

PHYSICO-CHIMIE DES EAUX DE PLUIE EN SAVANE ET SOUS FORÊT EN MILIEU TROPICAL

Ph. MATHIEU et C. MONNET

*Géologues ORSTOM
Laboratoire de Géologie et de Sédimentologie.
Université de Nice.*

RÉSUMÉ

Les paramètres physico-chimiques suivants : pH, Eh et résistivité, sont mesurés dans les eaux de pluie. Les méthodes utilisées permettent d'exécuter sur place des mesures nombreuses pendant l'averse et de déceler des variations rapides dans la nature du milieu. L'acidité des précipitations est discutée à la lumière des données bibliographiques et de nos propres observations faites en Côte d'Ivoire. L'influence de la localisation géographique des prélèvements et celle de la couverture forestière tropicale sur la charge de ces eaux apparaît comme primordiale.

ABSTRACT

pH, redox and resistivity were measured in rain-water with special methods in situ allowing a lot of values during the shower itself ; so are read out the eventual quick variations in the environment nature.

The rain water acidity is studied with the bibliographical data and our Ivory Coast observations.

It appears as fundamental controls the geographical points of sampling as well as the influence of the forest canopy.

ZUSAMMENFASSUNG

Folgende physikalisch-chemische Parameter : pH, Eh und spezifischer Leitungswiderstand, wurden im Regenwasser gemessen. Die angewandten Methoden erlauben es, viele Messungen an Ort und Stelle während des Regenschauers auszuführen und schnelle Veränderungen in der Natur des Milieus nachzuweisen. Der Säuregehalt der Niederschläge wird erörtert mit Hilfe der bibliographischen Daten und unserer eigenen Beobachtungen an der Elfenbeinküste. Der Einfluss der geographischen Lokalisierung der Probenahmen und der des tropischen Waldmantels auf die festen Teile in diesen Gewässern scheint von grosser Bedeutung.

РЕЗЮМЕ

Были измерены, в дождевых водах, следующие физико-химические параметры : pH, Eh и удельное сопротивление. Примененные методы позволяют производить на месте, во время дождя, многочисленные измерения и обнаруживать быстрые колебания природы среды. Обсуждается степень кислотности осадков в свете данных литературы и наших собственных наблюдений в республике Берега Слоновой Кости. Влияние как географической локализации сбора проб так и тропического лесного покрова на наносы этих вод имеет повидимому первостепенное значение.

INTRODUCTION

Pour une meilleure compréhension de la nature des eaux de ruissellement sur des bassins versants à végétation contrastée, il est intéressant de connaître celle des eaux de pluie dont elles sont issues.

La contribution de l'atmosphère et du couvert végétal lessivé par les précipitations en région forestière prend une importance particulière dans des zones pédo-climatiques où les eaux de surface ont des faibles charges (MANGIN *et al.*, 1966).

Nous n'envisagerons dans cette note que la nature physico-chimique de l'eau de pluie et les paramètres suivants ont été retenus : résistivité, pH et Eh. Seules sont prises en considération les mesures qui ont été faites immédiatement après le prélèvement.

Situation géographique

Les deux stations choisies sont situées, l'une en savane, dans le nord de la Côte d'Ivoire, à 600 km de la côte (bassin versant du Loserigue), l'autre en forêt, à 80 km du bord de mer (bassin versant de l'Amitioro). A cette station, les prélèvements sont effectués simultanément en clairière et sous la voûte forestière.

Pluviométrie (fig. 1)

Les deux bassins sont situés à proximité de l'isohyète interannuel 1 400 mm. Les pluviométries moyennes sont respectivement de 1 406 mm sur le Loserigue et de 1 323 mm sur l'Amitioro. Bien que ces valeurs soient voisines, les deux stations soumises à des régimes climatiques bien différenciés, offrent une répartition saisonnière des précipitations très différente (tableau I).

TABLEAU I

Pluviométrie moyenne mensuelle (en mm) comparée entre les deux stations

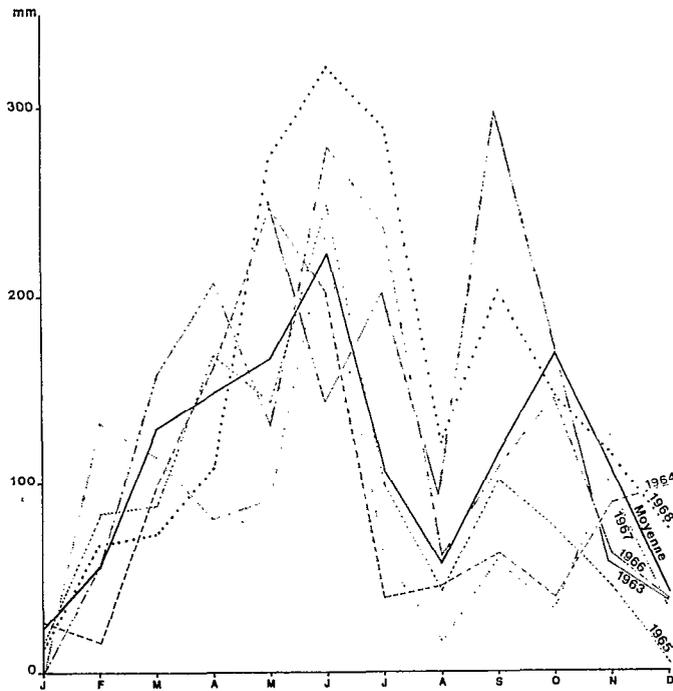
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Loserigue	5	13	44	101	125	162	197	304	268	132	43	12
Amitioro	23	56	128	148	166	223	106	56	115	169	106	40

Sur le bassin du Loserigue (savane), soumis au régime tropical de transition, il n'existe qu'une seule saison des pluies dont le maximum pluviométrique se situe en août. Sur le bassin de l'Amitioro (forêt), le régime équatorial de transition, type boréal, se caractérise par l'existence de deux saisons des pluies ayant leur maximum en juin et en octobre et dont les hauteurs pluviométriques sont moins élevées que sur le Loserigue.

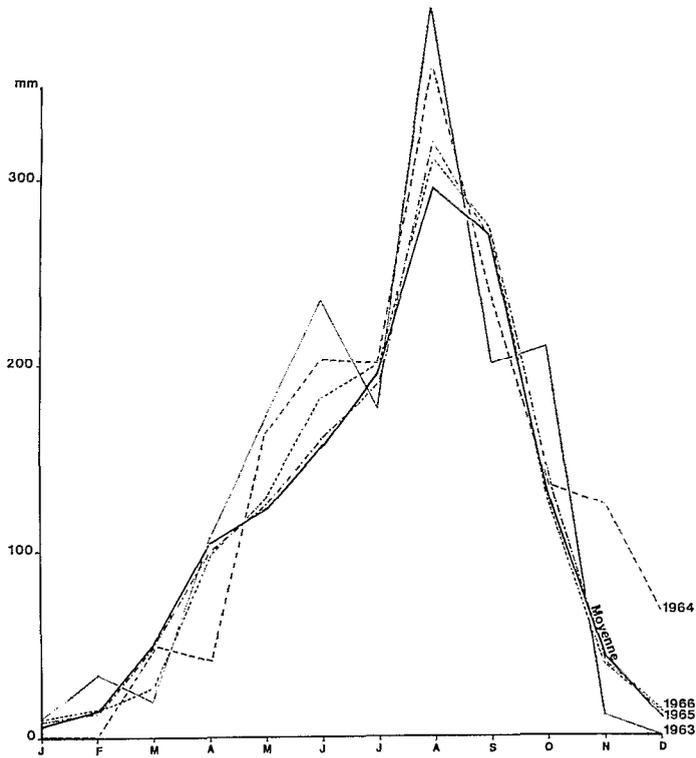
Le tableau II représente le classement des averses qui est assez comparable sur les deux bassins, par tranches de 10 mm.

Deux principaux types d'averses peuvent être distingués :

— les pluies de tornade. La phase préliminaire est de courte durée. Le corps de l'averse, bien marqué, présente de fortes intensités. Il est suivi d'une traîne à faible intensité.



Pluviométrie sur le bassin de l'Amitorio
comparée à la moyenne interannuelle (station de Tiassalé, 35 ans)



Pluviométrie sur le bassin du Loserigue
comparée à la moyenne interannuelle (station de Korhogo, 24 ans)

FIG. 1.

TABLEAU II

Classement des averses

	1964		1965		1966		1967	
	LOS	AMI	LOS	AMI	LOS	AMI	LOS	AMI
0 - 10 mm	54	71	54	66	52	107		56
10 - 20 —	15	15	23	13	20	26		16
20 - 30 —	11	9	10	11	10	15		10
30 - 40 —	4	9	7	5	7	3		2
40 - 50 —	3	1	1	1	3	2		3
50 - 60 —	3	1	4	4	1	2		0
> 60 —	4	0	0	6	4	2		1

— les pluies de mousson. Elles se caractérisent par de nombreuses pointes à intensité moyenne, séparées par des périodes à faible intensité. La durée totale de la précipitation dépasse plusieurs heures.

MÉTHODES

Au cours de la mise au point du dispositif de prélèvement, nous avons été guidés par un double but :

— fractionner l'averse en plusieurs prélèvements afin de suivre les variations chimiques et physiques de l'eau pendant la pluie, ce qui nécessite de disposer, en un court intervalle de temps d'une quantité d'eau suffisante quelle que soit l'importance de la précipitation.

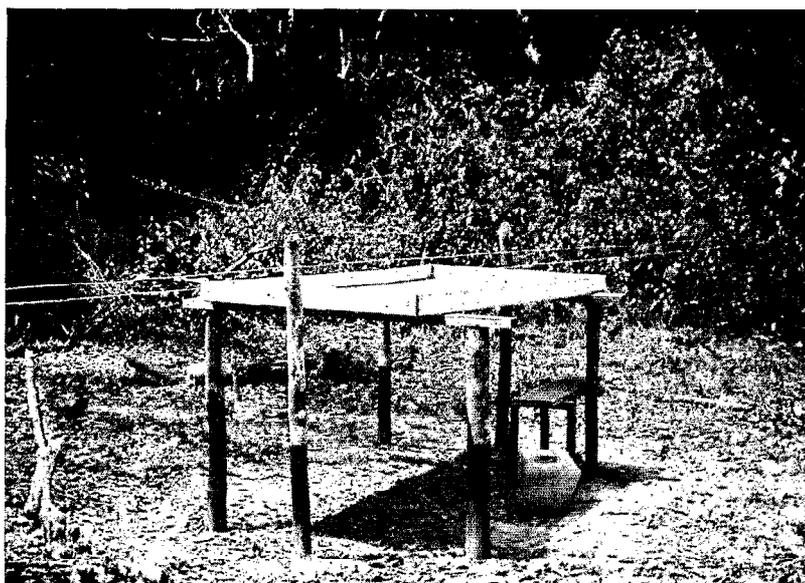


FIG. 2. — Bac de récupération des eaux de pluie

— faire immédiatement et sur place les mesures de température, de pH, de potentiel d'oxydo-réduction et de résistivité. En effet, quelques mesures faites après un certain temps de stockage de l'eau de pluie montrent que les valeurs de pH obtenues sont nettement différentes de celles mesurées immédiatement après le prélèvement (tableau III). Les comparaisons avec les valeurs de pH trouvées dans la littérature ne sont donc valables que dans la mesure où ces dernières ont été réalisées dans les mêmes conditions.

Les prélèvements sont réalisés à l'aide d'un bac en plastique rigide de 3 m² (2,50 × 1,20 m) légèrement incliné vers l'un des quatre angles pour permettre l'écoulement de l'eau par un trou auquel est adapté un tuyau en plastique (fig. 2 et 3). Ce trou n'est jamais bouché afin d'éviter le stockage de l'eau de pluie dans les bacs. Ceci est important pour éviter la contamination de l'eau. La superficie du bac permet de récupérer 3 litres d'eau après 1 mm de précipitation. Entre chaque averse, le bac à pluie est rincé à l'eau distillée et recouvert d'une bâche en plastique. L'eau recueillie est donc l'eau de pluie immédiatement après sa chute qui ne fait que transiter par le bac collecteur. Pour éviter les projections à partir du sol, la hauteur des pieux est de 1,40 m au point le plus haut.

TABLEAU III

Evolution des valeurs du pH des eaux de pluie de la station de l'Amitioto après prélèvement

Date	Bac	pH prélèvement	pH après prélèvement	Remarques
18-4-65	D	5,30	6,84	Même appareil 24 h après
	C	6,65	6,40	
27-4-65	D	6,33	6,00	Appareil de laboratoire 48 h après prélèvement
	C	6,71	6,30	
	D	6,42	5,80	
	C	6,80	6,10	
	D	6,64	5,70	
28-4-65	C	6,95	6,20	Appareil de laboratoire 48 h après prélèvement
	D	6,90	6,10	
	C	6,85	7,20	
	D	6,55	6,80	
	C	6,88	7,10	
29-6-65	D	6,57	6,70	Même appareil 24 h après
	C	6,98	7,00	
	D	4,75	4,91	
	C			
	D			
23-9-66	C	5,10	6,50	Même appareil 8 jours après prélèvement
	C	5,10	6,50	
	D	4,13	5,43	
	D	4,40	5,80	
	D	4,53	5,93	
	C	5,14	6,54	
	C	5,19	6,59	
	D	4,53	5,92	
	C	5,30	6,70	
	C	5,66	7,06	
	C	5,78	7,18	
	C	5,73	7,13	
C	5,03	6,43		



FIG. 3. — Bac à pluie muni de sa bâche de protection

Un seul bac est monté sur le bassin de savane du Loserigue. En forêt de l'Amitioro, deux bacs sont installés, l'un au centre d'une zone débroussée (clairière), de trente mètres de rayon environ dans laquelle est également établi l'entonnoir du pluviographe ; nous appellerons ce bac « bac découvert » ou BD. Il recueille la pluie directe qui ne traverse pas la couverture forestière. L'autre est installé à 40 mètres du précédent sous la voûte forestière. Nous l'appellerons « bac couvert » ou BC. Il recueille la pluie ayant lessivé le couvert végétal. Ce mode de prélèvement permet par comparaison entre les données des deux bacs, d'indiquer la participation de la végétation forestière à la composition finale des eaux de ruissellement.

Température, pH, potentiel d'oxydo-réduction, et résistivité sont mesurés sur place immédiatement après le prélèvement, plusieurs fois pendant la même averse. Les mesures sont faites en immergeant dans le godet de prélèvement une sonde constituée de cinq broches contenant :

- une résistance thermique,
- une électrode de résistivité,
- une électrode de verre pour la mesure du pH,
- une électrode de référence au calomel,
- une électrode de platine pour la mesure du potentiel redox.

Elles sont reliées par l'intermédiaire d'une gaine unique à une unité de mesure « MECI » composée :

- d'un thermomètre IP 41,
- d'un résistivimètre IP 31,
- d'un potentiomètre indicateur de pH : VS2 alimentés par batteries (fig. 4).

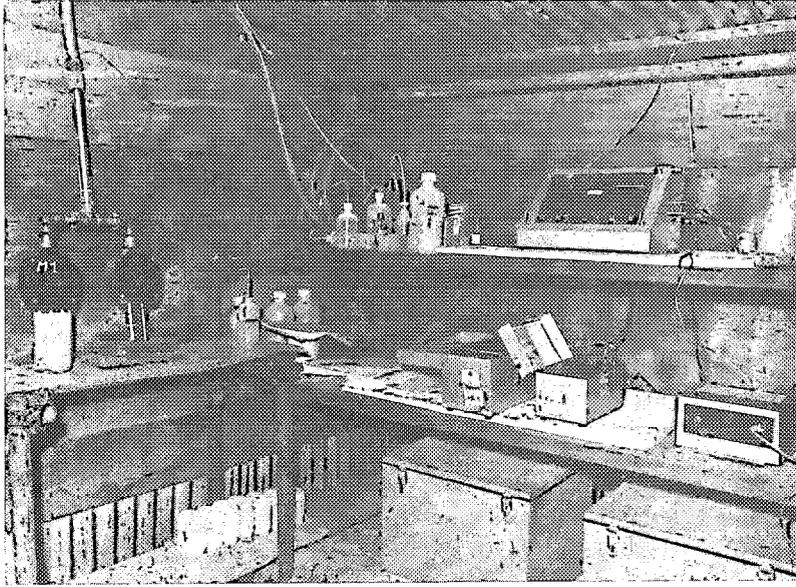
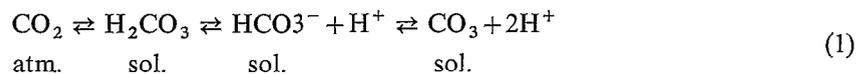


FIG. 4. — Intérieur de la case-abri où sont effectuées les mesures. Vue des appareils et de la sonde

QUELQUES DONNÉES SUR LA PHYSICO-CHIMIE DE L'EAU

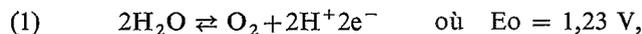
Les valeurs de la résistivité des eaux sont fonction de la température, de la nature et de la concentration des ions.

Les eaux météoriques en contact avec le gaz carbonique atmosphérique, dissolvent une partie de celui-ci suivant la réaction :



Dans un milieu pur en ions métalliques, la résistivité dépendra donc en grande partie de la teneur en ions H^+ libres par suite de la conductibilité importante de ces derniers et devrait par conséquent être en corrélation positive avec le pH.

Les fortes variations de pH que l'on peut rencontrer dans les milieux aqueux entraînent de grandes variations dans les potentiels redox. En fait, ils varient dans des limites étroites et se situent théoriquement entre les réactions suivantes :



potentiel normal du couple $\text{H}_2\text{O}/\frac{1}{2} \text{O}_2$.

Ce couple est pratiquement le seul présent dans les eaux aérées en contact avec l'atmosphère (en particulier les eaux de pluie). Les études de cinétique électrochimique permettent à MICHARD (1967) d'apparenter ce couple à un système lent, c'est-à-dire qu'il réagit extrêmement lentement au voisinage du potentiel d'équilibre. Les potentiels mesurés dans un tel système sont donc des « potentiels mixtes » et non des potentiels d'équilibre, l'eau naturelle aérée n'étant pas en équilibre redox.

Pour une pression partielle d'oxygène de 0,2 atmosphère, on a, d'après la formule de Nernst (1) :

$$\begin{aligned} \text{Eh} &= 1,23 + 0,23 \log (0,2)^{1/2} + 0,06 \log \text{H}^+ \\ \text{soit :} \quad \text{Eh} &= 1,22 - 0,06 \text{pH} \\ (2) \quad 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- &\rightleftharpoons \text{H}_2 \quad \text{où } \text{E}_0 = 0,00 \text{ V.} \end{aligned} \quad (2)$$

En appliquant la formule de Nernst :

$$\begin{aligned} \text{Eh} &= 0,00 + 0,03 \log [\text{H}^+]^2 - 0,03 \log [\text{H}_2] \\ \text{Eh} &= 0,06 \text{pH} - 0,03 \log [\text{H}_2] \end{aligned}$$

La pression partielle d'hydrogène dans les milieux aqueux ne pouvant excéder 1 atmosphère, le potentiel de réduction maximum en présence d'eau sera :

$$\begin{aligned} \text{Eh} &= -0,06 \text{pH} - 0,03 \log 1 \\ \text{Eh} &= -0,06 \text{pH} \end{aligned} \quad (3)$$

Théoriquement, les équations (2) et (3) fournissent les limites à l'intérieur desquelles les valeurs du Eh des milieux aqueux peuvent se situer.

A pH7, le potentiel de la réaction (2) serait de +0,80 V et celui de la réaction (3), de -0,42 V.

Une compilation des résultats obtenus sur les eaux naturelles dont une partie sont des eaux météoriques a été réalisée par BAAS BECKING *et al.* (1960), (fig. 5). La relation entre Eh et pH obtenue est la suivante :

$$\text{Eh} = 0,85 - 0,06 \text{pH}$$

GARRELS (1960) donne :

$$\text{Eh} = 0,70 - 0,06 \text{pH}$$

En fait, les mesures du potentiel d'oxydo-réduction réalisées dans les milieux naturels se situent bien en dessous de la limite théorique représentée par l'équation (2), et, d'après KRAUSKOPF (1967), l'équation empirique suivante :

$$\text{Eh} = 1,04 - 0,06 \text{pH}$$

constitue une limite supérieure plus réaliste.

Les mesures faites en Côte d'Ivoire ont permis d'obtenir les équations suivantes :

— eaux de pluie sur le bassin du Loserigue (savane) :

$$\text{Eh} = 0,85 - 0,06 \text{pH} \quad (120 \text{ mesures})$$

— eaux de pluie recueillies en clairière sur le bassin forestier de l'Amitioro :

$$\text{Eh} = 0,87 - 0,06 \text{pH} \quad (131 \text{ mesures})$$

— eaux de pluie recueillies sous la voûte forestière du bassin de l'Amitioro :

$$\text{Eh} = 0,89 - 0,06 \text{pH} \quad (143 \text{ mesures}).$$

(1) $E = E_0 + \frac{2303 RT}{nf} \log \frac{[\text{Y}]^y [\text{Z}]^z \dots}{[\text{B}]^b [\text{D}]^d \dots}$ potentiel de la réaction $y\text{Y} + z\text{Z} \rightleftharpoons b\text{B} + d\text{D} + n\text{e}^-$

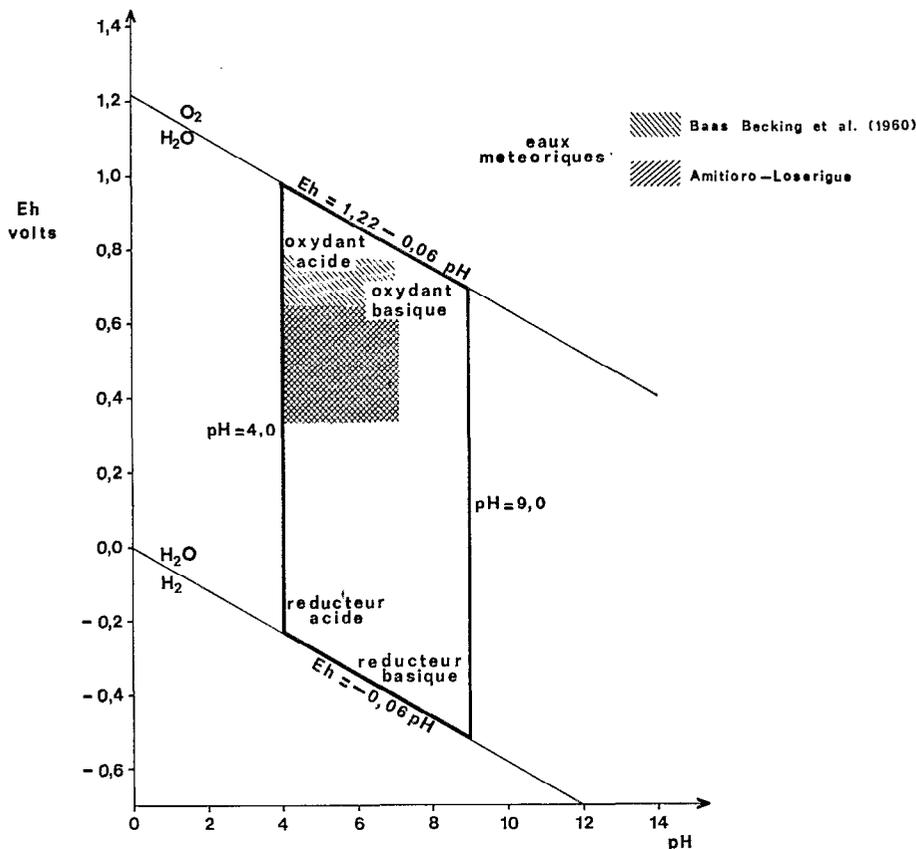


FIG. 5. — Limites usuelles du Eh et du pH dans les eaux naturelles.

Ces résultats sont donc très voisins de ceux obtenus par BAAS BECKING *et al.* et se groupent bien à l'intérieur des limites théoriques discutées plus haut.

Le diagramme Eh-pH de la figure 6 regroupe tous les résultats obtenus sur les eaux de pluie des deux bassins.

ACIDITÉ DES EAUX DE PLUIE. DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

L'acidité des eaux de pluie a été discutée par les auteurs. Elle tient à plusieurs facteurs.

Le gaz carbonique

Le pourcentage de gaz carbonique dissous dans ces eaux du fait de la différence des coefficients de solubilité est plus fort que dans l'atmosphère (H. SCHÖLLER, 1962). Cependant, MOHR (1944) pense que les eaux de pluie tropicales sont plus pures en gaz carbonique que celles des climats tempérés à cause de leur température plus élevée. BIROT (1949) estime que cette teneur est trois à quatre fois plus faible en climat chaud qu'en climat froid. Les valeurs du pH de pluies tropicales aussi bien que de pluies tempérées rapportées par ROUGERIE (1958) correspondent à une eau distillée en équilibre avec le gaz carbonique atmosphérique. Dans les eaux de pluie de Suède, BARRETT et BRODIN (1955) trouvent des pH plus acides

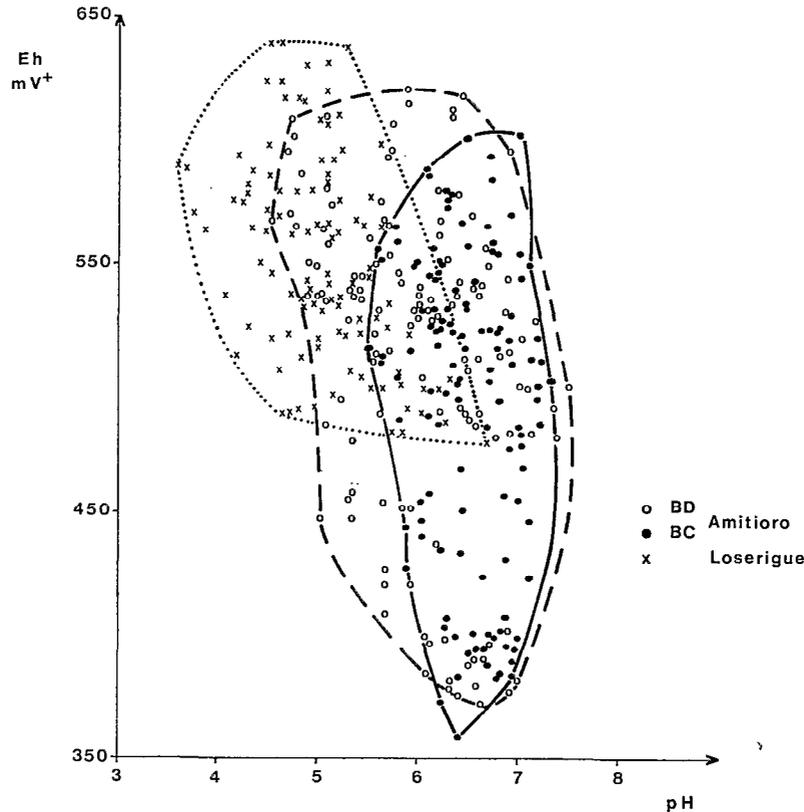


Fig. 6. — Distribution des mesures de pH et de Eh.

que celui d'une eau pure dans laquelle cet équilibre est atteint (pH 5,7). Cet « excès » d'acidité est attribué par les auteurs à la présence d'acides minéraux dans l'atmosphère ou, près des côtes, à la production d'acides organiques par l'activité biologique.

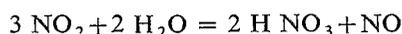
Présence d'acides minéraux dans l'atmosphère

La présence d'*acide nitrique* dans l'atmosphère a été notée par FREISE (1936) qui en trouve 18 mg/l dans l'eau de condensation des brouillards du Brésil. D'après CAPUS (1914) l'apport par les eaux de pluie en Indochine est de 8 kg/ha/an. Ces chiffres paraissent élevés à MOUREAUX (1954) qui obtient des valeurs bien inférieures en azote nitrique (1 kg/ha/an pour 1 500 mm de précipitation). ROUGERIE (1958, 1960) qui commente ces résultats pense qu'en fait, la nitrification des eaux météoriques est probablement sur-estimée ; dans les régions équatoriales, l'azote contenu dans l'atmosphère est oxydé par les décharges électriques qui y sont fréquentes ce qui enrichit les eaux de pluie en nitrates et en ammoniac (DUSSART, 1966). A Saïgon, RICHARD (1960) (dans DUSSART *op. cit.*) évalue à 106 $\mu\text{g/l}$ la teneur en acide nitrique dans l'eau de pluie, tandis que la teneur moyenne évaluée près des côtes de l'Atlantique est de 20 $\mu\text{g/l}$ ce qui est faible.

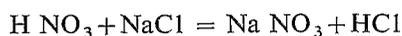
De plus, l'atmosphère contient du chlore à l'état gazeux, probablement sous forme d'*acide chlorhydrique*. Pour expliquer la présence de cet acide, CAUER (1938) formule l'hypothèse que les particules de sel de mer peuvent être oxydées par l'ozone atmosphérique ce qui libère du chlore gazeux éventuellement transformé en acide chlorhydrique, les bicarbonates se substituant aux ions chlores pour réaliser des

combinaisons avec les ions sodium. ERIKSSON (1958) pense que ce phénomène est quantitativement peu important et pour expliquer la libération du chlore, il fait intervenir l'absorption de l'hydrogène sulfuré et son oxydation par les sols arides riches en chlorure de sodium. Mais, pour GORHAM (1958 *a*, 1958 *b*) un tel processus ne pourrait se produire dans des sols alcalins qui neutraliseraient les acides au fur et à mesure de leur formation, mais serait plus vraisemblable pour les sols forestiers fortement acides.

A partir de résultats expérimentaux, ROBBINS *et al.* (1959) suggèrent un processus de conversion des particules de chlorure de sodium des aérosols en acide chlorhydrique gazeux dans l'atmosphère. La première étape serait l'hydrolyse du NO_2 pour former des vapeurs d'acide nitrique :



La seconde étape serait, suivant l'humidité relative, soit d'adsorption par les particules de chlorure de sodium, soit la mise en solution des particules hygroscopiques de chlorure de sodium. La troisième étape serait constituée par des interactions entre chlorure de sodium et acide nitrique.



La dernière étape étant la libération par désorption de l'acide chlorhydrique.

GORHAM (1955) et BARRETT et BRODIN (1955) attribuent l'acidité des eaux de pluie à la présence en quantité notable d'acide sulfurique libre pouvant provenir de l'oxydation des composés sulfurés, en particulier de ceux qui sont liés à la contamination industrielle. Par ailleurs, BARRETT et BRODIN notent qu'en Suède les pH sont décroissants de l'intérieur vers la côte ce qui leur fait émettre l'hypothèse que cet excès d'acidité peut provenir de la production d'acides organiques par l'activité biologique qui sont ensuite dispersés dans l'atmosphère à partir des gouttelettes de l'écume de mer. L'élévation du pH à l'intérieur des terres serait la conséquence de la présence d'aérosols alcalins. Ces pH élevés (6 à 7) sont associés à de fortes teneurs en calcium et à un rapport Ca/SO_4 élevé. GORHAM (1957) fait des observations analogues suivant lesquelles la présence de quantités notables de poussières calcaires dans l'air peut interférer sur les valeurs du pH. Contrairement à BARRETT et BRODIN, GAMBELL et FISCHER (1966) constatent qu'en Caroline du nord et en Virginie le pH est décroissant de la côte vers l'intérieur. Cette décroissance est en général parallèle aux variations du sulfate en excès. En Nouvelle Ecosse, HERMAN et GORHAM (1956) trouvent des pH plus acides dans les eaux de pluies dont les concentrations en nitrates et en sulfures sont élevées. Dans les eaux de pluie des régions à activité volcanique, riches en sulfures, ERIKSSON (1952) cite des pH très acides (2,82 à 3,16).

En fait, les nombreux résultats trouvés dans la littérature et qui sont rassemblés dans le tableau IV indiquent que les eaux de pluie ont une acidité modeste. Ceci est confirmé par les travaux récents réalisés sur le territoire de l'URSS par SULEJMANOV et LISTENGARTEN (1966) ainsi que par KONOVALOV et KOLESNIKOVA (1969). Certains auteurs rapportent même des pH fortement alcalins tel POUQUET (1956) qui trouve des valeurs comprises entre 7,0 et 8,5 dans des pluies de tornades tropicales et VISSER (1961) qui cite, pour des eaux de pluie mesurées en Ouganda des pH compris entre 5,7 et 9,8.

RÉSULTATS

Résistivité

Les valeurs des résistivités des eaux de pluie mesurées sur les deux bassins se répartissent entre les limites suivantes :

Bassin du Loserigue : (savane)

1965 : de 31 400 à 666 000 $\Omega \cdot \text{cm}$

1966 : de 14 700 à 388 000 $\Omega \cdot \text{cm}$

1967 : de 75 500 à 274 000 $\Omega \cdot \text{cm}$

TABLEAU IV

pH des eaux de pluies. Bibliographie

Auteurs	Année	Lieu	A découvert	Sous couvert forestier
ERIKSSON	1952	Régions à activité volcanique	2,82 - 3,16	
BARRETT et BRODIN	1955	Scandinavie — côte — intérieur	4,0 - 6,0 6,0 - 7,0	
EGNER et ERIKSSON	1955	Scandinavie Grande-Bretagne	3,9 - 7,5	
GORHAM	1955	Grande-Bretagne District des Lacs	4,0 - 5,8	
POUQUET	1956	Tornades tropicales	7,0 - 8,5	
POZDNIJAKOV	1956	URSS - Iakoutie, sous mélèzes, pins, bouleaux		5,8 - 6,4
HERMAN et GORHAM	1957	Nouvelle Ecosse	5,7 (moyenne)	
GORHAM	1957	Grande-Bretagne Rosscahill	5,9 - 7,6	
ALEXANDER	1958	Nigeria	5,8 - 6,8	
EGNER et BRODIN	1958	Sud de la Suède	4,7 - 6,1	
ROUGERIE	1958	France : — Paris — Périgord Côte-d'Ivoire	4,9 - 6,0 5,0 - 7,0	
BAAS BECKING <i>et al.</i>	1960	Etats-Unis Grande-Bretagne Australie	3,00 - 7,17	
ROUGERIE	1960	Abidjan, Côte-d'Ivoire	5,1 - 7,4	
VISSER	1961	Ouganda	5,7 - 9,8	
PONCELLET	1964	Belgique	3,4 - 6,8	
GAMBELL et FISCHER	1966	Caroline du Nord et Virginie : — côte — intérieur	5,2 - 5,6 4,6 - 4,9	
SULEJMANOV et LISTENGARTEN	1966	URSS, presqu'île d'Apsheron	5,5 - 6,9	
JOUS	1967	Normandie - France	4,4 - 6,4	
KONOVALOV et KOLESNIKOVA	1969	URSS, Région d'Otkaznoe	4,36 - 7,16	
FLEETWOOD	1969	Norvège : pluie + neige	6,14 - 6,80	
MATHIEU et MONNET	1965 à 1967	Côte-d'Ivoire : — Savane (Loserigue) — Forêt (Amitioro)	3,60 - 6,70 4,50 - 7,50	5,50 - 7,60

Bassin de l'Amitioro : (forêt)

- à *découvert* : 1964 : de 34 000 à 576 000 $\Omega \cdot \text{cm}$
 1965 : de 50 000 à 660 000 $\Omega \cdot \text{cm}$
 1966 : de 16 300 à 664 000 $\Omega \cdot \text{cm}$
- *sous couvert* : 1964 : de 24 000 à 150 000 $\Omega \cdot \text{cm}$
 1965 : de 14 000 à 110 000 $\Omega \cdot \text{cm}$
 1966 : de 7 000 à 88 000 $\Omega \cdot \text{cm}$

La distribution des valeurs de la résistivité est indiquée dans le tableau V.

TABLEAU V

Résistivités : tableau de fréquences (en %)

Résistivité $\times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$	< 25	25 50	50 100	100 150	150 200	200 300	300 400	> 400
Loserigue	1,6	11,9	22,2	22,2	21,4	7,1	7,1	6,3
Amitioro BD	4,9	3,1	22,8	19,7	12,3	16,0	8,0	13,0
Amitioro BC	43,5	40,7	14,7	1,1	0	0	0	0

Alors que les fréquences se distribuent de manière identique dans les pluies recueillies en savane et dans celles mesurées à découvert en zone forestière, les eaux qui entrent en contact avec la voûte forestière possèdent des charges beaucoup plus élevées.

Les précipitations lessivent les particules minérales d'aérosols déposées sur les feuilles entre les périodes pluvieuses (ERIKSSON, 1955, TAMM et TROEDESSON, 1955). Mais la végétation est elle-même un pourvoyeur d'éléments minéraux et l'eau de pluie entre pour une part importante dans le processus de retour au sol de certains d'entre eux, en particulier le potassium (DOMMERMUES, 1963). Les concentrations moyennes obtenues à partir des échantillons prélevés sur 56 pluies passent de 2,5 mg/l à découvert à 18,1 mg/l sous couvert forestier.

pH

Sur 125 mesures de pH réalisées sur les eaux de pluie tombées en savane sur le bassin du Loserigue, 73,6 % sont inférieures à 5,5. 58,4 % des résultats sont groupés entre pH 4,5 et pH 5,5. Aucune valeur supérieure à pH 7 n'a été observée.

Dans les pluies recueillies à découvert en zone forestière, les pH sont sensiblement moins acides qu'en savane et 23,9 % seulement des mesures sont inférieures à 5,5. 62,7 % des résultats sont groupés entre pH 5,0 et pH 6,5. 8,2 % des valeurs sont supérieures à pH 7,0.

Sous la couverture forestière, l'eau de pluie est moins acide. 80 % des résultats sont compris entre pH 6,0 et pH 7,0 et 13 % des valeurs sont supérieures à pH 7,0. Aucun pH inférieur à 5,5 n'a été relevé.

Ces résultats sont réunis dans le tableau VI.

TABLEAU VI

pH : tableau de fréquences (en %)

pH	< 4,0	4,0 4,5	4,5 5,0	5,0 5,5	5,5 6,0	6,0 6,5	6,5 7,0	> 7,0
Loserigue	4,8	10,4	27,2	31,2	14,4	6,4	5,6	0
Amitioro BD	0	0	7,5	16,4	19,4	26,9	21,6	8,2
Amitioro BC	0	0	0	0	6,8	41,1	39,0	13,0

Eh

La plus grande partie des mesures de potentiel d'oxydo-réduction sont comprises entre 450 mv+ et 650 mv+. Dans les eaux de pluie du bassin du Loserigue, toutes les valeurs sont situées à l'intérieur de ces limites. Dans les eaux de pluie du bassin de l'Amitioro, aussi bien sous couvert forestier qu'à découvert, le Eh peut atteindre des valeurs plus faibles, certaines d'entre elles atteignant 350 mv+ (fig. 6). La variabilité des valeurs du Eh est liée à celle des valeurs du pH.

Remarques

— Les mesures indiquent que le pH des eaux de pluie évolue entre une acidité marquée et une faible alcalinité.

— Cette acidité est plus marquée pour les pluies recueillies à la station forestière à découvert. Le bassin du Loserigue est situé à 600 km environ du bord de mer tandis que celui de l'Amitioro n'en est éloigné que de 80 km. Les mesures faites par ROUGERIE (1960) près de la côte ivoirienne fournissent des pH relativement élevés, compris entre 5,1 et 7,4. Le pH est donc décroissant de la côte vers l'intérieur conformément aux observations faites par GAMBELL et FISHER (1966) en Amérique. Ceci peut provenir du fait que dans le sud les précipitations lessivent davantage de sels appartenant à des aérosols d'origine marine. Les teneurs médianes en chlorure sont en effet de 1,15 mg/l dans les pluies de l'Amitioro alors qu'elles ne sont plus qu'inférieures à 0,5 mg/l au nord (MATHIEU et MONNET 1970). Parallèlement, on note une sensible décroissance des concentrations en sulfate (0,78 mg/l sur l'Amitioro contre 0,56 mg/l sur le Loserigue).

— En plus de l'influence marine expliquant en partie les plus fortes teneurs observées dans les pluies tombant sur la partie sud, forestière, de la Côte d'Ivoire, d'autres facteurs d'ordre biologique semblent devoir intervenir. L'activité métabolique étant plus active en milieu forestier qu'en savane il est possible que le soufre qui joue un rôle important dans le métabolisme végétal soit fourni en plus grande quantité à l'atmosphère. GORHAM (1957) constate en Grande Bretagne de plus fortes concentrations en sulfate au printemps quand le métabolisme biologique est le plus actif. Par ailleurs, la pollution de l'atmosphère par des matières organiques est plus élevée en milieu forestier qu'en savane.

— Sous la voûte forestière, les pH sont voisins de la neutralité. Les eaux de pluie, milieu non tamponné, évoluent très rapidement au moindre contact et le pH augmente presque instantanément même si l'apport ionique est réduit.

— Mais nous n'avons pris en considération que les eaux de pluie traversant la voûte forestière. Or, une partie de ces eaux arrive au sol en ruisselant le long des troncs. Les travaux de POZDNIJAKOV (1956) sous forêts de mélèzes, de pins et de bouleaux en URSS montrent que ces eaux sont plus acides (3,6 à 4,7) particulièrement lorsque le ruissellement s'effectue le long de troncs secs. Par contre, les précipitations qui arrivent au sol après avoir simplement traversé la voûte ne sont que faiblement acides (5,8 à

6,4). L'auteur fait remarquer que même si les teneurs en acides de ces eaux ne sont pas élevées, la quantité totale d'acide arrivant au sol forestier par les pluies, compte tenu de la hauteur totale de précipitations n'est pas négligeable.

— Pour des eaux de pluie pures en éléments minéraux (station du Loserigue), il existe une bonne corrélation entre pH et résistivité ($r = +0,83$, $n = 164$) (fig. 7). Par contre, dès que les pluies sont sensiblement plus chargées (station de l'Amitioro), pH et résistivité ne sont plus corrélés : $r = +0,28$ à dé-

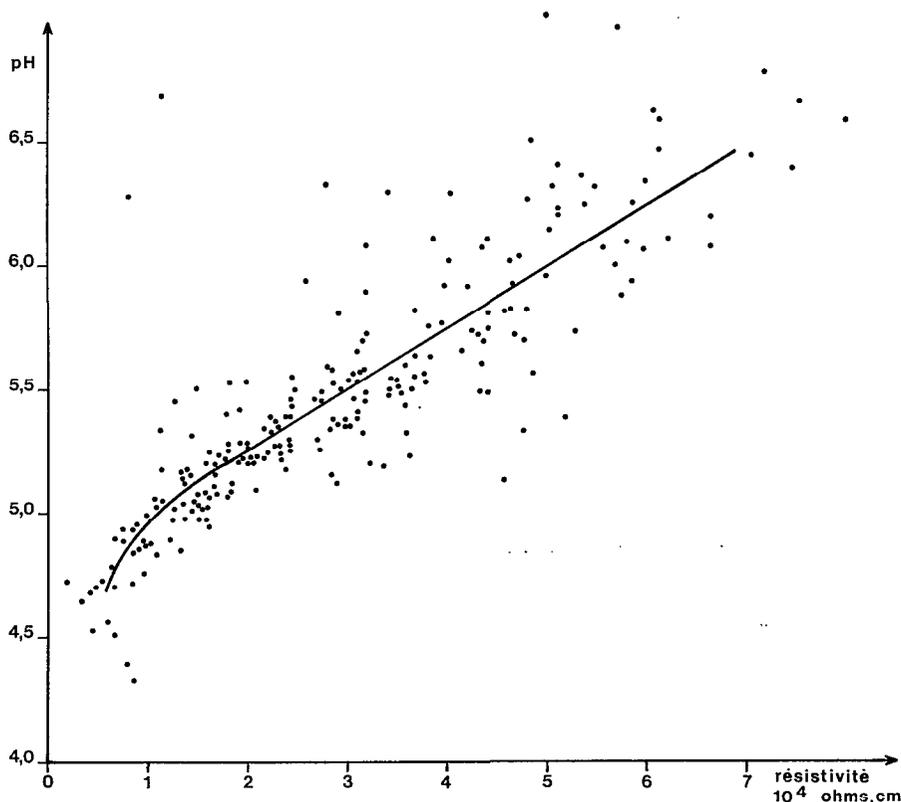


FIG. 7. — Eau de pluie sur le bassin du Loserigue : relation pH - résistivité.

couvert et $r = +0,15$ sous la voûte forestière. Dans le premier cas, les deux paramètres dépendent de la concentration des ions H^+ qui est elle-même fonction de la solubilisation du CO_2 atmosphérique. Dans le second cas où les eaux sont plus chargées, le pH évolue dans le sens d'une alcalinité croissante tandis que la résistivité diminue en fonction de l'augmentation de la charge.

— Dans les pluies du bassin forestier de l'Amitioro, le sulfate qui domine la composition chimique aussi bien à découvert que sous couvert, est en relation avec la résistivité (fig. 8). Sous couvert, il existe également une bonne relation entre résistivité et potassium qui est abondant dans les eaux traversant la voûte (fig. 9).

Variations des paramètres physico-chimiques pendant l'averse

Les variations du pH et du Eh pendant l'averse peuvent être importantes. BAAS BECKING et al. (1960) trouvent d'importantes variations dans les pluies, de l'ordre de deux unités pH, en cours d'activité orageuse. Par contre, en période de calme atmosphérique, les valeurs sont plus uniformes.

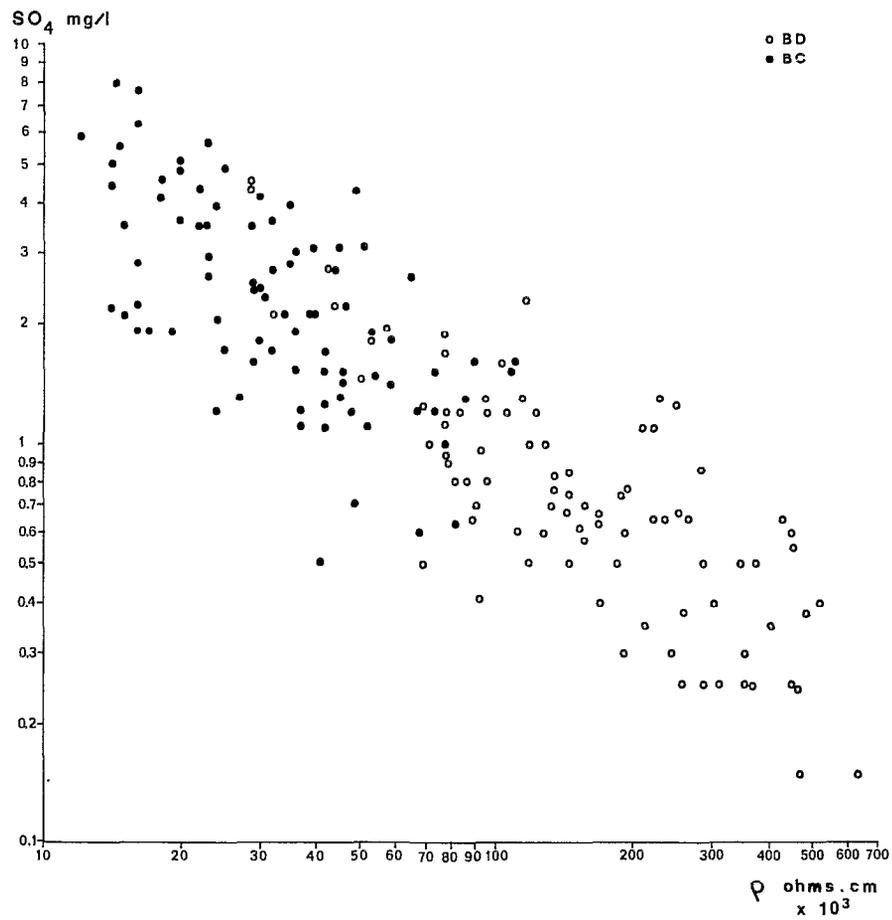


FIG. 8. — Relation résistivité - sulfate ; Amitiuro, 1965.

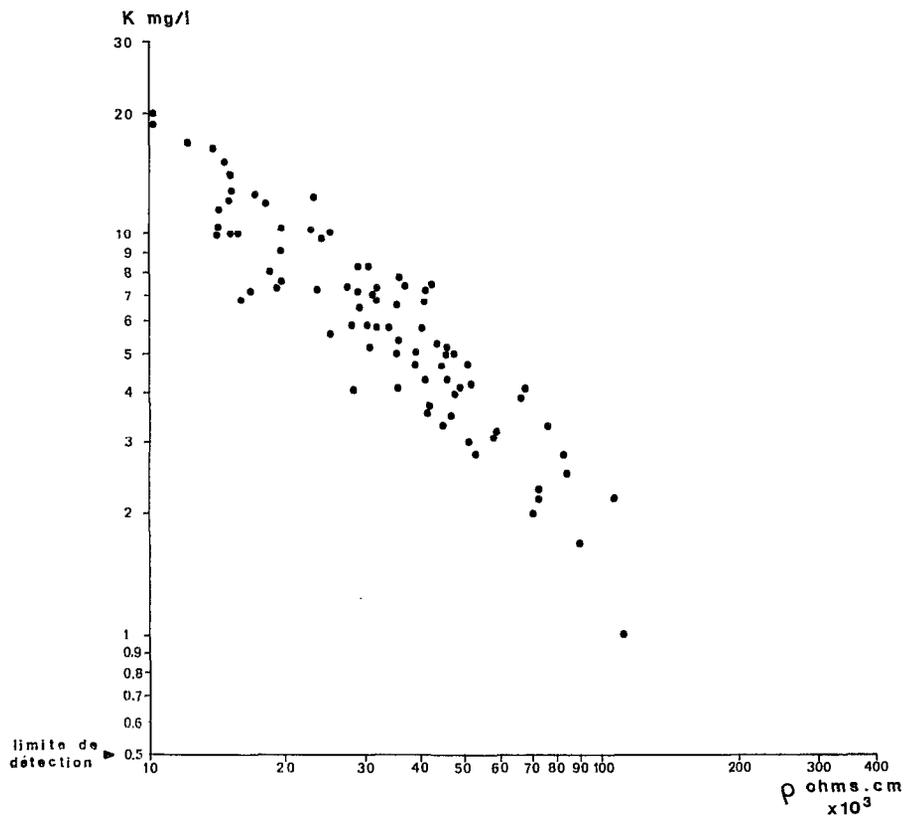


FIG. 9. — Relation résistivité - potassium ; Amitiuro, 1965.

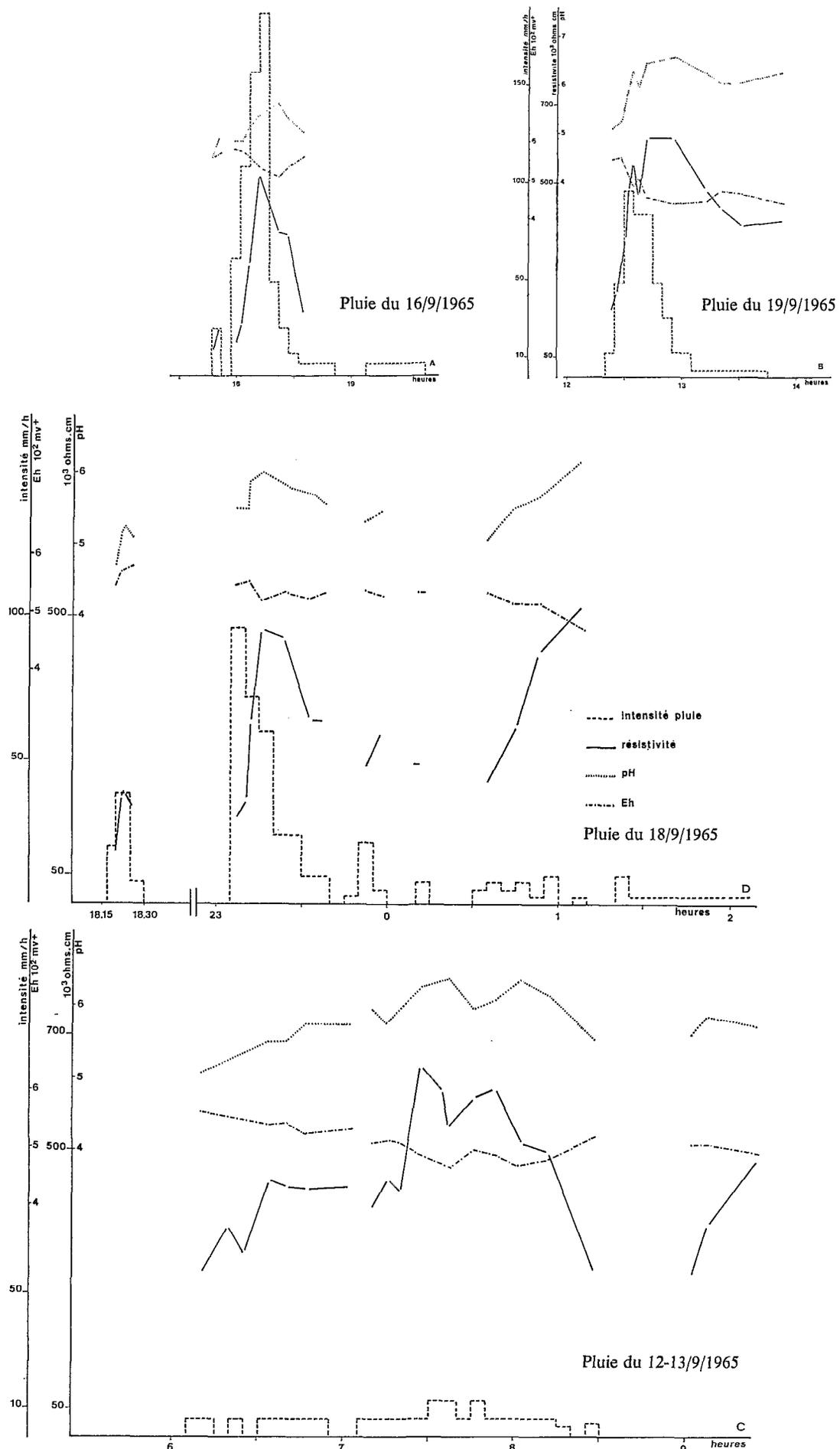
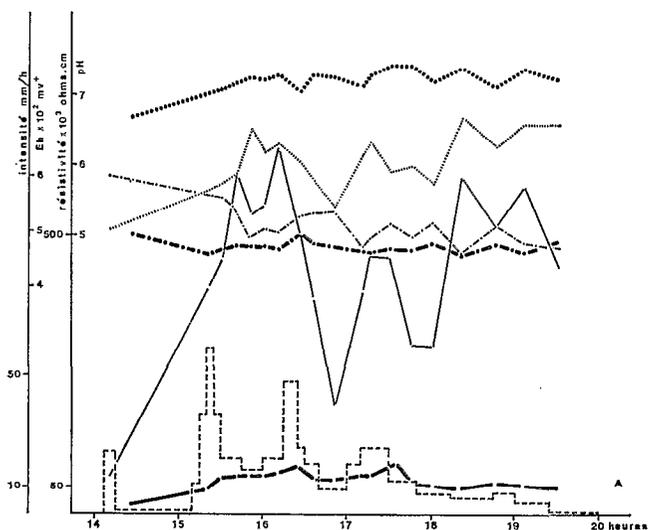
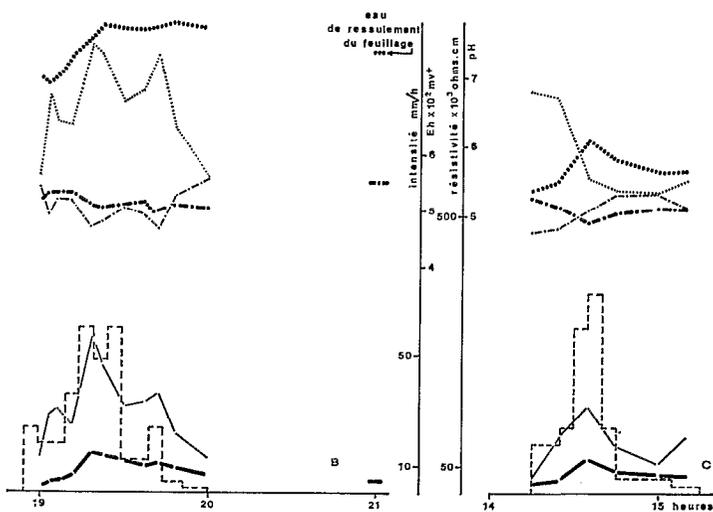


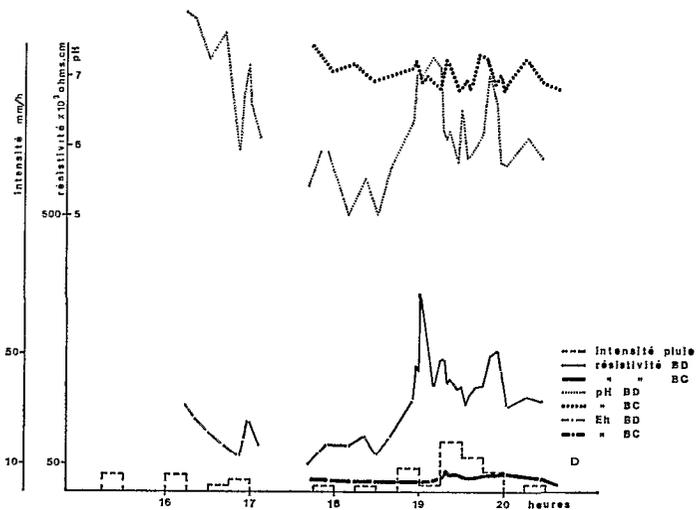
FIG. 10. — Bassin du Loserigue ; variations de la résistivité du pH et du Eh pendant la pluie. A et B : pluies à forte intensité ; C : Pluie à faible intensité ; D : pluie à forte et faible intensité.



A : Pluie du 13/6/1965



B : Pluie du 27/7/1966
C : Pluie du 9/5/1966



D : Pluie du 26/9/1966

FIG. 11. — Bassin de l'Amitioro ; variations de la résistivité, du pH et du Eh pendant la pluie (BD : bac à découvert, BC : bac sous couvert forestier).

Les nombreuses mesures de pH et de Eh faites en continu pendant les averses montrent parfois des variations de plus de une unité pH en quelques minutes, mais elles sont généralement plus faibles. Le Eh varie généralement en sens inverse du pH.

Dans les pluies de la station du Loserigue, les variations du pH et de la résistivité se font dans le même sens (fig. 10). A la station de l'Amitioro elles peuvent être inverses en particulier en début d'averse où les eaux sont généralement plus chargées.

A la station du Loserigue, les variations de la résistivité dépendent du type de précipitation, caractérisé par les facteurs intensité et temps. La majeure partie des pluies correspondent à des tornades. Dans ce cas, la résistivité augmente et décroît dans le même sens que l'intensité de la pluie.

Or les charges en éléments minéraux de ces pluies sont très faibles même en début d'averse. Pour interpréter les variations de la résistivité, il faut faire intervenir la teneur en gaz carbonique dissous. En effet, les valeurs de la résistivité sont d'autant plus faibles que la teneur en ions H^+ sera plus importante. Ceci se trouve confirmé par les valeurs du pH correspondantes, plus acides, pour des teneurs en gaz carbonique dissous plus élevées. La diminution des concentrations en CO_2 au fur et à mesure que la pluie tombe a été observée par PONCELLET (1964) qui trouve 50 mg/l de CO_2 au début et 7 mg/l à la fin d'une pluie de longue durée.

Dans le cas de pluies de plus longue durée et d'intensité plus faible (type pluie de mousson), les variations du pH et de la résistivité sont irrégulières, à l'image de celles de l'intensité.

A la station de l'Amitioro (fig. 11) les intensités sont généralement plus faibles qu'en savane. Cependant, les résistivités sont plus élevées au maximum d'intensité. Dans les pluies recueillies sous couvert, les variations sont identiques bien que les eaux soient plus chargées.

Variations saisonnières des paramètres physico-chimiques

Si les variations saisonnières n'apparaissent pas nettement à la station du Loserigue, les pluies de début de saison en zone forestière ont des résistivités plus faibles. Les pH montrent aux deux stations à découvert une assez grande irrégularité annuelle. Sous couvert forestier, ils tendent à être plus acides pendant les pluies de saison sèche (fig. 12).

En fait, sous la voûte forestière, les variations saisonnières dépendent davantage de la durée de la période de sécheresse précédant l'averse. C'est ainsi que, par exemple, les eaux prélevées au début de la pluie du 3 mars 1965 contiennent 40,8 mg/l d'éléments dissous après lessivage de la voûte forestière. Cette pluie survient après 15 jours de sécheresse. Au début de la pluie du 16 septembre 1965 qui succède à la petite saison sèche de fin août début septembre, les concentrations en éléments minéraux atteignent 45 mg/l. La pluie du 2 février 1966 qui tombe après deux mois de sécheresse est exceptionnellement chargée. En début d'averse, les concentrations sont de 110 mg/l sous forêt (alors qu'au même moment, l'eau de pluie recueillie en clairière ne contient que 7 mg/l d'éléments dissous). Une heure après, les concentrations ne sont plus que de 33 mg/l. Ces chiffres traduisent l'importance de l'apport atmosphérique par dépôt « à sec » sur les feuilles en périodes de sécheresse ainsi que du lessivage de l'atmosphère et des feuillages par les pluies pendant la saison.

Sur le bassin du Loserigue, les variations saisonnières du pH qui suivent celles de la résistivité, tiennent davantage à la répartition pluviométrique et les pH les plus bas sont observables au début des périodes pluvieuses.

CONCLUSIONS

L'eau de pluie considérée d'un point de vue physico-chimique, n'est pas un milieu stable. On observe qu'elle peut changer rapidement de caractéristiques et ces dernières ne sont représentatives que

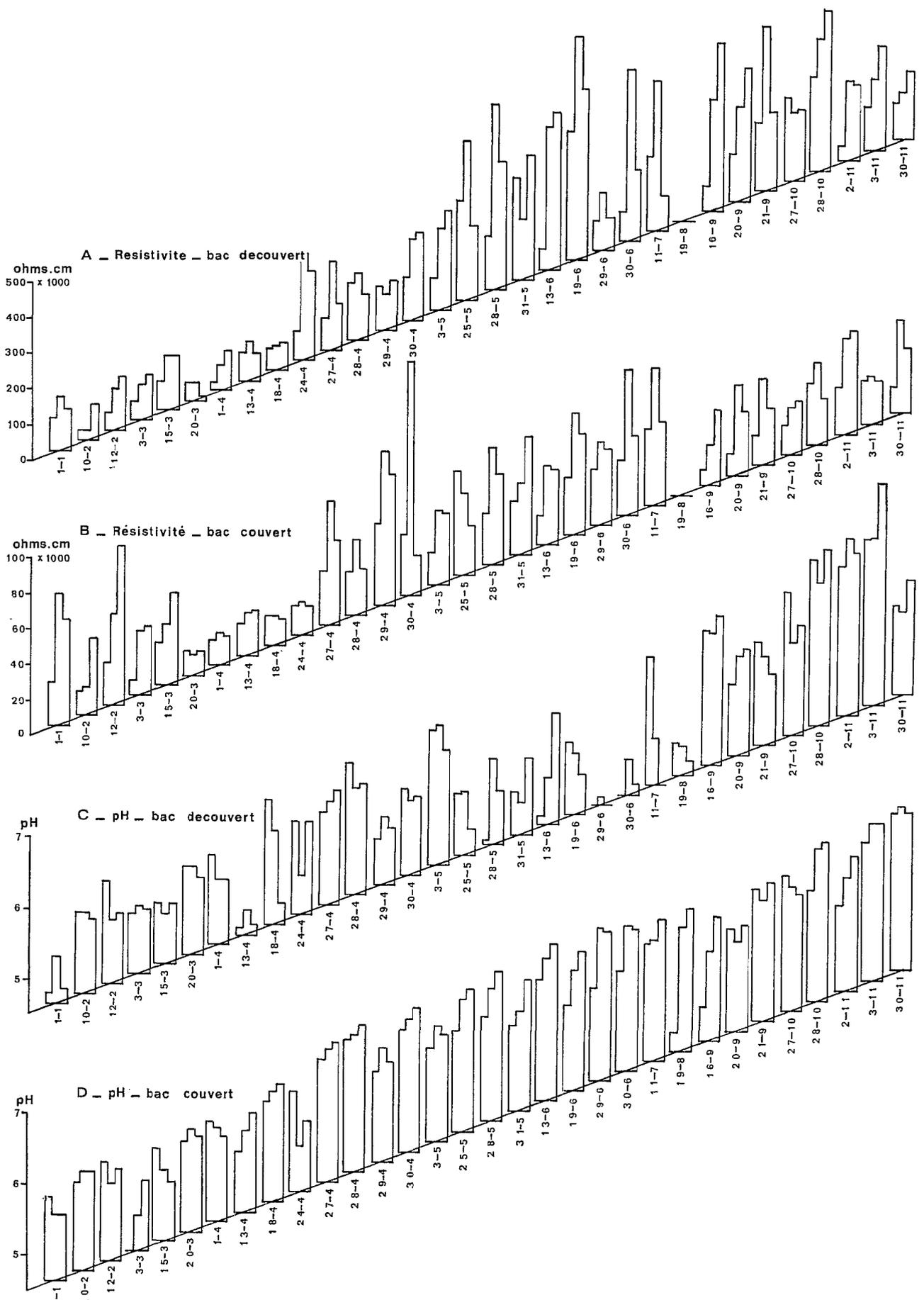


FIG. 12. — Bassin de l'Amitiro, 1965 ; variations saisonnières de la résistivité et du pH.

d'un état du milieu à un moment donné. Si l'on fait des mesures rapprochées de pH et de potentiel d'oxydo-réduction sur un même échantillon, les valeurs obtenues diffèrent généralement les unes des autres de façon notable. C'est la raison pour laquelle les mesures ont toujours été faites dans les mêmes conditions, immédiatement après la chute. Par ailleurs, les variations importantes de la nature physico-chimique observées pendant la durée de l'averse grâce à des mesures nombreuses et rapprochées prouvent qu'une pluie ne peut être caractérisée par un seul prélèvement.

Cette réserve faite, l'eau de pluie qui arrive au sol est un milieu oxydant ($350 < E_h < 650$ mv+), évoluant entre une acidité marquée et une faible alcalinité. L'influence de l'environnement apparaît comme primordiale et nous avons pu constater une sensible différence dans la nature physico-chimique du milieu entre les deux stations. A la station sud, forestière, plus rapprochée de l'influence marine, les eaux subissent un enrichissement en éléments minéraux par les aérosols d'origine marine plus abondants dans cette zone d'une part et du fait de la pollution organique de l'atmosphère par l'abondante végétation forestière d'autre part. A la station nord, couverte de savanes et plus éloignée du bord de mer, les contaminations naturelles sont beaucoup moins importantes.

De plus, pour les pluies qui traversent la voûte forestière, l'influence de cette dernière et les interactions entre l'atmosphère et le couvert végétal qui agit comme capteur d'éléments minéraux modifient considérablement les eaux de pluie qui constituent alors une source d'apport en solution très importante pour les sols et les eaux de ruissellement forestiers (MATHIEU, 1971). C'est une des causes possibles qui permettent d'établir une distinction entre la composition des eaux qui s'écoulent de la savane et celle des eaux qui proviennent des bassins forestiers (LENOIR, 1971).

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDER (F.E.S.), 1958. — Observations on tropical weathering (reply to discussion). *Proc. Geol. Soc.*, London, 1563, p. 117.
- BAAS BECKING (L.G.M.), KAPLAN (I.R.) et MOORE (D.), 1960. — Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation reduction potentials. *Jour. Géol.*, 68, 3, pp. 243-284.
- BARRETT (E.) et BRODIN (G.), 1955. — The acidity of Scandinavian precipitation. *Tellus*, VII, 2, pp. 251-257.
- BIROT (P.), 1949. — Essai sur quelques problèmes de morphologie générale. *Inst. Para a alta cultura*, Lisbonne, 176 p.
- CAPUS (C.), 1914. — La valeur économique des pluies tropicales. *Ann. Geogr.*, 128, pp. 109-120.
- CAUER (H.), 1938. — Einiges über den Einfluss des Meeres auf den Chemismus der Luft. *Balneologie*, 5, pp. 409-415.
- DOMMERMUES (Y.), 1963. — Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. *Rev. Bois et forêts des tropiques*, 87, pp. 9-25.
- EGNÉR (H.) et ERIKSSON (E.), 1955. — Current data on the chemical composition of air and precipitation. *Tellus*, 7, pp. 134-139 ; *Tellus*, 8, pp. 285-517.
- ERIKSSON (E.), 1952. — Composition of atmospheric precipitation. I. Nitrogen compounds. *Tellus*, 4, pp. 215-232. II. Sulphur, chloride, iodine compounds. *Tellus*, 4, pp. 280-303.
- ERIKSSON (E.), 1955. — Air borne salts and the chemical composition of river waters. *Tellus*, VII, 2, pp. 243-250.
- ERIKSSON (E.), 1958. — The chemical climate and saline soils in the arid zone. *Arid zone Research*, X, climatology, Reviews of Research, Canberra Symposium Proc., (UNESCO), pp. 147-180.

- FLEETWOOD (A.), 1969. — The chemical composition of the precipitation and surface water and its relation to evaporation on Björnöya Island Norway. *Tellus*, XXI, I, pp. 113-126.
- FREISE (F.W.), 1938. — Inselberge and Inseilberge-landschaften in Granit and Gneissgebiete Brasiliens. *Zeit für Geomorph.*, pp. 137-168.
- GAMBELL (A.W.) et FISHER (D.W.), 1966. — Chemical composition of rainfall eastern north Carolina and South eastern Virginia. *Geol. Surv. Water Supply Paper*, 1535-K, pp. K1-K 41.
- GARRELS (R.M.), 1960. — Mineral equilibria. Harper and Row, New-York, p. 254.
- GORHAM (E.), 1955. — On the acidity and salinity of rain. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 7, pp. 231-239.
- GORHAM (E.), 1957. — The chemical composition of rain from Rosscahill in county Galway. *The Irish Naturalist's jour.*, XII, pp. 122-126.
- GORHAM (E.), 1958a. — Free acid in British soils. *Nature*, 181, p. 106.
- GORHAM (E.), 1958b. — Atmospheric pollution by hydrochloric acid. *Roy. Meteorol. Soc. Quart. Jour.*, 84, p. 274-276.
- HERMAN (F.A.) et GORHAM (E.), 1957. — Total mineral material, Acidity, sulphur and nitrogen in rains and snow at Kentville, Nova Scotia. *Tellus*, IX, 2, pp. 180-183.
- JOUIS (E.), 1967. — Les apports en soufre et de quelques autres éléments par les pluies sur le N.E. de la Seine-Maritime. *Rev. Soc. Sav. Haute Normandie. Sci.* 45, pp. 25-36.
- KONOVALOV (G.S.) et KOLESNIKOVA (T.K.H.), 1969. — Eléments traces dans les précipitations atmosphériques de la région du réservoir d'Otkaznoe. *Gidrokhim. Mater.*, SSSR, 49, pp. 74-79. (en russe).
- KRAUSKOPF (K.B.), 1967. — Introduction to geochemistry. Mc Graw-Hill Book Co., 721 p.
- LENOIR (F.), 1971. — A propos de la répartition saisonnière des éléments transportés en solution dans un fleuve de la zone intertropicale (le Bandama, Côte d'Ivoire). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 273, pp. 34-36.
- MANGIN (J.-Ph.), LECOLLE (J.), MATHIEU (Ph.), MONNET (C.), PINTA (M.) et SIRCOULON (J.), 1966. — Géochimie des eaux naturelles ; le transport en solution par un fleuve de Côte d'Ivoire. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 262, pp. 2204-2206.
- MATHIEU (Ph.), 1971. — Apports chimiques par les eaux de pluie et action des eaux de ruissellement en milieu forestier tropical (Côte d'Ivoire). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 273, pp. 45-48.
- MATHIEU (Ph.) et MONNET (C.), 1970. — Apports chimiques par les eaux de pluie en savane et sous forêt en climat intertropical (Côte d'Ivoire). *Rapp. ORSTOM, multigr.*, 153 p., 80 fig. ; annexe, 61 fig., 45 tableaux.
- MICHARD (G.), 1967. — Signification du potentiel redox dans les eaux naturelles. *Mineralium deposita*, 2, pp. 34-36.
- MOHR (E.C.J.), 1944. — The soils of equatorial regions, with special reference to Netherlands East Indies. *Ann. Arbor. Michigan*, 766 p.
- MOUREAUX (C.), 1954. — Quelques aspects microbiologiques de divers sols du cristallin central de Madagascar. *Congr. Int. Sci. Sol, Léopoldville*, III, pp. 67-70.
- PONCELLET (L.), 1964. — L'eau et la météorologie. In « le livre de l'eau », CEDEBEAU, vol. I, pp. 136-183.
- POUQUET (J.), 1956. — La pluie et ses effets. *Ann. Fac. Lettres. d'Aix*, XXX, pp. 97-115.
- POZDNYAKOV (L.K.), 1965 — Sur le rôle des précipitations pénétrant sous la couverture de la forêt dans le processus de l'échange des substances entre la forêt et le sol. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 107, 5, pp. 753-756, (en russe).
- ROBBINS (R.L.), CADLE (R.D.) et ECKARDT (D.L.), 1959. — The conversion of sodium chloride to hydrogen chloride in the atmosphere. *Jour. meteorol.*, 16, pp. 53-56.
- ROUGERIE (G.), 1958. — Acidité des eaux en milieu tropical. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 246, pp. 447-449.
- ROUGERIE (G.), 1960. — Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière. *Mém. IFAN*, Dakar, 58, 542 p.
- SCHÖLLER (H.), 1962. — Les eaux souterraines. Masson, Paris, 642 p.
- SULEJMANOV (D.M.) et LISTENGARTEN (V.A.), 1966. — Sur la composition chimique des précipitations atmosphériques de la presqu'île d'Apsheron. *Dokl. Akad. Nauk. Azerbajdzhan, SSSR*, 22, 12, pp. 42-44, (en russe).
- TAMM (C.O.) et TRÆDSSON (R.), 1955. — An example of the amounts of plant nutrients supplied to the ground in road dust. *Oikos*, VI, pp. 61-70.
- VISSER (S.), 1961. — Chemical composition of rain water in kampala, Uganda and its relation to meteorological and topographical conditions. *Jour. Geophys. Res.*, 66, pp. 3759-3765.