Les isotopes stables de l'eau:
applications à l'étude du cycle de l'eau
et des variations du climat
thèse dirigée par Sandrine Bony et Jean Jouzel

#### Camille Risi

Laboratoire de Météorologie Dynamique Institut Pierre-Simon Laplace, Paris (France)

7 décembre 2009

## Les isotopes stables de l'eau

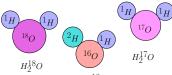
- ▶ eau =  $H_2^{16}O$ +  $H_2^{18}O$  (0.2%), HDO(0.015%),  $H_2^{17}O$  (0.004%)
- ► fractionnement isotopique
- ▶ Définitions:
  - $\delta^{18}O = \text{richesse en } H_2^{18}O$  par rapport à un standard (%)

$$\delta^{18} O = \left(\frac{\left(\frac{H_2^{18} O}{H_2^{16} O}\right)_{\acute{e}chantillon}}{\left(\frac{H_2^{18} O}{H_2^{16} O}\right)_{\acute{e}chantillon}} - 1\right) \cdot 1000$$

- ▶  $\delta D$ =richesse en HDO (‰)
- d-excess =  $\delta D 8 \cdot \delta^{18} O$



 $H_{2}^{16}O$ 



 $HD^{16}O$ 

2/58

Introduction

## Les isotopes stables de l'eau

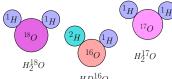
- eau =  $H_2^{16} O$  $+ H_2^{18}O (0.2\%), HDO$  $(0.015\%), H_2^{17}O(0.004\%)$
- fractionnement isotopique
- Définitions:
  - $\delta^{18}O$ =richesse en  $H_2^{18}O$ par rapport à un standard (%)

$$\delta^{18} O = \left( \frac{\left(\frac{H_2^{18} O}{H_2^{16} O}\right)_{\acute{e}chantillon}}{\left(\frac{H_2^{18} O}{H_2^{16} O}\right)_{SMOW}} - 1 \right) \cdot 1000$$

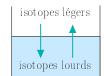
- ▶  $\delta D$ =richesse en HDO (‰)
- d-excess =  $\delta D 8 \cdot \delta^{18} O$



 $H_{2}^{16}O$ 



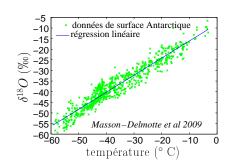
 $HD^{16}O$ 

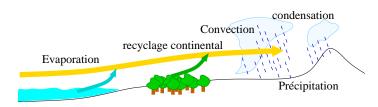


Introduction 2/58

### Applications des isotopes stables de l'eau

- sensible aux changements de phase
- applications paléo-climatiques aux pôles
- applications paléo-climatiques dans les tropiques?

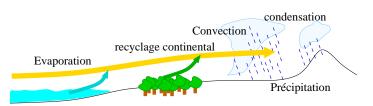




Introduction 3/58

#### Buts de la thèse

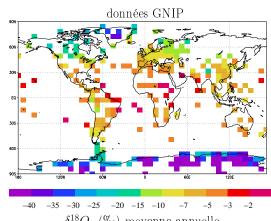
- Qu'est-ce qui contrôle de la composition isotopique dans les tropiques?
  - rôle de la convection atmosphérique?
  - intéractions avec la surface continentale?
- ► En retour: quelles informations sur:
  - ► le cycle de l'eau?
    - processus convectifs
    - hydrologie continentale
  - la représentation de ces processus dans les modèles?
  - les variations du climat?



Introduction 4/58

#### Outils: observations

- ► réseaux internationaux pré-existants de l'AIEA
  - GNIP: précipitation
  - ► GNIR: rivières
  - MIBA: sol, tiges, feuilles, vapeur

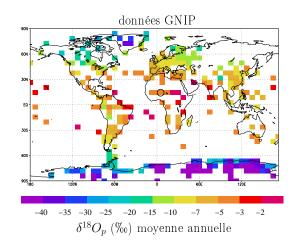


 $\delta^{18}O_p$  (‰) moyenne annuelle

Introduction 5/58

#### Outils: observations

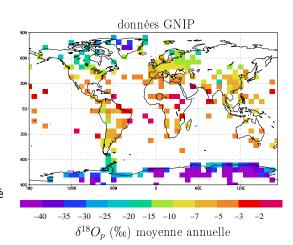
- réseaux internationaux pré-existants de l'AIEA
  - GNIP: précipitation
  - ► GNIR: rivières
  - MIBA: sol, tiges, feuilles, vapeur
- pluie collectée à Niamey pendant l'été 2006 pendant la campagne AMMA



Introduction 6/58

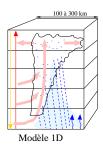
#### Outils: observations

- réseaux internationaux pré-existants de l'AIEA
  - GNIP: précipitation
  - GNIR: rivières
  - MIBA: sol, tiges, feuilles, vapeur
- pluie collectée à Niamey pendant l'été 2006 pendant la campagne AMMA
- données satellite SCIAMACHY: δD intégré verticallement sur 2003-2005, précision maximale sur le Sahel (Frankenberg et al 2009)



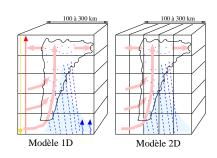
Introduction 7/58

- ► Modèle 1D d'atmosphère tropicale



Introduction 8/58

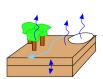
- ► Modèle 1D d'atmosphère tropicale
- ► Modèle 2D de lignes de grains



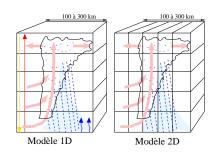
Introduction 9/58

- ► Modèle 1D d'atmosphère tropicale
- ► Modèle 2D de lignes de grains
- ► Modèle d'hydrologie continentale: SECHIBA/ORCHIDEE

•

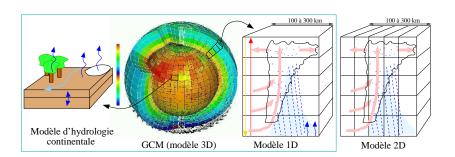


Modèle d'hydrologie



Introduction 10/58

- ► Modèle 1D d'atmosphère tropicale
- ► Modèle 2D de lignes de grains
- ► Modèle d'hydrologie continentale: SECHIBA/ORCHIDEE
- ► Modèle de circulation générale (GCM): LMDZ



Introduction 11/58

#### Plan

1. Isotopes de l'eau et convection atmosphérique

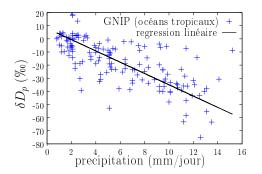
2. Isotopes de l'eau et hydrologie continentale

3. Isotopes de l'eau et variations du climat

Introduction 12/58

### 1. Isotopes et convection atmosphérique

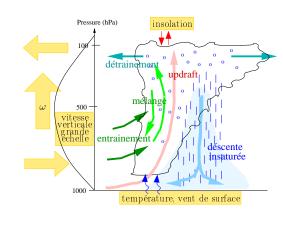
- Observations existantes
  - données à l'échelle mensuelle: amount effect (Dansgaard 1964)



▶ Questions: Quels processus expliquent l'amount effect? Impact des processus convectifs? Qu'en déduire en retour sur la convection?

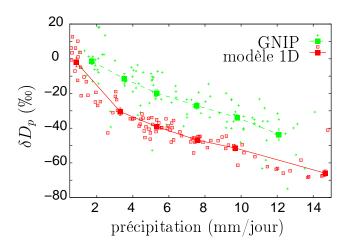
#### Modèle 1D

- modèle 1D sur océan
- conditions aux limites
- équilibre radiatif-convectif
- ▶ paramétrisation de la convection d'Emanuel ⇒ représentation de la réévaporation de la pluie et d'une descente insaturée
- contenu physique testé sur la campagne TOGA-COARE (Pacifique Ouest)



Bony, Risi et Vimeux 2008, JGR

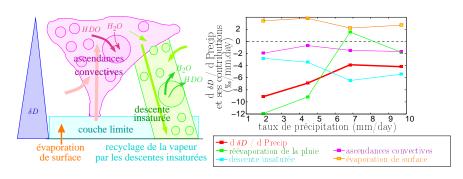
### Evaluation du modèle 1D



▶ bonne simulation de l'amount effect= $\frac{d\delta D_p}{dP}$ 

### Quels processus expliquent l'amount effect?

Amount effect = 
$$\frac{d\delta Dp}{dP} \simeq \frac{d\delta Devap}{dP} + c_{cond} + c_{revap} + c_{descente}$$

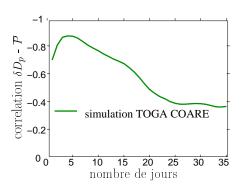


 principaux processus: réévaporation de la pluie et descentes insaturées

Risi, Bony et Vimeux 2008, JGR

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

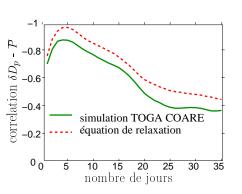
Simulation TOGA COARE (Pacifique Ouest)



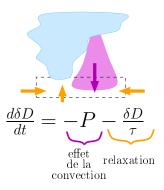
La composition isotopique intègre la convection sur les jours précédents

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

Simulation TOGA COARE (Pacifique Ouest)

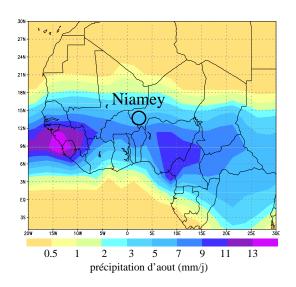


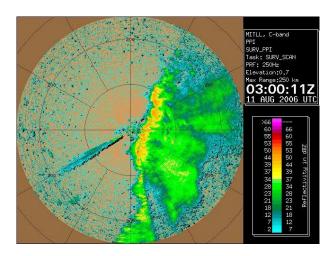
équation simple de relaxation:

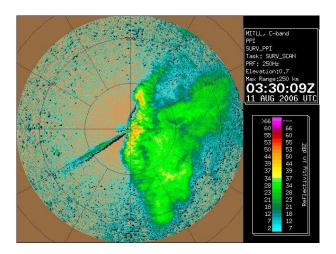


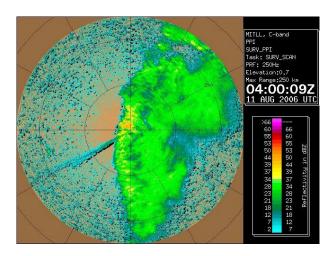
La composition isotopique intègre la convection sur les jours précédents

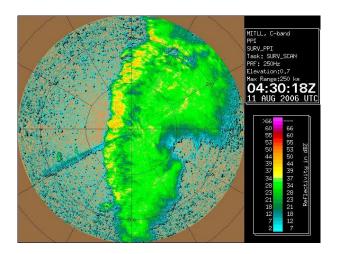
### Prélèvements pendant la campagne AMMA

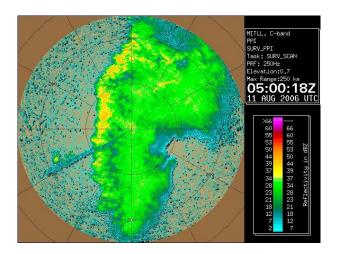


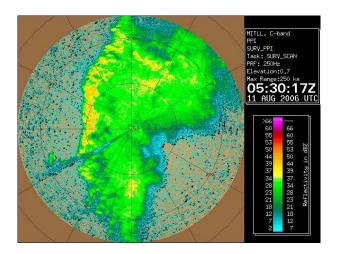


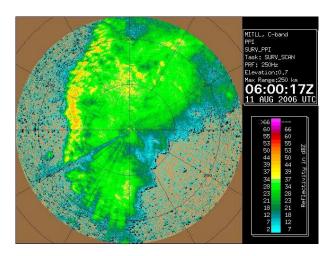




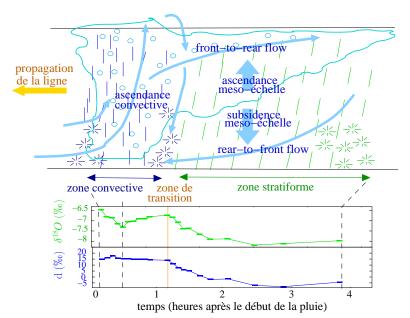




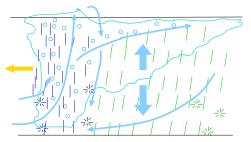




## Le long de la ligne de grain du 11 aout 2006



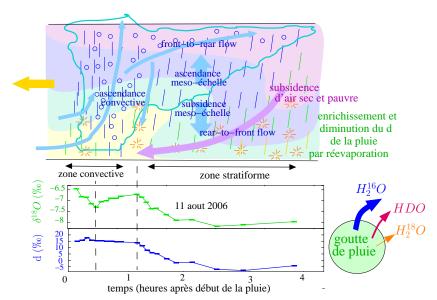
# Modèle 2D de transport et microphysique dans les lignes de grains



- stationnaire
- ▶ circulation forcée par vents 3D obtenus par radar pour le 11 aout 2006 (Chong sous presse)
- simule les propriétés robustes observées

Risi, Bony, Vimeux, Chong et Descroix, sous presse, QJRMS

### Processus au cours de lignes de grains

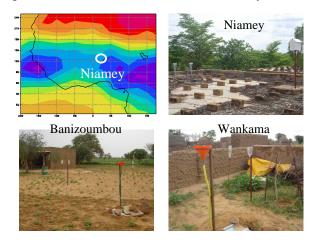


## Bilan des processus convectifs affectant la precipitation

- 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

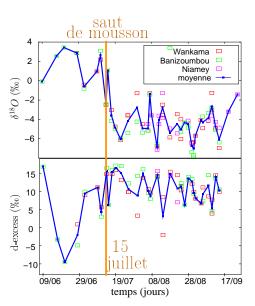
#### Données au cours de la mousson 2006

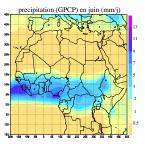
 collecte à la fin de chaque événement pluvieux, par des collègues locaux, sur 3 sites autour de Niamey



Risi, Bony, Vimeux, Descroix, Ibrahim, Lebreton, Mamadou, Sultan, 2009, GRL

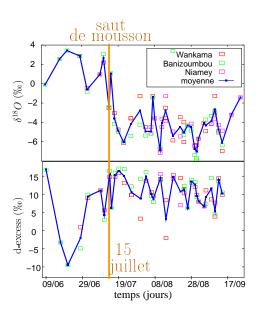
### Evolution au cours de la mousson

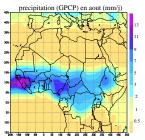




- les isotopes enregistrent l'activité convective
  - ► saut de mousson
  - •

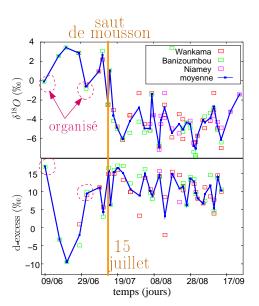
#### Evolution au cours de la mousson

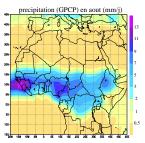




- les isotopes enregistrent l'activité convective
  - ► saut de mousson

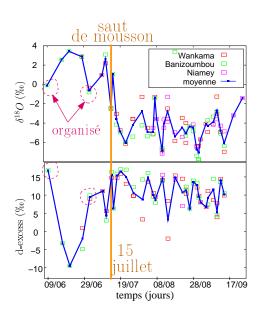
#### Evolution au cours de la mousson





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

#### Evolution au cours de

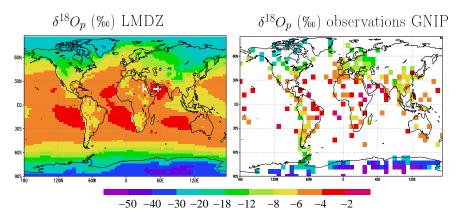




- les isotopes enregistrent l'activité convective
  - saut de mousson
  - avant la mousson: intensité et organisation des sytèmes
  - lacktriangle apres la mousson: le  $\delta^{18}O$  intègre temporellement la convection

#### Utilisation de simulations avec LMDZ-iso

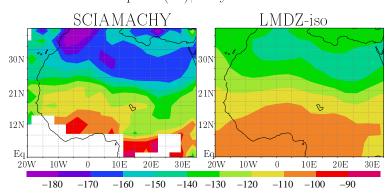
- version AR4 (LMDZ4)
- ▶ résolution horizontale: 2.5°x3.75°, 19 niveaux verticaux
- guidé par vents horizontaux des réanalyses NCEP
- fractionnements à la surface continentale négligés



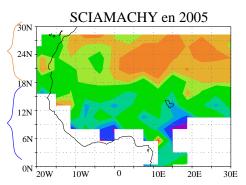
### Evaluation sur le Sahel: données satellite SCIAMACHY

▶  $\delta D$  vapeur intégrée verticallement, 2003-2005 (*Frankenberg et al 2009*)

 $\delta D$  vapeur (‰), moyenne annuelle

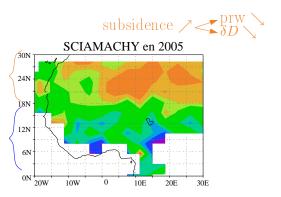


### Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY

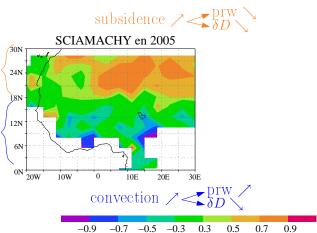




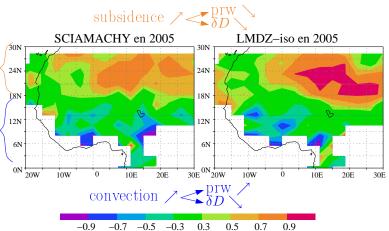
### Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY



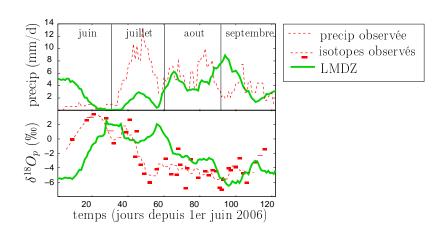
### Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY



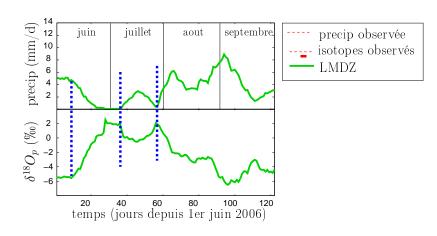
### Variabilité intra-saisonnière dans les données SCIAMACHY



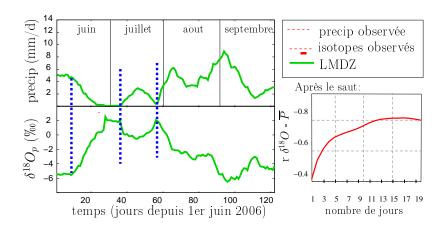
### LMDZ-iso sur Niamey



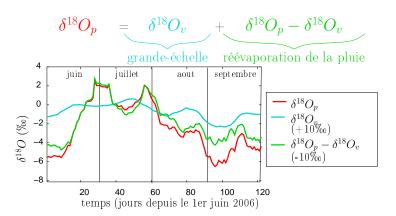
### LMDZ-iso sur Niamey



### LMDZ-iso sur Niamey



#### Variabilité intra-saisonnière dans LMDZ

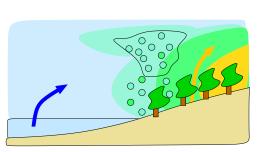


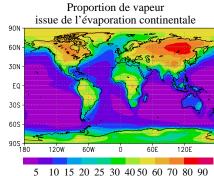
- ▶ avant le saut: réponse instantanée à la convection, par le biais de la réévaporation des gouttes
- ▶ après le saut: influence de la vapeur ⇒ processus grande échelle

### Introduction du water tagging dans LMDZ

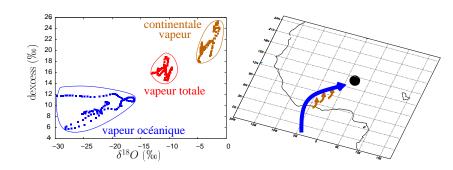
 Chaque molécule d'eau est coloriée d'une certaine couleur, selon une convention de coloriage

example: coloriage de l'évaporation continentale:



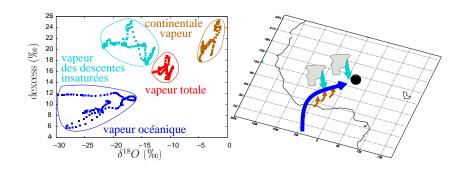


### Isotopes à Niamey et origine de la vapeur



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

### Isotopes à Niamey et descentes insaturées



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

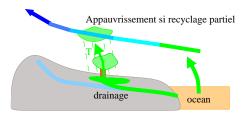
# Bilan sur l'effet de la convection sur la composition de la précipitation

- ▶ 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 avec le modèle 1D et les données intra-évènement
- en retour, intérêt des isotopes de l'eau pour étudier le cycle de l'eau et la convection

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

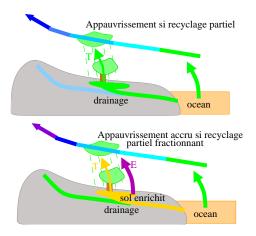
- Au sahel, δ<sup>18</sup> O enregistre l'activité convective dans les données et LMDZ:
  - saut de mousson
  - avant le saut: réponse instantanée et locale par évaporation des gouttes
  - ▶ après le saut: le  $\delta^{18}O$  intègre la convection par appauvrissement progressif par les descentes insaturées
- cohérents avec processus mis en évidence avec le modèle 1D et les données intra-évènement
- ▶ en retour, intérêt des isotopes de l'eau pour étudier le cycle de l'eau et la convection
- intérêt de données de vapeur:
  - évaluation du désequilibre gouttes/vapeur
  - ▶ lien plus direct avec les processus grande échelle
  - enregistrement continu

### 2. Isotopes et hydrologie continentale



lacktriangle Le taux de recyclage affecte gradients continentaux de  $\delta$ 

### 2. Isotopes et hydrologie continentale

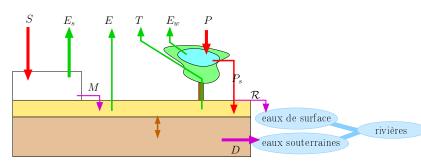


- $\blacktriangleright$  Le taux de recyclage affecte gradients continentaux de  $\delta$
- Le type de recyclage affecte la différence  $\delta$  sol/évapo-transpiration

### Isotopes et recyclage continental

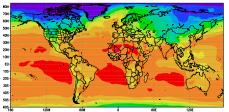
#### Questions

- Quel impact des processus hydrologiques de surface sur la composition isotopique de l'eau?
- Quelles informations sur l'hydrologie continentale?
- Outil: modèle d'hydrologie continentale SECHIBA/ORCHIDEE
  - version AR4 couplable à LMDZ

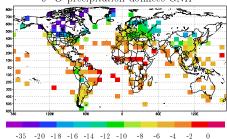


#### Evaluation d' LMDZ-ORCHIDEE-iso

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

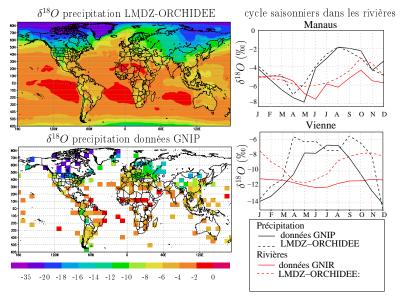






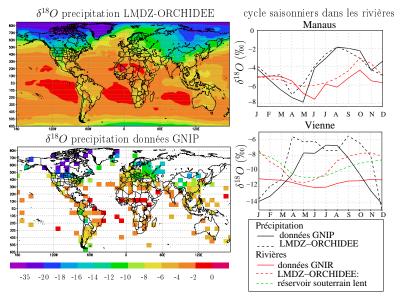
Risi, Bony, Ogée, Bariac et co-auteurs, en preparation

#### Evaluation d' LMDZ-ORCHIDEE-iso



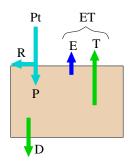
Risi, Bony, Ogée, Bariac et co-auteurs, en preparation

#### Evaluation d' LMDZ-ORCHIDEE-iso

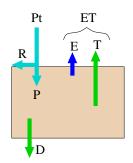


Risi, Bony, Ogée, Bariac et co-auteurs, en preparation

# Reconstruction du bilan hydrologique de surface par les isotopes

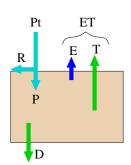


# Reconstruction du bilan hydrologique de surface par les isotopes



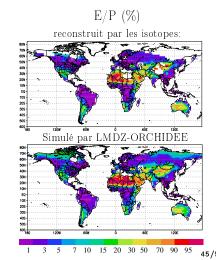
▶ si hypothèses simples:  $\{\delta^{18} O_{sol}, \delta^{18} O_{p}, T, rh\} \iff \frac{E}{D}$ 

# Reconstruction du bilan hydrologique de surface par les isotopes



▶ si hypothèses simples:  $\{\delta^{18} O_{sol}, \ \delta^{18} O_{p}, \ \mathsf{T}, \ \mathsf{rh}\} \Longleftrightarrow \frac{E}{P}$ 

expérience "modèle parfait"

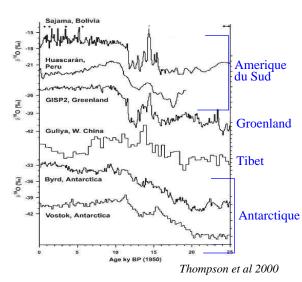


# Apports des isotopes aux problèmes d'hydrologie de surface

- processus hydrologiques de surface:
  - second ordre pour les compositions atmosphériques
  - fort impact sur les réservoirs continentaux
- en retour:
  - estimation des bilans d'eaux continentaux par méthodes isotopiques
  - contrainte de paramétrisations
- perspectives: développement des réseaux internationaux:
  - MIBA (sol, tiges, feuilles, vapeur),
  - GNIR (rivières),
  - ► IGLASS/TWIN (eaux de surface et souterraines)
  - maximum d'information en comparant la composition dans différents réservoirs sur un site donné

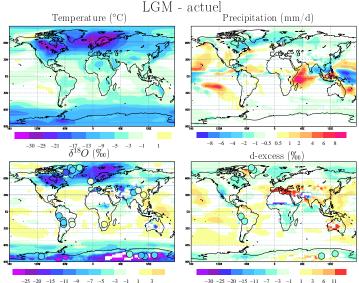
### 3. Isotopes et variations du climat

- Qu'enregistrent les isotopes dans les tropiques?
  - effet de la température/ précipitation?
- LMDZ-iso pour les climats passés

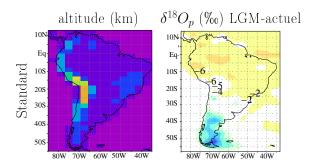


### LMDZ-iso au LGM (21 000 ans)

#### températures de surface de l'océan CLIMAP

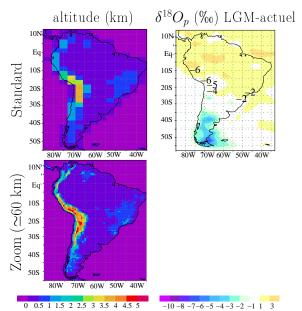


### LMDZ-iso zoomée sur l'Amérique du Sud

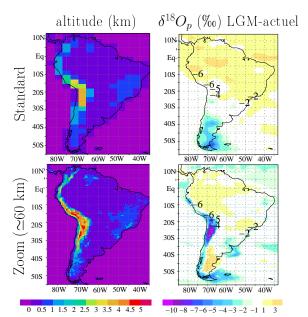




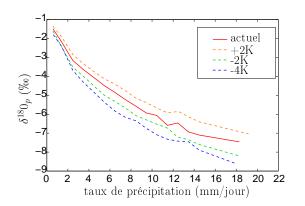
### LMDZ-iso zoomée sur l'Amérique du Sud



### LMDZ-iso zoomée sur l'Amérique du Sud



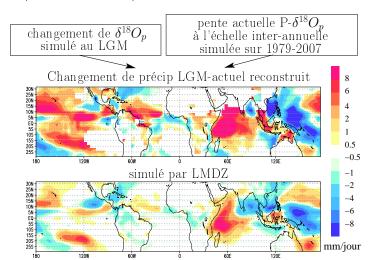
# Qu'est-ce qui contrôle les variations isotopiques dans les tropiques?



- Amount effect dominant dans chaque climat
- ► Au 2nd ordre, effet de température: 0.1‰/K

### Reconstitution des variations passées de l'activité convective

expérience "modèle parfait"



### Bilan sur les isotopes au LGM

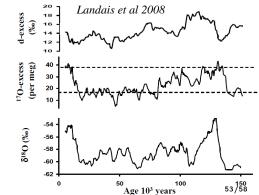
- $ightharpoonup \delta$  aux pôles: marqueur de la température polaire
- d-excess aux pôles:
  - marqueur de la température des zones sources?
  - mais GCMs simulent mal valeurs plus basses au LGM
- $\triangleright$   $\delta$  dans les Tropiques:
  - $ightharpoonup \delta$  marqueur de l'activité convective
  - mais GCMs simulent mal valeurs plus basses au LGM
- ▶ informations données par un 3e traceur isotopique: l'  $H_2^{17}$  O?

### $L'H_2^{17}O$ : un nouveau traceur isotopique

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

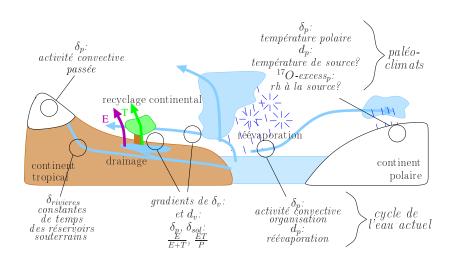
$$^{17}$$
 O-excess =  $10^6 \cdot \left( \ln \left( \frac{\delta^{17} \, O}{1000} + 1 \right) - 0.528 \cdot \ln \left( \frac{\delta^{18} \, O}{1000} + 1 \right) \right)$ 

- ightharpoonup mesures à Vostok ightharpoonup
- ► contrôles de l'<sup>17</sup> O-excess? (Risi, Landais, Bony, Masson-Delmotte, Jouzel et Vimeux, accepté, JGR)
- perspectives: meilleure couverture spatiale des données, simulations LMDZ



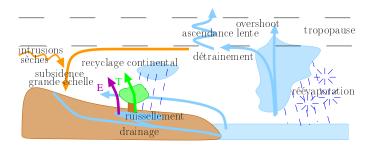
3. Isotopes de l'eau et variations du climat

#### Conclusion



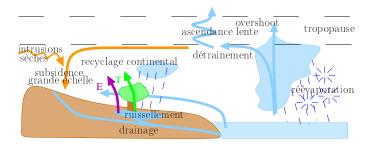
### Perspectives (1/4): nouvelles données

- ightharpoonup 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 par spectroscopie laser



### Perspectives (2/4): water tagging

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



### Perspectives (3/4): évaluation de la réponse des modèles aux variations du climat

- évaluation de cette réponse par comparaison aux enregistrements isotopiques: ex: archives de precipitation
- ▶ bientôt les isotopes dans le modèle couplé de l'IPSL
   ⇒ simulation de la composition isotopique dans différents types d'enregistrements:
  - cellulose des arbres avec LMD7-ORCHIDEE
  - sédiments marins quand couplage avec l'océan

# Perspectives (4/4): évaluation de paramétrisations

- isotopes sensibles à processus peu contraints dans les paramétrisations:
  - réévaporation de la pluie
  - partition drainage/ ruissellement/ évaporation de sol nu/ transpiration
  - ⇒ méthodes observationnelles d'évaluation des paramétrisations physiques par les isotopes?
- projet d'intercomparaison de GCMs (SWING)
- isotopes dans exercices d'inter-comparaisons plus contraints (ex: modèles 1D forcés par observations sur sites instrumentés)?

### Merci!

