

Variabilité spatiale de la qualité des masses d'air précipitantes en Afrique de l'ouest: l'expérience Bénin-Niger

ROBERT GALLAIRE

ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivie

e-mail: gallaire@hydro.rds.org.bo

JEAN-DENIS TAUPIN

ORSTOM-LTHE, Domaine Universitaire, BP 53, F-38041 Grenoble Cedex 9, France

ANNE COUDRAIN-RIBSTEIN

LGA-URA 1367, Université Pierre et Marie Curie, 4 Place Jussieu, F-75252 Paris Cedex 05, France

GIAN-MARIA ZUPPI

LIGA, Dipartimento Scienze della Terra, Via Valperga Caluso 37, I-10125 Torino, Italie

ANNICK FILLY

LHGI, Université de Paris-Sud, Bât. 504, F-91405 Orsay Cedex, France

Résumé En Afrique de l'ouest, durant l'hivernage 1989, l'étude isotopique et météorologique des pluies et de leur environnement permet d'apprécier la variabilité spatiale de la qualité des masses d'air suivant les axes sud-nord de la mousson guinéenne et est-ouest des lignes de grains. Tous les paramètres confirment l'accentuation de l'aridité du sud au nord. Mais l'effet isotopique de continentalité n'est pas sensible jusqu'à latitude sahélienne. Les mêmes paramètres observés suivant l'axe est-ouest, montrent une accentuation de l'humidité dans ce sens. L'absence d'appauvrissement isotopique des pluies d'est en ouest infirme l'hypothèse d'une participation des masses d'air océaniques indiennes. La station de Birni N'Konni met en évidence l'existence d'une humidité nouvelle liée à un recyclage de vapeur continentale. Le phénomène, confirmé par l'indice de végétation élevé de l'imagerie satellitaire, peut être relié à divers facteurs régionaux, naturel (cuvette sédimentaire du Kebbi) et anthropiques (rizières, réservoir de Kandji).

INTRODUCTION

Cette étude, basée sur l'observation des pluies et de leur environnement au cours d'un même hivernage (1989) au Bénin et au Niger, avait pour but de tester les enseignements d'une analyse simultanée, isotopique et météorologique, des précipitations. L'effet de continentalité, observé en milieu tempéré, qui se traduit par un appauvrissement progressif du rapport isotopique des pluies, en raison des vidanges successives du réservoir de vapeur, est-il perceptible en milieu tropical? La participation d'une vapeur locale évapotranspirée a-t-elle une signature? Cette étude

s'attache à montrer le rôle du recyclage en Afrique de l'ouest, et le lien qui peut exister localement entre l'action anthropique et le climat.

CADRE ET CONDITIONS DE L'ETUDE

L'étude de la circulation des masses d'air en Afrique de l'ouest a acquis une nouvelle dimension au cours des deux dernières décennies grâce aux observations satellitaires et à l'analyse isotopique, Citeau *et al.* (1991), Taupin & Gallaire (1996). La participation d'une vapeur continentale aux précipitations en milieu tropical est mise en évidence au cours des années 90; dans le bassin amazonien, à partir des isotopes, Gat & Matsui (1991), Martinelli *et al.* (1996), et en Afrique de l'ouest, à partir de l'étude physique des masses d'air, Brubaker *et al.* (1993), Gong & Althair (1996). Grâce à l'infrastructure du programme d'Etude des Précipitations par SATellite au Niger (EPSAT-Niger), Lebel *et al.* (1996), une démarche similaire fut entreprise en Afrique de l'ouest par l'ORSTOM au cours de la saison des pluies (hivernage) 1989. Quinze stations furent observées suivant deux trajectoires correspondant respectivement au déplacement de la mousson Guinéenne, de Cotonou 6°21'N à Agadez 17°N, et au cheminement de systèmes convectifs de mésoéchelle, entre N'Guigmi 13°23'E et Niamey 2°08'E (Fig. 1), régénérés par la mousson. L'analyse isotopique ($\square^{18}\text{O}$, $\square^2\text{H}$) réalisée sur 90% de la masse d'eau échantillonnée (jugée suffisamment représentative des phénomènes) à chaque station, a concerné respectivement 403 couples de valeurs suivant le transect sud-nord, et 264 couples suivant le transect est-ouest. L'erreur analytique tolérée de 0.2‰ pour l'oxygène-18 et 2‰ pour le deutérium a permis de tenir compte, dans le cadre de la relation $\delta^2\text{H}$

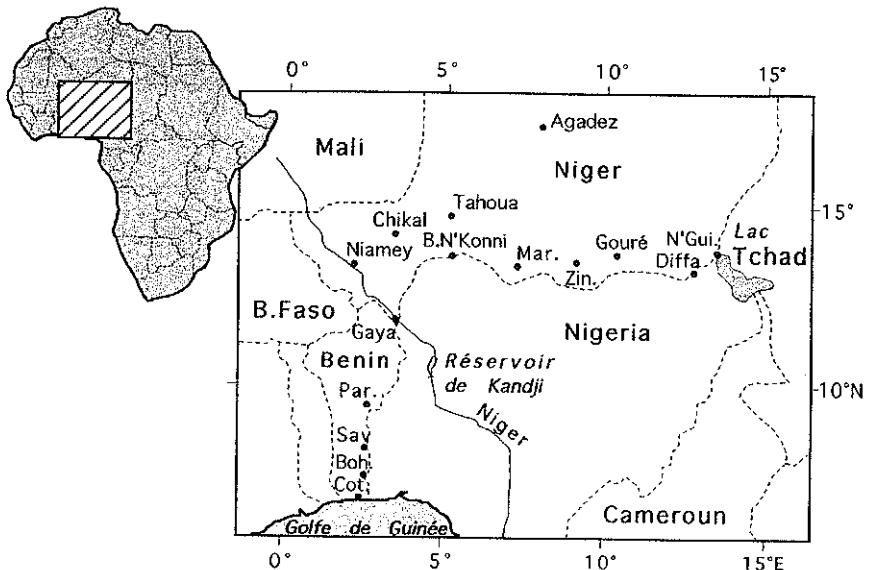


Fig. 1 Situation des postes météorologiques observés au cours de l'hivernage 1989. Suivant le transect sud-nord: Cotonou, Bohicon, Savé, Parakou, Gaya, Birni N'Konni, Tahoua, Agadez. Suivant le transect est-ouest: N'Guigmi, Diffa, Gouré, Zinder, Maradi, Birni N'Konni, Chikal, Niamey.

vs $\delta^{18}\text{O}$, d'un intervalle de confiance de $\pm 3.6\%$ (Fig. 2). Simultanément, un relevé des paramètres aérologiques, température et humidité, dont on sait qu'ils contrôlent directement le rapport isotopique des pluies, Craig *et al.* (1963), était opéré immédiatement avant et après chaque événement.

PRINCIPES

La relation isotopique $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ permet de discerner les pluies ayant été soumises à évaporation, situation graphique en dessous de la Droite d'équilibre des eaux Météoriques Mondiales (DMM), des pluies n'ayant pas été soumises à cet effet, qui restent dans l'environnement de cette droite. En revanche une position au dessus de la droite, représentative d'un excès en deutérium ($d > 10$), est caractéristique de phénomènes d'échanges sol-plantes-atmosphère à l'origine de cette pluie, Gat (1991). L'écart des paramètres aérologiques température et humidité ($\Delta T = T$ initiale - T finale; $\Delta Hr = Hr$ initiale - Hr finale) encadrant chacune des précipitations permet d'apprécier l'état de la masse d'air. Si on considère que chacune des gouttes de pluie échange avec le milieu environnant en cours de chute, et que l'effet produit (abaissement de la température liée à l'évaporation, ou augmentation de l'humidité relative) est cumulatif, un écart significatif de l'un ou l'autre des paramètres signale un état de sous saturation de la masse d'air, un écart minime, un état proche de la saturation.

RESULTATS ET ANALYSE

La relation $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ des pluies journalières à trois stations du transect sud-nord (Fig. 2) met en évidence l'essentiel de l'information sur l'évolution isotopique des pluies en fonction de la latitude.

Progressivement, l'importance et l'intensité (écart à la DMM: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$; $\pm 3.6\%$) des situations d'évaporation, soulignant l'assèchement de la masse d'air, s'accroissent du sud (Parakou, Fig. 2(a)) au nord (Tahoua, Fig. 2(c)). A latitude intermédiaire les pluies sahéliennes de Birni N'Konni (Fig. 2(b)), n'apparaissent pas dans la continuité isotopique entre les espaces soudanien et subdésertique. A cette station le pourcentage de pluies évaporées est en net régression, alors que celui d'excès en deutérium ($d > 10\%$) est en augmentation (60%). Cette nouvelle signature isotopique des pluies corrobore l'hypothèse d'une participation significative aux précipitations d'une vapeur continentale recyclée. Les données synthétiques du Tableau 1 soulignent ce caractère particulier des masses d'air à Birni N'Konni: variations moyennes de température et d'humidité minimales suivant les deux transects (Fig. 3), valeur de l'excès en deutérium pondéré supérieur à "dix" ($d_p > 10\%$), alors qu'il est toujours inférieur à cette valeur aux autres stations. Ce tableau montre également l'absence d'effet de continentalité, aussi bien en latitude (Tableau 1(a)), qu'en longitude (Tableau 1(b)). Sur la base des données isotopiques recueillies entre Djibouti à l'est et Dakar à l'ouest (9 stations météorologiques et 14 données d'eaux souterraines réparties sur 70° de longitude), Joseph & Aranyosy

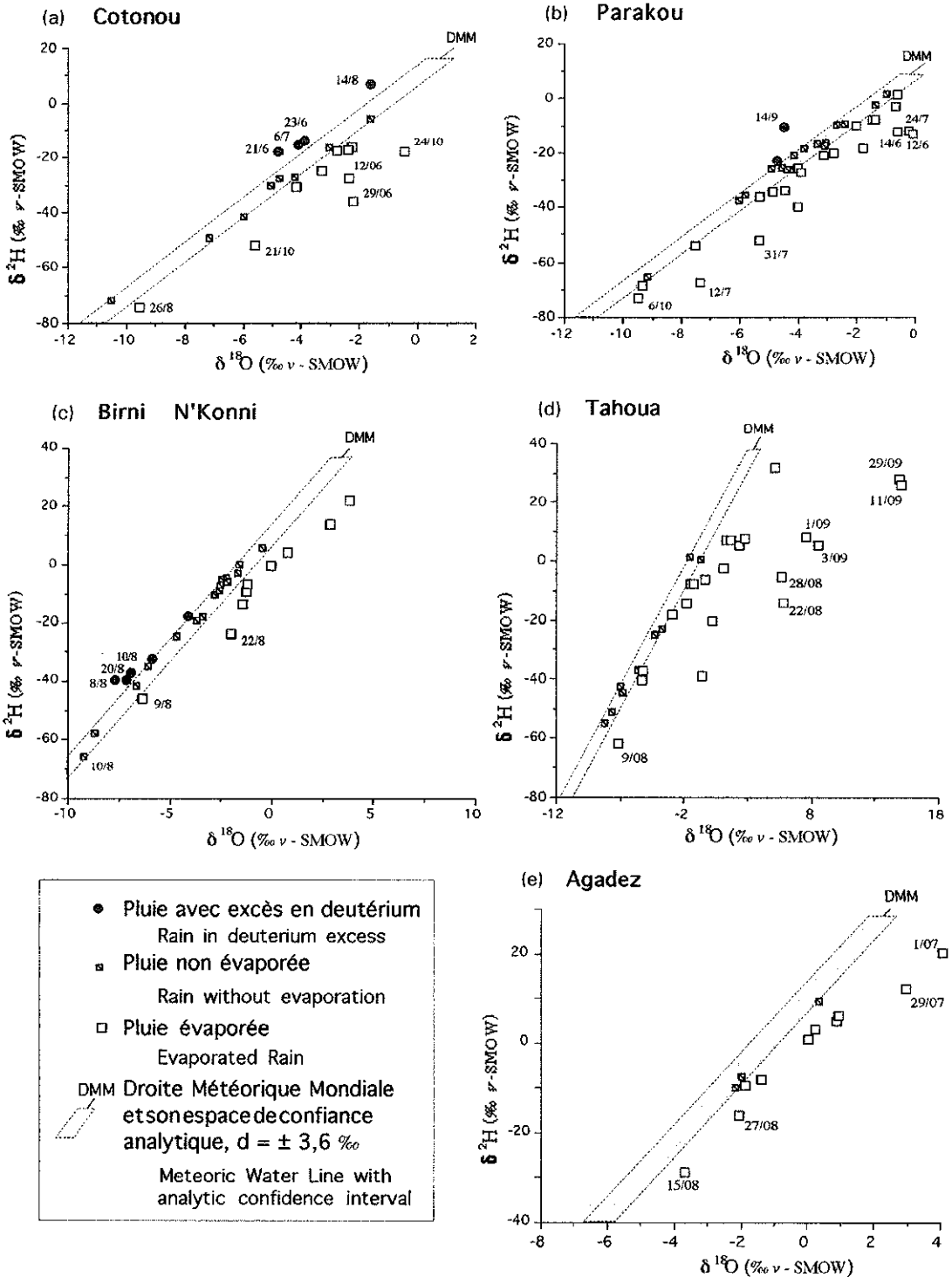


Fig. 2 Relation deutérium-oxygène-18 des précipitations suivant le transect sud-nord entre Cotonou et Agadez.

(1989) avaient mis en évidence un appauvrissement isotopique vers l'ouest, évoquant ainsi un effet de "continentalité inverse" lié au déplacement de masses d'air depuis les côtes est africaines. Les données plus précises présentées ici, à partir de huit stations pluviométriques réparties sur moins de 15° de longitude, ne confirment pas leurs résultats. La dépendance des isotopes vis-à-vis des paramètres température et humidité, et la cohérence des deux approches, est bien vérifiée par la Fig. 4. Les postes nord sahéliens, Tahoua et Agadez, qui présentent suivant le transect latitudinal (Fig. 4(a)), les plus fortes variations de température et d'humidité, sont aussi ceux pour lesquels le pourcentage du nombre de pluies avec une valeur d'excès en deutérium supérieur à 10‰ est le plus faible (environ 10%). Birni N'Konni, dont la variation des paramètres aérologiques durant un événement pluvieux est la plus faible, est aussi la station pour laquelle le pourcentage du nombre de pluies présentant une valeur d'excès en deutérium supérieure 10‰ est le plus fort. A l'est et à l'ouest du transect longitudinal (Fig. 4(b)), les stations de N'Guigmi, Diffa et Chikal, Niamey montrent à la fois les plus fortes variations de température et d'humidité et les pourcentages de nombre de pluies avec une valeur d'excès en deutérium >10‰ les plus faibles. En position intermédiaire sur ce transect, la station de Birni N'Konni se distingue encore par l'affaiblissement de la variation des paramètres aérologiques en cours d'événement, et par l'accroissement du pourcentage de pluies marquées par un "d > 10‰". L'ensemble de ces résultats conduisent à interpréter les conditions particulières de l'environnement de Birni N'Konni comme résultant d'un apport nouveau de vapeur d'origine continentale,

Tableau 1 Données analytiques des pluies et de leur environnement.

	$\delta^{18}O_p$	δ^2H_p	"d _p "	$\Delta Tm^\circ C$	$\Delta Hm\%$
(a) Axe S-N					
Cotonou	-4.47	-38.0	4.2	-2.0	6.3
Bohicon	-3.20	-20.4	4.8	-2.5	8.2
Savé	-4.05	-23.7	9.1	-3.0	8.6
Parakou	-4.13	-30.7	1.9	-3.3	12
Gaya	-4.24	-30.1	5.0	-4.2	19.1
B. N'Konni	-3.72	-18.9	10.9	-1.8	7.7
Tahoua	-2.13	-24.0	-7.6	-5.1	20.2
Agadez	-0.30	-1.4	1.0	-7.1	23.6
(b) Axe E-W					
N'Guigmi	-4.38	-35.5	-0.5	-5.5	22.0
Diffa	-1.82	-10.1	4.5	-5.1	25.9
Gouré	-2.58	-15.5	5.1	-5.0	20.3
Zinder	-4.24	-24.7	9.3	-4.8	30.8
Maradi	-3.87	-22.5	8.4	-3.9	16.5
B. N'Konni	-3.72	-18.9	10.9	-1.8	7.7
Chikal	-1.75	-22.9	-9.3	-4.3	14.9
Niamey	-4.54	-34.0	2.2	-6.2	20.5

$\delta^{18}O_p$: Oxygène-18 pondéré des pluies de l'hivernage 1989.

δ^2H_p : Deutérium pondéré des pluies de l'hivernage 1989.

"d_p": Excès en deutérium pondéré des pluies de l'hivernage 1989.

$\Delta Tm^\circ C$: Variation moyenne de température au moment de la pluie.

$\Delta Hm\%$: Variation moyenne d'humidité au moment de la pluie.

dont ne semble pas, ou peu (Maradi, Zinder), profiter les stations voisines. En rapprochant les valeurs d'excès en deutérium des pluies de leur hauteur, il est possible d'apprécier l'importance du recyclage continental des précipitations sahéliennes. Dans le cas de Birni N'Konni, 350 mm de pluie, présentant une valeur de $d > 10\%$, sur 450 mm précipités durant l'hivernage 1989, auraient donc pour origine une vapeur plus ou moins recyclée. Une investigation des causes possibles ou probables du regain d'humidité à la latitude de Birni N'Konni conduit à observer sur la carte géologique l'existence, au sud, sur la trajectoire de la mousson, d'une cuvette sédimentaire, au milieu de formations cristallines. Ces formations, du secondaire à l'actuel, constituent une réserve potentielle d'eaux superficielles ou peu profondes, en particulier les formations colluvionnaires pléistocènes du Kebbi (Nigeria) occupées par des rizières (Fig. 1). Au sud du Kebbi, l'existence sur le fleuve Niger du réservoir de grande surface ($> 1000 \text{ km}^2$) de Kandji, constitue une

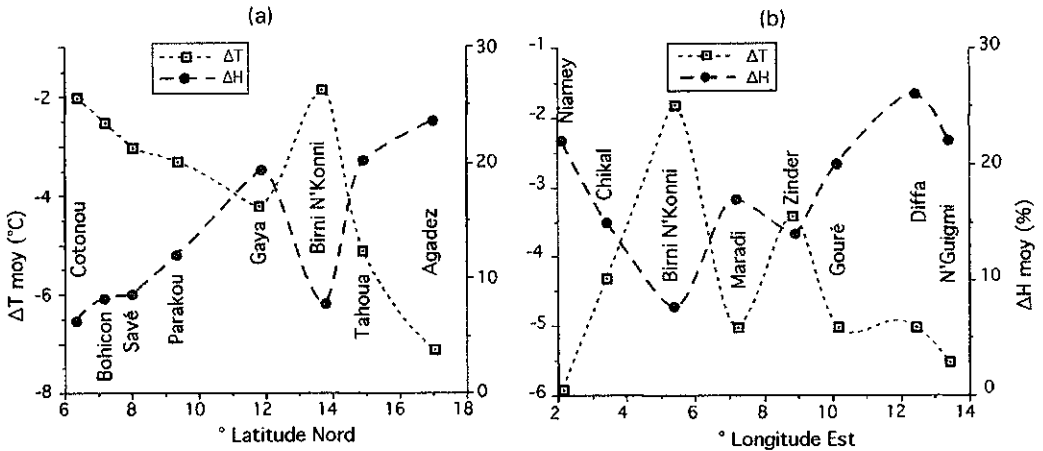


Fig. 3 Evolution (a) latitudinale (b) longitudinale des variations de température et d'humidité atmosphériques, durant la pluie.

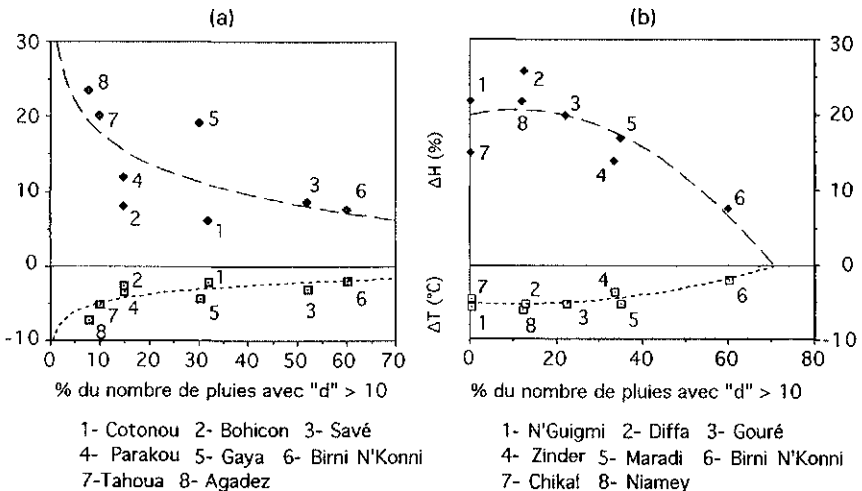


Fig. 4 Relations (a) latitudinale (b) longitudinale de la variation moyenne des paramètres météorologiques et de l'excès en deutérium.

- 1- Cotonou 2- Bohicon 3- Savé
- 4- Parakou 5- Gaya 6- Birni N'Konni
- 7-Tahoua 8- Agadez

- 1- N'Guigmi 2- Diffa 3- Gouré
- 4- Zinder 5- Maradi 6- Birni N'Konni
- 7- Chikail 8- Niamey

autre source d'évaporation. Au total près de 5500 km² assimilables à des nappes d'eau libre sont susceptibles de produire régionalement, durant les quatre principaux mois d'hivernage, environ 2×10^9 m³ d'eau sous forme vapeur. Cette valeur est obtenue à partir de l'estimation d'une évaporation Colorado régionale de 4 mm jour⁻¹, en micro climat humide soudanien, Le Barbé *et al.* (1993), et d'un coefficient de réduction Evaporation Lac/Evaporation Bac de "0.80". L'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), établie par AGRHYMET à partir d'observations satellitaires, montre que la région de Birni N'Konni bénéficie d'une situation particulière pour le milieu sahélien, équivalente à celle des régions méridionales du golfe de Guinée.

CONCLUSION

Il apparaît donc qu'en milieu continental tropical de sensibles variations des conditions atmosphériques puissent être enregistrées, à moyenne échelle (ordre de la centaine de km), à partir des rapports isotopiques des pluies et de l'étude des variations de température et d'humidité durant les précipitations. Si le réseau de mesures est trop lâche l'interprétation doit être menée avec précautions, et les modèles de circulation globale doivent tenir compte de ces risques d'existence d'hétérogénéités locales qui contraignent leur simulation. Les aménagements anthropiques peuvent ne pas influencer de façon notable la quantité précipitée, mais accroître sensiblement l'humidité des masses d'air, à la suite de recyclages qui favorisent en retour le développement de la végétation. Il apparaît ainsi essentiel de poursuivre l'investigation du milieu, surtout lorsque des aménagements viennent potentiellement modifier un état naturel, Savenije (1995).

REFERENCES

- Brubaker, K. L., Entekhabi, D. & Eagleson, P. S. (1993) Estimation of continental precipitation recycling, *J. Climate* 6, 1077-1089.
- Citeau, J., Mahé, G. & Demarcq, H. (1991) Dynamique de la ZICT et climat des régions sahéliennes. In: *Pêcheries Ouest Africaines*, 141-146. ORSTOM, Paris, France.
- Craig, H., Gordon, L. Y. & Horibe, Y. (1963) Isotopic exchange effects in the evaporation of water. *J. Geophys. Res.* 68(17), 5078-5087.
- Gat, J. R. & Matsui, E. (1991) Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model. *J. Geophys. Res.* 96(7), 13 179-13 188.
- Gat, J. R. (1991) The modification of the isotopic composition of meteoric waters at the land/biosphere-atmosphere interface. In: *Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere*. IAEA-SM 349, Vienna.
- Gong, C. & Eltahir, E. (1996) Sources of moisture for rainfall in West Africa. *Wat. Resour. Res.* 32(10), 3115-3121.
- 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.
- Le Barbé, L., Alé, G., Millet, B., Texier, Y., Borel, Y. & Gualde, R. (1993) *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*. ORSTOM, Paris, France.
- Lebel, T., Amani, A., Cazenave, F., Lecocq, J., Taupin, J. D., Elguero, E., Gréard, M., Le Barbé, L., Laurent, H., d'Amato N. & Robin, J. (1996) La distribution spatio-temporelle des pluies au Sahel: apports de l'expérience EPSAT-Niger. In: *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement* (ed. par P. Chevallier & B. Pouyaud) (Actes de la conférence de Paris, mai 1995, mélange à la mémoire de Jean Rodier), 77-98. IAHS Publ. no. 238.
- Martinelli, L. A., Victoria, R. L., Sternberg, L. S., Ribeiro, A. & Moreira, M. Z. (1996) Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. *J. Hydrol.* 183, 191-204.

- Savenije, H. H. G. (1995) New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the Sahel. *J. Hydrol.* **167**, 57-78.
- Taupin, J. D. & Gallaire, R. (1996) Stable isotopic (^{18}O , ^2H) behaviour of rainfall on an African north-south transect between Cotonou and Niamey. In: *Proc. International Meeting in Memory of John N. Andrews, Hydrochemistry, Noble Gases, Stable Isotopes and Radio-elements* (Reading, UK).