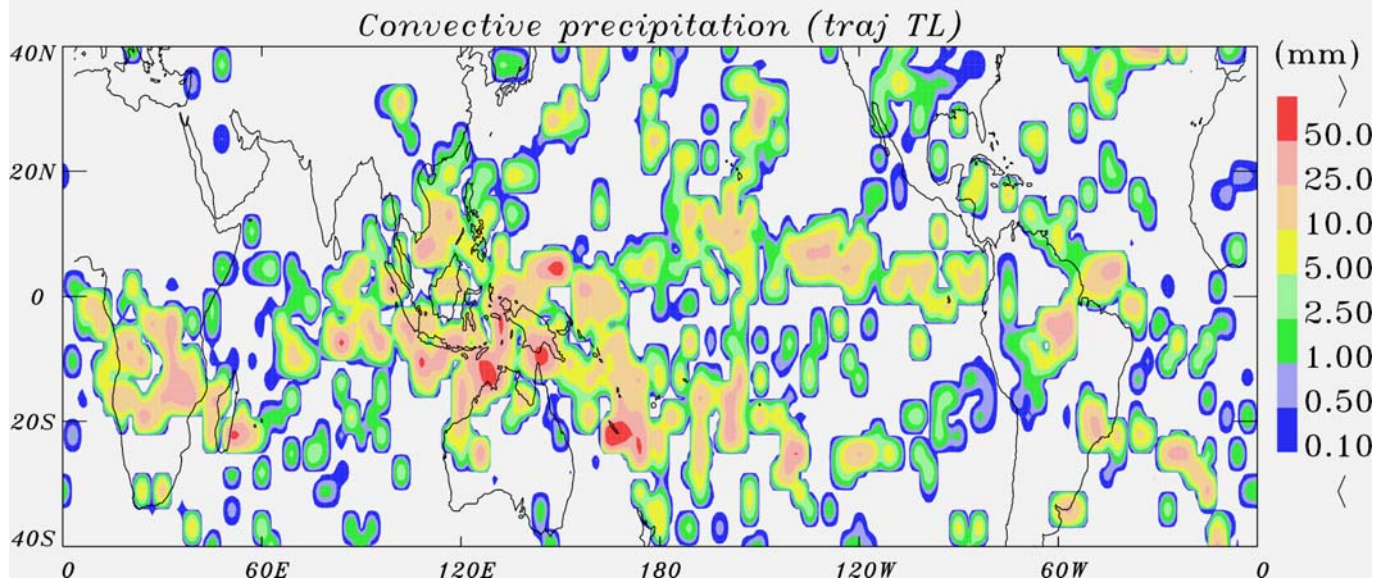
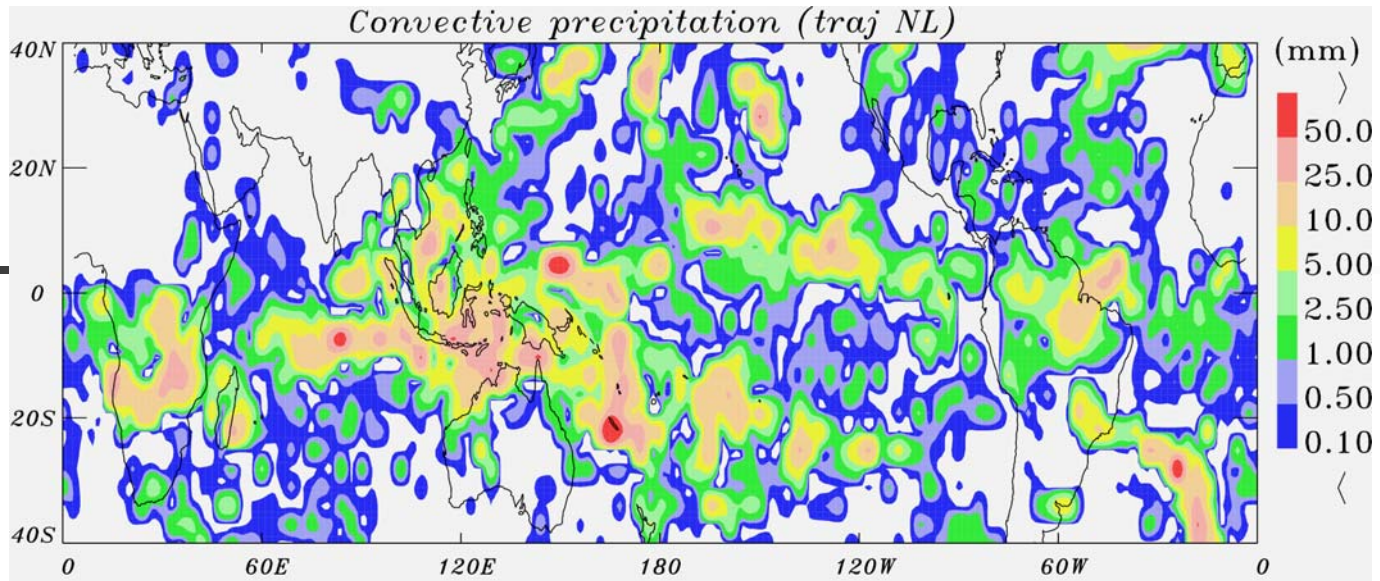
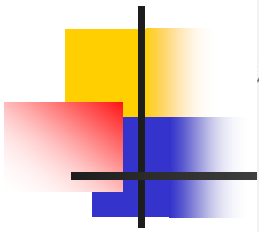
$$K' = s'_c = q'_c = 0$$

4. Evaluation de la trajectoire de pluie dans le modèle TL

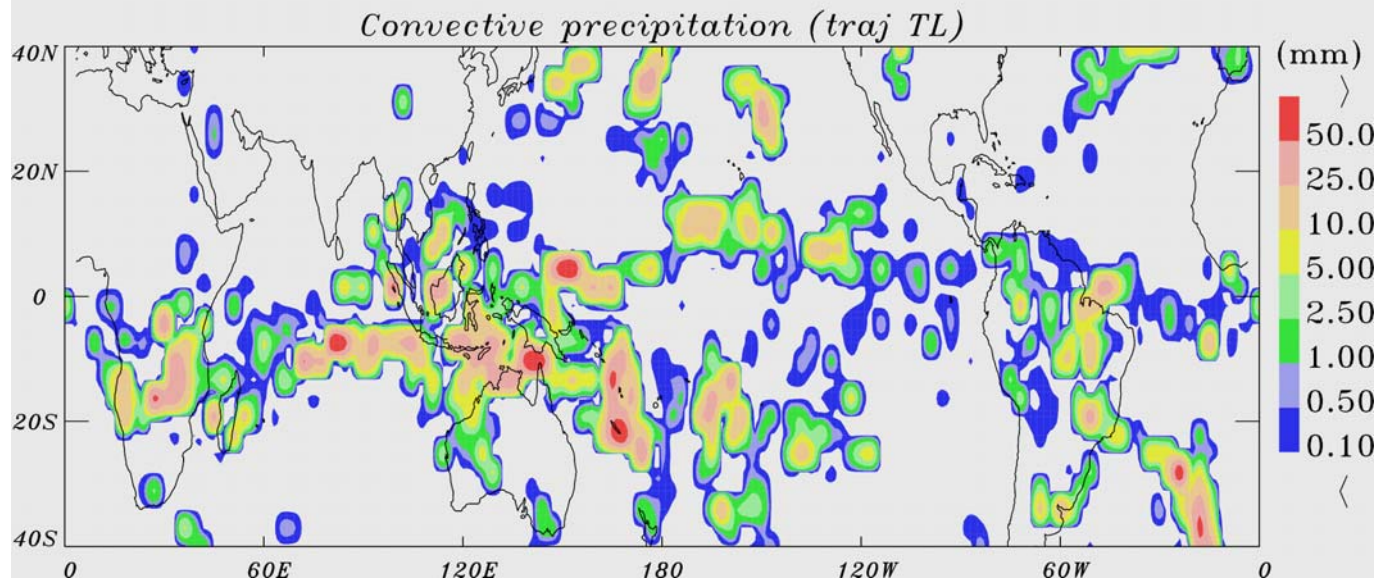
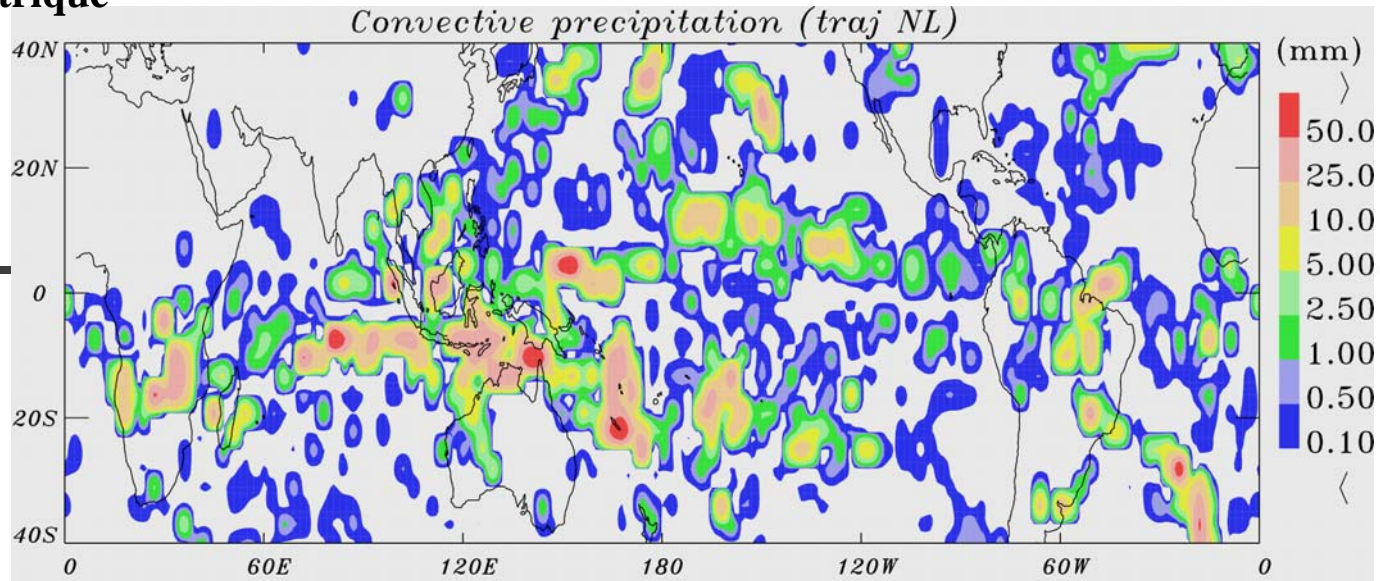
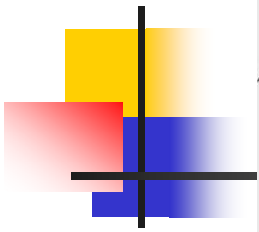




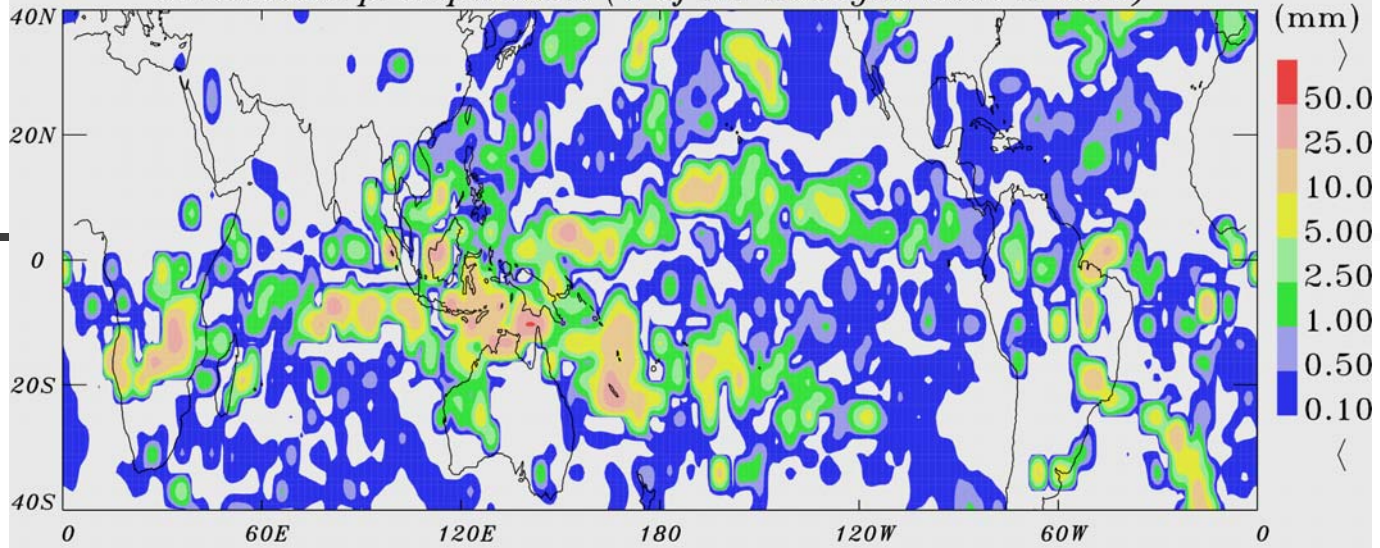
Kuo



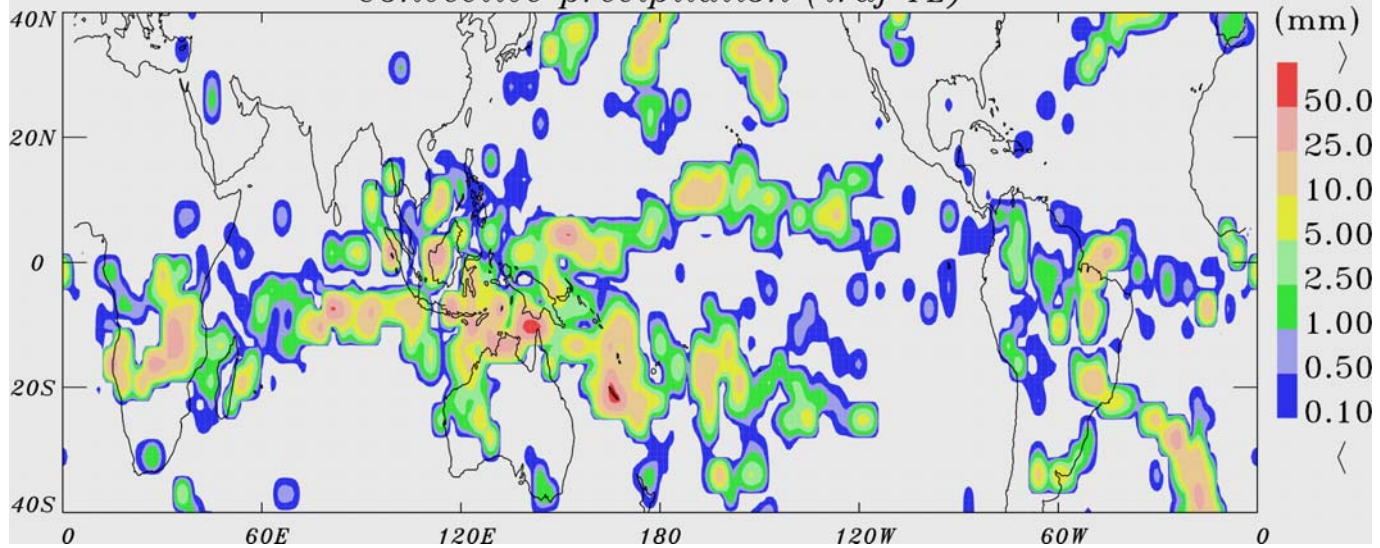
Kuo symétrique



Convective precipitation (traj NL Kuosym with K zero)



Convective precipitation (traj TL)





Généralisation de la linéarisation du schéma de convection

- Information disponible dans le schéma de convection NL : déclanchement, extension verticale de la couche convective (base et sommet du nuage).
- Si la convection est présente dans la trajectoire, les tendances perturbées produites par un schéma de convection linéarisé généralisé sont :

$$Q'_{1-R} = \frac{1}{C_p} \left[- \left(\frac{\partial s'}{\partial t} \right)_{LS} \right]$$

$$Q'_{2} = \left[- \left(\frac{\partial q'}{\partial t} \right)_{LS} \right]$$

Alternative possible au schéma de Kain & Fritsch complet



Evaluation de Kuo symétrique linéarisé dans le modèle ECMWF

- Cycle CY26R1 résolution T159L60
- Situation : 15 Mars 2001
- Intégration de 24 h
- Modèle NL physique complète ECMWF
- Modèle TL physique linéarisée opérationnelle dans le 4D-Var
- Modèle TL dans lequel le schéma flux de masse simplifié est remplacé par Kuo symétrique



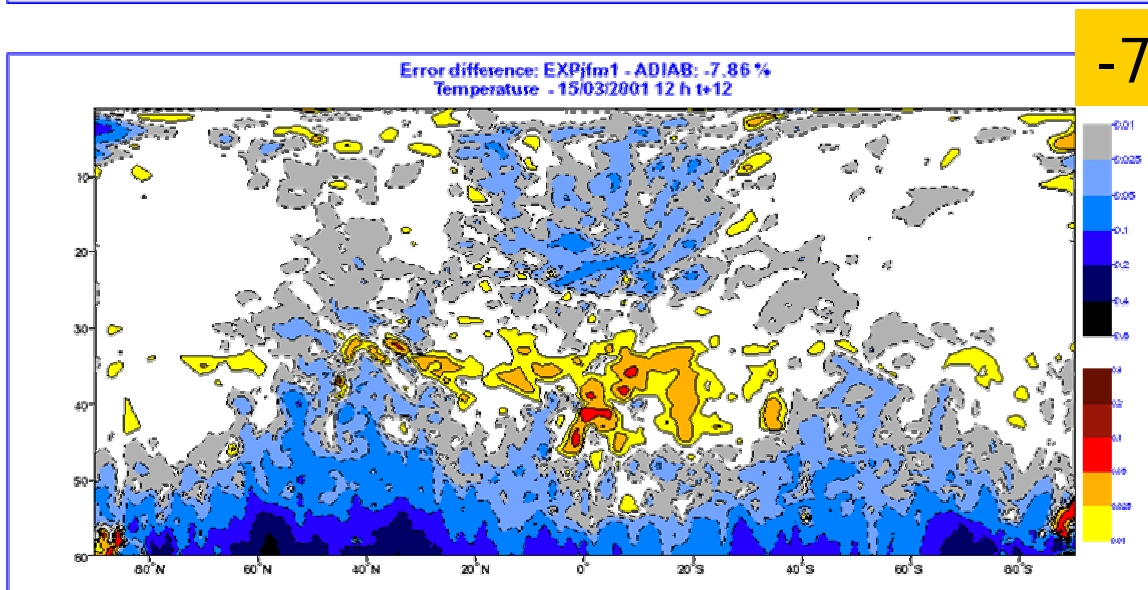
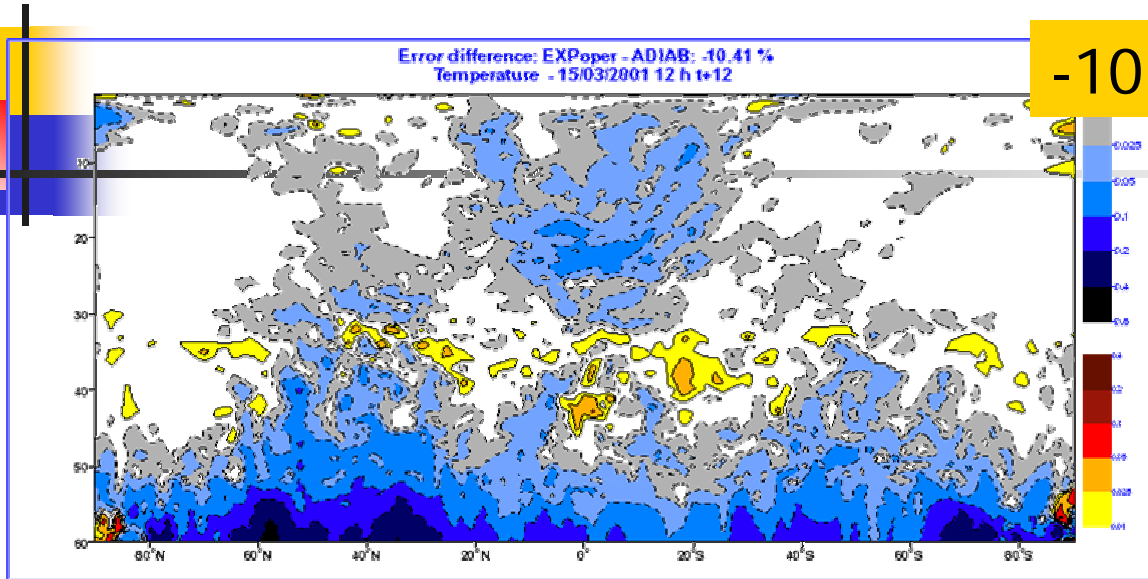
Schéma flux de masse linéarisé simplifié

- Tendances perturbées

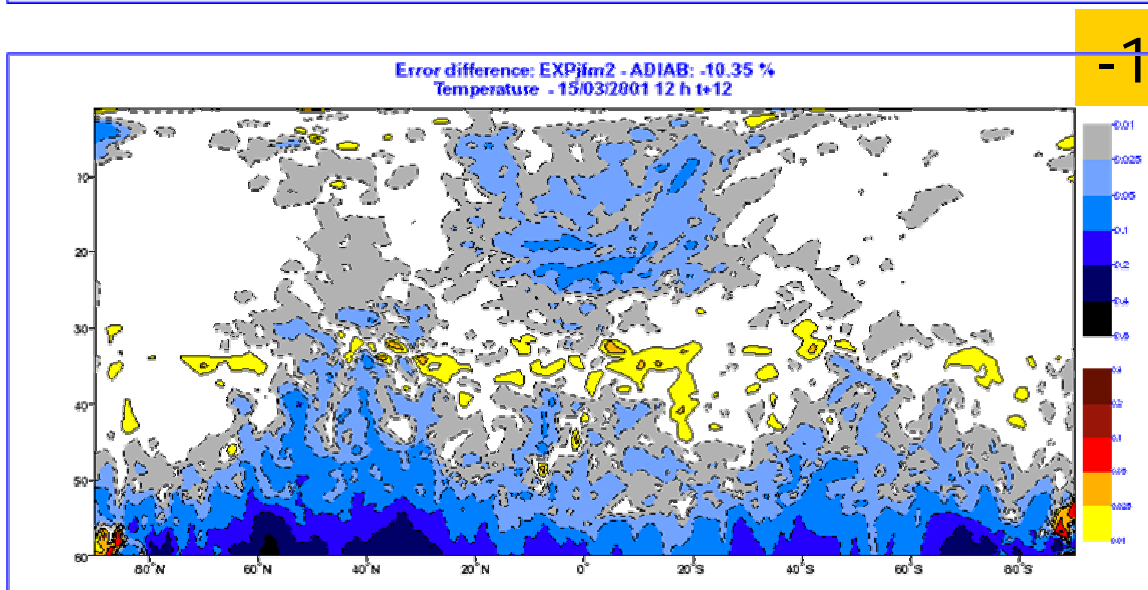
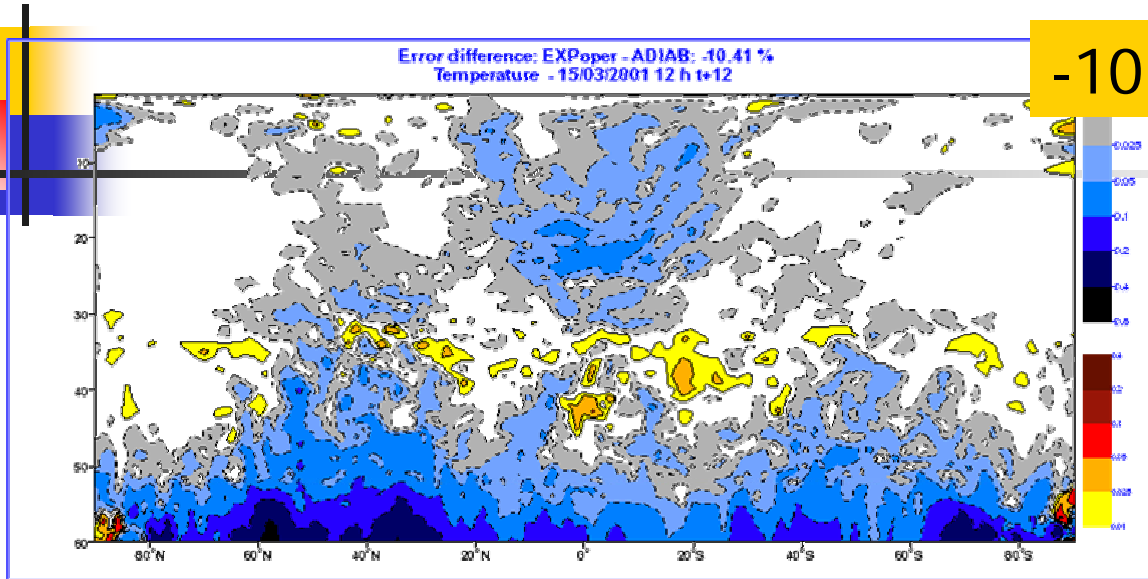
$$Q'_{1} - Q'_{R} = \frac{1}{C_p} \left[\omega^* \frac{\partial s'}{\partial p} \right]$$
$$Q'_{2} = \left[\omega^* \frac{\partial q'}{\partial p} \right]$$

ω^* est le flux de masse de la trajectoire

Incréments de température –réduction d'erreur % ADIAB



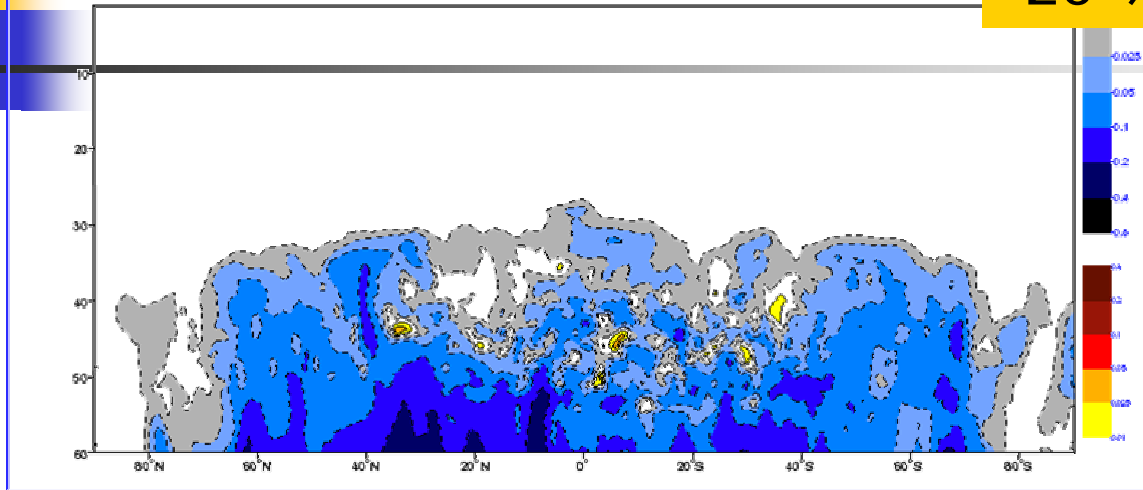
Incréments de température –réduction d'erreur % ADIAB



Incréments d'humidité spécifique – réduction d'erreur % ADIAB

Error difference: EXPoper - ADIAB: -19.9 %
Specific humidity - 15/03/2001 12 h t+24

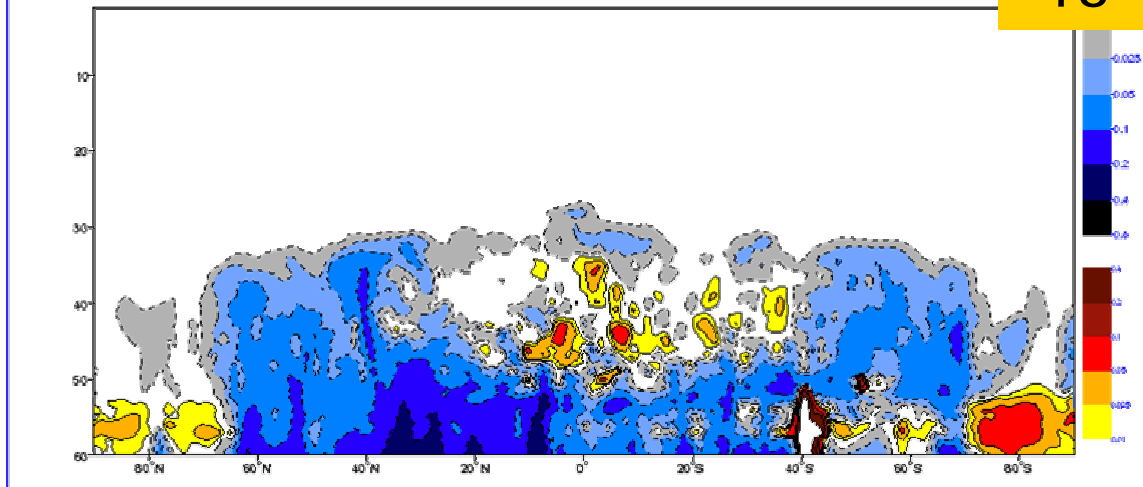
-20 %



Physique TL
complète
flux de masse
Simplifié

Error difference: EXPm1 - ADIAB: -13.1 %
Specific humidity - 15/03/2001 12 h t+24

-13 %

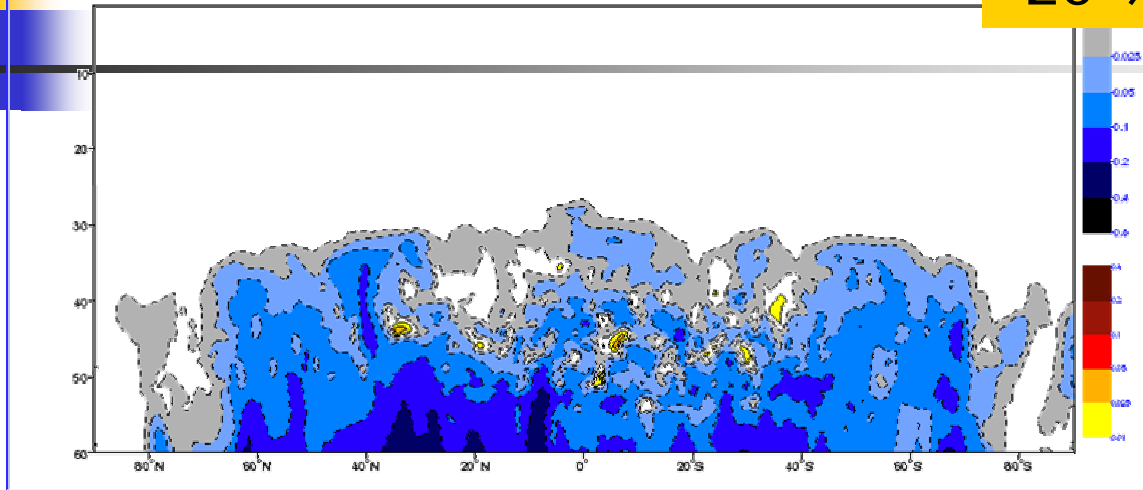


Physique TL
complète
Kuo symétrique
complet

Incréments d'humidité spécifique – réduction d'erreur % ADIAB

Error difference: EXPoper - ADIAB: -19.9 %
Specific humidity - 15/03/2001 12 h t+24

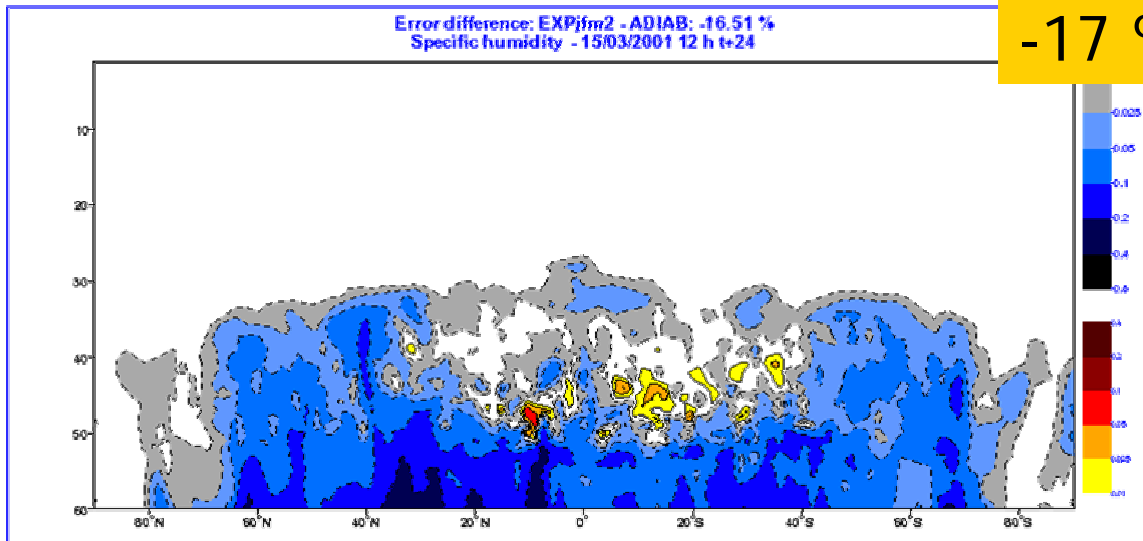
-20 %



Physique TL
complète
**flux de masse
simplifié**

Error difference: EXPjm2 - ADIAB: -16.51 %
Specific humidity - 15/03/2001 12 h t+24

-17 %



Physique TL
complète
**Kuo symétrique
simplifié**



Conclusions (1)

- Développement d'un schéma de convection simple (et peu coûteux) pour une utilisation dans GEM global (4D-Var, vecteurs singuliers, études de sensibilité)
- Nécessité de simplifier la linéarisation (approche retenue applicable à d'autres schémas de convection)
- Comportement proche du schéma flux de masse ECMWF simplifié (malgré l'incohérence avec le modèle NL dans l'évaluation)
- Etudes complémentaires sur les simplifications et la stabilité numérique du schéma



Conclusions (2)

- Etudes comparatives entre Kuo symétrique et Kain-Fritsch dans les versions linéarisées de GEM
- Etudes de sensibilité : calcul de

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_0} \left(\left[R(\mathbf{x}_t) - R_a \right]^2 \right)$$

- Nécessité de comprendre les interactions entre la convection profonde (observations) et la circulation de grande échelle (conditions initiales) à des échelles de temps < 24h



Evaluation des perturbations de pluie avec le schéma simplifié

- Sensibilité aux changements de température

$$R' = - \frac{L}{C_p} \int \left(\frac{\partial s'}{\partial t} \right)_{LS} \frac{dp}{g}$$

- Sensibilité aux changements d'humidité

$$R' = - \int \left(\frac{\partial q'}{\partial t} \right)_{LS} \frac{dp}{g} \quad \textit{Role asymétrique de T et q}$$

