

# Les isotopes stables de l'eau: applications à l'étude de la convection atmosphérique et du cycle de l'eau

thèse dirigée par Sandrine Bony et Jean Jouzel  
collaborations avec Françoise Vimeux et Amaelle Landais  
(LSCE)

Camille Risi

LMD/IPSL, Paris

26 novembre 2009





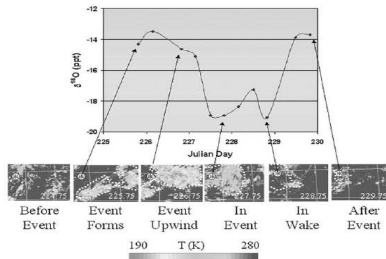
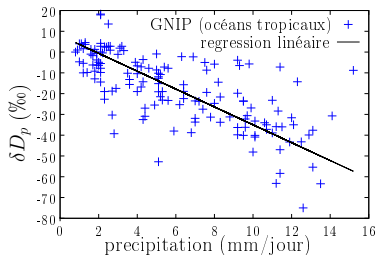
# Plan

1. Isotopes de l'eau dans la précipitation et convection atmosphérique
2. Isotopes de l'eau et humidité atmosphérique
3. Isotopes de l'eau et hydrologie continentale

# 1. Isotopes et convection atmosphérique

## ► Observations existantes

- Amount effect
- Effet de la convection à l'échelle synoptique

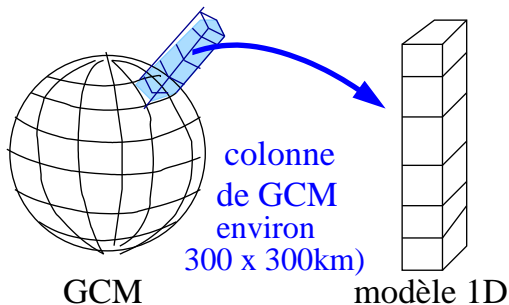


*Lawrence et al 2004*

- **Questions:** Par quels processus la convection impacte-t-elle la composition isotopique? A quelles échelles de temps? Qu'en déduire en retour sur la convection?

# Modèle 1D

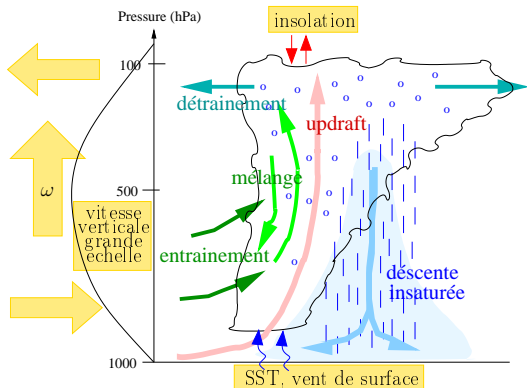
- ▶ modèle 1D d'équilibre radiatif-convectif sur océan
- ▶ Conditions aux limites
- ▶ schéma de convection d'Emanuel  $\Rightarrow$  représentation détaillée des processus isotopiques



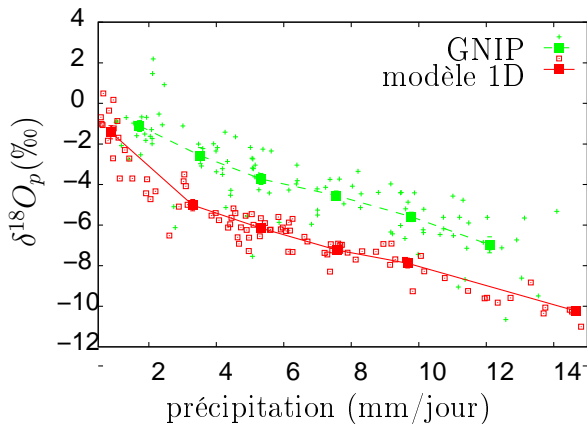
# Modèle 1D

- ▶ modèle 1D d'équilibre radiatif-convectif sur océan

- ▶ Conditions aux limites
- ▶ schéma de convection d'Emanuel  $\Rightarrow$  représentation détaillée des processus isotopiques



# Evaluation du modèle 1D



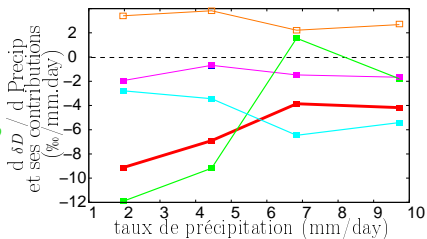
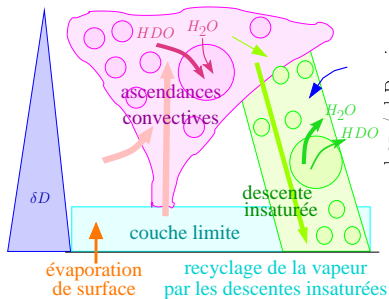
- ▶ bonne simulation de l'amount effect

*Bony, Risi et Vimeux 2008*



# Quels processus expliquent l'amount effect?

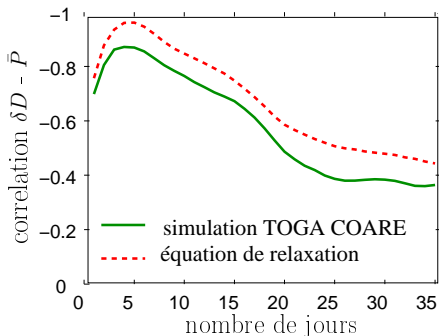
$$\text{Amount effect} = \frac{d\delta D_p}{dP} \approx \frac{d\delta D_{\text{evap}}}{dP} + c_{\text{cond}} + c_{\text{revap}} + c_{\text{downdraft}}$$



- ▶ principaux processus: réévaporation de la pluie et descentes insaturées

# Quelles sont les constantes de temps de l'amount effect?

- ▶ Simulation TOGA COARE (Pacifique Ouest)



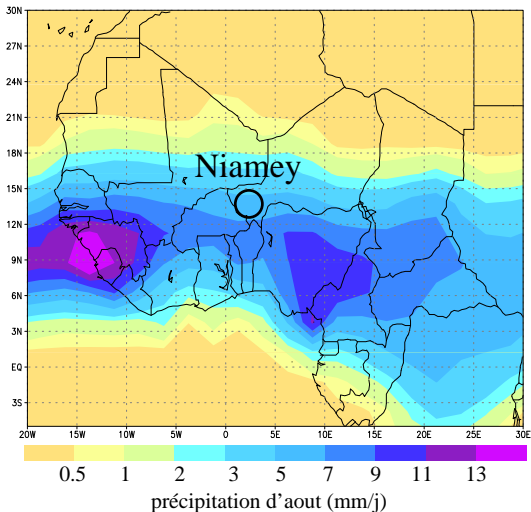
- ▶ équation simple de relaxation:

The diagram shows a blue cloud with a purple rain shaft. A dashed box encloses the rain shaft, with orange arrows pointing in from the sides, representing convection. A purple arrow points down from the top of the rain shaft, representing relaxation. Below the diagram is the differential equation:

$$\frac{d\delta D}{dt} = \underbrace{-P}_{\text{effet de la convection}} - \underbrace{\frac{\delta D}{\tau}}_{\text{relaxation}}$$

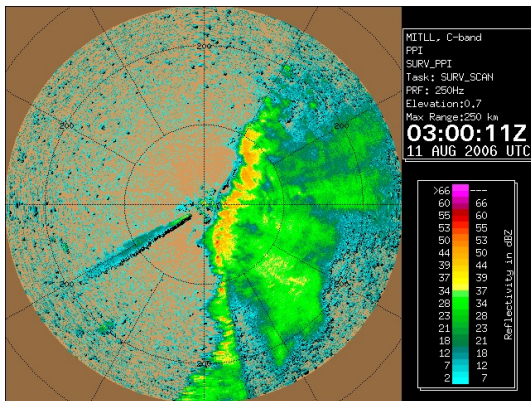
- ▶ La composition isotopique intègre la convection sur les jours précédents

# Prélèvements pendant la campagne AMMA



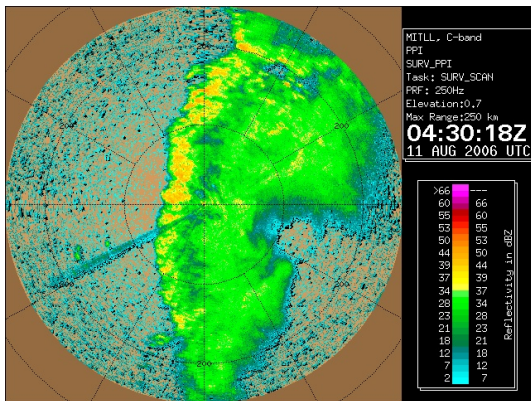
# Echantillonnage intra-évènement

Ligne du grains du 11 aout 2006



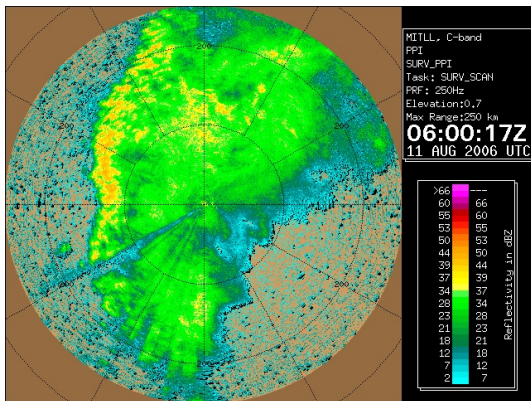
# Echantillonnage intra-évènement

Ligne du grains du 11 aout 2006

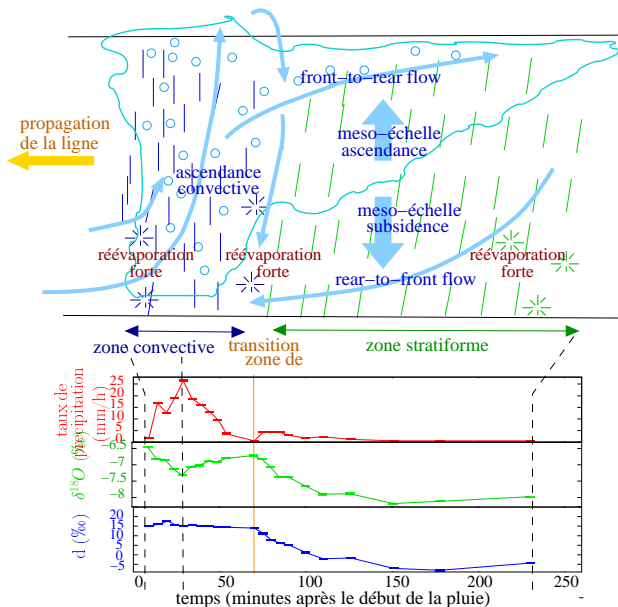


# Echantillonnage intra-évènement

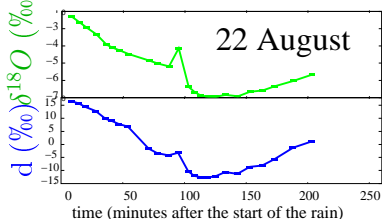
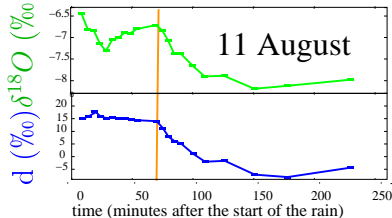
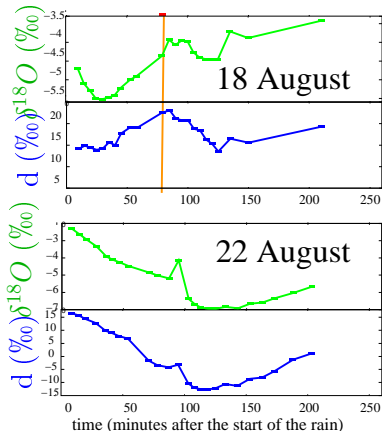
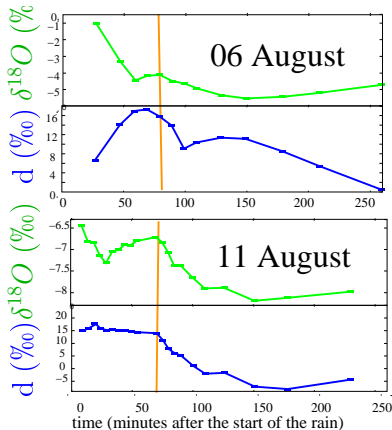
Ligne du grains du 11 aout 2006



# Mesures le 11 aout 2006



# Propriétés robustes entre les lignes de grains



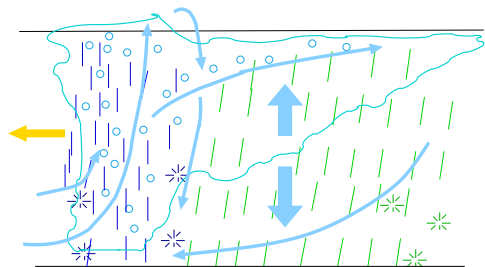
► forte variabilité entre lignes, mais propriétés robustes:

►  $\delta^{18}O$  en W,

► diminution du d-excess en début de zone stratiforme

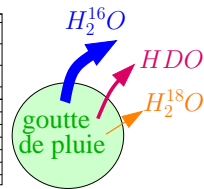
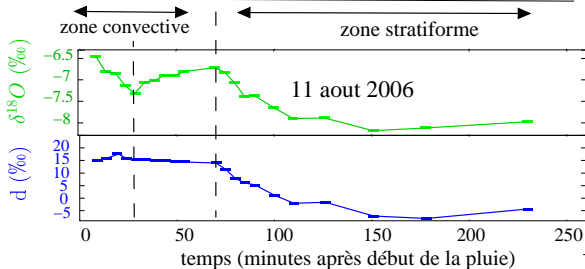
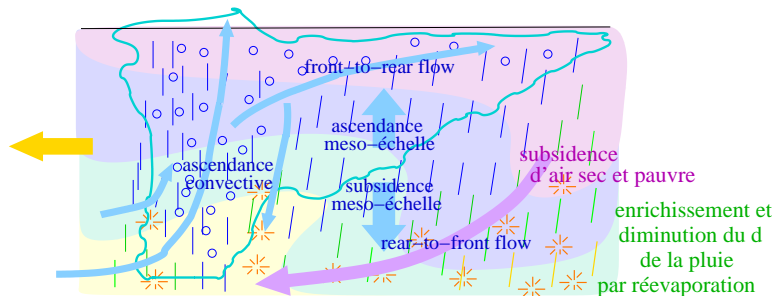


# Modèle 2D de lignes de grains



- ▶ 2D
- ▶ stationnaire
- ▶ schéma d'advection forcé par vents 3D obtenus par M. Chong à partir du MIT radar pour le 11 aout 2006
- ▶ microphysique de Kessler
- ▶ propriétés robustes simulées

# Processus au cours de lignes de grains

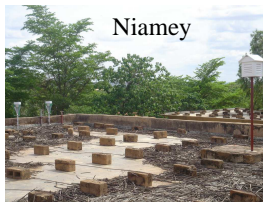
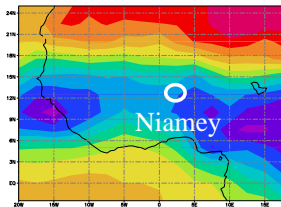


# Bilan des processus convectifs affectant la composition isotopique de la précipitation

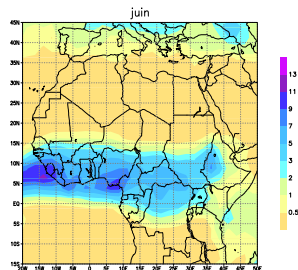
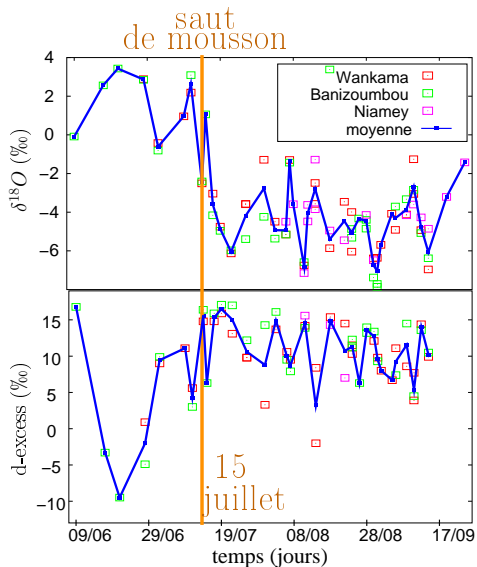
- ▶ Processus identifiés à la fois dans données intra-événement et modèle 1D
  - ▶ réévaporation des gouttes
  - ▶ subsidences convectives
- ▶ intégration de la convection sur les jours précédents

# Données à l'évènement au cours de la mousson

- ▶ collecte à la fin de chaque évènement, pendant la mousson 2006, sur 3 sites autour de Niamey

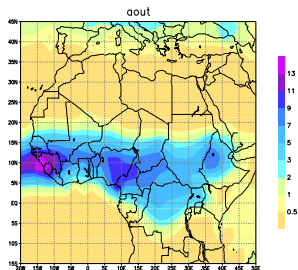
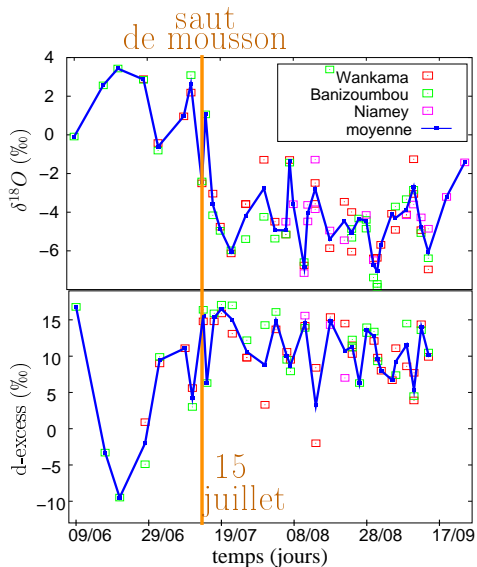


# Evolution au cours de la mousson



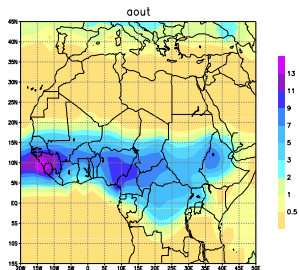
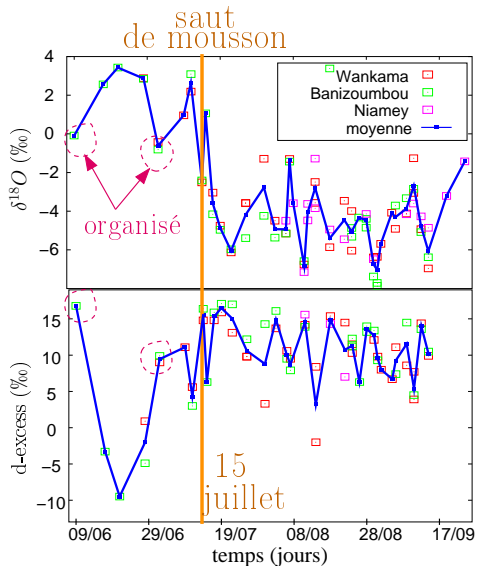
- ▶ les isotopes enregistrent l'activité convective
- ▶ saut de mousson
- ▶
- ▶

# Evolution au cours de la mousson



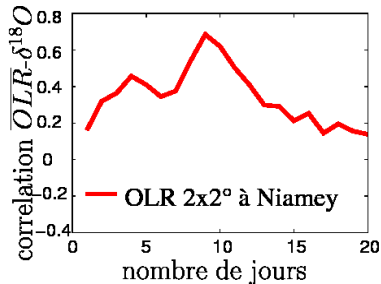
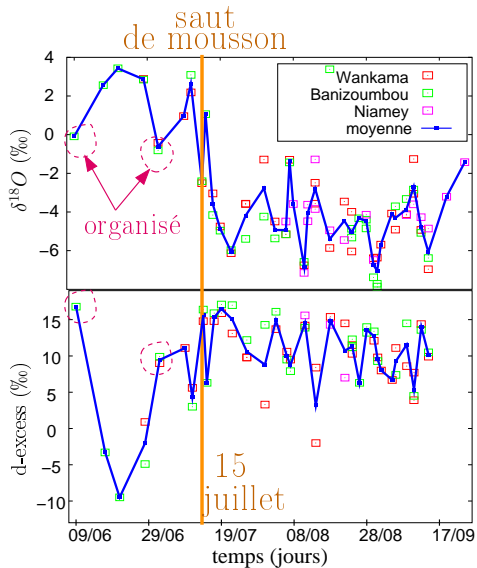
- ▶ les isotopes enregistrent l'activité convective
- ▶ saut de mousson
- ▶
- ▶

# Evolution au cours de la mousson



- ▶ les isotopes enregistrent l'activité convective
- ▶ saut de mousson
- ▶ avant la mousson: organisation et intensité des systèmes
- ▶

# Evolution au cours de la mousson



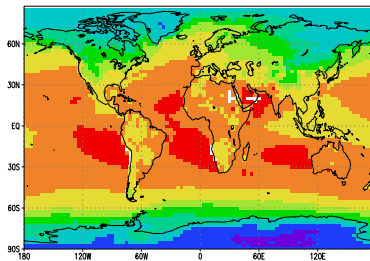
- ▶ les isotopes enregistrent l'activité convective
  - ▶ saut de mousson
  - ▶ avant la mousson: organisation et intensité des systèmes
  - ▶ après la mousson: le  $\delta^{18}O$  intègre temporellement la convection



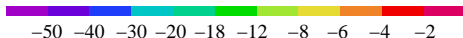
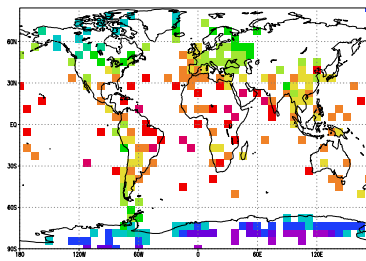
# Utilisation de simulations avec LMDZ

- ▶ LMDZ4 GCM, physique AR4
- ▶ résolution horizontale:  $2.5^\circ \times 3.75^\circ$ , 19 niveaux verticaux
- ▶ guidé par vents 3D des réanalyses NCEP
- ▶ représentation des isotopes
  - ▶ advectés comme l'eau
  - ▶ fractionnement à chaque changement de phase, sauf évaporation continentale

$\delta^{18}\text{O}$  (‰) LMDZ



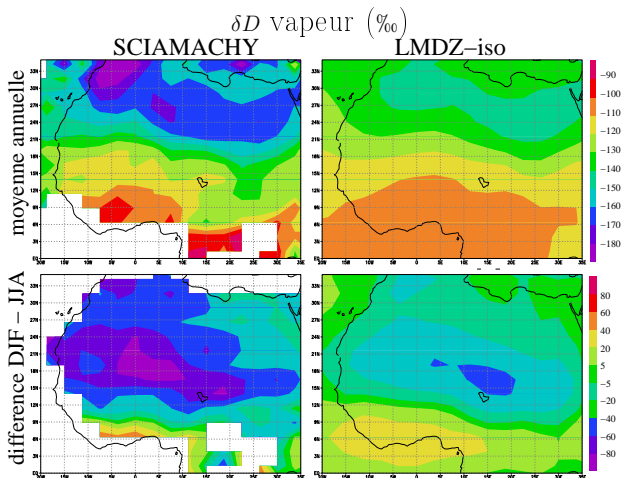
$\delta^{18}\text{O}$  (‰) observations



# Evaluation sur le Sahel: données satellites

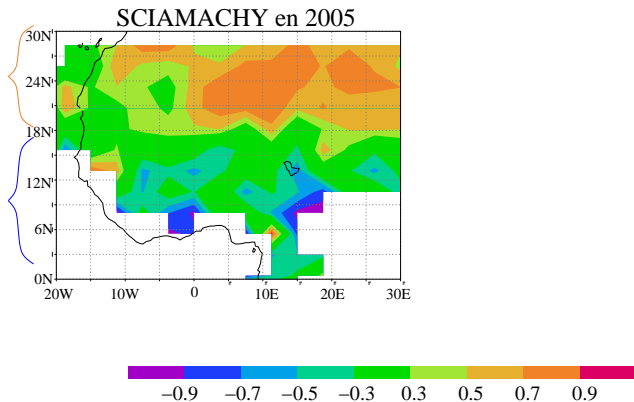
## SCIAMACHY

- ▶  $\delta D$  intégré verticalement, couverture globale, 2003-2005, précision maximale sur le Sahel (*Frankenberg et al 2009*)



# Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

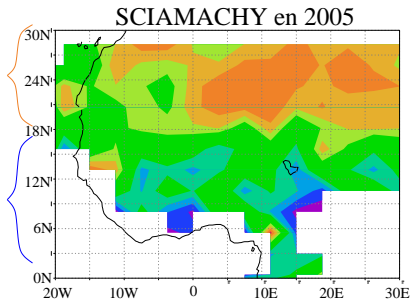
correlation entre eau précipitable et  $\delta D$   
à l'échelle intra-saisonnière en JJA



# Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

correlation entre eau précipitable et  $\delta D$   
à l'échelle intra-saisonnière en JJA

subsidence  $\nearrow$   $\left\langle \begin{array}{l} \text{prw} \\ \delta D \end{array} \right\rangle \searrow$

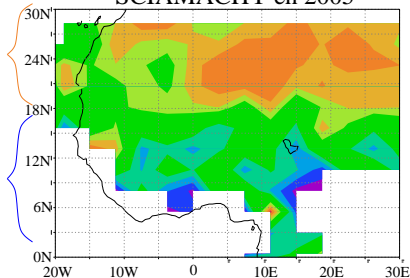


# Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

correlation entre eau précipitable et  $\delta D$   
à l'échelle intra-saisonnière en JJA

subsidence  $\nearrow$   $\left\langle \begin{array}{l} \text{prw} \\ \delta D \end{array} \right\rangle \searrow$

SCIAMACHY en 2005



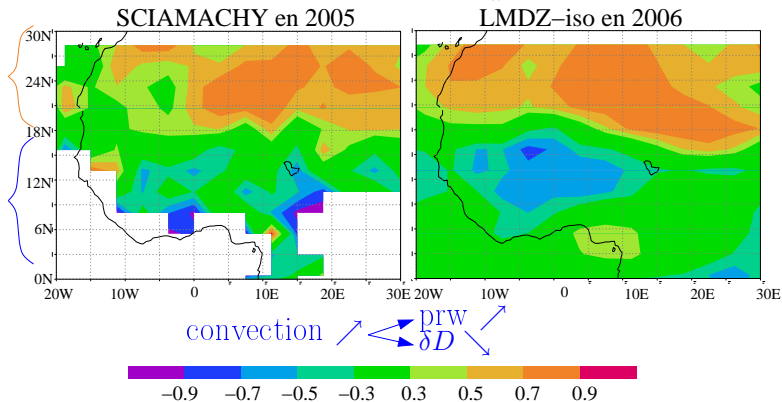
convection  $\nearrow$   $\left\langle \begin{array}{l} \text{prw} \\ \delta D \end{array} \right\rangle \searrow$



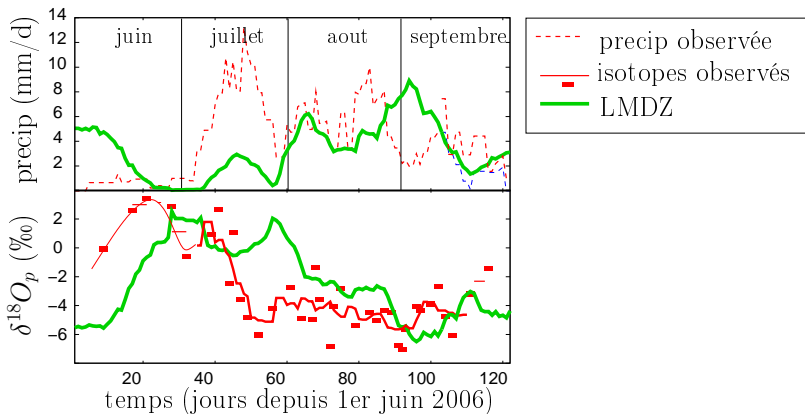
# Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

correlation entre eau precipitable water et  $\delta D$   
à l'échelle intra-saisonnière en JJA

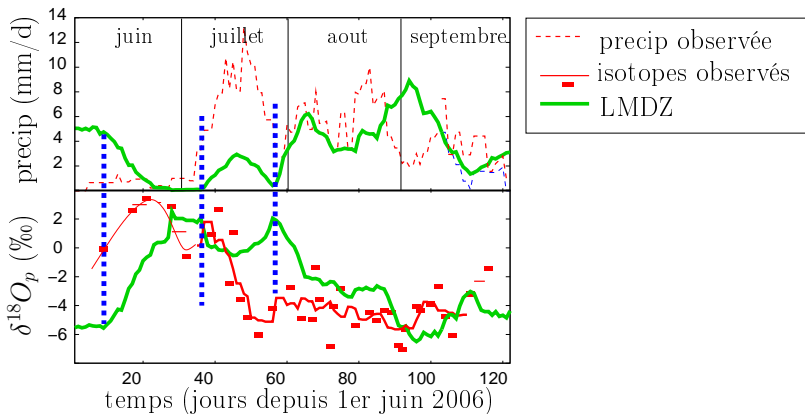
subsidence  $\nearrow$   $\left\langle \begin{array}{l} \text{prw} \\ \delta D \end{array} \right\rangle \searrow$



# LMDZ-iso sur Niamey

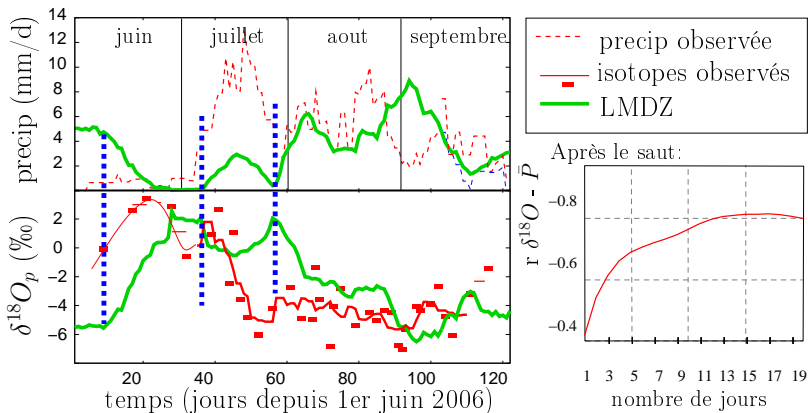


# LMDZ-iso sur Niamey

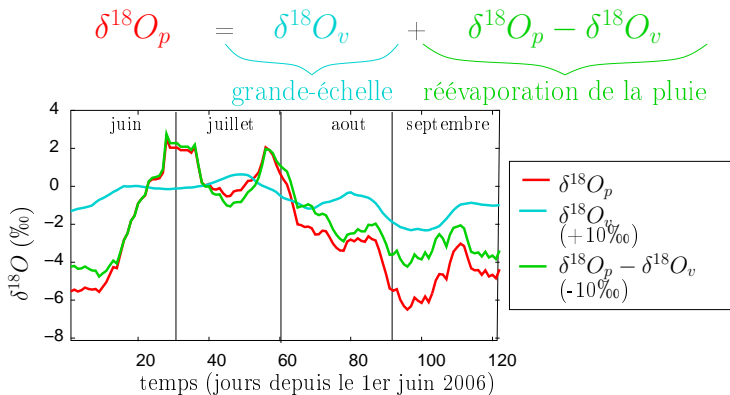




# LMDZ-iso sur Niamey



# Variabilité intra-saisonnière dans LMDZ

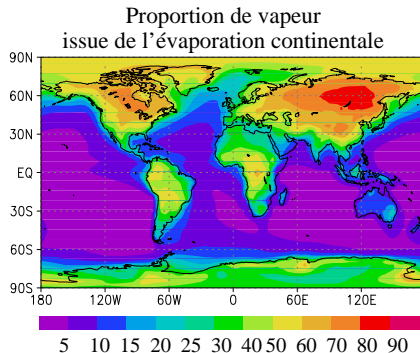
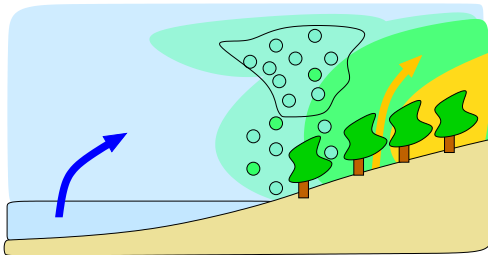


- ▶ avant le saut: réponse instantanée à la convection, par le biais de la réévaporation des gouttes
- ▶ après le saut: intégration de la convection, en partie par le biais de la vapeur

# Utilisation du water tagging dans LMDZ

- ▶ Chaque molécule d'eau est coloriée d'une certaine couleur, selon une convention de coloriage
- ▶ Traceurs d'eau additionnels dont la somme est égale à l'eau "normale"

exemple: coloriage de l'évaporation continentale:



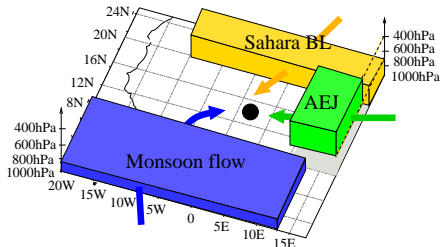
# Water tagging sur Niamey

% de la vapeur s'étant évaporée sur:

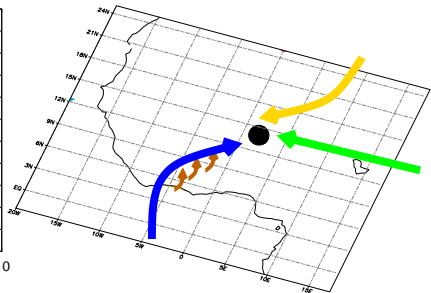
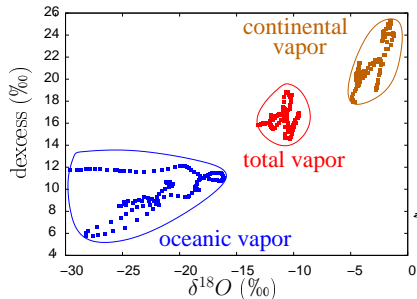
	JAS	DJF
continent	60%	30%
Atlantique	30%	45%
Méditerranée	2%	10%
Indien	10%	15%

% de la vapeur étant passée par:

	JAS	DJF
Flux de mousson	32%	20%
AEJ	32%	10%
CL saharienne	8%	60%



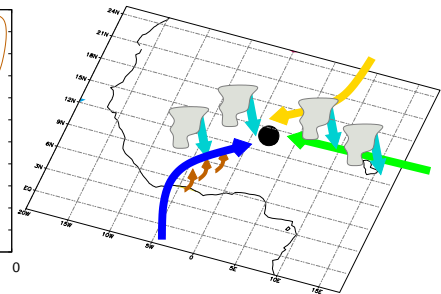
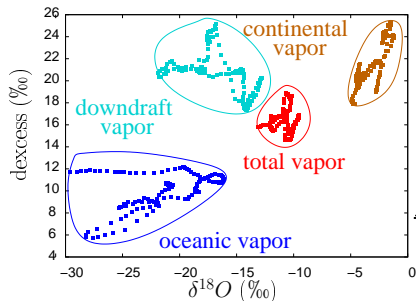
# Isotopes et origine de la vapeur



- ▶ signature particulière de la vapeur continentale  $\Rightarrow$  potentiel d'évaluation du recyclage continental?



# Isotopes and convection



- ▶ signature particulière de la vapeur continentale  $\Rightarrow$  potentiel d'évaluation du recyclage continental?
- ▶ appauvrissement de la vapeur par les descentes insaturées
- ▶ à l'échelle intra-saisonnière: la vapeur océanique est appauvrie par les descentes insaturées le long des trajectoires du flux de mousson

# Bilan sur l'effet de la convection sur la composition de la précipitation

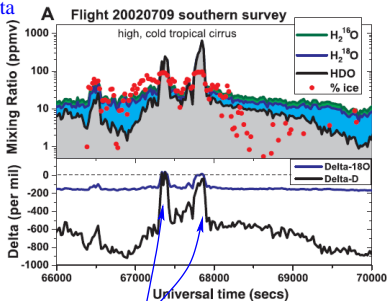
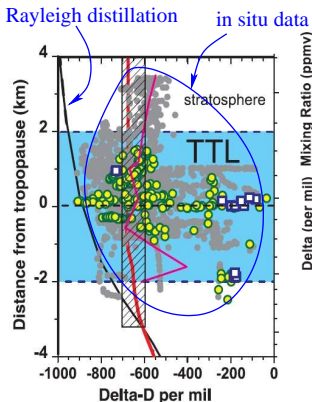
- ▶ Au sahel,  $\delta^{18}O$  enregistre l'activité convective dans les données et LMDZ:
  - ▶ saut de mousson
  - ▶ avant le saut: réponse instantanée et locale par évaporation des gouttes
  - ▶ après le saut: le  $\delta^{18}O$  intègre la convection par appauvrissement progressif par les descentes insaturées
- ▶ cohérents avec processus mis en évidence en 1D et dans les données intra-évènement
- ▶ en retour, intérêt des isotopes de l'eau pour l'étude du cycle de l'eau et de la convection





# Isotopes de l'eau et transport d'eau au travers de la tropopause tropicale

- ▶ Observations existantes
  - ▶ Moins pauvres que prévues
  - ▶ Forte variabilité associée aux nuages



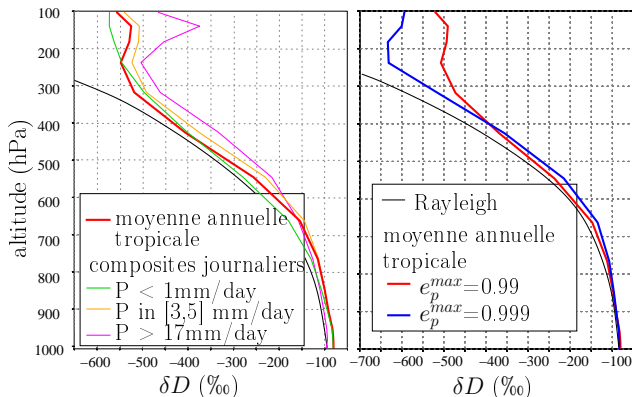
enrichment associated  
with convection

*Webster et al 2003*

# Résultats de modélisation

## ► GCM LMDZ

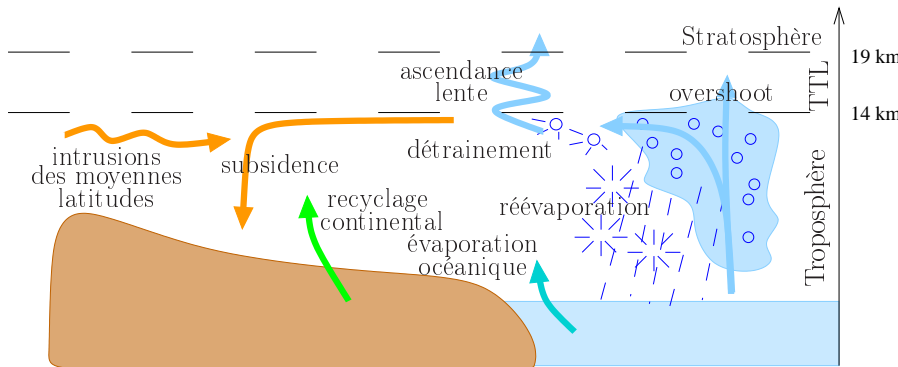
- impact de l'activité convective à l'échelle journalière
- enrichissement dépend du détrainement de condensat



## ► potentiel des isotopes pour contraindre rôle de la convection

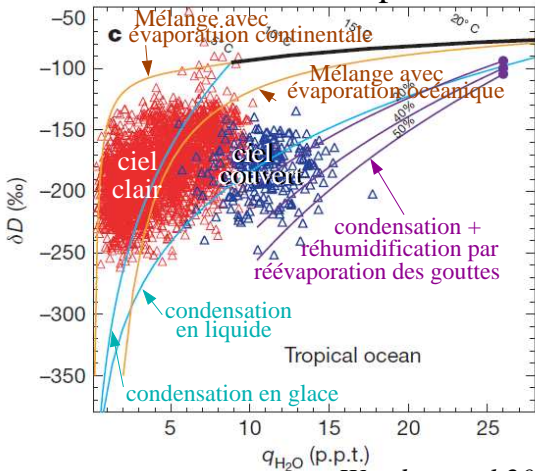
# Isotopes et processus contrôlant l'humidité troposphérique

- ▶ contribution dynamique/microphysique dans le contrôle de l'humidité troposphérique



# Isotopes et processus contrôlant l'humidité troposphérique

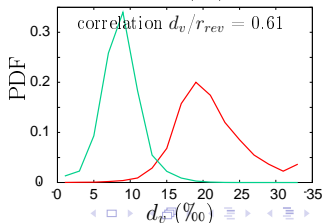
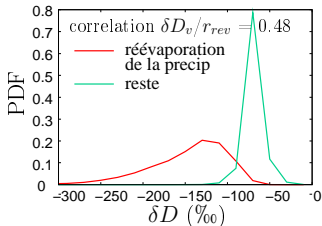
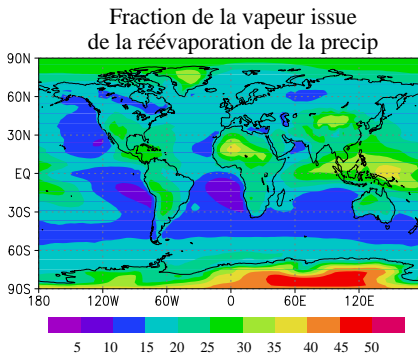
Données satellite TES: vapeur à 700hPa



Worden et al 2007

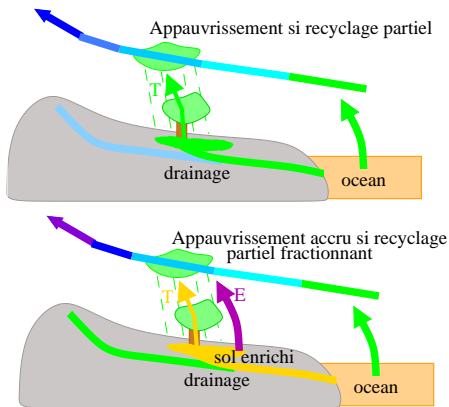
# Effet humidifiant de la réévaporation de la précipitation

- ▶ coloriage de la réévaporation de la précipitation
- ▶ estimation de l'effet humidifiant de la réévaporation par méthodes isotopiques?





# Isotopes et hydrologie continentale



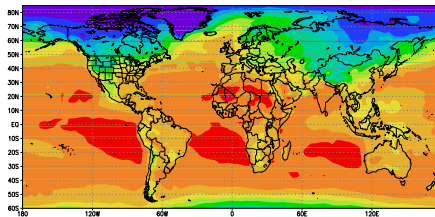
- ▶ Le taux de recyclage affecte gradients continentaux de  $\delta$  (*Rozanski et al 1992*)
- ▶ Le type de recyclage affecte la
  - ▶ différence  $\delta$  sol/évapo-transpiration (*Moreira et al 1997*)
  - ▶ gradients continentaux (*Gat et mastui 1991*)



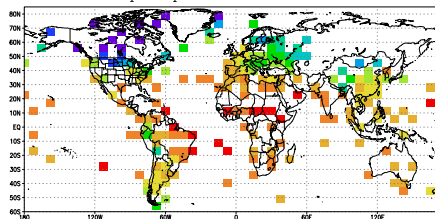


# Evaluation du modèle couplé LMDZ-ORCHIDEE-iso

$\delta^{18}O$  precipitation LMDZ-ORCHIDEE

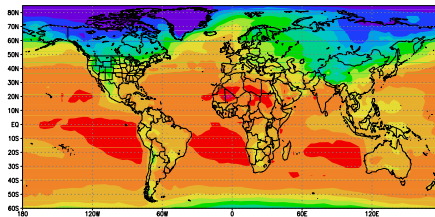


$\delta^{18}O$  precipitation données GNIP

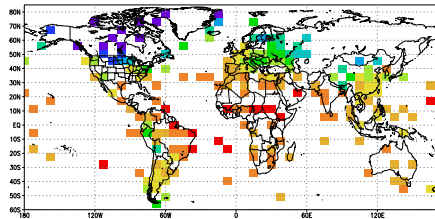


# Evaluation du modèle couplé LMDZ-ORCHIDEE-iso

$\delta^{18}O$  precipitation LMDZ-ORCHIDEE



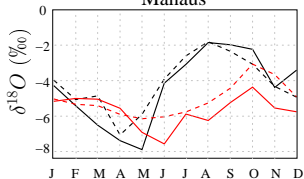
$\delta^{18}O$  precipitation données GNIP



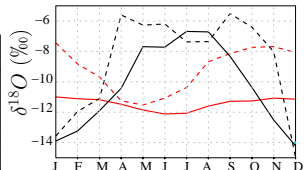
-35 -20 -18 -16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2 0

cycle saisonniers dans les rivières

Manaus



Vienne



Précipitation

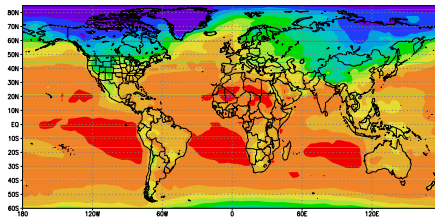
— données GNIP  
- - - LMDZ-ORCHIDEE

Rivières

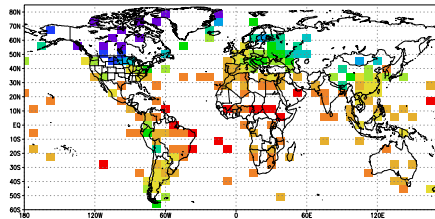
— données GNIR  
- - - LMDZ-ORCHIDEE:

# Evaluation du modèle couplé LMDZ-ORCHIDEE-iso

$\delta^{18}O$  precipitation LMDZ-ORCHIDEE



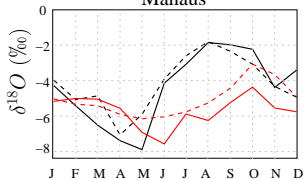
$\delta^{18}O$  precipitation données GNIP



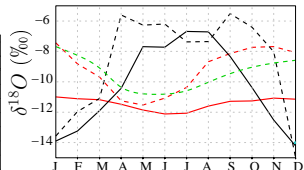
-35 -20 -18 -16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2 0

cycle saisonniers dans les rivières

Manaus



Vienne



Précipitation

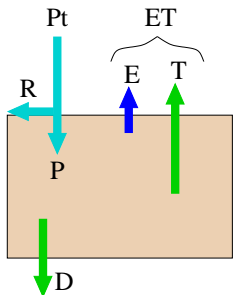
— données GNIP  
- - - LMDZ-ORCHIDEE

Rivières

— données GNIR  
- - - LMDZ-ORCHIDEE:  
- · - · - réservoir souterrain lent

# Reconstruction du bilan hydrologique de surface par les isotopes

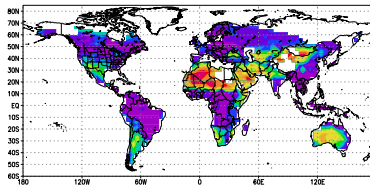
- expérience “modèle parfait”



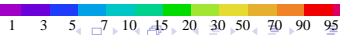
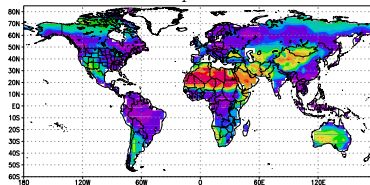
- si hypothèses simples:

$$\{\delta^{18} O_{sol}, \delta^{18} O_p, T, rh\} \iff \frac{E}{P}$$

E/P (%)  
reconstruit par les isotopes:



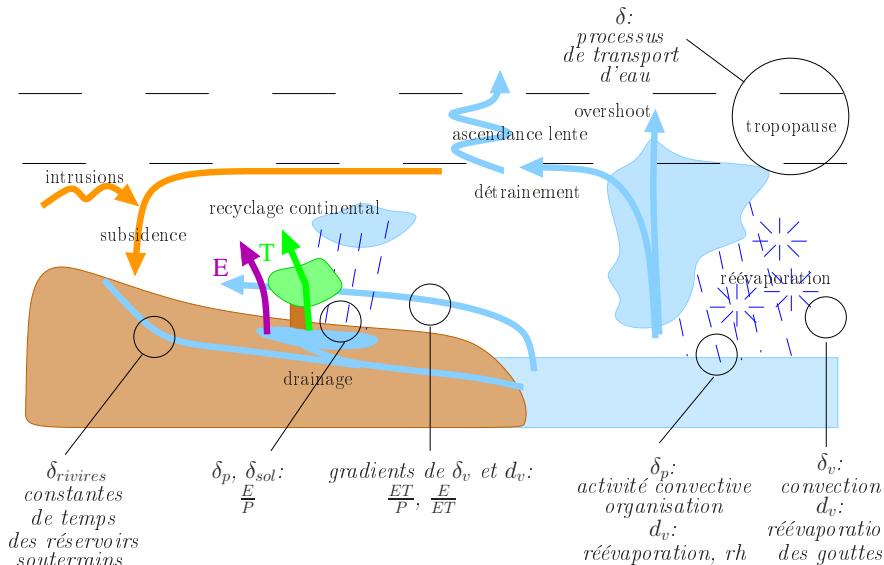
Simulé par LMDZ:



# Apports des isotopes aux problèmes d'hydrologie de surface

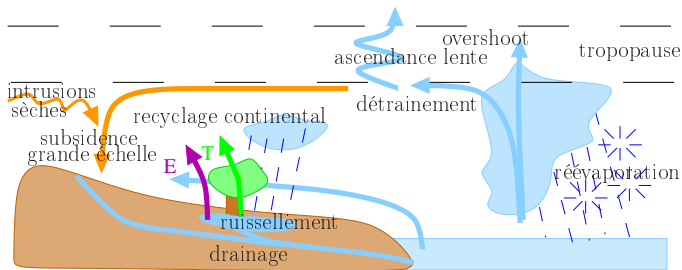
- ▶ effet des processus hydrologiques de surface:
  - ▶ second ordre pour la compositions atmosphériques
  - ▶ fort impact sur les réservoirs continentaux
- ▶ en retour:
  - ▶ contrainte des bilans d'eaux continentaux par méthodes isotopiques
  - ▶ contrainte de paramétrisations
- ▶ perspectives: développement des réseaux internationaux:
  - ▶ MIBA (sols, tiges, feuilles, vapeur),
  - ▶ GNIR (rivières),
  - ▶ IGLASS (eaux de surface et souterraines)

# Conclusion



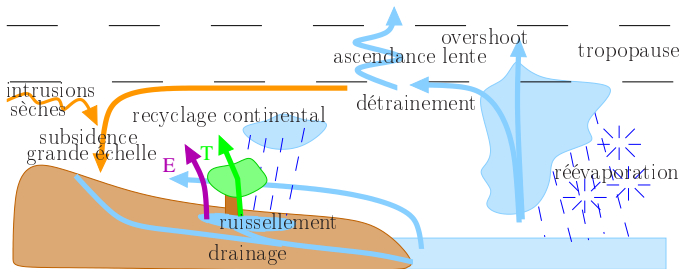
# Perspectives (1/5): nouvelles données disponibles

- ▶ données satellites de  $\delta D$  dans la vapeur:
  - ▶ SCIAMACHY (Frankenberg et al 2009): vapeur couche limite
  - ▶ TES (Worden et al 2007): vapeur 700hPa
  - ▶ IASI (Herbin et al 2009): moyenne troposphère
  - ▶ ODIN (Urban et al 2007), ACE (Nassar et al 2008), MIPAS (Payne et al 2007): haute troposphère-basse stratosphère
- ▶ données in-situ de  $\delta D$  et  $\delta^{18}O$  dans la vapeur: picaros



## Perspectives (2/5): water tagging

- ▶ water tagging dans LMDZ et dans ORCHIDEE: outil diagnostique très prometteur
  - ▶ contrôles de l'humidité atmosphérique: traçage processus source d'humidité, identification de biais dans les modèles
  - ▶ composante continentale du cycle de l'eau: variations des débits des fleuves, rôle de l'irrigation...





## Perspectives (3/5): contrainte de la sensibilité climatique des modèles

- ▶ comparaison directe des enregistrements isotopiques simulés et observés
- ▶ aux pôles:  $\delta$  indique la température
- ▶ dans les Tropiques:  $\delta$  indique plutôt l'activité convective
- ▶ nouvelles possibilités avec isotopes dans le modèle couplé: ex: cellulose des arbres dans LMDZ-ORCHIDEE

# Perspectives (4/5): contraintes de paramétrisations

- ▶ isotopes sensibles à processus peu contraints dans les paramétrisations:
  - ▶ réévaporation de la pluie
  - ▶ efficacité de précipitation
  - ▶ partition drainage/ ruissellement/ évaporation de sol nu/ transpiration
- ▶ projets d'intercomparaison de GCMs (SWING)  $\Rightarrow$  potentiel de contrainte des paramétrisations physiques par les isotopes?

## Perspectives (5/5):

### $^{17}\text{O}$ -excess: un nouveau traceur

$$d\text{-excess} = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$$

$$^{17}\text{O}\text{-excess} = 10^6 \cdot \left( \ln \left( \frac{\delta^{17}\text{O}}{1000} + 1 \right) - 0.528 \cdot \ln \left( \frac{\delta^{18}\text{O}}{1000} + 1 \right) \right)$$

- ▶ analogue au d-excess
- ▶ exprimé en permeg
- ▶ conservé lors d'une distillation
- ▶ information complémentaire par rapport à  $\delta$  ou  $d$
- ▶ Mesures d' $^{17}\text{O}$ -excess en cours au LSCE (Amaelle Landais)