

Analyses isotopiques et chimiques des précipitations sahéliennes de la région de Niamey au Niger: implications climatologiques

JEAN-DENIS TAUPIN

Orstom, BP 11416, Niamey, Niger. Adresse actuelle: 41 B^d des Provinces, 69200 S^{te} Foy les Lyon, France

ROBERT GALLAIRE

Orstom, LHGI, Université Paris XI, Orsay, France

YVES ARNAUD

Orstom, BP 11416, Niamey, Niger

Résumé L'étude se situe dans la région de Niamey au Niger, en milieu sahélien (P₅₀₀ mm). Un échantillonnage systématique des pluies a été effectué durant les hivernages (saison des pluies) de 1992 à 1995, de pluviosités variées. A l'échelle annuelle la composition isotopique pondérée n'apporte pas d'information significative. Par contre, à l'échelle mensuelle les teneurs isotopiques apparaissent liées à la température et à l'humidité relative. Au pas de l'événement enfin, la variation isotopique rend bien compte des différents facteurs auxquelles les précipitations sont soumises: évaporation en cours de chute, effet de masse, effet de continentalité, effet convectif de haute altitude. Les masses d'air sont principalement issues du golfe de Guinée, mais les teneurs isotopiques sont aussi le reflet d'un mélange important avec de la vapeur recyclée. La chimie met en évidence l'absence de pollution et la forte reprise évaporatoire à laquelle les gouttes d'eau sont soumises en cours de chute. Enfin, la comparaison des données isotopiques aux images satellitaires permet de les relier à la situation climatologique régionale.

INTRODUCTION

La composition isotopique des précipitations arrivant au sol est la conséquence de processus régionaux tels que l'effet de continentalité (appauvrissement successif en isotopes lourds des pluies lors du déplacement du nuage vers l'intérieur du continent), ou l'effet de masse (associant les hauteurs de pluies les plus importantes aux teneurs les plus appauvries; Dansgaard, 1964). Dans le nuage, le fractionnement isotopique entre les phases vapeur et liquide, lors du processus de condensation, enrichit en isotopes lourds la phase liquide au dépend de la phase vapeur. La goutte d'eau issue de la condensation va ensuite subir des interactions physiques qui vont modifier sa composition isotopique initiale. A l'intérieur du nuage, les mouvements turbulents s'accompagnent de processus de coalescence et d'un équilibrage thermique partiel. Lors de la chute, les gouttes d'eau ont tendance à perdre du volume par évaporation; l'atmosphère de la colonne précipitante sahélienne étant plutôt sous-saturée par rapport à celle du nuage. Des échanges thermiques variés, dépendant du différentiel de saturation, se développent alors; le réchauffement lié à la progression vers les basses

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: B*15696 Ex: 1



couches atmosphériques étant plus ou moins compensé par la consommation énergétique de l'évaporation. Les causes du fractionnement à la condensation étant identiques pour ^{18}O et ^2H , dans un graphe ^2H vs ^{18}O les pluies non évaporées se placent sur la Droite Météorologique Mondiale (DMM):

$$\delta^2\text{H} = A \cdot \delta^{18}\text{O} + B, \text{ avec } A=8 \text{ et } B=10 \quad (1)$$

Les points se trouvant sous la DMM, qui présentent donc un excès en oxygène-18, sont le signe d'une reprise évaporatoire des pluies en cours de chute. L'excès en deutérium " d " ($d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$) supérieur à 10, est caractéristique d'un recyclage de la vapeur locale.

Sur la base de paramètres climatologiques locaux et régionaux, une explication de la variation des rapports isotopiques et de la composition chimique des pluies est proposée, pour différentes échelles de temps, de l'année à l'événement.

SITUATION ET CONDITIONS DE L'ETUDE

L'étude se situe au Niger, sur le degré carré EPSAT (Etude des Précipitations par SATellite) 13-14° N et 2-3° E (Fig. 1). Le mouvement des masses d'air de cette région sahélienne dépend de l'antagonisme des deux anticyclones subtropicaux:

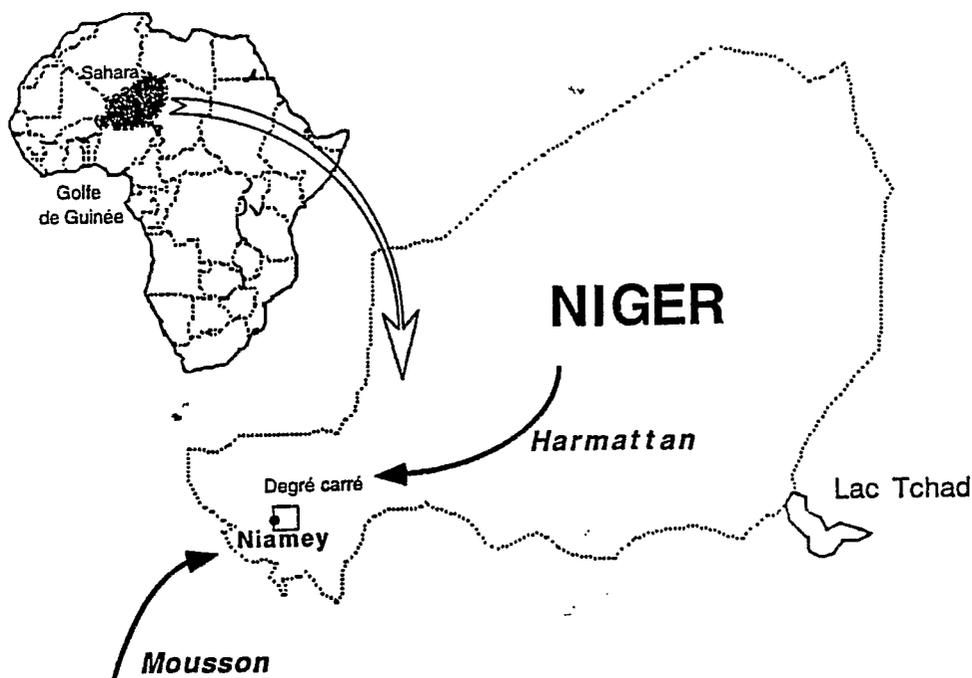


Fig. 1 Situation géographique de l'étude.

Au sud, septembre, humide et saharien po secteur E-N alternatif de deux mass InterTropic est conditio latitude saha dans le coin 39°C (Guil locaux, des méridienne continues il

Les eat l'évènement Deutérium chimique a l'objet de p

INTERPI

Echelle an

En climat s ont lieu er Niamey, la -2,44 à -4, 4,65‰ en globaleme 1, AIEA, 1 -4,11‰ es cette échel teneur iso montrent c appauvrie, teneurs an inversé, pt les plus fa

Tableau 1

An	196
mm	587
$\delta^{18}\text{O}$	-2,5

Au sud, l'anticyclone maritime de Sainte-Hélène, très dynamique de février à septembre, est responsable de la poussée vers le nord de la mousson, masse d'air humide et fraîche de secteur S-SO venant de l'Atlantique. Au nord, l'anticyclone saharien pousse vers le sud, d'octobre à février, une masse d'air chaude et sèche de secteur E-NE qui va surplomber le flux de mousson. Le renforcement saisonnier alternatif des deux anticyclones conduit à l'existence d'une frontière mobile, entre les deux masses d'air, qui est appelée Front InterTropical (FIT) au sol, et Zone InterTropicale de Convergence (ZITC) en altitude. La saison des pluies (avril à octobre) est conditionnée par la remontée progressive vers le nord du FIT, qui peut atteindre une latitude saharienne (25°N). Le caractère des précipitations est fonction de leur situation dans le coin humide. En retrait de la trace au sol du FIT, matérialisée par l'isotherme 39°C (Guillot & Pennarum, 1993, 1994), interviennent successivement: des orages locaux, des convections de méso-échelle ou des lignes de grains (structure convective méridienne se déplaçant d'est en ouest), des convections fortes donnant des pluies continues importantes et peu orageuses.

Les eaux du pluviomètre ORSTOM de Niamey ont été prélevées à l'échelle de l'événement, entre 1992 et 1995. La détermination des isotopes stables (Oxygène-18 et Deutérium) a été menée sur plus de 90% de la masse d'eau échantillonnée, et une étude chimique a été entreprise en 1992, année où neuf autres stations du degré carré ont été l'objet de prélèvements pour l'établissement de la valeur isotopique annuelle pondérée.

INTERPRETATION ET DISCUSSION

Echelle annuelle

En climat sahélien, plus de 90% des événements de la saison des pluies (avril à octobre) ont lieu entre juin et septembre; dont 65 à 70% pour les mois de juillet et août. A Niamey, la composition isotopique annuelle des pluies, pondérée des hauteurs, varie de -2,44 à -4,99‰ (-3,50‰ en 1992 pour 490,1 mm; -2,44‰ en 1993 pour 446,6 mm; -4,65‰ en 1994 pour 675,9 mm; -4,99‰ en 1995 pour 536,5 mm). Ces valeurs sont globalement comparables à celles de la série longue de N'Djamena au Tchad (Tableau 1, AIEA, 1992) qui appartient à la même bande sahélienne. La moyenne inter-annuelle -4,11‰ est aussi celle des aquifères superficiels de la bande (Joseph *et al.*, 1992). A cette échelle annuelle, aucun caractère climatologique régional ne semble corrélé à la teneur isotopique. Des années sèches localement, ou sur l'ensemble de la région, montrent des teneurs isotopiques très variables; et pour les années à teneur isotopique appauvrie, aucun effet de masse n'apparaît vraiment. En 1992, sur le degré carré, les teneurs annuelles varient spatialement de -3,4 à -5,1‰, et l'effet de masse est même inversé, puisque les teneurs globalement les plus appauvries correspondent aux pluies les plus faibles.

Tableau 1 Chronique des teneurs isotopiques annuelles des précipitations à la station de N'Djamena (d'après IAEA, 1992).

An	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1977	1978
mm	587	593	611	560	465	652	423	603	319	425	753	540	667
$\delta^{18}\text{O}$	-2,52	-3,20	-5,36	4,23	-3,13	-6,85	-5,89	-1,20	3,20	-3,23	-5,18	-3,06	-3,68

Echelle mensuelle

A cette échelle, les variations saisonnières se retrouvent d'une année sur l'autre (Fig. 2). En début de saison des pluies la montée du FIT, très irrégulière, génère une instabilité limitée et localisée, qui ne donne naissance qu'à de rares et faibles averses. L'atmosphère conserve une température élevée et une faible hygrométrie qui expliquent les teneurs isotopiques enrichies des pluies. En milieu de saison le flux de mousson est bien établi, les systèmes convectifs de forte amplitude produisent des pluies plus nombreuses et abondantes qui maintiennent l'atmosphère rafraîchie à un niveau hygrométrique élevé expliquant l'appauvrissement isotopique de cette période. En fin de saison des pluies, le retrait de la mousson ramène au schéma initial, avec des teneurs marquées par l'évaporation. Les pluies d'octobre, comme celles d'avril, sont les plus enrichies; elles se positionnent nettement sous la DMM (Fig. 3), alors que les pluies des autres mois en sont globalement proches. Le rapport isotopique de juillet 1993, anormalement élevé, signale des conditions atmosphériques très évaporantes, tard dans la saison.

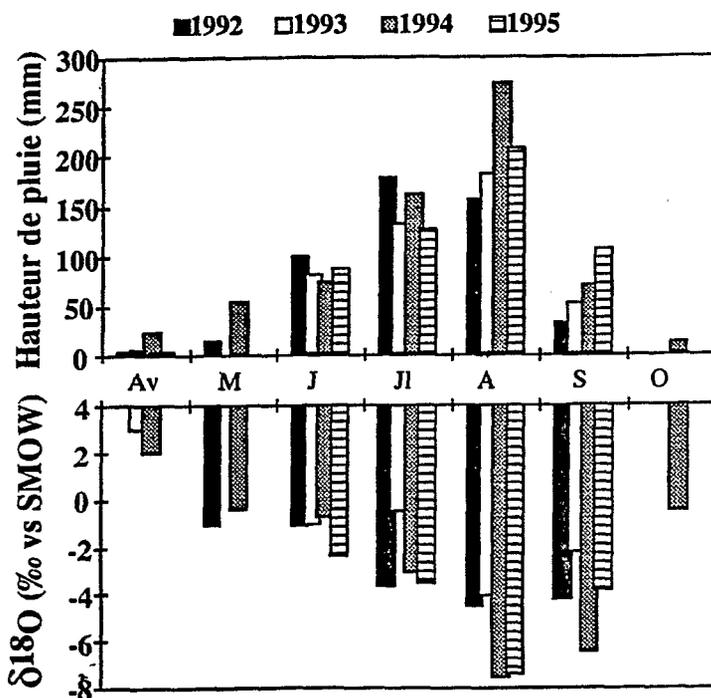


Fig. 2 Teneurs en oxygène-18 et hauteurs de pluie mensuelles pour les années 1992 à 1995 à la station de Niamey Orstom.

Température et humidité relative semblent plus particulièrement influencer la composition isotopique des pluies à cette échelle de temps; comme le montrent en 1994 (Tableau 2) les liaisons: teneur isotopique et température moyenne mensuelle ($r^2 = 0,75$), et teneur isotopique et humidité relative moyenne mensuelle ($r^2 = 0,88$). Sur les quatre années d'étude (1992-1995) les relations sont globalement conservées:

$\delta^{18}O = 1,90$
 $\delta^{18}O = 0,75$
 Dans le cas de la série
 pratiquement identique

Tableau 2 $\delta^{18}O$ pendant la

Mois	A
$\delta^{18}O$ pond	1,90
T°C moy	34,2
h _r moy	26,5

La recherche
 entreprise à par
 676 mm an⁻¹) c
 la série ($\delta^{18}O =$
 issus des donn
 déplacement d
 (Guillot & Pe
 susceptibles de
 considérés cor

$$\delta^{18}\text{O} = 1,07 \cdot T - 35,1 \quad r^2 = 0,68 \quad (2)$$

$$\delta^{18}\text{O} = 0,15 \cdot h_r + 6,5 \quad r^2 = 0,71 \quad (3)$$

Dans le cas de la relation ^{18}O vs T , les valeurs de pente et d'ordonnée à l'origine sont pratiquement identiques à celles identifiées au Burkina Faso (Mathieu *et al.*, 1993).

Tableau 2 $\delta^{18}\text{O}$ pondéré, température et humidité relative moyennes mensuelles durant la saison de pluies 1994 à la station de Niamey Aéroport.

Mois	A	M	J	J	A	S	O
$\delta^{18}\text{O}$ pond	1,90	-0,5	-0,81	-3,13	-7,62	-6,5	-0,52
T°C moy	34,2	34,5	31,6	29,2	27,1	29,1	30,4
h_r moy	26,5	39,5	54,0	66,0	77,5	65,5	59,0

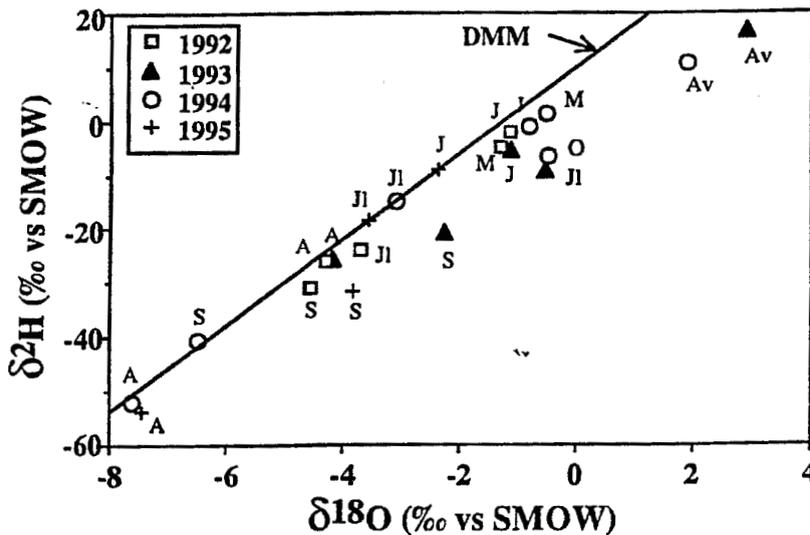


Fig. 3 Deutérium en fonction de l'oxygène-18 au pas mensuel pour les années 1992 à 1995.

La recherche d'une liaison entre rapport isotopique et situation climatologique a été entreprise à partir des années 1993 et 1994, dont les pluviosités très différentes (446 et 676 mm an⁻¹) correspondent aux valeurs isotopiques pondérées annuelles extrêmes de la série ($\delta^{18}\text{O} = -2,44\text{‰}$ en 1993 et $\delta^{18}\text{O} = -4,65\text{‰}$ en 1994). Deux indicateurs spatiaux, issus des données infrarouges du satellite Météosat ont été utilisés pour caractériser le déplacement des masses d'air ouest africaines: les champs thermiques de surface (Guillot & Pennarun, 1993, 1994) et les taux d'occurrence des nuages froids susceptibles de provoquer des pluies (Lahuec & Pennarun, 1993, 1994). Les nuages considérés comme froids étant ceux dont la température sommitale est inférieure ou

égale à -40°C . Le déplacement au sol de l'isotherme 39°C (FIT), montre qu'en mai (Fig. 4a) la situation est à peu près identique en 1993 et en 1994. En août, la position de cette isotherme est très différente sur toute la bande sahélienne; l'écart latitudinal entre les deux années se creuse dès juillet, en faveur de 1994, pour atteindre près de 400 km le mois suivant. Cette avancée, plus importante en 1994, du flux de mousson, se traduit par un plus grand développement du "coin humide" sur le Niger, à l'intérieur duquel, l'instabilité croissante entraîne une augmentation des altitudes de convection et du nombre d'événements pluvieux.

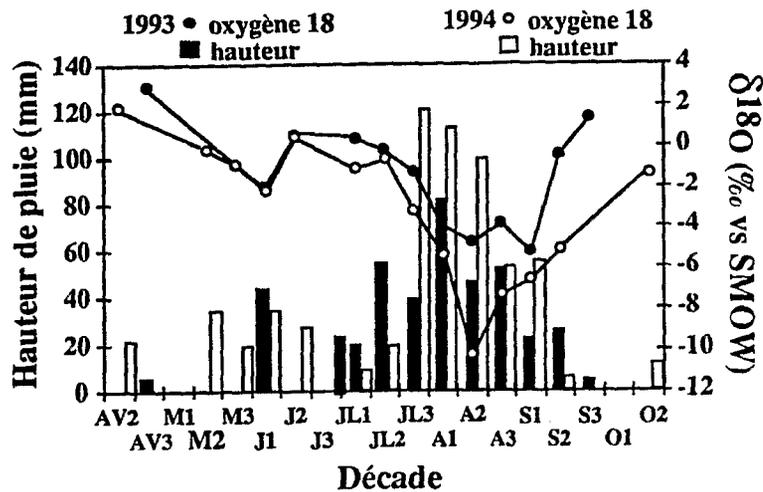


Fig. 4 Indicateurs spatiaux issus des données infrarouges Météosat pour 1993 et 1994: (a) Isotherme au sol 39°C (FIT) en mai et en août; and (b) Aire de fréquence 1 à 10% des occurrences de nuages froids des images traitées d'août 1993 et août 1994.

L'étude des occurrences de nuages froids confirme bien l'analyse du champ thermique au sol. En 1993, dès le mois de mai, le flux de mousson est bloqué au sud de la bande sahélienne. A cette date, la différence des teneurs isotopiques entre les deux années n'est pas sensible, car c'est le degré hygrométrique, encore modéré de l'air, qui contrôle l'enrichissement isotopique (Fig. 5). En août, l'aire de répartition de la fréquence "1-10%" des nuages froids à -40°C , est nettement plus au nord en 1994 qu'en 1993 (Fig. 4b). De plus, la valeur de ces fréquences est supérieure en 1994 (6% en août et 9% en septembre). Enfin, les teneurs isotopiques de ces deux mois sont plus appauvries en 1994 qu'en 1993 (Figs 2 et 3).

L'écart des teneurs isotopiques, constaté au cœur des hivernages 1993 et 1994, pourrait bien résulter de la différence des conditions climatologiques. En 1993, les systèmes pluvio-gènes, qui vont toucher la zone d'étude, sont liés à une structure FIT (orages locaux et lignes de grains) caractérisée par une discontinuité verticale (fortes turbulences) des champs de vent et d'humidité, qui favorisent l'évaporation et l'échange des pluies avec la vapeur recyclée. Tous ces phénomènes conduisent à limiter l'appauvrissement isotopique (Eriksson, 1965). En 1994, les précipitations relèvent

d'avantage de la ;
condensation plu
fréquentes et im
masse.

Echelle de l'

Comme pour
composition i
un pic de ten
(qui est une
(+3,4 à -11,4
 ^{18}O , les plu
droites de pe
proches de
Aranyossy (C
la bande sah
océanique (C
issues de cir
1992).

davantage de la ZITC, siège de convections intenses en altitude (températures de condensation plus basses). Le taux d'humidité reste élevé et les pluies sont plus fréquentes et importantes, favorisant ainsi appauvrissement isotopique et effet de masse.

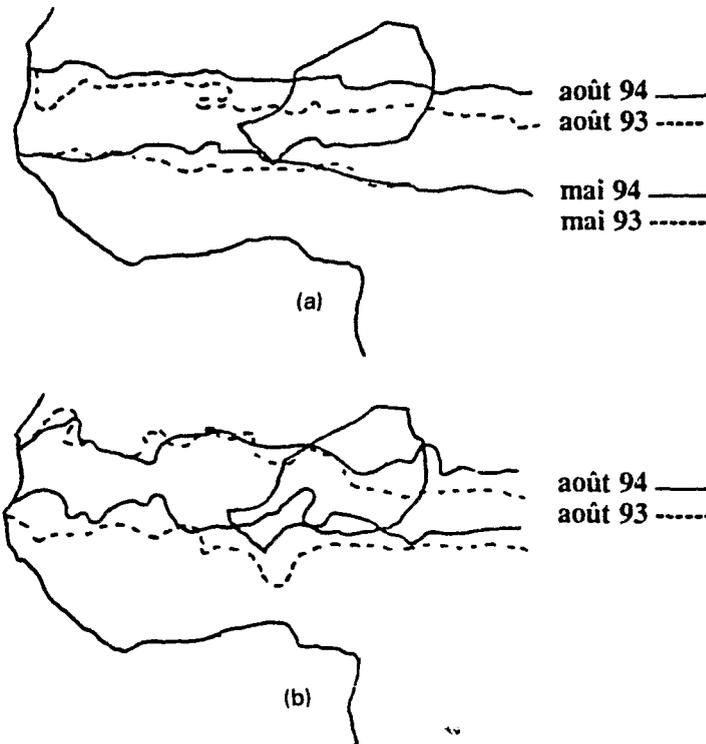


Fig. 5 Teneurs en oxygène-18 et hauteurs de pluies décadaires pour les années 1993 et 1994.

Echelle de l'événement

Comme pour les courbes mensuelles, la représentation en fonction du temps de la composition isotopique à l'échelle de l'événement montre, pour les années 1992 à 1995, un pic de teneurs appauvries en août (Fig. 6). La variabilité des rapports isotopiques (qui est une caractéristique des régions tropicales) est importante, pour l'oxygène-18 (+3,4 à -11,4‰) comme pour le deutérium (+16,4 à -80,1‰). Sur un diagramme ^2H vs ^{18}O , les pluies, supposées non évaporées, des quatre années, se regroupent autour de droites de pentes 7,5 à 7,8 et d'ordonnées à l'origine 4,8 à 6,6 (Fig. 7). Ces droites, proches de la DMM, correspondent bien aussi à celle déterminée par Joseph & Aranyossy (1989) sur la base de la composition isotopique des aquifères superficiels de la bande sahélienne ($\delta^2\text{H} = 7,5 \cdot \delta^{18}\text{O} + 4,8$). Les pluies semblent donc avoir une origine océanique (Golfe de Guinée), sans exclure la possibilité d'une participation de vapeurs issues de circulations d'est en altitude: Jet Est Africain, Jet Est Tropical (Joseph *et al.*, 1992).

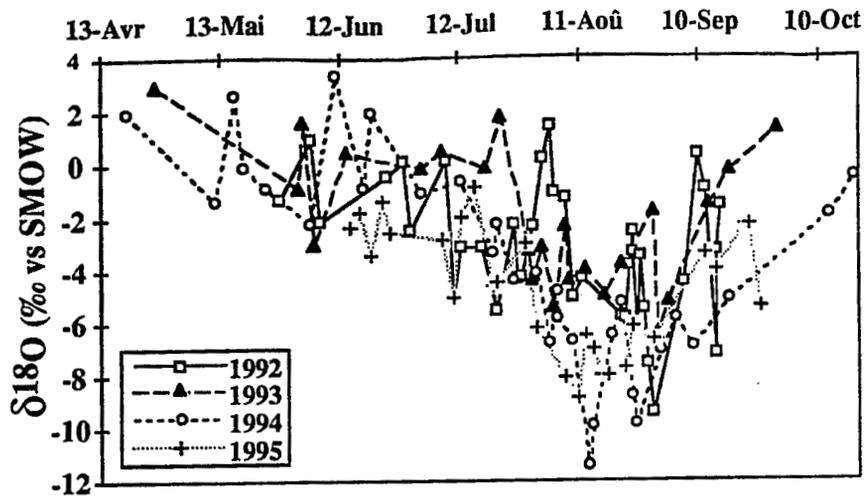


Fig. 6 Teneurs en oxygène-18 des pluies au pas de l'événement pour les années 1992 à 1995.

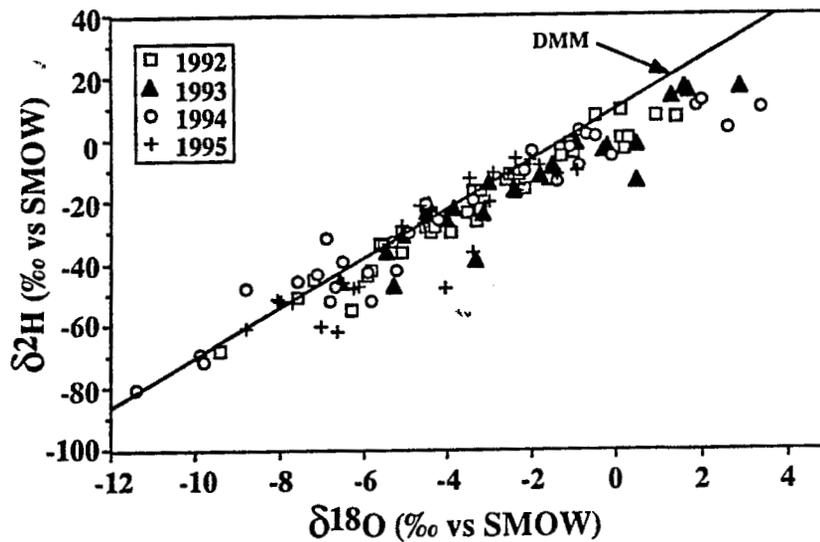


Fig. 7 Deutérium en fonction de l'oxygène-18 au pas de l'événement pour les années 1992 à 1995.

Un certain nombre de points, situés au-dessus de la DMM, présentent un excès en deutérium 'd' supérieur à 10, qui montre qu'une partie des précipitations est issue d'un mélange du flux de mousson et de vapeur résultant de l'évaporation des sols et plantes.

Quelques valeurs d'oxygène-18, très négatives (Fig. 8), apparaissent liées à de faibles hauteurs de pluie de 5 à 10 mm. En climat tropical, il est généralement admis que l'effet de masse est prédominant dans le processus d'appauvrissement isotopique des précipitations, mais ces valeurs pourraient aussi résulter d'une fin de vidange des

masses nuag
naissance en
de vapeur, a
produisant,
(Taupin et
condensatio
possibilité d
de pluie nais
avec l'atmo
des teneurs i
les données
développem
15000 m, e
température

Inverse
(supérieure
sans doute
d'enrichiss
initiale du
dernières]
de vapeur
correspon
les précip
terre-atm
insuffisan

masses nuageuses des systèmes de méso-échelle qui, pour la plupart, prennent naissance en hivernage, dans le secteur du lac Tchad; la vidange graduelle du réservoir de vapeur, au fur et à mesure de la progression de la ligne de grains vers l'ouest, produisant, par effet de continentalité, un appauvrissement isotopique croissant (Taupin *et al.*, 1995). La liaison de ces teneurs appauvries aux températures de condensation, très basses ($< -40^{\circ}$), des convections de haute altitude, constitue une autre possibilité d'explication. Dans ces conditions, si les fragments de glace ou les gouttes de pluie naissantes ont un diamètre important; lors de la descente, l'échange thermique avec l'atmosphère, s'effectuera plus lentement, permettant une relative conservation des teneurs isotopiques appauvries de la condensation. Cette hypothèse est validée par les données Météosat infrarouges qui montrent que le mois d'août est propice au développement de nuages pouvant atteindre des altitudes comprises entre 10000 et 15000 m, et que les faibles pluies à teneur isotopique appauvrie, sont liées à des températures de nuages très basses de -70 à -80°C .

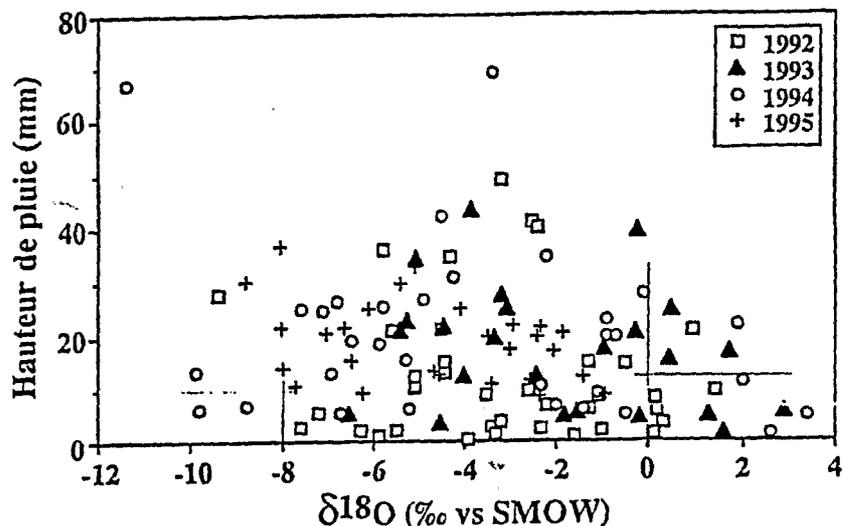


Fig. 8 Hauteur des pluies en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ pour les années 1992 à 1995. Encart droit: Pluies > 12 mm et $\delta^{18}\text{O} > 0$; Encart gauche: Pluies < 10 mm et $\delta^{18}\text{O} < -8$

Inversement en début de saison des pluies, certaines averses conséquentes (supérieures à 12 mm) présentent une composition isotopique enrichie (Fig. 8), qui est, sans doute pour partie, liée à l'évaporation en cours de chute. Mais deux autres sources d'enrichissement semblent également possibles à cette période de l'année: la vapeur initiale du nuage peut elle-même s'enrichir de la reprise évaporatoire au sol des dernières pluies, et la pluie correspondant aux premiers stades de vidange de la masse de vapeur peut présenter une composition relativement enrichie. Ces hypothèses correspondent bien aux conditions météorologiques de début de saison, qui favorisent les précipitations nocturnes. Le refroidissement, consécutif la nuit au rayonnement terre-atmosphère, est nécessaire à la condensation des masses de vapeur encore insuffisamment denses et instables dans la journée.

En 1992, une étude chimique des précipitations de Niamey montre que la minéralisation, à tendance bicarbonatée calcique, reste faible et typique des milieux continentaux non pollués. Les valeurs obtenues sur les éléments majeurs appartiennent, pour la plupart, à la même gamme que celle des prélèvements hebdomadaires réalisés en 1991 à la station de Yelouma, située à 40 km sur le degré carré (Tableau 3). L'absence de pollution est soulignée par la stabilité des pH qui restent proches de la neutralité (5,6 à 7,1). Les variations de la conductivité traduisent par contre divers phénomènes: les valeurs supérieures à la moyenne ($25 \mu\text{S cm}^{-1}$) sont soit liées à une évaporation des gouttes d'eau en cours de chute (pour les pluies inférieures à 10 mm) soit liées à un lessivage des aérosols après une période de plusieurs jours sans pluie; les deux phénomènes pouvant coexister au cours d'un même événement. Ces deux processus expliquent la valeur des relations ($0.5 < r^2 < 0.8$) entre la conductivité et la concentration des éléments prépondérants: Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- .

Tableau 3 Composition chimique des pluies. Concentrations en mg l^{-1} , conductivité en $\mu\text{S cm}^{-1}$. En 1991 à la station de Yelouma. En 1992 à la station de Niamey Orstom.

Ions	Ca	Na	Mg	K	HCO_3	Cl	SO_4	NO_3	pH	cond
1991	0,46	0,26	0,07	0,37		0,76	0,84	0,91		
1992	0,66	0,27	0,20	0,45	2,43	0,38	0,76	0,63	6,60	25,0
min(92)	0,10	0,01	0,01	0,07	0,50	0,12	0,33	0,13	5,60	5,5
max(92)	8,94	2,20	7,19	7,94	25,0	3,88	7,19	4,96	7,14	70,0

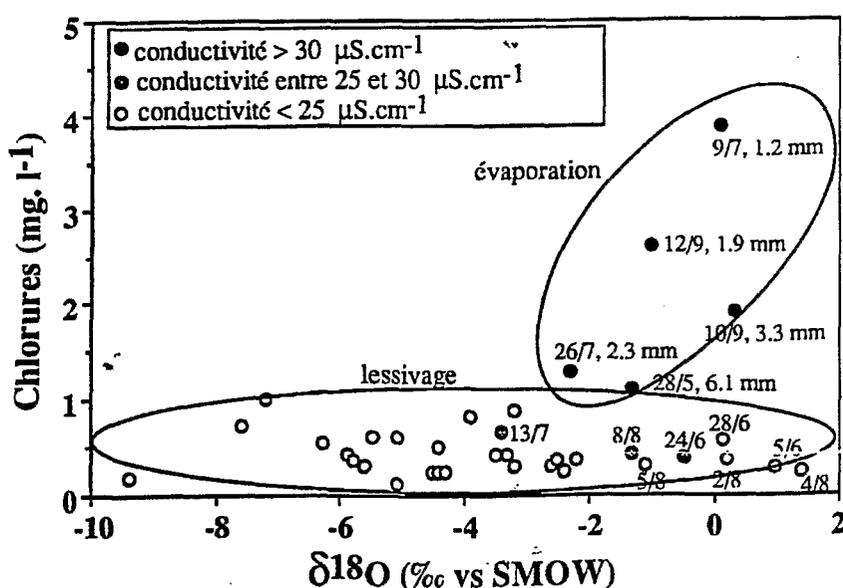


Fig. 9 Concentration en chlorures en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ des pluies de l'année 1992.

Dans la relation E
faibles en chlorures
aérosols. On y trouve
obligatoirement évap
dont l'oxygène-18 es
peu ou non évaporant
($P > 8.3$ mm) pour l
fortes teneurs en chl
phénomène concerne
par contre que la ten
d'évaporation et de l
qu'en début d'hivern

CONCLUSIONS

L'étude isotopique
grand intérêt en rais
des pluies et d'une
comme marqueurs
mouvements des n
chimique des précip
apportée par les isc
Les pluies exemptes
origine les masses
précipitations tradu
issues; convection e
une origine plus cor
partie, de recyclage

Remerciements C
ogie et de Géochim
drologique de Wall

REFERENCES

- Dansgaard, W. (1964)
Eriksson, E. (1965) I
theoretical cons
Guillot, B. & Penna
saharienne en ac
AIEA (1992) Statist
Tech. Reports s
Joseph, A. & Arany
en Afrique de l'
Joseph, A., Frangi, J
groundwater in
Lahuc, J.P. & Pe
convection en a

Dans la relation graphique chlorures vs oxygène-18 (Fig. 9), les valeurs les plus faibles en chlorures correspondent à un lessivage d'une atmosphère peu chargée en aérosols. On y trouve des pluies dont les teneurs sont enrichies, sans qu'elles soient obligatoirement évaporées, comme il a été dit précédemment. Ainsi sur les sept pluies dont l'oxygène-18 est supérieur à -2‰, quatre ont eu lieu en août dans des conditions peu ou non évaporantes; les trois autres, originaires de juin, ont des quantités suffisantes ($P > 8.3$ mm) pour les mettre à l'abri d'une reprise évaporatoire notable. Les pluies à fortes teneurs en chlorures apparaissent par contre marquées par l'évaporation, car le phénomène concerne des événements de faibles hauteurs (≤ 6 mm). Il est vraisemblable par contre que la teneur en chlorures la plus élevée soit le résultat du double processus d'évaporation et de lessivage, car neuf jours sans pluie précèdent l'averse du 9 juillet et, qu'en début d'hivernage, la teneur en aérosols de l'atmosphère est encore élevée.

CONCLUSIONS

L'étude isotopique et chimique des précipitations en zone sahélienne s'avère d'un grand intérêt en raison des situations climatologiques très contrastées en cours de saison des pluies et d'une année sur l'autre. Ce fort contraste permet d'utiliser les isotopes comme marqueurs des processus, liés à certains facteurs climatologiques ou aux mouvements des masses d'air mis en évidence par l'imagerie satellitaire. L'étude chimique des précipitations conduit, dans bien des cas, à la validation de l'information apportée par les isotopes, sur l'origine et le fonctionnement des masses précipitantes. Les pluies exemptes de pollution, mais en majorité marquées par l'évaporation, ont pour origine les masses océaniques guinéennes. La qualité isotopique et chimique des précipitations traduit, la plupart du temps, la dynamique de la masse d'air dont elles sont issues; convection et état d'avancement sur le continent. Certaines pluies montrent enfin une origine plus complexe où les vapeurs condensantes sont manifestement issues, pour partie, de recyclages.

Remerciements Ce travail a bénéficié du support analytique du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'Université Paris Sud (Pr. Zuppi) et de l'Institut Hydrologique de Wallingford (Pr. Edmunds).

REFERENCES

- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16(4), 436-468.
- Eriksson, E. (1965) Deuterium and oxygen-18 in precipitation and other natural waters. Some theoretical considerations. *Tellus* 18(4), 498-512.
- Guillot, B. & Pennarun, J. (1993 et 1994) Champs thermiques de surface en zone soudano-sahélienne en août 1993 et 1994. *Veille Climatologique Satellitaire* 46, 27-36 et 50, 23-35.
- AIEA (1992) Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation. IAEA, *Tech. Reports series no. 331*, Vienna.
- Joseph, A. & Aranyosy, J.F. (1989) Mise en évidence d'un gradient de continentalité inverse en Afrique de l'Ouest en relation avec les lignes de grain. *Hydrogéologie* 3, 215-218.
- 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.
- Lahuec, J.P. & Pennarun J., (1993 et 1994) Convergence intertropicale, l'intensité de la convection en août 1993 et août 1994. *Veille Climatologique Satellitaire* 46, 9-26 et 50, 8-22.

- Mathieu, R., Bariac, T., Fouillac, C., Guillot, B. & Mariotti, A. (1993) Variations en isotopes stables dans les précipitations en 1988 et 1989 au Burkina Faso: Apports de la météorologie régionale. *Veille Climatique Satellitaire* 45, 47-64.
- Taupin, J.D., Gallaire, R. & Fontes, J.Ch. (1995) Isotopic study of rainfall in the Sahelian zone (Niger) along two sections, east-west (Lac Chad-Niamey) and north-south (Agadez - Niamey). First Int. Symp.: *Application of Tracers in Arid Zone Hydrology*, Vienna, august 1994, IAHS Publ. 232, 285-292.