

Physico-chimie des précipitations en milieu forestier sud-camerounais

L. SIGHA-NKAMDJOU¹, D. ORANGE², D. SIGHOMNOU¹, P. SEYLER³, P. NIA¹, E. NAAH⁴

1. Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) BP 4110 Yaoundé, Cameroun
2. ORSTOM, BP 2528 Bamako, Mali
3. CENA, Université de Sao Paulo, BP 96 CEP 13416-00, Piracicaba, Brésil
4. Bureau Régional de l'UNESCO, BP 30592 Nairobi, Kénia

Résumé. L'étude des apports atmosphériques en milieu forestier sud-camerounais (suivant un transect ouest-est) est menée depuis 1989 par le Centre de Recherches Hydrologiques du Cameroun et l'ORSTOM dans le cadre du Programme d'Etude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI) de l'ORSTOM-INSU-CNRS. Les résultats d'analyse chimique des eaux pluviales, prélevées à partir des pluviomètres à lectures directes en plexiglas, ont permis d'établir des bilans géochimiques à l'exutoire des bassins versants. Le suivi spatio-temporel des apports atmosphériques depuis l'océan Atlantique jusqu'à la frontière camerouno-centrafricaine a contribué non seulement à une meilleure connaissance de leur qualité chimique, mais aussi à différencier les sources des éléments, de même qu'à déterminer leurs impacts environnementaux. Ainsi, les teneurs en chlore et en sodium décroissent de Kribi vers Yokadouma-Moloundou, soulignant leur origine marine tandis que celles de potassium, calcium, magnésium et sulfates augmentent, indiquant ainsi d'autres sources (terrigenes, biogéniques et anthropiques éventuellement). Les mesures de pH effectuées sur les pluies collectées à Zoétélé (Nsimi) en 1996 à l'aide d'un préleveur à ouverture automatique montrent que les pluies en milieu forestier sud-camerounais sont à tendance acide (pH moyen = 4,9), acidité imputable principalement aux acides formique (13 %) et acétique (6 %) qui représentent environ 20 % de la charge totale dissoute. Les premières conclusions de ce travail ont ouvert de nouveaux axes de recherche, notamment l'étude des gaz et des aérosols, suite à l'intégration du site de Zoétélé dans le réseau IGAC (International Global Atmospheric Chemistry)/DEBITS (Deposition of Biogeochemically Important Trace Species)-Africa (IDAF).

INTRODUCTION

Depuis le début du siècle, les paramètres climatiques et particulièrement la pluviométrie sont observés dans plusieurs localités du Cameroun. Si les hauteurs de précipitations sont assez bien mesurées et connues, il n'en est pas de même pour leur composition chimique. Celle-ci est pourtant au centre des préoccupations des recherches sur l'environnement en Afrique tropicale depuis bientôt deux décennies. Les travaux de Crozat (1978), Delmas (1980), Servant *et al.* (1987), Lacaux *et al.* (1987), Yoboue (1991) réalisés sur les pluies de Côte d'Ivoire et plus récemment ceux de Kouadio (1991), Lefeuvre (1991), Lacaux *et al.* (1992) sur les pluies du Congo ont montré que la forêt tropicale émet des composés azotés et soufrés ainsi que des acides organiques pouvant contribuer à la modification de la composition chimique de l'atmosphère et à l'acidification naturelle des pluies. Les variations climatiques et des transformations écologiques opérées au sein de nos écosystèmes semblent être les conséquences de ces modifications. De plus, l'eau de pluie est consommée en l'état par les populations des zones rurales et même urbaines de l'Afrique Centrale. Pour ce qui est du Cameroun, les études sur la qualité des eaux pluviales seraient limitées à celles de Kling (1987) réalisées dans le cadre du suivi des caractéristiques physico-chimiques des lacs.

Depuis les conférences de Dublin et de Rio sur l'environnement, la connaissance de la qualité des apports atmosphériques est l'une des préoccupations majeures des communautés scientifiques. Dans le cadre du Programme d'Etude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI) de l'ORSTOM-INSU-CNRS, opération Grands Bassins Fluviaux (GBF) du Congo/Zaïre, volet entité amont strictement forestière (système Dja-Ngoko), nous avons intégré dès 1989 la physico-chimie des précipitations non seulement pour l'établissement des bilans géochimiques, mais aussi dans le souci d'apporter une contribution à la connaissance de la chimie des apports météoriques en zone forestière sud-camerounaise. En raison du fait que la thématique de GBF/PEGI était axée essentiellement sur les bilans géochimiques à l'exutoire des bassins versants, l'échantillonnage des eaux de pluie à ces fins a été effectué à partir du réseau de pluviomètres (en plexiglas) à lectures directes ouverts en permanence. Les échantillons ainsi collectés sont alors un mélange de dépôts



secs et humides ou pluie " brute ". Les résultats des trois campagnes de mesures ont fait l'objet des publications (Seyler *et al.*, 1993 ; Sigha-Nkamdjou, 1994 ; Sigha-Nkamdjou *et al.*, 1995).

Par la suite, à l'issue du colloque PEGI de novembre 1993 à Paris, il a été décidé de compléter nos connaissances sur la qualité des apports atmosphériques par la mise en place d'un réseau de suivi des apports atmosphériques en Afrique Centrale suivant un axe SW-NE, depuis l'océan Atlantique (Cameroun) jusqu'au nord de la République Centrafricaine. L'intérêt de ce transect était de couvrir l'ensemble des biotopes caractéristiques du continent africain : la forêt tropicale, la savane humide puis la savane sèche. Outre les bilans géochimiques, ce réseau visait à suivre la variabilité spatio-temporelle des espèces chimiques des précipitations, à déterminer leurs origines et leurs impacts environnementaux. Le protocole d'échantillonnage ci-dessus a été couplé à un second basé sur la collecte des pluies dans des sacs de congélation en plastique. Ce réseau a été mis en place et suivi en 1994/95 (Orange et Sigha-Nkamdjou, 1994 ; Orange et Sigha-Nkamdjou, 1995 ; Sigha-Nkamdjou, 1995).

Lors du séminaire IGAC/DEBITS (International Global Atmospheric Chemistry/Deposition of Biogeochemically Important Trace Species) de décembre 1994 à Yamoussoukrou, le site de Zoétélé (Nsimi) avait été proposé pour le réseau IDAF (IGAC/DEBITS Africa). Il a été retenu comme observatoire de l'écosystème forestier peu anthropisé d'Afrique Centrale. Dans cette optique, le site de Zoétélé a été équipé d'un échantillonneur automatique des eaux pluviales dès juillet 1995. Les échantillons collectés devront être rapidement congelés afin d'inhiber la dégradation des acides organiques et les activités biologiques. L'intérêt du réseau IDAF est, en plus du suivi spatio-temporel de l'évolution de la chimie atmosphérique, la compréhension des processus naturels et anthropogéniques qui la commandent. Au niveau local, les résultats constitueront le signal d'entrée des éléments dans le bassin élémentaire de Mengong à Nsimi et des indicateurs pour envisager un éventuel traitement des eaux pluviales dans les zones où les eaux superficielles ou souterraines propres à la consommation sont quasiment inexistantes.

SITES D'OBSERVATION ET METHODES DE MESURE

La zone étudiée dans cet article est délimitée par les latitudes 01°30' et 05° nord et les longitudes 10°20' et 15°50' est. Les échantillons des précipitations utilisés pour l'étude des GBF au Cameroun ont été effectués sur 15 sites répartis suivant un transect ouest-est (Kribi-Moloundou) dans la bande méridionale du plateau sud-camerounais, auxquels s'est ajouté un peu plus tard le site de Zoétélé (Nsimi) suite à la démarche décrite ci-dessous (fig. 1). En accord avec la thématique de PEGI portée principalement sur l'établissement des bilans géochimiques à l'exutoire des bassins versants, les analyses ont été effectuées sur un aliquote de 250 ml issu du cumul mensuel de dépôts secs et humides collectés à l'aide des pluviomètres en plexiglas.

Afin de mieux connaître la qualité des apports météoriques en Afrique Centrale, en juin 1994, on a étendu ce réseau jusqu'au nord-est de la République Centrafricaine. En RCA, ce dernier est constitué de 12 stations situées entre les latitudes 03° et 08°30' N, de la forêt à la savane sèche (ils ne feront pas l'objet de nos propos). En plus du pluviomètre à lectures directes (PLD), certaines stations ont été équipées d'un préleveur manuel (nommé ESA_S). Inspiré du modèle à ouverture (225 cm²) automatique utilisé dans le programme DECAFE (Dynamique Et Chimie de l'Atmosphère en Forêt Equatoriale), il a été conçu et fabriqué sur place pour l'échantillonnage des précipitations. Ce préleveur a un double avantage : répondre aux précautions à prendre pour éviter toute contamination lors de la collecte des eaux pluviales et pallier aux contraintes financières. Il permet de collecter uniquement les dépôts humides suivant le protocole décrit sur la figure 2. Son principal inconvénient est de nécessiter la présence d'un opérateur au début et à la fin de la pluie. L'année suivante, dans certains sites dont Zoétélé/Nsimi, le préleveur ESA_S a été remplacé par l'échantillonneur à ouverture automatique modèle DECAFE (nommé ESA_A). Alimenté en électricité par pile, ce dernier présente l'avantage de s'ouvrir automatiquement dès la chute des premières gouttes de pluie ; ainsi et à l'inverse du collecteur

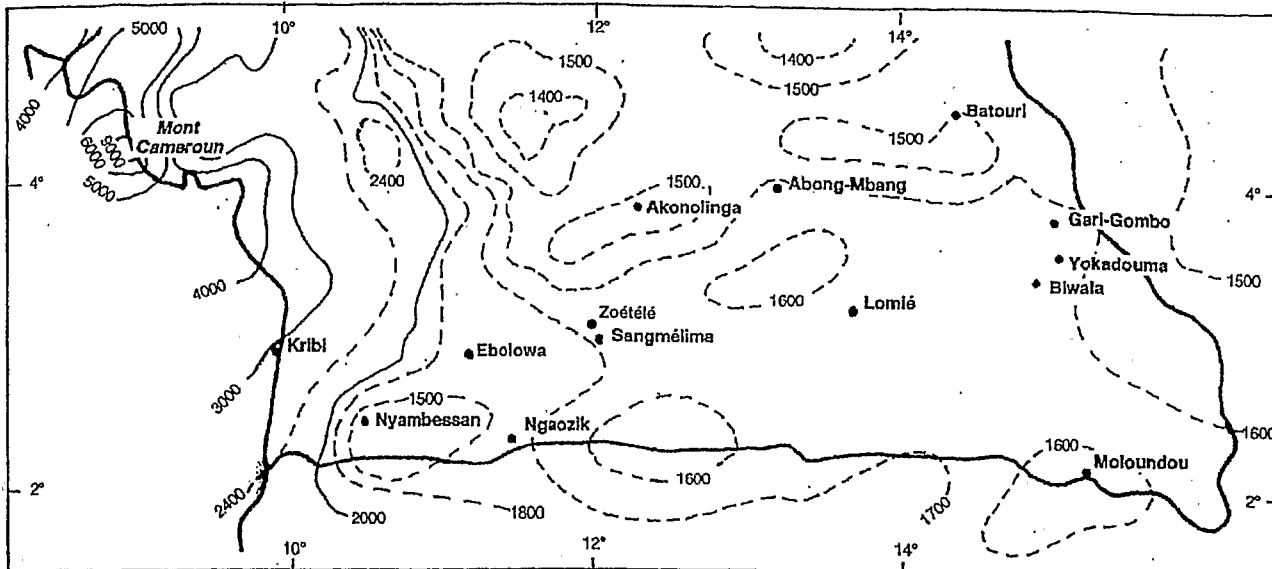
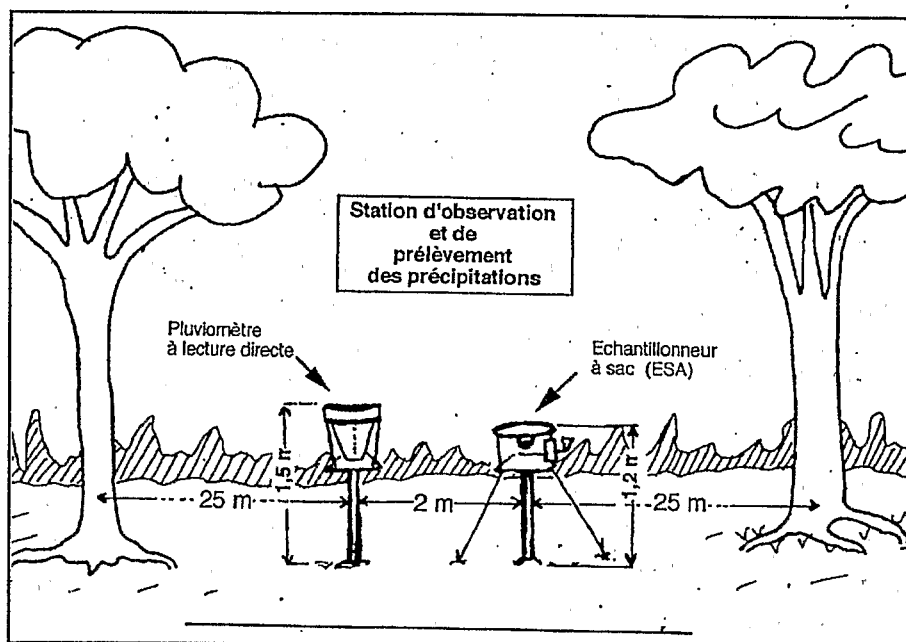


Figure 1. Isohyètes annuelles et sites d'échantillonnage



PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE

Quand une pluie commence (averse, orage)

1. Noter l'heure du début de la pluie
2. Mettre le sac dans le culot de bouteille en le poussant de l'extérieur vers le fond
3. Placer l'ensemble bouteille-sac sur le support ESA
4. Ouvrir le plastique et retourner les bords sur le support métallique (anneau) supérieur
5. Fixer le plastique sur les montants métalliques verticaux à l'aide des pinces à linge
6. Noter l'heure de pose de l'ensemble bouteille-sac

A la fin de la pluie

7. Fermer le sac en plastique en y faisant un nœud
8. Retirer l'ensemble bouteille-sac en plastique-eau du support
9. Noter l'heure de la fin de la pluie et du retrait de cet ensemble

Figure 2. Station type et protocole d'échantillonnage des précipitations

manuel, il recueille toutes les substances provenant du lessivage de l'atmosphère. Afin d'éviter toute contamination de l'eau recueillie, sa fermeture nécessite aussi l'intervention d'un opérateur dès la fin de la pluie. Un aliquote de 200 cm³ est congelé aussitôt après le prélèvement afin d'inhiber l'activité biologique et la dégradation des composés azotés et des acides organiques. Pour des raisons identiques et lorsque le volume d'eau recueilli est important, un aliquote de 100 cm³ est conditionné avec 30 mg de thymol qui est un puissant biocide.

L'analyse chimique des précipitations est effectuée au Laboratoire des Formations Superficielles (LFS) de l'ORSTOM/Bondy et au Laboratoire d'Aérodologie de l'Observatoire Midi Pyrénées (OMP) de Toulouse par chromatographie ionique, de type DIONEX. Les échantillons sont filtrés lors de l'injection d'un volume de 50 µl au moyen d'une seringue sur un filtre jetable de 0,22 µm de porosité.

ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE ET PHYTOGEOGRAPHIQUE

La zone d'étude est entièrement située dans le domaine camerounais de forêt équatoriale dense humide ou *moist forest*. La répartition des climats y résulte globalement de la circulation des masses d'air atmosphériques qui se fait de l'équateur vers les pôles et vice-versa, sous l'impulsion des vents appelés alizés. Elle est gouvernée par deux zones de hautes pressions :

i) l'anticyclone de Sainte-Hélène situé au SW de l'Afrique dans le Golfe de Guinée qui est à l'origine de flux de mousson générateur de précipitations ,

ii) l'anticyclone des Açores situé au NE de l'Afrique qui génère l'harmattan et est responsable de la saison sèche.

La limite entre les deux masses d'air appelée Equateur Météorologique est connue sous la dénomination de Front intertropical (FIT) ou encore Zone Intertropicale de Convergence (ZITC). Au cours d'une année, le FIT occupe deux positions majeures (fig.3) :

i) entre le 04 et le 05° de latitude nord en janvier-février. La saison sèche s'installe alors dans la région intertropicale, avec une atmosphère chargée de poussières sahariennes amenées par l'harmattan.

ii) au niveau du 20° de latitude nord en juillet-août. On enregistre alors des pluies orageuses liées à la mousson.

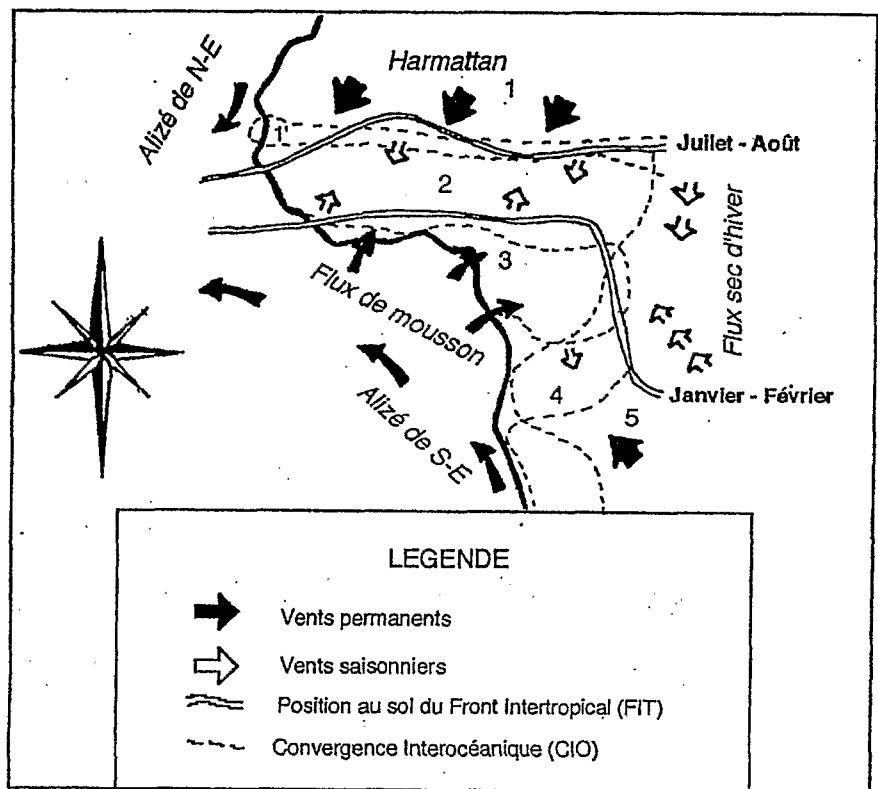


Figure 3. Schéma des principaux flux de masse d'air en Afrique de l'Ouest et centrale durant les deux situations extrêmes de l'année : janvier-février et juillet-août (d'après Mahé, 1992).

Les grandes zonations végétales sont repérées par des numéros : (1) déserts ; (1') steppes et brousses à épineux ; (2, 4 et 5) savanes herbacées et arborées ; (3) forêt dense.

En plus de cette alternance entre les deux masses d'air (mousson et harmattan), la zone d'étude subit également en partie (le bassin du fleuve Congo) l'influence des masses d'air de l'océan Indien. En effet, au mois de janvier, la discontinuité entre les flux provenant de l'océan Atlantique et de l'océan Indien ou Confluence

interocéanique (CIO), s'éloigne des bordures de la cuvette congolaise pour ne revenir qu'au mois de Juillet. On y enregistre alors de faibles pluies successivement sur les parties orientale et occidentale.

A ces masses d'air s'ajoute le recyclage de la vapeur d'eau par la végétation qui pourrait expliquer l'abondance et la régularité des pluies toute l'année dans cette zone.

La pluviosité (cf fig. 1) décroît très rapidement de la façade atlantique du Mont-Cameroun (10 000 mm à Debundscha) vers les confins du pays à l'est (1 380 mm à Moloundou) en passant par Kribi (3 000 mm). Elle diminue aussi mais de manière plus régulière de l'équateur (1 700 mm à Ambam/Ngoazik) vers la partie septentrionale du pays (800 mm).

Pour ce qui concerne l'environnement phytogéographique, comme nous l'avons signalé plus haut, la zone d'étude est entièrement située dans le domaine camerounais de forêt équatoriale dense humide ou (moist forest). Une étude de Letouzey (1986) la subdivise en forêt dense humide toujours verte et forêt atlantique de moyenne altitude.

S'agissant des caractéristiques écologiques de la forêt dense, Letouzey (*op. cit.*) note que la dégradation du milieu est limitée : villages peu peuplés et très peu actifs, activité agricole très réduite, pistes rarement carrossables, passage et séjour des chasseurs, des pêcheurs et des animaux peu mobiles tels que l'éléphant et exploitation forestière peu poussée.

La forêt atlantique de moyenne altitude, encore appelée *rain forest* de par son caractère très arrosé, est dans un état de dégradation assez avancé (exploitation forestière, défrichement aux fins des palmeraies, des cacaoyères et des plantations d'hévéa, etc...).

La présence de la forêt joue un rôle sur le mouvement des masses d'air. En empêchant tout réchauffement excessif, elle oppose un obstacle aux advections d'air sec d'origine saharienne et participe ainsi à l'élaboration de la masse d'air dite équatoriale dont l'humidité permanente facilite les ascendances et les pluies en toute saison, quelle que soit la distance par rapport à la mer (Leroux, 1983 ; cité par Suchel, 1987).

D'après Suchel (1987), dans cette région forestière, l'état hygrométrique de l'air n'est jamais éloigné de la saturation, ce qui limite l'évapotranspiration dont les valeurs plafonnent à peu près partout à 750 mm par an.

SOURCES DES APPORTS ATMOSPHERIQUES AU CAMEROUN

Les sources des émissions atmosphériques ont été inventoriées et largement décrites par Sigha-Nkamdjou *et al.* (1995). Il s'agit des :

— Sources anthropiques

Les composés atmosphériques anthropiques au Cameroun sont produits par les industries (pétrole, ciment, aluminium). A ces grosses unités s'ajoutent des manufactures plus petites et parfois informelles, le parc automobile vieillissant et les cuisines qui rejettent essentiellement les déchets d'une combustion souvent incomplète des produits pétroliers ou de la biomasse animale et végétale. L'inquiétude que suscitent ces émissions anthropiques serait négligeable si elles n'avaient pas lieu dans des écosystèmes déjà fragilisés où divers processus augmentent davantage le débit des sources naturelles que sont les formations végétales, les sols et la mer.

— Sources naturelles

Les formations végétales permanentes, constituées de 59,5 % de forêt et 40,5 % de savane couvrent environ 400 000 km². La biomasse à l'hectare varie de 120 à 350 m³ dans les forêts et de 50 à 60 m³ dans les savanes. Les émissions biogéniques de ces écosystèmes sont augmentées par l'anthropisation du milieu (feux domestiques et de biomasse, exploitation forestière et activités agropastorales). Environ 2,1. 10⁶ m³ de bois sans intérêt commercial et 4,8.10⁶ t de résidus agricoles (tiges, paille, épis, coques et bagasses) sont annuellement enfouis dans le sol en compagnie des herbes de friches et/ou incinérés pour des besoins agricoles ou énergétiques. A ces émissions s'ajoutent celles de la population animale estimée à 16 millions de têtes en 1988/89.

Les composés atmosphériques **terrigenes** concernent environ 84 000 km² de terres marécageuses et 83 000 km² de terres pâturées en permanence. Les terres arables s'étendent sur 15 000 km² dont 15 % occupées par des cultures permanentes. Les parcelles de culture et de pâturage permanents où la terre est sans cesse remuée constituent des sources d'émission terrigenes dans l'air lorsque les conditions climatiques sont favorables. C'est le cas au Cameroun pendant la grande saison sèche (décembre-mars) lorsque les 2/3 du pays sont balayés par l'harmattan. Etant donné que le Cameroun partage avec l'**Atlantique** (source des composés marins) une côte de 350 km environ, le recul du FIT vers le nord grâce à la mousson plus dynamique de mars à novembre limite les émissions terrigenes et favorise l'arrivée sur l'ensemble du territoire des composés atmosphériques **marins**.

RESULTATS

En prenant comme référence la classification des eaux pluviales définie par Galloway *et al.* (1982), selon laquelle les pluies ayant un pH inférieur à 5,60 sont acides et celles ayant un pH supérieur sont alcalines (5,6 étant le pH d'équilibre du CO₂ atmosphérique dans les précipitations), il ressort de nos mesures de pH à Zoétélé (pH moyen = 4,9) que les pluies de la zone forestière du Sud-Cameroun sont globalement acides (fig. 4).

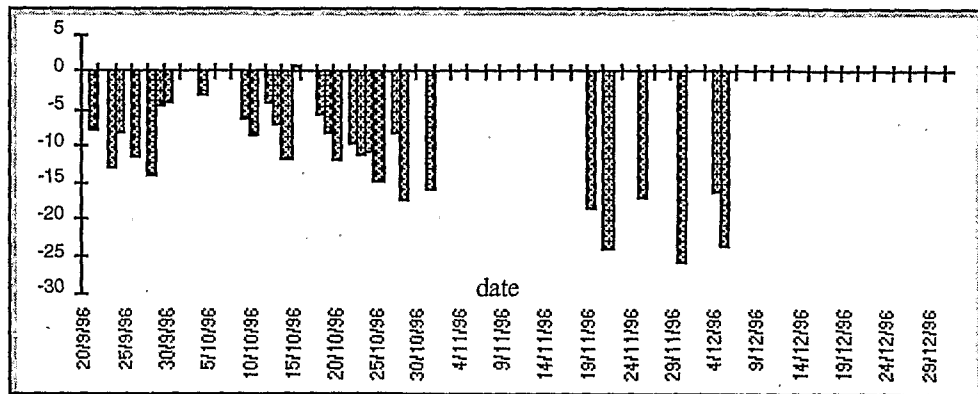


Figure 4. Zoétélé (Nsimi) :
Ecart en % au pH = 5,6

Cette acidité est imputable aux ions H⁺ libérés par les acides organiques, notamment l'acide acétique (CH₃COOH) et l'acide formique (HCOOH) contenus dans les pluies de zone forestière équatoriale en proportions assez élevées (fig. 5).

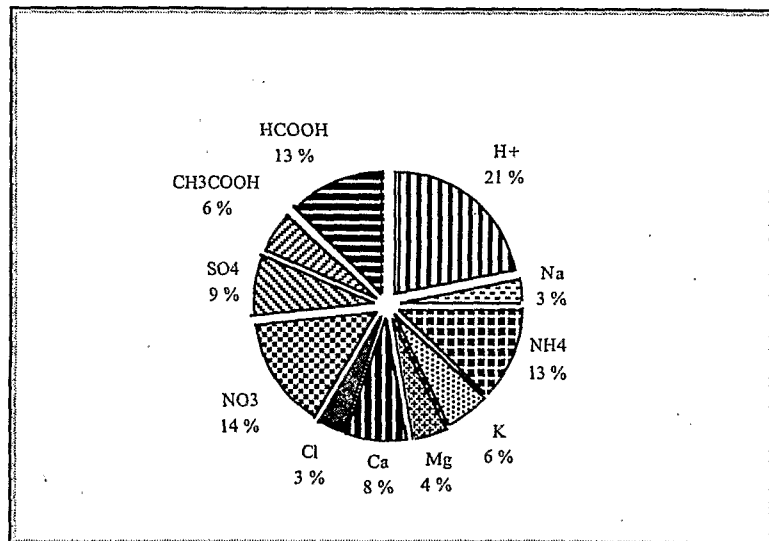
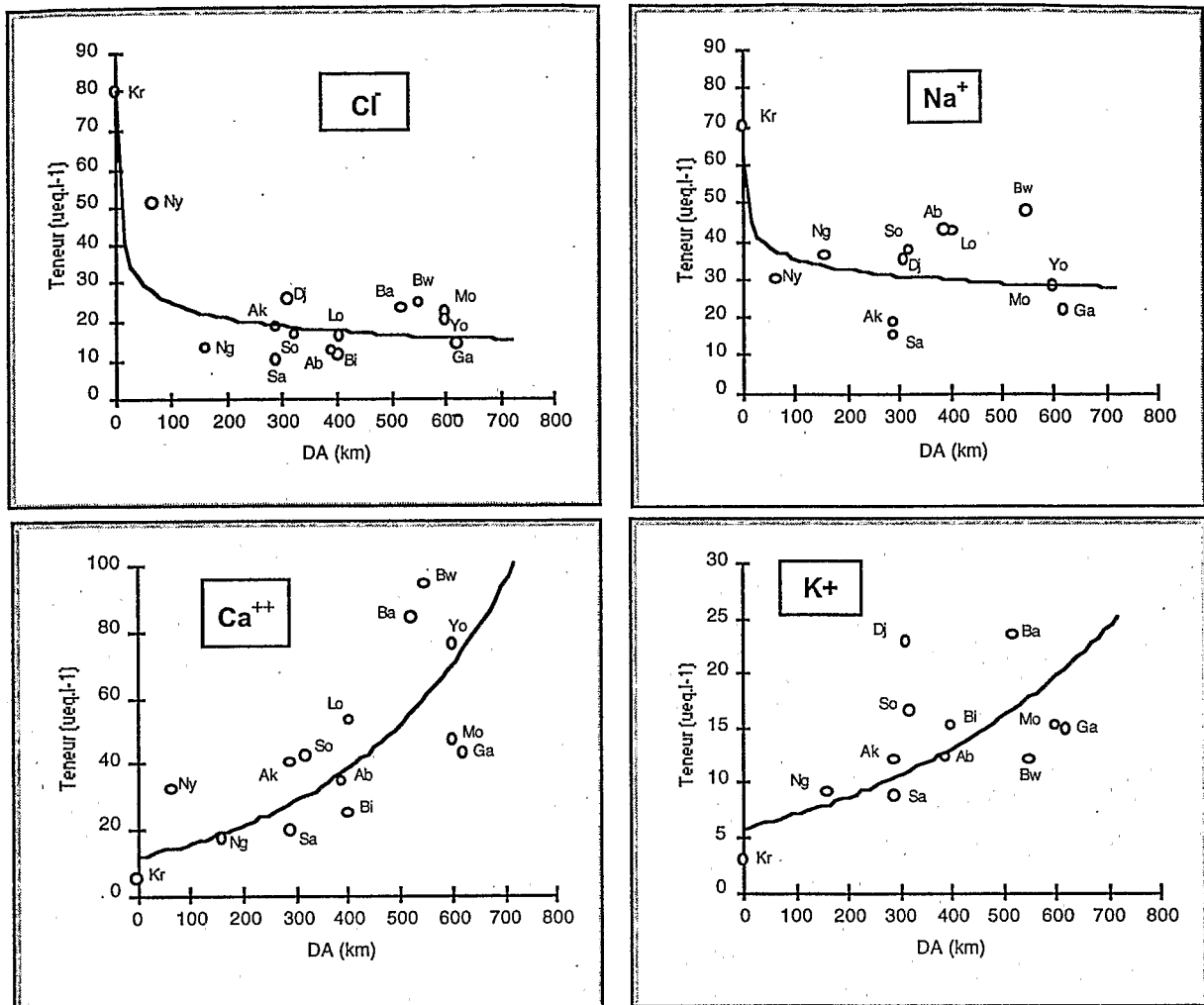


Figure 5. Zoétélé (Nsimi) : Proportions en ions des
eaux de pluies

En plus des émissions biogéniques, les activités des feux de savane en juillet, puis en octobre-novembre respectivement dans l'hémisphère sud (Lubumbashi) et dans l'hémisphère nord (sahel) seraient à l'origine des composés gazeux sulfurés, azotés et carbonés véhiculés par les alizés vers l'équateur où ils acidifient les pluies (Fontan, 1993 ; Lacaux *et al.*, 1992 ; Lefeuvre, 1993).

Le suivi de la composition chimique des précipitations depuis l'océan Atlantique (Kribi) vers la frontière camerouno-centrafricaine (Garigombo, Yokadouma, Moloundou), indique une décroissance des teneurs en Cl^- et Na^+ en fonction de l'éloignement à la mer. Cette décroissance est très rapide sur les 100 premiers kilomètres ; elle atteint un palier au-delà de 300 km (fig. 6).



Légende: BW : Biwala Kr : Kribi Lo : Lomié Mo : Moloundou Dj : Djoum-Mbang
 Ny : Nyabessan Ak : Akonolinga Ab : Abong-Mbang Yo : Yokadouma So : Somakomo
 Ga : Gari-Gombo Sa : Sangmelima Ng : Ngoazik Ba : Batouri Bi : Bi

Figure 6. Variation spatiale des ions de l'Atlantique vers la frontière camerouno-centrafricaine

Elle traduit l'origine marine de ces éléments. A l'inverse des chlorures et du sodium, les teneurs en Ca^{++} et en K^+ augmentent suivant le même transect (W-E). Cette augmentation pourrait indiquer un enrichissement en apports d'origine continentale, des émissions biogéniques et de la combustion de la biomasse. L'évolution des teneurs en Mg^{++} et en SO_4^- en fonction de la distance à l'Atlantique montre également une tendance à l'augmentation mais de façon moins nette. Globalement, l'influence terrigène est plus étendue du fait que les concentrations sont dans un rapport identique à celui des précipitations.

Les dépôts atmosphériques par site d'échantillonnage calculés en attribuant à chaque poste pluviométrique un poids proportionnel à une zone d'influence présumée, telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près, en distance horizontale, du pluviomètre correspondant (méthode de THIESSSEN), sont représentés sur la figure 7.

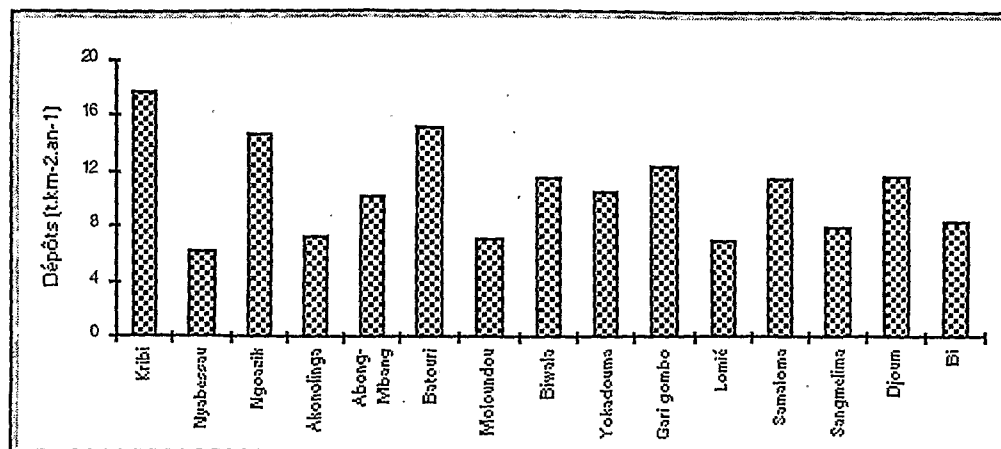


Figure 7. Dépôts atmosphériques par poste pluviométrique

Elle montre qu'endépit de la faible minéralisation des précipitations collectées à Kribi, le flux le plus important (17,7 t.km-2.an-1) est mesuré sur ce site du fait de l'importance de la hauteur pluviométrique (3 000 mm).

CONCLUSION

Les premiers résultats de l'étude concernent la tendance acide des précipitations en zone forestière du plateau sud-camerounais, avec un pH moyen de 4,9. Cette acidité est imputable à l'acide formique et à l'acide acétique qui représentent dans l'ordre 13 et 6 % de la totalité des espèces chimiques mesurées dans les précipitations. A l'échelle spatiale, on a noté une décroissance des teneurs en Cl⁻ et Na⁺ depuis l'Atlantique vers la frontière camerouno-centrafricaine, traduisant l'origine marine de ces éléments. A l'inverse des ions Cl⁻ et Na⁺, les teneurs en K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et SO₄⁻ ont plutôt augmenté. Cette augmentation serait liée aux apports d'origine continentale et aux émissions biogéniques. En terme de dépôts, le calcul des flux atmosphériques par site a montré une compensation des faibles concentrations par des hauteurs pluviométriques élevées, conduisant ainsi à des dépôts beaucoup plus importants près de l'Atlantique (Kribi). Ces premières conclusions ont suscité l'élaboration de nouveaux protocoles de mesures et d'analyses, puis l'intégration du site de Zoétéélé (Nsimi) dans le réseau IDAF qui vise à une meilleure connaissance de la composition chimique de l'atmosphère, à une identification des facteurs naturels et anthropiques qui les régulent en vue de l'évaluation de leur impact sur le climat et la biosphère.

RÉFÉRENCES

- CROZAT, G., 1978. *L'aérosol atmosphérique en milieu naturel. Etude des différentes sources de potassium en Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire)*. Th. Doc. ès-Sc. n° 846, UPS Toulouse.
- DELMAS R., 1980. *Contribution à l'étude des forêts équatoriales comme sources naturelles de dérivés soufrés atmosphériques*. Th. Doc. ès-Sc. n° 952, UPS Toulouse.
- FONTAN J., 1993. La pollution atmosphérique sous les tropiques. *La Recherche* 253, vol. 24, p. 400-408.
- GALLOWAY J. N., LIKENS G. E., KEENE W. C., MILLER J. M., 1982. The composition of precipitation in remote areas of the world. *J. of Geoph. Research*, Vol. 87, n° 11, p. 8771-8786.
- KLING G., 1987. *Comparative limnology of lakes in Cameroon, West Africa*. Ph. D. Thesis, Duke University USA, 482 p.

- KOUADIO G., 1991. *Etude de l'origine des acides organiques dans l'atmosphère d'une forêt équatoriale (le Mayombe)*. Th. Doc. UPS Toulouse, 183 p.
- LACAUX J. P., DELMAS R., KOUADIO G., CROS B., ANDREAE M. O., 1992. Precipitation chemistry in the Mayombe forest of equatorial Africa. *Journ. of Geoph. Research*, vol. 97, n° D6, p. 6195-6206.
- LACAUX J. P., LOEMBA-NDEMBI J., LEFEVRE B., CROS B., DELMAS R., 1992. Biogenic emissions and biomass burning influences of the chemistry of fogwater and stratiform Precipitations in the African equatorial rain forest. *Atm. Env.*, 26 A (4), p. 541-551.
- LACAUX J. P., SERVANT J., BAUDET J. G. R., 1987. Acid rain in the tropical forests of the Ivory Coast. *Atm. Environ.*, 12, p. 2643-2647.
- LEFEVRE B., 1993. Etude expérimentale et par modélisation des caractéristiques physiques et chimiques des précipitations collectées en forêt équatoriale africaine. Th. uni. P. SABATIER, Toulouse, 308 p.
- LETOUZEY R., 1986. Etude phytogéographique du Cameroun. Paris, 511 p.
- MAHE G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Th. Doc. Uni. Paris XI, *Coll. Etudes et Thèses*, Ed. ORSTOM, 438 p.
- ORANGE D., SIGHA -NKAMDJOU L., 1995. Etude des apports atmosphériques en Afrique Centrale. Coll. IDAF, Yamoussoukro, STAR Ed., 4 p.
- SERVANT J., LACAUX J. P., DELMAS R., 1987. Les acides organiques dans les eaux de précipitations recueillies au Congo. Sixth International Symposium of Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution on Global Atmospheric Chemistry. Trent University, Peterborough, Ontario, Canada, 28-29 August.
- SEYLER P., OLIVRY J.C., SIGHA NKAMDJOU L., 1993. Hydrochemistry of the Ngoko river, Cameroon : chemical balances in a rain-forest equatorial basin. Yokohama, Japan, IAHS, Publ. n° 216, p. 87-105.
- SEYLER P., SIGHA NKAMDJOU L., OLIVRY J.C., 1993. Dissolved and particulate transports in the Dja-Ngoko river, Cameroon : mechanical and chemical erosion rates in a rain-forest equatorial basin. *Journ. of African Earth Sciences*; 16th Coll on African Geol, Mbabane, Swaziland, Vol.18, N°4 p. 326-328.
- SIGHA NKAMDJOU L., 1994) : Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier de l'Afrique Centrale : La Ngoko à Moloundou (sud-est du Cameroun). Th. Doc. Uni Paris XI (Orsay), *Coll. TDM n°111*, Ed. ORSTOM, Paris. 380 p.
- SIGHA NKAMDJOU L., 1994. Qualité chimique des eaux pluviales en Afrique Centrale. *Recherche Centrafricaine Actualités*, Bangui, p.5-9.
- SIGHA NKAMDJOU L., 1995. *Etude de l'anomalie climatique de la vallée de la Haute Sangha et de apports atmosphériques depuis l'Atlantique (Cameroun) jusqu'à la Centrafrique (transect SW-NE. Premiers résultats de la campagne 1994/95)*. Rap. détaillé, ORSTOM Montpellier, novembre 1995.
- SIGHA NKAMDJOU L. et ORANGE D., 1995. Recueil des analyses chimiques des eaux de pluie d'Afrique Centrale (1989-1995). Rap. interne, ORSTOM Montpellier, octobre 1995, 90 p.
- SIGHANKAMDJOU L., CARRE P., SEYLER P., 1995. Bilans hydrologiques et géochimiques d'un écosystème forestier équatorial de l'Afrique Centrale : la Ngoko à Moloundou (Cameroun). *Actes du Coll. PEGI*, Ed. ORSTOM Paris, p. 199-216.

SIGHA NKAMDJOU L., SEYLER P., NGHONDA J. P., TSALEFAC M., 1995. *Chimie des eaux pluviales en milieu forestier sud-camerounais*. Coll. IDAF, Yamoussoukro, STAR Ed., 4p.

SUCHEL J. B., 1987. *Les climats du Cameroun*. Th. D'Etat, Univ. Bordeaux III, 4 volumes.

YOBOUE V., 1991. *Caractéristiques physiques et chimiques des aérosols collectées dans la savane humide de la Côte d'Ivoire*. Th. Doc. UPS Toulouse, 145 p.

Jean-Paul VICAT et Paul BILONG

GÉOSCIENCES AU CAMEROUN

Collection GEOCAM 1/1998

Presses Universitaires de Yaoundé
1998

Photographie de couverture :

« Le morne rocheux d'Ako' akas (sud-est d'Ébolowa - Cameroun) ».

Cliché JP. VICAT

© Presses Universitaires de Yaoundé
Université de Yaoundé I
CAMEROUN

ISBN n° 2-911541-08-1 • Dépôt légal 1998