

Variabilité isotopique des précipitations sahéliennes à différentes échelles de temps à Niamey (Niger) entre 1992 et 1999 : implication climatique

Jean-Denis Taupin^{a,*}, Gaëlle Gaultier^{b,c}, Guillaume Favreau^{b,c}, Christian Leduc^b, Christelle Marlin^c

^a IRD-INAMHI, Whymper 442 y Coruña, Apartado postal 17.12.857, Quito, Ecuador

^b UMR HydroSciences Montpellier, BP 5045, 34032 Montpellier, France

^c LHGI, université Paris-11, 91405 Orsay, France

Reçu le 16 juillet 2001 ; accepté le 3 octobre 2001

Présenté par Georges Pédro

Abstract – Isotopic variability of Sahelian rainfall at different time steps in Niamey (Niger, 1992–1999): climatic implications. The isotopic content of rainfall was measured in Niamey (Niger) over a period of eight years (1992–1999). Seasonal distribution of rainy events depends on the monsoon movement over the region. At the beginning and at the end of the rainy season, low rainfall, high temperatures and low relative humidity favour isotopic enrichment. In the middle of the rainy season, heavy rainfall, low temperatures and relative humidity close to saturation lead to isotopically depleted contents because of the mass effect; moreover, in the case of low rainfall, marked vertical convective development favours high altitude condensation. How far the Intertropical Front moves north, determines the quality of the rainy season and influences the isotopic contents. Thus the isotopic contents of rainfall are good climatic indicators. To cite this article: J.-D. Taupin et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 43–50. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Niamey / Sahel / rainfall / isotopes / climatology

Résumé – Durant huit années (1992–1999), la teneur isotopique des pluies a été mesurée à Niamey. Ces dernières suivent un cycle saisonnier lié au déplacement de la mousson sur la zone. 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, liées à l'effet de masse ; de plus, pour les pluies de faibles quantités, le fort développement vertical convectif favorise une condensation de haute altitude. La remontée plus ou moins importante du front intertropical vers le nord détermine la qualité de la saison des pluies et influe sur les teneurs isotopiques. Les isotopes des précipitations apparaissent donc comme de bons indicateurs climatiques. Pour citer cet article : J.-D. Taupin et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 43–50. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Niamey / Sahel / précipitations / isotopes / climatologie

Abridged version

1. Introduction

Numerous studies of rainfall isotopes in Europe and America have shown a significant correlation with environmental and meteorological parameters (e.g., [3, 5, 11]).

However, few studies have been carried out in Africa [1, 14]. A detailed study of rainfall isotopes was undertaken as part of the EPSAT–Niger program, which started in 1989 and is dedicated to the long-term survey of Sahelian rainfall [8]. For each event during the 1989 rainy season, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ were analysed along two transects in Benin and Niger. Results showed that air masses responsible for rain-

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : jdtaupin@inamhi.gov.ec (J.-D. Taupin).

fall over the Sahel originate in the Gulf of Guinea and that water evapotranspired in the Sudanian zone is recycled before falling in the Sahel [14]. Between 1992 and 1999, isotopic content of rainfall was sampled in Niamey (Niger), at the scale of the rainy event and at a smaller scale [13].

2. Climatic framework

Sahelian rainfall (April to October) depends on the position of the Intertropical Front (ITF) [10]. About 80 % of annual rainfall is due to convective systems (isolated cumulonimbus or squall lines moving westwards, several hundreds kilometres wide). In Niamey, mean annual rainfall for 1968–2000 was 508 mm [8]. With the exception of 1996, over 90 % of the annual rainfall (i.e., an average of 508 mm) was analysed for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ [2, 6]. Isotopic contents are expressed vs SMOW; the analytic error is 0.2 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and 1 ‰ for $\delta^2\text{H}$.

3. Results and interpretation

3.1. Annual scale

At the annual scale, the annual mean weighted by rainfall varied between -2.5 and -5.8 ‰ (table I). The interannual mean, -4.2 ‰, is comparable to the isotopic content in unconfined aquifers of the region [7, 9]. No regional climatological characteristic is correlated with the isotopic content.

3.2. Monthly scale

At the monthly or weekly scale, marked variation recurs each year during the rainy season (figure 1a, table I). At the beginning and at the end of the rainy season, isotopic contents are enriched by high temperatures and by the non-saturation of the atmosphere due to the instability of the monsoon. In the middle of the rainy season, when the monsoon is well established, isotopic contents become depleted because the atmosphere is saturated with water, temperatures are lower and numerous convective systems develop to a great height. The ^{18}O vs ^2H diagram (figure 1b) shows this seasonal variability. The dots under the WML (World Meteoric Line) give a line with a slope 5.9 expressing evaporation. The mass effect is not well correlated with isotopic content ($r^2 = 0.42$); however, temperature and relative humidity are much better descriptive [14]. For the period 1992–1999, the correlation is (table II):

$$\delta^{18}\text{O} = 1.03 T - 34.50 \quad (r^2 = 0.63) \quad \text{and}$$

$$\delta^{18}\text{O} = -0.16 H_r + 7.24 \quad (r^2 = 0.68) \quad \text{regression}$$

$$\delta^{18}\text{O} = 0.26 T - 0.13 H_r - 2.85$$

$$(r^2 = 0.69) \quad \text{multiple regression}$$

The relation is different of the annual relation of Dansgaard [5], $\delta^{18}\text{O} = 1.03 T - 13.6$, valid only for costal stations of North Atlantic.

We also compared two couples of dry (1993, 1997) and humid (1994, 1999) years using a time step of ten days. The movement of air masses over western Africa was analysed through:

- surface temperature data provided by Meteosat (infrared thermic), because the isoline 39° delimits the ITF northwards movement;
- the number of cold clouds, i.e., the outbreak frequency of clouds shown by infrared Meteosat images, whose summit temperature is lower than -40°C , because this temperature is considered to be highly correlated with rainfall in the Sahel [4].

In May 1993 and 1994, the isoline 39°C was approximately at the same latitude (figure 2a), but moved in August 1994 much farther north. The number of cold clouds ($< -40^\circ\text{C}$) in August confirms this northwards movement in 1994 in Niger (figure 2b). According to the distribution of rainfall (figure 2c), the monsoon was not in place until mid-July in both 1993 and 1994 and isotopic contents were relatively enriched. In 1994, the last third of July marked the real beginning of the rainy season (marked depletion in isotopic values), while in 1993 the monsoon remained in southern Niger. The rest of the season showed an exceptional intensification of the 1994 monsoon, with the ITF moving very far to the north. In 1993, the rainy systems over Niamey were linked with the structure of the ITF (local storms and squall lines) because of its failure to move far to the north. ITF structure is characterized by a vertical discontinuity in winds and humidity, which favours evaporation and mixing between rain and recycled vapour, and this limits isotopic depletion. In 1994, the high atmospheric humidity and frequent rainy events favoured the mass effect. Clouds with a great vertical ascent, i.e. with a low condensation temperature, also favoured isotopic depletion.

In 1997, the convection was jammed in south Niger, rainfall was much lower than usual and isotopic contents were partially enriched (figure 3). In 1999, the convection moved far to the north and reached its maximum in the last third of August with highly depleted isotopic content. In May 1997, even if rainfall was low, a large monsoon flux to Niger (figure 3a) was linked with highly depleted isotopic values.

The 1998 rainy season was very humid, with an exceptional total of 978 mm in Niamey, largely due to three extreme events in August and September. At the scale of Niger as a whole, clouds colder than -40°C were fewer than in 1999 and isotopic contents were consequently less depleted.

3.3. Event scale

At the scale of the event (figure 4a), isotopic contents ranged between $+7.0$ and -11.4 for $\delta^{18}\text{O}$ and between $+41$ and -89 ‰ for $\delta^2\text{H}$. During the eight years studied, the non-evaporated rainfalls ($P > 5$ mm, $\delta^{18}\text{O} < 0$) had slopes between 7.5 and 8.1, i.e., close to the WML slope (World Meteoric Line), and an origin ordinate between 4.8 and 6.6 [5]. Some points above the WML had a deuterium excess much higher than 10, which indicates vapour originating from soil evaporation and transpiration [14]. Some August events, with rainfall of less than 10 mm, were very depleted (figure 4b). This may be due either to the end of the emptying of the cloud mass originating in the Lake

Chad region, or to the development of convective system at high altitude leading to very negative condensation temperatures [12].

4. Conclusion

Because of strongly contrasting climatic situations, isotopes in Sahelian rainfalls provide interesting subjects of study. As they are enriched at the beginning and at the

end of the rainy season and depleted in the middle, they allow monitoring of monsoon movement. At the monthly or weekly scale, they match with satellite data. At the event scale, they can document the local state of the air mass (cloud emptying, recycled vapour, high altitude convection). The knowledge of actual climatology with the isotope of water allows the reconstruction of former climatology also.

1. Introduction

Depuis une quarantaine d'années, différentes études des précipitations en Europe et en Amérique ont montré des relations intéressantes entre teneur isotopique et situation climatique et météorologique. La composition isotopique des précipitations, mesurée au sol, résulte (par exemple [3, 5, 11]) :

- de conditions environnementales, tel l'effet de continentalité (appauvrissement successif des pluies en isotopes lourds lors du déplacement du nuage vers l'intérieur du continent), la latitude, l'altitude ;
- de paramètres météorologiques locaux, tels la température, l'humidité relative, etc. ;
- de caractéristiques du système pluvio-gène, telles l'effet de masse (associant les hauteurs de pluie les plus importantes avec les teneurs les plus appauvries), la structure et le type du nuage.

En Afrique, en revanche, les études isotopiques de la pluie sont peu nombreuses [14], surtout dans la partie ouest, où peu de séries longues mensuelles existent (Bamako, Kano, N'Djaména ; stations de l'Agence internationale de l'énergie atomique [1]). Avec le développement du programme EPSAT Niger de l'IRD en 1989 (étude à long terme des systèmes précipitants sahéliens [8]), une étude isotopique des précipitations a pu être menée. En premier lieu, durant la saison des pluies 1989, l'oxygène 18 et le deutérium ont été analysés à l'échelle de l'événement au Bénin et au Niger sur une vingtaine de postes, éclairant ainsi la variabilité spatiale des isotopes en fonction du gradient climatique entre le golfe de Guinée et le Sahel nigérien. Un des principaux résultats a été de mettre en évidence l'origine des masses d'air pluvio-gène sur le Sahel (contribution principale issue du golfe de Guinée) et la part du recyclage de l'eau par évapotranspiration des zones soudaniennes dans les pluies sahéliennes [14]. En second lieu, de 1992 à 1999, on a étudié la variabilité isotopique temporelle au Sahel à l'échelle événementielle et infra-événementielle [13], afin de mettre en relation teneurs isotopiques, paramètres climatologiques et situation climatique.

2. Situation climatique et conditions de l'étude

Les précipitations au Sahel (avril–octobre) dépendent presque exclusivement de la position du FIT (front intertropical) séparant l'Harmattan (masse d'air sèche et chaude) de la mousson guinéenne (masse d'air humide et frais) [10]. Pour près de 80 %, elles ont une origine convective, que ce soit sous forme de cumulonimbus isolés ou d'amas nuageux, organisés de plusieurs centaines de kilomètres de large, qui se déplacent d'est en ouest.

L'étude se situe à Niamey (moyenne annuelle de 508 mm pour la période sèche 1968–2000 [8]) où, durant huit années (1993 et 1997 déficitaires, 1994 et 1998 excédentaires), chaque événement pluvieux a été prélevé à la station IRD. L'analyse des isotopes stables (^{18}O , ^2H) a été menée sur plus de 90 % de la masse d'eau échantillonnée, sauf en 1996 (78 %). Pour l'analyse de ^{18}O , on équilibre 3 mL d'eau avec du CO_2 industriel de composition isotopique connue et, pour ^2H , on réduit 5 μL d'eau par le zinc pour obtenir de l'hydrogène gazeux [2, 6]. La mesure du rapport des isotopes se fait par spectrométrie de masse (laboratoire d'hydrologie et géochimie isotopique d'Orsay), par comparaison à un standard (VG micromass 602D et 602C) ; l'erreur sur la mesure est de $\pm 0,2 \text{ ‰}$ pour ^{18}O et $\pm 1 \text{ ‰}$ pour ^2H . Les teneurs isotopiques sont exprimées par rapport au SMOW en parts pour mille (‰).

3. Résultats et interprétations

3.1. Échelle annuelle

En climat sahélien, la saison des pluies se situe entre avril et octobre. Plus de 90 % des événements ont lieu entre juin et septembre, dont 65 à 70 % pour les seuls mois de juillet et août. À Niamey, la composition isotopique annuelle des pluies, pondérée des hauteurs, varie, sur les huit années d'étude, de $-2,4$ à $-5,8 \text{ ‰}$ (tableau 1). À cette échelle de temps, aucun caractère climatique régional ne semble corrélé à la teneur isotopique. Des années sèches,

Tableau I. Teneurs isotopiques annuelles et mensuelles pondérées par la hauteur de pluie à Niamey, 1992–1999 (en italique après la teneur en oxygène 18 : nombre d'événements analysés supérieurs à 5 mm).**Table I.** Annual and monthly isotopic contents weighted by rainfall in Niamey, 1992–1999 (italic following the oxygen-18 composition; number of analysed events over 5 mm).

	Annuel	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.
1992	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–3,5			–1,1; 5	–3,7; 9	–4,6; 16	–4,3; 6
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	–22			–2,1	–24	–31	–26
	<i>H (mm)</i>	467 (490) analysé (total)		100,8	178,8	157,1	34,0	
1993	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–2,4	2,9; 1		–1,1; 4	–0,5; 6	–4,1; 9	–2,3; 4
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	–17	16		–5	–9	–26	–21
	<i>H (mm)</i>	407 (447)	5,5		82,1	98,3	182,4	53,6
1994	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–4,6	1,9; 1	–0,5; 4	–0,8; 4	–3,1; 6	–7,6; 12	–6,5; 4
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	–29	11	–7	–1	–15	–52	–40
	<i>H (mm)</i>	642 (676)	23,6	55,2	75,6	162,7	273,0	72,3
1995	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–5,0			–2,4; 5	–3,6; 7	–7,4; 10	–3,8; 5
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	–33			–9	–18	–54	–32
	<i>H (mm)</i>	508 (537)			87,5	127,5	208,9	107,5
1996	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–4,7			–5,8; 4	–2,4; 4	–4,7; 11	
	$\delta^2\text{H}$ (‰)							
	<i>H (mm)</i>	439 (566)			111,6	85,3	232,1	
1997	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–3,2	–0,3; 1	–5,8; 2	–2,0; 4	–3,4; 3	–3,7; 4	–3,5; 4
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	–19	–26	–25	–15	–18	–19	–24
	<i>H (mm)</i>	417 (450)	5,7	31,2	128,0	96,9	66,4	69,5
1998	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–4,4	0,9; 1	–0,1; 3	–2,1; 3	–3,0; 7	–5,2; 9	–6,2; 8
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	–26	17	–3	–9	–28	–43	–46
	<i>H (mm)</i>	956 (978)	34,5	29,8	54,2	232,8	329,8	275,4
1999	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	–5,8	7; 1	4,1; 1	–1,1; 2	–5,0; 11	–8,4; 12	–5,3; 9
	$\delta^2\text{H}$ (‰)	–37	41	29	3	–33	–59	–31
	<i>H (mm)</i>	538 (567)	1,4	0,5	36,9	182,7	156,0	161,9

localement ou sur l'ensemble de la région montrent des teneurs isotopiques très variables ; pour les années à teneur isotopique appauvrie, aucun effet de masse n'apparaît vraiment. La moyenne interannuelle des pluies, $-4,2$ ‰, se retrouve bien, en revanche, dans les aquifères superficiels de la zone [7, 9].

3.2. Échelle mensuelle et décadaire

Des variations importantes existent au cours de la saison et se retrouvent d'une année à l'autre (*figure 1a, tableau I*). Le début de la saison des pluies est marqué par une montée du FIT très irrégulière, faite d'incursion et de retrait ; l'instabilité des masses d'air reste faible et localisée, donnant naissance à de rares orages isolés et de faibles hauteurs de pluie. L'atmosphère, encore en partie sous l'influence de l'harmattan, montre une température élevée et reste très désaturée, et cela même au cours des orages. Cette désaturation de la colonne d'air entraîne l'évaporation des gouttes d'eau, provoquant un enrichissement des teneurs isotopiques. Le milieu de saison est ca-

ractérisé par la prédominance du flux de mousson ; les pluies sont alors abondantes en nombre et en cumul, des systèmes convectifs à forte amplitude altitudinale peuvent se développer et les gouttes d'eau formées auront une teneur isotopique très appauvrie, conformément aux lois régissant le fractionnement isotopique ; l'atmosphère reste à un seuil de saturation élevé et la température est plus fraîche. Température de condensation basse, température au sol basse, effet de masse tendent ainsi à ce que les teneurs isotopiques des pluies au sol conservent une signature appauvrie. En fin de saison, le retrait de la mousson ramène au schéma du début de saison, avec des teneurs marquées par l'évaporation. Sur le diagramme ^{18}O vs ^2H (*figure 1b*), les teneurs du mois d'avril et du mois d'octobre sont fortement enrichies et nettement sous la droite météorologique mondiale (DMM), marquant une forte évaporation. Les teneurs des autres mois sont en général proches de la DMM, mais on peut supposer une légère évaporation pour les mois de mai et juin, qui ont des teneurs fortement enrichies. La teneur isotopique du mois de juillet 1993 est anormale-

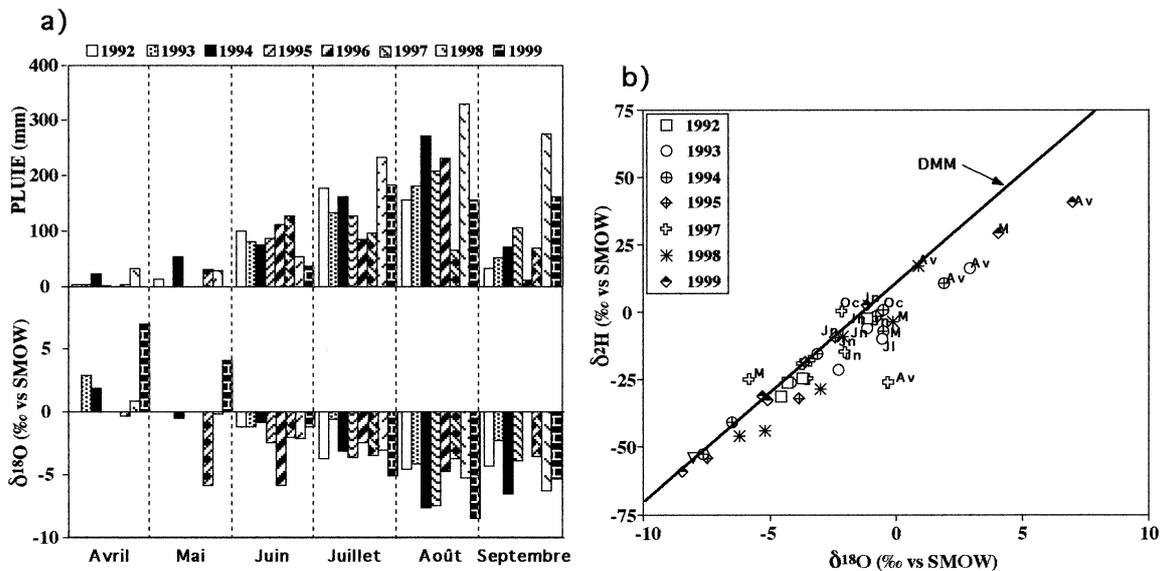


Figure 1. Teneurs isotopiques mensuelles des pluies à Niamey (1992–1999). **a.** Histogramme des teneurs et des cumuls mensuels. **b.** Relation ^{18}O – ^2H .

Figure 1. Monthly isotopic contents in Niamey rainfall (1992–1999). **a.** Histogram of monthly contents and sums. **b.** Relation between ^{18}O and ^2H .

ment enrichie et s'écarte fortement de la DMM ; les conditions climatiques particulièrement défavorables et sèches ont entraîné de nombreuses pluies, mais de faible hauteur, favorisant une reprise évaporatoire (cumul de pluie de 98 mm en six événements analysés), contrairement aux saisons 1995 et 1997, qui sont aussi déficitaires, avec un mois de juillet peu pluvieux, mais avec des hauteurs moyennes de pluies supérieures (127 mm en sept pluies et 97 mm en trois pluies respectivement), l'évaporation paraissant ainsi moins affecter ces deux années. L'ensemble des points sous la DMM ($n = 16$), forme une droite de pente 5,9, marquant l'évaporation : $\delta^2\text{H} = 5,92 \delta^{18}\text{O} + 0,68$ ($r^2 = 0,77$).

L'effet de masse (^{18}O vs hauteur) n'apparaît pas comme le seul paramètre déterminant dans l'acquisition de la teneur isotopique à l'échelle mensuelle ($r^2 = 0,42$). Les autres paramètres climatiques qui semblent gouverner la teneur isotopique à cette échelle de temps sont la température (T) et l'humidité relative (H_r) [14]. Pour l'ensemble des sept années (tableau II) où les données isotopiques sont complètes (90 % de la pluie analysée), les relations avec T et H_r sont significatives :

$$\delta^{18}\text{O} = 1,03 T - 34,50 \quad (n = 40, r^2 = 0,63) \quad \text{et}$$

$$\delta^{18}\text{O} = -0,16 H_r + 7,24 \quad (n = 40, r^2 = 0,68)$$

et en multirégression :

$$\delta^{18}\text{O} = 0,26 T - 0,13 H_r - 2,85 \quad (r^2 = 0,69)$$

Les valeurs diffèrent de la relation annuelle de Dansgaard [5], $\delta^{18}\text{O} = 1,03 T - 13,6$, qui n'est valide que pour les stations côtières de l'Atlantique nord.

À l'échelle décadaire, on a comparé la climatologie régionale et les teneurs isotopiques d'années sèches (1993 et 1997) et humides (1994 et 1999) pour apprécier leur sensibilité en fonction de situations climatiques contrastées. Deux indicateurs spatiaux ont été utilisés pour caractériser le déplacement des masses d'air sur l'Afrique occidentale :

- les champs thermiques de surface, issus des données satellitaires InfraRouge Thermique Météosat ; la température au sol de 39 °C marque la limite (FIT) entre les deux masses d'air Harmattan et Mousson ; on peut ainsi suivre l'évolution au cours du temps de la montée ou la descente de la mousson ;
- les taux d'occurrence des nuages froids, qui s'expriment par la fréquence d'apparition sur les images infrarouge Météosat des nuages dont la température sommitale est inférieure ou égale à -40 °C, température considérée comme fortement corrélée aux précipitations en zone sahélienne [4].

En mai, l'isohyète 39 °C est à peu près au même niveau latitudinal pour les deux années 1993 et 1994 (figure 2a). En revanche, en août 1994, l'isohyète remonte beaucoup plus au nord. Les occurrences de nuages froids (< -40 °C) du mois d'août confirme bien cette poussée vers le nord en 1994 sur le Niger (figure 2b). Par comparaison avec la répartition des pluies pour ces deux années (figure 2c) jusqu'à mi-juillet, la saison des pluies en 1993 et 1994 n'est pas parfaitement installée, les précipitations sont de type orageux, localisées le plus souvent, ce qui se traduit par un comportement identique du point de vue isotopique pour les deux années. Ces pluies tombant à travers une atmosphère peu ou non

Tableau II. Valeurs mensuelles (1992–1999) à Niamey de la température (°C) et de l’humidité relative (%).

Table II. Monthly values (1992–1999) of temperature (°C) and relative humidity (%) in Niamey.

	A	M	J	J	A	S	O
1992			31,6–57,5	29,0–67,5	27,7–74,5	29,7–63,5	
1993	33,9–19,5		32,0–54,0	29,1–65,5	28,4–72,0	29,6–66,5	31,9–45,5
1994	34,2–26,5	34,5–39,5	31,6–54,0	29,2–66,0	27,1–77,5	29,1–65,5	30,4–59,0
1995			32,0–52,1	29,1–62,1	28,4–73,7	29,6–66,3	
1997	33,8–28,0	33,5–48,0	31,7–56,0	30,1–63,0	30,1–65,0	30,7–65,0	32,8–49,0
1998	35,5–27,0	35,1–47,0	32,1–56,0	29,5–66,0	27,6–76,0	28,5–74,0	
1999	34,6–29,0	34,9–41,0	33,9–45,0	29,4–67,0	27,5–77,0	28,5–73,0	

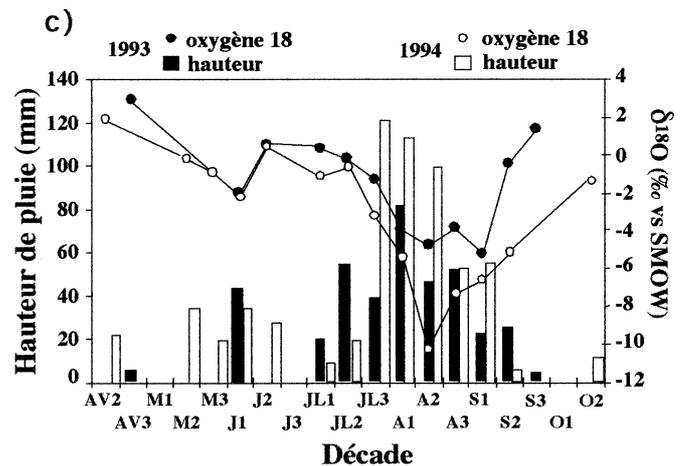
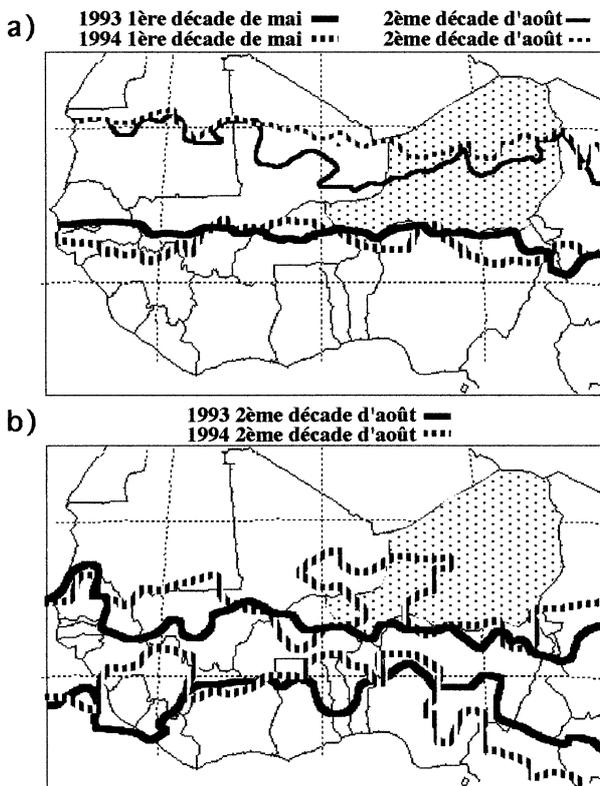


Figure 2. Saisons 1993 et 1994. **a.** Isoligne de température de surface 39 °C, première décennie de mai et seconde décennie d’août. **b.** Zone de répartition des occurrences de température sommitale de nuage inférieure à –40 °C pour la seconde décennie d’août en Afrique de l’Ouest. **c.** Histogramme décadaire des teneurs en ¹⁸O et des cumuls à la station de Niamey.

Figure 2. Years 1993 and 1994. **a.** Isoline 39 °C for surface temperature, first third of May and second third of August. **b.** Distribution of clouds with a summit temperature lower than –40 °C in the second third of August over West Africa. **c.** Histogram of ¹⁸O contents and sums in Niamey every ten days.

saturée, les teneurs isotopiques seront relativement enrichies par effet d’évaporation. À partir de la troisième décennie de juillet, on rentre complètement dans la saison des pluies en 1994, alors qu’en 1993 le flux de mousson reste bloqué sur le Sud du Niger. La mousson, une fois installée, génère des conditions optimum pour une convection maximale et des températures fraîches : ceci se traduit, comme on l’a vu précédemment, par un net appauvrissement des teneurs des pluies en 1994, à partir de la fin juillet. La suite de la saison montre un renforcement exceptionnel de la mousson en 1994, confirmé par une remontée du FIT très au nord du 22^e parallèle, latitude atteinte en année normale. En 1993, les systèmes touchant Niamey sont liés à la structure du FIT (orages locaux et lignes de grains), en raison de sa faible montée vers le nord. Sa discontinuité

verticale des champs de vent et d’humidité favorise l’évaporation et l’échange des pluies avec la vapeur recyclée, conduisant ainsi à limiter l’appauvrissement isotopique. En revanche, en 1994, les précipitations vont relever plus de la ZITC (zone intertropicale de convergence), siège de la convection intense ; le taux d’humidité dans l’atmosphère reste élevé, les pluies sont continues et souvent importantes et favorisent ainsi l’effet de masse. Cette zone permet aussi le développement de nuages à forte ascendance verticale, donc à température de condensation basse, favorisant là aussi un appauvrissement des teneurs isotopiques.

Pour les années 1997 et 1999, en milieu de saison, on retrouve le même schéma climatologique que pour les saisons 1993 et 1994 avec, en 1997, un blocage de la convection sur le Sud du Niger, entraînant

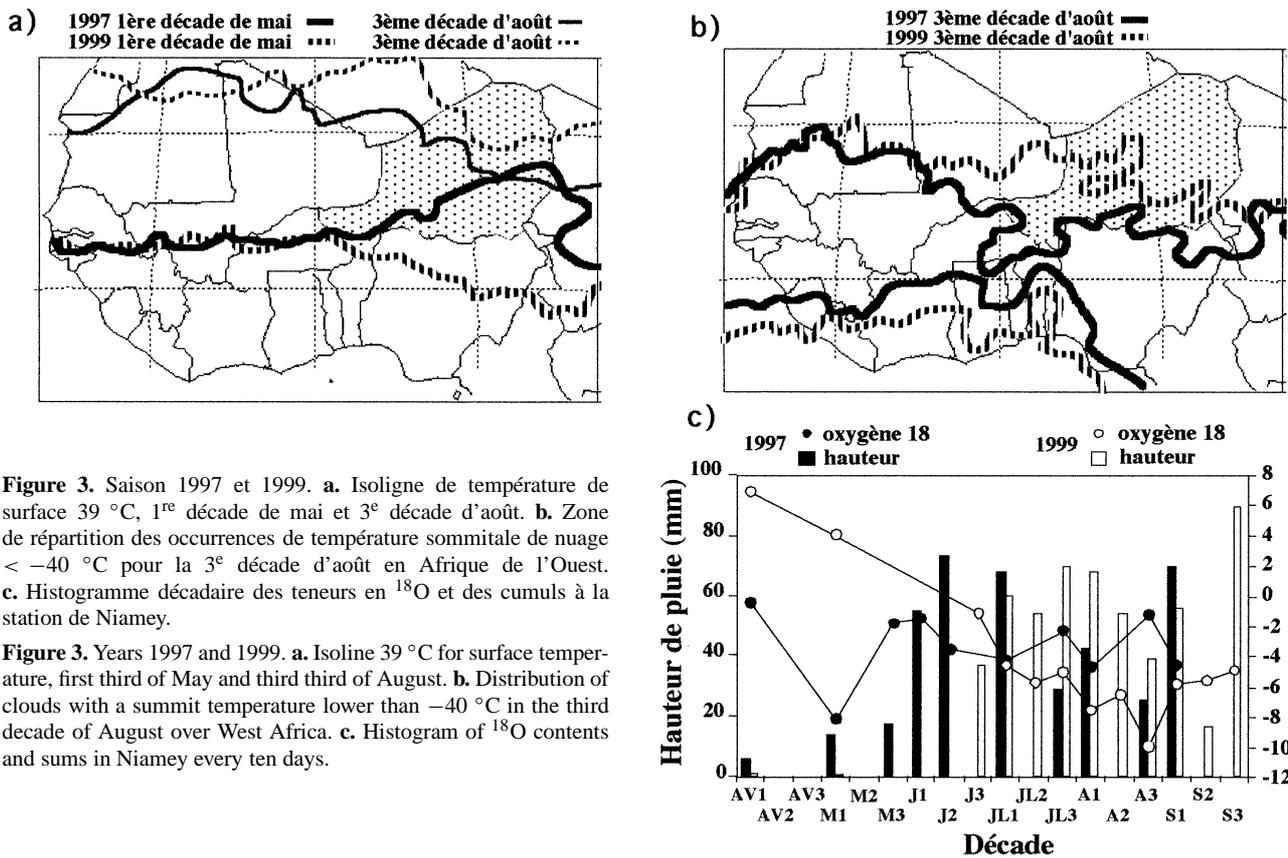


Figure 3. Years 1997 and 1999. **a.** Isoline 39°C for surface temperature, first third of May and third third of August. **b.** Distribution of clouds with a summit temperature lower than -40°C in the third decade of August over West Africa. **c.** Histogram of ^{18}O contents and sums in Niamey every ten days.

Figure 3. Years 1997 and 1999. **a.** Isoline 39°C for surface temperature, first third of May and third third of August. **b.** Distribution of clouds with a summit temperature lower than -40°C in the third decade of August over West Africa. **c.** Histogram of ^{18}O contents and sums in Niamey every ten days.

une baisse importante des précipitations et des teneurs partiellement enrichies (figure 3). Pour 1999, en revanche, la convection monte très au nord et, durant la troisième décennie d'août, on atteint un maximum de développement, conduisant à des teneurs particulièrement appauvries. On peut noter, au début du mois de mai 1997, une incursion importante du flux de mousson dans la partie nigérienne (figure 3a), qui semble se traduire, là aussi, par un fort appauvrissement des teneurs isotopiques, malgré de faibles cumuls de précipitations.

La saison 1998 est aussi une année humide, avec un cumul exceptionnel sur Niamey (978 mm), apporté en grande partie par trois pluies extrêmes en août et septembre, mais à l'échelle du Niger, le taux d'occurrence des nuages froids ($< -40^{\circ}\text{C}$) reste moins élevé qu'en 1999 et les teneurs isotopiques sont donc moins appauvries.

3.3. Échelle de l'événement

On retrouve les mêmes caractéristiques déjà observées pour les courbes mensuelles, avec des valeurs isotopiques enrichies en début et en fin de saison, ainsi qu'un pic de teneurs appauvries au mois d'août (figure 4a). La variabilité isotopique 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 $\delta^{18}\text{O} < 0$) restent proches de la DMM et sont respectivement comprises entre 7,5 et 8,1, avec une ordonnée à l'origine d entre 4,8 et 6,6 [5]. 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), signe d'une contribution de vapeur issue de l'évaporation des sols et de la végétation [14].

En climat tropical, il est généralement admis que l'effet de masse 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 (figure 4b). Plusieurs hypothèses peuvent être émises : ces pluies, qui se situent au cœur de la saison, pourraient résulter d'une fin de vidange de la masse nuageuse ; en effet, en 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 [12]. La seconde hypothèse est basée sur une température de condensation beaucoup plus basse, liée à un dévelop-

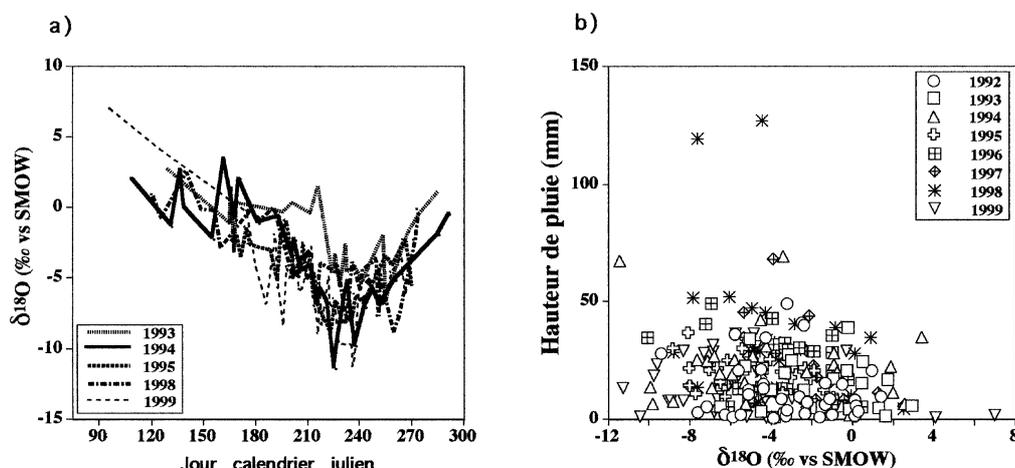


Figure 4. a. Répartition de la teneur isotopique des pluies événementielles au cours des saisons 1993–1994–1995–1998–1999. **b.** Relation teneurs isotopiques–hauteurs des pluies événementielles.

Figure 4. a. Distribution of isotopic contents of rainy events in 1993–1994–1995–1998–1999. **b.** Relation between isotopic content and rainfall of rainy events.

pement convectif de haute altitude du système pluviogène. 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 ; lors de leur descente vers le sol, le processus de coalescence reste limité, l'équilibre thermique avec l'atmosphère se fait plus difficilement. Ainsi, ces gouttes de pluie peuvent préserver en partie leur signature originelle. On a vu précédemment que les occurrences de nuages inférieurs à -40 °C sont dominantes en août et donc que les conditions sont propices au développement de nuages pouvant atteindre des altitudes supérieures à 10 000 m.

4. Conclusion

L'utilisation des isotopes des précipitations en zone sahélienne s'avère d'un grand intérêt, en raison des si-

tuations climatologiques très contrastées au cours de la saison des pluies. Ils sont un marqueur des mouvements de la mousson et sont ainsi le reflet de l'état de saturation de l'atmosphère. Les isotopes permettent de discriminer des situations climatiques extrêmes à des échelles de temps mensuelle et décadaire ; ils sont en bon accord avec les données satellitaires retranscrivant l'état climatique régional. À l'échelle de l'événement, bien que le signal reste complexe à interpréter, les isotopes enregistrent l'état de la masse d'air localement (vidange du nuage, apport de vapeur recyclée, convection de haute altitude). Cette forte connexion entre les isotopes et la climatologie actuelle permet aussi la reconstruction de la climatologie passée à partir des archives des eaux souterraines ou/et des archives lacustres carbonatées (l'oxygène 18 des carbonates précipitant en équilibre avec l'oxygène de l'eau).

Références

- [1] AIEA, Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation, Technical Reports Serie 331, AIEA, Vienna, 1992.
- [2] Coleman M.I., Shepherd T.J., Durham J.J., Rouse J.E., Moore G.R.D., Reduction of water with zinc for hydrogen analysis, *Anal. Chem.* 54 (1982) 993–995.
- [3] Craig H., Isotopic variations in meteoric waters, *Science* 133 (1961) 1702–1703.
- [4] Dagorne D., Banque de données Météosat-Veille climatique Agrhymet 1986–1999, CD-Rom, IRD Bondy, 2000.
- [5] Dansgaard W., Stable isotopes in precipitation, *Tellus* 16 (4) (1964) 436–468.
- [6] Epstein S., Mayeda T., Variations of the ^{18}O content of waters from natural sources, *Geochim. Cosmochim. Acta* 4 (1953) 213–224.
- [7] Joseph A., Frangi J.-P., Aranyosy J.-F., Isotope characteristics of meteoric water and groundwater in the Sahelo-Sudanese zone, *J. Geophys. Res.* 97 (D7) (1992) 7543–7551.
- [8] Lebel T., Taupin J.-D., D'Amato N., Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology, *J. Hydrol.* 188–189 (1997) 74–96.
- [9] Leduc C., Taupin J.-D., Hydrochimie et recharge de la nappe phréatique du Continental terminal (Niamey, Niger), in : Peters N.E., Coudrain-Ribstein A. (Eds.), *Hydrochemistry*, AISH Publ. n° 244, 1997, pp. 235–243.
- [10] Leroux M., Le climat de l'Afrique tropicale, Champion, Paris, 1983.
- [11] Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R., Isotopic patterns in modern global precipitation, in : *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophysical Monograph, Vol. 78, 1993, pp. 1–36.
- [12] Taupin J.-D., Gallaire R., Fontes J.-C., Isotopic study of rainfall in the Sahelian zone (Niger) along two transects, E–W (Lake Chad–Niamey) and N–S (Agadez–Niamey), in : Adar E.M., Leibundgut C. (Eds.), *Application of tracers in arid zone hydrology* AISH Publ. n° 232, 1995, pp. 285–292.
- [13] Taupin J.-D., Gallaire R., Variabilité isotopique à l'échelle infra-événement de quelques épisodes pluvieux dans la région de Niamey, Niger, *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa* 326 (1998) 493–498.
- [14] Taupin J.-D., Coudrain-Ribstein A., Gallaire R., Zuppi G.M., Filly A., Rainfall characteristics ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ΔT and ΔH_f) in Western Africa, regional scale and influence of irrigated areas, *J. Geophys. Res.* 105 (D9) (2000) 11911–11924.