

Etude isotopique des précipitations sahéliennes à l'échelle de l'événement: relation avec les paramètres météorologiques et le type de précipitation

JEAN-DENIS TAUPIN

*IRD (Institut de Recherche pour le Développement), Whimper 442 y Coruña, Quito, Ecuador
jtaupin@inamhi.gov.ec*

GAELE GAULTIER

LHGI, Université Paris XI, 91405 Orsay et IRD, UMR HydroSciences Montpellier, France

GUILLAUME FAVREAU, CHRISTIAN LEDUC

IRD, UMR HydroSciences Montpellier, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

EDSON RAMIREZ

IRD, LSCE, CEA/CNRS Saclay, 91191, Gif sur Yvette, France

Résumé De nombreuses études effectuées sous différents climats montrent que la teneur isotopique des précipitations est conditionnée par un certain nombre de paramètres physiques liés à l'état de l'atmosphère (température, humidité ...), à la structure du nuage précipitant et à son histoire (origine de la masse d'air et chemin effectué). Durant huit années (1992–1999), la teneur isotopique des pluies a été mesurée à l'échelle de l'événement à Niamey (sud-ouest Niger) et dans sa région proche. Pour retracer l'acquisition de la teneur isotopique mesurée au sol en conditions sahéliennes, on a croisé ces teneurs avec des données de température et d'humidité relative mesurées au sol, des profils de radiosondages, des données satellitales infrarouge et des données d'intensité et de durée de la pluie. Il en ressort que la teneur isotopique suit un cycle saisonnier lié au déplacement de la mousson sur la zone en total accord avec la variation de T et de Hr . En début et en fin de saison humide, faibles précipitations, températures élevées et humidité relative faible favorisent un enrichissement isotopique. Au cœur de la saison, pluies importantes, températures basses et humidité relative proche de la saturation entraînent des teneurs appauvries. L'effet de masse a aussi une influence mais beaucoup plus faible que l'on aurait pu le supposer. La structure du nuage semble, par contre, fortement conditionner la teneur isotopique, le développement vertical convectif très fréquent au mois d'août donnant naissance à des pluies très appauvries malgré des quantités de pluies faibles.

Mots clefs événement; isotope de l'eau; Niger; précipitation

Key words events; isotopes of water; Niger; rainfall

INTRODUCTION

Peu d'études sur les isotopes de la pluie existent en Afrique de l'ouest à l'échelle journalière (Gallaire *et al.*, 1995; Mbonu & Travi, 1994; Travi *et al.*, 1993). Avec le développement du programme EPSAT-HAPEX de l'IRD en 1988 (Lebel *et al.*, 1997), des études isotopiques des précipitations à l'échelle régionale (Taupin *et al.*, 2000) et

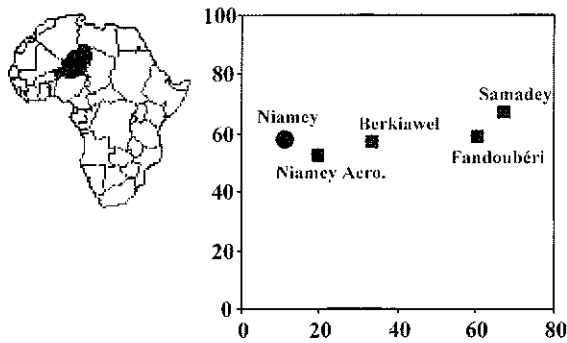


Fig. 1 Carte de localisation des stations de prélèvement des pluies pour analyse isotopique.

locale (Taupin *et al.*, 2002) ont permis de comprendre un certain nombre de processus, de l'échelle décadaire à saisonnière, en relation directe avec les paramètres climatologiques. A l'échelle infra-événementielle, on a montré que les isotopes rendent compte de l'évolution de la convection et des apports des différentes masses d'air dans la partie du front et de la traîne (Taupin & Gallaire, 1998). A l'échelle journalière, les teneurs isotopiques dépendent surtout des conditions météorologiques locales et du type de système précipitant, bien qu'elles obéissent aussi à un cycle saisonnier. Cette étude concerne huit années (1992–1999) de mesure des isotopes des précipitations journalières à Niamey ainsi que les mesures en 1992 sur un transect de 60 km, partant de Niamey et comportant cinq stations (Fig. 1). Localement, ces données isotopiques de pluie événementielle sont confrontées à des paramètres météorologiques (température et humidité relative au sol, température du sommet des nuages, humidité et température de profils altitudinaux) et des paramètres du système précipitant (intensité, durée) pour étudier les relations possibles entre isotope et paramètres physiques du système précipitant. Régionalement, on étudie la variabilité du signal isotopique et sa représentativité à cette échelle de temps.

ANALYSE DES DONNEES

Variabilité spatiale

Comme toute mesure ponctuelle, se pose la question de la représentativité spatiale d'une mesure isotopique et donc de la possibilité d'extrapolation régionale pour des études, entre autres, de signal d'entrée hydrogéologique. A l'échelle de l'événement, différentes études en milieu tempéré (Blavoux, 1978) présentent une grande variabilité spatiale des teneurs isotopiques des pluies. En milieu tropical, les différentes expérimentations montrent plutôt une assez grande homogénéité des teneurs et cela malgré le type de système prédominant (convection) qui aurait pu induire une grande variation des teneurs liée à la grande amplitude spatiale des hauteurs d'eau. On voit ainsi que sur le transect de 60 km Niamey–Samadey (Fig. 2) la variabilité reste faible (inférieure à 2‰ pour 78% des averses et à 2.5‰ pour 91% des événements). La forte

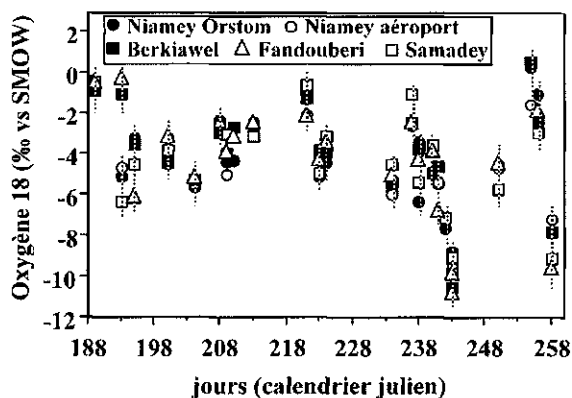


Fig. 2 Variation des teneurs isotopiques sur le transect Niamey Orstom-Samadey entre juillet et octobre 1992.

variabilité isotopique observée concerne des précipitations de début de saison, notamment l'averse du 11 juillet 1992 (193^{ème} jour en calendrier julien, -0.2 à -6.3% pour 1 à 12.4 mm), où l'on peut penser que les conditions de saturation de l'atmosphère ne sont pas remplies localement, ce qui conduit à une évaporation des gouttes de pluie des précipitations les plus faibles avant l'arrivée au sol. Ceci est confirmé par la position des points dans un graphique $^{18}\text{O}-^2\text{H}$: les deux stations ayant les teneurs les plus enrichies sont nettement sous la droite météorologique mondiale (DMM, droite $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$, qui définit la teneur isotopique des précipitations à l'échelle mondiale).

Comportement saisonnier

A l'échelle événementielle (Fig. 3(a)), on retrouve les mêmes caractéristiques déjà observées pour les courbes mensuelles (Taupin *et al.*, 2002) avec des valeurs isotopiques enrichies en début et fin de saison et un pic de teneurs appauvries au mois d'août en relation directe avec le mouvement antagoniste des masses d'air sèche (harmattan) et humide (mousson guinéenne). La variabilité isotopique sur la série de Niamey est importante, de -11.4 à $+7.0\%$ en $\delta^{18}\text{O}$ et de -89 à $+41\%$ en $\delta^2\text{H}$, caractéristique des régions tropicales.

Pour les huit années, les pentes des droites des pluies non évaporées ($P > 5$ mm et $\delta^{18}\text{O} < 0$) sont comprises entre 7.5 et 8.1, montrant une origine de l'humidité essentiellement atlantique, avec une ordonnée à l'origine entre 4.8 et 6.6. Cette droite est très proche de la DMM et est conforme à celle trouvée par Joseph *et al.* (1992) calculée à partir de la composition isotopique des nappes superficielles de la bande sahélienne ($\delta^2\text{H} = 7.5 \times \delta^{18}\text{O} + 4.8$).

Un certain nombre de points sont au-dessus de la DMM et montrent donc un excès en deutérium "d" bien supérieur à 10 (20% des analyses avec "d" entre 11 et 30.4). Une partie des précipitations serait donc issue d'un mélange entre vapeur océanique et recyclage continental (Taupin *et al.*, 2000).

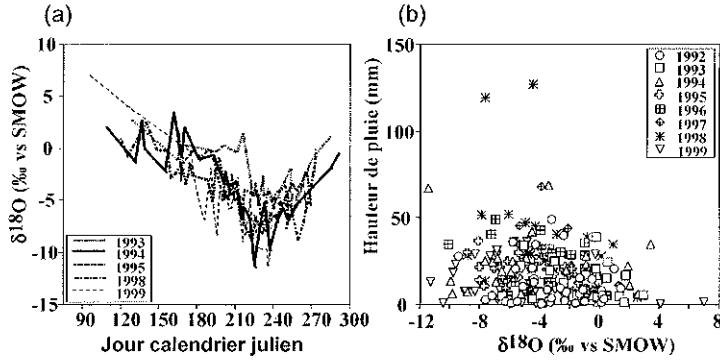


Fig. 3 (a) Répartition de la teneur isotopique des pluies événementielles au cours des saisons 1993–94–95–98–99; (b) relation teneurs isotopiques—hauteurs des pluies événementielles.

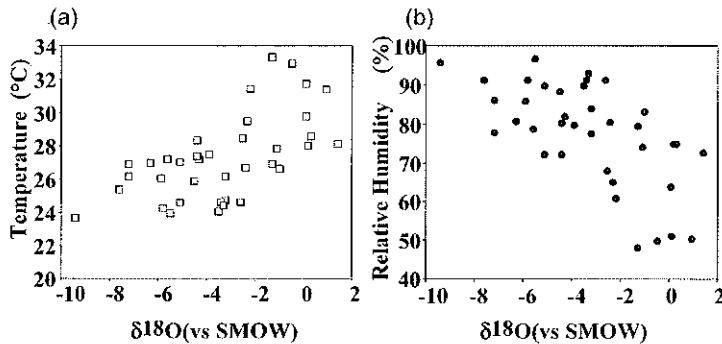


Fig. 4 Relation teneurs isotopiques à Niamey en 1992 avec: (a) la température journalière; (b) l'humidité relative journalière.

Température et humidité journalière au sol

Ces deux paramètres sont étroitement liés à la présence ou non de la mousson sur le Sahel. En début et fin de saison, on observe des températures élevées et une faible humidité relative dues à des phases d'avancée et de retrait successifs de la masse d'air humide. Les faibles précipitations, le plus souvent reprises par l'évaporation, induisent des teneurs isotopiques enrichies. Au cœur de la saison, le profil atmosphérique tend à la saturation en humidité lors des précipitations et les températures sont plus fraîches, induisant des teneurs isotopiques plus appauvries. On a donc, à l'échelle de l'événement des relations isotope-température et isotope-humidité relative très fortes (Fig. 4(a),(b)).

Température du sommet des nuages et effet de masse

En climat tropical, il est généralement admis que l'effet de masse (appauvrissement de la teneur isotopique de la pluie avec l'augmentation de la quantité de pluie) est prédominant dans l'appauvrissement des teneurs isotopiques des précipitations, mais il

n'est pas le seul processus: des teneurs très appauvries, situées toutes en août, peuvent aussi être liées à de faibles hauteurs de pluie, entre 5 et 10 mm (Fig. 3(b)). Plusieurs hypothèses peuvent être émises. Ces pluies du cœur de la saison pourraient résulter de la fin de vidange de la masse nuageuse. En effet, à cette période, les précipitations sont issues de systèmes de mésoéchelle qui, pour la plupart, prennent naissance bien à l'est de Niamey. La vidange progressive du réservoir de vapeur, au fur et à mesure du déplacement du système, peut conduire à un appauvrissement des teneurs isotopiques. La seconde hypothèse est basée sur une température de condensation beaucoup plus basse, liée à un développement convectif de haute altitude du système pluvigène. Dans ces conditions de convection intense, les gouttes de pluie se formant au sommet du nuage (12 000 à 15 000 m, entre -60 et -70°C) sont très appauvries et, lors de leur descente vers le sol, le processus de coalescence reste limité, l'équilibre thermique avec l'atmosphère se fait plus difficilement et ces gouttes de pluies peuvent préserver en partie leur signature originelle. A l'échelle décadaire, les occurrences de nuages inférieurs à -40°C sont dominantes en août (Taupin *et al.*, 2002) et les conditions sont donc propices au développement de nuages pouvant atteindre des altitudes supérieures à 10 000 m. A l'échelle journalière, l'étude à partir des images IR de Météosat montre que le nombre d'occurrence ($T < -60$) moyen par événement est de 4 au moins d'août, pour 3 en juillet et 2.5 en juin. Les petites pluies avec une teneur isotopique appauvrie (23/8, 1 mm, -59‰ en ^{18}O ; 25/8, 2 mm, -6.3‰ ; 28/8, 1.9 mm, -5.5‰ ; 25/8, 2 mm, -6.3‰ ; 29/8, 2.6 mm, -7.6‰) ont un taux d'occurrence élevé pour trois des pluies respectivement 3, 4 et 7, par contre la pluie apparemment la plus appauvrie a un nombre d'occurrence de 0. Il semble donc que, même si la température de nuage peut jouer un rôle dans l'appauvrissement des faibles précipitations, d'autres facteurs peuvent interférer. Il faut donc rester prudent, d'autant plus que hauteur de nuage et altitude de condensation ne coïncident pas obligatoirement.

De manière réciproque, en début de saison des pluies, pratiquement chaque année, certaines pluies ont des hauteurs conséquentes mais montrent des teneurs isotopiques fortement enrichies (1992: 05/6, $\delta^{18}\text{O} = 0.9\text{‰}$, 20.8 mm; 1993: 14/6, $\delta^{18}\text{O} = 0.5\text{‰}$, 24.6 mm; 1994: 20/4, $\delta^{18}\text{O} = 1.9\text{‰}$, 22.0 mm; 1998: 30/4, $\delta^{18}\text{O} = 0.9\text{‰}$, 34.5 mm; 1999: 24/6, $\delta^{18}\text{O} = -0.3\text{‰}$, 29.0 mm). On ne peut évidemment pas retenir le processus unique d'un marquage dû à l'évaporation des gouttes d'eau en cours de chute. Deux autres scénarios peuvent être évoqués:

- ces précipitations peuvent être générées par une vapeur initiale très enrichie car issue de la reprise évaporatoire au sol de pluies anciennes réévaporées,
- à cette époque, les conditions météorologiques ne favorisent pas l'instabilité et le développement de gros systèmes. Puisque les orages sont très localisés et issus de convection locale, ces précipitations correspondraient alors aux premiers stades de vidange de la masse de vapeur, avec donc des teneurs très enrichies.

Profil de radiosondage

En 1992, de multiples radiosondages ont été effectués de fin juin à début septembre (deux par jour, profils de température et d'humidité relative sur une tranche 0–20 000 m). On constate peu de variation de température de 0 à 15 000 m, hauteur maximum probable des nuages (Fig. 5(a)); par contre la teneur en eau varie fortement,

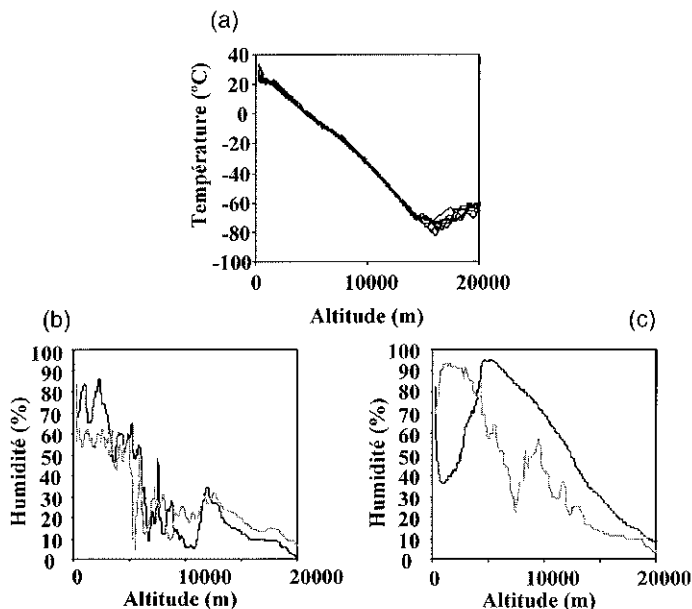


Fig. 5 (a) Différents profils de température entre le 28 août et le 6 septembre; (b) profil d'humidité relative le 28 juillet entre 10:23 et 22:25 TU (pluie 35 mm, -4.3‰ en ^{18}O); (c) profil d'humidité relative le 25 août à 10:30 et 22:40 TU (pluie 2 mm, -6.3‰ en ^{18}O).

d'autant plus s'il y a eu précipitation entre deux radiosondages successifs. On a donc essayé de distinguer les niveaux d'altitudes où l'humidité avait varié avant et après la précipitation. Il en ressort que pour la plupart des averses, la perte d'humidité se fait essentiellement sur les 3000 premiers mètres (Fig. 5(b)). Par contre, pour les quatre petites pluies à fort appauvrissement citées précédemment, les niveaux de perte d'humidité sont systématiquement plus élevés, supérieurs à 5000 m pour la pluie du 29/8. Si c'est effectivement cette vapeur qui est utilisée dans le processus de précipitation, on a correspondance entre teneurs appauvries dans le cas de faible précipitation. Néanmoins, comme pour les données satellitales, la mesure reste indirecte et sans une étude systématique sur plusieurs années, il faut rester prudent sur le processus physique en relation avec cette évolution des profils d'humidité.

Caractéristique de la précipitation

Grâce au dispositif pluviographique associé à la mesure isotopique de la pluie, on a pu comparer l'intensité maximum à différents pas de temps, l'intensité moyenne, la durée de l'averse en fonction des teneurs isotopiques et du type de convection locale ou de mésoéchelle. La relation entre convection locale ou de mésoéchelle et isotopes est claire: la configuration climatique favorise la convection locale en début et fin de saison et la convection de mésoéchelle au cœur de la saison. Des corrélations existent entre intensité et teneur isotopique, mais trop variables d'une année sur l'autre pour être statistiquement représentatives. On ne trouve pas non plus de relation avec la

durée totale des événements. Dans cette étude, on a travaillé sur la totalité de la pluie, mais le système convectif étant constitué d'un front et d'une traîne (le front représentant entre 50 et 90% de la pluie), il serait intéressant de continuer ce travail, en discriminant les deux parties du système précipitant pour essayer d'optimiser les corrélations.

CONCLUSIONS

La signature isotopique des précipitations à l'échelle événementielle en zone sahélienne est marquée d'une part par la saisonnalité qui obéit à la montée (et la descente) de la masse d'air humide venant du Golfe de Guinée, phénomène régional, et d'autre part par des facteurs locaux qui sont principalement la température et l'humidité de l'air mesurée au sol, le type de convection (locale ou de mésoéchelle), le développement altitudinal de la convection. Les relations avec les caractéristiques de la pluie totale ne sont par contre pas très nettes et des études complémentaires doivent être effectuées en discriminant la partie frontale et la traîne de la convection.

REFERENCES

- Blavoux, B. (1978) Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse doctorat, Univ. Paris VI, France.
- Gallaire, R., Fontes, J. C. & Zuppi, G. M. (1995) Isotopic characterization and origin of rainwater on the Air massif (Niger). In: *Application of Tracers in Arid Zone Hydrology* (ed. by E. M. Adar & C. Leibundgut), 293–302. IAHS Publ. no. 232.
- Joseph, A., Frangi, J. P. & Aranyosy, J. F. (1992) Isotope characteristics of meteoric water and groundwater in the Sahelo-sudanese zone. *J. Geophys. Res.* **97**(D7), 7543–7551.
- Lebel, T., Taupin, J. D. & D'Amato, N. (1997) Rainfall monitoring during HAPEx-Sahel. I. General rainfall conditions and climatology, *J. Hydrol.* **188–189**, 74–96.
- Mbonu, M. & Travi, Y. (1994) Labelling of precipitation by stable isotopes (^{18}O , ^2H) over the Jos Plateau and the surrounding plains (north-central Nigeria). *J. Afr. Earth Sci.* **19**, 91–98.
- Taupin, J. D. & Gallaire, R. (1998) Variabilité isotopique à l'échelle infra-événement de quelques épisodes pluvieux dans la région de Niamey, Niger. *C. R. Acad. Sci. Paris* **326**, série IIa, 493–498.
- Taupin, J. D., Coudrain-Ribstein, A., Gallaire, R., Zuppi, G. M. & Filly, A. (2000) Rainfall characteristics ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ΔT and ΔH_p) in Western Africa, regional scale and influence of irrigated areas. *J. Geophys. Res.* **105**(D9), 11911–11924.
- Taupin, J. D., Favreau, G., Gaultier, G., Leduc, C. & Marlin, C. (2002) Variabilité isotopique des précipitations sahéliennes à différentes échelles de temps à Niamey (Niger) entre 1992 et 1999: implication climatique. *C. R. Géoscience* **334**, 43–50.
- Travi, Y., Gac, J. Y., Gibert, F., Leroux, M. & Fontes, J. C. (1993) Composition isotopique et genèse des précipitations sur Dakar pendant les saisons des pluies 1982 et 1984. In: *Application des Techniques Isotopiques à l'étude des Changements Environnementaux Passé et Présent dans L'hydrosphère et L'atmosphère*, 495–497. Proc. Ser. IAEA-SM-329, Vienna, Austria.