

Article

« Signature isotopique et chimique des précipitations (pluies et pluviollessivats) en Guyane française »

A. Millet, T. Bariac, C. Grimaldi et J. Boulègue

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 12, n° 4, 1999, p. 729-751.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705375ar>

DOI: 10.7202/705375ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Signature isotopique et chimique des précipitations (pluies et pluviollessivats) en Guyane française

Isotopic and chemical signal of precipitations (rains and throughfalls) in French Guyana

A. MILLET¹, T. BARIAC^{1*}, C. GRIMALDI² et J. BOULÈGUE³

Reçu le 3 août 1998, accepté le 17 mai 1999**

SUMMARY

Geochemical hydrograph separation methods are frequently employed because they allow one to determine the origin (spatial or temporal) of water that contributes to creating floods. This approach, based on mass balance equations, requires a good knowledge of the geochemical (isotopic and chemical) signals of the reservoirs that contribute to the flood. However, geochemical signals in precipitation, an obvious reservoir, may vary strongly over time. In forested watersheds, throughfall - and not direct rain - make up the input signal. The geochemical signal of throughfall may be different from that of rain and it may vary temporally and spatially. In order to clarify the use of geochemical tracers for hydrograph separation, we studied the isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) and chemical composition of precipitation (rain and throughfall) in two watersheds, as well as the spatial and temporal variations of this precipitation during two runoff events that occurred on May 24, 1992 and on May 15, 1993. The studied watersheds are located near the city of Sinnamary (French Guyana), 120 km south-west of Cayenne. They are small in size (1,5 ha) and close to each another (200 m). One basin (hereafter named B basin) is covered by primary forest, whereas the other (hereafter named A basin) was cleared and turned into grassland (*Digitaria swazilendensis*, ÉCÉREX program, supported by Orstom-CTFT). The climate is tropical-humid, characterised by high mean annual temperatures (26°C), which slightly varied from month to month, and high mean annual precipitation (3500 to 3900 mm.yr⁻¹). Precipitation occurred primarily during the main wet season, centred around May and

-
1. Laboratoire de Biogéochimie Isotopique, UMR 162 CNRS-Inra-UPMC, case 120, 4, place Jussieu 75252 Paris, France.
 2. Unité de science du sol, Inra, Centre de Rennes, 65, rue de Saint Brieu, 35042 Rennes, France.
 3. Laboratoire de Géochimie et Métallogénie, UMR 1762, CNRS-UPMC, case 124, 4, place Jussieu, 75252 Paris, France.

* Correspondance. E-mail : bariac@ccr.jussieu.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 novembre 2000.

June, and during the secondary wet season from December to January. Given the small distance between the watersheds, the differences noted between the rain collected in the A basin and the throughfall collected in the B basin (amount, geochemical signal) were attributed to the forest cover (leaching, interception,...). The monitoring equipment consisted of 31 rain gauges in the B basin and 3 rain gauges in the A basin. Rainfall was important for the two studied rain events (about 60 mm in basin A). Average rainfall in the A basin is characterised by low coefficients of variation, whereas average water inputs in the B basin showed high coefficients of variation. Thus, the amount of incoming water was spatially homogeneous in basin A, but heterogeneous in basin B. In both basins, the instantaneous $\delta^{18}\text{O}$ value for precipitation varied considerably over time, but it was still spatially homogeneous in both watersheds with the average $\delta^{18}\text{O}$ value showing a low coefficient of variation. This result means that the interception of the rain by the canopy destroyed the structure of the precipitation amounts under the forest, but not the structure of its isotopic signal. On May 24, 1992, we noted a dilution of the chemical content of the rain and a decrease in its pH over the course of the event. The chemical contents of the throughfall were on the whole more concentrated than in the incident rain and the pH more buffered. We did not note any correlation between the chemical content of rain or throughfall and the intensity of precipitation. The chemical composition of throughfall, studied during the main shower on May 24, 1992, exhibited considerable spatial variation and 31 rain gauges did not seem to be enough to precisely estimate the amount reaching the soil. A continuous depletion in heavy isotopes (^{18}O , ^2H) and some chemical species (e.g., Cl^-) was noted for the first episode (May 24, 1992) but not for the second (May, 15, 1993). This depletion may be explained by water vapour condensation outside the Rayleigh distillation, or by mixing of different air masses. The comparison between the evolution of integrated values of $\delta^{18}\text{O}$ and the integrated Cl^- content versus the amount of accumulated precipitation proved that the rain event of May 24, 1992, was generated by a single air mass whereas the event of May 15, 1993 was generated by several air masses. We also noted that the integrated value of $\delta^{18}\text{O}$ for throughfall was slightly more concentrated than the content of rain. In the absence of evaporation (the isotopic composition of the throughfall corresponded to the local meteoric line), this enrichment suggests that direct rain mixed with older water that was stored in the canopy and had a different isotopic composition.

This study showed that the intensity and the geochemical signal of precipitation (rain and throughfall) vary greatly on a temporal scale in a tropical environment. It also showed that the amount of incoming water varied spatially under a forest cover, as did its geochemical (isotopic and chemical) signal. In order to achieve a stream hydrograph geochemical separation, it is necessary to collect the precipitation (rain and throughfall) with a short time step. It is also necessary to collect the throughfall across a concentrated network of rain gauges.

Key-words: rain, throughfall, interception, leaching, stable isotopes (^{18}O , ^2H), geochemistry.

RÉSUMÉ

Au cours de 2 crues survenues le 24 mai 1992 et le 15 mai 1993 sur 2 bassins versants, nous avons étudié la composition isotopique et chimique des précipitations (pluies et pluviolessivats) ainsi que leurs variations temporelle et spatiale. Les bassins étudiés (d'environ 1,5 ha) sont situés près de la ville de Sinnamary (Guyane française) et sont proches l'un de l'autre (200 m). Un des bassins (bassin B) est recouvert par une forêt primaire, tandis que le second (bassin A) a été défriché et transformé en prairie (*Digitaria swazilendensis*, programme ECÉREX Orstom-CTFT). Le dispositif expérimental est composé

de 31 pluviomètres sur le bassin B et de 3 pluviomètres sur le bassin A. Les hauteurs d'eau précipitées lors des événements étudiés sont importantes (environ 60 mm sur le bassin A). La hauteur d'eau précipitée est homogène spatialement sur le bassin A, alors qu'elle est très hétérogène sur le bassin B. La teneur instantanée des précipitations en ^{18}O est très variable temporellement, mais reste homogène spatialement, sur les 2 bassins. L'interception de la pluie par la canopée déstructure donc la hauteur d'eau précipitée sous forêt, mais pas sa signature isotopique. Le 24 mai 1992, nous avons observé une dilution de la composition chimique de la pluie et une diminution de son pH au cours du temps. Les pluviolessivats sont généralement plus concentrés que la pluie et leur pH est plus tamponné. Nous n'avons pas observé de corrélation entre la composition chimique de la pluie ou des pluviolessivats et l'intensité des précipitations. La variabilité spatiale de la composition chimique des pluviolessivats, étudiée lors de l'averse principale du 24 mai 1992, est très importante et 31 pluviomètres semblent insuffisants pour estimer précisément les apports au sol. L'effet de masse est respecté le 24 mai 1992, mais n'est pas visible le 15 mai 1993. La comparaison de l'évolution des teneurs intégrées en Cl^- et en ^{18}O montre que l'événement pluvieux du 24 mai 1992 est issu d'une masse d'air unique, alors que celui du 15 mai 1993 est issu de plusieurs masses d'air différentes. On remarque également que la teneur intégrée en ^{18}O des pluviolessivats est légèrement supérieure à celle de la pluie en milieu ouvert. En l'absence d'évaporation (la composition isotopique des pluviolessivats est alignée sur la droite locale des eaux météoriques), cela s'explique par un mélange entre la pluie directe et de l'eau de pluie plus ancienne, retenue sur la canopée et de composition isotopique différente.

Mots clés : pluie, pluviolessivats, interception, lessivage, effet de masse, isotopes stables (^{18}O , ^2H), géochimie.

1 - INTRODUCTION

Les méthodes de décomposition géochimique des hydrogrammes de crues sont de plus en plus employées en hydrologie, car elles permettent de déterminer l'origine, spatiale ou temporelle, de l'eau qui génère la crue (CROUZET *et al.*, 1970 ; DINCER *et al.*, 1970 ; HERRMANN et STICHLER, 1980 ; KENNEDY *et al.*, 1986 ; MAULÉ et STEIN, 1990). Ces méthodes, basées sur l'utilisation des équations de mélange, requièrent une bonne connaissance des signatures géochimiques des réservoirs participant à la crue, ainsi que de leur variations spatio-temporelles. Or, les précipitations, qui constituent un réservoir éventuel, présentent une signature géochimique variable au cours d'un même événement pluvieux. En effet, les fractions successives de pluie issues d'une même masse d'air présentent une diminution continue des teneurs isotopiques (effet de masse, DANSGAARD, 1964), ainsi que des concentrations en certains éléments chimiques (Cl^- , Br^- ...), qui servent de noyaux de coalescence lors de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique (ERIKSON, 1959 ; DUCE *et al.*, 1963 ; NJITCHOUA *et al.*, 1995).

Dans les bassins versants forestiers, ce sont les transprécipitations, en particulier les pluviolessivats, qui constituent le signal d'entrée dans le bassin. Or, différentes études ont montré que leurs compositions isotopique (PEARCE *et al.*, 1986 ; PIONKE et DEWALLE, 1992) ou chimique (PICHON *et al.*, 1995 ; PROBST *et*

al., 1995 ; PICHON *et al.*, 1996) sont généralement différentes de celle de la pluie en milieu ouvert. La composition chimique de la pluie incidente est en effet modifiée par le lavage de la canopée entraînant les dépôts secs et les sels minéraux apportés par les pluies anciennes partiellement évaporées ainsi que par les échanges foliaires (CROZAT, 1979 ; HAMBURCKERS et REMACLE, 1993). L'importance de cette modification dépend de multiples facteurs. La diversité des espèces forestières et de la morphologie de la canopée, l'état nutritionnel de la forêt, l'intensité des précipitations ainsi que les événements climatiques antérieurs sont à l'origine de la variabilité spatio-temporelle importante de la composition chimique des pluviollessivats (HANSEN *et al.*, 1994 ; ROBSON *et al.*, 1994 ; BROUWER, 1996 ; CROCKFORD *et al.*, 1996a, 1996b).

Au cours de l'étude de plusieurs crues survenues sur 2 petits bassins situés en Guyane française (MILLET, 1996 ; MILLET *et al.*, 1998), nous avons analysé la composition isotopique et chimique des précipitations (pluie et pluviollessivats) et étudié leurs variations temporelle et spatiale. Ce travail nous a permis de préciser les conditions d'utilisation, lors d'études hydrologiques, des traceurs géochimiques dans les bassins versants forestiers tropicaux.

2 - MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette étude est menée sur deux petits bassins versants distants de 200 mètres environ, situés au sud-ouest de la ville de Sinnamary (53,3°O ; 5,2°N), à 120 km au S.O. de Cayenne (Guyane française, *figure 1a*). Il s'agit des bassins A et B du dispositif expérimental ÉCÉREX aménagé par l'Institut Français de Recherche en Coopération pour le Développement (Orstom) et le Centre Technique Forestier Tropical (CTFT) (ROCHE, 1982 ; SARRAILH, 1990 ; FRITSCH, 1990). Ces petits bassins (1,6 ha pour le bassin B et 1,3 ha pour le bassin A), sont situés à environ 17 km de la mer. La hauteur d'eau moyenne des précipitations varie de 3 500 à 3 900 mm/an (ROCHE, 1982). Les précipitations se produisent essentiellement lors de la grande saison des pluies (centrée sur les mois de mai et juin) et de la petite saison des pluies, de décembre à janvier (ROCHE, 1982 ; FRITSCH, 1990). La végétation est constituée par une forêt primaire sur le bassin B et par une prairie de graminées sur le bassin A.

Afin de comparer la signature des pluviollessivats et celle de la pluie incidente, nous avons supposé que les caractéristiques (quantité, intensité, composition isotopique ou chimique) de la pluie au-dessus de la canopée du bassin forestier correspondaient à celles de la pluie recueillie sur le bassin A. Cette hypothèse, liée à la faible distance séparant les bassins, sera discutée ultérieurement. Dans cette perspective, les différences observées entre les deux bassins peuvent donc être imputées à l'action de la forêt (interception, pluviollessivage).

Deux événements pluvieux importants, ayant généré des crues sur les 2 bassins, ont été prélevés le 24 mai 1992 et le 15 mai 1993.

Lors d'une première expérimentation, menée en janvier 1992, nous avons installé 18 pluviomètres, de type SPIEA modifié MN (ROI-2050 A), sur chaque bassin (MOLICOVA, 1997). Cette expérimentation a révélé l'homogénéité spatiale

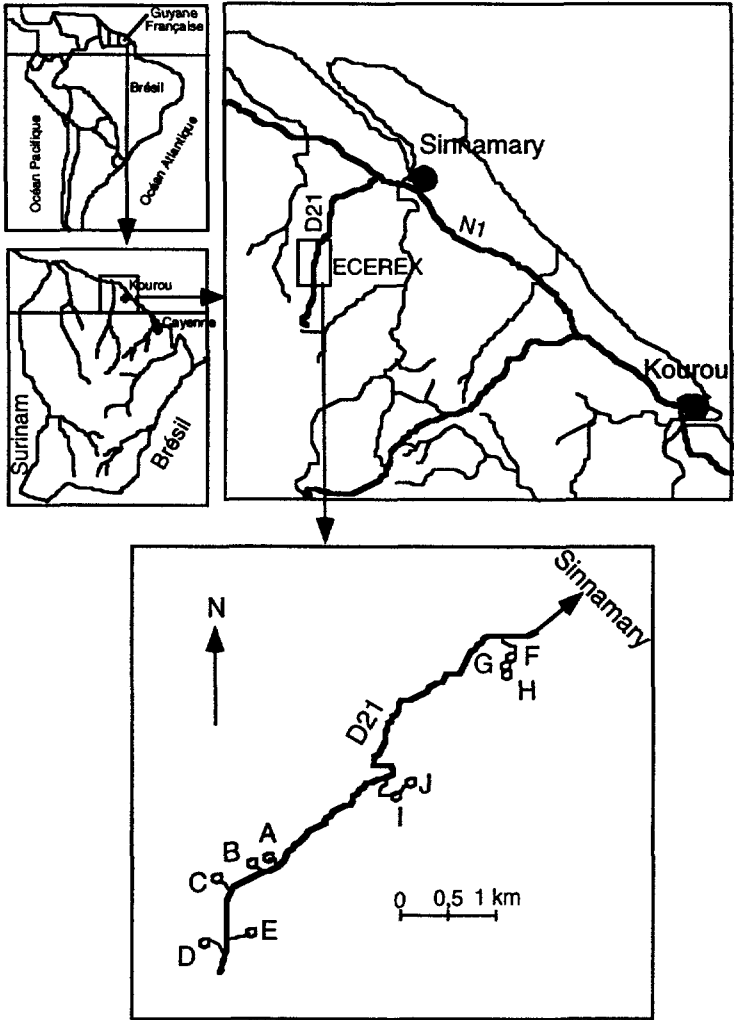


Figure 1a Localisation géographique du dispositif ECÉREX (d'après FRITSCH, 1990).
Geographic location of the ECÉREX project (after FRITSCH, 1990).

de la hauteur d'eau précipitée sur la prairie et la forte hétérogénéité spatiale de celle précipitée sous forêt (MILLET, 1996). Lors des expérimentations suivantes, nous avons donc modifié le dispositif expérimental. Sur le bassin en graminée, nous avons laissé 3 pluviomètres, placés sur un transect perpendiculaire au thalweg. Sur le bassin forestier, nous avons installé 31 pluviomètres disposés aléatoirement sur un transect parallèle au thalweg (figure 1b). Pendant les événements pluvieux étudiés, les prélèvements ont été effectués toutes les 15 minutes. Toutefois, le 24 mai 1992, plusieurs fractions de pluie ont dû être regroupées en raison de leur faible intensité, en particulier sur le bassin forestier. Sur ce bassin, les analyses chimiques ont été effectuées sur le mélange formé par l'eau recueillie dans les différents pluviomètres. En revanche, lors de

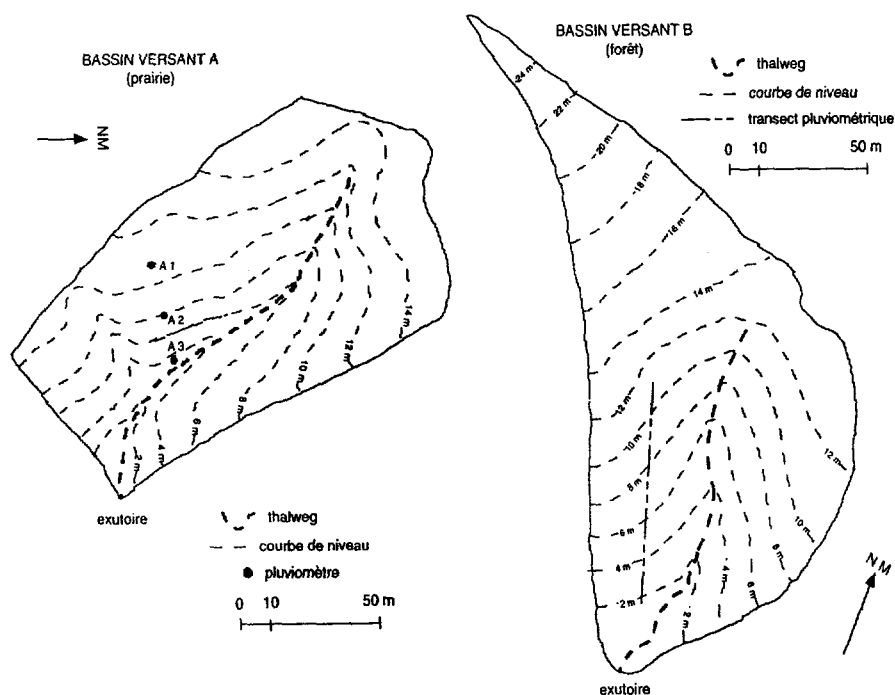


Figure 1b Cartes des bassins A (prairie) et B (forêt) du dispositif ÉCÉREX.
Maps of A (grassland) and B (forest) watersheds, ÉCÉREX project.

l'averse principale de l'événement du 24 mai 1992 (12 h 07 à 13 h 17), nous avons analysé l'eau recueillie dans chaque pluviomètre afin d'apprécier la variabilité spatiale de la composition chimique des pluviollessivats. Les analyses chimiques des pluviollessivats n'ont pas été réalisées sur l'échantillon prélevé de 11 h 07 à 11 h 37 (4^e fraction prélevée). Sur le bassin prairial, nous n'avons analysé l'eau recueillie que dans un seul pluviomètre.

Le 15 mai 1993, les analyses chimiques des précipitations n'ont été effectuées que sur 1 seul pluviomètre par bassin.

Les teneurs en ^{18}O sont mesurées au spectromètre de masse de rapport isotopique à double collecteur par la méthode d'équilibration $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (EPSTEIN et MAYEDA, 1953). Les teneurs en ^2H ont également été mesurées au spectromètre de masse VG Optima (Fisons Instrument), après réduction de l'eau sur de l'uranium chauffé à 800 °C. La précision analytique est d'environ 0,1 % en ^{18}O et de 0,5 % en ^2H . Les teneurs en ^{18}O et ^2H sont exprimées en part pour mille par rapport à l'étalon international V-SMOW (unités « δ » GONFIANTINI, 1978).

Les concentrations en cations ont été déterminées par absorption atomique (précision 10 %). Les concentrations en Cl^- ont été mesurées soit par colorimétrie (précision 10 %), soit par chromatographie ionique (précision 4 $\mu\text{m/l}$). Les limites de détection sont de 1 $\mu\text{m/l}$ les cations, à l'exception de Na^+ pour qui cette limite est 2 $\mu\text{m/l}$. Pour Cl^- la limite de détection est de 9 $\mu\text{m/l}$ (colorimétrie) ou de 2 $\mu\text{m/l}$ (chromatographie ionique).

Dans la suite de cet article, afin de caractériser les signatures de chaque épisode prélevé ou de la totalité de la pluie précipitée, nous utiliserons les définitions suivantes :

- teneur instantanée des précipitations en ^{18}O (ou en ^2H) :

$$\delta_i = \frac{\sum_j \delta_j \times H_j}{\sum_j H_j} \quad (1)$$

où δ_j est la composition isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ ou $\delta^2\text{H}$) de la fraction de pluie recueillie dans le pluviomètre j et H_j la hauteur d'eau mesurée dans ce pluviomètre. On calcule δ_i pour chaque fraction de pluie prélevée. On obtient ainsi la valeur moyenne, pondérée par la hauteur d'eau précipitée dans chaque pluviomètre, de la composition isotopique de cette fraction de pluie.

- teneur intégrée des précipitations en ^{18}O (ou en ^2H) :

$$\delta = \frac{\sum_i \delta_i \times H_i}{\sum_i H_i} \quad (2)$$

où δ_i est la composition instantanée isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ ou $\delta^2\text{H}$) de l'épisode i calculée selon la formule (1), et H_i la hauteur d'eau précipitée sur le bassin pendant cette période.

Le calcul permet d'obtenir la composition isotopique globale de la pluie du début de l'événement jusqu'à l'épisode i . La dernière valeur représente donc la composition globale de la pluie (MC DONNELL *et al.*, 1990).

On peut également calculer, de façon similaire, une composition chimique intégrée de la pluie.

3 - RÉSULTATS

3.1 Pluviométrie

Les événements prélevés ont des durées comparables (10 heures en 1992 et 13 heures en 1993), et sont provoqués par des développements convectifs (MÉTÉO-FRANCE, 1992 et 1993a). Cependant, l'événement du 24 mai 1992 est plus fractionné et présente une lame d'eau inférieure à celui du 15 mai 1993 (tableaux 1a, 1b). Les quantités d'eau précipitées sont importantes (56,8 mm le 24 mai 1992 et 66,4 mm le 15 mai 1993, sur le bassin prairial). L'interception, estimée par soustraction entre la lame d'eau précipitée sur le bassin prairial et celle précipitée sur le bassin forestier, est faible (5,3 % le 24 mai 1992 et 4,2 % le 15 mai 1993).

Tableau 1a Caractéristiques des événements pluvieux du 24 mai 1992 et du 15 mai 1993.

Table 1a Characteristics of the rainy events on May 24, 1992 and on May 15, 1993.

	Durée (h)	Nombre d'épisodes	Durée épisode principal (h)	Lame d'eau précipitée (mm)	Interception (%)
24 mai 1992	10	5	2,75	53,8 (forêt) 56,8 (prairie)	5,3
15 mai 1993	13	4	2,5	64,0 (forêt) 66,4 (prairie)	4,2

Tableau 1b Hauteur d'eau précipitée pour chaque épisode pluvieux prélevé sur les 2 bassins pendant les événements du 24 mai 1992 et du 15 mai 1993.

Table 1b Depth water for each rainy episode collected at the both watersheds during the rainy events of May, 24, 1992 and of May, 15, 1993.

24 mai 92 prairie		24 mai 92 forêt	
Épisode	Hauteur d'eau précipitée (mm)	Épisode	Hauteur d'eau précipitée (mm)
4 h 00 à 4 h 45	7,0	4 h 00 à 4 h 45	4,9
6 h 00 à 7 h 45	9,6	6 h 00 à 8 h 45	8,8
8 h 00 à 8 h 15	0,9	10 h 21 à 11 h 07	2,1
8 h 15 à 8 h 45	2,8	11 h 07 à 11 h 37	8,7
10 h 20 à 11 h 00	5,8	11 h 37 à 12 h 07	4,4
11 h 00 à 11 h 35	1,5	12 h 07 à 13 h 17	19,1
11 h 35 à 11 h 50	6,0	13 h 37 à 14 h 38	5,9
11 h 50 à 12 h 20	11,3		
12 h 20 à 12 h 35	5,0		
12 h 35 à 12 h 50	3,7		
12 h 50 à 13 h 05	2,4		
13 h 35 à 14 h 05	0,6		
14 h 05 à 14 h 35	0,3		
15 mai 93 prairie		15 mai 93 forêt	
Épisode	Hauteur d'eau précipitée (mm)	Épisode	Hauteur d'eau précipitée (mm)
0 h 12 à 0 h 25	8,0	0 h 12 à 0 h 35	6,9
7 h 30 à 7 h 45	3,0	7 h 30 à 7 h 45	2,3
8 h 00 à 8 h 15	8,1	8 h 00 à 8 h 15	7,8
8 h 15 à 8 h 30	5	8 h 15 à 8 h 30	2,1
8 h 30 à 8 h 45	4,9	8 h 30 à 8 h 45	6,9
8 h 45 à 9 h 00	2,7	8 h 45 à 9 h 00	2,5
9 h 00 à 9 h 15	9,1	9 h 00 à 9 h 15	9,6
9 h 15 à 9 h 30	1,8	9 h 15 à 9 h 30	2,0
9 h 30 à 9 h 45	8,6	9 h 30 à 9 h 45	7,6
9 h 45 à 10 h 00	8,1	9 h 45 à 10 h 00	9,2
10 h 00 à 10 h 15	2,9	10 h 00 à 10 h 15	3,5
10 h 15 à 10 h 30	0,7	10 h 15 à 10 h 30	1,9
13 h 00 à 13 h 20	1,4	13 h 00 à 13 h 35	1,8
13 h 20 à 13 h 35	2,4		

L'intensité des précipitations est élevée et présente des variations importantes pour un même événement. Par exemple, sur le bassin prairial, on observe des variations de 3 à 36 mm.h⁻¹ le 15 mai 1993 et de 1 mm.h⁻¹ à 22 mm.h⁻¹ le 24 mai 1992).

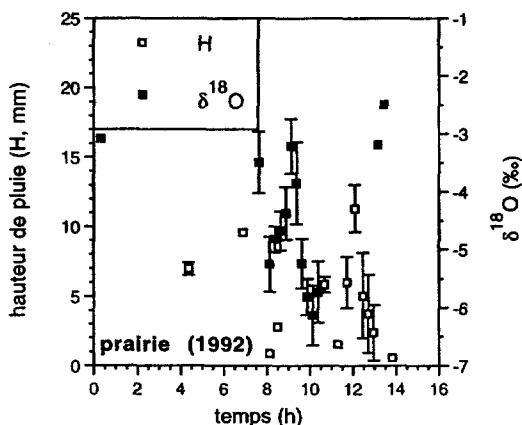


Figure 2a Évolutions temporelles de la hauteur d'eau moyenne précipitée sur le bassin prairial le 24 mai 1992 et de la teneur en ¹⁸O associée. Les écarts-types sont également représentés (n = 3).

Temporal variations of average depth water precipitated at the grassy watershed on May, 24, 1992 and ¹⁸O value associated. Standart deviations are also presented (n = 3).

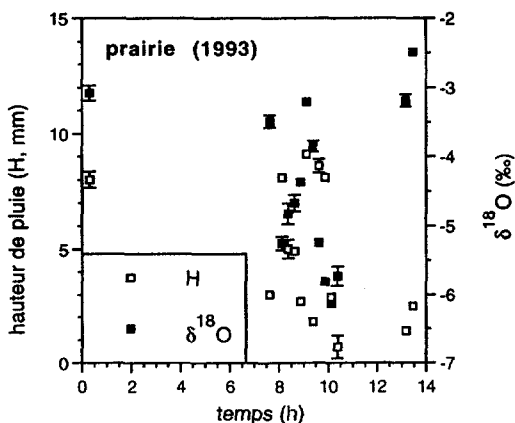


Figure 2b Évolutions temporelles de la hauteur d'eau moyenne précipitée sur le bassin prairial le 15 mai 1993 et de la teneur en ¹⁸O associée. Les écarts-types sont également représentés (n = 3).

Temporal variations of average depth water precipitated at the grassy watershed on May, 15, 1993 and ¹⁸O value associated. Standart deviations are also presented (n = 3).

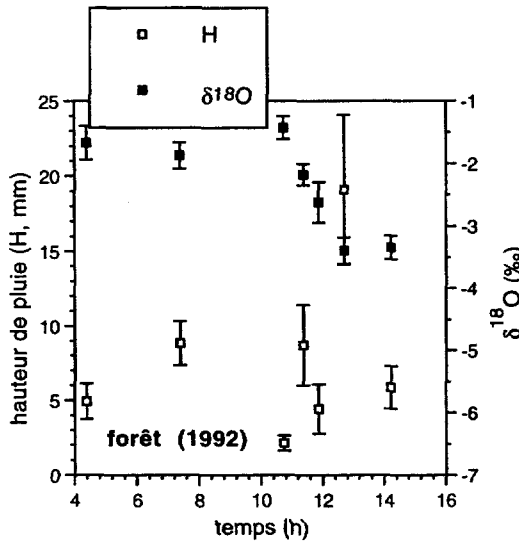


Figure 3a

Évolutions temporelles de la hauteur d'eau moyenne précipitée sur le bassin forestier le 24 mai 1992 et de la teneur en ^{18}O associée. Les écarts-types sont également représentés ($n = 31$).

Temporal variations of average depth water precipitated at the forested watershed on May, 24, 1992 and $\delta^{18}\text{O}$ value associated. Standart deviations are also presented ($n = 31$).

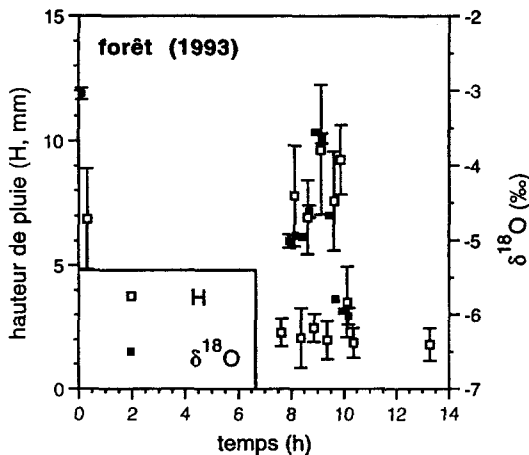


Figure 3b

Évolutions temporelles de la hauteur d'eau moyenne précipitée sur le bassin forestier le 15 mai 1993 et de la teneur en ^{18}O associée. Les écarts-types sont également représentés ($n = 31$).

Temporal variations of average depth water precipitated at the forested watershed on May, 15, 1993 and $\delta^{18}\text{O}$ value associated. Standart deviations are also presented ($n = 31$).

Sur le bassin en graminée, la hauteur d'eau précipitée est homogène spatialement (*figures 2a et 2b*). Par exemple, le 15 mai 1993, les écarts-types sont inférieurs à 0,5 mm, ce qui correspond à des coefficients de variation inférieurs à 10 %. Les écarts-types plus importants (de 0,1 mm à 3,1 mm, ce qui correspond à des coefficients de variation compris entre 3 % et 173 %), observés le 24 mai 1992 sont probablement dû au décalage temporel dans le prélèvement des trois pluviomètres. On intègre ainsi une partie de la variabilité temporelle de la hauteur d'eau précipitée. Notons que les deux derniers prélèvements, les plus variables (les coefficients de variations sont de 113 % et de 173 %), correspondent à des lames d'eau précipitées inférieures à 1 mm.

En revanche, la hauteur d'eau précipitée sous forêt présente une forte variabilité spatiale (*figures 3a et 3b*), caractérisée par des coefficients de variations élevés (de 17 à 37 % le 24 mai 1992 et de 15 à 58 % le 15 mai 1993) et des variogrammes de type aléatoire avec un effet pépite important (MOLICOVA, 1997). Le signal continu des précipitations au-dessus de la canopée est ainsi déstructuré par l'interception qui est un phénomène très variable spatialement. Ce caractère aléatoire de l'interception explique la forte variabilité spatiale des précipitations mesurées sous forêt.

3.2 Composition isotopique des précipitations

La teneur instantanée en ^{18}O des précipitations, calculée selon la formule (1), présente, sur les 2 bassins, une variabilité temporelle importante, d'amplitude comparable sur les 2 bassins (*figures 2a, 2b, 3a et 3b*). Par exemple, le 15 mai 1993, elle est de 2,9 ‰ sur le bassin prairial et de 3,0 ‰ sur le bassin forestier. Le 24 mai 1992, cette amplitude est plus faible sur le bassin forestier que sur le bassin en prairie (2,0 ‰ au lieu de 2,6 ‰). Ce résultat s'explique par le regroupement important des échantillons effectué sur le bassin forestier qui masque probablement une variabilité temporelle plus importante.

Les écarts-types calculés pour chaque valeur instantanée sont du même ordre de grandeur sur les deux bassins et sont faibles, notamment le 15 mai 1993 (l'écart-type maximal est de 0,1 ‰ sur le bassin forestier et de 0,15 ‰ sur le bassin en prairie, ce qui correspond à des coefficients de variation maximaux de 3 % sur les 2 bassins). Les valeurs, plus élevées, obtenues le 24 mai 1992 peuvent s'expliquer par un léger artefact dû au prélèvement (décalage temporel et regroupement des échantillons) qui intègre la variabilité temporelle de la signature des précipitations. Ces résultats indiquent que la composition isotopique de la pluie est homogène dans l'espace, à l'échelle de l'hectare, en milieu ouvert ou sous forêt, en région tropicale. La signature isotopique des pluviolsivats reste donc homogène dans l'espace malgré l'interception de la pluie incidente par la canopée.

3.3 Composition chimique des précipitations

Lors de l'événement pluvieux du 24 mai 1992, les eaux de pluie, prélevées sur le bassin prairial, sont progressivement diluées au cours des épisodes pluvieux successifs (*figures 4a, 4b, 4c, 4d, 4e, 4f*). Cette évolution n'est pas corrélée avec l'intensité, mais peut s'expliquer par la vidange d'une masse d'air unique générant la pluie, comme le montre l'analyse de l'évolution des teneurs intégrées en ^{18}O et en Cl^- (voir ci-après).

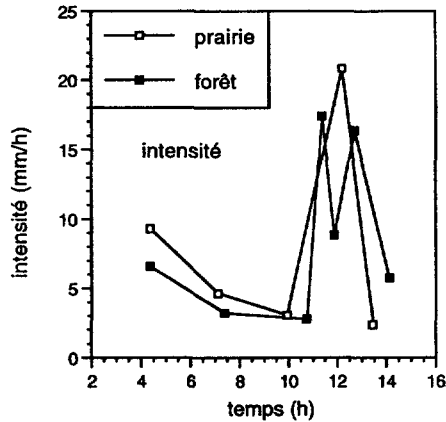


Figure 4a Évolutions temporelles des intensités moyennes des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992 ($n = 31$ pour le bassin forestier et $n = 3$ pour le bassin prairial).

Temporal variations of the average intensities of the precipitations collected at the both watersheds on May, 24, 1992 ($n = 31$ for the forested watershed and $n = 3$ for the grassy watershed).

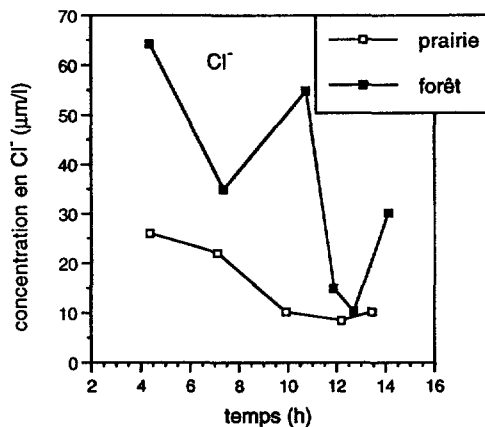


Figure 4b Évolutions temporelles des concentrations moyennes en Cl^- des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992 ($n = 31$ pour le bassin forestier et $n = 3$ pour le bassin prairial).

Temporal variations of the average Cl^- contents of the precipitations collected at the both watersheds, on May, 24, 1992 ($n = 31$ for the forested watershed and $n = 3$ for the grassy watershed).

Les pluviollessivats, prélevés sur le bassin forestier, sont généralement plus concentrés que la pluie recueillie en milieu ouvert (figures 4a, 4b, 4c, 4d, 4e, 4f). Leur pH, autour de 6, est plus tamponné que celui de la pluie, qui varie entre 7 et 5 (figure 4g), ce qui est sans doute lié au lessivage d'anions organiques d'acides faibles. Les autres éléments chimiques montrent une variabilité tempo-

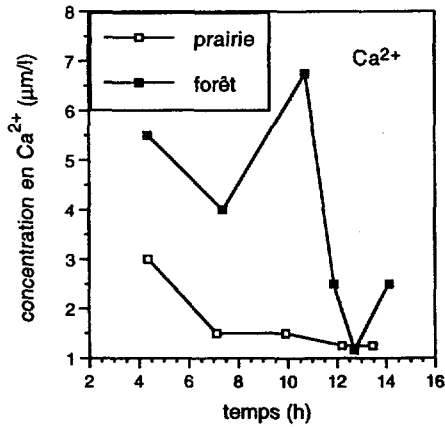


Figure 4c Évolutions temporelles des concentrations moyennes en Ca²⁺ des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992 (n = 31 pour le bassin forestier et n = 3 pour le bassin prairial).

Temporal variations of the average Ca²⁺ contents of the precipitations collected at the both watersheds, on May, 24, 1992 (n = 31 for the forested watershed and n = 3 for the grassy watersehed).

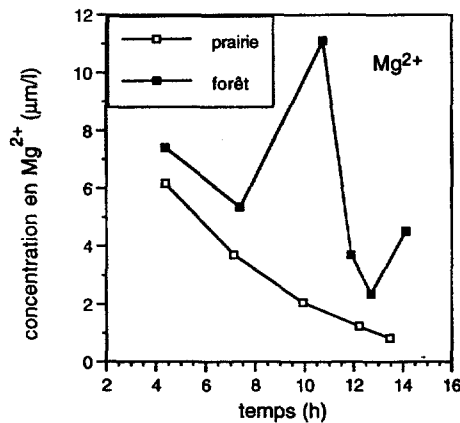


Figure 4d Évolutions temporelles des concentrations moyennes en Mg²⁺ des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992 (n = 31 pour le bassin forestier et n = 3 pour le bassin prairial).

Temporal variations of the average Mg²⁺ contents of the precipitations collected at the both watersheds, on May, 24, 1992 (n = 31 for the forested watershed and n = 3 for the grassy watersehed).

relle plus forte, avec une augmentation des concentrations pour un épisode de très faible intensité (3^e fraction prélevée) et une diminution pour un épisode de forte intensité (6^e fraction prélevée, mais 5^e point sur les graphiques). Malgré cette observation, la relation entre la concentration moyenne des pluviollessivats et l'intensité de l'averse qui les génère est plus complexe. Par exemple, on

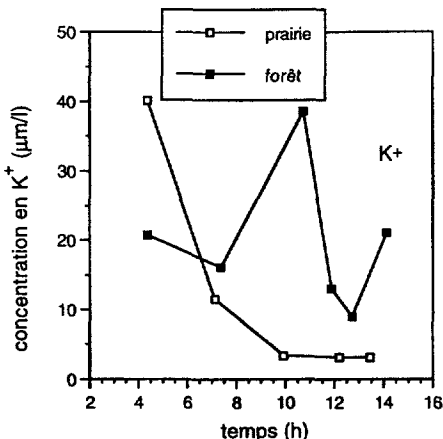


Figure 4e Évolutions temporelles des concentrations moyennes en K⁺ des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992 (n = 31 pour le bassin forestier et n = 3 pour le bassin prairial).
Temporal variations of the average K⁺ contents of the precipitations collected at the both watersheds, on May, 24, 1992 (n = 31 for the forested watershed and n = 3 for the grassy watersehed).

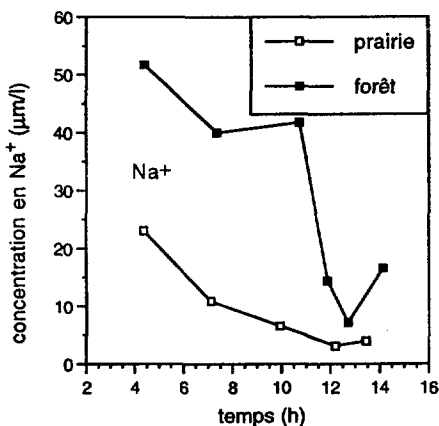


Figure 4f Évolutions temporelles des concentrations moyennes en Na⁺ des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992 (n = 31 pour le bassin forestier et n = 3 pour le bassin prairial).
Temporal variations of the average Na⁺ contents of the precipitations collected at the both watersheds, on May, 24, 1992 (n = 31 for the forested watershed and n = 3 for the grassy watersehed).

remarque que pour une intensité comparable, entre la première et la dernière fraction prélevée, les concentrations diminuent fortement, surtout pour Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ et Al.

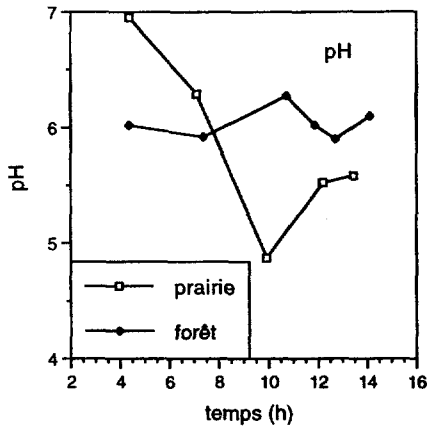


Figure 4g Évolutions temporelles du pH moyen des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992 ($n = 31$ pour le bassin forestier et $n = 3$ pour le bassin prairial).

Temporal variations of the average pH of the precipitations collected at the both watersheds, on May, 24, 1992 ($n = 31$ for the forested watershed and $n = 3$ for the grassy watershed).

L'écart des concentrations entre pluies et pluviollessivats varie aussi temporellement. Il est plus important lors de la première averse pour Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , où l'effet de lavage des feuilles peut prédominer, d'autant plus que la pluie du 24 mai 1992 a été précédée d'une période sèche prolongée (MÉTÉO-FRANCE, 1993b). La composition chimique des pluviollessivats se rapproche de celle de la pluie pour la 6^e fraction prélevée, dont l'intensité est forte, alors que l'écart est relativement élevé pour la 3^e averse, d'intensité très faible. En effet, une intensité faible augmente le temps de contact sur la canopée, donc les possibilités d'échanges foliaires, et diminue l'effet de dilution par la pluie incidente.

Les analyses effectuées séparément sur les 31 pluviomètres du transect sous forêt, lors de l'épisode 12 h 07 à 13 h 17 du 24 mai 1992, confirment la forte variabilité de la composition chimique des pluviollessivats (tableau 2). Même à l'échelle d'un hectare, 31 pluviomètres n'apparaissent pas suffisants pour estimer avec une bonne précision la composition des apports au sol. Les coefficients de variations sont élevés et supérieurs à celui de la hauteur d'eau précipitée (26,3 %). Al et H_4SiO_4 sont particulièrement variables (autour de 90 %). Cl^- , bien qu'utilisé fréquemment comme traceur hydrologique, est aussi fortement variable (38 %). Aucune concentration n'est corrélée avec la quantité d'eau recueillie dans chaque pluviomètre (tableau 3). En revanche, les quatre cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) et le chlorure sont corrélés entre eux ($P < 0,005$). La corrélation la plus forte concerne le potassium ($R = 0,768$).

La principale origine du potassium est le lessivage des feuilles, alors que les teneurs en chlorure dans les pluviollessivats sont souvent attribuées au lavage des sels évaporés sur les feuilles. Cependant, l'épisode pluvieux étudié (12 h 07 à 13 h 17) succède à plusieurs averses, survenues en début de journée, qui ont sans doute déjà réalisé ce lavage des feuilles. La corrélation entre le chlorure et

le potassium confirme donc que le chlorure n'a pas seulement une origine atmosphérique mais est aussi apporté par la végétation (PICHON *et al.*, 1996 ; CORNU *et al.*, 1998).

Tableau 2 Hauteur d'eau précipitée et caractéristiques chimiques des pluviolsivats (épisode 12 h 07/13 h 17 du 24 mai 1992, n = 31).

Depth water and chemical characteristics of the throughfall (episode 12 h 07/13 h 17 of May, 24, 1992, n = 31).

	P (mm)	cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{m}/\text{l}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{m}/\text{l}$)	K ⁺ ($\mu\text{m}/\text{l}$)	Na ⁺ ($\mu\text{m}/\text{l}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{m}/\text{l}$)	Al ($\mu\text{m}/\text{l}$)	H ₄ SiO ₄ ($\mu\text{m}/\text{l}$)	[H ⁺] ($\mu\text{m}/\text{l}$)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
moy	19,0	3,9	1	3	9	7	13	6	1	1,4	-3,4
ECT	5,0	1,2	0,5	1	5	4	5	5	1	0,7	0,2
CV	26,3	30,8	50	48	33	57	38	83	100	50	5,9

moy : moyenne ; ECT écart-type ; CV : coefficient de variation

Tableau 3 Coefficients de corrélation entre différentes caractéristiques des précipitations recueillies sur le bassin forestier le 24 mai 1992 (épisode 12 h 07/13 h 17, n = 31).

Correlation coefficients between different characteristics of the precipitations collected at the forested watershed on May, 24, 1992 (episode 12 h 07/13 h 17, n = 31).

	H	cond	pH	Al	Ca	Mg	K	Na	Cl	Si	$\delta^{18}\text{O}$
H				-0,392							
cond					0,824	0,772	0,911	0,738	0,725		
pH							0,368	0,366	0,555		
Al								0,510			
Ca						0,742	0,624	0,649	0,603		
Mg							0,633	0,402	0,617		
K								0,584	0,768		
Na									0,445		
Cl											
Si											0,577
$\delta^{18}\text{O}$											

Ne sont représentés que les coefficients de corrélation pour lesquels $P < 0,05$.

3.4 Effet de masse

3.4.1 Évolution générale

Au cours de la vidange d'une même masse d'air nuageuse, la pluie issue de cette masse d'air présente une diminution continue de sa composition isotopique (effet de masse, DANSGAARD, 1964). La caractérisation de cet effet se fait à travers l'étude des compositions intégrées, isotopique ou chimique, calculées selon la formule (2). On remarque que l'effet de masse est globalement respecté le 24 mai 1992, aussi bien en ^{18}O qu'en Cl^- (figure 5).

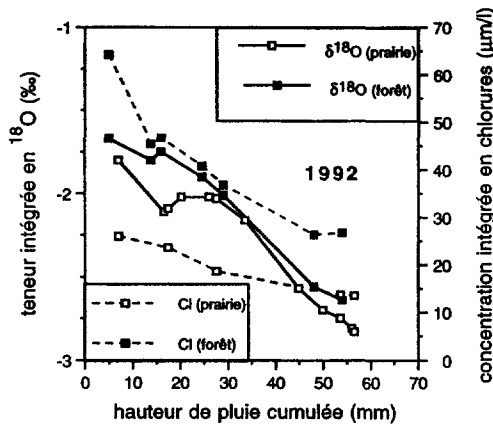


Figure 5 Évolution des teneurs intégrées en ^{18}O et en Cl^- des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 24 mai 1992.

Variations of the integrated values of $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- contents of the precipitations collected at the both watersheds on the May, 24, 1992.

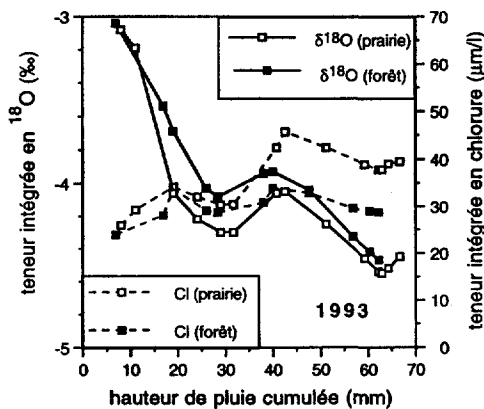


Figure 6 Évolution des teneurs intégrées en ^{18}O et en Cl^- des précipitations prélevées sur les 2 bassins le 15 mai 1993.

Variations of the integrated values of $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- contents of the precipitations collected at the both watersheds on the May, 24, 1992.

En revanche, lors de l'événement pluvieux du 15 mai 1993, les évolutions des teneurs intégrées en ^{18}O et en Cl^- sont très différentes de celles obtenues précédemment (*figure 6*). Nous observons en effet 2 périodes d'appauvrissement séparées par une période d'enrichissement pour les teneurs intégrées en ^{18}O , alors que les teneurs intégrées en Cl^- présentent 2 périodes de concentration alternant avec 2 périodes de dilution. Ces résultats ne peuvent s'expliquer que par une condensation de la vapeur d'eau se faisant en dehors des conditions du modèle de la distillation de Rayleigh. Il peut, par exemple, se produire soit des mélanges entre des masses d'air différentes, soit une condensation hors équilibre, entraînant un fractionnement cinétique, au sein d'une même masse d'air. L'étude de l'évolution des concentrations intégrées en chlorure peut permettre de trancher entre ces 2 hypothèses. En effet, les chlorures servent de noyaux de coalescence lors de la formation des précipitations et sont donc progressivement éliminés du réservoir de vapeur d'eau atmosphérique (ERIKSON, 1953 ; DUCE *et al.*, 1963). Au cours de la vidange d'une même masse nuageuse, on doit donc mettre en évidence une diminution régulière des concentrations en chlorures (NJITCHOUA *et al.*, 1995). En revanche, si un événement pluvieux est généré par des masses d'air différentes, les concentrations en chlorures des fractions de pluie successives doivent montrer des phases d'enrichissement et d'appauvrissement. La comparaison entre l'évolution des teneurs intégrées en ^{18}O et en Cl^- nous permet d'interpréter les résultats obtenus le 15 mai 1993 de la façon suivante. Les 2 premières averses de la nuit, c'est-à-dire les 11 premiers mm de pluie sur le bassin prairial, sont issues de masses d'air différentes. La première partie de l'averse principale (de 8 h 00 à 9 h 00, soit de 11 à 32 mm de pluie cumulée sur le bassin prairial) est issue d'une même masse d'air, alors que la dernière partie de l'averse principale (9 h 00 à 10 h 30, au-delà de 32 mm de pluie cumulée sur le bassin prairial) est issue d'une masse d'air distincte.

3.4.2 Comparaison entre les 2 bassins

L'évolution des teneurs intégrées en ^{18}O , calculées selon la formule (2), est la même sur les 2 bassins lors des 2 événements étudiés. On remarque cependant que les pluviollessivats (bassin forestier) présentent des teneurs légèrement supérieures à celles de la pluie du bassin prairial (*figures 5 et 6*). L'écart global est en moyenne de 0,15 ‰ (0,2 ‰ en 1992 et de 0,1 ‰ en 1993), ce qui est proche de ceux mesurés en régions tempérées (PEARCE *et al.*, 1986 ; SAXENA, 1986 ; DEWALLE et SWISTOCK, 1994). L'écart est variable au cours du temps. Par exemple, en 1993, il est proche de 0,0 ‰ pour la première averse de la nuit et atteint 0,5 ‰ pour les premiers épisodes de l'averse principale. Il est généralement plus faible lors des épisodes pluvieux de forte intensité.

Deux mécanismes ont été proposés pour expliquer l'enrichissement des pluviollessivats :

- (1) mélange entre la pluie directe et de l'eau de pluie plus ancienne, retenue sur la canopée et enrichie en isotopes lourds (^{18}O , ^2H) par évaporation et par échange avec la vapeur d'eau atmosphérique (SAXENA, 1986).
- (2) mélange entre la pluie directe et de l'eau de pluie plus ancienne, retenue sur la canopée n'ayant pas subi d'évaporation, mais qui possède une composition isotopique différente (DEWALLE et SWISTOCK, 1994).

Afin de trancher entre ces différents mécanismes, nous avons analysé la composition en ^2H des pluviollessivats prélevés le 24 mai 1992. On constate que

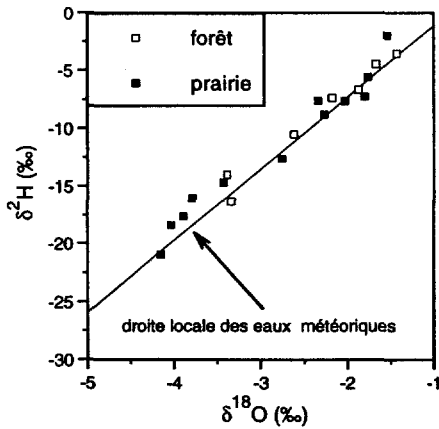


Figure 7 Relation $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ obtenue pour les précipitations prélevées le 24 mai 1992 sur les 2 bassins. La droite locale des eaux météoriques est également représentée.

$\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ relationship obtained for the precipitations collected at the both watersheds, on the May, 24, 1992. The local meteoric line is also presented.

la composition isotopique des précipitations recueillies sur les deux bassins est alignée sur la droite locale des eaux météoriques (figure 7), déterminée à Cayenne par l'Agence internationale de l'énergie atomique d'après les moyennes mensuelles calculées sur la période 1962-1975, dont l'équation est :

$$\delta^2\text{H} = 6,20 (+/-0,34) \delta^{18}\text{O} + 5,07 (+/-0,98) \quad (\text{A.I.E.A., 1992})$$

Les pluviollessivats du bassin forestier n'ont donc pas subi d'évaporation. Leur enrichissement isotopique est donc dû à un mélange entre la pluie incidente et de l'eau issue des fractions antérieures, plus enrichie, retenue sur la canopée.

L'évolution des concentrations intégrées en Cl^- est également identique sur les 2 bassins lors des 2 événements étudiés (figures 5 et 6). Le 24 mai 1992, les concentrations intégrées en Cl^- des pluviollessivats du bassin forestier sont nettement supérieures à celles de la pluie du bassin prairial (figure 5). L'écart est maximal en début de pluie (38 $\mu\text{m/l}$) et diminue ensuite (13 $\mu\text{m/l}$, en fin de pluie). L'augmentation globale de la concentration en chlorures des pluviollessivats est de 98 % par rapport à la concentration de la pluie. Cet écart est nettement supérieur à celui (22 %) mesuré par FORTI et MOREIRA-NORDEMANN (1991) pendant la saison des pluies en Amazonie Centrale. Il peut s'expliquer par la faiblesse des précipitations du mois d'avril 1992 et du début du mois de mai 1992 (MÉTÉO-FRANCE, 1993), ce qui n'a pas permis le lavage de la canopée. La comparaison entre les 2 bassins est plus difficile à réaliser le 15 mai 1993. En effet, les pluviollessivats n'ont été analysés que sur 1 seul pluviomètre par bassin, qui n'est peut être pas représentatif, en valeur absolue, de l'ensemble du bassin, surtout sous forêt, même si les tendances générales sont les mêmes. Nous pouvons toutefois remarquer que les concentrations intégrées en chlorures sont voisines sur les deux bassins (figure 6). Cela est probablement dû à la forte plu-

viométrie du mois d'avril 1993 (MÉTÉO-FRANCE, 1994) qui a permis une remobilisation des dépôts secs retenus sur la canopée avant la pluie du 15 mai 1993.

3.4.3 Comparaison prairie - clairière

Notre étude repose sur l'hypothèse que les caractéristiques de la pluie incidente au-dessus de la forêt sont égales à celle de la pluie recueillie sur le bassin prairial. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons, le 15 mai 1993, placé un pluviomètre dans une clairière située à proximité de l'exutoire du bassin forestier. On constate (*tableau 4*) que la hauteur d'eau précipitée dans les 2 pluviomètres ainsi que la teneur intégrée en ^{18}O totale sont très proches sur les 2 bassins. Ce résultat justifie donc notre hypothèse initiale.

Tableau 4 Caractéristiques de l'averse principale (8 h 00/10 h 30) de l'événement du 15 mai 1993 mesurées dans une clairière près du bassin forestier et dans le bassin prairial.

Characteristics of the main shower (8 h 00/10 h 30) of the rainy event on May, 15, 1993, measured at the clearing near the forested watershed and at the grassy watershed.

	Lame d'eau précipitée (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ total (‰)
clairière (près du bassin B)	51,9	- 5,0
prairie (bassin A)	51,9	- 4,8

4 - CONCLUSION

Notre étude a montré la forte variabilité temporelle de l'intensité des précipitations et de leur signature isotopique ou chimique en région tropicale, tant en milieu ouvert que sous forêt. On remarque, en particulier, que la variation temporelle de la composition isotopique des précipitations n'est pas toujours conforme à l'effet de masse. La hauteur d'eau précipitée en milieu ouvert ainsi que ses compositions isotopique et chimique sont homogènes spatialement. La hauteur d'eau précipitée sous forêt présente une forte variabilité spatiale en raison de l'interception de la pluie incidente par la canopée. Cette variabilité spatiale est encore plus forte pour la composition chimique des pluviolessivats. En revanche, la composition isotopique des pluviolessivats reste homogène spatialement.

On remarque également que la teneur intégrée en ^{18}O des pluviolessivats est légèrement enrichie en ^{18}O (environ 0,1 ‰) par rapport à la pluie en milieu ouvert. En l'absence d'évaporation, ce résultat s'explique par le mélange de la pluie incidente avec des fractions de pluie antérieures, plus enrichies, retenues sur la canopée.

D'un point de vue pratique et afin de réaliser une décomposition géochimique de l'hydrogramme de crue, ces résultats montrent la nécessité de :

- prélever les précipitations de façon fractionnée dans le temps ;
- et de prélever les pluvolessivats avec un réseau dense de pluviomètres. En effet, nous avons mis en évidence, qu'à l'échelle de l'hectare, 31 pluviomètres sont insuffisants pour estimer la hauteur d'eau et la composition chimique, en particulier la concentration en Cl^- , des pluvolessivats. Augmenter le nombre de pluviomètres introduit cependant une autre contrainte dans la mesure où leur prélèvement doit être simultané, en raison de la forte variabilité temporelle des précipitations.

Afin d'alléger les dispositifs expérimentaux et de pouvoir étudier des bassins versants de grandes dimensions, les études futures devront s'attacher à mieux comprendre l'acquisition de la signature géochimique des pluvolessivats.

D'un point de vue isotopique, il s'agit d'étudier les conséquences de l'intensité de la pluie incidente sur l'interception et les mélanges pouvant se produire entre l'eau retenue sur la canopée et la pluie incidente.

D'un point de vue chimique, il s'agit d'étudier l'influence que peuvent avoir la diversité du peuplement forestier, les conditions météorologiques et l'origine de la masse d'air qui génère la pluie sur la composition chimique des pluvolessivats.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le cadre du Programme d'étude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI), financé par l'Orstom et l'INSU-CNRS. Les auteurs remercient les centres de recherche Orstom de Cayenne (G. Rocheteau, J.-L. Colin, Ph. Vauchel, M. Sarrazin, J.-M. Dhenin, R. Bron, J.-C. Bron) et du CIRAD-Forêt de Kourou (J.-M. Sarrailh) pour leur accueil, leur mise à disposition de matériel et de résultats et leur contribution aux prélèvements de terrain. Nous remercions également Stéphanie Revault pour son aide lors de la rédaction du résumé anglais, ainsi que les 3 rapporteurs anonymes qui ont accepté de juger ce travail et dont les remarques ont permis d'en améliorer la qualité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, 1992. - Statistical treatment of data of environmental isotopes in precipitation. Technical reports series n° 331.

BROUWER L. C., 1996. - *Nutrient cycling in pristine and logged tropical rain forest. A study in Guyana*. Tropenbos, Guyana Series 1, Thesis Univ. Utrecht, The Netherlands, 224 pp.

- CORNU S., AMBROSI J.-P., LUCAS Y. and DESJARDINS T., 1998. Origin and behaviour of dissolved chlorine and sodium in brazilian rainforest. *Wat Res.*, 32 (4), 1151-1161.
- CROCKFORD R.H., RIDCHARDSON D.P. and SAGEMAN R., 1996a. Chemistry of rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in south-eastern Australia : 2. throughfall. *Hydrol. Proc.*, 10, 13-24.
- CROCKFORD R.H., RIDCHARDSON D.P. and SAGEMAN R., 1996b. Chemistry of rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in south-eastern Australia : 3. stemflow and total inputs. *Hydrol. Proc.*, 10, 25-42.
- CROUZET E., HUBERT P., OLIVE Ph., SIWERTZ É. et MARCÉ A., 1970. Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. *J. Hydrol.*, 11, 217-229.
- CROZAT G., 1979. Sur l'émission d'un aérosol riche en potassium par la forêt tropicale. *Tellus*, 31, 52-57.
- DANSGAARD W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, XVI, 436-468.
- DEWALLE D.R. and SWISTOCK B.R., 1994. Differences in oxygen-18 content of throughfall and rainfall in hardwood and coniferous forests. *Hydrol. Proc.*, 8, 75-82.
- DINCER T., PAYNE B.R., FLORKOWSKI T., MARTINEC J. and TONGIORGI E., 1970. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen 18. *Wat. Resour. Res.*, 6(2), 110-124.
- DUCE R.A., WASSON J.T., WINCHESTER J.W. and BURNS F., 1963. Atmospheric iodine, bromine and chlorine. *J. Geophys. Res.*, 68(13), 3943-3947.
- ERIKSSON E., 1959. The yearly circulation of chloride and sulfur in nature ; meteorological, geochemical and pedological implications. Part I. *Tellus*, XI(4), 375-403.
- EPSTEIN S. and MAYEDA T., 1953. Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 213-224.
- FORTI M.C. and MOREIRA-NORDEMANN L.M., 1991. Rainwater and throughfall chemistry in a « Terra Firme » rain forest : Central Amazonia. *J. Geophys. Res.*, 96 (D4), 7415-7421.
- FRITSCH J.-M., 1990. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants (opération ÉCÉREX en Guyane Française). *Th. Doct. Univ. Sc. et Tech. du Languedoc (Montpellier II)*, 391 pp.
- HAMBUCKERS A. and REMACLE J., 1993. Relative importance of factors controlling the leaching and uptake of inorganic ions in the canopy of a spruce forest. *Biogeochemistry*, 23, 99-117.
- HANSEN K, DRAAIJERS G.P., IVENS W.P.M.F., GUNDERSEN P. and VAN LEUVEN N.F.M., 1994. Concentration variations in rain and canopy throughfall collected sequentially during individual rain events. *Atmospheric Environment*, 28 (20), 3195-3205.
- GONFIANTINI R., 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271, 534-536.
- HERRMANN A. and STICHLER W., 1980. Groundwater-runoff relationships. *Catena*, 7, 251-263.
- KENNEDY V.C., KENDALL C., ZELLWEGER G.W., WYERMAN T.A. and AVANZINO R.J., 1986. Determination of the components of stormflow using water chemistry and environmental isotopes, Mattole river basin, California. *J. Hydrol.*, 84, 107-140.
- LIN T.C., HAMBURG S.P., KING H.B. and HSIA Y.J., 1997. Spatial variability of throughfall in a subtropical rain forest in Taiwan. *J. of Environmental Quality*, 26(1), 172-180.
- MAULÉ C.P. and STEIN J., 1990. Hydrologic flow path definition and partitioning of spring water. *Water Resour. Res.*, 26 (12), 2959-2970.
- Mc DONNELL J.J., BONELL M., STEWART M.K. and PEARCE A.J., 1990. Deuterium variations in storm rainfall: implications for stream hydrograph separation. *Wat. Resour. Res.*, 26 (3), 455-458.
- MÉTÉO-FRANCE, 1992. Bulletin climatologique mensuel, Guyane, mai 1992.
- MÉTÉO-FRANCE, 1993a. Bulletin climatologique mensuel, Guyane, mai 1993.
- MÉTÉO-FRANCE, 1993b. Résumé climatologique annuel, Guyane, 1992.
- MILLET A., 1996. Bilans hydriques et géochimiques dans le cycle forestation-déforestation.

- tation : le cas des forêts tropicales. *Th. Doct. Univ. P. et M. Curie (Paris VI)* n° 96-10, 199 pp.
- MILLET A., BARIAC T., LADOUCHE B., MATHIEU R., GRIMALDI C., GRIMALDI M., HUBERT P., MOLICOVA H., BRUCKLER L., VALLÈS V., BERTUZZI P., BRUNET Y. et BOULÈGUE J., 1998. Influence de la déforestation sur le fonctionnement hydrologique de petits bassins versants tropicaux. *Rev. Sc. Eau*, 11(1), 61-84.
- MOLICOVA H., 1997. Bilans et modélisation des flux hydrologiques et hydrochimiques sur un bassin versant élémentaire forestier tropical. *Th. Doct. École Nat. Sup. des Mines de Paris*, 268 pp.
- NJITCHOUA R., ARANYOSSI J.-F., FONTES J.-C., MICHELOT J.-L., NAAH E. et ZUPPI G.-M., 1995. Oxygène 18, deutérium et chlorures dans les précipitations à Garoua (Nord-Cameroun) : implications météorologiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 321 série II a, 853-860.
- PEARCE A.J., STEWART M.K. and SKLASH M.G., 1986. Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1) Where does the water come from ? *Wat. Resour. Res.*, 22(8), 1263-1272.
- PICHON A., MARC V. et TRAVI Y., 1995. Influence de l'interception des pluies sur le traçage chimique de l'eau en zone forestière méditerranéenne (BVRE du Réal Collobrier, Var, France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 321 série IIa, 137-144.
- PICHON A., TRAVI Y. and V. MARC, 1996. Chemical and isotopic variations in throughfall in a mediterranean context. *Geophys. Res. Lett.*, 23(5), 531-534.
- PIONKE H.B. and DEWALLE D.R., 1992. Intra and inter-storm ¹⁸O trends for selected rainstorms in Pennsylvania. *J. Hydrol.*, 138, 131-143.
- PROBST A., DAMBRINE É., VIVILLE D., EZZAHAR B., FRITZ B. et AMBROISE B., 1995. Fonctionnement hydrobiogéochimique du petit bassin versant forestier du Strengbach à Aubure (Hautes-Vosges, France). *Ann. Géo.*, 581-582, 178-182.
- ROBSON A.J., NEAL C., RYLAND G.P., HARROW M., 1994. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *J. Hydrol.*, 158, 107-122.
- ROCHE M.A., 1982. Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à ÉCÉREX, en Guyane. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIX(2), 81-114.
- SARRAILH J.-M., 1990. Mise en valeur de l'écosystème guyanais : opération ÉCÉREX. Inra CTFT Eds.
- SAXENA R.K., 1986. Estimation of canopy reservoir capacity and oxygen-18 fractionation in throughfall in a pine forest. *Nordic hydrol.*, 17, 251-260.