

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)

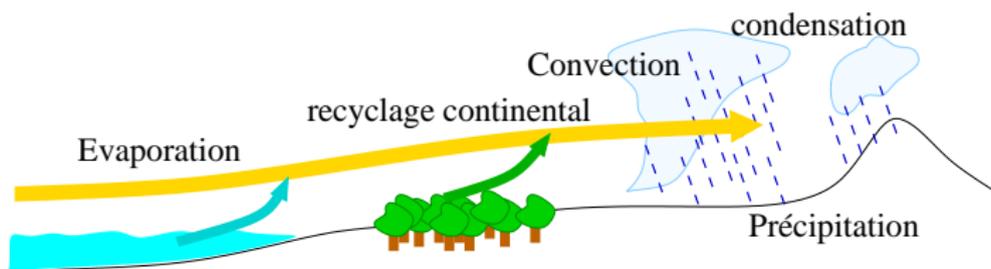
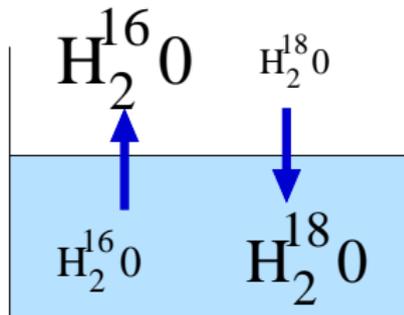
Camille Risi

LMD/IPSL, Paris

26 novembre 2009

Les isotopes stables de l'eau

- ▶ eau = molécules légères ($H_2^{16}O$) + lourdes ($H_2^{18}O$, HDO , $H_2^{17}O$)
- ▶ fractionnement isotopique
- ▶ composition isotopique
 - ▶ $\delta^{18}O$ = enrichissement en $H_2^{18}O$ par rapport à un standard (‰)
 - ▶ δD = enrichissement en HDO par rapport à un standard (‰)
 - ▶ d-excess = $\delta D - 8 \cdot \delta^{18}O$
- ▶ sensible aux changements de phase



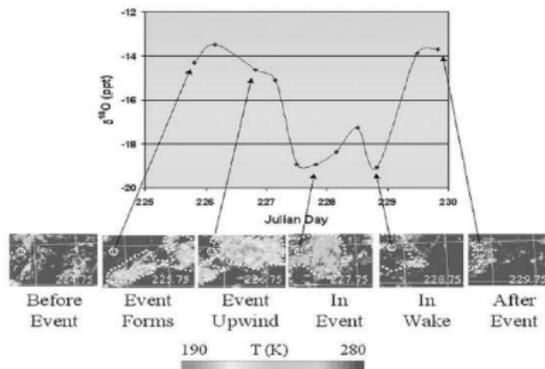
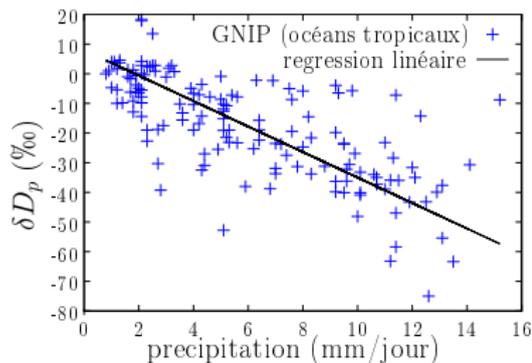
Plan

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



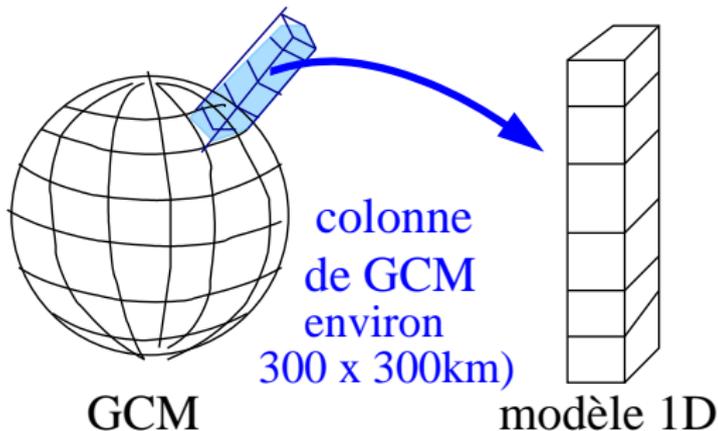
Lawrence et al 2004

- **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

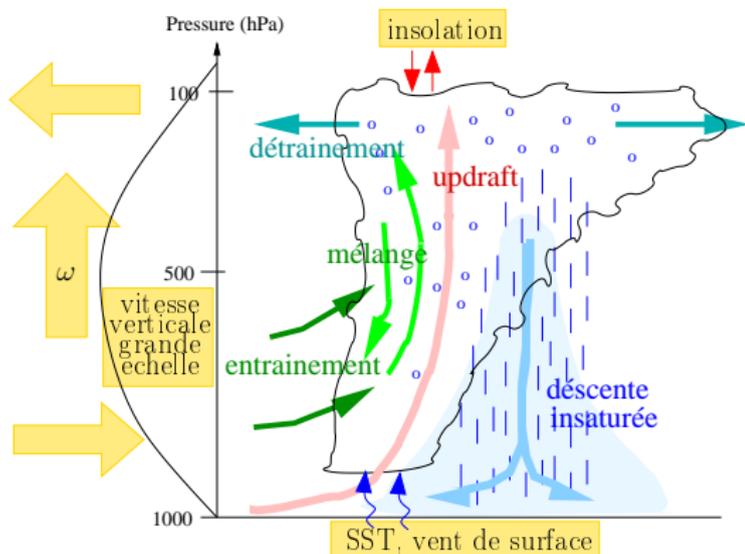
- Conditions aux limites
- schéma de convection d'Emanuel ⇒ représentation détaillée des processus isotopiques



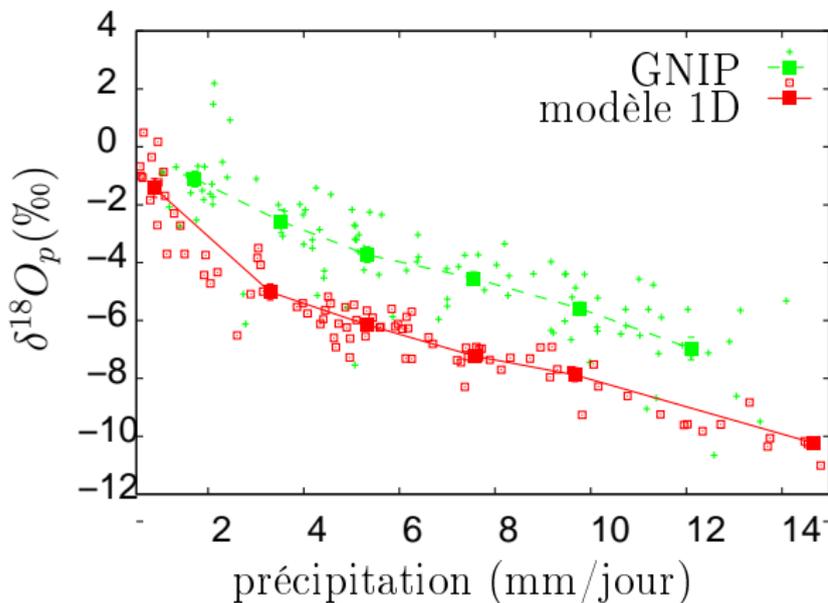
Modèle 1D

- ▶ 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

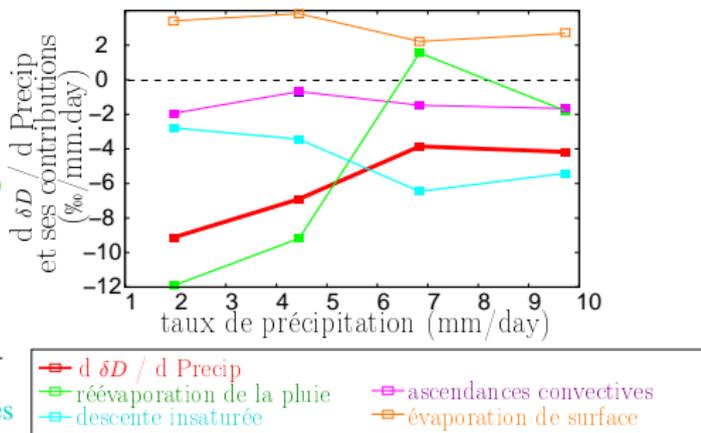
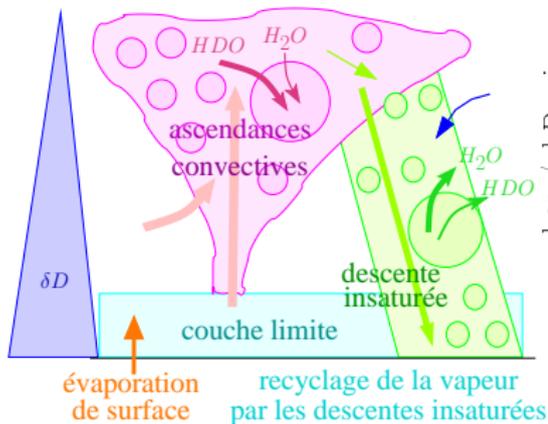


- ▶ bonne simulation de l'amount effect

Bony, Risi et Vimeux 2008

Quels processus expliquent l'amount effect?

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

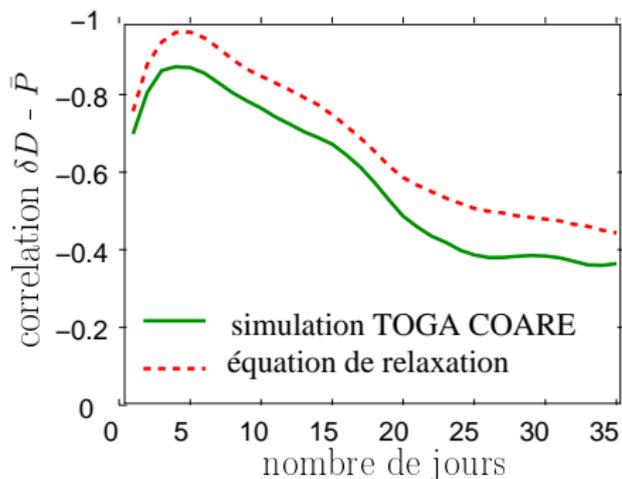


- ▶ principaux processus: rééaporation de la pluie et descentes insaturées

Risi, Bony et Vimeux 2008

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

- ▶ Simulation TOGA COARE (Pacifique Ouest)



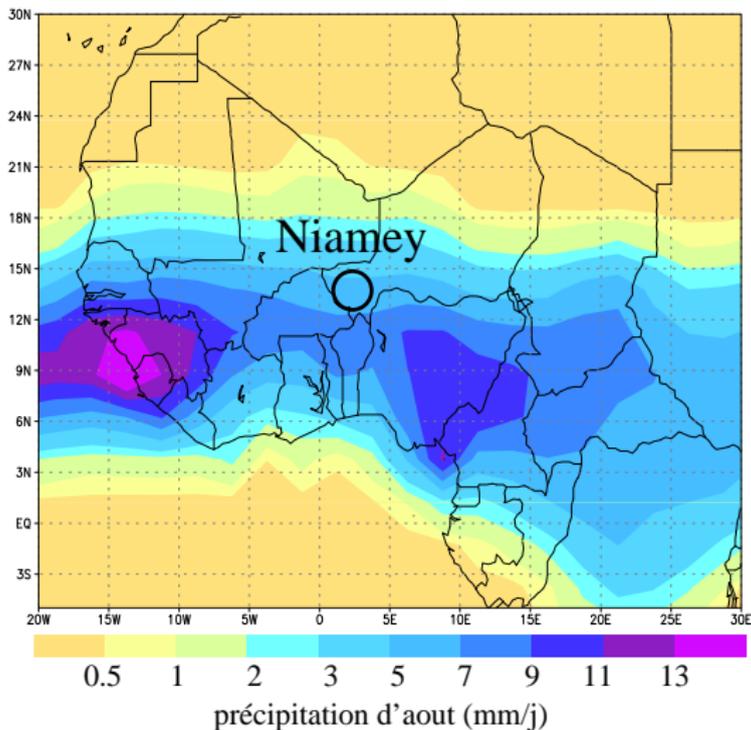
- ▶ équation simple de relaxation:

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 equation:

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

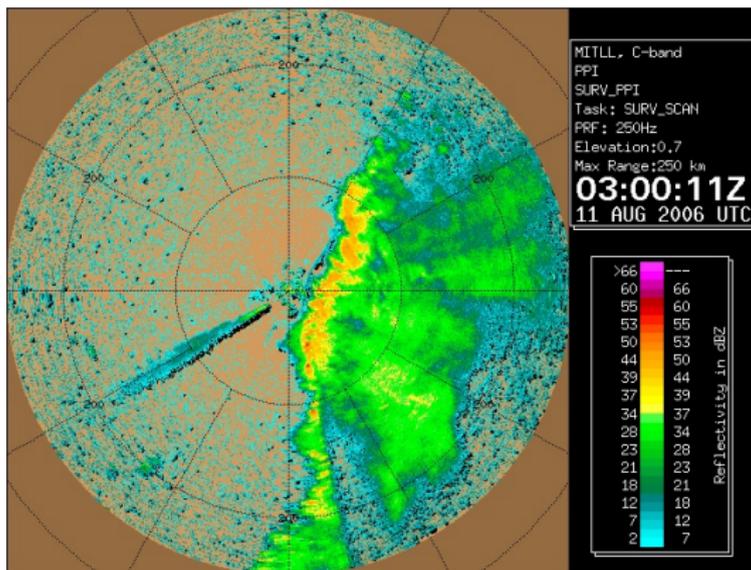
- ▶ La composition isotopique intègre la convection sur les jours précédents

Prélèvements pendant la campagne AMMA



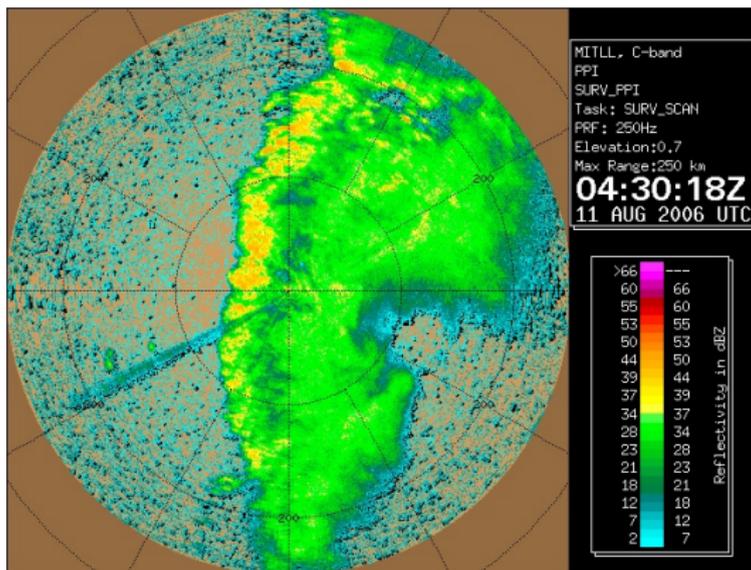
Echantillonnage intra-évènement

Ligne du grains du 11 aout 2006



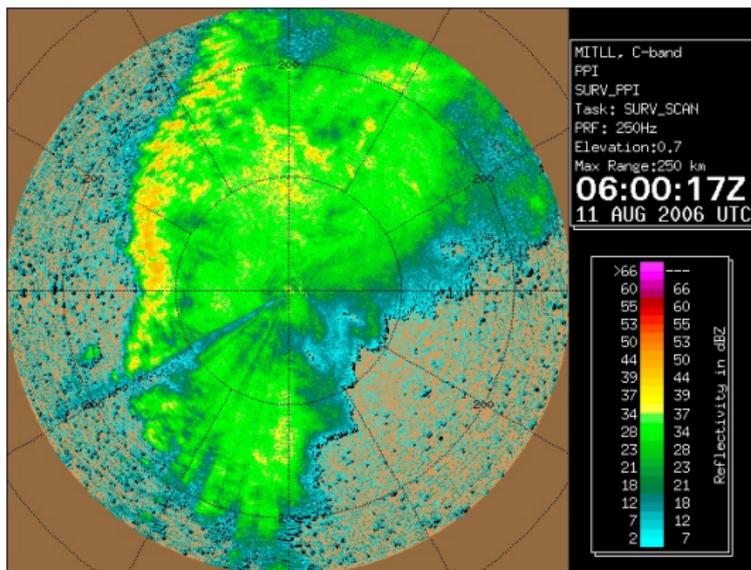
Echantillonnage intra-évènement

Ligne du grains du 11 aout 2006

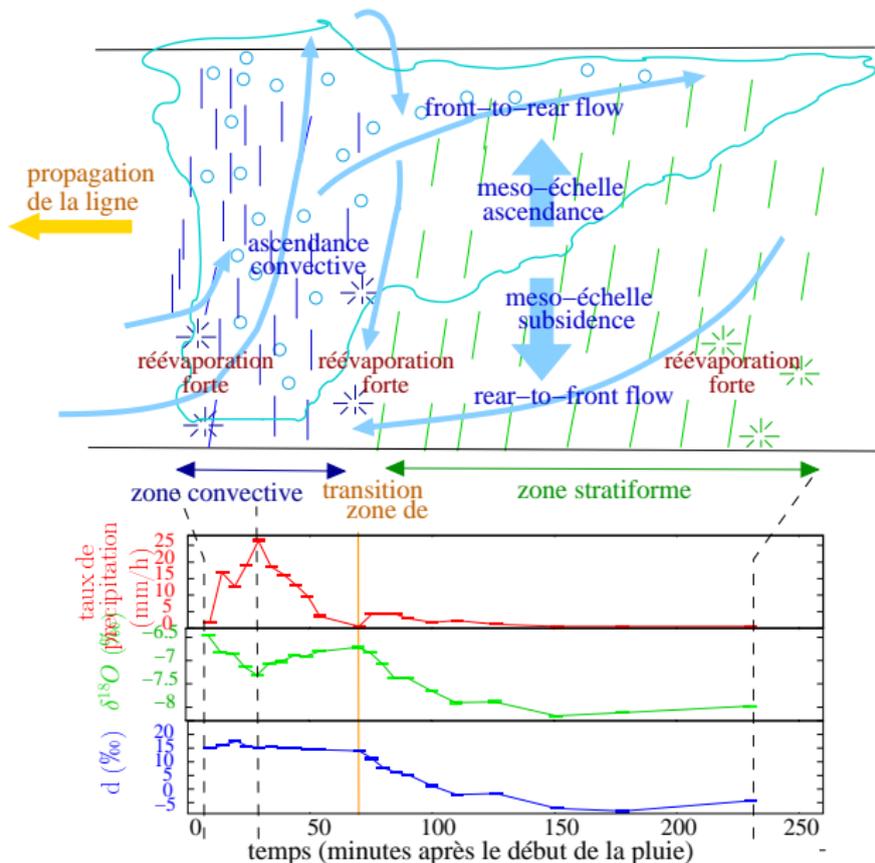


Echantillonnage intra-évènement

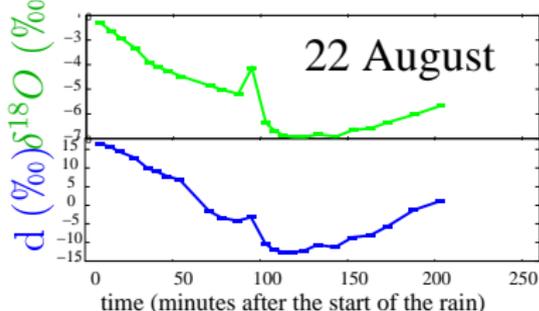
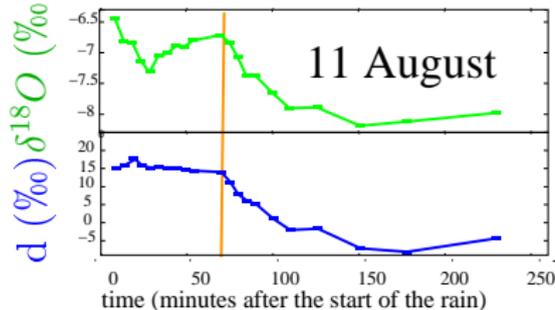
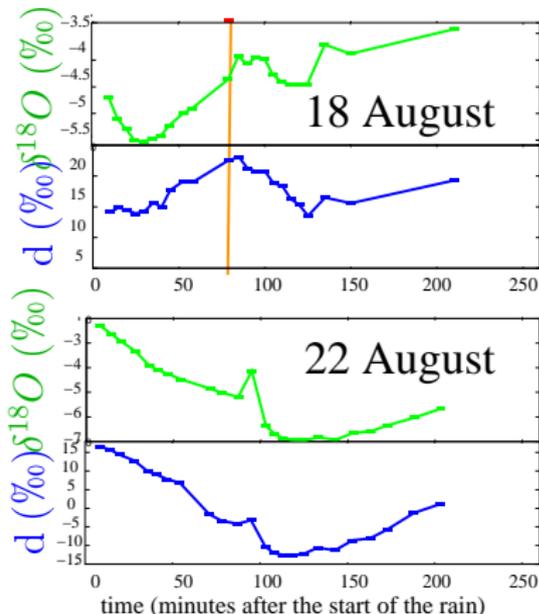
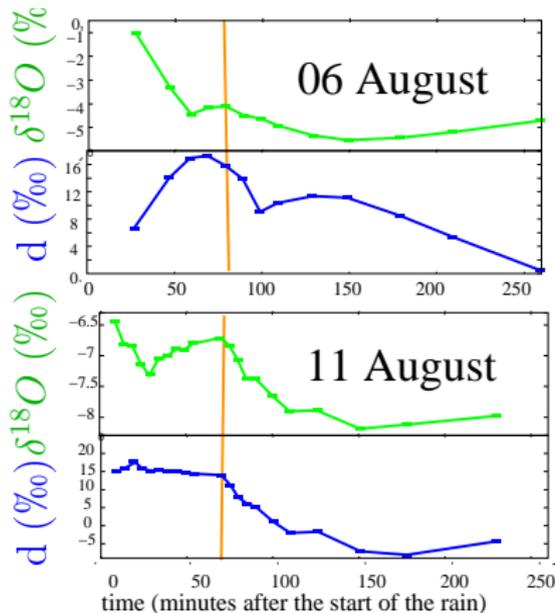
Ligne du grains du 11 aout 2006



Mesures le 11 aout 2006



Propriétés robustes entre les lignes de grains

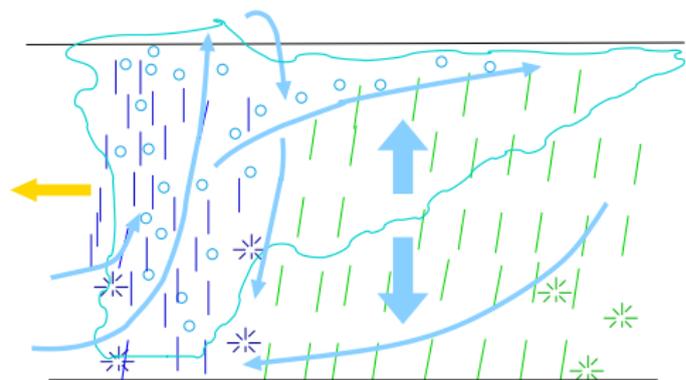


► forte variabilité entre lignes, mais propriétés robustes:

► $\delta^{18}O$ en W,

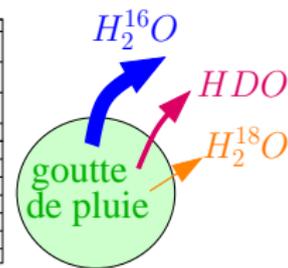
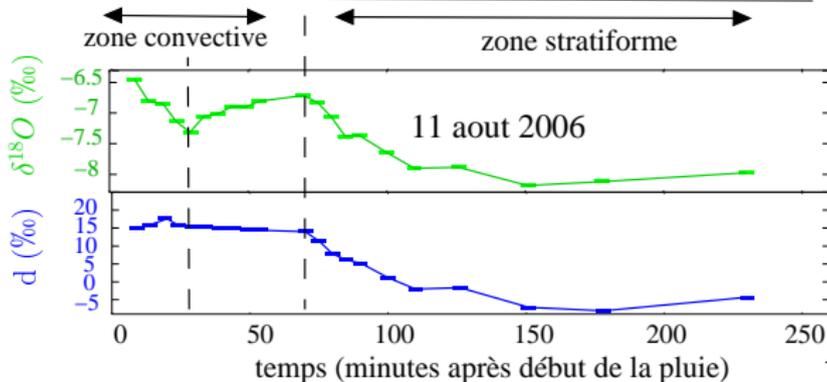
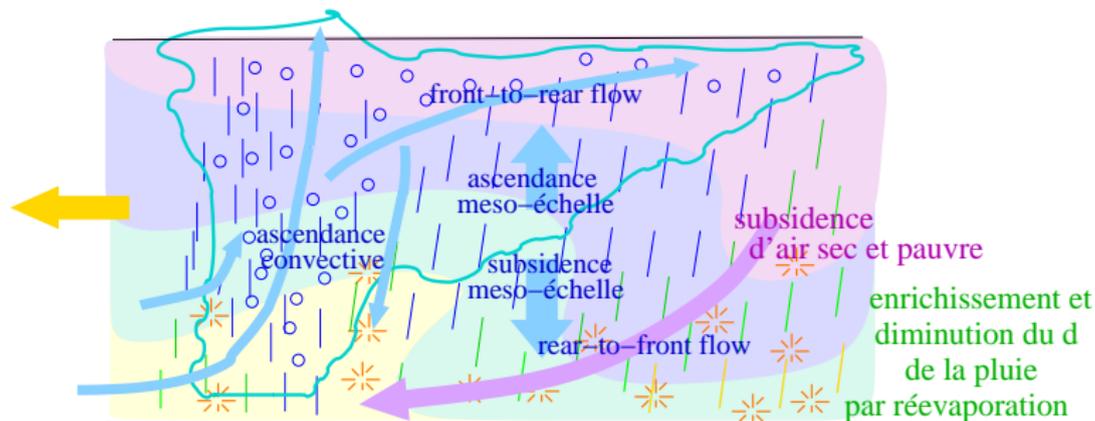
► diminution du d -excess en début de zone stratiforme

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

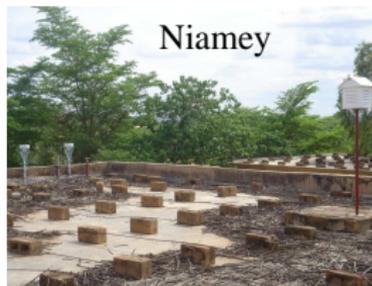
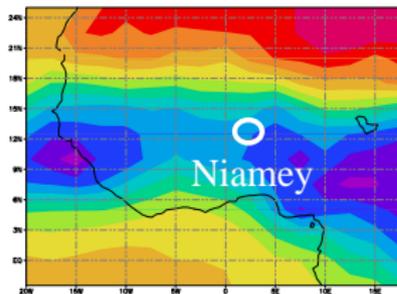


Bilan des processus convectifs affectant la composition isotopique de la précipitation

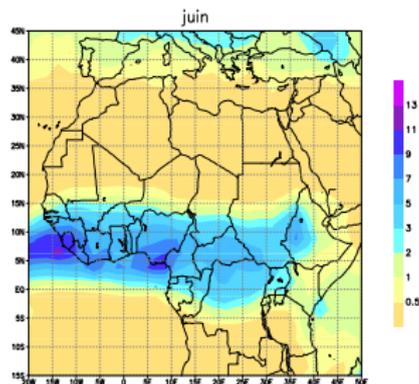
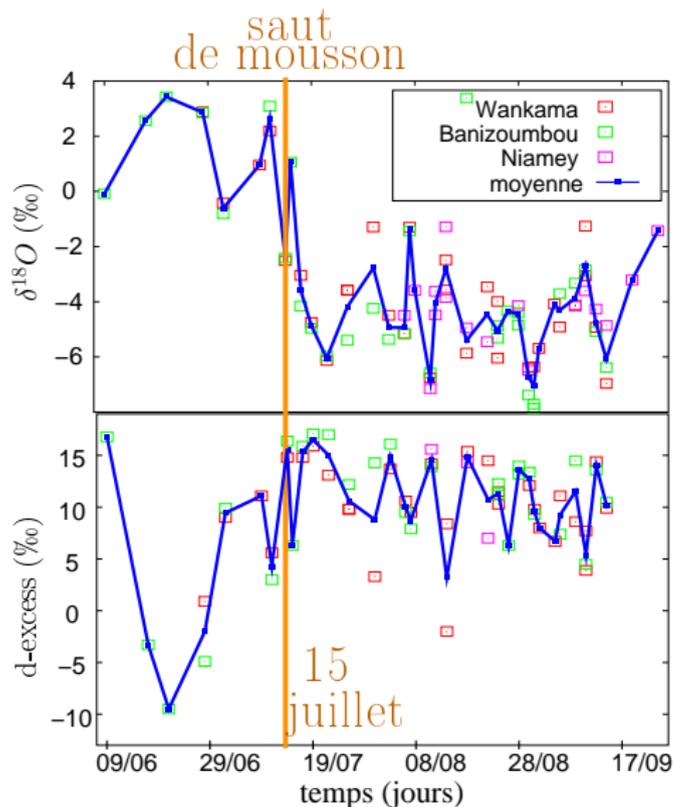
- ▶ Processus identifiés à la fois dans données intra-événement et modèle 1D
 - ▶ réévaporation des gouttes
 - ▶ subsidences convectives
- ▶ intégration de la convection sur les jours précédents

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

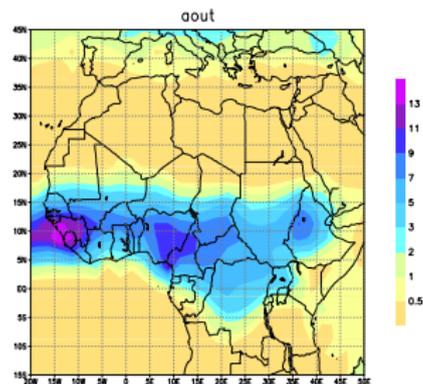
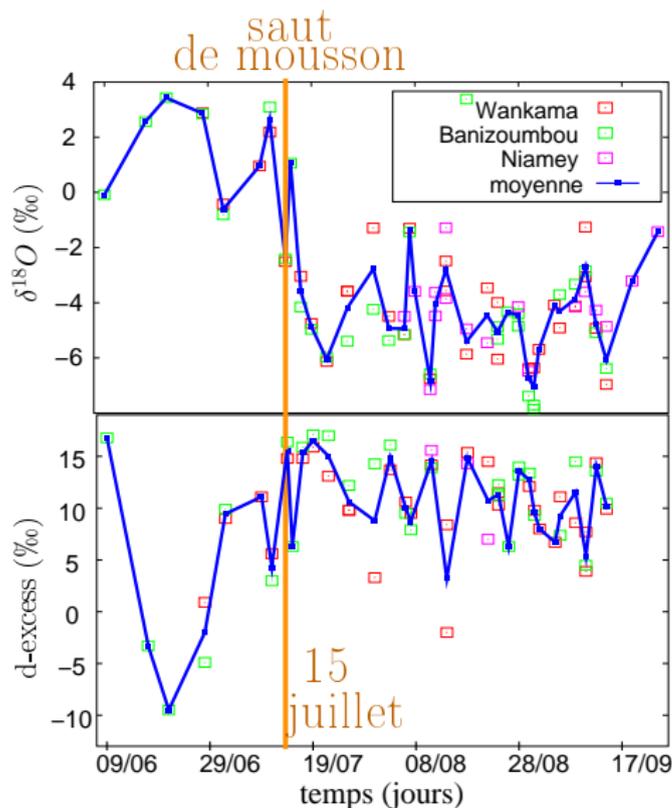


Evolution au cours de la mousson



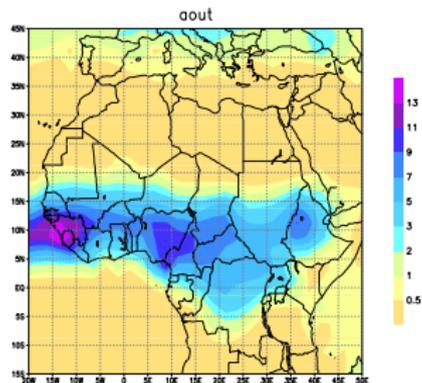
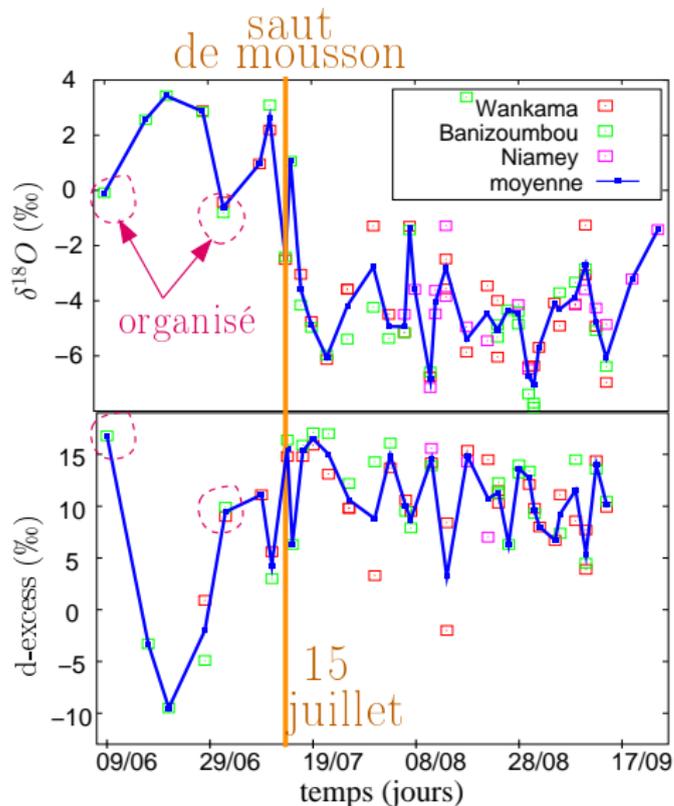
- ▶ les isotopes enregistrent l'activité convective
- ▶ saut de mousson
- ▶
- ▶

Evolution au cours de la mousson



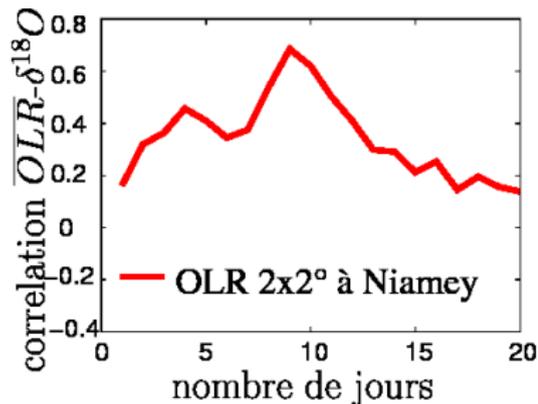
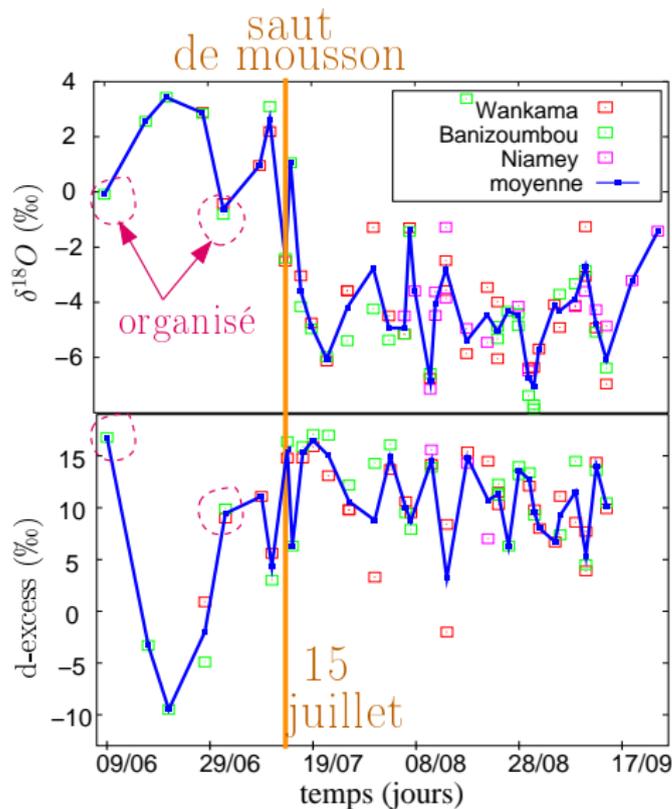
- ▶ les isotopes enregistrent l'activité convective
- ▶ saut de mousson
- ▶
- ▶

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

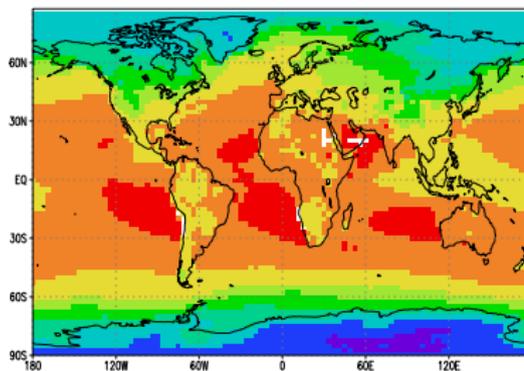


- ▶ les isotopes enregistrent l'activité convective
 - ▶ saut de mousson
 - ▶ avant la mousson: organisation et intensité des systèmes
 - ▶ après la mousson: le $\delta^{18}O$ intègre temporellement la convection

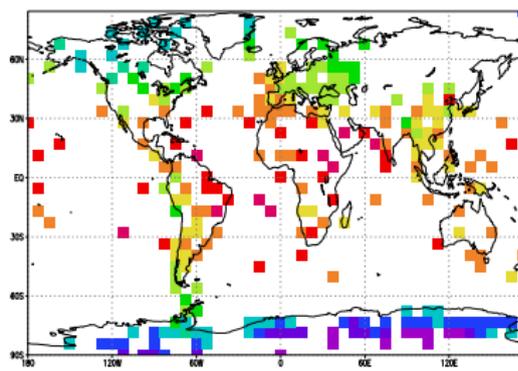
Utilisation de simulations avec LMDZ

- ▶ 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



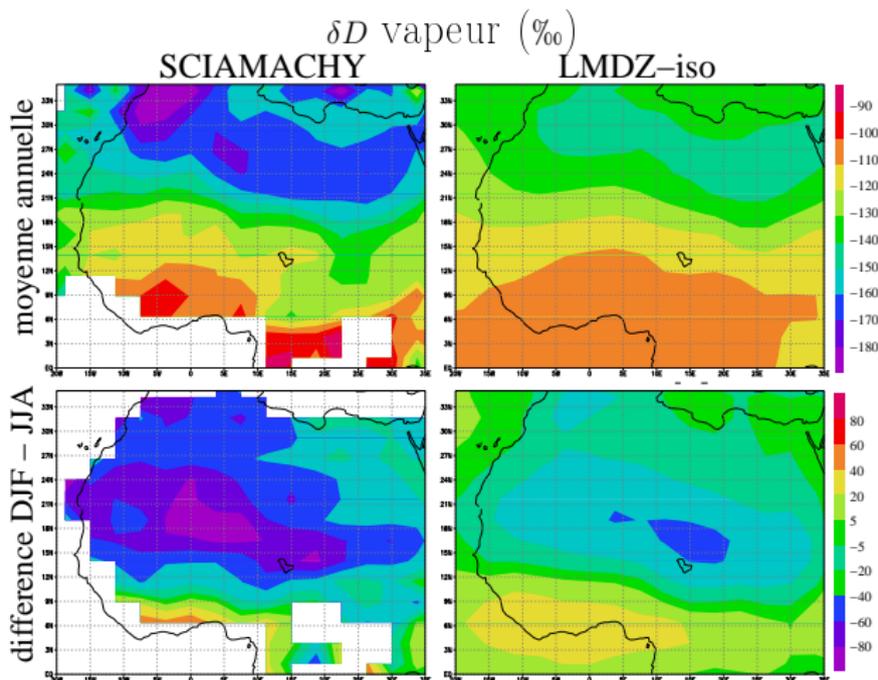
$\delta^{18}\text{O}$ (‰) observations



Evaluation sur le Sahel: données satellites

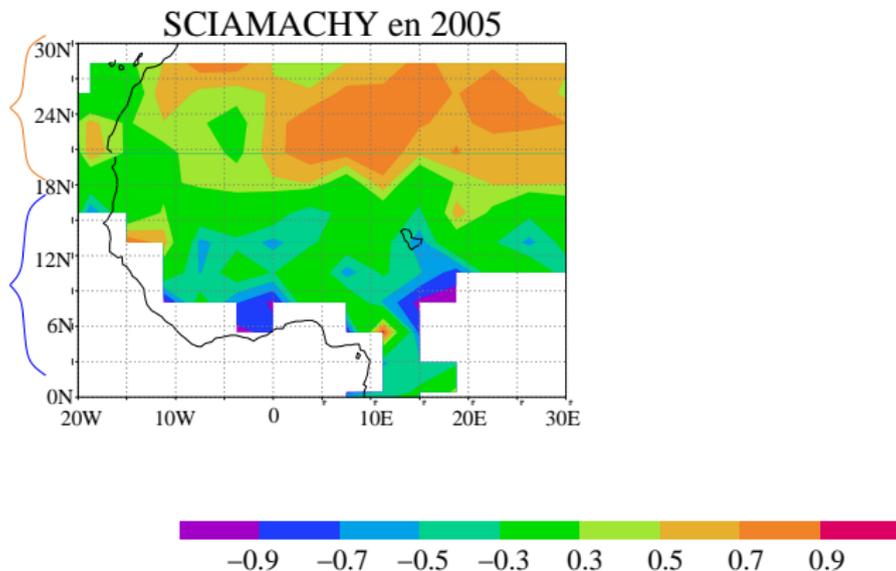
SCIAMACHY

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



Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

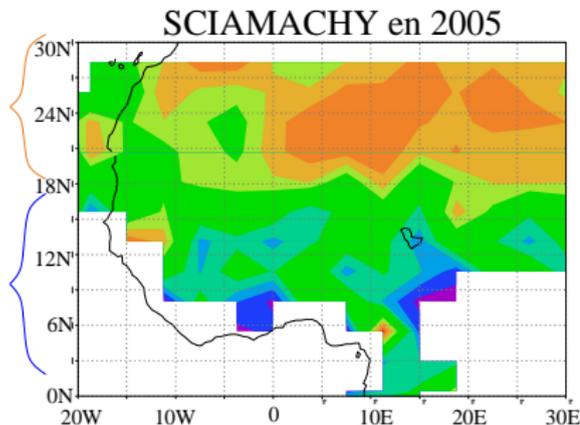
correlation entre eau précipitable et δD
à l'échelle intra-saisonnière en JJA



Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

correlation entre eau précipitable et δD
à l'échelle intra-saisonnière en JJA

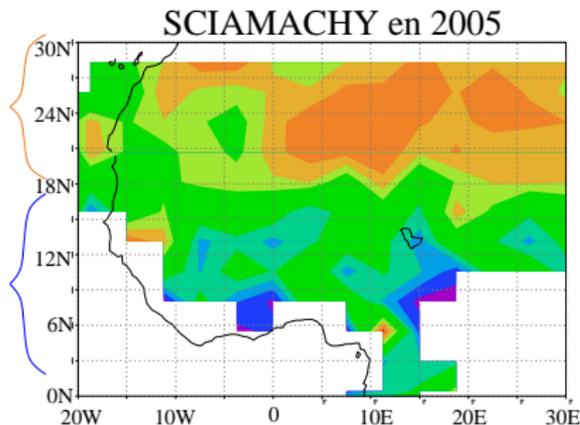
subsidence \nearrow $\left\langle \begin{array}{l} \text{prw} \\ \delta D \end{array} \right\rangle \searrow$



Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

correlation entre eau précipitable et δD
à l'échelle intra-saisonnière en JJA

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



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



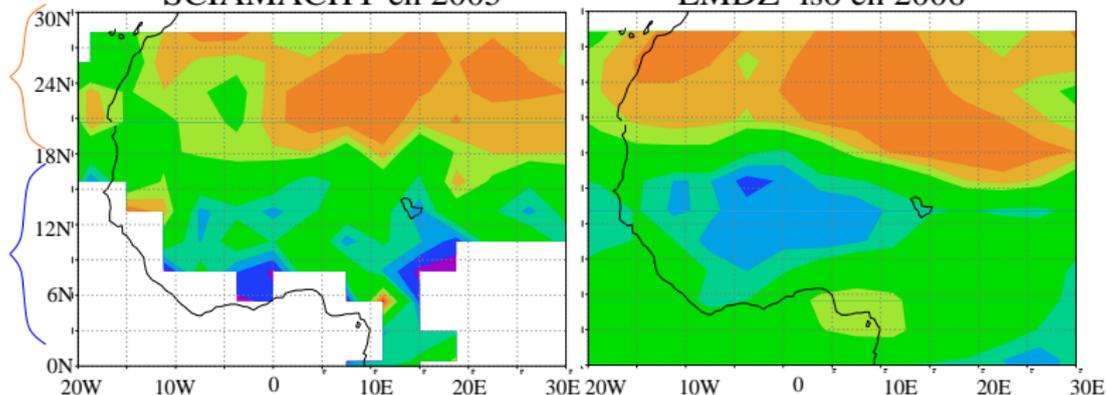
Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

correlation entre eau precipitable water et δD
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

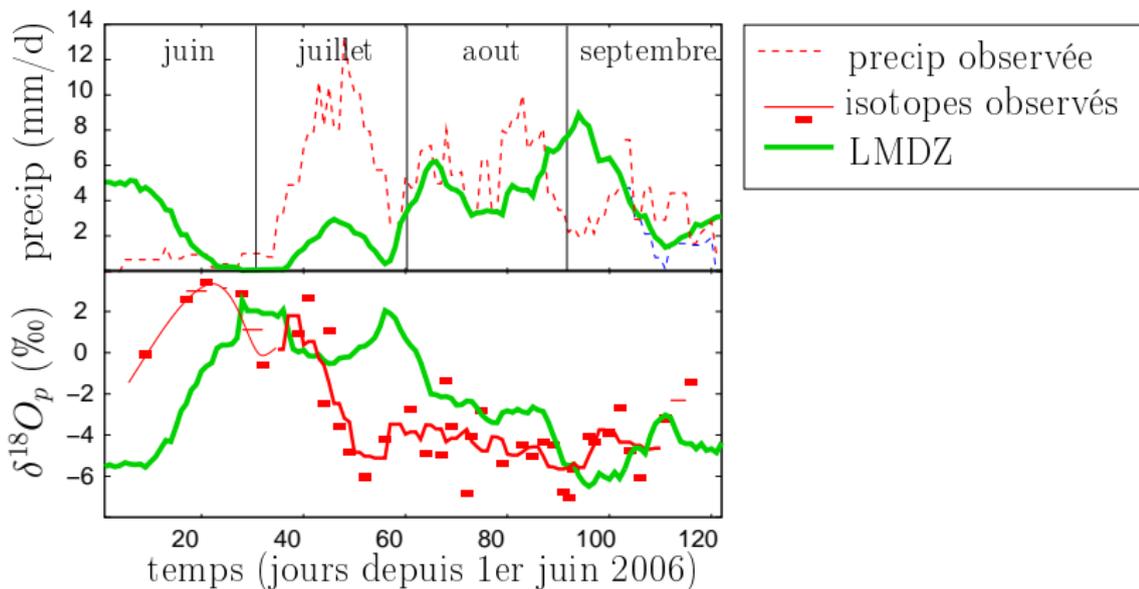
LMDZ-iso en 2006



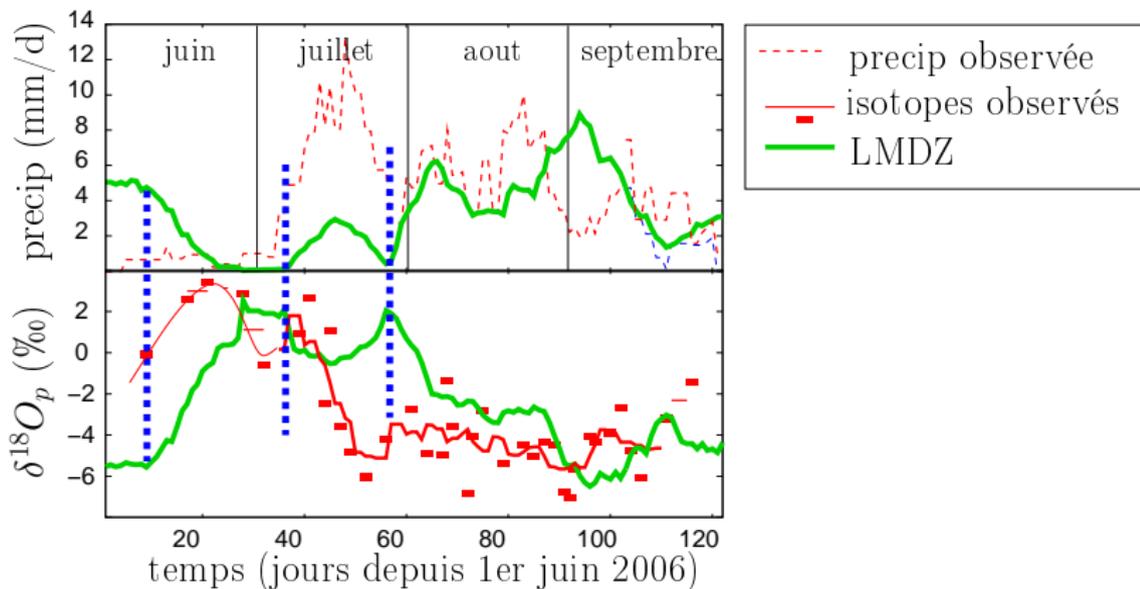
convection \nearrow $\left\langle \begin{array}{l} \text{prw} \\ \delta D \end{array} \right\rangle \searrow$



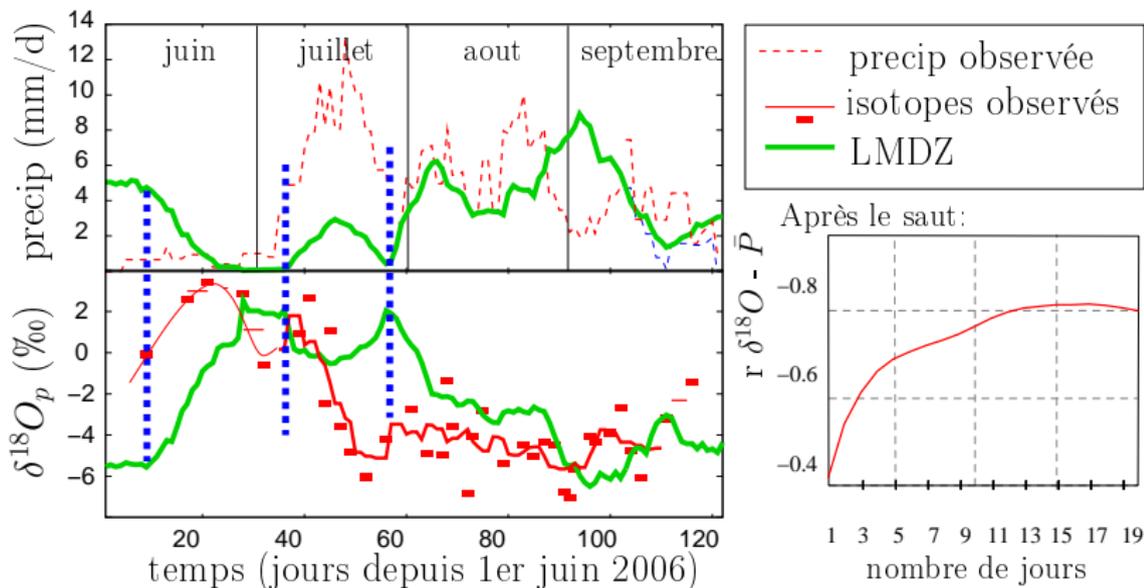
LMDZ-iso sur Niamey



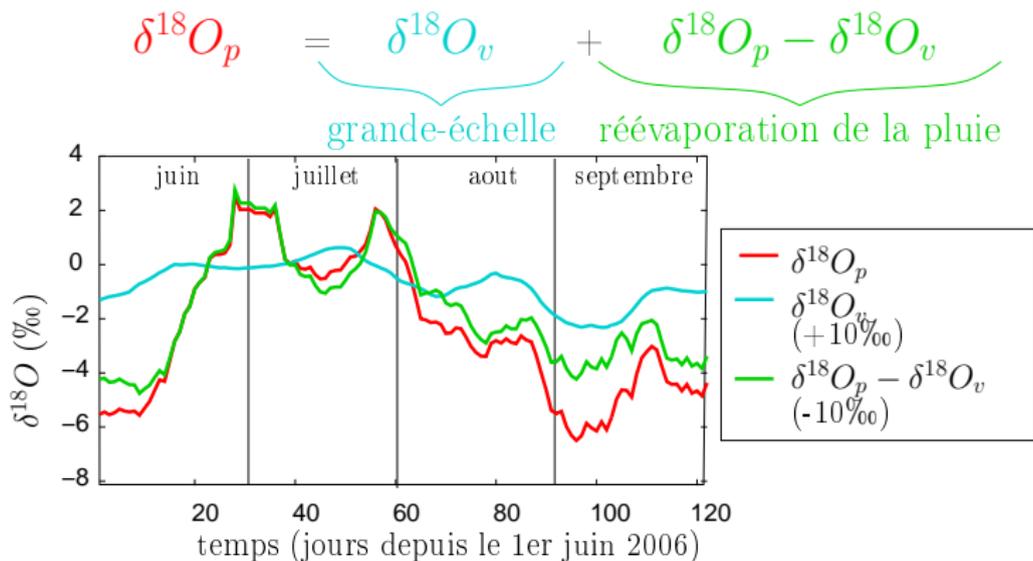
LMDZ-iso sur Niamey



LMDZ-iso sur Niamey



Variabilité intra-saisonnière dans LMDZ

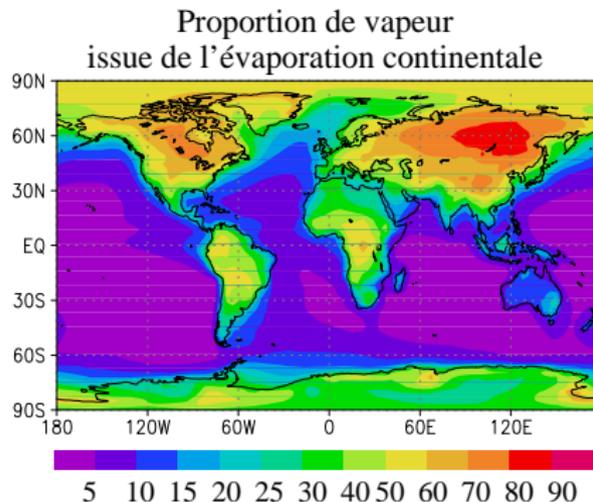
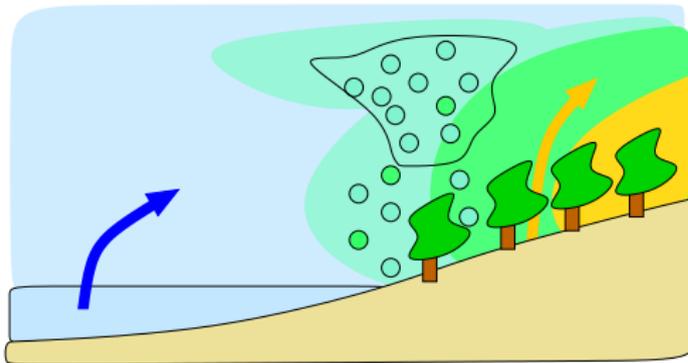


- ▶ avant le saut: réponse instantanée à la convection, par le biais de la réévaporation des gouttes
- ▶ après le saut: intégration de la convection, en partie par le biais de la vapeur

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:



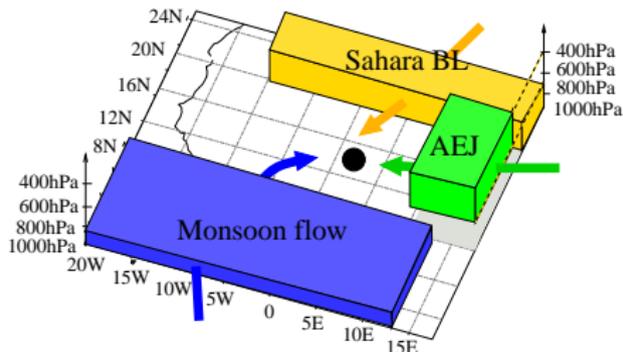
Water tagging sur Niamey

% de la vapeur s'étant évaporée sur:

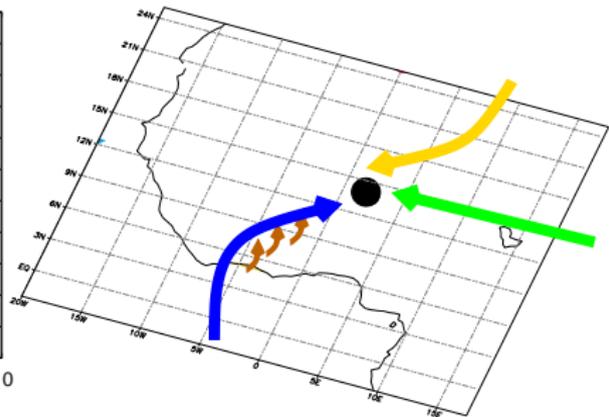
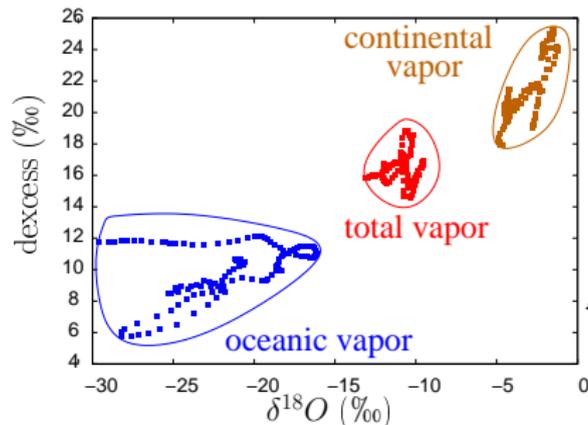
	JAS	DJF
continent	60%	30%
Atlantique	30%	45%
Méditerranée	2%	10%
Indien	10%	15%

% de la vapeur étant passée par:

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



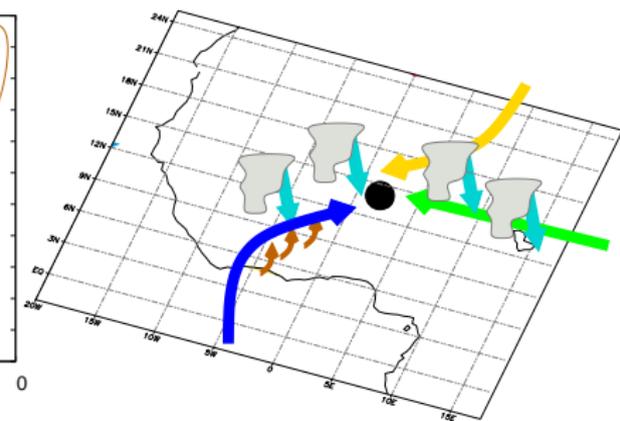
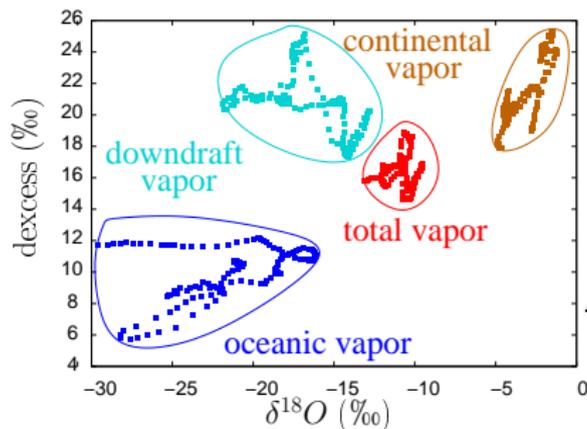
Isotopes et origine de la vapeur



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



Isotopes and convection



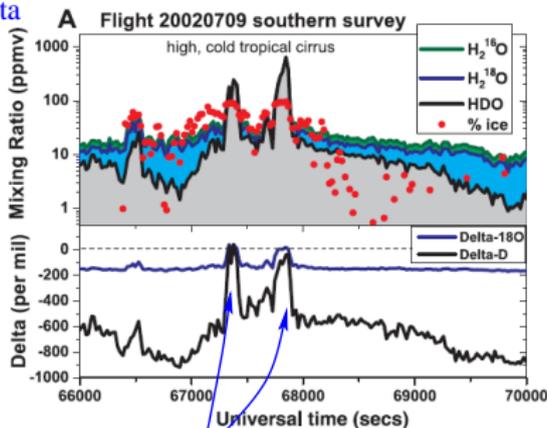
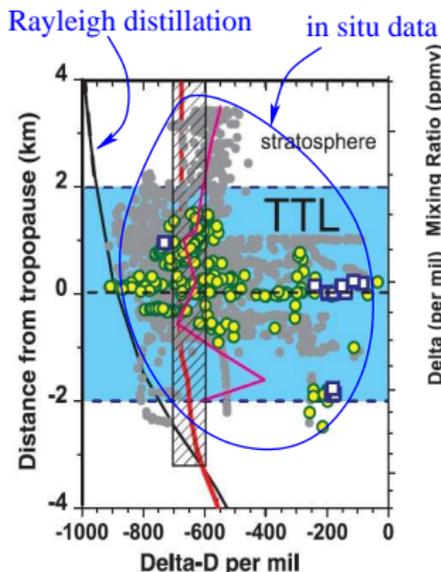
- ▶ signature particulière de la vapeur continentale \Rightarrow potentiel d'évaluation du recyclage continental?
- ▶ appauvrissement de la vapeur par les descentes insaturées
- ▶ à l'échelle intra-saisonniers: la vapeur océanique est appauvrie par les descentes insaturées le long des trajectoires du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



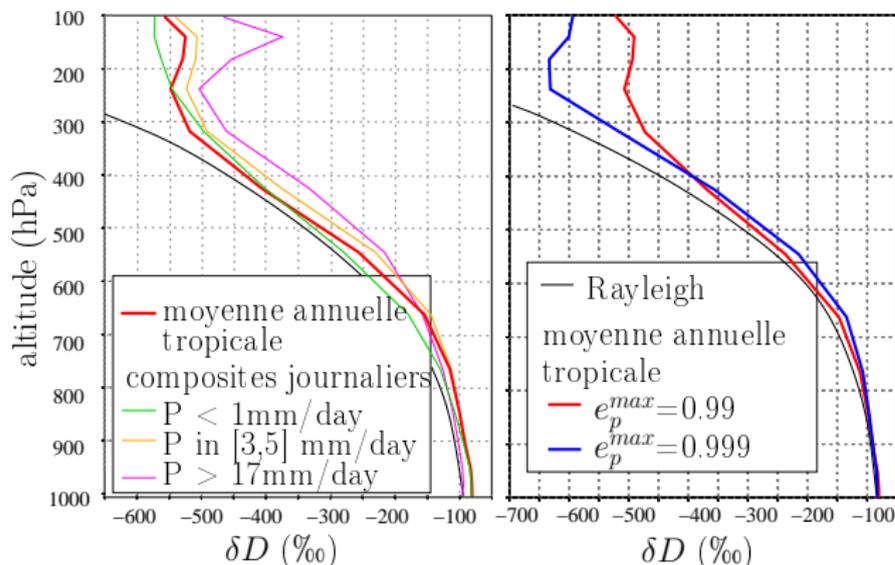
enrichment associated
with convection

Webster et al 2003

Résultats de modélisation

► GCM LMDZ

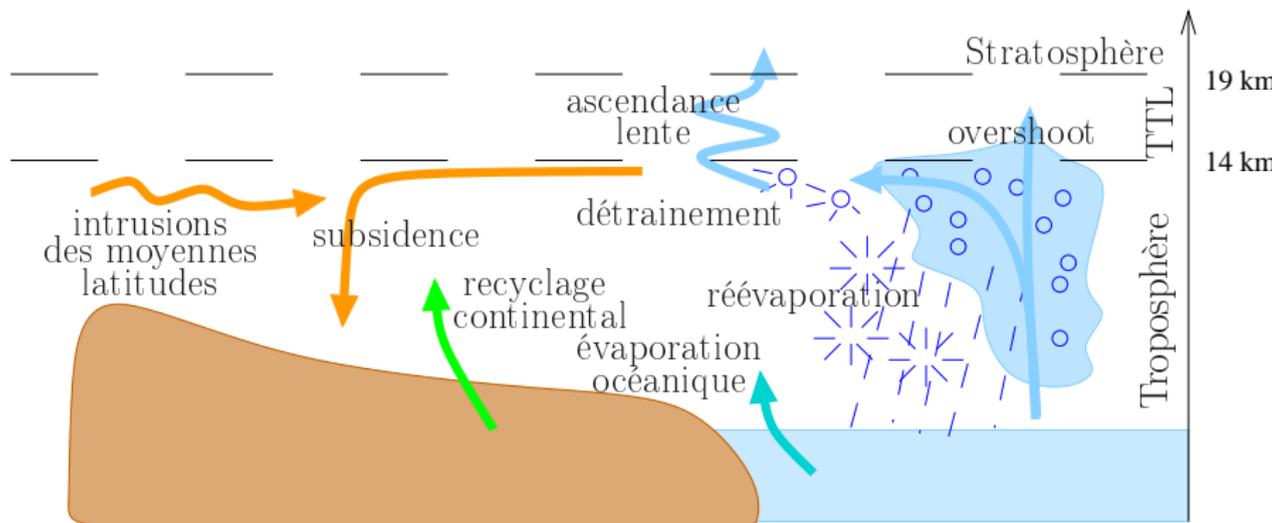
- impact de l'activité convective à l'échelle journalière
- enrichissement dépend du détrainement de condensat



► potentiel des isotopes pour contraindre rôle de la convection

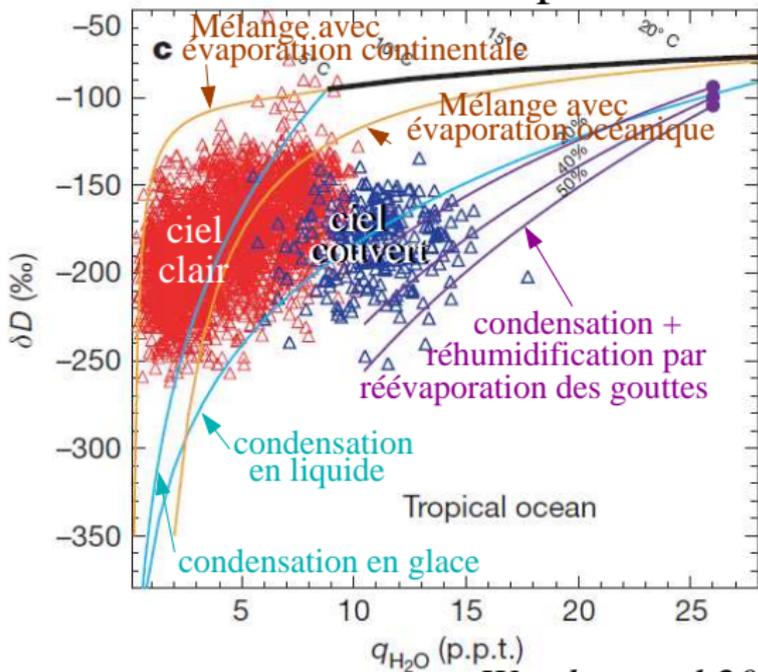
Isotopes et processus contrôlant l'humidité troposphérique

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



Isotopes et processus contrôlant l'humidité troposphérique

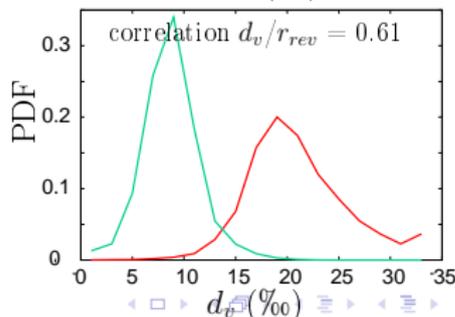
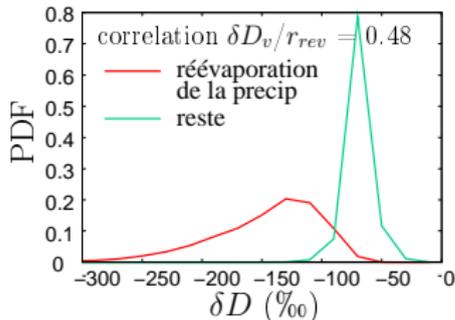
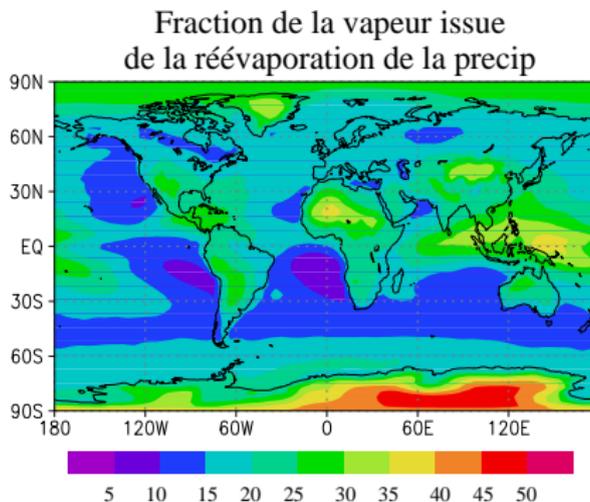
Données satellite TES: vapeur à 700hPa



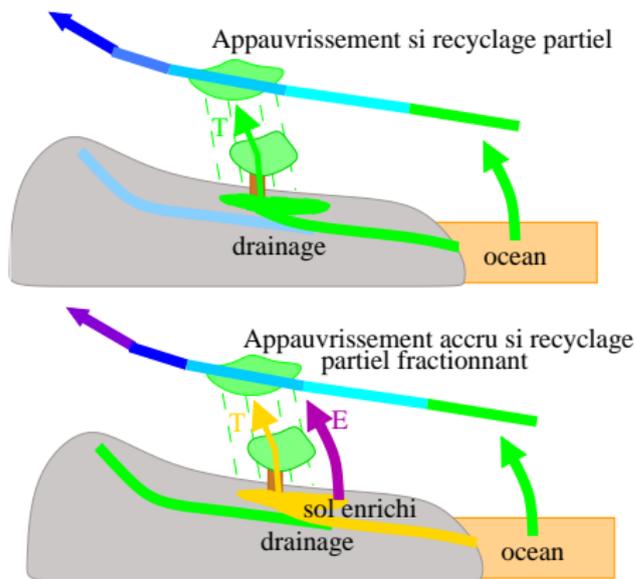
Worden et al 2007

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?



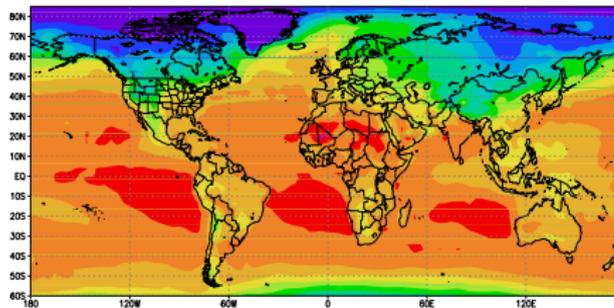
Isotopes et hydrologie continentale



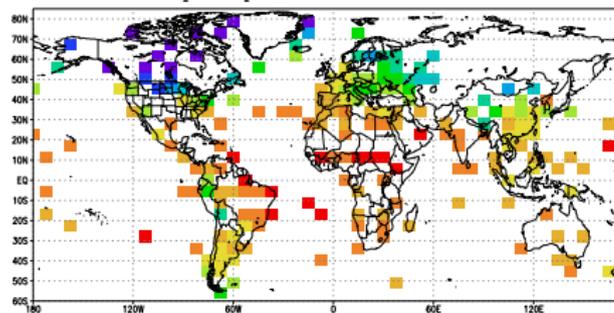
- ▶ Le taux de recyclage affecte gradients continentaux de δ (*Rozanski et al 1992*)
- ▶ Le type de recyclage affecte la
 - ▶ différence δ sol/évapo-transpiration (*Moreira et al 1997*)
 - ▶ gradients continentaux (*Gat et mastui 1991*)

Evaluation du modèle couplé LMDZ-ORCHIDEE-iso

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

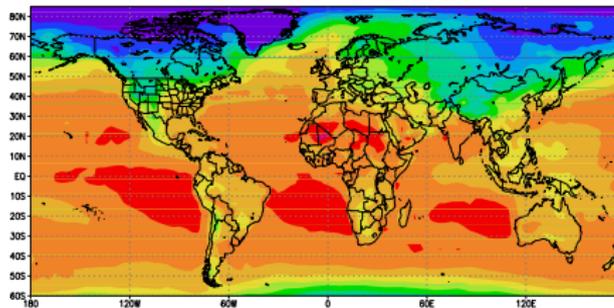


$\delta^{18}O$ precipitation données GNIP

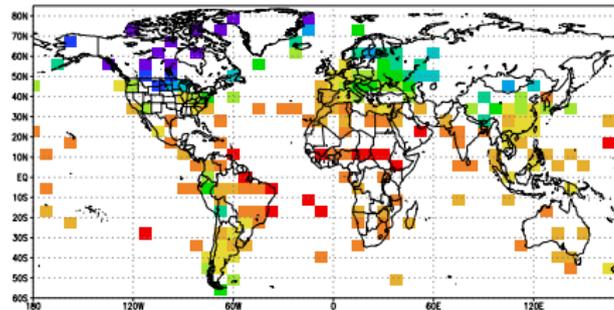


Evaluation du modèle couplé LMDZ-ORCHIDEE-iso

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



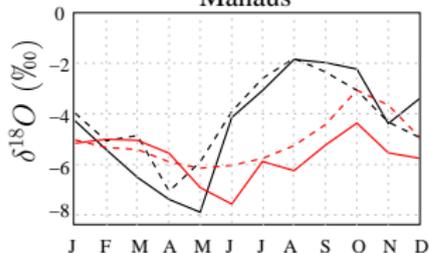
$\delta^{18}O$ precipitation données GNIP



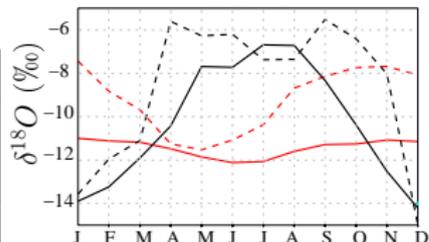
-35 -20 -18 -16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2 0

cycle saisonniers dans les rivières

Manaus



Vienne



Précipitation

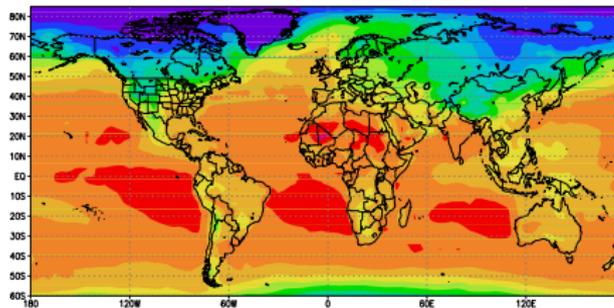
— données GNIP
- - - LMDZ-ORCHIDEE

Rivières

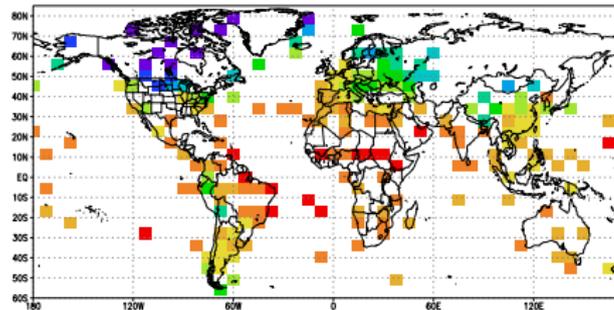
— données GNIR
- - - LMDZ-ORCHIDEE:

Evaluation du modèle couplé LMDZ-ORCHIDEE-iso

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



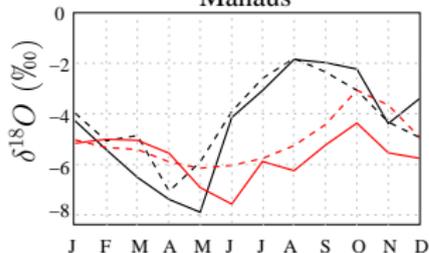
$\delta^{18}O$ precipitation données GNIP



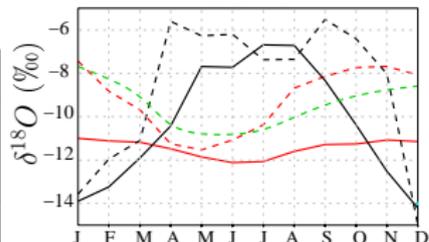
-35 -20 -18 -16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2 0

cycle saisonniers dans les rivières

Manaus



Vienne



Précipitation

— données GNIP

- - - LMDZ-ORCHIDEE

Rivières

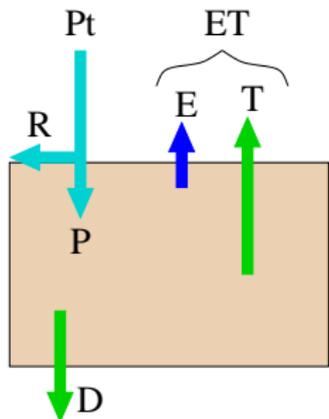
— données GNIR

- - - LMDZ-ORCHIDEE:

- · - · - réservoir souterrain lent

Reconstruction du bilan hydrologique de surface par les isotopes

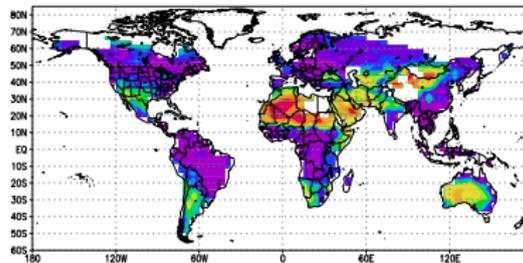
- expérience “modèle parfait”



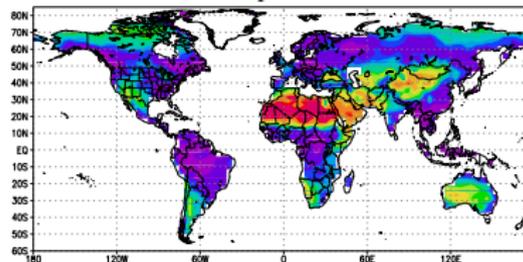
- si hypothèses simples:

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

E/P (%)
reconstruit par les isotopes:



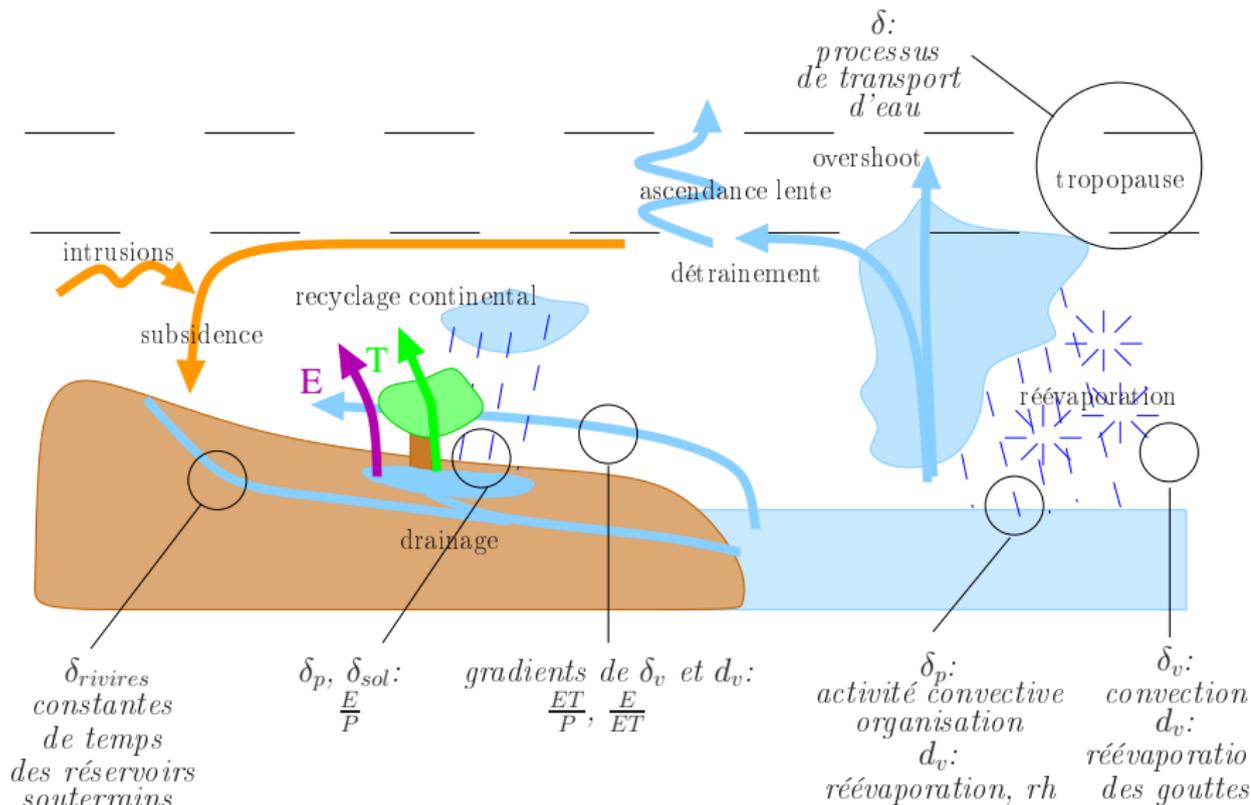
Simulé par LMDZ:



Apports des isotopes aux problèmes d'hydrologie de surface

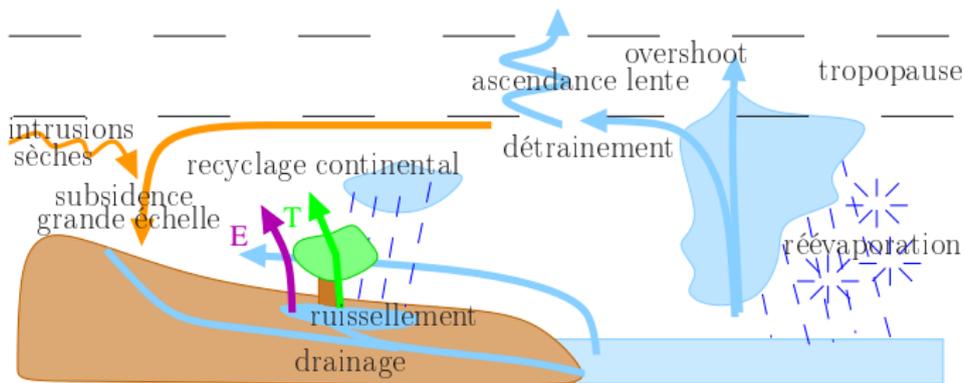
- ▶ effet des processus hydrologiques de surface:
 - ▶ second ordre pour la compositions atmosphériques
 - ▶ fort impact sur les réservoirs continentaux
- ▶ en retour:
 - ▶ contrainte des bilans d'eaux continentaux par méthodes isotopiques
 - ▶ contrainte de paramétrisations
- ▶ perspectives: développement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

Conclusion



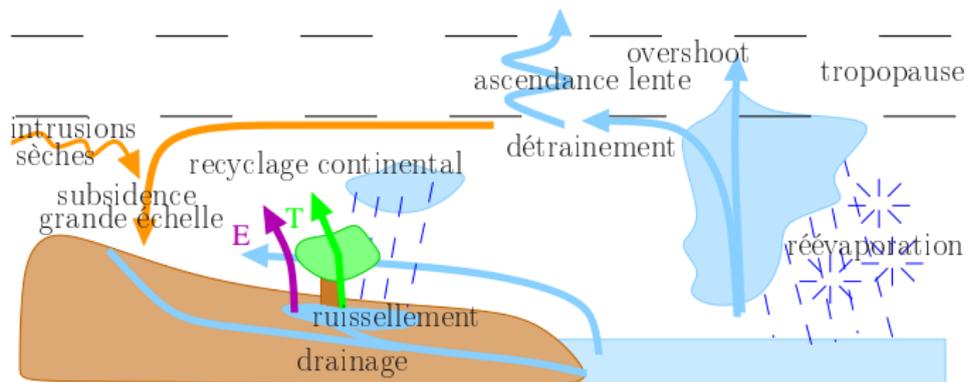
Perspectives (1/5): nouvelles données disponibles

- ▶ données satellites de δD 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 δD 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: δ indique la température
- ▶ dans les Tropiques: δ 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}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 δ ou d
- ▶ Mesures d' ^{17}O -excess en cours au LSCE (Amaelle Landais)