

APPLICATION DE QUELQUES TRAITEMENTS STATISTIQUES AUX DONNÉES HYDROCHIMIQUES DES SOURCES THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

A. LE MARECHAL

Géologue de l'ORSTOM

H. TEIL

Centre d'Informatique Géologique de l'ENSMP

RÉSUMÉ

Les données hydrochimiques d'une centaine de sources thermominérales du Cameroun sont étudiées à l'aide de méthodes statistiques : courbes de fréquence, calculs de moyennes, d'écart-type, de coefficients de corrélation, analyse factorielle des correspondances. L'interprétation géologique des résultats est particulièrement intéressante car toutes les sources sont issues du socle cristallin et sont associées à d'importants phénomènes tectoniques auxquels s'ajoutent parfois des manifestations volcaniques.

Dans ce contexte, les éléments anioniques (bicarbonate, chlorure, sulfate) ont une origine essentiellement profonde, tandis que les cations et les éléments traces proviennent du lessivage des roches le long des circuits hydrothermaux. Les eaux bicarbonatées sont associées à l'activité volcanique et, lorsque celle-ci est récente, des chlorures s'ajoutent aux bicarbonates. Les eaux sulfatées jalonnent les grandes fractures.

Par ailleurs, les associations d'éléments traces dans les eaux sont analogues à celles de la lithosphère et la distinction entre éléments felsiphiles et fémaphiles doit permettre d'avoir des indications sur la nature acide ou basique des roches traversées.

ABSTRACT

Hydrochemical data from about a hundred thermal and mineral springs in the Cameroons were studied with the help of statistical methods : frequency curves, calculations of means, standard-deviations, correlation coefficients, correspondance factor analysis. The geological interpretation of the results is particularly interesting because all the sources are derived from a crystalline basement and are associated with important tectonic phenomena and sometimes volcanic events.

In this context, the anionic elements (bicarbonate, chloride, sulphate) have an essentially deep origin, whilst the cations and the trace elements are the result of leaching of rocks along the hydrothermal circuits. The bicarbonate waters are associated with volcanic activity, and when this is recent, the chlorides are added to the bicarbonates. The sulphate waters mark out the large fractures.

Elsewhere, the associations of trace elements in the waters are analogue to those in the lithosphere, and the distinction between felsiphile and femaphile elements should give indications on the acid or basic nature of the wall rocks.

ZUSAMMENFASSUNG

Die hydrochemischen Daten von rund hundert Thermomineralquellen Kameruns wurden mit Hilfe statistischer Methoden : Häufigkeitskurven, Berechnung des Mittelwerts, Abweichungstyp des Wechselbeziehungskoeffizienten, faktorielle Analyse der Verbindungen, untersucht. Die geologische Auslegung der Resultate ist besonders interessant, denn alle Quellen sind kristalliner Unterlage entsprungen und sind mit bedeutenden tektonischen Erscheinungen verbunden, denen sich manchmal vulkanische Erscheinungen hinzufügen.

In diesem Zusammenhang haben die anionischen Elemente (Bikarbonate, Chloride, Sulfate) eine Herkunft besonderer Tiefe, während die Kationen und die Spurenelemente von der Auswaschung der Felsen entlang des hydrothermischen Verlaufes herkommen. Die bikarbonathaltigen Wasser sind mit vulkanischer Tätigkeit verbunden und wenn diese aus neuerer Zeit stammt, findet man neben dem Bikarbonat auch Chloride. Die sulfathaltigen Wasser findet man längs der grossen Brüche.

Ausserdem sind die Verbindungen der Spurenelemente in den Wassern analog zu denen der Lithosphäre und die Unterscheidung zwischen « felsiphiles » und « femaphiles » Elementen erlaubten es, Hinweise über die saure oder basische Natur des durchlaufenen Gesteins zu geben.

РЕЗЮМЕ

Были изучены гидрохимические данные касающиеся около сотни источников тёплых минеральных вод Кемеруна при помощи статистических методов: кривые распределения, вычисление средних величин, средних квадратических отклонений и коэффициентов корреляции, факториальный анализ соответствий. Геологическое истолкование результатов особенно интересно, так как все источники происходят из кристаллического основания и связаны с значительными тектоническими явлениями, и с вулканической деятельностью.

В таком контексте, анионные элементы [бикарбонат, хлорид, сульфид] происходят преимущественно из глубоких горизонтов, тогда как катионы и рассеянные элементы связаны с выщелачиванием пород вдоль по линиям циркуляции тёплых вод. Бикарбонатные воды связаны с вулканической деятельностью, и в случае недавнего проявления последней, к бикарбо-

натам присоединяются хлориды. Сульфатные воды следуют разломам.

Кроме того, ассоциации рассеянных элементов в водах и в литосфере одинаковы и различие между элементами сродными с кислыми и сродными с основными породами должно дать указание на характер горных пород через которые они прощивались.

INTRODUCTION

Cette note se propose de montrer comment certains traitements statistiques ont été appliqués à l'étude des données hydrochimiques des sources thermominérales du Cameroun et quels résultats ont été ainsi obtenus. La théorie des méthodes utilisées ne sera pas développée ici car elle a déjà été décrite à la fois sous ses aspects mathématiques et sous celui de son adaptation à la géologie et aux données hydrochimiques. On pourra notamment consulter le Traité d'Informatique Géologique et son importante bibliographie, ainsi que l'article de CAZES, SOLETY et VUILLAUME, paru en 1972.

Les données proviennent d'une étude de l'ORSTOM au Cameroun et la partie calcul et informatique a été réalisée au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

LES DONNÉES

1. *L'homogénéité des données doit être soulignée* : les eaux analysées proviennent de sources réparties sur plusieurs milliers de km² mais ayant plusieurs points communs :

— ce sont des points d'eau naturels parfois sommairement captés par un puits de quelques mètres, mais il ne s'agit jamais de forages plus profonds ;

— ce sont des sources thermominérales, à l'exclusion de sources d'eau douce, et leurs eaux présentent une minéralisation particulière en quantité et en qualité ;

— aucune n'est issue de terrains sédimentaires, les sources de ce type ayant été mises de côté, à la fois à cause de leur minéralisation beaucoup plus élevée que celle des autres et à cause de leur environnement géologique différent ;

— tous les griffons sont dans des roches granitiques ou gneissiques parfois altérées et aucun circuit hydrothermal n'est en relation visible avec des roches basiques, mais il existe en surface d'importantes manifestations de volcanisme basique ;

— les minéralisations s'échelonnent de 0,2 à 6 g/l ;

— les mesures sont comparables entre elles : dosages *in situ* faits par le même opérateur, avec des méthodes et des appareils constants, analyses complémentaires effectués par les mêmes laboratoires (Centre ORSTOM de Yaoundé et Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à Bondy).

2. *Le nombre et la qualité des données ont aussi de l'importance.* Une centaine de sources ont été échantillonnées et analysées : c'est un nombre correct qui justifie l'emploi de méthodes puissantes dont les résultats pourraient ne pas être significatifs avec un nombre trop faible.

Une trentaine de variables ont été mesurées : température, conductivité, pH, teneurs en carbonate, bicarbonate, chlorure, sulfate, sodium, potassium, calcium, magnésium, silice, fer, anhydride carbonique dissous, strontium, lithium, baryum, manganèse, titane, vanadium, étain, cuivre, plomb, chrome, molybdène, nickel, cobalt.

Le tableau échantillons-variables ainsi constitué appelle les remarques suivantes :

— il est incomplet : pour plusieurs échantillons, certaines variables manquent, parfois elles n'étaient pas mesurables avec les méthodes utilisées, ainsi certaines teneurs en éléments traces trop élevées (strontium) ou trop faibles (dans ce dernier cas, on a résolu le problème en adoptant comme valeur le tiers du seuil de détection). Dans ces conditions, l'effectif des échantillons change avec chaque traitement et cela nuit un peu à l'homogénéité des résultats qui ne sont pas rigoureusement comparables entre eux. Cependant les différences entre les effectifs ne sont généralement pas très grandes et, sans toutefois les perdre de vue, nous n'en tiendrons pas compte en première analyse ;

— les résultats n'ont pas tous la même précision, notamment les teneurs en éléments majeurs et les teneurs en éléments traces : ces dernières ne sont connues qu'à 30 % près et sont d'ordres de grandeur très différents. On a donc été amené à les traiter séparément, puis ensemble et à comparer les résultats.

3. *Enfin, les teneurs peuvent être exprimées de diverses manières.* Les éléments majeurs en mg/l, mé/l, pourcentage, les éléments traces en µg/l ou en ppm de résidu sec. Pour des raisons d'homogénéité, on a choisi de tout rapporter au litre et d'adopter comme unités le mé/l, le mg/l et le µg/l. On a vérifié en outre que les résultats du calcul des corrélations entre les éléments majeurs étaient faussés en utilisant les teneurs en pourcentage qui sont très liées entre elles par la relation : somme des anions = somme des cations = 100.

D'ailleurs, ce problème des teneurs en pourcentage se pose aussi dans le cas des analyses chimiques de roches. Les risques de fausses corrélations sont cependant minimes, et cela a été vérifié, car, pour un échantillon pétrographique, c'est une douzaine de teneurs dont la somme vaut 100 au lieu de 3 ou 4 pour un échantillon d'eau. Toutefois, on peut diminuer les risques en transformant les pourcentages d'oxydes en nombre d'atomes de cations mais les résultats sont peu modifiés.

4. *Il faut mentionner enfin qu'une première classification des types d'eau rencontrés à été faite à partir de l'examen des données de l'analyse chimique des éléments majeurs et du diagramme de Piper correspondant (fig. 1). Elle est mentionnée ci-dessous :*

Eaux bicarbonatées sodiques		4 sources
— sodiques et calco-		
— magnésiennes	33 sources	
— calco-		
— magnésiennes	9 sources	
— calcosodiques	5 sources	
— magnésiennes cal-		
— cosodiques	13 sources	
Eaux bicarbonatées sulfatées } sodiques	23 sources	
et sulfatées bicarbonatées }		
Eaux bicarbonatées chloru- } sodiques	10 sources	
rées et chlorurées bicarbonatées }		

CALCULS STATISTIQUES SIMPLES - COURBES DE FRÉQUENCE

On a calculé la moyenne, l'écart-type, les rapports Ca/Mg et (Na + K)/Ca et on a tracé les courbes de fréquence.

Les valeurs moyennes des teneurs n'ont pas beaucoup de signification en elles-mêmes. Cependant, elles peuvent être assimilées à la composition de l'eau

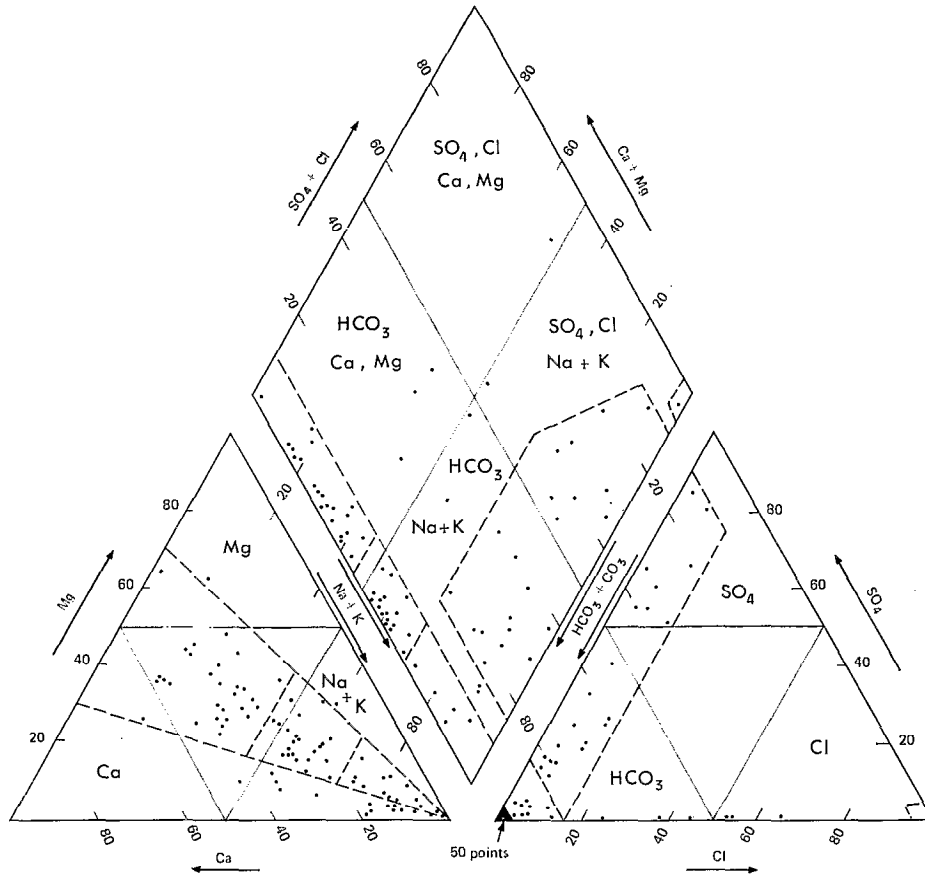


Fig. 1. — Composition chimique des sources thermominérales du Cameroun. Diagramme de PIPER (teneurs en milliéquivalents pour cent de la somme des anions ou des cations).

d'une source fictive dont le type serait caractéristique à l'échelle régionale. Voici ce que cela donne :

<i>Majeurs</i>	HCO ₃	17,0 mé/l	Ca	4,6 mé/l
	CO ₃	0 —	Mg	3,9 —
	Cl	1,7 —	Na	8,7 —
	SO ₄	1,4 —	K	0,9 —
		20,1 —		18,1 —

<i>Traces</i>	Sr	1 000 µg/l	Sn	17 µg/l
	Li	365 —	Cu	15 —
	Ba	320 —	Rb	9 —
	Mn	210 —	Cr	8 —
	Ti	175 —	Mo	7 —
	V	35 —	Ni	6,5 —
			Co	2,5 —

	(mg/l)		
<i>Divers</i>	CO ₂ dissous	395	T 24 °C
	Fe ₂ O ₃	5	pH 6,5
	SiO ₂	38,5	
	Minéralisation	1 500	

Ce type d'eau, bicarbonaté sodique et calcomagnésien, est effectivement le plus fréquemment rencontré au Cameroun et on peut le considérer comme caractéristique de l'environnement géologique : socle granito-neissique faillé et volcanisme. Les courbes de fréquence indiquent la loi de distribution des différentes variables (fig. 2 et 3) :

— tendance vers une distribution normale pour Na, SiO₂, pH et T ;

TRAITEMENTS STATISTIQUES DE LA GÉOCHIMIE DES EAUX THERMOMINÉRALES (CAMEROUN)

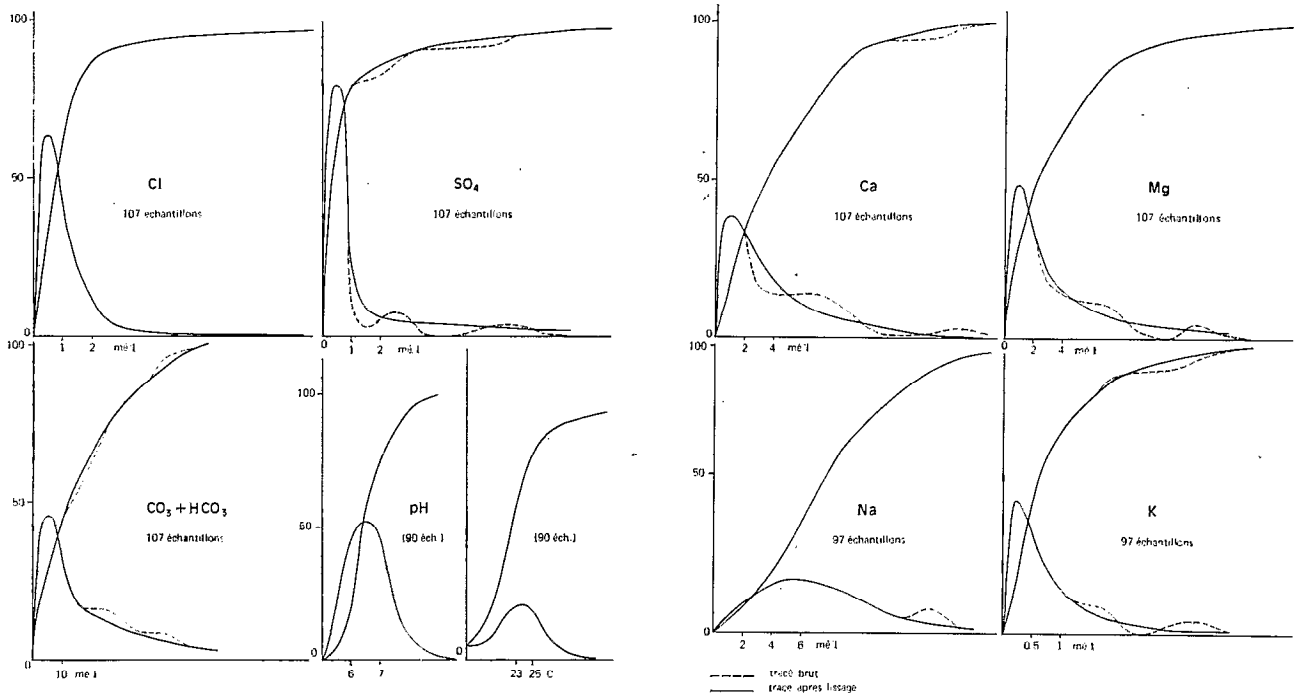


FIG. 2. — Courbes de fréquences cumulées des teneurs en ions majeurs (en mg/l).

- tendance vers une distribution log-normale pour Cl, Mn, Pb, Mo, Sn, Cu, Ni, Co, Ti, Li ;
- tendance vers une distribution à deux maximums pour Ca, Mg, K, SO₄, HCO₃, Fe₂O₃, V et Ba.

Il faut cependant remarquer que la forme des courbes de fréquence est fonction du nombre de classes et des coupures choisies pour chacune des variables. Dans le cas présent, il a été vérifié que certains maximums secondaires apparaissent avec des classes plus nombreuses. Mais d'une façon générale, l'ensemble des variables a une distribution qui tend vers une loi log-normale comme pour les données géochimiques habituelles.

La loi de distribution des variables est importante à connaître pour effectuer certains traitements, tel le calcul des coefficients de corrélation entre les variables dont l'application n'est théoriquement valable que si les données ont une distribution normale ou très voisine. C'est pourquoi en géochimie on fait souvent ces calculs avec les logarithmes des teneurs (cf. plus loin).

La présence de deux maximums dans une courbe de fréquence traduit l'existence de deux populations dis-

tinctes. Pour Ca et Mg, les premiers pics correspondent aux sources sodiques (peu calcomagnésiennes) et les seconds aux sources calcomagnésiennes (peu sodiques).

TABLEAU 1

Matrice des coefficients de corrélation entre les teneurs en éléments majeurs exprimées en mg/l. Les coefficients supérieurs au seuil de signification sont en chiffres gras

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃
Ca	1,00						
Mg	0,78	1,00					
Na	0,18	0,03	1,00				
K	0,23	0,12	0,31	1,00			
Cl	0,22	0,04	0,80	0,07	1,00		
SO ₄	-0,04	-0,16	0,11	-0,10	-0,03	1,00	
HCO ₃	0,73	0,71	0,42	0,48	0,21	-0,26	1,00

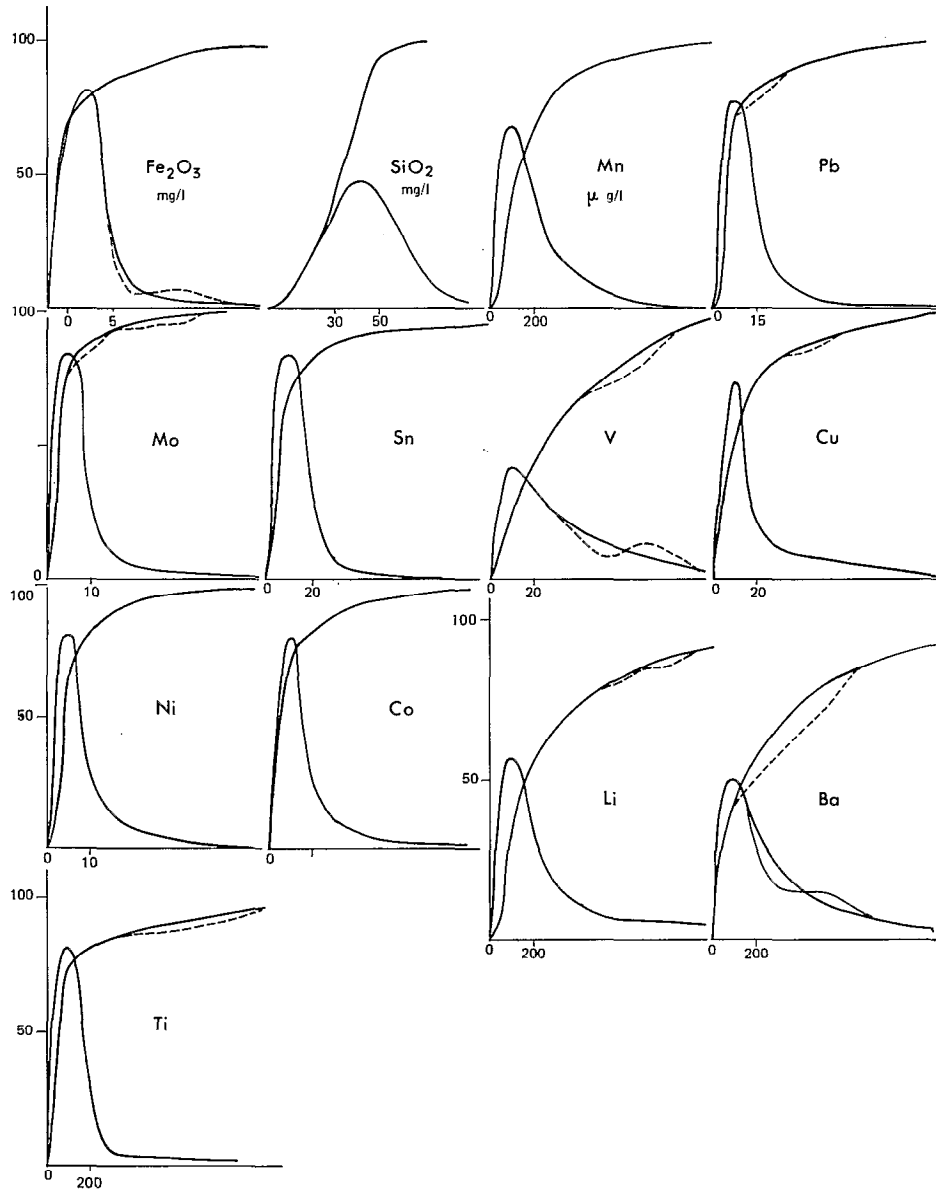


FIG. 3. — Courbes de fréquences cumulées des teneurs en éléments traces (en $\mu\text{g/l}$). 59 échantillons (sauf Li, Ba, Ti : 71).

De façon analogue, le premier pic de HCO_3 correspond aux sources essentiellement sulfatées et chlorurées (peu bicarbonatées), inversement pour le second.

Les seconds pics des éléments traces correspondent à un groupe assez constant de sources renfermant une plus grande quantité de ces éléments.

La population étudiée semble donc comporter deux ensembles discontinus alors que, a priori, l'homogénéité pétrographique du socle pouvait laisser supposer que les minéralisations des eaux thermominérales refléteraient cette homogénéité. D'autres facteurs doivent donc intervenir pour déterminer le chimisme de ces eaux.

CALCUL DES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION

 1. *Corrélations entre les éléments majeurs* (teneurs exprimées en mé/l)

Effectif : 107, sauf pour Na et K (97).

Seuils de signification des coefficients : 0,20 et 0,21. (Tableau 1, p. 219).

Ces coefficients de corrélations indiquent les covariations des éléments qu'on peut représenter par le schéma de la figure 4 plus explicite que le tableau et plus aisé à commenter.

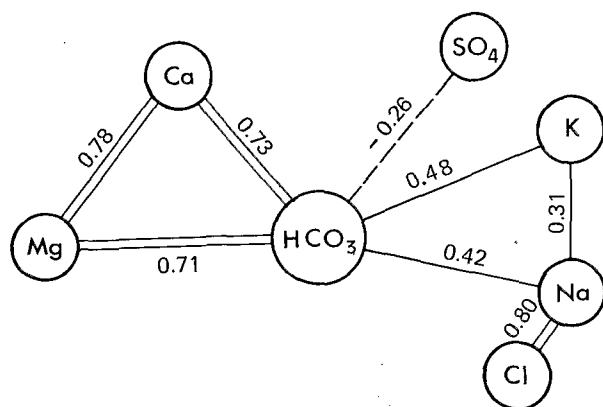


FIG. 4. — Schéma représentant les corrélations entre les éléments majeurs.

— Les anions ne sont pas corrélés entre eux sauf bicarbonate et sulfate encore que ce soit faiblement et négativement c'est-à-dire qu'ils ne sont pas tout à fait indépendants l'un de l'autre.

— Les cations sont corrélés positivement deux par deux, d'un côté les alcalino-terreux, Ca et Mg, fortement, de l'autre les alcalins, Na et K, de manière plus lâche. En outre, ils sont tous corrélés au bicarbonate, les alcalins moins fortement que les alcalino-terreux.

— Enfin, chlorure et sodium sont très fortement corrélés positivement.

L'interprétation de ces corrélations peut se faire en se basant sur les origines possibles de la minéralisation des eaux thermominérales.

Il est maintenant reconnu que la plus grande partie de l'eau est d'origine météorique et que dans la plupart des cas l'ensemble des éléments de la minéralisation provient du lessivage des roches le long des chenaux de circulation de l'eau. Dans un environnement sédimentaire, en effet, il est rare de ne pas pouvoir

relier l'existence d'eaux chlorurées sodiques à la présence de terrains salifères dans le sous-sol, les eaux sulfatées calciques à des terrains gypseux, les eaux bicarbonatées et carbonatées à des terrains calcaires.

Mais dans un environnement de roches cristallines ou cristallophylliennes, comme c'est le cas au Cameroun, la nature des roches est incapable d'expliquer les fortes teneurs en anhydride carbonique, bicarbonate, chlorure et sulfate, tandis qu'on peut lui attribuer l'origine des cations. On est donc obligé de supposer que les anions ont une origine profonde, juvénile ou magmatique. Des études faites ailleurs sur la composition isotopique du carbone semblent d'ailleurs confirmer cette hypothèse dans le cas des bicarbonates. Il n'existe pas de preuve pour les chlorures et les sulfates, mais c'est très vraisemblable. Ceci étant posé le processus de minéralisation serait le suivant :

— infiltration d'eaux météoriques par un réseau de fissures ;

— montée depuis la profondeur de fluides chargés de CO₂, Cl₂, HCl, H₂S, SO₂ ou SO₃. A priori la composition du fluide est quelconque et on doit s'attendre à ce que les teneurs des différents ions qui en résultent dans l'eau (HCO₃, SO₄ et Cl) soient indépendantes les unes des autres. C'est bien ce que l'on observe ;

— rencontre des deux courants, dissolution des fluides dans l'eau et remontée de l'eau qui est ainsi douée d'un pouvoir dissolvant élevé ;

— au contact des roches encaissantes se produit l'attaque des minéraux les plus altérables : feldspaths, pyroxènes, amphiboles, micas, et la libération de leurs éléments constitutifs : SiO₂, Al₂O₃, Ca, Na, K, Mg, Fe. Des réactions secondaires se produisent, notamment la formation de kaolinite, mais une partie des éléments libérés passent en solution et contribuent à minéraliser l'eau.

On peut alors se demander ce qui va déterminer les teneurs présentes en solution. De nombreux facteurs doivent intervenir : les conditions physico-chimiques du milieu (pH, température, pression partielle des gaz...), la nature de la roche encaissante et aussi la nature du solvant, c'est-à-dire du fluide venant de la profondeur. Ainsi pour les eaux bicarbonatées, on peut penser que certaines réactions d'équilibre pourront jouer, en particulier celles des bicarbonates alcalino-terreux, et que les teneurs en Ca et Mg seront étroitement liées à la teneur en bicarbonate, plus que Na et K dont les teneurs dépendront surtout des quantités disponibles dans les roches. C'est effectivement ce que l'on constate dans le calcul des corrélations.

Dans le cas des eaux chlorurées, on connaît les affinités des ions Cl et Na et les teneurs en sodium seront étroitement liées aux teneurs en chlore.

Pour les eaux sulfatées, on devrait s'attendre à une liaison entre les ions SO_4 et Ca, Na. Mais ce n'est pas le cas et les teneurs de cet anion sont indépendantes de celles des cations comme s'il ne participait pas à leur mise en solution et ne déterminait pas leur concentration. Ceci trouve une explication logique si l'on suppose que ce n'est pas SO_2 ou SO_3 qui vient de la profondeur mais H_2S . L'acide sulfhydrique est en effet un acide faible dont les sels sont peu solubles. L'eau serait donc chargée de H_2S qui s'oxyderait au voisinage de la surface et l'équilibre ionique serait rétabli aux dépens des ions déjà en solution.

En conclusion, on constate que les résultats du calcul des corrélations confirme l'hypothèse émise sur l'origine de la minéralisation des eaux thermominérales situées dans un contexte de roches éruptives et métamorphiques : anions d'origine profonde, et cations provenant de l'altération le long des circuits hydrothermaux.

2. Corrélations entre les éléments traces

Effectif 72, sauf pour Ba (71). Seuil de signification : 0.23 (Tableau 2).

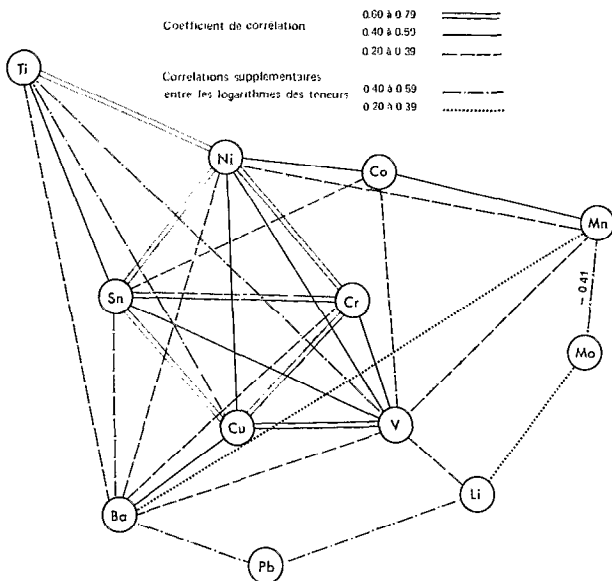


FIG. 5. — Schéma représentant les corrélations entre les éléments traces.

Le tableau présente les coefficients obtenus à partir des teneurs en $\mu\text{g/l}$ (ligne supérieure) et à partir du logarithme de ces teneurs (ligne inférieure) pour tenir compte des distributions log-normales. Le schéma de la figure 5 permet de visualiser les corrélations les plus significatives.

La comparaison du deuxième ensemble de coefficients au premier montre les changements suivants :

- augmentation des coefficients moyens,
- diminution des coefficients les plus élevés,
- apparition de nouvelles corrélations significatives (10),
- pas de suppressions de corrélations significatives.

Le problème de la signification des corrélations entre les logarithmes des teneurs est important : en géochimie l'usage est de travailler sur les valeurs logarithmiques à cause de la distribution généralement log-normale des données mais le recours à cet artifice mathématique autorise-t-il la transposition des résultats à la réalité ? Dans le cas présent, est-ce que les corrélations significatives apparues seulement à partir des calculs sur les valeurs logarithmiques ont vraiment une signification ? Sans répondre à cette question ici, il semble que l'expérience montre leur validité et ce sont elles qui seront considérées.

L'interprétation des corrélations entre les éléments traces peut se faire en fonction d'une part de ce qui a été dit à propos des éléments majeurs et d'autre part de ce que l'on sait de la géochimie des éléments traces.

D'une part, les éléments traces sont généralement liés aux minéraux des roches parfois dans le réseau cristallin, le plus souvent dans les fissures et les plans de clivage. Donc la destruction de ces minéraux entraîne la libération des éléments traces.

D'autre part, les éléments traces peuvent se différencier par leurs affinités avec tel ou tel type de roche ce qui est particulièrement net dans les roches éruptives. Donc les teneurs des éléments ayant les mêmes affinités devraient se trouver liées dans la mesure où les eaux se trouvent en contact avec un type de roche particulier.

Et on constate effectivement que les éléments Ni, Cr, Cu, V, Ti, Co (éléments fémaphiles) que l'on rencontre de préférence dans les roches basiques se retrouvent corrélés dans les eaux minérales. Ceci vient donc corroborer les résultats précédents.

TRAITEMENTS STATISTIQUES DE LA GÉOCHIMIE DES EAUX THERMOMINÉRALES (CAMEROUN)

TABLEAU 2

Matrice des coefficients de corrélations entre les teneurs des éléments en traces

	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Ba	Li
Mn	1,00											
Pb	0,03 0,20	1,00										
Mo	-0,15 -0,41	-0,07 0,12	1,00									
Su	0,18 0,43	-0,03 0,08	-0,10 -0,19	1,00								
V	0,23 0,24	0,15 0,45	-0,10 0,13	0,42 0,39	1,00							
Cu	0,10 -0,04	-0,06 0,10	-0,04 0,11	0,63 0,41	0,65 0,48	1,00						
Ni	0,25 0,27	0,08 0,27	-0,08 0,05	0,63 0,61	0,45 0,46	0,57 0,42	1,00					
Co	0,57 0,43	-0,00 0,22	-0,04 -0,14	0,23 0,48	0,38 0,30	0,17 0,20	0,47 0,61	1,00				
Ti	0,04 0,33	-0,07 0,20	-0,06 0,06	0,46 0,61	0,14 0,43	0,33 0,53	0,66 0,70	0,29 0,47	1,00			
Cr	0,04 0,02	-0,06 0,20	-0,04 0,07	0,70 0,58	0,47 0,63	0,64 0,77	0,73 0,58	0,11 0,30	0,44 0,63	1,00		
Ba	0,29 0,36	0,13 0,44	-0,11 0,05	0,39 0,35	0,34 0,51	0,56 0,39	0,38 0,46	0,15 0,37	0,28 0,51	0,29 0,42	1,00	
Li	0,04 -0,16	0,03 0,19	-0,00 0,27	0,05 0,01	0,35 0,29	0,06 0,15	0,03 0,10	0,22 0,13	-0,16 -0,05	0,01 0,20	-0,04 0,17	1,00

Ligne supérieure : calculs à partir des teneurs en $\mu\text{g/l}$;

Ligne inférieure : calculs à partir du logarithme des teneurs ;

Chiffres gras : coefficient supérieur au seuil de signification ;

Le manganèse bien que n'ayant pas de tendance marquée est lié à ces mêmes éléments tandis que Li et Mo, caractéristiques de roches acides (éléments felsiphiles) sont liés entre eux, mais faiblement.

L'étain dont les affinités vont vers les roches acides est corrélé avec les éléments des roches basiques et ceci est plus difficilement explicable.

3. Corrélations entre les éléments majeurs et les éléments traces

Effectif : 74, sauf pour Ba (73), Ti (72), SiO_2 et CO_2 (70), Fe_2O_3 (68). Seuil de signification : 0.23.

Seules les corrélations significatives sont indiquées ci-dessous.

CO₂ dissous est fortement lié à HCO₃ (0.62) et présente les mêmes corrélations que lui, ce qui confirme l'origine présumée de l'ion bicarbonate.

On note en plus :

- CO₂ - Mn : 0.30
- Ba - Mg : 0.35
- V - Mg : 0.35
- Pb - Ca : 0.35
- Li - HCO₃ : 0.50 et Li - Na : 0.39
- Fe - Ti : 0.48 et Fe - Sn : 0.56
- Fe - Ni : 0.48

Certaines de ces corrélations ne sont pas surprenantes : elles traduisent des associations géochimiques connues dans la lithosphère, ainsi Pb - Ca, Fe - Ti, Fe - Ni. D'autres sont plus difficilement interprétables : Ba - Mg, Ba - Ca, V - Mg, Fe - Sn et Li - Na.

L'étude des corrélations entre les éléments présents dans les eaux thermominérales fournit donc des arguments pour expliquer l'origine de leur minéralisation. Cependant, l'existence de coefficients significatifs est parfois difficile à interpréter en fonction de connaissances géochimiques insuffisantes, et, à la limite, on pourrait dire qu'une corrélation n'a d'intérêt qu'à partir du moment où elle est expliquée géologiquement.

ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES

Ce traitement a été appliqué plusieurs fois en tenant compte de variables différentes pour trouver des rela-

tions existant entre les échantillons eux-mêmes, entre les variables elles-mêmes et ensuite entre les deux ensembles, en calculant les facteurs qui expliquent la dispersion et l'inertie du nuage des points. Les résultats sont présentés chaque fois dans un tableau de largeur 100 unités, divisé en autant de colonnes que de facteurs calculés, la largeur de chaque colonne étant proportionnelle au pourcentage de variance expliqué par le facteur correspondant. En ordonnées, les variables sont repérées par leur contribution absolue à chaque facteur.

1. Les éléments majeurs

Effectif : 97 échantillons et 7 variables.

Un premier passage en machine a utilisé l'ensemble des données. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3 qui appelle les commentaires suivants :

— 6 facteurs suffisent à expliquer la totalité de la variance du système, ce qui est remarquable ;

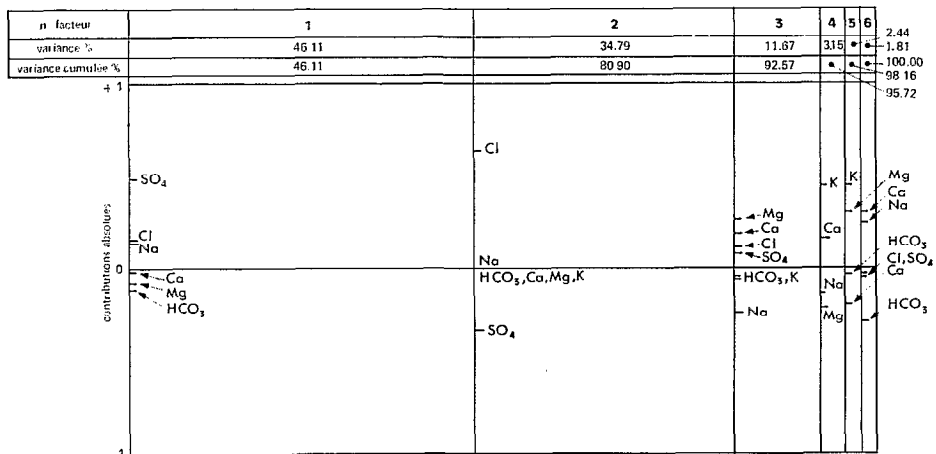
— le premier facteur (46 % de la variance) montre que l'ensemble des sources se subdivise en deux sous-ensembles dont l'un est caractérisé par les ions Cl, SO₄ et Na, l'autre par les ions HCO₃, Ca et Mg, c'est-à-dire d'une part les eaux sulfatées et chlorurées sodiques, d'autre part les eaux bicarbonatées calco-magnésiennes ;

— le deuxième facteur (35 % de la variance) distingue les eaux sulfatées des eaux chlorurées ;

— le troisième facteur (12 % de la variance) sépare les eaux sodiques des eaux calco-magnésiennes ;

TABLEAU 3

Analyse factorielle des correspondances en fonction des éléments majeurs.



TRAITEMENTS STATISTIQUES DE LA GÉOCHIMIE DES EAUX THERMOMINÉRALES (CAMEROUN)

— les derniers facteurs mettent en relief certaines particularités dues notamment au potassium qui définit une grande partie des quatrième et cinquième facteurs, mais n'intervient de façon marquante que dans un très petit nombre de sources, comme l'indique le tableau des contributions absolues des échantillons aux différents facteurs (ce tableau encombrant n'est pas reproduit ici).

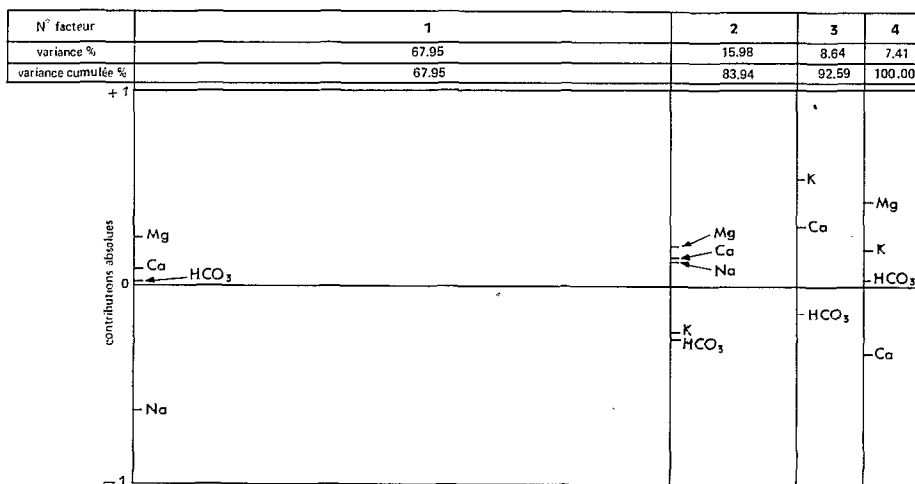
Étant donné les très fortes contributions de SO_4 et Cl aux deux premiers facteurs qui provoquent une distorsion des axes, ces variables ont été considérées

comme des variables supplémentaires pour effectuer un deuxième traitement, c'est-à-dire que les facteurs ont été recalculés sans tenir compte de ces anions. On a également écarté les deux échantillons qui présentaient les plus fortes teneurs en Cl et SO_4 . Cela revient finalement à analyser l'ensemble des sources considérées comme étant essentiellement bicarbonatées et, par suite, à étudier la variance du système par rapport aux cations.

Les nouveaux résultats sont représentés dans le tableau 4 et résumés ci-dessous :

TABLEAU 4

Analyse factorielle des correspondances en fonction des éléments majeurs (sauf Cl et SO_4).



— quatre facteurs seulement rendent compte de la variance du système ;

— le premier facteur (68 % de la variance) divise l'ensemble en sources sodiques et en sources calco-magnésiennes ;

— les deuxième et troisième facteurs sont déterminés par le potassium. Dans le deuxième facteur, il s'oppose aux autres cations, et dans le troisième, il est covariant avec le calcium et s'oppose au bicarbonate. Le potassium a donc un rôle certain dans la distinction des différentes minéralisations et il y aura lieu de lui accorder ici plus d'importance qu'on ne le fait généralement, en considérant un groupe d'eaux potassiques ;

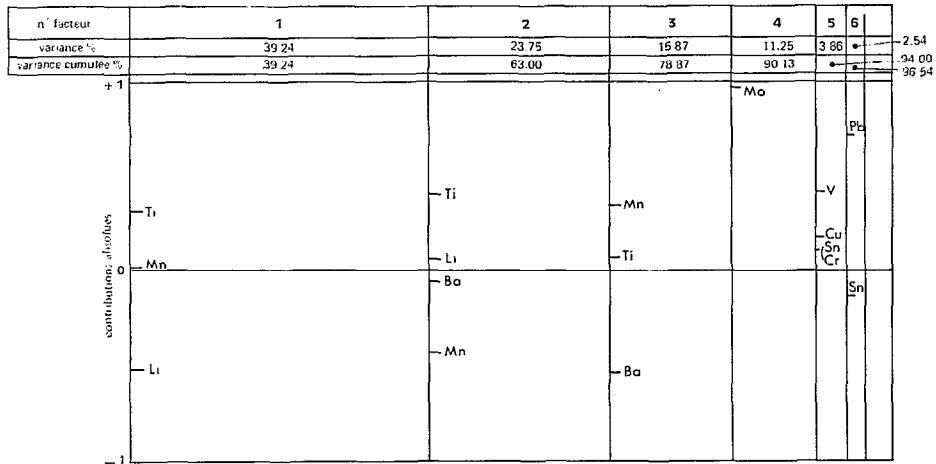
— le quatrième facteur distingue surtout Ca et Mg

et met ainsi en relief l'individualité des quelques sources particulièrement magnésiennes ou calciques.

En conclusion, l'analyse factorielle des teneurs en éléments majeurs a confirmé la classification qui avait été faite à partir du diagramme de PIPER : eaux bicarbonatées sodiques ou calco-magnésiennes, eaux sulfatées et eaux chlorurées sodiques. Elle n'a pas apporté de conclusions vraiment originales mais elle permet d'affirmer que le type d'eau thermominérale caractéristique de l'environnement géologique considéré (socle granito-gneissique fracturé) est l'eau bicarbonatée sodique et (ou) calcomagnésienne. Les autres types d'eau rencontrés sont dus à des particularités géologiques locales : influence plus ou moins accusée de la tectonique et du volcanisme, variations de la lithologie en profondeur.

TABLEAU 5

Analyse factorielle des correspondances en fonction des éléments traces.



2. Les éléments en traces

Effectif : 71 échantillons et 12 variables.

Les résultats de l'analyse factorielle des teneurs en éléments traces sont présentés dans le tableau 5, d'où l'on peut dégager les conclusions suivantes :

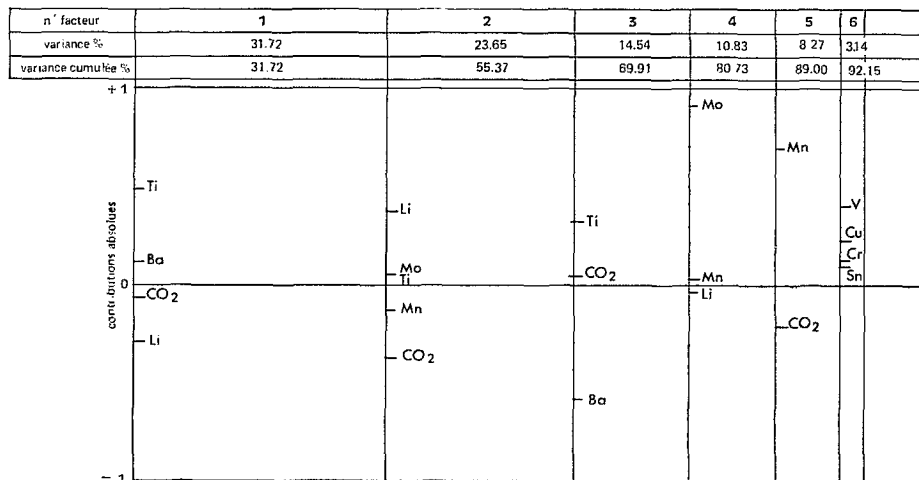
— le calcul de six facteurs ne suffit pas à expliquer toute la variance de l'ensemble mais le résidu non expliqué est faible (3,5 %) ;

— les trois premiers facteurs (79 % de la variance) mettent en relief les éléments dont les écarts-types sont les plus élevés : Ti, Li, Mn, Ba ont en effet des écarts-types allant de 200 à 500 alors que ceux des autres éléments varient de 6 à 34. Ce sont donc les variables qui différencient le mieux l'ensemble des échantillons ;

— le quatrième facteur (11 %) est presque entièrement défini par le molybdène, mais en fait très peu

TABLEAU 6

Analyse factorielle des correspondances en fonction de l'ensemble des variables.



d'échantillons y contribuent (91 % pour deux échantillons). Cet élément n'est donc pas caractéristique de l'ensemble des eaux ;

— le cinquième facteur fait apparaître le groupement V, Cu, Sn, Cr qui ressortait déjà de l'étude des corrélations ;

— le sixième facteur est défini par le plomb et l'étain.

L'interprétation géologique de ces résultats est délicate et sera esquissée plus loin (§ 6.2.).

3. Ensemble des variables

Effectif : 59 échantillons et 22 variables.

Tableau 6.

Les ions majeurs sont exprimés en mé/l, les traces en µg/l et CO₂, Fe₂O₃ et SiO₂ en mg/l.

Les résultats sont très proches de ceux du tableau 5 : d'abord apparaissent les variables qui ont le plus grand écart-type : Li-CO₂-Ba-Ti-Mn ; puis on retrouve Mo dans le quatrième facteur et le groupe V-Cu-Cr-Sn. Les éléments majeurs ne ressortent pas du tout dans cette analyse à cause de leurs faibles écarts-types.

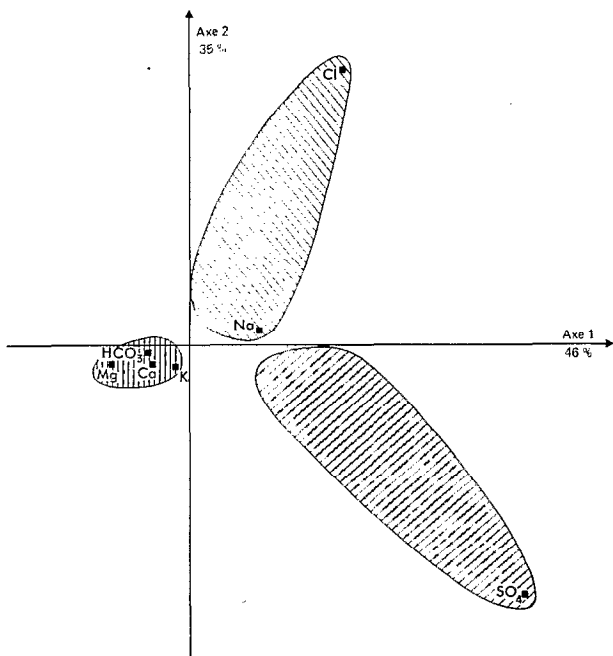


FIG. 6. — Analyse factorielle des correspondances. Eléments majeurs. Projection dans le plan des axes factoriels 1 et 2 (97 échantillons).

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

Elle complète les résultats de l'analyse factorielle et permet de mieux les interpréter. Généralement, on se limite à la projection de l'ensemble échantillons-variables sur les plans des axes factoriels 1 et 2, puis 2 et 3.

1. Eléments majeurs (fig. 6 et 7)

Les diagrammes montrent bien les oppositions entre les ions majeurs indiqués par les facteurs et la répartition des sources autour des pôles HCO₃, Cl et SO₄, avec une très forte densité de points dans le domaine HCO₃-Ca-Mg. Ils illustrent ce qui a été dit en commentant le tableau 3.

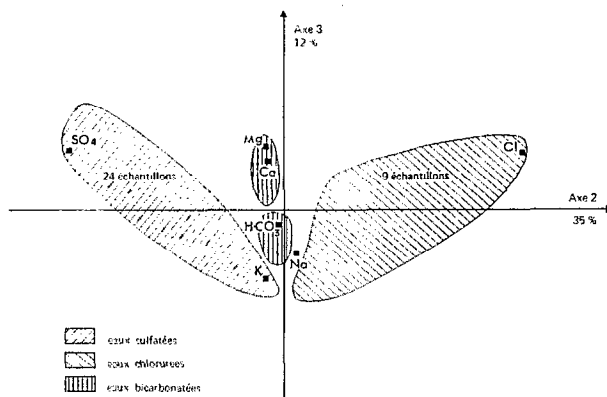


FIG. 7. — Analyse factorielle des correspondances. Eléments majeurs. Projection dans le plan des axes factoriels 2 et 3 (97 échantillons).

2. Eléments traces (fig. 8 et 9)

Les deux nuages obtenus sont grossièrement triangulaires et dans l'espace des axes 1-2-3 on aurait un nuage tétraédrique avec pour pôles les variables Li, Ti, Mn et Ba.

Ces variables ont des écarts-types élevés, ce sont donc les plus discriminants ; c'est pourquoi ils caractérisent les premiers facteurs. On note aussi que ce sont les éléments les plus abondants. En outre, Ti et Mn sont généralement liés aux roches basiques, Li et Ba aux roches acides. Ainsi, les premiers facteurs pourraient être interprétés comme marquant l'opposition des éléments acides aux éléments basiques.

Le graphique montre encore que les éléments Cu, Co, Ni, Sn et Cr sont groupés plus près de Ti que des autres pôles : ils sont également liés aux roches

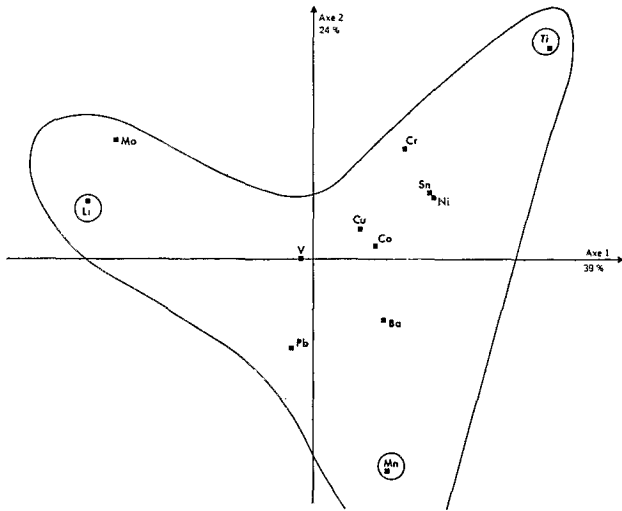


FIG. 8. — Analyse factorielle des correspondances. Eléments traces. Projection dans le plan des axes factoriels 1 et 2 (71 échantillons).

basiques dans la lithosphère (sauf Sn). Le molybdène est voisin du lithium, de même que ces deux éléments ont un comportement géochimique comparable : on les rencontre dans les produits des phases tardives de la cristallisation fractionnée des magmas, particulièrement des magmas granitiques.

Il est intéressant de noter que la liaison du molybdène et du lithium est déjà apparue par le calcul des

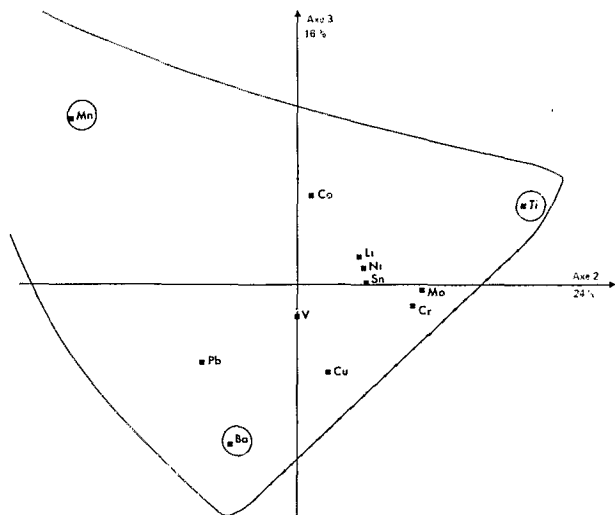


FIG. 9. — Analyse factorielle des correspondances. Eléments traces. Projection dans le plan des axes factoriels 2 et 3 (71 échantillons).

corrélations entre les logarithmes des teneurs, mais pas entre les teneurs brutes. C'est également vrai pour les autres corrélations mises en évidence de cette façon. Il est donc vraisemblable que les corrélations entre les logarithmes de teneur soient interprétables de la même manière que les autres puisqu'elles ressortent aussi de l'analyse factorielle qui n'impose aucune condition à la loi de distribution des variables. De plus, ces résultats montrent qu'il est effectivement nécessaire de calculer les coefficients de corrélation à partir du logarithme des teneurs quand celles-ci ont une distribution log-normale, si on veut découvrir les corrélations existantes.

Finalement, cette analyse fait apparaître des groupements de variables analogues à ceux des éléments dans la lithosphère. La distinction est vague puisqu'on différencie seulement éléments felsiphiles et éléments fémaphiles, mais les teneurs ne sont connues qu'à 30 % près. Cela indique que les éléments traces dans les eaux sont liés à ceux des roches. Ils seraient donc entraînés par lessivage et leur nature devraient en outre permettre de distinguer des eaux de roches basiques et des eaux de roches acides. Comme en surface tous les griffons sont dans des roches acides, on devrait pouvoir dire que certains circuits hydrothermaux traversent des roches basiques en profondeur.

3. Ensemble des variables (fig. 10)

Il est intéressant de comparer les figures 6, 8 et 10 bien que le nombre des échantillons soit différent pour chacune. En effet, la figure 10 se déduit à peu près

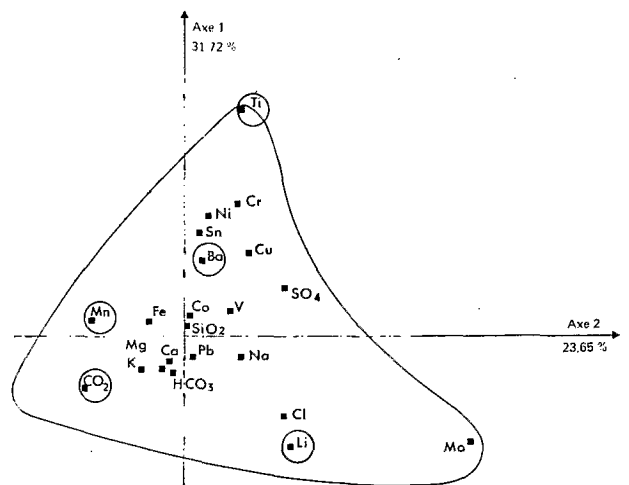


FIG. 10. — Analyse factorielle des correspondances. Ensemble des variables. Projection dans le plan des axes factoriels 1 et 2 (59 échantillons).

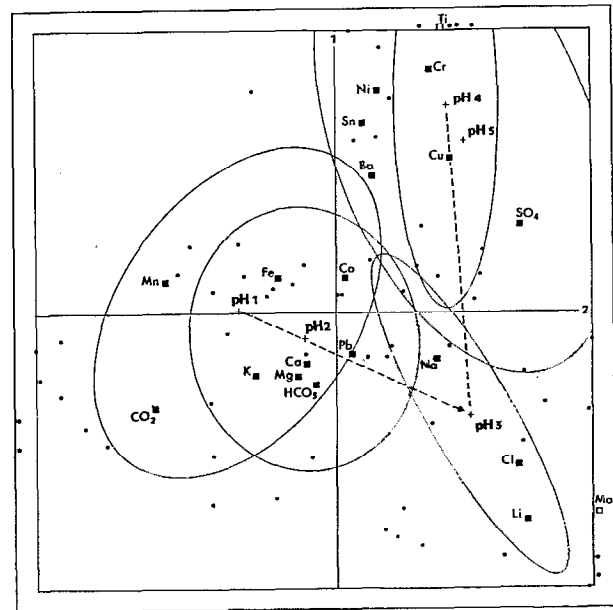
TRAITEMENTS STATISTIQUES DE LA GÉOCHIMIE DES EAUX THERMOMINÉRALES (CAMEROUN)

de la superposition des figures 6 et 8 avec des groupes de variables très voisins. Par ailleurs, plusieurs remarques sont à faire :

— le pôle SiO_2 est très proche du centre de gravité du nuage (intersection des axes) : les teneurs en SiO_2 sont indépendantes du type d'eau ;

— le pôle des eaux sulfatées est du côté des éléments liés aux roches basiques : ceci rejoint les conclusions du § 6.2. et une observation de terrain. En effet, les sources sulfatées correspondent à des failles très importantes par leur longueur, par leurs effets et sans doute par l'épaisseur des terrains qu'elles affectent : épais filons de quartz et probablement mouvements de grande ampleur. Les circulations d'eau qui leur sont associées ont donc pu atteindre des profondeurs plus grandes que pour d'autres sources et rencontrer plus facilement des roches basiques, ces dernières ayant d'ailleurs pu être également injectées à la faveur des mouvements tectoniques ;

— la proximité des pôles Cl et Li est probablement à rapprocher de leurs comportements géochimiques voisins comme Li et Mo ;



pH1 < 6.0	15 échantillons
pH2 de 6.0 à 6.5	10 "
pH3 de 6.5 à 7.0	9 "
pH4 de 7.0 à 7.5	5 "
pH5 > 7.5	11 "

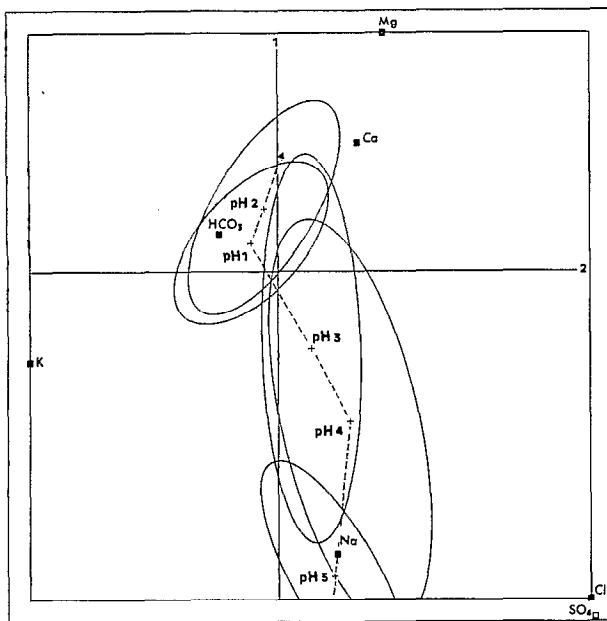
FIG. 12. Ellipses représentant le pH en fonction de l'ensemble des variables.

— Cl et CO_2 sont en opposition et les fortes teneurs en Cl sont associées à l'existence de manifestations volcaniques plus récentes que lorsqu'il y a seulement des eaux bicarbonatées. Dans ces conditions, la présence de Cl pourrait témoigner du stade d'évolution des phénomènes volcaniques locaux, un peu à la manière de l'évolution géochimique des fumerolles et des mofettes, dans le temps et dans l'espace.

LES ELLIPSES

1. Ellipses du pH

C'est une simple technique graphique qui utilise les résultats de l'analyse factorielle des correspondances et qui permet de faire intervenir de nouvelles données. Le plus simple est de prendre un exemple : l'étude du pH des eaux de sources en fonction des éléments majeurs (fig. 11), Cl et SO_4 étant considérés comme des données supplémentaires (cf. § 5.1). La même chose a été faite en fonction de l'ensemble des variables (fig. 12) et en fonction des éléments traces seuls. On



pH1 < 6.0
6.0 < pH2 < 6.5
6.5 ≤ pH3 < 7.0
7.0 ≤ pH4 < 7.5
pH5 > 7.5

FIG. 11. Ellipses représentant le pH en fonction des éléments majeurs (sauf Cl et SO_4).

commence par diviser le domaine de variation du pH en plusieurs classes ; cinq classes ont été choisies auxquelles correspondent un certain nombre d'échantillons :

pH 1 < 6,0	20 sources
pH 2 de 6,0 à 6,5	34 —
pH 3 de 6,5 à 7,0	12 —
pH 4 de 7,0 à 7,5	8 —
pH 5 \geq 7,5	14 —

Il faut que les coupures choisies soient significatives (pH = 7,0 s'imposait) et que les effectifs de chaque classe ne soient pas trop différents (l'effectif de pH 4 est un peu faible).

Ensuite, chaque groupe de points est supposé définir une ellipse dont on détermine le centre de gravité (C) et les deux axes et on trace les ellipses ainsi obtenues. Le graphique final comporte donc autant d'ellipses que de classes et leurs dispositions relatives montrent d'éventuelles évolutions en fonction de la variable introduite. Les dimensions de l'ellipse sont fonction de la dispersion des échantillons correspondants.

Dans le cas présent, on constate sur la figure 11 une évolution régulière du pH des eaux calcomagnésiennes : plus les eaux sont calcomagnésiennes, moins elles sont sodiques et plus le pH diminue. C'est un résultat logique qui traduit le fait que les eaux sont d'autant plus acides qu'elles sont bicarbonatées. Sur la figure 12, les résultats sont encore plus nets : les eaux les plus acides correspondent à celles qui renferment du CO₂ dissous, ensuite le pH augmente avec les eaux bicarbonatées, puis chlorurées, puis sulfatées, cette évolution coïncidant avec celle des éléments en traces. Ces résultats très cohérents montrent que le pH est lié, non seulement aux ions majeurs, mais aussi aux éléments traces. L'évolution en fonction des éléments traces seuls est moins régulière mais tout aussi significative : le grand axe des ellipses change d'orientation selon que le pH est inférieur ou supérieur à 7,0. Il est dirigé suivant Li-Ba pour pH < 7,0 et suivant Ti-Cu pour pH > 7,0, ce qui montre encore l'opposition entre éléments felsiphiles et fémaphiles.

D'autres ellipses ont été tracées :

2. Ellipses en fonction des éléments majeurs (sauf Cl et SO₄)

On a tracé les ellipses de la minéralisation totale, et de la somme Ca+Mg. Elles montrent des évolutions identiques, ces deux caractéristiques augmentent

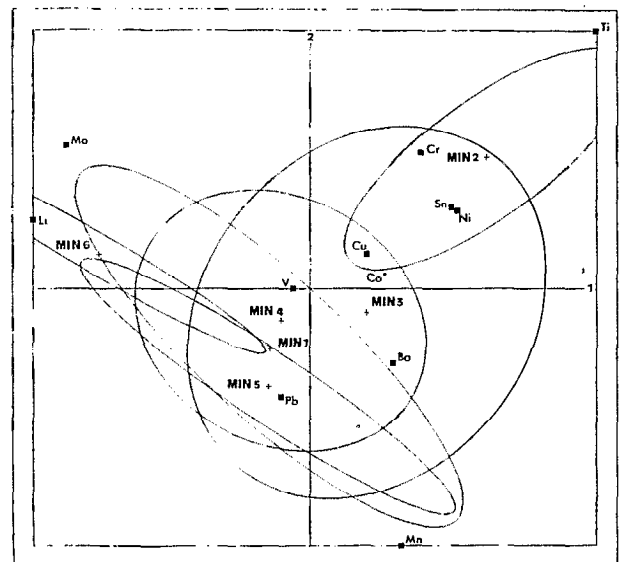
quand on passe du type sodique au type calcomagnésien, c'est-à-dire en fait des types sulfatés et chlorurés au type bicarbonaté. Ceci signifie que les eaux sont plus agressives par CO₂ que par Cl et SO₄, sans doute à cause des teneurs généralement faibles de Cl et SO₄.

3. Ellipses en fonction des éléments traces

Quatre séries d'ellipses ont été tracées en plus de celles du pH. Ce sont les ellipses de la température, de la minéralisation totale, des alcalins et des alcalino-terreux.

Il n'y a pas d'évolution de la température en fonction des éléments traces.

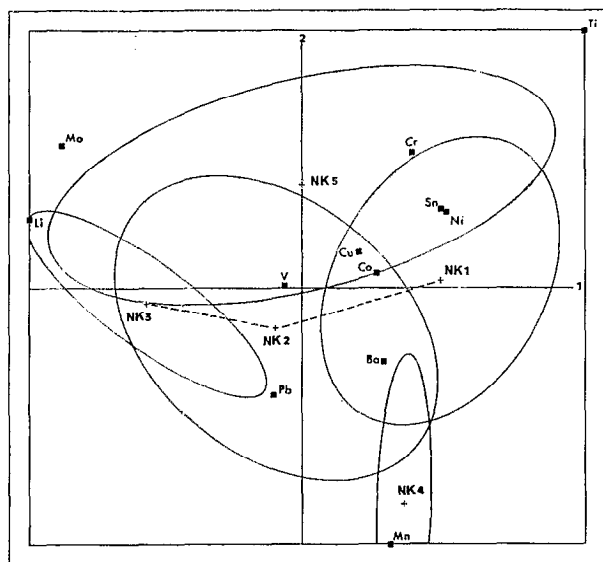
La minéralisation totale paraît augmenter quand les éléments traces deviennent acides (fig. 13) sauf quand elle est inférieure à 500 mg/l.



MIN 1 = < 500 mg/l	17 échantillons
MIN 2 = 500 - < 1000 "	15 "
MIN 3 = 1000 - < 1500 "	15 "
MIN 4 = 1500 - < 2000 "	17 "
MIN 5 = 2000 - < 3000 "	8 "
MIN 6 = > 3000 "	6 "

FIG. 13. Ellipses représentant la minéralisation totale en fonction des éléments traces.

L'évolution de Ca+Mg n'est pas significative, celle de Na+K (fig. 14) ne l'est guère plus : jusqu'à 12 mé/l, la teneur en alcalins augmente des éléments basiques vers les éléments acides. Ensuite, l'évolution est quelconque.



NK 1	< 4	méj ds Na + K	15	échantillons
NK 2	4 - 8	"	22	"
NK 3	8 - 12	"	25	"
NK 4	12 - 18	"	6	"
NK 5	≥ 18	"	3	"

FIG. 14. Ellipses représentant Na+K en fonction des éléments traces.

4. Ellipses en fonction de l'ensemble des variables

En plus des ellipses du pH, ont été tracées celles de la température (sans signification), du rapport Mg/Ca (sans signification : ce rapport varie donc peu avec le type chimique des eaux) et du type des eaux (fig. 15).

Ces dernières ellipses sont plus intéressantes : les coupures ont été établies d'après le diagramme de Piper : eaux bicarbonatées sodiques (18),

- calcomagnésiennes (18),
- chlorurées 6,
- sulfatées 17.

Les résultats permettent de préciser ceux obtenus par l'analyse des correspondances seule, en montrant comment la classification des types d'eau en fonction des ions majeurs s'accompagne d'une différenciation de la nature des éléments traces. On ne peut cependant parler que d'une tendance car les ellipses se chevauchent beaucoup.

CONCLUSIONS

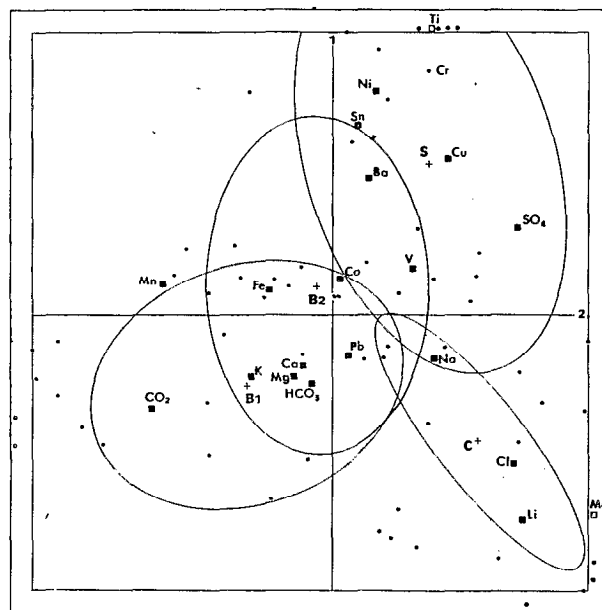
Les méthodes précédentes ont permis d'analyser de façon assez détaillée et systématique l'ensemble des

données hydrochimiques des sources thermominérales du Cameroun. On a obtenu, d'une part un certain nombre de résultats importants dont la plupart n'aurait pu l'être autrement, et d'autre part la confirmation de plusieurs hypothèses de travail.

Il faut remarquer que, si ces méthodes peuvent parfois orienter des recherches ultérieures en mettant l'accent sur certaines analogies, leurs résultats ne sont généralement interprétables que dans la mesure où l'on a une connaissance préalable des phénomènes étudiés, en particulier de ceux qui sont susceptibles d'expliquer les variations observées, le problème essentiel étant d'attribuer un sens géologique à chaque facteur.

En effet, ces méthodes servent à *décrire* un tableau échantillons-variables en fonction d'un ordre (au sens le plus général) supposé préexistant dans les valeurs. Il n'y a donc aucune notion géologique à l'origine. C'est l'utilisateur qui introduit ces notions pour essayer d'expliquer l'ordre éventuel mis ainsi en évidence.

Dans l'étude présente, ce sont surtout le comportement géochimique des éléments de la minéralisation



S	= Sulfatées	17	échantillons
C	= Chlorurées	6	"
B1	= Bicarbonatées sodiques	18	"
B2	= Bicarbonatées calcomagnésiennes	18	"

FIG. 15. — Ellipse représentant les principaux types d'eau en fonction de l'ensemble des variables.

et l'environnement géologique qui ont permis d'aboutir aux conclusions résumées brièvement ci-dessous :

— Confirmation de la classification des types d'eaux en fonction des ions majeurs.

— Définition d'un type représentatif à l'échelle régionale : bicarbonaté calcomagnésien et sodique.

— Confirmation de l'origine de la minéralisation : anions d'origine profonde, cations et traces provenant du lessivage des roches encaissantes.

— Relation possible entre l'évolution locale du volcanisme et le type de certaines eaux : les eaux chlorurées témoignant d'un volcanisme plus récent que les eaux seulement bicarbonatées.

— Association des eaux sulfatées aux roches basiques et aux grandes fractures.

— Relation entre les éléments traces et le type de roche traversée par les circuits hydrothermaux.

Ces conclusions d'ordre général concernent essentiellement les sources de terrains cristallins et seront affinées par un examen plus détaillé de toutes les sources.

D'un point de vue méthodologique, deux traitements ont été appliqués : calcul des corrélations et analyse factorielle des correspondances. On a vu à propos des éléments traces, mais cela est vrai aussi pour les autres variables, que l'analyse factorielle retrouve les résultats qualitatifs du calcul des coefficients de corrélations, mais ces derniers sont plus explicites.

L'analyse factorielle est tout à fait indiquée pour établir les bases d'une classification. En l'absence de toute idée préconçue, nous aurions pu être embarrassés

pour choisir tel ou tel élément comme critère de classification et cette méthode a clairement montré quels étaient les ions dont les teneurs variaient de façon la plus significative par rapport à l'ensemble, tout en confirmant les choix plus ou moins raisonnés faits antérieurement.

Il faut répéter encore que si ces méthodes ont d'abord mis en évidence des choses plus ou moins connues, elles ont conduit aussi à des interprétations géologiques intéressantes, notamment à partir des représentations graphiques.

PROGRAMMES DE CALCULS UTILISÉS

Pour les calculs de statistiques simples, d'histogrammes et de corrélations : programmes sub-routine de chez IBM.

Pour l'analyse des correspondances : programme écrit au Laboratoire de Statistique Mathématique (Faculté des Sciences de Paris) modifié et complété au Centre d'Information Géologique (J.P. BORDET).

Pour les sorties graphiques (nuages de points et ellipses) : programme de J.P. BORDET et M. ALBUISON.

Ordinateur utilisé : IBM 360.

REMERCIEMENTS :

Nous exprimons notre gratitude à M. DEFOSSEZ qui a permis la réalisation de ce travail en y intéressant le Service d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris et nous remercions l'ensemble du personnel de ce service qui a participé à son exécution en particulier J.P. BORDET qui a écrit les programmes et contribué à leur mise en œuvre et à l'interprétation des résultats.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 13 juin 1973

BIBLIOGRAPHIE

Traité d'informatique géologique. Sous la direction de P. LAFITTE, Masson et Cie édit., Paris, 1972, 624 p.

CAZES (P.), SOLETY (P.), VUILLAUME (Y.), 1972. — Exemple de traitement statistique des données hydrochimiques. Application aux nappes du Nord de la France. *Bull. BRGM*, III, Fr, n° 4, pp. 75-90.

LE MARECHAL (A.), 1970. — Les sources thermominérales de l'Adamaoua. Analyses chimiques et utilisation. ORSTOM, Centre de Yaoundé, 32 p. *multigr.*, 1 carte h.t.

LE MARECHAL (A.), 1972. — Les sources thermominérales de l'Ouest du Cameroun. ORSTOM, Centre de Yaoundé, 52 p. *multigr.*, 1 carte h.t.