

La simulation du rôle du recyclage continental dans les variations intra-saisonnières de précipitation : évaluation en utilisant les données isotopiques satellitaires GOSAT.

Camille Risi¹, Christian Frankenberg², David Noone³, Sandrine Bony¹

24 janvier 2012, présentation aux AMAs

¹LMD/IPSL, CNRS, Paris, France

² Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Californie, USA

³ CIRES, University of Colorado, Boulder, USA

Résumé

Les modèles de climat suggèrent un rôle important des rétroactions continent-atmosphère dans la variabilité des précipitations continentales aux échelles intra-saisonnières, mais présentent une dispersion importante dans la simulation de ce rôle. Existe-t-il des contraintes observationnelles de ce rôle ? De nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années concernant les rétroactions locales entre humidité du sol, couche limite et convection. Cette étude s'intéresse quant à elle aux rétroactions à l'échelle régionale liées au recyclage continental. Ces rétroactions peuvent-être positives : quand la précipitation est forte, l'évapo-transpiration augmente et humidifie l'air en aval, favorisant les précipitations ; ou négatives : quand la précipitation est forte, le sol est plus frais, défavorisant la convergence d'humidité et donc les précipitations.

Le développement récent des mesures de composition isotopiques de la vapeur d'eau offre la possibilité unique d'évaluer ces rétroactions : l'eau évaporée sur continent est plus enrichie que celle évaporée sur océan. Nous avons exploitées les mesures isotopiques du satellite GOSAT, avec un maximum de sensibilité dans la couche limite, pour évaluer la représentation de ces rétroactions dans la version isotopique du modèle couplé atmosphère-continents LMDZ-ORCHIDEE.

Une série de simulations avec LMDZ-ORCHIDEE, différant par la physique atmosphérique ou continentale, ont été réalisées. Le rôle du recyclage continental dans les variations intra-saisonnières de précipitation y est quantifié par la méthodologie du water tagging, permettant de tracer virtuellement l'eau de différentes origines. Comme attendu, on trouve que les rétroactions liées au recyclage continental sont généralement positives dans les régions de mousson. On trouve aussi un lien très fort entre l'intensité de ces rétroactions et la variabilité intra-saisonnière isotopique, à l'échelle spatiale mais aussi entre les différentes simulations. Plus la rétroaction est positive, plus la vapeur d'eau est enrichie pendant les périodes pluvieuses. La composition isotopique de la vapeur d'eau peut donc être utilisée comme diagnostique observable du rôle du recyclage dans les variations intra-saisonnières de précipitation.

La comparaison de ce diagnostique aux mesures GOSAT montrent une bonne simulation globale du rôle du recyclage dans les variations intra-saisonnières de précipitation. Ce rôle est toutefois très sensible aux paramètres hydrologiques d'ORCHIDEE (ex : résistance stomatique, fraction de sol nu, profondeur d'extraction racinaire). En particulier, les simulations sous-estimant les rétroactions continent-atmosphère liées au recyclage sont celles dont la réponse de l'évapo-transpiration à l'humidité du sol est le plus faible.

Introduction

Les modèles de climat suggèrent un rôle important des rétroactions continent-atmosphère dans la variabilité des précipitations continentales aux échelles intra-saisonnières, mais présentent une dispersion importante dans la simulation de ce rôle ([Koster et al., 2006]). Existe-t-il des contraintes observationnelles de ce rôle ?

De nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années concernant les rétroactions à l'échelle locale et diurne entre humidité du sol, couche limite et convection ([Betts, 1992, De Ridder, 1997, Eltahir, 1998, Findell and Elta, 2003, Ek and Holtslag, 2004, Santanello et al., 2009, Tuinenburg et al., 2011, Santanello et al., 2011, Ferguson and Wood, 2012, Ferguson et al.,]). Cette étude s'intéresse quant à elle aux rétroactions à l'échelle régionale liées au recyclage continental. Ces rétroactions peuvent-être positives : quand la précipitation est forte, l'évapo-transpiration augmente et humidifie l'air en aval, favorisant les précipitations ([Eltahir and Bras, 1994]) ; ou négatives : quand la précipitation est forte, le sol est plus frais, ce qui défavorise la convergence d'humidité. Les résultats des études basées sur la modélisation ou des bilans d'eau à partir des réanalyses ([Numaguti, 1999, Bosilovich and Schubert, 2002, Dominguez and Kumar, 2008]) sont toutefois difficiles à évaluer par des observations.

Le développement récent des mesures de composition isotopiques de la vapeur d'eau offre la possibilité unique d'évaluer ces rétroactions : la composition isotopique de l'eau est en effet sensible à son l'origine évaporative ([Gat and Matsui, 1991]). Nous explorons ici cette possibilité en utilisant les données isotopiques satellitaires GOSAT ([Frankenberg and Worden,]) et un modèle de circulation général atmosphérique couplé à un modèle de surface continentale.

Table des matières

1	Simulations, données, méthodes	3
1.1	Simulations numériques	3
1.2	Données GOSAT	3
1.3	Water tagging	3
2	Lien entre composition isotopique de la vapeur d'eau et recyclage continental	3
2.1	Signature isotopique des sources évaporatives	3
2.2	Lien à l'échelle intra-saisonnière	5
2.3	Lien spatial	5
3	Diagnostic isotopique du rôle du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière	7
3.1	Le diagnostic isotopique	7
3.2	Utilisation de GOSAT comme contrainte observationnelle	7
4	Mécanismes déterminant le rôle du recyclage continental	8

1 Simulations, données, méthodes

1.1 Simulations numériques

Nous utilisons le modèle de circulation générale LMDZ ([Hourdin et al., 2006]) couplé au modèle de surface continentale ORCHIDEE ([Ducoudré et al., 1993, Krinner et al., 2005]), dans lesquels les isotopes ont été introduits ([Risi et al., 2010c, Risi et al., a]). Nos simulations sont forcées par les températures de surface observées selon le protocole AMIP ([Gates, 1992]) et guidées par les vents des réanalyses ECMWF ([Uppala et al., 2005]) pour assurer une simulation réaliste comparable au jour le jour avec les données.

On a réalisé une série de tests de sensibilité :

- à la physique atmosphérique : advection plus diffusive, taux de condensation grande échelle plus faible, efficacité de précipitation convective plus faible 'détails dans [Risi et al., b])
- à la l'hydrologie continentale : plus ou moins de sol nu, résistance stomatique plus faible, profondeur d'extraction racinaire plus forte.

1.2 Données GOSAT

Les mesures GOSAT permettent une restitution du contenu intégré de la colonne d'atmosphère en vapeur d'eau (eau précipitable notée W) et en HDO . Cela permet de calculer le δD exprimant la concentration en HDO en anomalie par rapport à la surface de l'océan, en ‰. Le δD mesuré par GOSAT est très fortement pondérée par la couche limite, où se trouve la majeure partie de la vapeur d'eau. En l'absence de calibration absolue, on doit se concentrer sur les variations spatiales ou temporelles du δD .

1.3 Water tagging

Le water tagging permet de tracer virtuellement dans le modèle l'eau selon son origine ([Risi et al., 2010b]). Ici, nous traçons l'eau selon si elle s'évapore sur océan, est transpirée par la végétation ou évaporée par le sol nu.

Nous quantifions le rôle du recyclage continental dans les variations intra-saisonnières de précipitation par un diagnostique noté D1 basé sur le water tagging (fig 1, haut). D1 est la moyenne de la fraction de la vapeur venant de l'évaporation continentale (r_{con}) pendant les jours de forte pluie (pluie supérieur à la moyenne saisonnière plus un écart type) à laquelle on soustrait la moyenne saisonnière de r_{con} . Si r_{con} est plus fort pendant les jours de fortes pluies (D1>0), alors cela indique une rétroaction positive liée au recyclage continental : plus la précipitation est forte, plus l'humidité du sol (q_{sol}) est forte, plus l'évapo-transpiration (ET) est forte, plus l'humidité est forte en aval, favorisant la précipitation. Avec ce diagnostique, on trouve que les rétroactions liées au recyclage continental sont généralement positives dans les régions de mousson (fig 1, bas). Le recyclage continental peut amplifier les fortes pluies jusqu'à 10 à 20%.

2 Lien entre composition isotopique de la vapeur d'eau et recyclage continental

2.1 Signature isotopique des sources évaporatives

Le water tagging permet de diagnostiquer la composition isotopique de l'eau provenant de différentes origines évaporatives. L'enrichissement en isotopes lourds se mesure en δD ou $\delta^{18}O$, qui suivent la même évolution au premier ordre. Le d-excess est un paramètre de second ordre mesurant l'enrichissement en HDO par rapport à celui en $H_2^{18}O$ par $\delta D - 8 \cdot \delta^{18}O$.

Chaque origine de l'eau a une signature isotopique bien distincte (fig 2) :

- la transpiration est beaucoup plus enrichie que l'évaporation océanique. Ceci est lié au fait que les isotopes les plus légers s'évaporent le plus facilement des surfaces libres. Au contraire, la transpiration réinjecte sans fractionnement l'eau du sol dans l'atmosphère, car il n'y a pas de fractionnement au niveau des racines ([Flanagan and Ehleringer, 1991]). Or l'eau du sol provient des précipitations, qui sont plus enrichies par rapport à la vapeur. Ceci explique les maxima isotopiques sur les continentaux tropicaux observés dans toutes les données satellitaires dans la basse troposphère ([Worden et al., 2007, Frankenberg et al., 2009]).

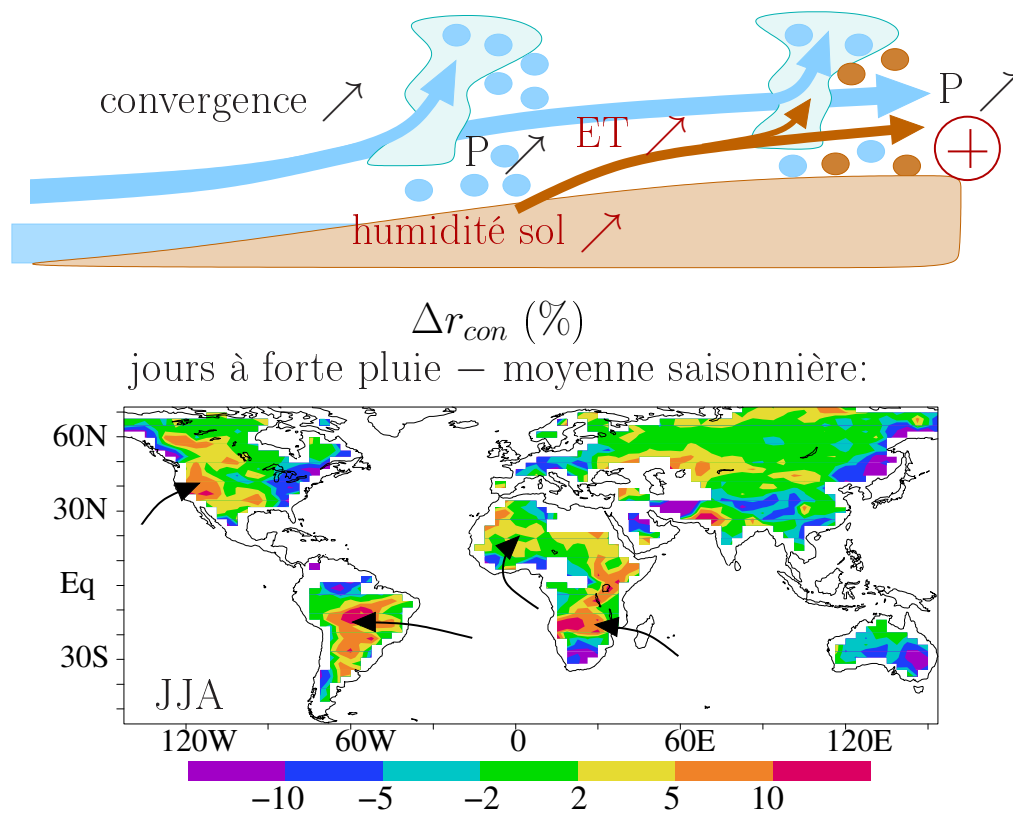


FIGURE 1 – Haut : principe de la quantification de la rétroaction du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière de la précipitation : quand la rétroaction est positive, la fraction de la vapeur venant de l'évaporation continentale (r_{con}) est plus forte pendant les jours de forte pluie. On regarde donc la différence de r_{con} entre les jours de fortes pluie et la moyenne saisonnière. Bas : résultat, pour DJF en exemple.

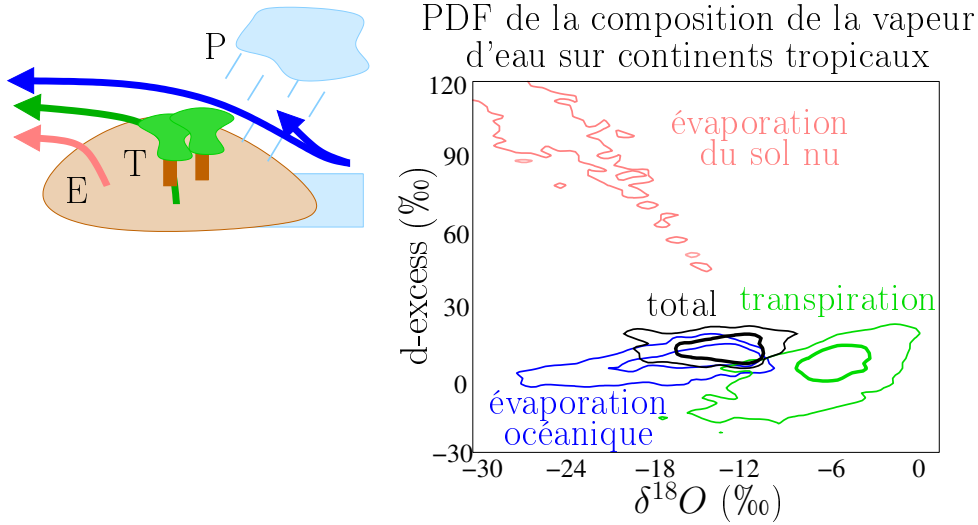


FIGURE 2 – Distribution de probabilité de la composition isotopique ($\delta^{18}O$ et d-excess) de la vapeur d'eau des basses couches, pour la vapeur totale (noir), ou venant de l'évaporation océanique, de la transpiration ou de l'évaporation du sol nu.

– L'évaporation du sol nu a un d-excess beaucoup plus fort ([Gat and Matsui, 1991]). Comme le d-excess est difficile à mesurer, on se concentre sur les δ dans la suite.

2.2 Lien à l'échelle intra-saisonnière

Pour voir dans quelle mesure les mesures isotopiques peuvent être utiles pour estimer les variations intra-saisonnières du recyclage, nous calculons la corrélation journalière entre le δD de la vapeur dans les basses couches et r_{con} pour différentes saisons. En DJF par exemple, il y a des fortes corrélations en Amérique du Sud et au Sahel (fig 3, gauche). Ce sont dans ces régions que les mesures isotopiques peuvent être les plus utiles pour notre objectif.

La corrélation diminue rapidement avec l'altitude (fig 3 droite). Les données isotopiques utiles sont donc celles en surface ou dans la couche limite, comme GOSAT.

2.3 Lien spatial

Comme expliqué, nous diagnostiquons le rôle du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière des précipitations par le diagnostic D1, soit la différence de r_{con} entre les jours de forte pluie et la moyenne saisonnière. Ce diagnostic non observable peut-il être approximé par la différence δD de la vapeur entre les jours de forte pluie et la moyenne saisonnière (D1_{iso}) ?

Sur l'Amazonie en JJA (3), par exemple, quand r_{con} ne varie pas lors des jours de forte pluie, le δD est plus appauvri pendant les jours de forte pluie : c'est lié à l'effet appauvrissant de la convection sur la vapeur d'eau ([Lawrence et al., 2004, Risi et al., 2008, Risi et al., 2010a]). Plus la rétroaction liée au recyclage continental est positive, plus la vapeur d'eau est enrichie pendant les périodes pluvieuses. Cela suggère que la composition isotopique de la vapeur d'eau peut être utilisée comme diagnostic observable du rôle du recyclage dans les variations intra-saisonnières de précipitation.

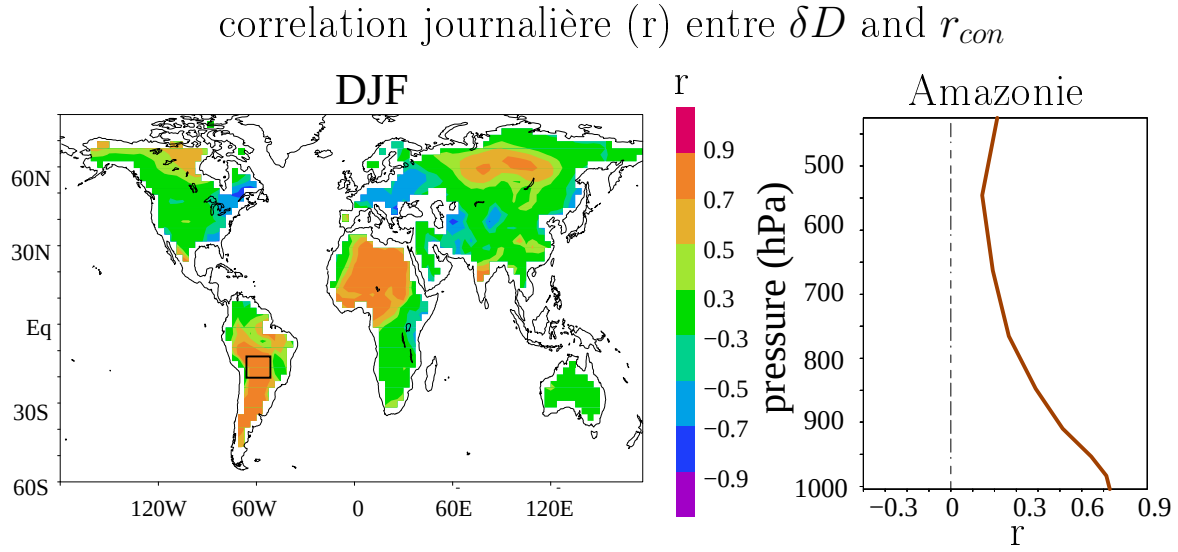


FIGURE 3 – Gauche : corrélation entre le δD de la vapeur d'eau des basses couches et la fraction de vapeur continentale (r_{con}) à l'échelle journalière en DJF. Droite : corrélation en fonction de l'altitude en moyenne sur l'Amérique du Sud.

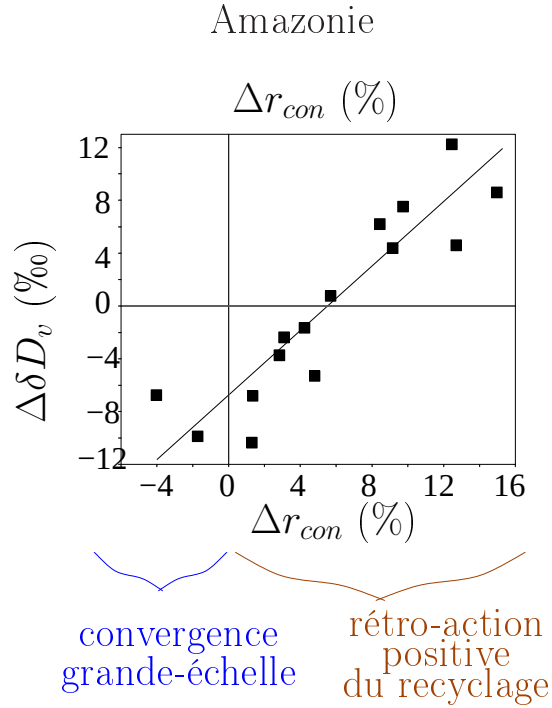


FIGURE 4 – Lien spatial entre la différence de r_{con} (abscisses) et de δD de la vapeur des basses couches (ordonnées) entre les jours de fortes pluies et la moyenne saisonnière, en exemple sur l'Amérique du Sud (carré en fig 1) en JJA.

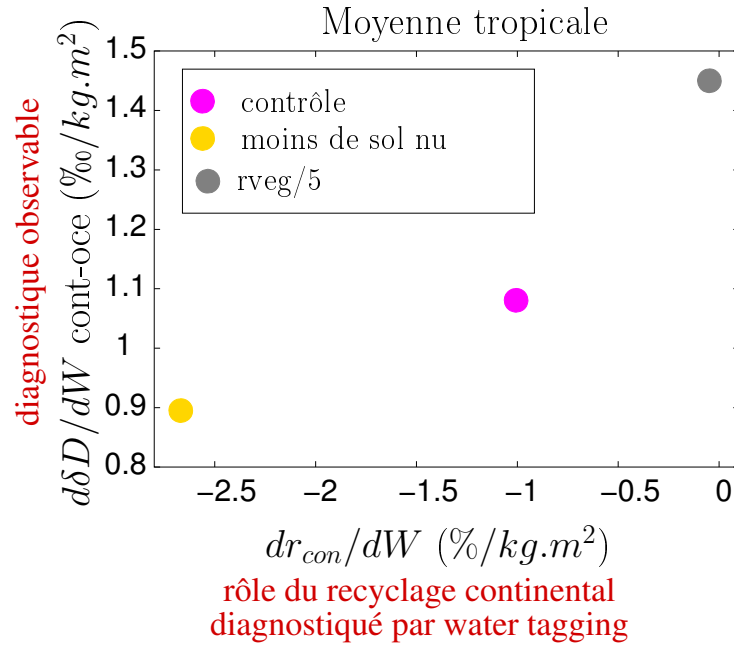


FIGURE 5 – En abscisse : diagnostic du rôle du recyclage sur la variabilité intra-saisonnière de l’humidité basé sur le water tagging (D2). En ordonnée : diagnostic observable basé sur la composition isotopique. On a moyenné sur l’ensemble des continents tropicaux et sur JJA et DJF. Trois tests de sensibilité à l’hydrologie continentale sont représentés.

3 Diagnostic isotopique du rôle du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière

3.1 Le diagnostic isotopique

On quantifie ici le rôle du recyclage continental sur la variabilité intra-saisonnière de la précipitation par la pente journalière dr_{con}/dW pour JJA ou DJF. On note D2 ce diagnostic. Cela donne des résultats similaires par rapports à D1 montré en fig 1. En première approche grossière, on en calcule la moyenne sur tous les continents tropicaux et sur JJA et DJF. On regarde si on peut approximer ce diagnostic par la moyenne de $d\delta D/dW$ sur tous les continents tropicaux, à laquelle on retranche la la moyenne de $d\delta D/dW$ sur tous les océans tropicaux. On note ce diagnostic D2_iso. L’utilisation de W au lieu de la precipitation permet d’utiliser les valeurs de δD et de W mesurées par le même instrument GOSAT, ce qui évite les incertitudes liées à la collocalisation. On retranche la moyenne sur les océans tropicaux pour essayer de retrancher l’effet du rôle appauvrissant de la convection. On suppose que le rôle de la convection sur océan et sur continent est le même.

Sur les 3 tests de sensibilité réalisés avec water tagging, on voit une bonne relation entre le diagnostic D2 et le diagnostic observable D2_iso, suggérant que D2_iso peut être utilisé pour évaluer le rôle du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière de précipitation.

3.2 Utilisation de GOSAT comme contrainte observationnelle

On regroupe tous nos tests de sensibilité dans un diagramme présentant la moyenne de $d\delta D/dW$ sur tous les océans tropicaux (représentant l’effet de la convection) et le diagnostic D2_iso du rôle du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière de précipitation (6). La dispersion pour l’effet de la convection est surtout liée à la représentation des processus atmosphériques. En revanche, la dispersion pour le rôle du recyclage est surtout liée à la représentation des processus d’hydrologie continentale. Cela suggère que notre diagnostic D2_iso permet bien de séparer les modèles pour leur représentation des interactions continents-atmosphère.

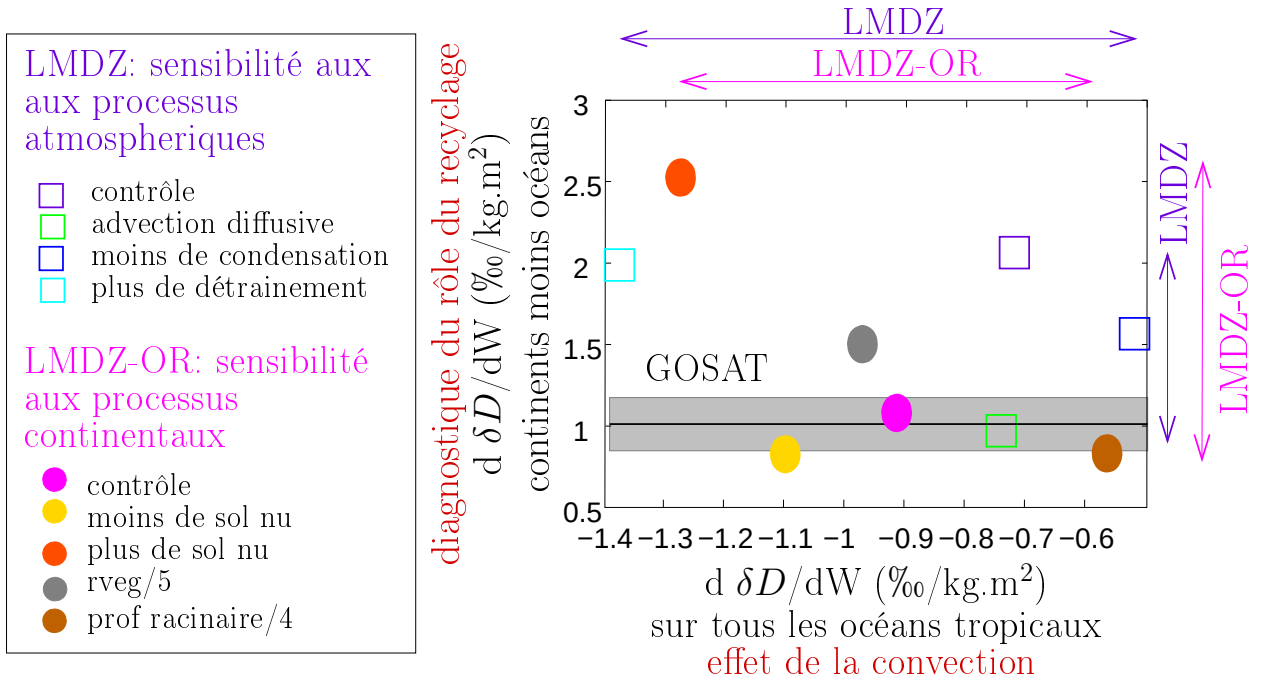


FIGURE 6 – Ensemble des tests de sensibilité à la physique atmosphérique et à l’hydrologie continentale, dans un diagramme présentant la moyenne de $d\delta D/dW$ sur tous les océans tropicaux (représentant l’effet de la convection) et le diagnostic D2_{iso} du rôle du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière de précipitation. La contrainte observationnelle GOSAT est superposée.

La comparaison aux données GOSAT suggère que la simulation LMDZ-ORCHIDEE de contrôle est la plus réaliste pour son rôle du recyclage continental, ce qui est rassurant car c’est la version du modèle la plus optimisée et validée.

4 Mécanismes déterminant le rôle du recyclage continental

Qu’est-ce qui explique la dispersion du rôle du recyclage parmi les différents tests de sensibilité ? Qu’est-ce qui détermine ce rôle dans la physique du modèle ?

La boucle de rétroaction liée au recyclage continental contient plusieurs segments : la précipitation affecte l’infiltration, qui affecte q_{sol} , puis ET , W et enfin en retour la précipitation. On calcule les corrélations journalières entre ces différentes étapes de la boucle de rétroaction. Le diagnostic D2_{iso} montre une bonne relation avec la corrélation entre q_{sol} et le rapport de l’ ET sur l’ ET potentielle (fig 7). Les simulations sur-estimant le rôle du recyclage sont celles dont le couplage entre humidité du sol et évapotranspiration est le plus fort, et vis versa.

Ceci suggère que la représentation de la sensibilité de l’ ET à q_{sol} est une source majeure de dispersion dans la simulation du rôle du recyclage continental dans la variabilité intrasaisonnière (cohérent avec [Guo et al., 2006]).

Conclusion

Cette étude montre que dans le modèle LMDZ-ORCHIDEE :

- la variabilité intra-saisonnière du recyclage continental contribue significativement à la variabilité intra-saisonnière des précipitations, surtout dans les régions de mousson ;
- la composition isotopique de la vapeur d’eau observée par satellite dans la basse troposphère peut être utilisée pour évaluer le signe et l’intensité des rétroactions continent-atmosphère liées au recyclage continental dans les modèles ;

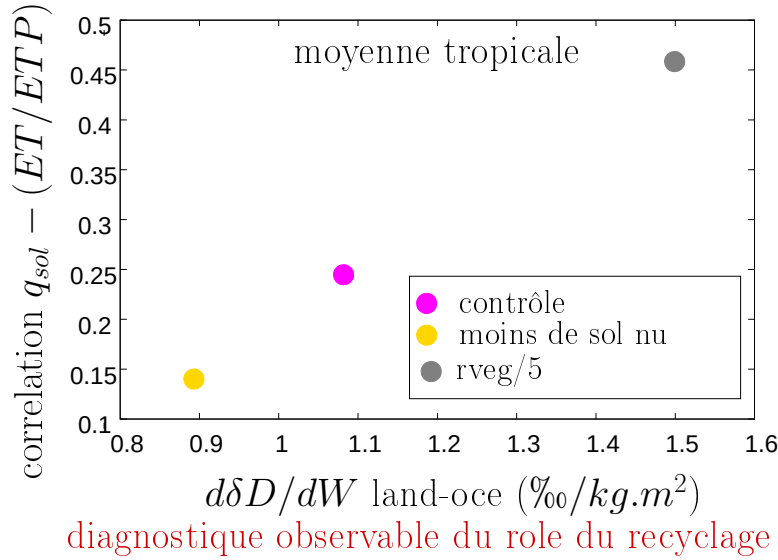


FIGURE 7 – Corrélation entre q_{sol} et le rapport de l' ET sur l' ET potentielle, en fonction du diagnostic D2_iso du rôle du recyclage continental dans la variabilité intra-saisonnière de précipitation. On a moyenné sur l'ensemble des continents tropicaux et sur JJA et DJF. Trois tests de sensibilité à l'hydrologie continentale sont représentés.

- le signe et l'intensité de ces rétroactions dépend fortement de la représentation des processus hydrologiques, en particulier, le couplage entre humidité du sol et évapo-transpiration.

En changement climatique, une partie significative de la dispersion concernant les projections de changements futurs de précipitations sur les continents provient de la représentation des rétroactions continent-atmosphère ([Crossley et al., 2000, Gedney et al., 2000]). Si un modèle (ou une version de modèle) simule mieux les rétroactions continent-atmosphère à l'échelle intra-saisonnière, cela lui donne-t-il plus de crédibilité pour simuler ces rétroactions en changement climatique? Pour cela, il faudrait montrer un lien entre le comportement du modèle à l'échelle intra-saisonnière et celui en changement climatique, à la manière de [Hall and Qu, 2006]. Ceci est en cours d'étude.

Références

- [Betts, 1992] Betts, A. K. (1992). Five atmospheric boundary layer budget methods. *J. Geophys. Res.*, 97 :D18, 18,523–18,532.
- [Bosilovich and Schubert, 2002] Bosilovich, M. G. and Schubert, S. D. (2002). Water vapor tracers as diagnostics of the regional hydrologic cycle. *J. Hydrometeor.*, 3 :149–165.
- [Crossley et al., 2000] Crossley, J. F., Polcher, J., Cox, P. M., Gedney, N., and Planton, S. (2000). Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations. *Clim. Dyn.*, 16 :949–961.
- [De Ridder, 1997] De Ridder, K. (1997). Land surface processes and the potential for convective precipitation. *J. Geophys. Res.*, 102(D25) :30,085–30,090, doi :10.1029/97JD02624.
- [Dominguez and Kumar, 2008] Dominguez, F. and Kumar, P. (2008). Precipitation Recycling Variability and Ecoclimatological Stability? A Study Using NARR Data. Part I : Central U.S. Plains Ecoregion. *J. Climate*, 21 :5165–5186, doi : <http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI1756.1>.
- [Ducoudré et al., 1993] Ducoudré, N., Laval, K., and Perrier, A. (1993). SECHIBA, a new set of parametrizations of the hydrological exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model. *J. Clim.*, 6 :248–273.
- [Ek and Holtslag, 2004] Ek, M. B. and Holtslag, A. A. M. (2004). Influence of soil moisture on boundary layer cloud development. *J. Hydrometeor.*, 5 :86–99.
- [Eltahir, 1998] Eltahir, E. A. B. (1998). A soil moisture-rainfall feedback mechanism 1. theory and observations. *Water Resour. Res.*, 34(4) :765–776.
- [Eltahir and Bras, 1994] Eltahir, E. A. B. and Bras, R. L. (1994). Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quart. J. R. Meteor. soc.*, 120 (518) :861–880, DOI : 10.1002/qj.49712051806.
- [Ferguson and Wood, 2012] Ferguson, C. R. and Wood, E. F. (2012). Observed land-atmosphere coupling from satellite remote-sensing and re-analysis. *J. Hydrometeor.*
- [Ferguson et al.,] Ferguson, C. R., Wood, E. F., and Vinukollu, R. K. A global inter-comparison of modeled and observed land-atmosphere coupling. *J. Hydrometeor.*, submitted.
- [Findell and Elta, 2003] Findell, K. L. and Elta (2003). Atmospheric controls on soil moisture? boundary layer interactions. part i : Framework development. *J. Hydrometeor.*, 4 :552–569.

- [Flanagan and Ehleringer, 1991] Flanagan, L. B. and Ehleringer, J. R. (1991). Stable isotope composition of stem and leaf water : applications to the study of plant use. *Functional Ecology*, 5 (2) :270–277.
- [Frankenberg et al., 2009] Frankenberg, C., Yoshimura, K., Warneke, T., Aben, I., Butz, A., Deutscher, N., Griffith, D., Hase, F., Notholt, J., Schneider, M., Schrijver, H., and Röckmann, T. (2009). Dynamic processes governing lower-tropospheric HDO/H₂O ratios as observed from space and ground. *Science*, 325 :1374–1377.
- [Frankenberg and Worden,] Frankenberg, C., R. C. and Worden, J. Atmospheric hdo/h₂o abundances measured from the gosat satellite : Technique and initial validation. in preparation.
- [Gat and Matsui, 1991] Gat, J. R. and Matsui, E. (1991). Atmospheric water balance in the Amazon basin : An isotopic evapotranspiration model. *J. Geophys. Res.*, 96 :13179–13188.
- [Gates, 1992] Gates, W. L. (1992). AMIP : The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 73 :1962–1970.
- [Gedney et al., 2000] Gedney, N., Cox, P. M., Douville, H., Polcher, J., and Valdes, P. (2000). Characterizing gcm land surface schemes to understand their responses to climate change. *J. Clim.*, 13 :3066–3079.
- [Guo et al., 2006] Guo, Z., Dirmeyer, P. A., Koster, R. D., Bonan, G., Chan, E., Cox, P. M., Gordon, C. T., Kanae, S., Kowalczyk, E., Lawrence, D., Liu, P., Lu, C.-H., Malyshev, S., McAvaney, B., McGregor, J. L., Mitchell, K., Mocko, D., Oki, T., Oleson, K. W., Pitman, A., Sud, Y. C., Taylor, C. M., Verseghy, D., Vasic, R., Xue, Y., and Yamada, T. (2006). Glace : the global landatmosphere coupling experiment. part ii : Analysis. *J. Hydrometeorol.*, 7 (4) :611–625, doi :10.1175/JHM511.1.
- [Hall and Qu, 2006] Hall, A. and Qu, X. (2006). Using the current seasonal cycle to constrain snow albedo feedback in future climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 33 :L03502, doi :10.1029/2005GL025127.
- [Hourdin et al., 2006] Hourdin, F., Musat, I., Bony, S., Braconnot, P., Codron, F., Dufresne, J.-L., Fairhead, L., Filiberti, M.-A., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Krinner, G., Levan, P., Li, Z.-X., and Lott, F. (2006). The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Clim. Dyn.*, 27 :787–813.
- [Koster et al., 2006] Koster, R. D., Guo, Z., Dirmeyer, P., and coauthors (2006). GLACE : The Global LandAtmosphere Coupling Experiment. Part I : Overview. *J. Hydromet.*, 7 :590–610.
- [Krinner et al., 2005] Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 19.
- [Lawrence et al., 2004] Lawrence, J. R., Gedzelman, S. D., Dexheimer, D., Cho, H.-K., Carrie, G. D., Gasparini, R., Anderson, C. R., Bowman, K. P., and Biggerstaff, M. I. (2004). Stable isotopic composition of water vapor in the tropics. *J. Geophys. Res.*, 109 :D06115, doi :10.1029/2003JD004046.
- [Numaguti, 1999] Numaguti, A. (1999). Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent : Experiments using an atmospheric general circulation model . *J. Geophys. Res.*, 104 :D2, 1957–1972, doi :10.1029/1998JD200026.
- [Risi et al., a] Risi, C., Bony, S., Ogée, J., Bariac, T., Raz-Yaseed, N., and Wingate, L. Water stable isotopes to evaluate the hydrological budget in large-scale land surface models : investigation with ORCHIDEE-iso. *Clim. Dyn.*, en révision.
- [Risi et al., 2008] Risi, C., Bony, S., and Vimeux, F. (2008). Influence of convective processes on the isotopic composition (O18 and D) of precipitation and water vapor in the Tropics : Part 2 : Physical interpretation of the amount effect. *J. Geophys. Res.*, 113 :D19306, doi :10.1029/2008JD009943.
- [Risi et al., 2010a] Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., Chong, M., and Descroix, L. (2010a). Evolution of the water stable isotopic composition of the rain sampled along Sahelian squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136 (S1) :227 – 242.
- [Risi et al., 2010b] Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., Frankenberg, C., and Noone, D. (2010b). Understanding the Sahelian water budget through the isotopic composition of water vapor and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 115, D24110 :doi :10.1029/2010JD014690.
- [Risi et al., 2010c] Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., and Jouzel, J. (2010c). Water stable isotopes in the LMDZ4 General Circulation Model : model evaluation for present day and past climates and applications to climatic interpretation of tropical isotopic records. *J. Geophys. Res.*, 115, D12118 :doi :10.1029/2009JD013255.
- [Risi et al., b] Risi, C., Noone, D., Worden, J., Frankenberg, C., Stiller, G., Kiefer, M., Funke, B., Walker, K., Bernath, P., Schneider, M., Wunch, D., Sherlock, V., Deutscher, N., Griffith, D., Wernberg, P., Bony, S., Jeonghoon Lee, D. B., Uemura, R., and Sturm, C. Process-evaluation of tropical and subtropical tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations. Part 1 : model-data intercomparison. *J. Geophys. Res.*, in revision.
- [Santanello et al., 2009] Santanello, J. A., Peters-Lidard, C. D., Kumar, S. V., Alonge, C., and Tao, W.-K. (2009). A modeling and observational framework for diagnosing local land-atmosphere coupling on diurnal time scales. *J. Hydrometeorol.*, 10 :577–599,doi : 10.1175/2009JHM1066.1.
- [Santanello et al., 2011] Santanello, J. A. J., Peters-Lidard, C., and Kumar, S. (2011). Diagnosing the sensitivity of local land-atmosphere coupling via the soil moisture-boundary layer interaction. *J. Hydrometeorol.*, 12 :766–786.
- [Tuinenburg et al., 2011] Tuinenburg, O. A., Hutjes, R. W. A., Jacobs, C. M. J., and P., K. (2011). Diagnosis of local land-atmosphere feedbacks in india. *J. Clim.*, 24 :251–266. DOI :10.1175/2010JCLI3779.1.
- [Uppala et al., 2005] Uppala, S., Kallberg, P., Simmons, A., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Cairns, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Holm, E., Hoskins, B., Isaksen, I., Janssen, P., Jenne, R., McNally, A., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N., Saunders, R., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 :2961–3012.
- [Worden et al., 2007] Worden, J., Noone, D., and Bowman, K. (2007). Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle. *Nature*, 445 :528–532.