

# Premiers résultats sur la composition isotopique des précipitations de la région du Mont Cameroun

J. Ch. FONTES

Maître-Assistant à l'Université Pierre-et-Marie-Curie  
Paris VI

J. C. OLIVRY

Chargé de Recherches ORSTOM à Yaoundé

## RÉSUMÉ

*La région du Mont Cameroun, dont le sommet culmine à plus de 4 000 m d'altitude, à faible distance de l'Océan, présente sur une zone restreinte, de forts contrastes pluviométriques mis en évidence par les relevés fournis par le réseau pluviométrique d'altitude qui fonctionne maintenant depuis une dizaine d'années. Sur la côte directement soumise à la mousson, le total pluviométrique annuel peut atteindre dix mètres et les précipitations se produisent toute l'année; par contre, au sommet du Fako, le total annuel s'abaisse à deux mètres et il ne pleut plus que quatre mois par an.*

*Depuis 1972, des analyses isotopiques sont effectuées sur les eaux de pluie recueillies par les pluviomètres totalisateurs. Ces analyses montrent que la variation de la composition en isotopes lourds ( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ ) n'est pas due à l'abondance du total pluviométrique annuel, mais est fonction de l'altitude. La composition isotopique pour une altitude donnée est relativement stable d'une année à l'autre dans cette région du globe et les faibles variations observées s'expliquent par la variation annuelle du profil thermique de l'atmosphère.*

## ABSTRACT

*The Mount Cameroon's zone presents a very varied topography, ranging from sea level to over 4 000 m and offers over a small area highly rainfalls contrasts clearly illustrated by the rain gauge network at which data are obtained since ten years. Along the coast affected by the west to southerly monsoon, precipitations falling the whole year can give rise to ten meters a year; but at the Fako's top, the annual rainfall decreases to two meters and it only rains four months a year.*

*Since 1972, isotopic analyses are made on rain waters given by the storage precipitation gauges. These analyses indicated that the variation of composition in heavy isotopes ( $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$ ) is not correlated with the amount of annual rainfall but with the altitude. The isotopic composition at a given altitude is rather stable from year to year in this equatorial wet zone and the annual variation of the atmospheric thermal profile can explain the little isotopic variations which are observed.*

## SOMMAIRE

### Généralités

- 1.1. Aperçu géographique et climatique
- 1.2. Cadre des mesures

### Etude des hauteurs de précipitations

- 2.1. Précipitations moyennes
- 2.2. Précipitations en 1972, 1973, 1974

### *Analyses isotopiques des précipitations*

- 3.1. Généralités
- 3.2. Les résultats
- 3.3. Relation entre les teneurs annuelles en oxygène 18 et l'altitude
  - 3.3.1. Etude des corrélations
  - 3.3.2. Le gradient
  - 3.3.3. Variations de l'ordonnée à l'origine
- 3.4. Relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et les températures
  - 3.4.1. Détermination des données climatiques
  - 3.4.2.  $\delta^{18}\text{O}$  et température moyenne de l'atmosphère
  - 3.4.3.  $\delta^{18}\text{O}$  et température du point de rosée
- 3.5. Variations de  $\delta^2\text{H}$
- 3.6. Relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$
- 3.7. Critique des résultats
- 3.8. Conclusions

### *Bibliographie*

## 1. GÉNÉRALITÉS

### 1.1. APERÇU GÉOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

Situé au fond du Golfe de Guinée, et plus précisément du golfe de Biafra, le Mont Cameroun, ou Fako, élève sa masse volcanique imposante à plus de 4 000 m au-dessus de la mer. Il est le dernier témoin occidental de la grande ligne de fracture appelée « ligne du Cameroun » qui a donné naissance à la Dorsale Camerounaise (Adamaoua, Monts de Bamenda, etc.) et se prolonge dans l'Océan Atlantique par les îles de Fernando Po, Principe, Sao Thome et Annobon.

Dans l'axe des vents dominants (W.-S.-W.), cet obstacle orographique vigoureux s'oppose tel un butoir à la progression de la mousson et est responsable de contrastes locaux particulièrement importants dans la distribution spatiale des précipitations. Ainsi sur le versant maritime, certaines stations côtières reçoivent des hauteurs annuelles de précipitations comparables aux records mondiaux de Tcherapundji, des Îles Hawaï et de la Réunion, tandis que le versant E.-N.-E., abrité, est beaucoup moins arrosé.

La hauteur moyenne annuelle des précipitations passe de près de 10 m à Debundscha, sur la côte, à moins de 2 m à Meanja, 40 km à l'intérieur. En dépit de cette disparité, la répartition mensuelle des précipitations est assez peu différente en valeurs relatives, et correspond au climat de type équatorial côtier propre à la région de Douala.

La position géographique du Mont Cameroun, à la limite méridionale des déplacements du Front Intertropical (FIT) entraîne par ailleurs de forts contrastes dans la distribution, dans le temps, des précipitations avec l'altitude. On sait que la masse d'air humide s'enfonce en biseau aigu sous la masse d'air sec et que le FIT correspond à un plan incliné par rapport à l'horizontale, si la limite la plus méridionale de la trace au sol du FIT reste au Nord du Mont Cameroun, on retrouve en altitude le domaine de l'Harmattan pendant une bonne partie de l'année, alors que la mousson se manifeste dans le même temps par des précipitations importantes sur la côte.

Le Mont Cameroun présente sur une verticale en altitude, le raccourci des variations climatiques que l'on observe en latitude.

La limite supérieure de la forêt, vers 2 500 m, est assez significative du passage du climat équatorial au climat tropical d'altitude dont la saison sèche pourrait durer de cinq à six mois.

L'absence de précipitations en altitude pendant plusieurs mois se traduit d'ailleurs dans le régime hydrologique de petits fleuves côtiers, tel la Sanje, par la persistance de basses eaux jusqu'au mois de juin.

### 1.2. CADRE DES MESURES

La mise en valeur ancienne des pentes inférieures du Mont Cameroun (plantations d'hévéas, palmeraies) a permis un équipement pluviométrique d'une densité assez forte (notamment au sud et à l'est) entre 0 et 900 m

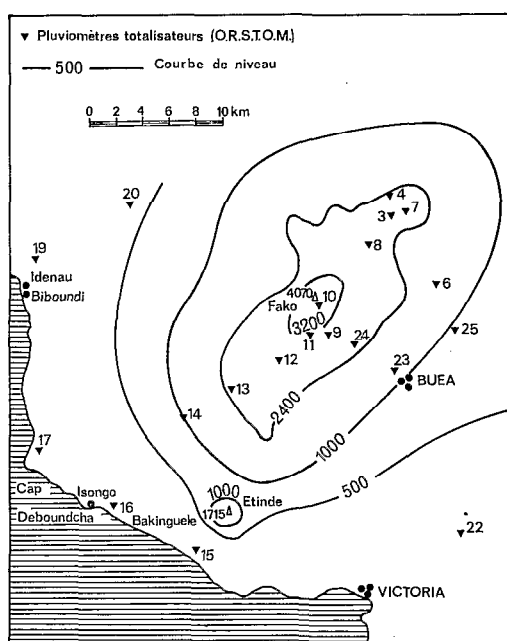


Fig. 1. — Région du mont Cameroun.

d'altitude. Plus en altitude, on ne disposait d'aucune observation susceptible de préciser la forme des variations de la pluviométrie. Aussi, depuis 1966, l'ORSTOM s'est attaché à combler cette lacune en mettant en service une vingtaine de pluviomètres totalisateurs étagés en altitude sur les versants nord-est et sud-ouest (fig. 1). Du fait des difficultés d'accès, les mesures ne sont effectuées qu'une fois par an. Les précipitations recueillies dans des fûts de 200 l sont protégées de l'évaporation par une couche d'huile renouvelée chaque année.

L'altitude des différentes stations a été déterminée d'après les cartes IGN au 1/50 000<sup>e</sup> et contrôlée par mesures barométriques. L'erreur de positionnement en altitude n'excède pas 5 m.

L'aspect de la pluviométrie dans la région du Mont Cameroun a fait l'objet d'une première étude (R. LEFEVRE) qui doit être reprise à l'issue de dix années d'observations.

Les mesures pluviométriques sont complétées depuis 1972 par des prélèvements d'échantillons d'eau de pluie qui sont effectués à chaque station au moment de la tournée annuelle de mesures. Ces échantillons, conservés dans des flacons en polyéthylène de 60 ml, sont envoyés pour analyse des teneurs en isotopes lourds au laboratoire de Géologie Dynamique de l'Université de Paris VI.

L'étude des variations de la composition isotopique des précipitations 1972, 1973 et 1974 qui fait l'objet de cette note, impliquait tout d'abord de replacer brièvement la pluviosité de ces trois années dans le contexte général de pluviométrie du Mont Cameroun.

## 2. ÉTUDE DES HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS

### 2.1. PRÉCIPITATIONS MOYENNES

Depuis l'installation des pluviomètres ORSTOM, on dispose de 8 années complètes d'observations, mais sur 12 postes seulement, compte tenu des lacunes sur une ou plusieurs années et d'équipements plus récents. Les moyennes obtenues sont indiquées dans le tableau I.

La comparaison des moyennes calculées sur cette période de 8 ans et la période totale d'observations pour

Debundscha et Idenau, stations de longue durée, montre que la pluviosité de ces 8 dernières années a été moins forte que sur l'ensemble de la période d'observation (1).

|            | Moyenne 8 ans<br>(mm) | 21 ans<br>(mm) | 38 ans<br>(mm) |
|------------|-----------------------|----------------|----------------|
| Debundscha | 9 126                 |                | 9 895          |
| Idenau     | 7 786                 | 8 515          |                |

A partir des moyennes obtenues sur les stations d'altitude du versant maritime, nous avons tenté de déduire des histogrammes d'Isongo, Idenau et Debundscha, la répartition mensuelle des précipitations à diverses altitudes. Le graphique de la figure 2 illustre cette tentative pour les altitudes 1 000, 2 500, 3 000 et 4 000 m. Les hauteurs de précipitations en altitude sont très probablement liées à l'épaisseur de la mousson et aux pluies abondantes reçues sur la côte.

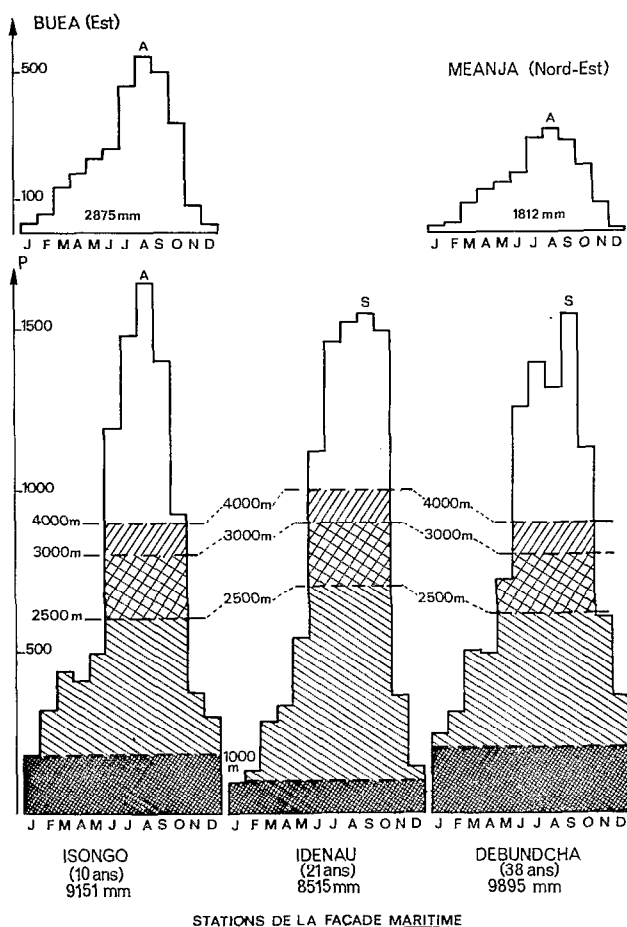


Fig. 2. — Histogrammes moyens de la région du mont Cameroun.

(1) Laquelle période a connu le maximum absolu observé à Debundscha : 14 694 mm en 1919.

Les histogrammes déterminés pour différentes altitudes sur le graphique 2 ne constituent cependant qu'une indication relative sur la longueur de la saison des pluies. On suppose qu'un histogramme donné correspond à la partie supérieure du dessin pour un niveau d'altitude donné. La saison des pluies durerait de 4 à 5 mois au sommet du Mont Cameroun, de 5 à 6 mois vers les 3 000 m et de 6 à 7 mois à 2 500 m au-dessus de la forêt. A 1 000 m d'altitude, la saison des pluies aurait une durée pratiquement équivalente à celle des stations côtières (11-12 mois). Ces durées très inégales de la saison des pluies pourraient avoir une incidence sur les variations de la composition isotopique moyenne annuelle des précipitations.

## 2.2. PRÉCIPITATIONS EN 1972, 1973, 1974

Les hauteurs annuelles de ces précipitations ont été reportées dans le tableau I. La comparaison des résultats de chaque année à la moyenne annuelle (8 ans pour 12 postes) montre que les précipitations ont été excédentaires pour chaque station en 1972, très déficitaires pour chaque station en 1973, et déficitaires pour 9 postes, excédentaires pour 2 postes en 1974.

La moyenne des précipitations moyennes reçues aux postes est de 4 388 mm ; elle est de 4 715 mm en 1972 (+ 7,5%), 3 542 mm en 1973 (-19%) et de 4 161 mm en 1974 (-5%).

En 1972 et 1973, la sécheresse catastrophique du Sahel s'est manifestée jusqu'à des latitudes très basses puisque les déficits pluviométriques les plus importants au Cameroun en pourcentage ont été observés sur la façade maritime (Douala et Tiko) et la région de l'Ouest. Ces déficits ont d'ailleurs persisté en 1974.

|        | Moyenne<br>(mm) | 1972   |           | 1973   |           | 1974   |           |
|--------|-----------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
|        |                 | P (mm) | Ecart (%) | P (mm) | Ecart (%) | P (mm) | Ecart (%) |
| Douala | 4 333           | 3 340  | -21,7     | 3 451  | -20,4     | 3 575  | -17,5     |
| Tiko   | 3 021           | 2 622  | -13       | 2 039  | -32,5     | 2 563  | -15       |

TABLEAU I  
HAUTEURS ANNUELLES DES PRÉCIPITATIONS AU MONT CAMEROUN

| N° poste pluviométrique<br>et lieu-dit | Altitude<br>(m) | Moyenne<br>calculée sur 8 ans<br>(mm) | 1972<br>(mm) | 1973<br>(mm) | 1974<br>(mm) |
|--|-----------------|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Versant Nord                           | 3               | 2 500                                 | —            | 3 315        | 2 735        |
| Station VHF                            | 4               | 2 460                                 | —            | 2 970        | 2 640        |
| Route VHF                              | 6               | 1 610                                 | 3 448        | 4 070        | 2 850        |
| Versant Nord                           | 7               | 2 475                                 | 2 824        | 3 050        | 2 600        |
| Nord                                   | 8               | 3 050                                 | 2 145        | 2 480        | 1 900        |
| Hutte 2                                | 9               | 2 925                                 | 2 602        | 3 120        | 2 310        |
| Sommet Bottle Peak                     | 10              | 4 050                                 | 2 150        | 2 540        | 1 875        |
| SW                                     | 11              | 3 300                                 | 1 880        | 2 100        | 1 400        |
| Versant SW                             | 12              | 3 000                                 | 2 515        | 3 030        | 1 830        |
| Limite forêt SW                        | 13              | 2 320                                 | 3 329        | 3 945        | 2 270        |
| Forêt SW                               | 14              | 1 000                                 | 7 530        | 7 210        | 4 810        |
| Batoki                                 | 15              | 50                                    | —            | 6 130        | 4 590        |
| Bakingele                              | 16              | 10                                    | 7 318        | 7 930        | 5 365        |
| Debundsha                              | 17              | 20                                    | 9 126        | 9 200        | 8 430        |
| Idenau                                 | 19              | 30                                    | 7 786        | 7 915        | 6 870        |
| Bomana                                 | 20              | 460                                   | —            | 5 525        | 5 050        |
| Brasseries                             | 22              | 180                                   | —            | 4 455        | 1 990        |
| UPPER Farm                             | 23              | 1 100                                 | —            | 3 730        | 2 210        |
| Limite forêt BUEA                      | 24              | 2 500                                 | —            | 3 800        | 2 680        |
| Bonakanda                              | 25              | 860                                   | —            | 3 730        | 2 990        |

Il est donc surprenant de mettre en évidence au Mont Cameroun une assez forte pluviosité en 1972. En 1973, les déficits pluviométriques sont rattachés à une faible ampleur de la mousson, encore manifeste en 1974.

La figure 3 illustre sur un profil W.-S.-W. - E.-N.-E. du Mont Cameroun les variations de la pluviométrie au cours des trois années et en année moyenne. Elle montre l'opposition des versants au vent et sous le vent ainsi que des gradients pluviométriques variables avec l'exposition. Une éventuelle incidence de ces pluviosités très différentes sur la composition isotopique des précipitations d'une année à l'autre n'est pas à écarter.

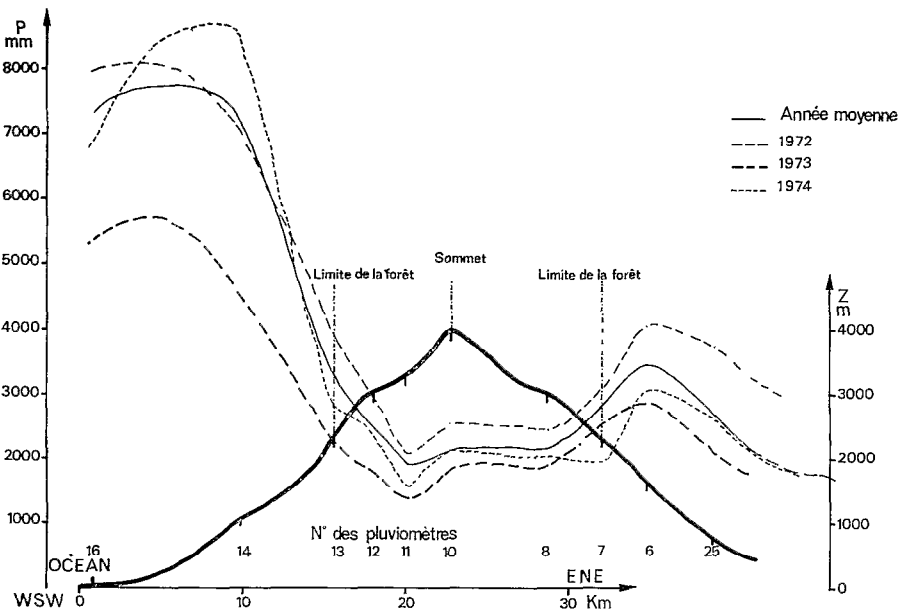


Fig. 3. — Profils topographiques et pluviométriques du mont Cameroun.

### 3. ANALYSES ISOTOPIQUES DES PRÉCIPITATIONS

#### 3.1. GÉNÉRALITÉS

Dans l'hydrosphère, la répartition des principaux isotopes constitutifs de la molécule d'eau est en moyenne la suivante :

| Isotopes                    | Fréquence (%) |
|-----------------------------|---------------|
| Hydrogène $^1\text{H}$      | 99,985        |
| Deutérium $^2\text{H}$ ou D | 0,015         |
| Oxygène 16 $^{16}\text{O}$  | 99,76         |
| Oxygène 18 $^{18}\text{O}$  | 0,20          |

La composition isotopique de l'eau peut être modifiée par un changement partiel de phase (condensation à partir d'une masse de vapeur, évaporation à partir d'un liquide).

Par rapport aux isotopes légers, les isotopes lourds montrent une aptitude plus grande au changement partiel de phase vapeur-liquide et plus faible au changement partiel de phase inverse — aptitudes d'autant plus marquées que la température est basse.

Ainsi, dans le cycle de l'eau, la masse de vapeur née de l'eau océanique montre un appauvrissement en isotopes lourds. Cette masse de vapeur continue de s'appauvrir au cours de stades de condensation successifs ; les précipitations connaissent un enrichissement relatif en isotopes lourds par rapport à la masse de vapeur qui leur a donné naissance.

Les teneurs en isotopes lourds des précipitations dépendent de l'abaissement de température subi par la masse de vapeur saturante depuis sa formation jusqu'au lieu de collection. Les précipitations sont donc isotopiquement tracées en fonction de leur histoire thermique liée en général de façon simple à la température au sol de la région réceptrice. L'étude isotopique des précipitations du Mont Cameroun devait permettre de préciser leur traçage en altitude.

Les échantillons ont été prélevés une fois par an à partir des précipitations recueillies par les pluviomètres totalisateurs (protégées de l'évaporation par de l'huile) ; ils sont représentatifs de la composition isotopique moyenne de l'année.

Les analyses ont été effectuées par le laboratoire de Géologie Dynamique de l'Université de Paris VI. Les teneurs de  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ont été déterminées par équilibration à 25°C de l'échantillon d'eau avec  $\text{CO}_2$  et analyse du gaz carbonique au spectromètre de masse à double collection.

Le rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de l'échantillon est comparé au rapport d'un standard classique appelé SMOW (Standard Mean Oceanic Water) correspondant à la moyenne d'une série de mesures de l'eau océanique. Les résultats sont exprimés en termes de  $\delta$  ou parts pour mille de différence relative

$$\delta = \left\{ \frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ Echantillon}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ SMOW}} - 1 \right\} 1000$$

La mesure des teneurs en Deutérium s'exprime de la même manière.

Une eau à  $\delta$  négatif est appauvrie en isotopes lourds (et vice versa). C'est le cas de la masse de vapeur issue de l'Océan et des précipitations reçues dans la région du Mont Cameroun.

### 3.2. LES RÉSULTATS

Les analyses isotopiques des précipitations ont été faites année par année. Certains échantillons ont été répétés à la suite de petits problèmes analytiques qui s'étaient révélés à l'examen des premiers spectres. Les teneurs en Deutérium ont été mesurées après mise au point d'une technique analytique propre à cet isotope.

TABLEAU II  
PRÉCIPITATIONS DU MONT CAMEROUN  
ANALYSES ISOTOPIQUES

| N° poste pluviométrique<br>et lieu-dit | Altitude<br>(m) | 1972                  |                    | 1973                  |                    | 1974  |         |
|--|-----------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-------|---------|
|  |                 | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ |       |         |
| Station VHF                            | 3               | 2 500                 | -6,59              | -44,6                 | -7,44              |       | (-7,24) |
|  | 4               | 2 460                 | -6,38              |                       | -6,99              | -46,5 | -7,04   |
| Route VHF                              | 6               | 1 610                 | -5,74              | -34,7                 | -5,98              |       | -5,75   |
|  | 7               | 2 475                 | -6,25              |                       | -6,56              |       | (-5,91) |
|  | 8               | 3 050                 | -7,53              |                       | -8,28              |       | (-8,33) |
| Hutte 2                                | 9               | 2 925                 | -7,57              | -49,6                 | -7,50              |       | -7,93   |
| Sommet Bottle Peak                     | 10              | 4 050                 | -8,89              | -61,1                 | -9,77              | -68,0 | -9,95   |
|  | 11              | 3 300                 | -8,44              | -59,2                 | -8,98              | -62,6 | -9,11   |
| Versant SW                             | 12              | 3 000                 | -7,38              |                       | -8,22              | -55,4 | -8,92   |
| Limite forêt SW                        | 13              | 2 320                 | -6,13              |                       | -6,92              |       | -8,61   |
| Forêt SW                               | 14              | 1 000                 | -3,62              | -22,8                 | -4,86              |       | -4,25   |
| Batoki                                 | 15              | 50                    | -2,45              |                       | -2,92              |       | -3,28   |
| Bakingele                              | 16              | 10                    | -2,41              | -12,4                 | -2,93              | -17,5 | -3,36   |
| Debundsha                              | 17              | 20                    | -2,61              |                       | -3,09              |       | -3,67   |
| Idenau                                 | 19              | 30                    | -3,02              |                       | -3,59              | -25,4 |         |
| Bomana                                 | 20              | 460                   | -3,58              |                       | -3,94              |       | -4,05   |
| Brasseries                             | 22              | 180                   | -3,26              |                       | -3,61              | -24,1 | -3,86   |
| UPPER Farm                             | 23              | 1 100                 | -4,39              | -26,2                 | -4,94              | -29,2 | -5,06   |
| Limite forêt Buea                      | 24              | 2 500                 | -6,25              | -36,3                 | -6,29              | -43,1 | -6,74   |
| Bonakanda                              | 25              | 860                   | -4,19              |                       | -4,73              |       | -4,86   |

Trois analyses (3, 7 et 8) des précipitations 1974 devront être répétées, ayant été exécutées en période d'instabilité. L'analyse de la source de Man à 2 500 m d'altitude, faite sur un prélèvement de 1972, n'a pas été retenue ( $\delta^{18}\text{O} = -4,27$ ), l'eau ayant de toute évidence subi une évaporation importante.

La quasi absence de sources étagées en altitude n'a pas permis d'envisager d'étude particulière sur le parcours moyen des eaux souterraines et les implications hydrogéologiques de l'infiltration des précipitations à telle ou telle altitude.

Les résultats des analyses des vingt postes pluviométriques sont donnés dans le tableau II. Les variations de teneur sont comprises pour  $\delta^{18}\text{O}$  entre  $-2,41$  pour Bakingele en 1972 et  $-9,95$  au sommet en 1974, pour  $\delta^2\text{H}$  entre  $-12,4$  en 1972 (Bakingele) et  $-68,0$  au sommet en 1973.

Les variations de la composition isotopique sont liées à celles de la température. L'existence, en général, de gradients thermiques réguliers avec l'altitude permet d'étudier ce dernier paramètre dans l'étude isotopique des précipitations.

Les hauteurs de précipitations annuelles ne constituent pas un paramètre susceptible d'expliquer les variations de leur composition isotopique. Un semblant de relation apparaît cependant malgré une forte dispersion ; mais cela est dû, comme nous l'avons signalé, à l'existence de gradients pluviométriques en fonction de l'altitude.

En première analyse, nous étudierons donc les variations de la composition isotopique des précipitations en fonction de l'altitude.

### 3.3. RELATION ENTRE LES TENEURS ANNUELLES EN OXYGÈNE 18 ET L'ALTITUDE

#### 3.3.1. Etude des corrélations

Les teneurs en oxygène 18 des précipitations recueillies à chaque poste pluviométrique pour chaque année ont été mises en régression en fonction de l'altitude  $z$  de collecte.

Les régressions sont bonnes comme en témoigne le calcul des coefficients de corrélation :

1972  $r = -0,978$  équation de la droite  $\delta^{18}\text{O} = -0,16 z 10^{-2} - 2,65$

1973  $r = -0,975$  équation de la droite  $\delta^{18}\text{O} = -0,16 z 10^{-2} - 3,15$

1974  $r = -0,962$  équation de la droite  $\delta^{18}\text{O} = -0,16 z 10^{-2} - 3,40$

Les variations de la pente de la droite de régression n'excèdent pas 2% d'une année à l'autre.

En considérant l'échantillon des années 72-73, le coefficient de corrélation est  $r = -0,980$  et l'équation de la droite

$$\delta^{18}\text{O} = -0,16 z 10^{-2} - 2,90$$

Avec les derniers résultats (précipitations 74) dont l'échantillon montre une dispersion un peu plus forte, le coefficient de corrélation obtenu pour les trois années est  $r = -0,969$  et l'équation de la droite

$$\delta^{18}\text{O} = -0,16 z 10^{-2} - 3,01 \tag{1}$$

#### 3.3.2. Le gradient

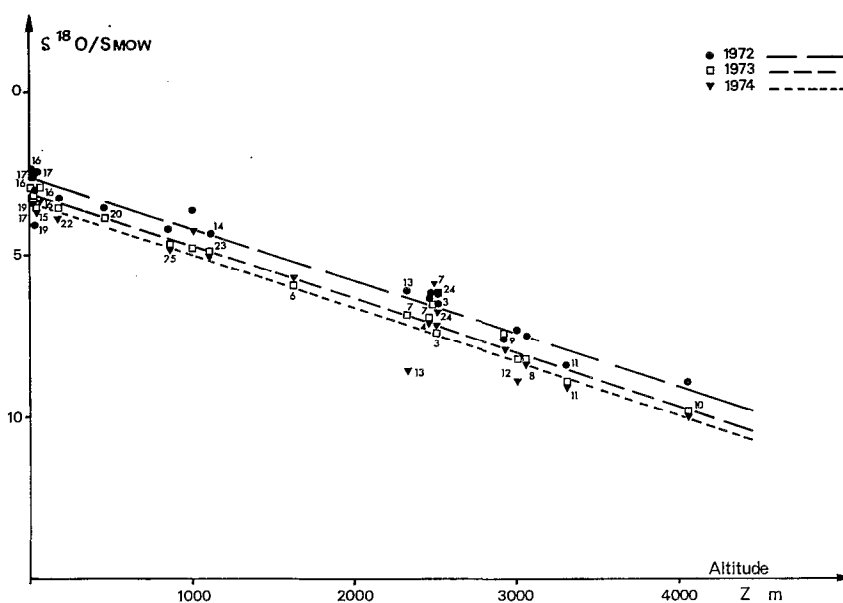
Il est remarquable de noter que le gradient de variation de la teneur en oxygène 18 est resté le même d'une année à l'autre.

Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}/\text{SMOW}$  diminuent de 0,16 par 100 m gagnés en altitude. Ce gradient est faible par rapport aux résultats d'études semblables effectuées dans des régions d'altitude.

Ces travaux indiquent des variations générales du gradient de  $-0,6 \delta^{18}\text{O}/100 \text{ m}$  à  $-0,2 \delta^{18}\text{O}/100 \text{ m}$  entre les hautes et les basses latitudes. Pour le Kilimandjaro, on a relevé un gradient de  $-0,3 \delta^{18}\text{O}/100 \text{ m}$ , soit près du double de la valeur mesurée au Mont Cameroun ; ce dernier est à environ  $4^\circ$  de latitude nord alors que le Kilimandjaro n'est qu'à  $3^\circ$  au sud de l'Equateur. Cette différence s'explique sans doute par la proximité de la mer qui baigne le pied du Mont Cameroun, alors que le Kilimandjaro est déjà à 300 km de l'Océan Indien.

La situation particulière du Mont Cameroun entraîne un gradient régulier de température en altitude qui expliquerait que l'on se trouve en présence d'un mécanisme très pur de distillation fractionnée des masses de vapeur.

(1) Ecart résiduel de  $\delta^{18}\text{O} \text{ ‰} = 0,21$  en 72,  $0,23$  en 73,  $0,41$  pour 72-73,  $0,57$  en 1974 et  $0,52$  pour les trois années.

Fig. 4. — Précipitations au mont Cameroun. Relation  $\delta^{18}\text{O}$ -altitude.

### 3.3.3. Variations de l'ordonnée à l'origine

La comparaison des compositions isotopiques d'une année à l'autre montre généralement des valeurs assez voisines pour un poste. Les variations n'excèdent pas en moyenne  $\pm 5\%$  de la valeur moyenne des trois années et sont souvent plus réduites (exception faite du poste 12 et, surtout, du poste 13). Cette relative stabilité des compositions isotopiques témoigne d'un régime permanent bien établi dans le mécanisme des précipitations.

Cependant, le calcul de l'équation des droites de régression de chaque année montre que les ordonnées à l'origine sont tout de même assez différentes d'une année à l'autre. Ainsi l'ordonnée à l'origine passe de  $-2,65$  à  $-3,15$  de 1972 à 1973 et à  $-3,40$  en 1974, soit des variations respectives de  $-0,50$  et  $-0,25$  en  $\delta^{18}\text{O}$ , très probablement significatives.

Ces variations pourraient signifier que la distillation fractionnée des masses de vapeur s'effectue suivant un profil thermique décalé en altitude d'une année à l'autre (en fonction de conditions climatiques particulières) ou, en d'autres termes, que le niveau de condensation des précipitations reçues en un même point se situe à différentes altitudes suivant l'année.

Ainsi le niveau moyen de condensation en 1973 serait de 300 m plus haut que celui de 1972, et en 1974 de 150 m plus élevé qu'en 1973 ( $0,50/0,0016$  et  $0,25/0,0016$ ).

Une analyse fine des variations de la composition isotopique des précipitations annuelles au Mont Cameroun implique donc de substituer à l'altitude un paramètre traduisant les conditions climatiques propres à l'année considérée.

## 3.4. RELATION ENTRE $\delta^{18}\text{O}$ ET LES TEMPÉRATURES

### 3.4.1. Détermination des données climatiques

Dans l'aperçu qui a été donné sur les précipitations du Mont Cameroun, l'originalité des trois dernières années a été dégagée. Aucune autre mesure climatologique que celle des précipitations n'ayant pu être réalisée au Mont Cameroun, nous avons tenté l'exploitation des observations effectuées à Tiko et surtout Douala.

Pour Tiko, on ne dispose que d'observations au sol, tandis que pour Douala le lâcher journalier de ballons-sondes complète les mesures au sol par des mesures dans l'atmosphère.

La proximité de Douala (à 70 km du Fako) soumis par ailleurs aux mêmes conditions climatiques que le Mont Cameroun justifiait a priori l'exploitation des observations météorologiques, et notamment celle des données transmises par sondages.

TABLEAU III  
VARIATIONS DE QUELQUES PARAMÈTRES CLIMATIQUES A DOUALA ET TIKO  
(Valeurs moyennes annuelles)

|                                       | 1970  | 1971  | 1972  | 1973  | 1974  |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>DOUALA</b>                         |       |       |       |       |       |
| Température de l'air (en °C)          |       |       |       |       |       |
| au sol                                | 26,5  | 26,4  | 26,7  | 26,9  | 26,4  |
| à 1 520 m                             | 19,0  | 17,7  | 17,6  | 18,8  | 18,0  |
| à 3 170 m                             | 10,7  | 9,5   | 9,2   | 10,4  | 9,5   |
| à 5 890 m                             | - 4,4 | - 5,8 | - 5,4 | - 4,1 | - 5,0 |
| à 7 620 m                             | -14,7 | -16,1 | -15,8 | -14,1 | -14,9 |
| Température du point de rosée (en °C) |       |       |       |       |       |
| au sol                                | 24,8  | 24,5  | 24,8  | 24,2  | 24,0  |
| à 1 520 m                             | 16,3  | 14,7  | 15,6  | 14,0  | 13,6  |
| à 3 170 m                             | 5,2   | 3,8   | 3,8   | 2,3   | 2,8   |
| à 5 890 m                             | -11,3 | -12,6 | -13,0 | -12,8 | -13,2 |
| à 7 620 m                             | -22,8 | -23,6 | -24,7 | -24,1 | -24,9 |
| Insolation (en heures)                | 1 675 | 1 730 | 1 761 | 2 146 | 1 876 |
| Précipitations (en mm)                | 4 307 | 4 597 | 3 393 | 3 451 | 3 575 |
| <b>TIKO</b>                           |       |       |       |       |       |
| Température au sol (en °C)            | 26,1  | 26,0  | 26,6  | 26,4  | 25,9  |
| Insolation (en heures)                | —     | 1 566 | 1 799 | 1 946 | 1 806 |
| Précipitations (en mm)                | 2 758 | 2 451 | 2 622 | 2 039 | 2 563 |

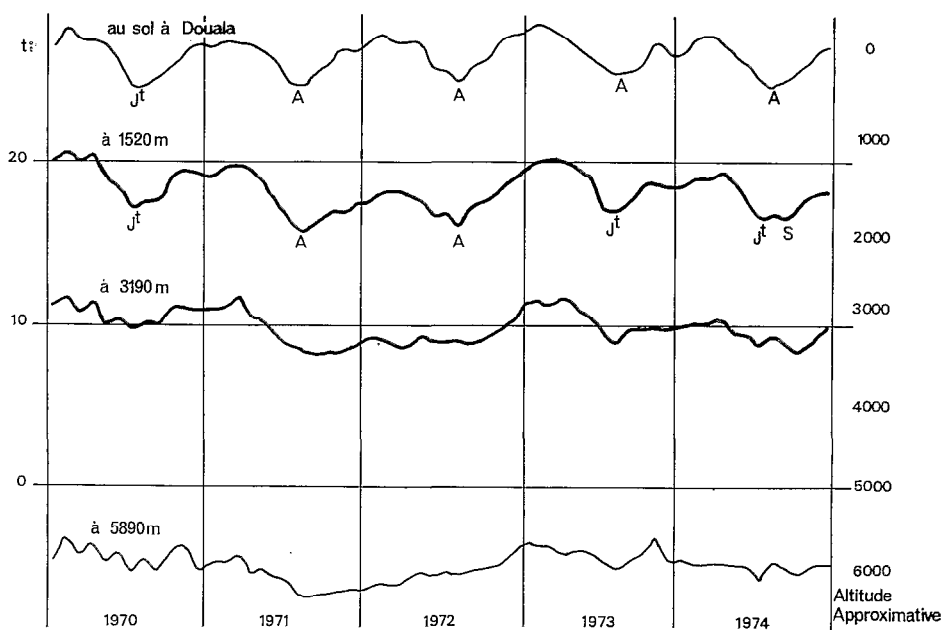


Fig. 5. — Variations des températures moyennes mensuelles à Douala à différentes altitudes (1970-1974)

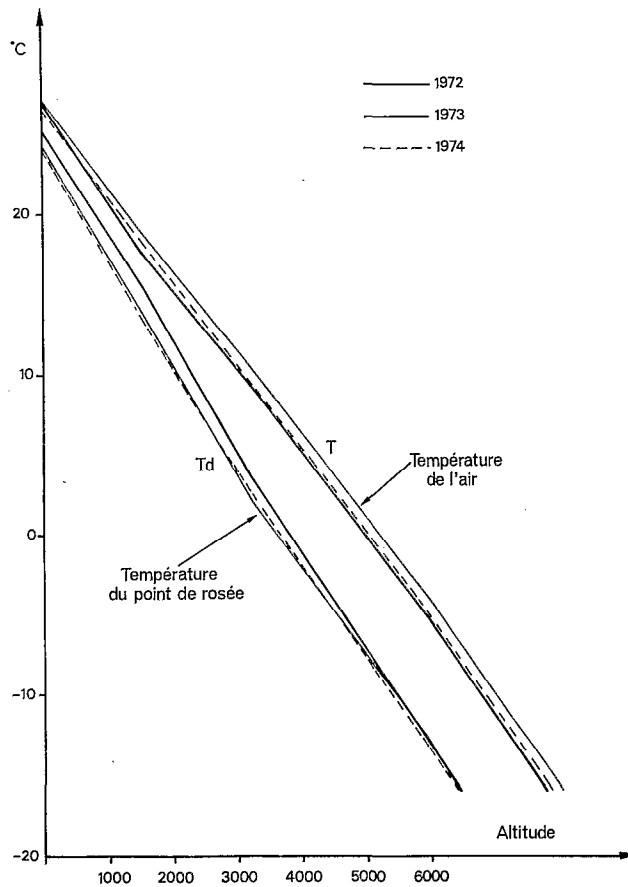


Fig. 6. — Variations des températures annuelles (T et Td) avec l'altitude à Douala (1972, 1973, 1974).

Les moyennes annuelles des différents paramètres ont été calculées pour les cinq dernières années et sont données dans le tableau III. L'évolution mensuelle des températures au sol et en altitude, de 1970 à 1974, est indiquée sur le graphique de la figure 5.

La figure 6 donne les variations de la température moyenne annuelle (T) et de la température moyenne annuelle du point de rosée (Td) en fonction de l'altitude pour les années 72, 73 et 74. Le graphique montre un gradient régulier, sensiblement le même d'une année à l'autre, mais avec un décalage des températures qu'il était intéressant de rapporter aux variations de la composition isotopique des précipitations.

#### 3.4.2. $\delta^{18}\text{O}$ et température moyenne de l'atmosphère

À partir des courbes annuelles de température de l'atmosphère, en fonction de l'altitude, nous avons attribué à chaque poste pluviométrique une température moyenne annuelle pour 1972, 1973 et 1974. Une étude de corrélation  $\delta^{18}\text{O}/T$  a été faite. Elle n'est pas satisfaisante (1). Si la teneur en isotopes lourds diminue d'une manière générale, avec la température, on constate ici qu'aux températures plus fortes de 1973 correspondent des teneurs en isotopes plus faibles. L'inverse aurait paru plus satisfaisant. Or, le caractère de sécheresse de l'année 1973 n'exclut pas pour autant une provenance identique des masses de vapeurs (domaine de la mousson). On doit donc admettre qu'au niveau de l'analyse fine, la température moyenne ne constitue pas le paramètre idoine.

(1) {  $r = 0,90$  seulement et  $\delta^{18}\text{O} = 0,3 T - 10,7$  }

### 3.4.3. $\delta^{18}\text{O}$ et température du point de rosée

L'introduction du paramètre Td (température du point de rosée) paraît beaucoup plus satisfaisante. En effet, les variations de Td d'une année à l'autre vont dans le même sens que celles des teneurs en isotopes lourds. Pour une même température Td, la différence d'altitude porte sur 200 à 300 m entre 1972 d'une part et 1973, 1974 d'autre part.

Ces valeurs sont à rapprocher des 300 et 450 m de décalage entre 72 et 73, 74 dans les relations  $\delta^{18}\text{O} = f(z)$ . Ceci laisse présager l'existence d'une corrélation interannuelle satisfaisante. En outre, les phénomènes de condensation sont liés à la température du point de rosée et la recherche d'une régression  $\delta^{18}\text{O} = f(\text{Td})$  est tout à fait conforme à la théorie de la distillation isotopique.

Les corrélations année par année montrent des coefficients très voisins de ceux obtenus à partir de l'altitude z, du fait de la quasi linéarité de la relation  $\text{Td} = f(z)$

$$1972 \quad r = 0,987$$

$$1973 \quad r = 0,988$$

$$1974 \quad r = 0,961$$

L'échantillon 1972-1973 montre un coefficient de corrélation de 0,986 contre 0,98 pour  $\delta^{18}\text{O} = f(z)$  et un écart résiduel  $v = 0,35$ . Enfin, l'échantillon global portant sur 59 couples montre un coefficient de corrélation de 0,976 (contre 0,969 pour  $\delta^{18}\text{O} = f(z)$ ). Le gain obtenu n'est donc pas négligeable.

L'écart résiduel est de  $v = 0,46$ .

L'équation de la droite de régression s'écrit :

$$\delta^{18}\text{O} = 0,232 \text{ Td} - 8,82$$

### 3.5. VARIATIONS DE $\delta^2\text{H}$

La composition en Deutérium des précipitations suit des variations tout à fait comparables à celles qui ont été observées pour l'oxygène 18. Ces isotopes lourds obéissent aux mêmes types de fractionnement. L'échantillon de mesures, plus réduit, 18 valeurs portant sur 1972 et 1973, ne permet pas une analyse fine. On retrouve cependant le décalage entre les valeurs de 1972 et celles de 1973.

L'étude de la corrélation entre  $\delta^2\text{H}$  et l'altitude a été faite. L'équation de la droite de régression de l'échantillon 72-73 s'écrit :

$$\delta^2\text{H} = \delta D = -1,20 z \cdot 10^{-2} - 15,4$$

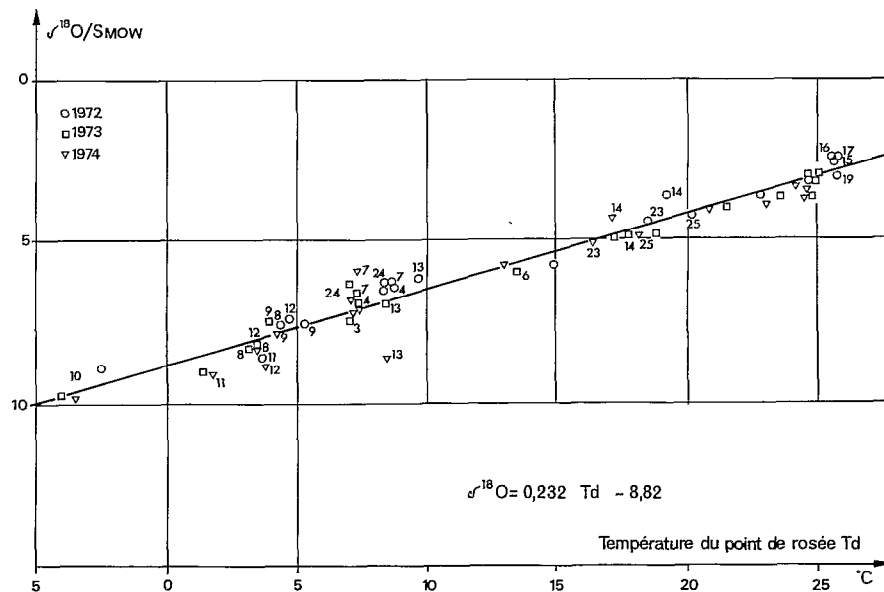
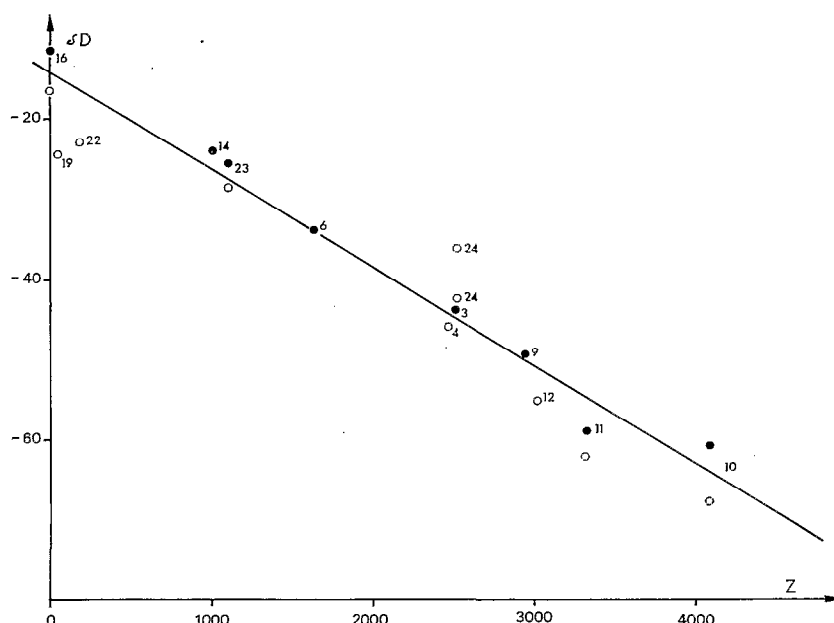


Fig. 7. — Précipitations au mont Cameroun. Relation  $\delta^{18}\text{O}$ -Td (point de rosée).

Fig. 8. — Précipitations au mont Cameroun. Relation entre  $\delta D$  et l'altitude.

### 3.6. RELATION ENTRE $\delta^{18}O$ ET $\delta^2H$

L'établissement de relations générales linéaires, entre les teneurs en isotopes lourds ( $^{18}O$  et  $D$ ) et l'altitude ou la température, implique que se vérifie une corrélation du même type entre les teneurs respectives en  $^{18}O$  et  $D$ .

A partir de l'échantillon dont nous disposons (réduit à 18 couples mais seulement 13 stations) l'équation de la droite de régression s'écrit :

$$\delta D = 7,5 \delta^{18}O + 6,4$$

H. CRAIG a montré que les précipitations à l'échelle du globe obéissent à la loi générale d'expression

$$\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$$

Si, dans le détail des régions météorologiques, l'ordonnée à l'origine n'est pas toujours la même, la pente, par contre, se révèle extrêmement constante.

Le graphique de la figure 9 montre que la droite expérimentale obtenue pour le Mont Cameroun est très proche de la droite de CRAIG qui caractérise le mécanisme de condensation à l'exclusion de toute évaporation successive. Ceci apporte a posteriori la preuve de la validité de la technique employée dans la mesure des précipitations par des totalisateurs annuels. L'eau recueillie ne subit pas d'évaporation occulte.

Il est à noter par ailleurs que la droite expérimentale ne s'écarte de la droite de CRAIG que sous le poids des stations les plus basses en altitude n° 16, 14, 22 et 19 dont les précipitations auraient subi une très légère évaporation par rapport au reste de la collection.

Ces stations, de par leur faible altitude, sont les plus susceptibles d'une légère sous-saturation en humidité de l'atmosphère. Ceci expliquerait que l'eau recueillie à ces stations ait subi une légère évaporation au cours de la précipitation dans un profil atmosphérique non saturé.

### 3.7. CRITIQUE DES RÉSULTATS

Il peut paraître illusoire d'espérer un gain d'information significatif d'une analyse fine sur des échantillons pris à l'échelle de l'année.

Cette critique est basée sur :

- les variations climatiques observées entre le littoral et le sommet, entre le versant maritime et le versant sous le vent ;
- les variations saisonnières de la composition isotopique des précipitations.

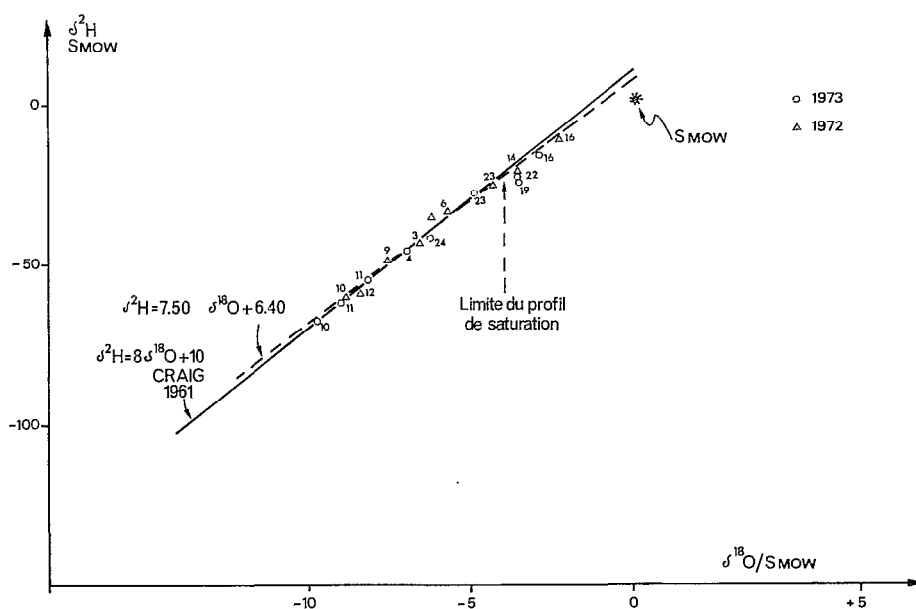


Fig. 9. — Précipitations au mont Cameroun. Relation  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ .

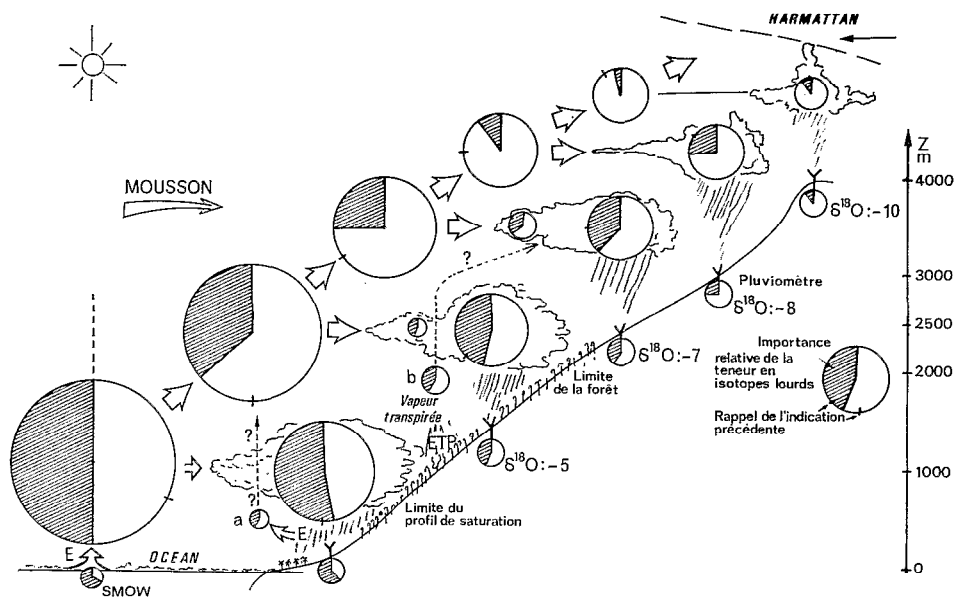


Fig. 10. — Schéma explicatif des variations de la composition isotopique des précipitations au mont Cameroun.

Horizontalement : enrichissement relatif en Isotopes lourds par condensation de la masse de vapeur à différents niveaux.

Verticalement : appauvrissement en Isotopes lourds de la masse de vapeur par évaporation (E) de l'eau océanique, puis du fait des condensations successives.

a, b : phénomènes secondaires hypothétiques liés à l'évaporation en cours de précipitation (a) ou à l'évapotranspiration de la forêt (b).

En fait, les variations climatiques, entre le rivage et le sommet, entre les versants, n'apportent pas de variations significatives dans les teneurs en isotopes lourds des précipitations, autres que celles dues à l'altitude et aux variations de température. De légères anomalies par rapport au comportement d'ensemble, pour les postes 24, 4 et 7, pourraient s'expliquer par un effet de relief local, ou encore par la participation aux précipitations reçues à ces postes, de vapeur transpirée par la forêt plus basse en altitude ; bien que d'autres postes comme les n<sup>os</sup> 3 et 13 ne viennent pas confirmer ces hypothèses.

En ce qui concerne les postes de basse altitude 16, 14, 22 et 19, l'hypothèse de précipitations dans un profil atmosphérique non saturé, mis en évidence dans l'étude de la relation  $D = f(\delta^{18}O)$ , paraît plus plausible mais demande à être confirmée par d'autres mesures sur les stations correspondantes.

En ne considérant que l'échantillon de la façade maritime sur un profil qui va de Bakingele au sommet du Mont Cameroun (pour lequel nous avons étudié l'évolution des précipitations avec l'altitude), on pouvait espérer obtenir de meilleures relations dans l'étude des variations des compositions isotopiques. Il était, en effet, logique de supposer que le mécanisme de distillation fractionnée des masses de vapeur soit plus pur et plus régulier sur la façade maritime que pour l'ensemble de la région soumise au nord à certaines influences continentales. En fait, la dispersion des valeurs est tout à fait comparable à celle de l'ensemble de l'échantillon et on n'obtient pas de meilleure relation.

La saison des pluies dure de onze à douze mois sur la côte, et seulement quatre mois au sommet ; de ce fait, des variations saisonnières de la composition isotopique des précipitations pourraient a priori être responsables d'une forte dispersion dans les résultats. Or, cette dispersion reste faible.

Ces variations saisonnières de teneurs en isotopes lourds sont généralement liées à celles du profil thermique en cours d'année, ce qui explique qu'en zone tempérée ces variations soient importantes entre les pluies hivernales et estivales. Quelques mesures effectuées dans la région de Garoua (9° de latitude nord) montrent également des variations importantes à l'échelle du mois (climat tropical).

Mais pour le Mont Cameroun, il n'est pas certain que ces variations soient importantes. Climat équatorial et influence océanique contribuent à réduire les amplitudes thermiques annuelles, et, par suite, les variations de la composition isotopique des précipitations en un lieu donné.

En supposant même que ces variations ne soient pas négligeables, la distribution mensuelle des précipitations suffirait à expliquer l'homogénéité de la collection d'échantillons annuels.

Les histogrammes des stations côtières (Debundscha, Isongo, Idenau), comme ceux de stations plus continentales (Mbanga, Ekona, Buea), montrent que 70 à 80% des précipitations tombent de juin à octobre, époque à laquelle le sommet du Mont Cameroun est lui-même dans le domaine de la mousson.

Le poids des précipitations de décembre, janvier, février, inexistantes en altitude, apparaît relativement négligeables. D'éventuelles variations des teneurs en isotopes lourds à cette époque auraient peu d'incidence à l'échelle de l'échantillon annuel.

Cependant, ces éventuelles variations, et l'absence de précipitations en altitude pendant l'hiver boréal, pourraient expliquer une légère diminution du gradient de  $\delta^{18}O = f(z)$  entre 3 000 et 4 000 m (postes 10 et 11).

### 3.8. CONCLUSIONS

L'analyse de ces phénomènes secondaires susceptibles de modifier localement la composition isotopique des précipitations ne montre en définitive rien de bien significatif compte tenu de la faible dispersion des variations étudiées. Le schéma de la figure 10 illustre la genèse de ces variations.

La poursuite des analyses en 1975 et 1976, l'étude des variations isotopiques mensuelles en 1976, pour Idenau, permettront sans doute de préciser ces points de détail.

Il apparaît d'ores et déjà que les grosses variations climatiques observées au cours des trois années de mesure n'ont pas eu d'effet majeur sur la composition isotopique des précipitations.

Climat équatorial, présence de l'océan et épaisseur de la mousson, entraînent pour la région du Mont Cameroun un mécanisme très pur dans la distillation fractionnée des masses de vapeur, probablement exceptionnel à l'échelle du globe.

### BIBLIOGRAPHIE

FONTES (J. Ch.) – Quelques aspects isotopiques du cycle des eaux naturelles, p. 197-225. (In comptes rendus d'un Colloque international sur les isotopes de l'oxygène, décembre 1972, Cadarache, European Molecular Biology Organization).

- LEFEVRE (R.) – 1967 – Aspect de la pluviométrie dans la région du Mont Cameroun. *Cahiers d'Hydrologie ORSTOM*, vol. IV, n° 4, p. 15 à 43.
- OLIVRY (J. C.) – Les déficits hydropluviométriques au Cameroun pendant les années sèches 1972 et 1973. *ORSTOM*, Yaoundé, juin 1974, 70 p.
- SUCHEL (J. B.) – 1972 – La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. *Travaux et Documents de Géographie Tropicale* n° 5, CEGET, 287 p.
- MÉTÉOROLOGIE NATIONALE – Résumés mensuels du temps. Années 1970, 1971, 1972, 1973, 1974.