

O
N
A
R
E
S
T

INSTITUT DE RECHERCHES SUR LES TECHNIQUES,
L'INDUSTRIE ET LE SOUS-SOL

COMPOSITION ISOTOPIQUE
DES PRÉCIPITATIONS DE LA RÉGION
DU MONT CAMEROUN

J. CH. FONTES et J. C. OLIVRY

Mars 1977



71701

OFFICE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE

INSTITUT DE RECHERCHES SUR LES TECHNIQUES
L'INDUSTRIE ET LE SOUS-SOL

COMPOSITION ISOTOPIQUE
DES PRECIPITATIONS DE LA REGION DU MONT CAMEROUN
0-0-0-0-0-0

J.CH. FONTES⁺ et J.C. OLIVRY⁺⁺

Mars 1977

+ Laboratoire de Géologie Dynamique, 4, Place Jussieu, 75230 PARIS
CEDEX 05, France.

++ Hydrologue de l'ORSTOM, à l'ONAREST (IRTISS) BP 4110 YAOUNDE.

SOMMAIRE

1 - GENERALITES

- 1.1. Aperçu géographique et climatique
- 1.2. Prélèvements

2 - ETUDE DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS

- 2.1. Précipitations moyennes
- 2.2. Précipitations en 1972, 1973, 1974, 1975

3 - ANALYSES ISOTOPIQUES DES PRECIPITATIONS

- 3.1. Généralités
- 3.2. Résultats
- 3.3. Relation entre les teneurs annuelles en oxygène 18 et l'altitude
 - 3.3.1. Etude des corrélations
 - 3.3.2. Les gradients
 - 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
 - 3.4.4. Discussion des résultats
- 3.5. Variations de $\delta^2\text{H}$
- 3.6. Relation : entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$
- 3.7. Conclusions

BIBLIOGRAPHIE

1 - GENERALITES

1.1. Aperçu géographique et climatique

Au fond du Golfe de Guinée, et plus précisément du Golfe de Biafra, le Mont Cameroun, ou Fako, élève sa masse volcanique à plus de 4000 m au-dessus de la mer. Il est le dernier témoin continental de l'activité de la "ligne du Cameroun", cette zone de fractures qui a donné naissance à la Dorsale Camerounaise (Adamaoua, Monts de Bamenda etc...) et se prolonge dans l'Atlantique par les îles de Fernando Po, Principe, Sao Thome et Annobon.

Les vents dominants venus de l'océan (WSW) viennent buter sur cet obstacle orographique isolé qui s'oppose à la progression de la mousson. Il s'ensuit que la distribution régionale des précipitations est très hétérogène. Ainsi, sur le versant maritime, certaines stations reçoivent des hauteurs annuelles de précipitations comparables aux records mondiaux de Tcherapundji, des îles Hawaï et de la Réunion, tandis que, sous le vent, le versant ENE est beaucoup moins arrosé. La hauteur annuelle moyenne des précipitations évolue de près de 10 m à Debundscha sur la côte, à moins de 2 m à Meanja 40 km à l'intérieur. Cependant, en chaque station, la répartition mensuelle relative des précipitations reste assez semblable 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 des précipitations avec l'altitude. La masse d'air humide de mousson s'enfonce en biseau aigu sous la masse d'air sec et 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 du vent sec venu du Sahara (Harmattan) pendant une bonne partie de l'année alors que les masses humides de la mousson engendrent dans le même temps d'importantes précipitations sur la côte. Le Mont Cameroun présente, sur une verticale, le raccourci des variations climatiques que l'on observe en latitude.

La limite supérieure de la forêt, vers 2500 m, marque le passage du climat équatorial au climat tropical d'altitude dont la saison sèche pourrait durer de 5 à 6 mois. L'absence de précipitations en altitude pendant plusieurs mois se traduit dans le régime hydrologique de petits fleuves côtiers, tel que la Sanje, par la persistance de basses eaux jusqu'au mois de Juin.

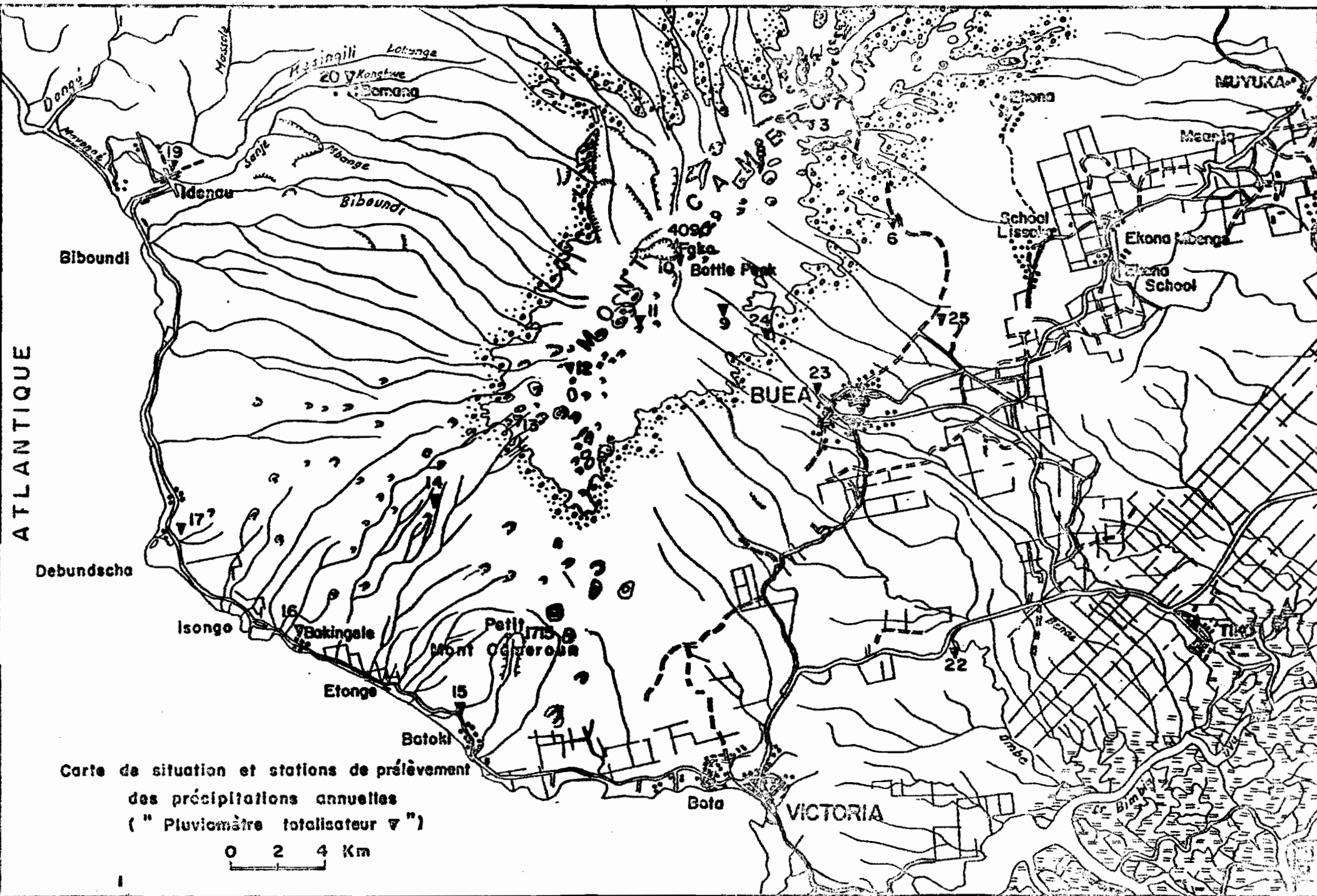
1.2. Prélèvements

La mise en valeur 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 d'altitude. Plus en altitude, on ne disposait d'aucune observation. Aussi, depuis 1966, l'ORSTOM a mis en service une vingtaine de pluviomètres totalisateurs étagés en altitude sur les versants Nord-Est et Sud-Ouest (voir carte 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 minérale renouvelée chaque année. L'altitude des différentes stations a été déterminée d'après les cartes IGN au 1/50.000 et contrôlée par mesures barométriques. L'erreur de positionnement en altitude n'excède pas 5 m.

La pluviométrie dans la région du Mont Cameroun a fait l'objet d'une étude préliminaire (LEFEVRE, 1967) qui doit être reprise à l'issue de 10 années d'observations.

Les mesures pluviométriques sont complétées depuis 1972 par des prélèvements d'eau de précipitations effectués à chaque station au moment de la tournée annuelle de mesures et destinés à l'analyse des teneurs en isotopes lourds. L'étude des variations de la composition isotopique des précipitations 1972, 1973, 1974 et 1975, qui fait l'objet de cette note, impliquait tout d'abord de replacer brièvement la pluviosité de ces quatre années dans le contexte général de la pluviométrie du Mont Cameroun.

date
des
1986



Carte de situation et stations de prélèvement
des précipitations annuelles
(" Pluviomètre totalisateur ▽ ")

0 2 4 Km

2 - ETUDE DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS

2.1. Précipitations moyennes

Depuis l'installation des pluviomètres ORSTOM, nous disposons de 8 années complètes d'observations en 12 stations. Les périodes d'observation sont plus courtes pour les autres stations. Les hauteurs moyennes de précipitations sont indiquées dans le tableau 1. Les variations des hauteurs de précipitations sur les versants sont très probablement liées à l'épaisseur de la mousson puisque la pluviosité se révèle, dans l'ensemble, plus faible en altitude.

A l'examen des observations disponibles pour les stations de longue durée de Debundscha et Idenau (fig. 1), il s'avère que la pluviosité de ces 8 dernières années a été moins forte que sur l'ensemble de la période de relevés (1).

	Moyenne 8 ans	21 ans	38 ans
Debundscha	9126 mm		9895 mm
Idenau	7786 mm	8515 mm	

A partir des moyennes obtenues aux stations ORSTOM du versant maritime, et en utilisant les histogrammes d'ISONGO, IDENAU et DEBUNDSCHA, nous avons estimé approximativement la longueur de la saison des pluies en fonction de l'altitude. La saison des pluies durerait de 4 à 5 mois au sommet du Mont Cameroun, de 5 à 6 mois vers 3000 m et de 6 à 7 mois à 2500 m au-dessus de la forêt. A 1000 m d'altitude, la saison des pluies aurait une durée pratiquement équivalente à celle des stations côtières (11 - 12 mois).

(1) Maximum absolu observé à Debundscha : 14694 mm en 1919.

2.2. Précipitations en 1972, 1973, 1974 et 1975.

Les hauteurs annuelles des précipitations ont été reportées dans le tableau 1 et la figure 2. 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, déficitaires pour 9 postes et excédentaires pour 4 postes en 1974. La moyenne des précipitations moyennes tombées sur l'ensemble des stations est de 4388 mm sur 8 ans ; elle est de 4715 mm en 1972 (+ 7,5 %), 3542 mm en 1973 (- 19 %) de 4161 mm en 1974 (-5 %) et de 4106 mm en 1975 (-6,5 %).

En 1972 et 1973, la sécheresse catastrophique du Sahel s'est manifestée au Cameroun jusqu'à des latitudes très basses puisque les déficits pluviométriques les plus importants ont été observés sur la façade maritime (Douala et Tiko) et dans la région de l'Ouest. Ces déficits semblent d'ailleurs persister en 1974 et 1975.

	Moyenne	1972	1973	1974	1975
	Pmm	Pmm	Pmm	Pmm	Pmm
	écart %	écart %	écart %	écart %	écart %
Douala	4333	3340 -21,7	3451 -20,4	3575 + 17,5	4117 -5 %
Tiko	3021	2622 -13,0	2039 -32,5	2563 - 15,0	2230 -26 %

Il est donc surprenant de mettre en évidence au Mont Cameroun une assez forte pluviosité en 1972. En 1973, les déficits pluviométriques sont attribués à la faible ampleur de la mousson, encore manifeste en 1974 et 1975.

La figure 2 illustre les variations de la pluviométrie au cours des 4 années et en année moyenne sur un profil WSW-ENE du Mont Cameroun. Il montre l'opposition classique de comportement des versants au vent et sous le vent dans les mécanismes de condensation, ainsi que des gradients pluviométriques en altitude variables avec l'exposition.

T A B L E A U 1

HAUTEURS ANNUELLES DES PRECIPITATIONS
AU MONT CAMEROUN

N° Poste pluviométrique et lieudit		Altitude m	MOYENNE calculée sur 8 ans, en mm	1972	1973	1974	1975
				mm	mm	mm	mm
Versant Nord	3	2500	-	3315	2735	3050	3125
Station VHF	4	2460	-	2970	2150	2640	3275
Route VHF	6	1610	3448	4070	2850	3175	3515
Versant Nord	7	2475	2824	3050	2600	1950	3425
Nord	8	3050	2145	2480	1900	2025	2725
Hutte 2	9	2925	2602	3120	2310	2725	3050
Sommet Bottle Peak	10	4050	2150	2540	1875	2150	2300
SW	11	3300	1880	2100	1400	1550	2075
Versant SW	12	3000	2515	3030	1830	2475	2900
Limite Forêt SW	13	2320	3329	3945	2270	2825	3240
Forêt SW	14	1000	7530	7210	4810	8735	8290
Batoki	15	50	-	6130	4590	5295	5115
Bakingélé	16	10	7318	7930	5365	6785	6565
Debundscha	17	20	9126	9200	8430	8015	8350
Idenau	19	30	7786	7915	6870	7530	7140
Bomana	20	460	-	5525	5050	-	5870
Brasseries	22	180	-	4455	1990	2700	2150
UPPER Farm	23	1100	-	3730	2210	2725	2665
Limite Forêt BUEA	24	2500	-	3800	2680	3075	3200
Bonakanda	25	860	-	3730	2990	3225	3140
MOYENNES			4388	4715	3542	4161	4106

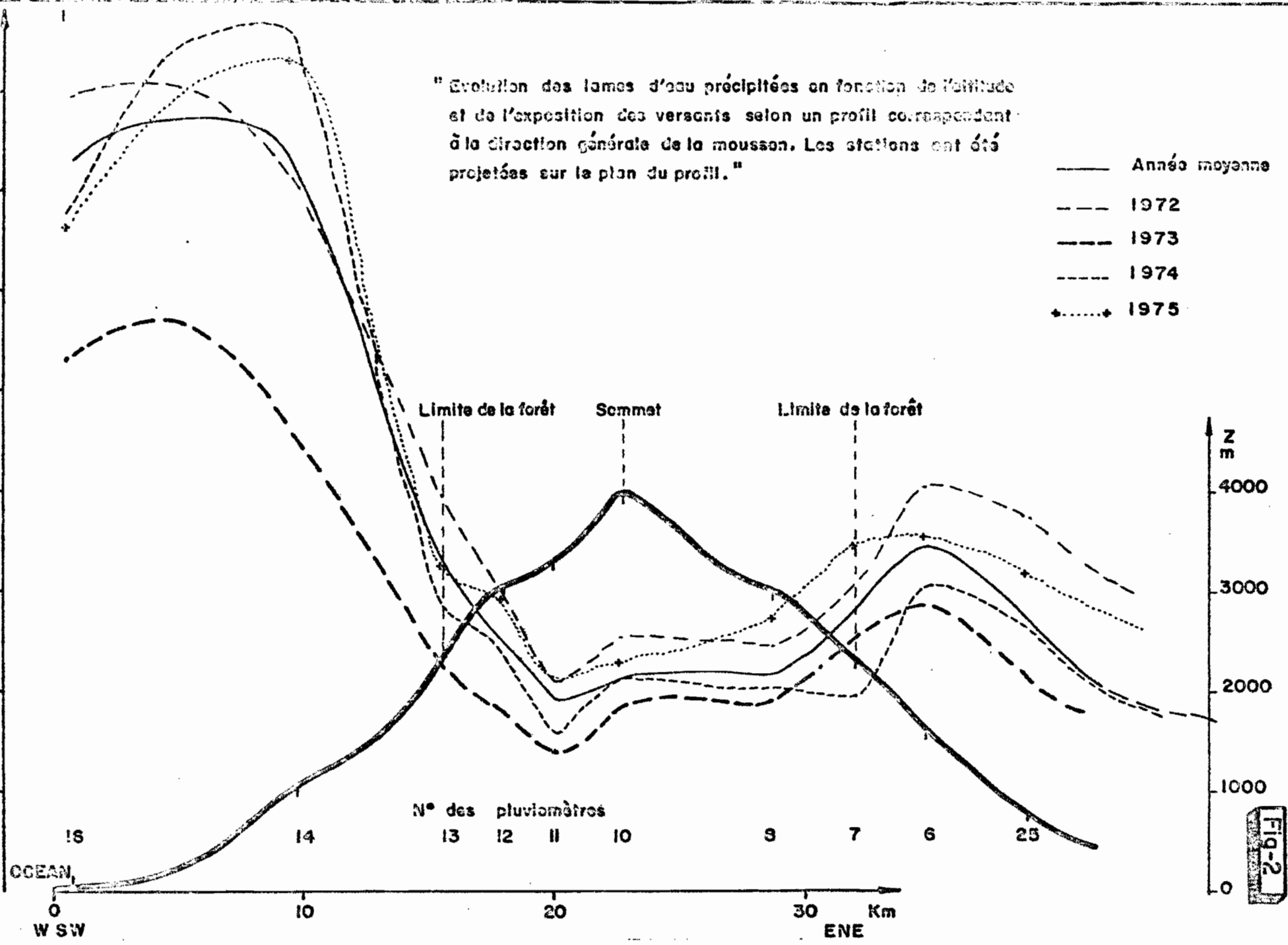


Fig-2

3 - ANALYSES ISOTOPIQUES DES PRECIPITATIONS

3.1. Généralités

Les tensions de vapeur des différentes espèces isotopiques qui constituent l'eau sont légèrement plus faibles pour les molécules "lourdes" $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ et $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ que pour la forme banale $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$. Il s'ensuit un fractionnement isotopique lors des changements partiels de phase. La vapeur est appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide qui lui donne naissance. A l'inverse, la précipitation est enrichie en isotopes lourds par rapport à la vapeur dont elle procède. Chaque épisode de condensation tend à délester le réservoir de vapeur de ses isotopes lourds. Comme, dans la nature, le passage vapeur-liquide est en général lié à un refroidissement, c'est la variation de température du milieu qui gouverne la variation de teneur en isotopes lourds des précipitations successives engendrées par une masse de vapeur. Les précipitations sont donc tracées dans l'intimité de leur composition isotopique en fonction des conditions thermiques qui ont présidé à leur formation. Dans la pratique, les teneurs en isotopes lourds des précipitations sont liées à la température au sol de la station de prélèvement (DANSGAARD, 1964).

Les teneurs en isotopes lourds sont exprimées en termes de δ ou parts pour mille de différence relative entre l'échantillon et l'étalon de référence international SMOW qui est représentatif de la composition isotopique moyenne de l'eau des océans :

$$\delta = \left\{ \frac{R \text{ échantillon}}{R \text{ SMOW}} - 1 \right\} \cdot 1000$$

avec $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/^1\text{H}$.

Une eau à δ négatif est appauvrie en isotopes lourds par rapport à l'océan (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. Résultats

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 Bakingélé en 1972 et -9,95 au sommet en 1974, pour $\delta^2\text{H}$ entre -12,4 en 1972 (Bakingélé) et -68,0 au sommet en 1973.

TABLEAU II

PRECIPITATIONS DU MONT CAMEROUN

ANALYSES ISOTOPIQUES DES ECHANTILLONS ANNUELS MOYENS

N° Poste pluviométrique et lieu dit	Altitude	1972		1973		1974	1975
		$\delta^{18}O$ SMOW	δ^2H SMOW	δ^{20} SMOW	δ^2H SMOW	$\delta^{18}O$ SMOW	$\delta^{18}O$ SMOW
3	25000	-6,59	-44,6	-7,44		-7,24	-6,99
4							
Station VHF	2460	-6,38		-6,99	-46,5	-7,04	-7,19
Route VHF	1610	-5,74	-34,7	-5,98		-5,75	-4,94
7	2475	-6,25		-6,56		-5,85	-6,71
8	3050	-7,53		-8,28		-8,33	-7,92
Hutte 2	2925	-7,57	-49,6	-7,50		-7,93	-7,39
Sommet Bottle Peak	4050	-8,89	-61,1	-9,77	-68,0	-9,95	-9,45
11	3300	-8,44	-59,2	-8,98	-62,6	-9,11	-8,24
Versant SW	3000	-7,38		-8,22	-55,4	-8,92	-7,55
Limite Forêt SW	2320	-6,13		-6,92		-8,61	-7,07
Forêt SW	1000	-3,62	-22,8	-4,86		-4,25	-4,17
Batoki	50	-2,45		-2,92		-3,28	-3,69
Bakingele	10	-2,41	-12,4	-2,93	-17,5	-3,36	-3,38
Debundscha	20	-2,61		-3,09		-3,67	-3,33
Idenau	30	-3,02		-3,59	-25,4	-3,37	-3,82
Bomana	460	-3,58		-3,94		-4,05	-3,96
Brasseries	180	-3,26		-3,61	-24,1	-3,86	-4,08
UPPER Farm	1100	-4,39	-26,2	-4,94	-29,2	-5,06	-5,59
Limite Forêt BUEA	2500	-6,25	-36,3	-6,29	-43,1	-6,74	-7,01
Bonakanda	860	-4,19		-4,73		-4,86	-4,88

3.3. Relation entre les teneurs annuelles en oxygène 18 et l'altitude

L'examen des variations de teneur en isotopes lourds que l'on pouvait attendre en fonction des variations de température de condensation avec l'altitude constituait l'objectif essentiel de cette étude.

3.3.1. Etude des corrélations

Les teneurs en oxygène 18 des précipitations recueillies à chaque poste pluviométrique pour chaque année sont corrélées aux altitudes de collecte (fig. 3). Les régressions sont très bonnes comme en témoigne le calcul des coefficients de corrélation.:

1972 $\delta^{18} O$	=	$-0,16 z 10^{-2} - 2,65$	$r = -0,978$
1973 $\delta^{18} O$	=	$-0,16 z 10^{-2} - 3,15$	$r = -0,975$
1974 $\delta^{18} O$	=	$-0,16 z 10^{-2} - 3,40$	$r = -0,962$
1975 $\delta^{18} O$	=	$-0,14 z 10^{-2} - 3,47$	$r = -0,967$

1 Les variations de la pente de la droite de régression n'excèdent pas 2 % d'une année à l'autre, excepté en 1975 où le poids des stations de basse altitude entraîne une diminution de la pente.

En considérant les valeurs des années 72-73, le coefficient de corrélation est $r = -0,980$ et l'équation de la droite $\delta^{18}O = -0,16 z 10^{-2} - 2,90$.

Avec les précipitations de 74 qui montrent une dispersion un peu forte, le coefficient de corrélation obtenue pour les 3 années est $r = -0,969$ et l'équation de la droite

$$\left(\delta^{18}O = -0,16 z 10^{-2} - 3,01 \right)$$

Pour les 4 années, le coefficient de corrélation est $r = -0,970$ et l'équation de la droite s'écrit

$$\left(\delta^{18}O = -0,16 z 10^{-2} - 3,1 \right) \quad (1)$$

(1) Ecart résiduel de $\delta^{18}O$ u = 0,21 en 72, 0,23 en 73, 0,41 pour 72-73, 0,57 en 1974, 0,52 pour 3 années et 0,37 pour 4 années.

PRECIPITATIONS MONT CAMEROUN
 RELATION $\delta^{18}O$ - ALTITUDE

- 1972 ————
- 1973 - - - -
- ▽ 1974 - - - -
- x 1975 - - - -

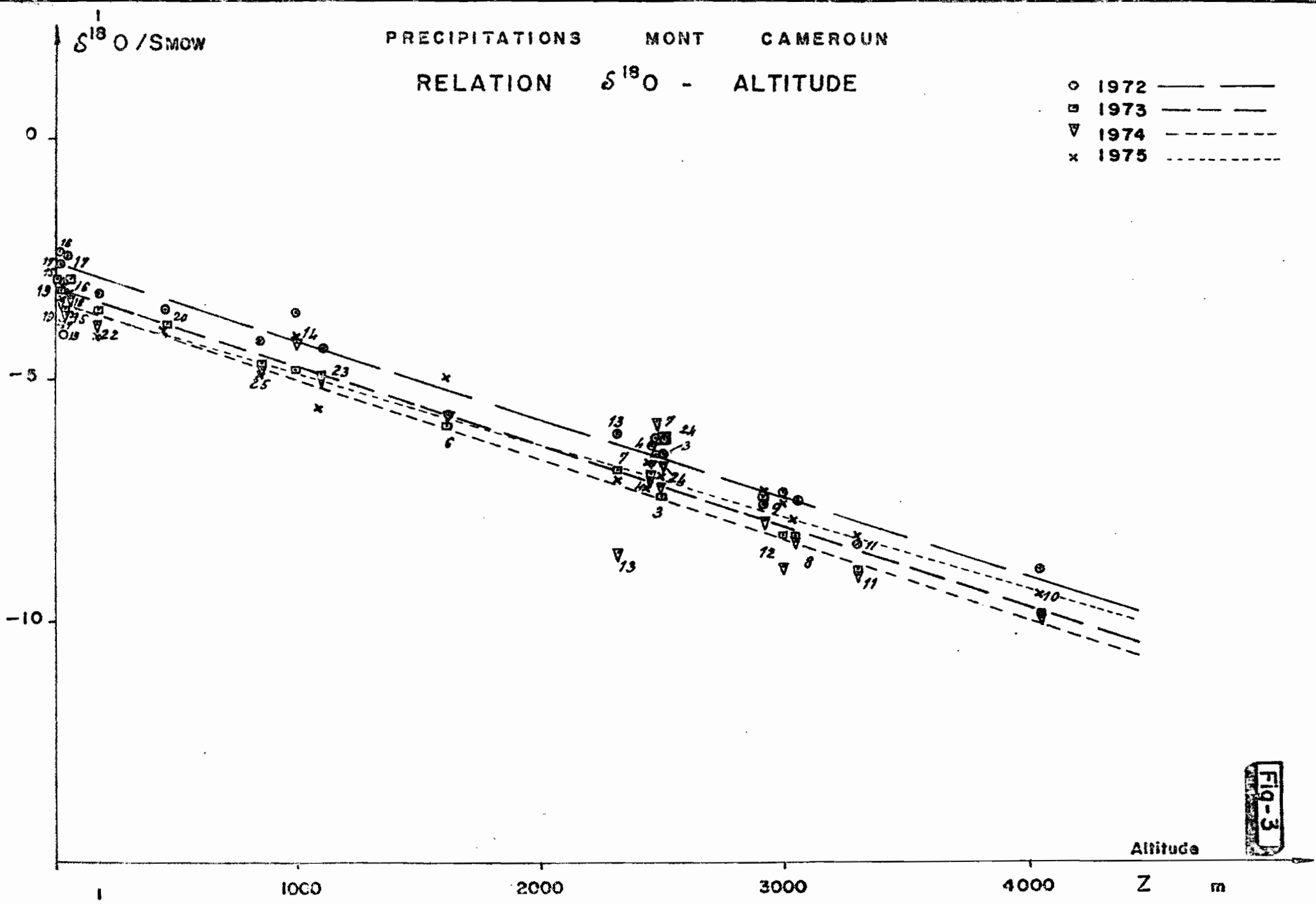


Fig-3

data | des.

3.3.2. Les gradients

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

Les teneurs en ^{18}O diminuent de 0,16‰ par 100 m gagnés en altitude.

Ce gradient est faible par rapport aux valeurs relevées au long de profils d'altitude sous différents climats (ZUPPI et al., 1974 ; PAYNE et YURTSEVER, 1974).

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 au cours d'un même épisode de précipitation neigeuse un gradient de $-0,3 \delta^{18}\text{O}/100 \text{ m}$ (TONGIORGI, 1970), soit près du double de la valeur mesurée au Mont Cameroun, alors que les deux montagnes sont situées à des latitudes très voisines (Mont Cameroun 4°N , Kilimandjaro 3°S). La différence de gradient s'explique sans doute par la proximité de la mer qui baigne le pied du Mont Cameroun, alors que le Kilimandjaro est à 300 km de l'Océan Indien. De plus, les gradients du Mont Cameroun sont des gradients annuels moyens tandis que la valeur du Kilimandjaro correspond à une situation instantanée. On peut cependant estimer que la situation particulière du Mont Cameroun détermine un gradient faible et régulier de décroissance de la température en altitude qui expliquerait que l'on se trouve en présence d'un mécanisme très pur de distillation fractionnée des masses de vapeur.

3.3.3. Variations de l'ordonnée à l'origine

La comparaison des compositions isotopiques d'une année à l'autre, pour un poste donné, montre généralement des valeurs assez voisines. Les variations n'excèdent pas en moyenne + 5 ‰ de la valeur moyenne des 4 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 et -3,47 en 1975, soit des variations respectives de -0,50, -0,25 et -0,07% dans les teneurs en oxygène 18.

Ces variations peuvent 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 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 autre possibilité est que la teneur initiale en isotopes lourds de la vapeur qui vient condenser sur les versants du Mont Cameroun soit légèrement différente d'une année à l'autre.

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, afin de mettre à l'épreuve les deux hypothèses précédentes.

3.4. Relation entre $\delta^{18}O$ 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 n'ayant pu être réalisée au Mont Cameroun, nous avons tenté l'exploitation des observations effectuées à Tiko (fig.1) et surtout Douala.

Pour Tiko, on ne dispose que d'observations au sol, tandis que pour Douala le lâcher journalier de ballons-sonde livre également des mesures dans l'atmosphère. La proximité de Douala, à 70 km du Mont Cameroun et soumis par ailleurs aux mêmes conditions climatiques, justifiait a priori l'exploitation des observations météorologiques, et notamment celle des données transmises par sondages atmosphériques.

Les moyennes annuelles des différents paramètres ont été calculées pour les 5 dernières années et sont données dans le tableau III. L'évolution mensuelle des températures au sol et en altitude de 1971 à 1975 est indiquée dans la figure 4.

La figure 5 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, 74 et 75.

Ce graphique montre un gradient régulier, sensiblement le même d'une année à l'autre, mais aussi un décalage des températures qu'il était intéressant de rapporter aux variations de la composition isotopique des précipitations.

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

A 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. La teneur en isotopes lourds diminue d'une manière générale, mais la corrélation $\delta^{18}O/T$ n'est guère satisfaisante (1).

La température moyenne annuelle au sol, calculée à partir des profils thermiques de l'atmosphère, ne constitue pas le meilleur paramètre pour rendre compte des variations de composition isotopique observées sur les versants.

3.4.3. $\delta^{18}O$ 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 (fig. 6). Ces valeurs sont à rapprocher des 300 et 450 m de décalage entre 72 et 73, 74 dans les relations $\delta^{18}O = f(z)$.

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

T A B L E A U III

VARIATIONS DE QUELQUES PARAMETRES CLIMATIQUES

A DOUALA ET TIKO

(Valeurs moyennes annuelles)

DOUALA	1970	1971	1972	1973	1974	1975
Temp. au sol	26,5	26,4	26,7	26,9	26,4	26,3
T à 1520 m	19,0	17,7	17,6	18,8	18,0	18,0
T à 3170 m	10,7	9,5	9,2	10,4	9,5	9,6
T à 5890 m	-4,4	-5,8	-5,4	-4,1	-5,0	-4,9
T à 7620 m	-14,7	-16,1	-15,8	-14,1	-14,9	-14,7
Temp. point de rosée						
Td au sol	24,8	24,5	24,8	24,2	24,0	23,6
Td à 1520 m	16,3	14,7	15,6	14,0	13,6	13,2
Td à 3170 m	5,2	3,8	3,8	2,3	2,8	2,6
Td à 5890 m	-11,3	-12,6	-13,0	-12,8	-13,2	-13,8
Td à 7620 m	-22,8	-23,6	-24,7	-24,1	-24,9	-25,2
Insolation heures	1675	1730	1761	2146	1876	1878
Précipitations mm	4307	4597	3393	3451	3575	4117
TIKO						
Temp. au sol	26,1	26,0	26,6	26,4	25,9	26,0
Insolation heures	-	1566	1799	1946	1806	1880
Précipitations mm	2758	2451	2622	2039	2563	2230

data | des

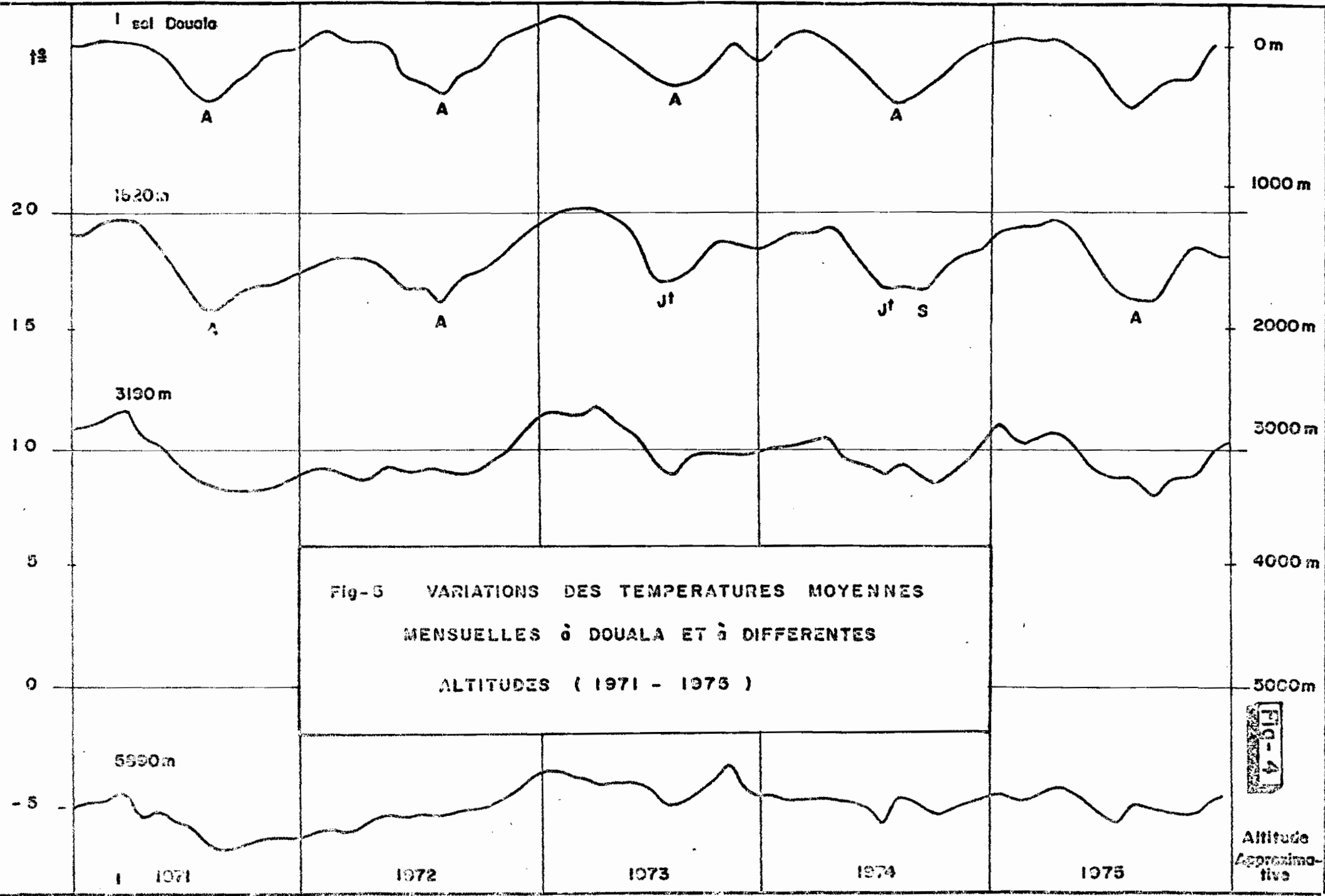
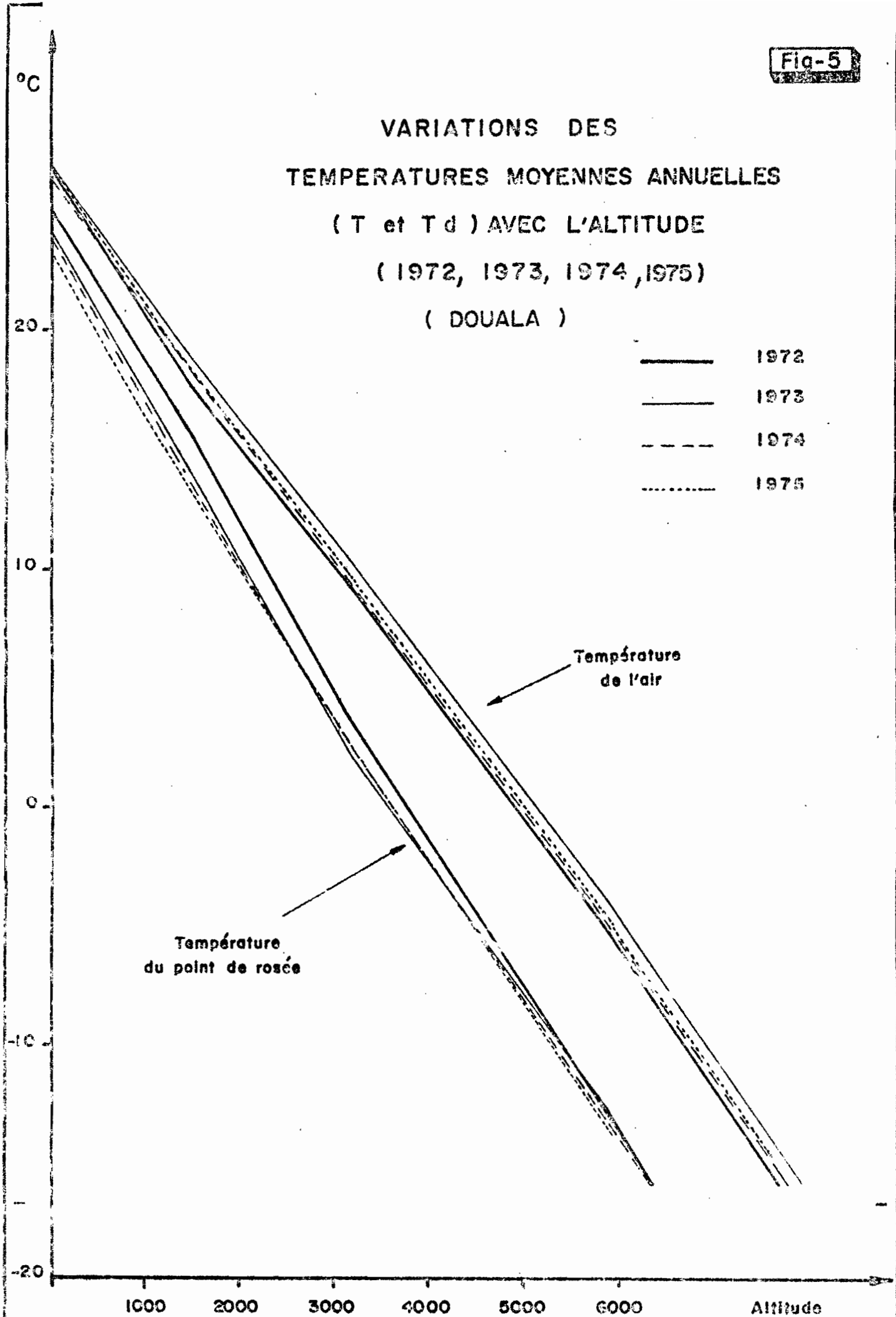


Fig-4

Altitude Approximative

VARIATIONS DES
TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES
(T et T d) AVEC L'ALTITUDE
(1972, 1973, 1974, 1975)
(DOUALA)

- 1972
- 1973
- - - 1974
- 1975



Température de l'air

Température du point de rosée

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 relation $\delta^{18}O = f(Td)$ est tout à fait conforme à la théorie de la distillation isotopique.

Les corrélations année par année montrent en 1972 et 1973 des coefficients plus significatifs que ceux que l'on obtient à partir de z :

	$\delta^{18}O = f(Td)$	$\delta^{18}O = f(z)$
1972	$r = 0,987$	$r = -0,978$
1973	$r = 0,988$	$r = -0,975$
1974	$r = 0,961$	$r = -0,962$
1975	$r = 0,963$	$r = -0,967$

L'échantillon 1972-1973 montre un coefficient de corrélation de 0,986 contre 0,980 pour $\delta^{18}O = f(z)$ et un écart $u = 0,35$. L'échantillon 72, 73, 74 portant sur 59 couples montre un coefficient de corrélation de 0,976 (contre 0,969 pour $\delta^{18}O = f(z)$) et l'équation de la droite de régression s'écrit : $\delta^{18}O = 0,232 Td - 8,82$.

Pour l'échantillon global des 4 années (79 couples) le coefficient tombe à 0,953 et l'équation de la droite s'écrit :

$$\delta^{18}O = 0,227 Td - 8,73.$$

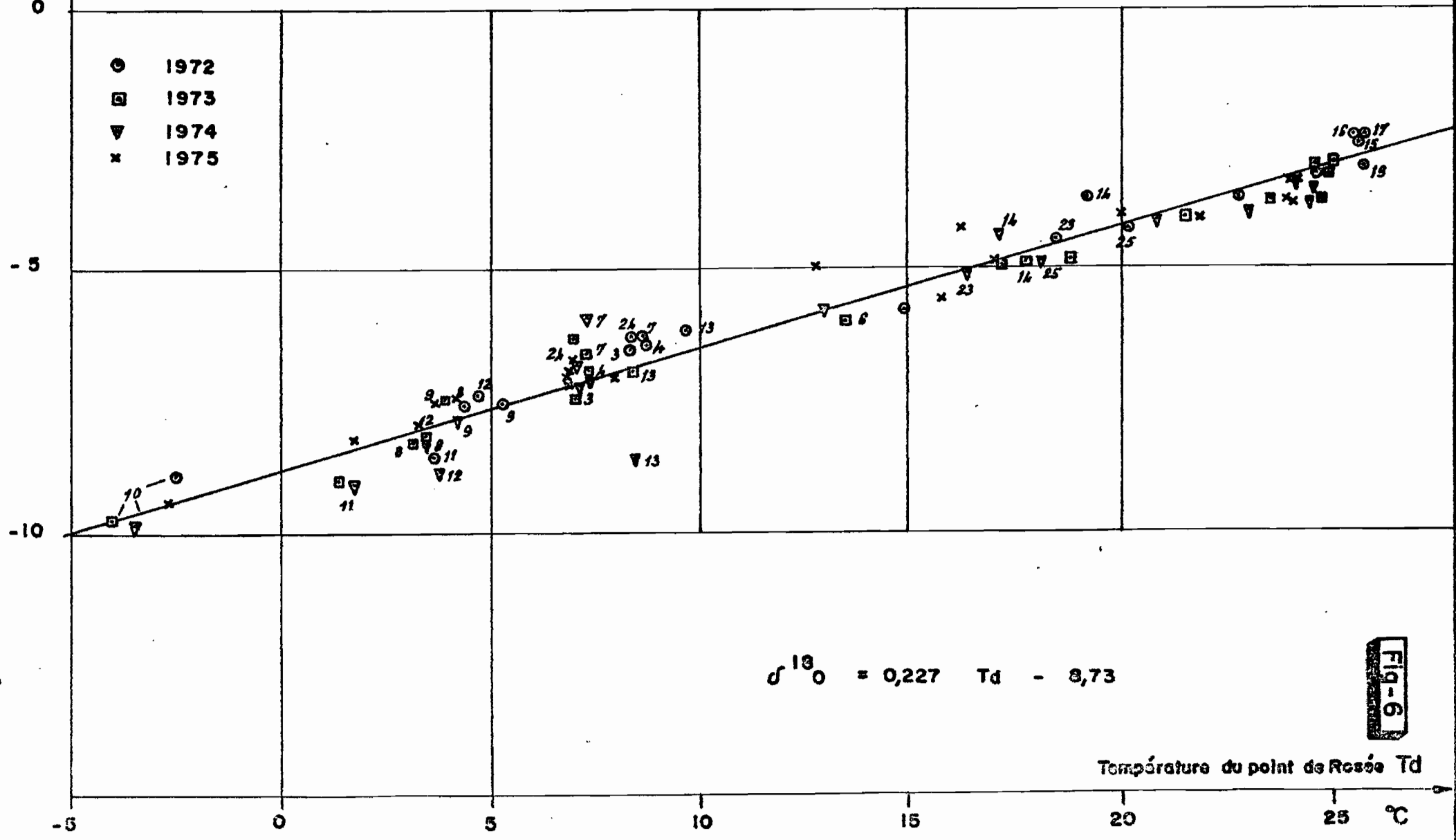
Ces corrélations entre la teneur en oxygène 18 et la température de condensation commençante montrent bien que la température de changement de phase, à partir d'une même réserve de vapeur, est le facteur essentiel qui régit la composition isotopique des précipitations sur les flancs du Mont Cameroun. Le paramètre Td est plus significatif lorsque la pluviosité de l'année considérée s'écarte sensiblement du régime interannuel des précipitations.

$\delta^{18}O / \text{SMOW}$

PRECIPITATIONS MONT CAMEROUN

RELATION $\delta^{18}O$ - Td POINT DE ROSEE

- 1972
- 1973
- ▽ 1974
- x 1975



$\delta^{18}O = 0,227 \text{ Td} - 8,73$

Fig-6

Température du point de Rosée Td

date
des.

3.4.4. Discussion des résultats

En se limitant à l'examen du profil de la façade maritime qui s'étend de Bakingélé 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 d'attendre un mécanisme de distillation fractionnée des masses de vapeur 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 11 à 12 mois sur la côte et est vraisemblablement plus courte au sommet. De ce fait, les variations saisonnières de la composition isotopique des précipitations devraient engendrer une forte dispersion dans les résultats. Or, cette dispersion reste faible. Ces variations saisonnières de teneurs en isotopes lourds des précipitations 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. Sous climat tropical, le cœur de la saison humide est marqué par une teneur minimale des précipitations en isotopes lourds.

Mais, pour le Mont Cameroun, ces variations isotopiques saisonnières ont pratiquement disparu. 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.

Le graphique de la figure 4 montre que des oscillations thermiques saisonnières de 3 à 4 degrés persistent aux différentes altitudes. Transcrites en variations de composition isotopique des pluies à l'aide de la relation locale $\delta^{18}O = 0,3t^{\circ}C - 10,7$, cette fluctuation devrait déterminer des variations saisonnières maximales de $\delta^{18}O$ ne dépassant guère 1 ‰. Cet écart potentiel, imputable au fait que la distribution temporelle des précipitations n'est probablement pas la même sur tout le versant, se trouve dilué dans l'échantillon moyen annuel qui, dans sa plus large part, correspond aux pluies du coeur de la mousson. En effet, les histogrammes des stations côtières (Debundscha, Isongo, Idenau) comme ceux de stations plus continentales (Mbanga, Ekona, Buéa) 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.

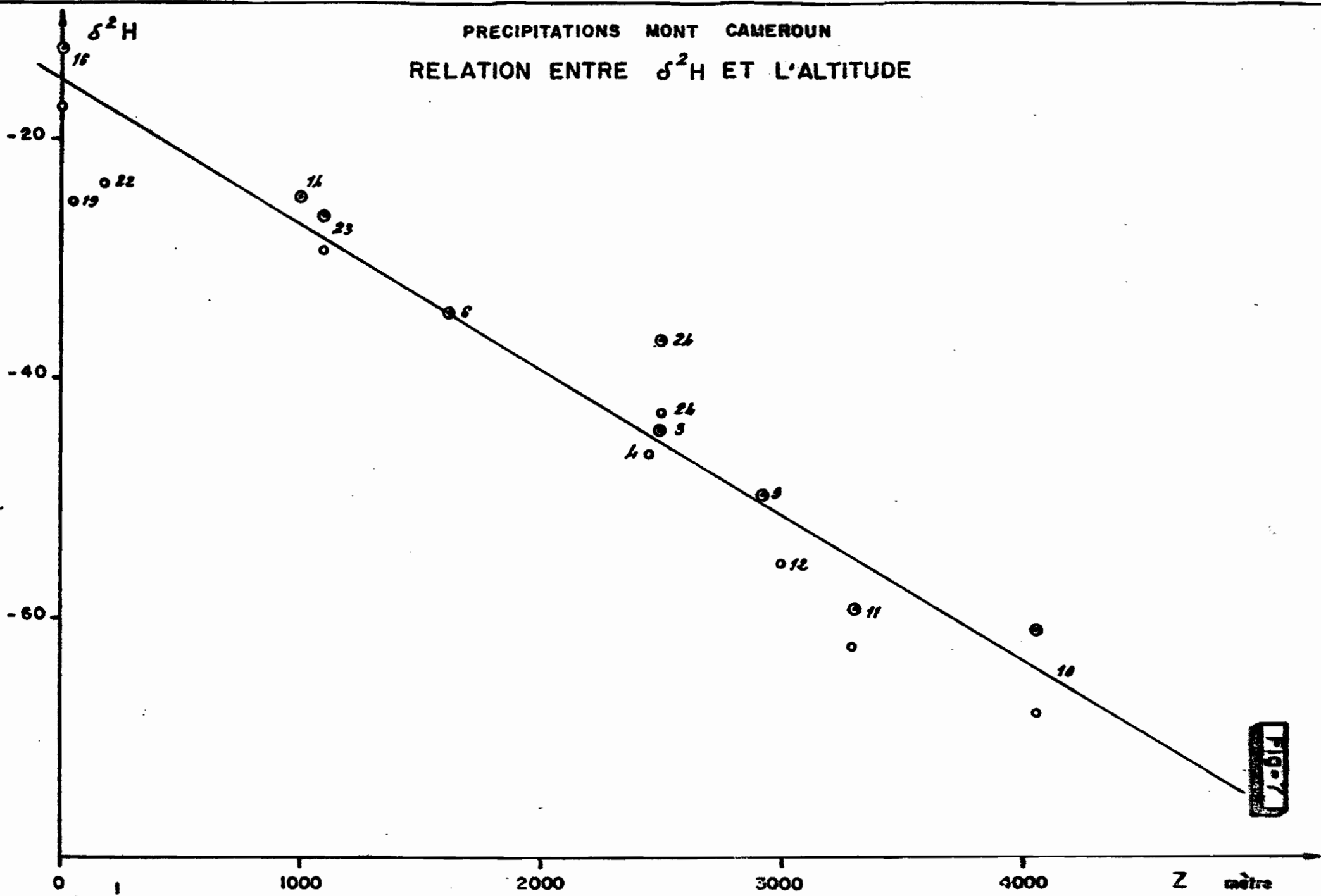
3.5. Variations de δ^2H .

La teneur en deuterium des précipitations suit des variations tout à fait comparables à celles qui ont été observées pour l'oxygène 18 (fig.7). 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 détaillée. On retrouve cependant le décalage entre les valeurs de 1972 et celles de 1973.

L'étude de la corrélation entre δ^2H et l'altitude pour les valeurs disponibles (1972-73) montre l'existence d'une droite de régression :

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

PRECIPITATIONS MONT CAMEROUN
RELATION ENTRE $\delta^2\text{H}$ ET L'ALTITUDE



3.6. Relation entre $\delta^{18}O$ et δ^2H .

L'établissement de relations générales linéaires, entre les teneurs en isotopes lourds (^{18}O et 2H) et l'altitude, ou la température, implique que se vérifie une corrélation du même type entre les teneurs respectives en oxygène 18 et deuterium (fig. 8).

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 :

$$\delta^2H = 7,5 \delta^{18}O + 6,4$$

H. CRAIG (1961) a montré que les précipitations à l'échelle du globe obéissent à la loi générale d'expression :

$$\delta^2H : 8\delta^{18}O + 10$$

Les études de détail (DANSGAARD, 1964) ont montré que la pente de 8 était extrêmement constante tandis que l'ordonnée à l'origine dépendait de l'origine des masses de vapeur.

Si l'on considère uniquement les stations situées à une altitude supérieure à 1000 m, il vient :

$$\delta^2H = 8,05\delta^{18}O + 10,18$$

La relation entre les teneurs en deuterium et en oxygène 18 obtenue pour ces stations est très proche de la droite de CRAIG qui caractérise le mécanisme général de condensation à l'exclusion de toute évaporation successive. Ceci apporte à 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.

De plus, on a vu 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). A cause de leur faible altitude, ces stations sont les plus susceptibles d'être soumises à 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. Conclusions

Les teneurs en isotopes lourds des précipitations sur les flancs du Mont Cameroun sont régies par la température de condensation commençante des masses de vapeur. Les gradients annuels moyens en altitude sont remarquablement constants malgré des conditions climatiques générales très différentes. Les valeurs de ces gradients sont faibles : $-0,14$ à $-0,16 \delta^{18}O/100 \text{ m}$. Les teneurs en oxygène 18 et en deuterium des eaux précipitées au-dessus de 1000m sont liées par une relation assez proche de l'équation générale des précipitations océaniques à l'échelle mondiale.

Le climat équatorial à faible amplitude de variation des températures, la régularité du profil thermique en altitude, l'afflux d'énormes masses de vapeurs de provenance océanique immédiate pendant la mousson, confèrent aux condensations du Mont Cameroun le caractère d'un système de distillation fractionnée qui fonctionne de façon très proche des conditions théoriques.

LEGENDE DES FIGURES

- Fig. 1 - Carte de situation et stations de prélèvement des précipitations annuelles (pluviomètres totalisateurs).
- Fig. 2 - Evolution des lames d'eau précipitées en fonction de l'altitude et de l'exposition des versants, selon un profil correspondant à la direction générale de la mousson. Les stations ont été projetées sur le plan du profil.
- Fig. 3 - Précipitations sur le Mont Cameroun. Relation $\delta^{18}O$ - altitude.
- Fig. 4 - Variations des températures moyennes mensuelles à Douala à différentes altitudes (1970 - 1974).
- Fig. 5 - Variations des températures moyennes annuelles (T et Td) avec l'altitude (1972, 1973, 1974) (Douala).
- Fig. 6 - Précipitations au Mont Cameroun. Relation $\delta^{16}O$ - Td point de rosée.
- Fig. 7 - Précipitations au Mont Cameroun. Relation entre δ^2H et l'altitude.
- Fig. 8 - Précipitations au Mont Cameroun. Relation δ^2H - $\delta^{18}O$.

BIBLIOGRAPHIE

- CRAIG H. (1961).- Isotopic variations in meteoric waters.
Science, 133, 1833-34.
- DANSGAARD J.-CH. (1964).- Stable isotopes in precipitations.
Tellus, 19, 435-468.
- FONTES J.-CH. (1972).- Quelques aspects isotopiques du cycle des eaux naturelles. In comptes-Rendus d'un colloque International sur les Isotopes de l'Oxygène. Déc. 1972, Cadarache. European Molecular Biology Organization, 197-225.
- FONTES J.-CH. et OLIVRY J.-C. (1976).- Gradient isotopique entre 0 et 4000 m, dans les précipitations du Mont Cameroun. 4e Réun. Ann. Sc. Terre, Paris, Soc. Géol. Fr., P.171 (résumé).
- LEFEVRE R. (1967).- Aspect de la pluviométrie dans la région du Mont Cameroun. Cah. Hydrol. ORSTOM, IV, 4, 15-43.
- OLIVRY J.-C. (1974).- Les déficits hydropluviométriques au Cameroun pendant les années sèches 1972 et 1973. ORSTOM, Yaoundé, Juin 1974, 70 P.
- PAYNE B.R. and YURTSEVER Y. (1974).- Environmental isotopes as a hydrogeological tool in Nicaragua. In "Isotope Technique in Groundwater Hydrology, 1974", Proceed. Symp. I.A.E.A., Vienna, I, 193-202.
- SUCHEL J.-B. (1972).- La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Trav. et Doc. Géogr. Trop., 5, CEGET, 287 p.
- TONGIORGI E. (1970).- In R. GONFIANTINI "Isotopes Hydrology", Proceed. Symp. I.A.E.A., Vienna, 56.
- ZUPPI G.M., FONTES J.-CH. et LETOLLE R. (1974.) Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurées dans le Latium. In "Isotope Technique in Groundwater Hydrology, 1974", Proceed. Symp. I.A.E.A., Vienna, I, 341-361.
- Météorologie Nationale - Résumés mensuels du temps, années 1970, 1971, 1972, 1973, 1974.