

**TRAVAUX
ET DOCUMENTS
DE L'O.R.S.T.O.M.**



**GÉOLOGIE ET GÉOCHIMIE
DES SOURCES THERMOMINÉRALES
DU CAMEROUN**

Alain le MARÉCHAL

TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'ORSTOM N° 59

Alain le MARECHAL

**GÉOLOGIE ET GÉOCHIMIE
DES
SOURCES THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN**

ORSTOM — PARIS — 1976

Cet ouvrage a fait l'objet d'une thèse de Doctorat d'état
présentée à l'Université de Paris VI
pour obtenir le grade de Docteur ès-sciences, le 6 mars 1974.

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part,
« que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à
« une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but
« d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans
« le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1^{er} de
« l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc
« une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal».

© O.R.S.T.O.M. 1977

I.S.B.N. 2-7099-0428-4

A CHRISTINE

AVANT-PROPOS

Le Comité Technique de Géologie de l'ORSTOM m'a confié en 1966 l'étude des sources thermominérales du Cameroun sur la proposition de M. le Professeur P.M. Vincent qui était alors titulaire de la chaire de géologie à la Faculté des Sciences de l'Université du Cameroun. Ce travail a été effectué sous sa direction scientifique et je lui suis infiniment reconnaissant de la confiance qu'il m'a ainsi accordée, des conseils, suggestions et critiques aussi amicaux qu'éclairés, qu'il m'a prodigués tant sur le terrain qu'au cours de la mise au point de ce mémoire.

Je remercie M. le Professeur R. Dars, mon Parrain Scientifique, qui malgré ses lourdes charges à l'Université de Nice s'est toujours intéressé au déroulement de ce travail et a accepté de faire partie du Jury.

Avant mon départ MM. M. Lasserre et J.C. Dumort m'ont fait part de leur expérience camerounaise et m'ont donné conseils et encouragements.

Les études sur le terrain ont duré quatre ans (1967-1969 et 1969-1971) durant lesquels j'ai reçu l'appui logistique des différents services du Centre ORSTOM de Yaoundé dirigé par M.R. Lefèvre. En particulier MM. M. Klur puis L. Nalovic, chefs de Laboratoire ont analysé les échantillons d'eau, tandis que grâce à M. M. Boyer, chef de garage j'ai pu effectuer de nombreux déplacements sans soucis mécaniques.

J'ai bénéficié de fructueux échanges de vues avec mes camarades du Centre ORSTOM tout spécialement F.X. Humbel, pédologue, ainsi qu'avec les chercheurs de l'Université du Cameroun, notamment S.E. Belinga, géologue et P. Fritsch, géographe.

Cette étude n'a été possible qu'avec l'appui et la bienveillante considération des autorités camerounaises : M. Kamga, Directeur du Service des Mines, MM. les Préfets, Sous-Préfets et Chefs des Services Départementaux de l'Adamaoua et de l'Ouest du Cameroun.

V. Mbele m'a accompagné dans toutes mes tournées et fut un aide précieux à la fois technicien, interprète, guide, cuisinier, porteur, etc ...

Enfin nombreux sont ceux qui m'ont réservé un accueil généreux au cours de ces tournées : missionnaires, éleveurs, planteurs, habitants de nombreux villages, pour qui l'hospitalité africaine n'est pas un vain mot.

Que tous trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

De retour en France j'ai entrepris l'exploitation des résultats acquis sur le terrain et la préparation de ce mémoire. M. le Professeur G. Camus, Directeur Général de l'O.R.S.T.O.M., et M. J. Séverac, Secrétaire Général m'ont accordé toutes facilités pour mener cette tâche à bonne fin et je les en remercie vivement.

J'exprime ma reconnaissance à M. le Professeur J. Nicolas qui a bien voulu m'accepter dans le laboratoire de Géologie Appliquée qu'il dirige à l'Université de Paris VI et présider le Jury de cette thèse.

En compagnie de mes camarades J.H. Guillon et B. Boulangé, j'ai trouvé dans ce Laboratoire l'accueil sympathique de B. Hiéronymus, P. Robert et P. Bildgen, l'aide des chimistes et le concours dévoué de Mlle M.A. Lançon, documentaliste.

Le traitement des données par ordinateur a pu être effectué d'une part grâce à l'appui de M. M. Défossez auprès du Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris et à la collaboration de Mme H. Teil, d'autre part grâce au concours de G. Maglione qui m'a fait partager son expérience acquise aux Etats-Unis.

Je remercie vivement M. le Professeur J. Faucher de l'intérêt qu'il a porté à ce travail en critiquant les interprétations géochimiques et en acceptant de faire partie du Jury.

J'adresse également mes remerciements aux Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM qui ont contribué à ce travail. M. M. Pinta et le Service de Spectrographie ont analysé les éléments en traces. M. Danart a réalisé les cartes, sous la direction de M. Combroux. MM. Bonnet-Dupeyron, Hiernaux et Mlle Dardenne ont apporté leur concours dans la réalisation matérielle de cet ouvrage.

« L'eau occupe dans l'histoire de notre planète et dans celle de ses éléments chimiques et de ses atomes une position tout à fait particulière et unique.

C'est pourquoi, dans l'état actuel de la science, aucun corps n'a en géochimie une importance comparable à celle des eaux naturelles.

Il faut les prendre (...) en entier et non en dégager seulement des parties. »

VERNADSKI (1930)

INTRODUCTION

1 – DÉFINITION

Il n'existe pas de définition simple et complète des eaux thermominérales car le terme recouvre des notions complexes. Plusieurs caractères les différencient des eaux souterraines ordinaires : leur température, leur minéralisation et leur action thérapeutique, mais ces caractères peuvent ne pas se présenter simultanément. D'où la définition de Lefort (1860) citée par De Launay (1899) : « On doit entendre par eaux minérales toutes celles qui, en raison, soit de leur température bien supérieure à celle de l'air ambiant, soit de la quantité ou de la nature spéciale de leurs principes salins et gazeux, sont ou peuvent être employées comme agents médicamenteux. »

On voit que l'accent est mis sur l'aspect médical qui est aussi le seul souligné dans la définition administrative actuelle citée dans la nomenclature des sources d'eaux minérales françaises (Annales des Mines, 1961) : « *Les dénominations « eau minérale », « eau minérale naturelle » ou toute autre contenant ces mots sont réservées aux eaux douées de propriétés thérapeutiques, provenant d'une source dont l'exploitation a été autorisée par décision ministérielle, dans les conditions prévues par les lois et règlements en vigueur* », ce que G. Castany (1967) énonce plus simplement : « *Une eau thermominérale est une eau naturelle douée de propriétés thérapeutiques particulières.* »

Les hydrogéologues pour qui l'aspect médical est secondaire ne sont pas satisfaits par ces définitions et en ont proposé d'autres.

P. Fourmarier (1939) qualifie d'eaux minérales :

- (1) les venues d'origine profonde au moins pour un de leurs constituants,
- (2) les eaux qui renferment en quantité anormale des éléments exceptionnels,

- (3) les eaux d'origine superficielle qui ont pénétré assez profondément dans la croûte terrestre pour que leur composition se soit notablement modifiée.

De plus, une eau est dite thermale lorsque sa température est sensiblement supérieure à la température moyenne annuelle. Cadisch (1969) cite la définition internationale du « Codex alimentarius » : une eau minérale désigne une eau dont le résidu sec est supérieur à 1 g/l, ainsi que les eaux contenant au choix au moins : 1 mg/l de lithium, 5 mg/l de fer, 10 mg/l de strontium, 5 mg/l de brome, 1 mg/l d'iode, 2 mg/l de fluor, 1,3 mg/l d'hydroarsénate (HAsO_4), 4 mg/l d'acide métaborique (HBO_2), des ions hydrosulfureux ou thiosulfates, de l'hydrogène sulfuré (H_2S) ou 0,25 g/l (125 cm^3/l) d'anhydride carbonique libre.

Lopez de Ascona (1969) cite la définition de l'Union Internationale des Sciences Géologiques (I.U.G.S.) : une eau minérale est une eau souterraine contenant des substances dissoutes correspondant à un résidu sec à 110° supérieur à 1 g/l et une eau thermale est une eau souterraine ayant une température supérieure à la température moyenne annuelle locale.

Plusieurs pays ont adopté des définitions du même genre. En particulier la valeur de 1 g/l pour le résidu sec est choisie par la plupart tandis que les teneurs critiques des diverses substances peuvent varier. Le critère de thermalité ci-dessus est aussi retenu le plus souvent, cependant aux États-Unis la température limite est celle de la moyenne annuelle locale augmentée de 5°C.

Il n'y a donc pas de définition universellement admise : dans ce travail ont été considérées comme *thermominérales les eaux souterraines possédant à l'émergence un ou plusieurs des caractères suivants* :

- température supérieure à la moyenne annuelle locale,
- résidu sec supérieur à 1 g/l,
- minéralisation inhabituelle notamment présence de gaz libres ou dissous.

Cette définition est assez simple pour permettre de repérer une telle eau, avec des moyens réduits : thermomètre, résistivimètre, gustation.

De plus cette étude est limitée aux sources naturelles et laisse de côté toutes les eaux obtenues artificiellement par forage, telles les eaux connées et les eaux de gisement qui sont toujours minéralisées. Elle ne tient pas compte non plus des eaux très pures du type Volvic qui ne sont minérales que dans la mesure où on pourrait qualifier ainsi toutes les eaux souterraines, l'eau étant considérée comme un minerai, point de vue qui se justifie du fait de la richesse qu'elles représentent de plus en plus.

Maintenant que l'objet de cette étude est bien précisé, situons-le dans le cadre des connaissances actuelles.

2 — PROBLEMES POSÉS PAR LES SOURCES THERMOMINÉRALES

Le problème essentiel est celui de la genèse des eaux thermominérales. On l'envisage généralement sous plusieurs aspects : origine de la thermalité, origine de la minéralisation, origine de l'eau proprement dite, relation avec les autres phénomènes géologiques tels que tectonique et volcanisme.

La résolution de tels problèmes ne peut être abordée qu'après l'étude descriptive et analytique du plus grand nombre possible de sources. Ces études ne manquent pas dans la littérature hydrogéologique qui propose une très grande quantité de monographies concernant des sources du monde entier.

A partir de ces données un travail de synthèse doit être entrepris pour dégager les traits essentiels du phénomène hydrominéral et les expliquer.

En fait les synthèses effectuées jusqu'à présent sont souvent partielles et les explications génétiques proposées ne résolvent pas tous les problèmes.

Parmi les ouvrages anciens, il faut en citer trois qui n'ont pas perdu de leur actualité : celui de Daubrée sur les eaux souterraines (1887), celui de Jacquot et Willm sur les eaux minérales de la France (1894) et celui de L. De Launay sur la recherche, le captage et l'aménagement des sources thermominérales (1899).

Le livre de Moret (1946) apporte peu d'éléments nouveaux de même que celui de Urbain (1967) sur la géochimie et l'hydrogéologie des enveloppes aqueuses et des eaux thermominérales.

Plusieurs points ressortent de ces travaux généraux :

- les émergences sont toujours en relation étroite avec des failles et parfois avec des phénomènes volcaniques actuels ou récents ;
- les éléments présents dans les eaux sont très nombreux et en proportions extrêmement variables. Il existe diverses classifications basées sur les principaux éléments en solution ;
- la plupart des éléments en solution proviennent des roches encaissantes soit par simple dissolution, soit par hydrolyse ;
- la thermalité est attribuée au gradient géothermique normal ;
- l'eau proprement dite a une origine soit météorique soit juvénile. Ce point est très controversé mais aucune des théories n'est appuyée par des preuves formelles.

Les deux dernières décennies ont vu naître un regain d'intérêt pour les sources thermominérales que l'on peut attribuer à un certain développement de l'exploitation des ressources en énergie géothermique et qui explique que ce sont surtout les eaux thermales s.s. qui ont été étudiées en profitant de nouvelles méthodes d'investigation.

Plusieurs résultats complémentaires sont ainsi acquis :

- la thermalité des eaux est due non seulement au gradient géothermique normal mais aussi à ses anomalies et à une activité magmatique au sens large ;
- des expériences de laboratoire confirment que l'altération des roches peut suffire à expliquer la minéralisation de certaines eaux ;
- l'analyse isotopique montre que l'eau proprement dite est en grande partie d'origine météorique ;
- enfin des classifications génétiques des types d'eau minérales sont présentées.

Ces différents sujets vont être abordés et nous verrons en quoi l'étude des sources du Cameroun permet d'en approfondir certains. Ce mémoire est donc d'abord une étude régionale et ensuite une contribution à l'étude des sources thermominérales en général.

PREMIERE PARTIE

CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE L'ÉTUDE

Toutes les sources thermominérales étudiées sont localisées dans deux régions assez bien individualisées : l'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun, cette dernière comprenant l'ancien Cameroun Occidental et une grande partie des régions administratives de l'Ouest et du Littoral.

Il est possible que d'autres sources existent ailleurs, en particulier dans certains secteurs du Nord du pays qui présentent des caractères géologiques favorables mais ils n'ont pas été prospectés et on ne trouve pas de documents en faisant mention. Cette étude se rapporte donc bien à l'essentiel des ressources en eaux minérales du Cameroun.

1 – CARACTERES PHYSIQUES DES RÉGIONS ÉTUDIÉES

Nous donnons ici quelques éléments de géographie physique régionale afin de replacer les sources dans leur cadre naturel (voir le schéma oro-hydrographique fig. 1).

1.1 Orographie

L'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun correspondent à la presque totalité des zones hautes du Cameroun dans lesquelles on peut distinguer : des massifs montagneux, des plateaux et des bassins.

Les massifs montagneux sont situés surtout à l'ouest et comprennent du sud vers le nord : le mont Cameroun, sommet le plus élevé (4070 m), le massif du Manengouba (2400m), les monts Roumpis (1765m), les monts Bamboutos (2740m) le massif de Bamenda (2500 m), du Mbam (2335 m), du Nkogam (2263 m), du Mbapit (1989 m), le mont Oku (3008 m), le massif du tchabal * Mbabo (2460 m). Le mont Nganha (1920 m) et le hosséré ** Djinga (1710 m) sont les points culminants de l'Adamaoua.

Tous ces massifs sont essentiellement d'origine volcanique et dominant souvent *des plateaux structuraux*.

On distingue deux grands plateaux : celui de l'Adamaoua avec une altitude moyenne de 1100 m constitue la plus grande partie de la région du même nom comprise entre 6° et 8° de latitude Nord et entre 12° et 15° de longitude Est.

Le plateau bamiléké (région de Bafoussam) est de dimension plus réduite mais se situe à une altitude moyenne plus élevée de l'ordre de 1400 m. Il domine le plateau bamoun (région de Foumban) dont l'altitude moyenne est de 1100 m.

Enfin au pied des plateaux et des massifs se trouvent *des plaines ou des bassins* drainés par les cours supérieurs des grandes rivières. Ce sont dans l'Adamaoua le bassin du mayo*** Déo et la plaine koutine, le bassin de la Vina, de la Bini (ou Vina du nord) et surtout les bassins du Djérem et de la Mbéré qui limitent au Sud le plateau de l'Adamaoua par l'intermédiaire d'un escarpement de failles très accusé.

Vers l'ouest on rencontre le bassin du Mbam avec la plaine tikar, et deux petites plaines alluviales : celle de Ndop et celle des Mbos. Enfin la plaine du Mungo s'étend de Loum au golfe de Guinée et le bassin de la Cross River s'ouvre vers le Nigéria.

La situation des émergences dans des régions d'altitude relativement élevée est caractéristique des eaux thermominérales du Cameroun mais aussi d'autres provinces hydrominérales du monde.

1.2 Hydrographie

Les sources thermominérales sont en rapport avec le réseau hydrographique car les émergences, tout en étant situées sur les plateaux, se trouvent à leurs points bas, c'est-à-dire au fond des vallons déterminés par les cours d'eau, souvent dans leur lit même et elles contribuent ainsi à les alimenter bien que dans une faible proportion.

Un réseau hydrographique assez dense couvre ces régions qui font partie de trois grands bassins (fig. 1).

* *tchabal* désigne un relief tabulaire en dialecte foulfouldé

** *hosséré* désigne un massif montagneux en dialecte foulfouldé

*** *mayo* désigne un cours d'eau en dialecte foulfouldé.

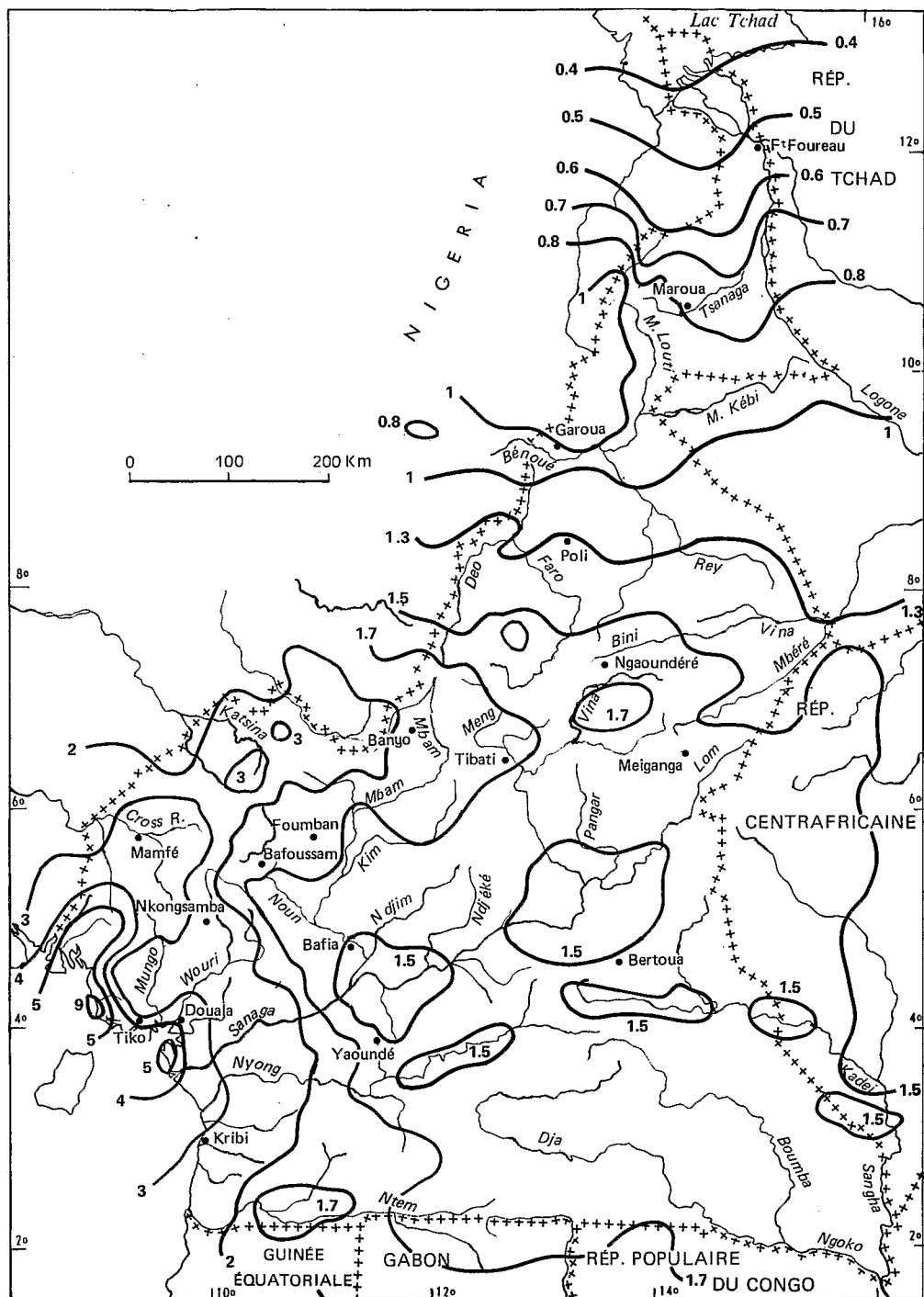


Fig. 2 Pluviosité moyenne annuelle au Cameroun. (Hauteurs d'eau en mètres)
(d'après J. B. Suchel, 1971)

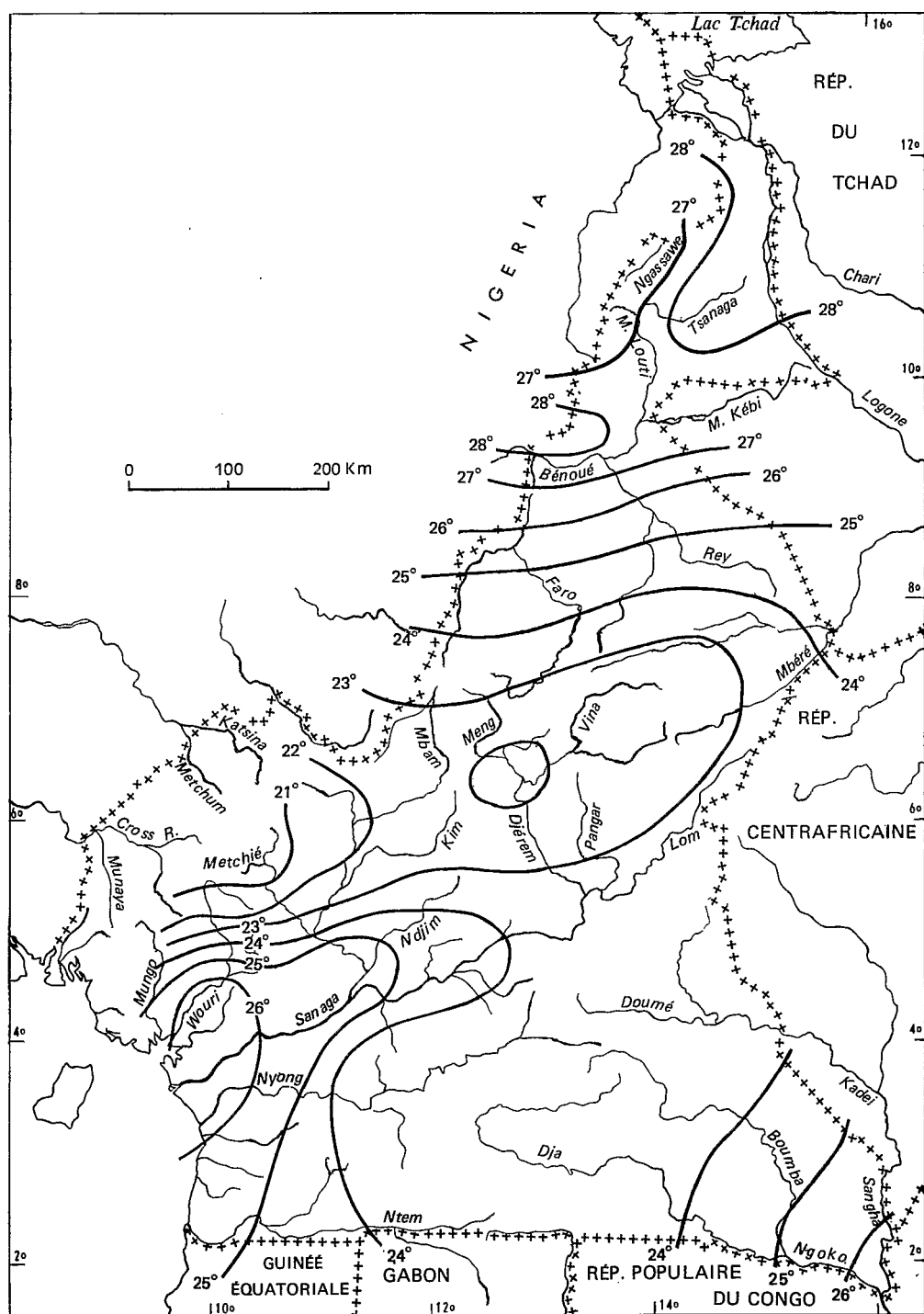


Fig. 3 Températures moyennes annuelles au Cameroun, en °C.

La Vina du Nord et la Mbéré drainent l'est de l'Adamaoua et dépendent du bassin du Tchad.

Le Faro et le mayo Déo drainent le nord de l'Adamaoua et dépendent du bassin Bénoué-Niger.

Le Djérem et le Mbam drainent le sud et l'ouest de l'Adamaoua ainsi qu'une partie de l'Ouest-Cameroun et dépendent du bassin de la Sanaga.

Enfin la Cross River et la Katsina drainent les régions les plus occidentales vers le bassin Bénoué-Niger.

1.3 Climatologie

La climatologie intervient dans l'étude des sources thermominérales par la pluviométrie car nous verrons que l'eau des sources a une origine essentiellement météorique et par la température puisque les eaux thermales s.s. se définissent à partir de la température moyenne annuelle locale.

L'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun appartiennent à deux zones climatiques différentes : l'Adamaoua jouit d'un climat tropical dit de montagne à cause de l'altitude tandis que vers le Sud-Ouest règne le climat équatorial avec diverses variétés régionales dues à l'altitude ainsi qu'à l'influence océanique.

Quand on va de Ngaoundéré vers Douala, *la pluviosité moyenne annuelle* passe progressivement de 1600 mm à 4000 mm (Suchel, 1971) et se répartit à peu près de la même façon au cours de l'année : une saison des pluies centrée sur juillet et une saison sèche centrée sur janvier (fig. 2).

Les bilans hydrologiques montrent que le déficit d'écoulement diminue des régions tropicales aux régions équatoriales surtout du fait des variations de l'évapotranspiration ; cependant on ne connaît pas la part des pertes par infiltration qui sont susceptibles d'alimenter les sources thermominérales.

La température moyenne annuelle reste sensiblement constante dans les régions étudiées (fig. 3). Elle est de 23° C dans l'Adamaoua et peut varier de 2 à 3° C, dans certaines zones de l'Ouest-Cameroun, en plus près des côtes, en moins près des reliefs. Nous avons adopté l'unique valeur de 23° pour l'ensemble des régions prospectées afin d'avoir un critère simple pour distinguer eaux thermales et eaux froides.

2 – GRANDS TRAITS DE LA GÉOLOGIE RÉGIONALE

Les grands traits de la géologie régionale sont connus à la suite des levés systématiques de la carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 par Guiraudie (1955), Koch (1953), Lasserre (1961) pour l'Adamaoua et Dumort (1968), Péronne (1969), Weecksteen (1957) pour l'Ouest-Cameroun.

En 1956, Gazel a réalisé une synthèse générale dans une carte à 1/1.000.000.

A ces données se sont ajoutées des observations de l'auteur ainsi que les résultats d'études récentes : Belinga (1966 et 1972) dans l'étude des bauxites de l'Adamaoua, Chevassus-Agnès (1968 et 1971) dans l'étude géomorphologique d'une partie du fossé de la Mbéré, Humbel (1966) dans une étude pédologique au NW de Ngaoundéré et P.M. Vincent pour le volcanisme de la région du mont Cameroun (non publié).

L'ensemble permet de présenter une mise à jour de la carte géologique du Cameroun à 1/1.000.000 pour l'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun (carte 1 h.t.). C'est un travail nouveau (1) pour cette dernière région qui n'était pas rattachée au Cameroun au moment de la publication de la carte de Gazel. La légende de cette carte a été simplifiée de manière à faire ressortir les traits essentiels de la géologie.

L'étude des sources thermominérales fait appel à plusieurs disciplines géologiques :

- la pétrographie pour la géochimie des eaux,
- l'étude du volcanisme pour la géochimie des eaux et la localisation des sources,
- les études structurales pour la localisation des griffons.

2.1 Pétrographie et stratigraphie

Les roches constituant l'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun appartiennent à plusieurs ensembles :

- le socle,
- les séries sédimentaires métamorphisées,
- les séries sédimentaires,
- les séries volcaniques.

2.1.1 LE SOCLE

Le socle est formé de roches cristallophylliennes et de roches éruptives qui affleurent largement dans les régions étudiées :

— *Les roches cristallophylliennes* comprennent :

- (a) des gneiss de composition minéralogique variée : à muscovite, à biotite, à 2 micas, à biotite et amphibole, à hypersthène, des leptynites et des quartzites ;
- (b) des amphibolites et des pyroxénites ortho- et paramétamorphiques ;
- (c) des migmatites à biotite ou à biotite et hornblende verte passant à des granites d'anatexie.

Ces roches sont le résultat du métamorphisme régional à des degrés divers avec ou sans métasomatisme. Plusieurs paragenèses sont celles du faciès granulite. L'ensemble est généralement calco-alcalin.

(1) Signalons néanmoins l'esquisse à 1/2.000.000 de l'ensemble du Cameroun dressée par M. Lasserre (1969, b) en collaboration avec G. Vivier, pour servir de base à ses études géochronologiques.

— *Les roches éruptives* constituent des massifs syntectoniques anciens et tardifs et des massifs post-tectoniques.

- (a) *Les massifs syntectoniques anciens* sont en étroit rapport avec les roches cristallophylliennes et présentent les caractères suivants : concordance ou subconcordance avec les terrains encaissants, contours diffus, hétérogénéité de texture et de structure, hétérogénéité de composition minéralogique (le type dominant est un granite calcoalcalin à biotite et amphibole, mais on rencontre aussi des types syénitiques, monzonitiques, granodioritiques), présence fréquente d'enclaves de roches cristallophylliennes, structure orientée. On y distingue plusieurs faciès : type grenu iso-granulaire ou porphyroïde, type à biotite ou à deux micas.
- (b) *Les massifs syntectoniques tardifs* sont généralement des granites à tendance alcaline. Comme les précédents, ils peuvent être concordants et renfermer des enclaves de roches cristallophylliennes mais ils sont beaucoup plus homogènes et rarement orientés. Ils se présentent sous un faciès grenu typique ou porphyroïde. Les syénites, gabbros et diorites sont plus rares.
- (c) *Les massifs post-tectoniques* sont circonscrits et nettement discordants, très homogènes et sans orientation. Leur composition minéralogique varie des granites aux syénites et aux diorites avec une tendance marquée vers les types alcalins et hyperalcalins. Les types hyperalcalins se distinguent des autres par leur mise en place récente (« série ultime » qu'on a comparée aux « Younger granites » de Nigéria), par leur localisation à l'ouest du Cameroun en rapport avec une importante ligne de fractures (Nlonako, mont Koupé, massif de Bana, Nda Ali, massifs de Sabongari, Mayo Darlé et Gengalabbo), par leur association fréquente à des roches volcaniques et par leur structure de type subvolcanique comme celle des massifs analogues connus dans l'Aïr, le Nigéria (Black and Girod, 1970) et le nord du Cameroun (Koch, 1955 ; Lasserre, 1966a ; Vincent, 1969a).

Signalons en particulier le massif granitique de Mayo Darlé (Koch, 1955, p. 160) dont le granite type présente une structure graphique et se compose de quartz, microcline, albite perthitique, biotite et accessoirement fluorine, zircon, sphène (très rare), un peu de magnétite, tourmaline (rare). La partie sud du massif comporte des granites hyperalcalins à aegyrine, riebeckite et arfvedsonite. Il est accompagné de filons de dolérites, rhyolites et surtout de greisens minéralisés en cassitérite qui sont exploités.

L'étude géochronologique des formations du socle est en cours depuis 1962. Une première série de résultats obtenus par la méthode au strontium conventionnel appliquée à des micas et à quelques roches totales permet à M. Lasserre (1966 a et b, 1969a) de distinguer trois groupes d'âges nettement différenciés.

— *Les âges du groupe I de 2400 à 1800 millions d'années (M.A.)* concernent un ensemble de gneiss et de granites calco-magnésiens à pyroxènes (complexe du Ntem dans le sud du Cameroun) non représenté dans les régions étudiées. Le résultat le plus sûr paraît être 2360 ± 50 M.A. (biotite du granite d'Ebolowa) et la majorité des mesures date un phénomène de rajeunissement ayant affecté les biotites.

— *Les âges du groupe II de 620 à 480 M.A. (antécambriens et cambriens)* comprennent une centaine de résultats d'interprétation difficile car ils concernent :

- les schistes cristallins du socle,
- les séries épimétamorphiques,
- les granitoïdes syntectoniques et post-tectoniques anciens.

Pour la majorité de ces formations les âges correspondent à un rajeunissement des micas ; en revanche pour les granites intrusifs post-tectoniques la concordance des résultats obtenus sur les micas et sur les roches totales permet de penser que l'âge de 500 à 550 M.A. obtenu correspond à la période de mise en place de ces massifs.

— *Les âges du groupe III inférieurs à 70 M.A. (tertiaires)* concernent les massifs post-tectoniques ultimes.

Les résultats obtenus par la méthode au strontium conventionnel appliquée aux roches totales des granites post-tectoniques ont été étayés par des études complémentaires par la méthode au strontium ajusté par isochrone (Lasserre, 1966b) appliquée toujours aux roches totales.

Des études ultérieures effectuées à l'aide de cette dernière méthode ont permis de préciser les périodes de mise en place de certaines formations : 2500 M.A. pour les formations du Ntem et 520 à 500 M.A. pour les granites intrusifs post-tectoniques.

Cette succession semble s'accompagner de différences dans le chimisme des roches correspondant à plusieurs provinces. Lasserre et Vivier (1973, à paraître) en distinguent trois :

- le sud avec le complexe du Ntem de type calco-magnésien ;
- le centre avec les roches granitiques syntectoniques et post-tectoniques de type calcoalcalin ;
- la bordure occidentale, où sont présents un ensemble granitique et un ensemble syénitique passant tous les deux d'un pôle calcoalcalin à un pôle alcalin sodique.

Toutefois, à l'échelle régionale, les roches granitiques ont une extension beaucoup plus importante que les autres et les analyses chimiques montrent que leurs teneurs en $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ et $\text{CaO} + \text{MgO}$ varient dans des limites peu étendues, les alcalins de 6 à 10% et les alcalino-terreux de 0,75 à 6% sauf pour les gneiss généralement plus riches en alcalino-terreux, comme on peut le voir sur le diagramme de la figure 4 qui rassemble 45 analyses de granites et gneiss prélevés dans l'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun (Tableau 1, h. t.).

Finalement, d'un point de vue global, les roches du socle ont une composition chimique relativement homogène à l'affleurement avec quelques variations localisées dans des massifs restreints de syénites, gabbros, diorites, amphibolites, pyroxénites.

2.1.2 LES SÉRIES SÉDIMENTAIRES FAIBLEMENT MÉTAMORPHISÉES.

Elles sont représentées ici par la série du Lom au SE de l'Adamaoua, formée essentiellement de schistes et quartzites affectés par un métamorphisme épizonal et constituant un bassin peu étendu.

Localement cette série paraît reposer en discordance sur le socle (Gazel et

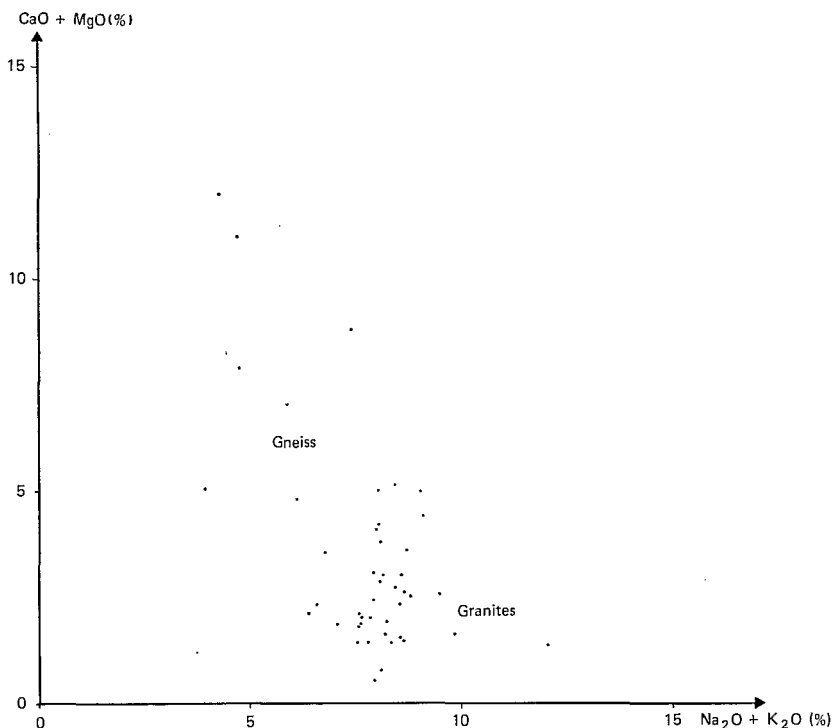


Fig. 4 Teneurs en alcalins et alcalino-terreux du socle granito-gneissique du Cameroun. (cf. Tableau 1, h. t.)

Gérard, 1954) mais cela est douteux (Lasserre, 1958 et 1973, comm. écrite) et des études détaillées sont en cours afin de préciser ses relations stratigraphiques et géochronologiques avec l'ensemble du complexe de base.

2.1.3 LES SÉRIES SÉDIMENTAIRES NON MÉTAMORPHISÉES

Elles sont connues dans des bassins côtiers et des bassins intérieurs et n'ont pas de relation avec les séries précédentes dont elles sont probablement séparées par une très longue lacune due à l'érosion et (ou) à l'absence de sédimentation.

(a) Les bassins côtiers.

Il s'agit des bassins de Campo et de Douala. Ce dernier, le plus étendu, comprend une série d'épaisses formations continentales ou fluvio-marines séparées par quelques intercalations marines fossilifères, d'une puissance globale de plusieurs milliers de mètres : 2.000 m reconnus par les affleurements, 4.000 m d'après la sismique réfraction dans la région de Douala et sans doute plus sur la côte.

Le dépôt de ces séries a commencé au Crétacé inférieur et se poursuit actuellement. La succession lithologique comporte une série de grès, marnes et calcaires avec des récurrences de faciès et se termine par des argiles et des sables.

(b) Les bassins intérieurs.

Plusieurs bassins remplis de sédiments datés généralement du Crétacé inférieur au Crétacé supérieur sont situés dans les régions étudiées : Kontcha à l'extrême NW de l'Amadoua (bassin se prolongeant en Nigéria), la Bini à l'Est, les bassins de la Mbéré et du Djérem constituant la limite sud de l'Adamaoua, Mamfé dans l'ouest où il existe également de nombreux lambeaux peu importants.

Il s'agit de formations continentales et lagunaires avec localement des épisodes marins : conglomérats, grès arkosiques, shales, schistes et calcaires. La subdivision en étages est délicate faute de fossiles caractéristiques et la lithologie varie avec les bassins mais les séries présentent des caractères communs :

- fortes épaisseurs : 1.500 à 2.000 m à Kontcha pour le seul Crétacé inférieur, même ordre de grandeur dans le bassin de la Mbéré (le Maréchal et Vincent, 1971), probablement plusieurs centaines de mètres dans le bassin de Mamfé ;

- structures comparables en graben ou demi-graben : la formation des différents bassins est la conséquence d'importants phénomènes tectoniques. Les limites sont soulignées en partie par des failles, l'une d'elles est notamment marquée par le métamorphisme du conglomérat de base de la série de la Mbéré (Vincent, 1968). Les bassins sont généralement dissymétriques et les couches monoclinales ;

- enfin, de nombreux témoins crétacés plus restreints, dont un a été découvert par l'auteur à proximité de Ngaoundéré, rendent probable l'existence d'une vaste aire de sédimentation reliant entre eux tous ces bassins. Ainsi, on pense qu'il existait une communication entre les bassins de Kontcha et du Nord-Cameroun et que celui de Mamfé était relié à la mer vers Douala et vers le Nigéria.

En conclusion, l'époque crétacée a vu une reprise de l'érosion et de la sédimentation liée à des phénomènes tectoniques de grande ampleur et qui a conduit à la formation de dépôts continentaux, localement lagunaires ou marins, sur de grandes surfaces et souvent de grandes épaisseurs.

De nombreuses venues basaltiques recoupent et recouvrent en partie ces formations.

2.1.4 LE VOLCANISME.

Les manifestations volcaniques sont nombreuses dans l'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun. Gêze (1943) a distingué 3 ensembles de manifestations qui se seraient succédé dans le temps. En fait leurs relations dans l'espace et dans le temps apparaissent aujourd'hui beaucoup plus complexes et sont loin d'être complètement éclaircies, mais le schéma proposé reste commode d'un point de vue descriptif surtout en l'absence d'une révision générale de la question.

(a) Les séries noires inférieures.

Elles sont représentées essentiellement par des basaltes à olivine, aphyriques ou porphyriques. Les analyses chimiques indiquent que ces basaltes ont souvent une composition d'andésites dans l'Adamaoua.

Ces roches affleurent sous forme de filons et surtout de coulées très étiendues, mais relativement peu épaisses, qui ont été fortement réduites par l'érosion et

l'altération. On estime que l'épaisseur ne devait pas dépasser 150 à 200 mètres. En général, les rivières ont suffisamment creusé leur lit pour traverser la couche basaltique et couler sur les roches sous-jacentes.

Suivant les régions ces coulées semblent présenter deux modes d'émission : dans l'Adamaoua, il s'agirait de trapps, c'est-à-dire d'un volcanisme fissural. Les basaltes de la région de Ngaoundéré formeraient un premier trapp allongé suivant la direction NW-SE de Ngaoundéré à Meiganga, ceux de la région de Tignère et Minim-Martap formeraient un second trapp mais très démantelé et qui pourrait être plus ancien que le premier, et ceux du tchabal Mbabo un troisième. Les fissures nourricières ne sont pas connues mais on pourrait admettre qu'elles sont de direction parallèle à l'allongement des trapps soit N 120° E, direction que l'on retrouve à l'échelle régionale, jalonnée parfois par des pointements trachytiques et phonolitiques justement dans les environs de Ngaoundéré et Tignère. Ce sont des produits de différenciation des basaltes dont la mise en place a pu succéder immédiatement à celle des coulées basaltiques et se faire par les fissures nourricières.

Ceci est en fait l'application d'un schéma proposé par P.M. Vincent (1969b) au Tibesti et dans le Nord-Cameroun (Vincent et Armstrong, 1973) et qui semble se transposer parfaitement à l'Adamaoua et en Nigéria. Ces directions sont très obliques par rapport à celles des grandes failles. Cependant, des observations complémentaires sont indispensables pour conclure définitivement.

En dehors de l'Adamaoua, les coulées de basaltes paraissent être issues surtout d'appareils centraux et le volcanisme serait de type hawaïens. Les principaux appareils sont les monts Roumpis, le massif du Manengouba, les monts Bamboutos et le mont Oku. Mais le volcanisme fissural existe aussi dans le recouvrement du plateau bamiléké et peut-être dans la région de la Ring Road (Péronne, 1969).

Les basaltes recouvrent soit le socle, soit les séries crétacées et se trouvent à des altitudes variées à cause des déplacements verticaux antérieurs ou postérieurs aux épanchements. Ils ne sont pas datés avec précision mais il est probable que tous les épanchements ne sont pas contemporains et les âges diffèrent suivant les régions. Des mesures radio-chronologiques systématiques pourraient lever le doute mais une seule a été faite sur un échantillon de basalte du tchabal Mbabo et a révélé un âge de 37.2 ± 0.2 M.A. c'est-à-dire oligocène inférieur (détermination inédite de R.L. Armstrong, University of Yale, U.S.A. sur un échantillon prélevé par P.M. Vincent en 1969). En première analyse, on peut dire que ces basaltes se sont mis en place de l'Eocène à l'Oligocène et dans l'Adamaoua d'après l'état de démantèlement et d'érosion, on pourrait avoir la succession suivante :

- région de Minim-Martap,
- tchabal Mbabo,
- régions de Ngaoundéré et Tignère.

(b) Les séries blanches moyennes.

Elles sont composées d'un cortège de roches plus acides que les précédentes (trachytes très fréquents, andésites, rhyolites, tufs divers) formant des reliefs parfois très importants : Nganha, Djinga, Bamenda, Bamboutos, Manengouba, Roumpis.

Les appareils associés à ces séries sont de structure complexe et présentent souvent des caldeiras. Leur histoire est mal connue.

Ces formations traversent et recouvrent celles des séries inférieures mais leur extension est moins grande.

Alors qu'il était délicat de définir les directions des fractures ayant permis la montée des basaltes de la série inférieure, les appareils des séries moyennes jalonnent très nettement la *direction N 28° E* appelée ligne du Cameroun (Passarge, 1910) qui se prolonge vers le nord jusqu'au Tchad. Seuls les massifs de Nganha et Djinga semblent indépendants de cette direction mais l'un est associé aux basaltes de la région de Ngaoundéré, l'autre à ceux de Tignère ce qui n'est pas un hasard et tous deux sont accompagnés de pointements trachytiques secondaires.

D'une façon générale, les rhyolites sont des venues plus récentes que les autres roches.

(c) Les séries noires supérieures.

Les séries supérieures sont représentées par quelques coulées de basaltes le plus souvent aphyriques renfermant parfois des enclaves de péridotite (Kumba, Nyos) et par d'abondants dépôts de produits pyroclastiques (blocs, cendres et lapillis). Il s'agit d'un volcanisme de type strombolien qui a provoqué la formation de nombreux puys de dimensions modestes (rarement plus d'une centaine de mètres d'élévation).

Ces formations se situent dans les régions de Ngaoundéré (une cinquantaine d'appareils), Wum (une dizaine d'appareils), Foubot (une vingtaine d'appareils), Nkongsamba (une vingtaine de puys), Tombel-Kumba (une soixantaine de puys), sommet et flancs du mont Cameroun (plus d'une centaine).

L'âge de ces manifestations est essentiellement quaternaire et les puys qui leur sont associés jalonnent des directions différentes suivant les régions :

- N 28° E, c'est-à-dire la ligne du Cameroun, dans la région du Mungo (Mbanga, Nkongsamba),
- N 58° E dans la région de Foubot,
- N 140° E dans la région de Wum,
- N 117° E dans la région de Ngaoundéré.

Dans cette série le massif du Mont Cameroun tient une place particulière que l'on peut préciser grâce aux travaux récents de P.M. Vincent (1971). Il s'agit d'un important volcan dont les manifestations remontent au Miocène supérieur et se poursuivent encore à l'heure actuelle : coulées historiques notamment en 1922 et 1959, mofettes, fumerolles. N'ayant pas rejeté de produits acides il se distingue des autres appareils de la ligne du Cameroun et s'apparente à ceux du golfe de Guinée : Fernando Po, Principe, Sao Tome et Annobon, (Vincent, 1973, à paraître).

Il faut signaler en outre dans le sud du massif le mont Etinde constitué de roches à feldspathoïdes : leucitites, néphélinites, étindites. Toutefois, ces roches sont aussi des produits de différenciation d'un magma alcalin ordinaire. Elles sont très profondément altérées au contraire des autres roches, mais elles sont bien d'un âge quaternaire récent : 340.000 ± 60.000 ans pour une néphélinite (R.L. Armstrong et P.M. Vincent, inédit).

CONCLUSIONS SUR LE VOLCANISME :

Les manifestations volcaniques de l'Adamaoua et de l'Ouest-Cameroun sont

donc de types et d'âges assez différents : fissural ou hawaïen, vulcanien et strombolien.

Les roches qui en résultent appartiennent à deux types distincts : d'une part les roches basiques (basaltes essentiellement) qui sont assez abondantes avec leurs produits de différenciation (trachyphonolites et phonolites) qui représentent un volume relativement peu important, d'autre part les roches acides, trachytes et rhyolites, qui n'ont pas de relation magmatique avec les basaltes et sont localisées principalement sur la ligne du Cameroun.

D'un point de vue chimique (Dumort, 1967), le passage du pôle basique au pôle acide se traduit par l'augmentation des teneurs en alcalins et la diminution des teneurs en alcalino-terreux (fig. 5).

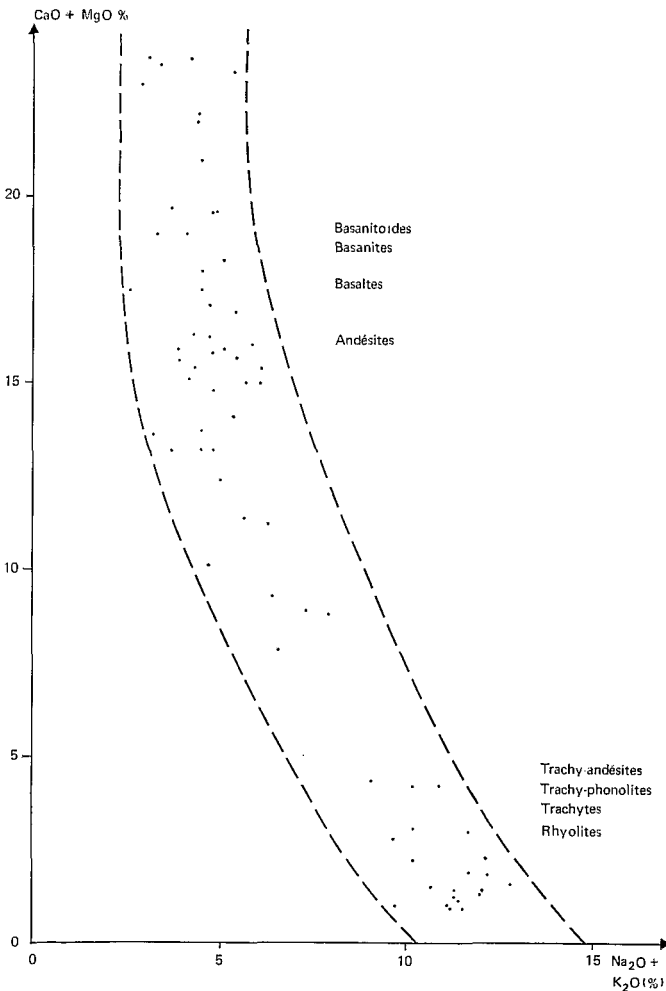


Fig. 5 Teneurs en alcalins et alcalino-terreux des roches volcaniques du Cameroun. (cf. Dumort, 1967 ; Mont Cameroun, Manengouba, Roumpis, pays bamileké, pays bamoun, Bamenda, Bamboutos, Adamaoua).

A l'exception des séries récentes, les roches volcaniques sont généralement profondément altérées. En fonction des conditions locales, actuelles et passées, cette altération a conduit à la formation de sols plus ou moins épais où l'on peut rencontrer des concentrations d'oxydes de fer, de manganèse ou d'alumine (bauxites de l'Adamaoua et de l'Ouest-Cameroun).

Enfin, la localisation des manifestations volcaniques est liée aux directions tectoniques régionales qui sont étudiées maintenant.

2.2 Géologie structurale.

Les sources thermominérales sont en relation directe avec la géologie structurale : d'une part certaines sources sont considérées comme des manifestations tardives du volcanisme, lui-même lié à la tectonique, et d'autre part les circuits empruntés par l'eau sont créés par des fissures, des failles ou des fractures. En conséquence, l'étude structurale régionale revêt une importance primordiale.

Sur la carte structurale à 1/1.000.000 (carte hors texte n° 2), ont été reportés les éléments en relation avec les phénomènes tectoniques soit :

- les lignes structurales du socle indiquées par les cartes à 1/500.000 c'est-à-dire l'orientation des roches cristallophylliennes et les axes de plis ;
- les principales fractures observées sur le terrain ou déduites d'observations photogéologiques ;
- les appareils volcaniques ;
- les massifs plutoniques intrusifs, en particulier les massifs post-tectoniques ultimes ;
- le réseau hydrographique ;
- l'emplacement des griffons des sources thermominérales.

Tous ces éléments servent à tracer des linéaments qui se ramènent à un nombre limité de directions matérialisant en fait les directions structurales et tectoniques du socle.

Le socle plissé et fracturé, les massifs intrusifs, le réseau hydrographique et les sources thermominérales vont être successivement examinés.

2.2.1 LE SOCLE PLISSÉ ET FRACTURÉ.

(a) Orientation et plissement des roches cristallophylliennes.

Ces directions varient suivant les régions : à l'ouest de la ligne Mont Cameroun - Bamenda l'orientation est N 12° E. Elle passe à N 28° E entre la ligne précédente et la ligne Ndikiniméki-Genfalabbo et dans le reste de l'Adamaoua elle s'infléchit encore pour varier entre N 28° E et N 58° E.

L'âge des roches du socle correspond en partie à celui de la phase orogénique panafricaine datée de 550 ± 100 M.A. et qui a consolidé l'ensemble du craton

africain dans sa forme actuelle à partir des trois boucliers de l'Afrique de l'Ouest, du Congo et du Kalahari, formés antérieurement (Clifford, 1970). La formation et la mise en place de la plus grande partie de ces roches sont antérieures à cette orogénie qui les a seulement rajeunies. Seuls les granites intrusifs post-tectoniques semblent s'être mis en place à cette époque. Des axes synclinaux et anticlinaux ont été repérés dans le socle et sont confondus avec l'orientation des couches.

Les directions précédentes sont perturbées par des décrochements importants qui ont dû se manifester à la fin de l'orogénèse (début du Primaire).

(b) Fractures et mylonites.

La plus importante des failles primaires est visible au sud de l'Adamaoua où elle est actuellement marquée par des escarpements de 600 m. En fait ce rejet est le résultat d'une réactivation tectonique depuis le Secondaire et, à l'origine, cette faille est surtout un décrochement.

En Amadaoua, il existe en fait trois failles sensiblement parallèles mais qui convergent vers l'Ouest au niveau du confluent Mbam-mayo Darlé par l'intermédiaire de segments dirigés N 28° E (ligne du Cameroun) et N 58° E (direction somalienne de Krenkel, 1925-1938).

Ensuite, la direction passe brusquement de N 73° E à N 58° E entre le mayo Kouï et Fouban. Ce passage correspond à l'intersection avec la direction majeure de l'ouest de l'Adamaoua, N 28° E, qui est un relais de la ligne du Cameroun. A l'ouest de Fouban les observations sont discontinues à cause du recouvrement volcanique mais des mylonites jalonnent la direction N 58° E jusqu'à Bafang.

Les mylonites sont en fait caractéristiques de l'ensemble de ces accidents et elles peuvent atteindre jusqu'à 6 km d'épaisseur apparente, témoignant ainsi de l'intensité des phénomènes de compression et de friction qui leur ont donné naissance.

Dans l'Ouest-Cameroun, les mylonites sont les seuls témoins des failles anciennes qui ne paraissent pas avoir joué comme dans l'Adamaoua. Un premier groupe comprend des bandes situées au nord et au sud-est de Bafang ainsi qu'au sud-est de Nkongsamba, dont les orientations varient de N 28° E à N 58° E. Un deuxième groupe comprend une bande probablement continue de Dschang à Ekoneman (120 km) et orientée sensiblement N 105° E ainsi que de petites bandes de direction N 0° à 28° E. Le tracé de cet ensemble de mylonites suggère que le grand décrochement du sud de l'Adamaoua se divise au niveau de Fouban en un accident encore très important à peu près E-W et en plusieurs accidents de moindre importance NE-SW. Le mouvement relatif qui a suivi la rupture s'est fait vers l'est pour la partie septentrionale et vers l'ouest pour la partie méridionale : c'est un décrochement dextre (Black and Girod, 1970, fig. 1, Structural map of West Africa).

Aucun de ces décrochements accompagnés de mylonites n'a donné lieu à des manifestations volcaniques.

D'autres failles remarquables existent dans ces régions et elles sont marquées par de très grands rejets verticaux. Très nombreuses, elles ont divisé le socle en compartiments qui se sont déplacés les uns par rapport aux autres et sont à l'origine

du modelé régional caractérisé par une juxtaposition de blocs surélevés ou effondrés. (*block faulting*).

Les roches ont fréquemment été broyées à leur contact mais les zones mylonitisées sont beaucoup plus réduites que précédemment.

Voyons les principales unités structurales ainsi définies.

— *Le fossé du Sud Adamaoua.*

Long d'environ 250 km, c'est la bordure sud du plateau de l'Adamaoua. Il a fait l'objet d'une mise au point récente (le Maréchal et Vincent, 1971) et nous rappelons qu'il est dû à la réactivation tectonique d'un décrochement très ancien, à la suite de mouvements d'extension dirigés normalement à cette faille qui ont conduit à une structure en demi graben caractéristique. Les failles qui limitent le fossé au sud, également de direction N 73° E, sont de formation plus récente que celle du nord qui coïncide avec la ligne de l'Adamaoua. Vers l'est le fossé se termine en coin par le jeu de failles orientées N 58° E. Les sédiments gréseux qui remplissent ce fossé sont également faillés comme en témoigne entre autres un important filon de mylonite quartzeuse résultant de l'écrasement des grès.

— *Le plateau de l'Adamaoua.*

C'est un horst composé de blocs à des niveaux différents. Toutes les failles qui les limitent n'ont pas été reconnues mais les directions principales sont les suivantes : N 73° E et N 58° E qui prédominent à l'est, N 28° E, E-W, et N 135° E qui prédominent à l'ouest et enfin N 117° E bien marquée dans tout l'Adamaoua. On peut y distinguer plusieurs régions naturelles :

- le plateau de Ngaoundéré à une cote voisine de 1200 m, bordé au nord et à l'est par des compartiments à 1400 m,
- la vallée du Faro de 900 à 1000 m,
- la région de Tignère 1200 m,
- la région de Minim-Martap vers 1300 m,
- la plaine koutine et la vallée du mayo Déo vers 600 m,
- le tchabal Mbabo qui culmine à 2500 m et où le socle affleure à plus de 2000 m,
- la région de Banyo vers 1200 m.

Le passage entre ces différentes régions se fait par des escarpements plus ou moins accusés.

— *La plaine Tïkar.*

Située à une cote d'environ 750 m, elle fait la transition entre l'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun. D'importantes falaises la limitent au NE, au NW et au SW qui soulignent les directions N 135° E, N 28° E et N 58° E.

L'Ouest-Cameroun comprend *une première série de régions naturelles* alignées approximativement sur la ligne du Cameroun :

- la région de la Ring Road,
- le plateau bamiléké,
- la plaine des Mbos,
- le Mungo,
- le mont Cameroun.

La structure générale est celle d'un horst limité par des fractures N 28° E et subdivisé par des failles transversales N 142° E, en horst et graben secondaires (plaine des Mbos et graben de Tombel notamment). La direction N 58° E est également bien représentée.

Entre ces régions et le Nigéria existe *un autre ensemble de régions* moins bien connues faute de voies de communications et de cartes mais où dominent les directions N 12° E et N 105° E.

Il existe donc toute une série de directions de fractures dans le socle dont l'une au moins est certainement ancienne (N 117° E ligne de l'Adamaoua) et a été réactivée au cours du Crétacé et sans doute ultérieurement. Il est difficile de se prononcer sur l'âge des autres. Cependant la ligne du Cameroun doit être également très ancienne car elle paraît avoir subi un décrochement au niveau de la ligne de l'Adamaoua : les failles limitant les horsts du mont Cameroun et du Manengouba butent contre le prolongement de la ligne de l'Adamaoua et se retrouvent plus vers l'est dans le compartiment nord (Mayo Darlé-Kontcha). Si cette observation correspond à la réalité, elle impliquerait un décrochement latéral d'à peu près 160 km que l'on retrouve en considérant les zones où les grandes failles de la ligne de l'Adamaoua se divisent : la première au confluent Mbam-mayo Darlé et la seconde supposée vers Foubot. Ces deux zones sont également distantes d'à peu près 160 km et on peut supposer qu'à l'origine elles étaient confondues.

Enfin, à l'appui de l'ancienneté de la direction de la ligne du Cameroun, on remarque que l'orientation des roches cristallophylliennes suit de près cette direction à l'ouest de l'Adamaoua entre les villes de Mayo Darlé et Kontcha. D'importants filons de quartz mylonitiques la soulignent dans la vallée du mayo Déo et elle marque un changement de direction de la faille de la ligne de l'Adamaoua au voisinage du 11ème parallèle. Ceci conduit à émettre l'hypothèse que cette ligne du Cameroun correspond à un accident contemporain de la ligne de l'Adamaoua et qui aurait joué aussi comme une faille de cisaillement provoquant un décrochement du compartiment est vers le nord mais décrochement de moindre ampleur que le premier. On observe aujourd'hui la combinaison de ces mouvements.

Cette hypothèse demeure fragile car elle est fondée seulement sur le tracé des failles et l'orientation des roches cristallophylliennes. Des observations de terrain complémentaires sont nécessaires pour la confirmer ou l'infirmer, mais il faut souligner la difficulté de prouver des décrochements horizontaux dans des roches cristallophylliennes où les repères sont rares.

Quant aux autres directions, on note que, tout à fait à l'ouest, la direction N 12° E est aussi celle d'axes de plis dans les roches cristallophylliennes du socle et qu'elle est donc également assez ancienne. Mais on ne peut vraiment rien dire des autres directions de fractures.

En résumé, trois ensembles de phénomènes tectoniques se sont succédé :

- plissement des roches cristallophylliennes,
- tectonique cassante avec grands décrochements,
- tectonique cassante avec importants rejets verticaux.

Et on note que les mouvements ont suivi des directions tectoniques constantes qui ont donc marqué la région depuis longtemps.

2.2.2 LES APPAREILS VOLCANIQUES.

Nous rappellerons seulement ce qui a été dit à propos du volcanisme :

- volcanisme basique de l'Adamaoua avec des fractures nourricières peut-être orientées NW-SE (N 120° E),
- volcanisme acide de type central avec de nombreux appareils jalonnant la ligne du Cameroun (N 28° E),
- volcanisme strombolien soulignant plusieurs directions : N 28° E (Mbanga), N 53° E (Manengouba et pays Bamoun), N 142° E (Ring Road), et N 117° E (Adamaoua).

Ce sont les mêmes directions que précédemment auxquelles vient s'ajouter la ligne de l'Adamaoua. La relation avec la tectonique est évidente et la montée du magma a été facilitée par la présence de failles profondes préexistantes mettant en communication la surface avec le magma basaltique sous-crustal. Cette montée s'est faite dans les zones de bombements et de surrection épirogénique accompagnée de la formation de grabens (Black and Girod, *op. cit.* ; Vincent, 1969b).

2.2.3 LES MASSIFS PLUTONIQUES INTRUSIFS.

Ce sont surtout les massifs post-tectoniques ultimes (Tertiaire) qui soulignent des directions remarquables :

- les massifs du Koupé, du Nlonako et de Bana sont alignés à peu près N 58° E, de même ceux de Sabongari et Mayo Darlé ;
- ceux de l'ouest de l'Adamaoua jalonnent la direction de la ligne du Cameroun de même ceux qui existent vers le nord du Cameroun en dehors des régions étudiées et qui sont situés dans le même alignement.

L'emplacement de ces massifs est donc lié à des directions tectoniques régionales.

2.2.4 LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE.

Dans les régions de socle, il est de règle que le réseau hydrographique soit étroitement lié au réseau des failles et fractures. C'est le cas ici et sur la carte ont été soulignées les portions de cours d'eau dont le tracé est remarquable : les directions ainsi obtenues coïncident avec celles qui ont été définies précédemment.

La carte est suffisamment parlante sur ce point pour qu'il ne soit pas nécessaire de faire une énumération fastidieuse. Remarquons toutefois la ligne définie par

le cours inférieur de la Katsina au Nigéria et son affluent la Metschum et qui se poursuit jusqu'à la Sanaga. Son orientation N 142° E est celle de quelques fractures importantes de l'Ouest-Cameroun. Cette ligne est remarquable par son extension qui déborde les limites de la carte.

2.2.5 LES SOURCES THERMOMINÉRALES.

Elles sont mentionnées brièvement ici, puisqu'il en sera longuement question plus loin, pour dire qu'elles s'alignent le plus souvent sur les directions déjà mentionnées et que parfois elles peuvent définir de nouveaux linéaments parallèles aux précédents particulièrement dans la région de Tignère.

2.2.6 CONCLUSION DE L'ÉTUDE STRUCTURALE.

Tous les éléments considérés ont permis de mettre en évidence les grandes directions structurales régionales :

- N 12° E,
- N 28° E ligne du Cameroun,
- N 58° E direction somalienne,
- N 73° E ligne de l'Adamaoua,
- N 117° E,
- N 135° à 142° E direction érythréenne.

Ces directions contrôlent les plissements des roches cristallophylliennes, les failles, le réseau hydrographique, l'emplacement des appareils volcaniques, des massifs intrusifs post-tectoniques ultimes et des sources thermominérales. La plupart sont très anciennes et ont été réactivées au cours de l'évolution géologique locale. Les effets les plus importants s'observent le long des lignes du Cameroun et de l'Adamaoua.

DEUXIEME PARTIE

LES SOURCES THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

1 – HISTORIQUE. MÉTHODE D'ÉTUDE. RÉSULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

1.1 Historique.

L'existence de sources thermominérales au Cameroun a été reconnue depuis longtemps : les Allemands en signalent vers 1911 à Banyo et Ngaoundéré (Fickendey, 1911).

La source de Baré au N de Nkongsamba est captée à la même époque et plusieurs études de détail sont publiées ultérieurement : Peirier (1928), Buisson (1930), Geslin et Lepape (1930), Buisson (1931).

Les sources salées de la région de Mamfé sont mentionnées par Wilson en 1928 et Gèze (1943) cite l'hypothèse de l'existence de couches salifères pour expliquer leur origine. De plus cet auteur fait état de renseignements indiquant l'existence de sources minérales dans le massif du Manengouba.

Une note sur le lahoré de *Ngaoundéré* (1) cite une quarantaine de sources thermominérales dans l'Adamaoua (Delcroix, 1937).

(1) Le mot *lahoré* désigne une source thermominérale en dialecte foulfouldé.

Dans une étude sur les ressources en calcaire du Cameroun, J. Gazel (1947) décrit le gisement de travertins de Ngol (SW de Nkongsamba) exploité au cours de la guerre de 1939-1945 et associé à ces sources thermominérales.

Un croquis de E. ROCH (1953) mentionne une source natronée sur la rive gauche de la Mbéré ; il s'agit vraisemblablement de la source de Yaisunu (n° 95).

En 1955, l'Administration française procède à une enquête pour recenser les sources de l'Adamaoua tandis que D. Chatonier et M. Lasserre publient en 1958 une étude hydrogéologique des 18 principales sources de la région. De 1955 à 1960, se déroule une campagne de travaux de captage qui aboutit à l'équipement de 25 sources pour leur utilisation comme point d'eau pour le bétail (puits, pompe à main, citerne, abreuvoir).

En même temps, les géologues chargés du levé de la carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 signalent les sources thermominérales qu'ils ont l'occasion de rencontrer.

Finalement, c'est plus d'une centaine de noms de sources qui étaient connus avant le début de ce travail mais une trentaine seulement étaient localisées et parfois étudiées.

1.2 Inventaire.

Les documents précédents ont servi de base à l'inventaire et ont été complétés par enquête auprès des populations locales de manière à situer et voir les points d'eau déjà signalés et à en découvrir de nouveaux.

L'inventaire établi suivant cette méthode a été publié sous forme de rapports multigraphiés (le Maréchal, 1969, 1970 et 1971). Il comporte 150 noms de sources thermominérales parmi lesquelles une vingtaine n'ont pas été vues du fait de leurs difficultés d'accès et sur les 130 qui restaient, une quinzaine se sont avérées des sources virtuelles, c'est-à-dire que faute d'une pression suffisante et d'une exploitation régulière l'émergence a disparu et les eaux se perdent par circulation latérale. Les emplacements sont cependant bien connus et il suffirait probablement d'un aménagement sommaire pour retrouver l'eau minérale.

On peut donc compter environ 115 émergences naturelles d'eaux thermominérales dans l'Adamaoua et l'Ouest-Cameroun (voir cartes 1 et 2 et tableau 2 h.t.).

Cet inventaire n'est probablement pas exhaustif car toutes les sources ne sont pas forcément connues de la population, dans les régions peu fréquentées en particulier. La prospection par enquête reste toutefois la seule manière efficace de procéder car il n'est pas possible de déduire l'existence d'une source thermominérale de l'examen de données géologiques ou géographiques, tout au plus pourra-t-on définir des zones favorables par leur tectonique ou par les phénomènes volcaniques qu'on y rencontre et, à moins de parcourir ces zones en tous sens, seule une enquête auprès de la population permettra de faire l'inventaire des sources thermominérales.

Cependant, les techniques récentes de télédétection devraient contribuer à

faciliter la prospection des eaux thermales s.s. en mettant en évidence des zones chaudes de l'écorce terrestre. Ainsi la radiométrie infrarouge a été utilisée pour la prospection géothermique et a donné des résultats intéressants (Cazal *et al.*, 1971) mais l'existence d'une anomalie thermique n'implique pas nécessairement celle d'une source thermique. C'est un facteur favorable qui s'ajoute aux autres précédemment définis.

1.3 Méthodes d'étude.

Chaque source visitée a fait l'objet d'observations et de mesures *in situ* puis en laboratoire.

1.3.1 ÉTUDES IN SITU

Chaque émergence a été définie dans son contexte géologique : description du griffon, des roches affleurant dans son environnement immédiat, des dépôts éventuels, etc ...

Ensuite, plusieurs mesures ont été faites sur place :

- La *température de l'eau* et la *température atmosphérique* ont été mesurées avec un thermomètre à 1/5e de degré permettant d'apprécier le 1/10e.

Pour les sources thermales un thermomètre à maximum gradué en degrés a été utilisé.

- La *résistivité* a été mesurée à l'aide d'un auditoammètre Chauvin et Arnoux ; on en a déduit la conductivité à 25°C, sa valeur étant plus maniable que la résistivité car elle est directement liée à la charge ionique. On a également choisi la température de référence 25°C au lieu de 18 ou 20°C que l'on rencontre habituellement pour les mesures faites en Europe car elle est plus proche des températures rencontrées couramment au Cameroun.

- Le *pH* a été mesuré avec un pHmètre Heito type PP26 permettant d'apprécier 0,05 unité pH.

Enfin, plusieurs dosages chimiques ont été effectués avec un laboratoire portatif Hach (distribué en France par Prolabo). Les eaux trop boueuses ont été filtrées auparavant.

- *Alcalinité* (CO_3^{2-} et HCO_3^-) : titration par H_2SO_4 après addition d'un indicateur coloré (phénolphthaléine et vert de bromocrésol).

- *Anhydride carbonique dissous* : titration par NaOH après addition de phénolphthaléine.

- *Calcium et magnésium* : titrations par la solution d'EDTA après addition d'indicateurs colorés.

Les dosages précédents ont été obligatoirement effectués *in situ* à cause de l'évolution des eaux thermominérales à partir du moment de leur prélèvement. D'autres dosages étaient possibles : ils ont donné une première idée de la nature de la minéralisation de l'eau avant de connaître les déterminations du laboratoire :

- *Chlorure* : titration par le nitrate mercurique.

- *Sulfate* : turbidimétrie après précipitation du sulfate de baryum.
- *Silice* : colorimétrie après formation du silicomolybdate.
- *Fer* : colorimétrie après addition de phénanthroline.
- *Manganèse, cuivre et chrome* ont été testés également par colorimétrie mais leurs faibles concentrations n'étaient pas mesurables par ces méthodes.
- *Hydrogène sulfuré* : un test semi-quantitatif pour détecter l'hydrogène sulfuré dissous a été appliqué le cas échéant : l'effervescence d'une pastille d'Alka-Seltzer libère les gaz dissous qui vont colorer un papier indicateur que l'on compare ensuite à une gamme étalon.

Enfin un échantillonnage était effectué en vue des déterminations de laboratoire. Les quantités prélevées dans des flacons de polyéthylène étaient de 2 ou 4 l suivant la conductivité.

Aucune autre mesure n'a été faite, en particulier pas de mesure de débit qui aurait nécessité pour chaque émergence naturelle des travaux d'aménagement et un équipement assez lourd non prévus dans le cadre de cette étude générale. Cependant, quelques chiffres ont été donnés pour certaines des sources aménagées et il en sera question plus loin. De même ni les gaz ni les compositions isotopiques n'ont été déterminés. Le coût de ces analyses est malheureusement trop élevé pour qu'elles soient effectuées systématiquement. Ce n'est qu'au terme de cette étude qu'on pourrait choisir les sources où ces déterminations seraient les plus intéressantes à faire.

1.3.2 ÉTUDES DE LABORATOIRE.

Les autres analyses chimiques ont été réalisées en laboratoire.

(a) Le laboratoire du Centre ORSTOM de Yaoundé a complété l'analyse des éléments majeurs : sodium et potassium par spectrophotométrie de flamme, l'ion chlorure par titration, l'ion sulfate par analyse pondérale, le fer et la silice par colorimétrie, mesure du résidu sec et préparation des échantillons pour le dosage des éléments traces.

(b) Le laboratoire des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à Bondy a dosé les éléments traces par spectrométrie d'émission dans l'arc (Pinta, 1962). Les résultats sont semi-quantitatifs (à 30% près). Les éléments recherchés étaient : argent, baryum, bismuth, césium, chrome, cobalt, cuivre, étain, gallium, germanium, lithium, manganèse, molybdène, nickel, plomb, rubidium, strontium, vanadium, zinc et zirconium.

(c) Enfin l'interprétation de l'ensemble des résultats d'analyses, soit un effectif de 2 à 3.000 données, a fait largement appel aux méthodes de l'analyse statistique dont la mise en œuvre a été effectuée grâce au centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris et les résultats, bien que faisant déjà l'objet d'une note (le Maréchal et Teil, 1973) seront rappelés et complétés dans ce mémoire.

1.4 Les résultats.

1.4.1 PRÉSENTATION.

Les tableaux de résultats sont placés en annexe à la fin du mémoire (Tableau 3, h.t.).

— Chaque analyse est repérée par un *numéro* qui renvoie au répertoire des sources et aux cartes (Tableau 2. h.t.).

— Ce numéro est parfois affecté d'un *astérisque* qui indique que les dosages ont été faits entièrement au laboratoire. Ce sont les résultats d'une première campagne de prospection pour laquelle nous ne disposions pas du matériel nécessaire. Une deuxième campagne a permis de voir la plupart des sources une seconde fois. Les moins importantes ont été laissées de côté.

Chaque analyse comprend les déterminations suivantes :

- La *température* de l'eau au griffon exprimée en °C,
- Le *pH* mesuré sur place,
- la *conductivité* mesurée sur place, rapportée à la température de 25°C et exprimée en micromho/cm,
- les *teneurs en ions dits majeurs* en milliéquivalents par litre (mé/l) : d'une part les anions, bicarbonate, carbonate, chlorure, sulfate et leur somme, d'autre part les cations, calcium, magnésium, sodium, potassium et leur somme,
- la *minéralisation* en milligrammes par litre (mg/l) est la somme des ions majeurs,
- le *résidu sec* en mg/l mesuré au laboratoire après évaporation à 110°C,
- l'*anhydride carbonique dissous* en mg/l dosé sur place,
- la *silice* et le *fer* (exprimé sous forme de Fe₂ O₃) en mg/l,
- les *teneurs en éléments traces* en microgrammes par litre (µg/l). 13 éléments ont pu être dosés semi-quantitativement : manganèse, plomb, molybdène, étain, vanadium, cuivre, nickel, cobalt, titane, chrome, strontium, baryum et lithium. Les autres éléments recherchés n'étaient pas dosables par cette méthode : argent, bismuth, césium, gallium, germanium, rubidium, zinc et zirconium. De plus, les teneurs en strontium dépassent bien souvent la limite supérieure de détection de la méthode et n'ont pas pu être déterminées dans ce cas.

1.4.2 CRITIQUE DES RÉSULTATS.

Avant d'étudier l'ensemble des résultats et d'en tirer des conclusions, il est important de connaître la valeur qu'on peut leur accorder.

(a) *Représentativité des échantillons analysés.*

Cette question se pose à cause des conditions naturelles d'émergence des sources étudiées. Lorsqu'on parle de sources, on s'imaginerait de l'eau s'écoulant d'une fissure dans un rocher. Ce mode d'émergence est ici assez rare (une trentaine de sources) et on observe la plupart du temps un puits naturel ou artificiel dans une

zone plus ou moins marécageuse, sans écoulement visible en surface. On pourrait penser qu'il s'agit de marécages ordinaires s'il n'y avait des dégagements gazeux pour signaler l'émergence thermominérale.

Dans ces conditions, on peut se demander dans quelle mesure l'eau qui est prélevée et analysée n'est pas le résultat d'un mélange d'eau thermominérale et d'eau superficielle. L'existence même de l'émergence montre que la pression de l'eau venant de la profondeur est suffisante pour l'amener jusqu'à la surface en traversant éventuellement les circulations superficielles. Il se produit probablement un entraînement d'eau superficielle donc un mélange mais il est limité car la pression de l'eau minérale tend plutôt à repousser l'eau de surface. L'eau qui est analysée est donc légèrement diluée par des eaux de surface très peu minéralisées. Cette dilution est encore limitée du fait que les prélèvements ont été effectués au cours de la saison sèche mais elle est bien réelle car des différences sensibles de conductivité ont été observées entre les deux campagnes de prélèvements. Par exemple, au moment de l'aménagement de la source de Gade (n° 28) pendant lequel des essais de pompage ont pu être faits, la conductivité est passée de 1160 à 2420 micromhos/cm.

La conclusion qui s'impose est qu'il faut *considérer les minéralisations globales mesurées comme étant des limites inférieures* et qu'il n'est guère possible de les comparer entre elles. Mais comme il s'agit d'une dilution par de l'eau relativement pure les *proportions des différentes substances dissoutes* sont à peu près conservées pour chaque source.

(b) *Nécessité de dosages in situ.*

Le prélèvement d'un échantillon d'eau pour l'analyse au laboratoire ne conserve généralement pas les conditions physicochimiques de l'environnement naturel de l'eau et peut provoquer des modifications dans les caractéristiques de l'échantillon pH, alcalinité, résistivité, teneurs en éléments dissous. Les résultats obtenus au laboratoire ne peuvent donc pas être comparables à ceux que l'on obtient dans les conditions naturelles. Ceci a été vérifié pour des eaux de rivières et de nappes d'eau douce (Roberson *et al.*, 1963) et c'est encore plus vrai pour les eaux thermominérales dont la minéralisation est souvent importante et qui renferment fréquemment des gaz dissous.

C'est le cas notamment des eaux bicarbonatées qui, une fois prélevées, vont perdre spontanément l'anhydride carbonique dissous. La diminution de la pression de CO₂ va rompre l'équilibre des bicarbonates et entraîner la précipitation de carbonate de calcium.

Il y a deux manières de résoudre ce problème : d'une part empêcher l'évolution de l'eau par l'addition de réactifs appropriés, d'autre part effectuer un certain nombre de dosages au moment du prélèvement.

La première solution n'est jamais parfaite car l'addition de réactifs conserve certaines caractéristiques mais en modifie d'autres. L'addition de chloroforme permet de conserver l'alcalinité (Marcille, 1959 ; voir également la circulaire n° 170 du 24 Novembre 1954 parue au Journal Officiel Français du 19 Décembre 1954). L'acidification par HCl empêchera la précipitation du calcium et du magnésium. Plusieurs

prélèvements sont donc nécessaires et de toutes façons il n'est pas possible de bloquer l'évolution du pH.

La deuxième solution paraît donc plus intéressante. C'est elle que nous avons adoptée. Cependant, les déterminations sur le terrain seront moins précises qu'au laboratoire.

En fait, l'idéal serait une solution intermédiaire : mesures *in situ* du pH, de la résistivité et de l'alcalinité, prélèvement acidifié pour le dosage du calcium et du magnésium, prélèvement d'eau naturelle pour les autres déterminations.

L'évolution de la composition des eaux thermominérales du Cameroun a été vérifiée au cours des deux campagnes de prospection. Pendant la première, seule la conductivité était mesurée sur place et le reste de 1 à 4 mois après au laboratoire alors que, pendant la seconde, plusieurs dosages ont pu être faits *in situ*. Les résultats les plus significatifs sont présentés dans le tableau 4 où les valeurs voisines des conductivités mesurées *in situ* au cours de chaque campagne montrent que les minéralisations étaient également voisines si on ne tient pas compte d'une évolution du chimisme des eaux entre les deux campagnes qui est négligeable d'après ce que l'on sait de sources observées au cours de longues périodes. Les modifications principales sont les suivantes :

- *la conductivité diminue*, conséquence d'une diminution de la quantité d'ions en solution donc d'une précipitation ;
- *la teneur en bicarbonate diminue*, tandis que se forment parfois des ions carbonates ;
- *la teneur en calcium diminue* ;
- *la teneur en magnésium* tend parfois à diminuer mais *reste sensiblement constante* ;
- *corrélativement le pH augmente*, les eaux acides à l'émergence devenant basiques.

Il s'avère donc nécessaire d'effectuer un certain nombre de mesures *in situ*. Bien qu'elles n'aient pas été indispensables les teneurs en chlorure et sulfate ont été déterminées aussi sur place. Les résultats du laboratoire ont généralement confirmé ceux du terrain.

(c) Équilibre ionique des analyses.

Les résultats d'une analyse d'eau ne sont corrects que si les sommes des teneurs en anions et en cations exprimées en milliéquivalents par litre sont égales, ceci afin que soit respecté l'équilibre électrique de la solution. Compte tenu de la précision des analyses et des ions en faible teneur qui ne sont pas dosés, la différence entre les deux sommes ne doit pas dépasser 6% du total (Castany, 1967, p.593). Comme ici une partie des dosages a été faite sur le terrain avec une précision moindre qu'au laboratoire (dilutions souvent obligatoires, etc ...) une différence de 10% est acceptable.

**Tableau 4 ÉVOLUTION DE CERTAINES CARACTÉRISTIQUES
DE QUELQUES EAUX THERMOMINÉRALES
ENTRE L'INSTANT DU PRÉLEVEMENT ET
CELUI DE L'ANALYSE DU LABORATOIRE.**

N°	Conductivité		pH	HCO ₃	CO ₃	Ca	Mg
	1 ^{re} camp.	2 ^e camp.					
3	940 990	905	7.3 5.8	5.8 9.8	0 0	0.9 2.9	3.1 2.6
9	2 500 3 500	3 640	7.3 6.2	36 42	0 0	0.5 9.6	8.5 9.4
17	750 2 200	2 540	7.6 5.9	21 30	0 0	0.8 8.2	3.6 5.8
28	1 300 2 380	2 420	7.4 6.0	21 34	0 0	2.7 16	15 12
37	940 1 130	1 280	7.7 7.2	12 16	0 0	1.1 5.5	6.5 6.0
38	2 700 3 500	3 100	7.7 6.6	6.8 40	0 0	0.9 9.0	5.3 5.2
40	1 180	1 145	7.2 5.9	11 14.5	0 0	1.0 5.0	7.0 5.0
45	1 100 1 600	1 565	6.1 8.0	16 20	0 0	10.0 8.0	10 6.5
74	2 600 3 330	3 470	7.5 6.3	37 50	0 0	1.5 11	29 31
84	1 700 2 600	2 730	7.7 6.3	21 40	0 0	3.0 15.5	11 12
85	750 1 500	1 550	7.4 6.1	14 20	0 0	1.0 7.0	4.2 7.0
92	1 500 2 050	2 050	5.3 7.6	18 28	0 0	2.6 9.0	11 8.0
106a	1 200 1 580	1 520	8.0 5.9	11 18.4	1 0	0.24 5.70	2.3 2.1
112	1 400 2 020	1 300	7.9 6.25	15 25	0.6 0	0.9 7.1	3.3 3.9
113	1 160	1 115	8.3 6.4	10 14	0.9 0	0.5 1.4	2.5 2.45
115	7 500 9.330	9 500	8.2 6.2	6.2 32	0.6 0	0.72 8.5	2.6 4.3

- 1^{ère} ligne : détermination au laboratoire (1^{ère} campagne)
- 2^{ème} ligne : détermination *in situ* (2^{ème} campagne). La conductivité *in situ* est connue pour les 2 campagnes.

La conductivité est exprimée en micromhos/cm, les teneurs en milliéquivalents par litre.

Un certain nombre de résultats ne sont pas corrects à ce point de vue : d'une part, des eaux bicarbonatées présentent un excès d'anions par rapport aux cations, d'autre part, des eaux sulfatées présentent au contraire un déficit d'anions par rapport aux cations, ceci étant suffisamment systématique pour qu'il ne s'agisse pas d'erreurs accidentelles.

Il semble qu'il y ait une explication à chacune de ces anomalies : pour les eaux bicarbonatées, on aurait non pas un excès d'anions mais un déficit de cations provenant d'une erreur de technique dans le dosage des éléments alcalino-terreux sur le terrain : la titration se faisant à pH très basique aurait dû être précédée d'une acidification pour éliminer l'acide bicarbonique et éviter la précipitation des carbonates alcalino terreux au moment de l'addition de base forte destinée à obtenir le pH alcalin.

Il est donc probable que les teneurs en calcium des analyses en cause (au nombre de 23) sont trop faibles. Cette explication est apparue trop tard pour qu'il soit possible d'en tenir compte.

Pour les eaux sulfatées le déficit des anions serait dû à la présence d'ions non dosés en particulier les anions sulfures et hyposulfites qui existent fréquemment dans ces types d'eau que l'on peut comparer à certaines eaux thermominérales des Pyrénées qui contiennent jusqu'à 2 ou 3 mé/l d'ions sulfure et hyposulfite.

(d) *Les teneurs des éléments en traces.*

La méthode de dosage des éléments en traces par spectrométrie d'émission dans l'arc ne permet d'obtenir que des résultats semi-quantitatifs dont la précision est au mieux de 30%. Les teneurs n'ont donc qu'une valeur indicative et chacune prise isolément n'a pas beaucoup de signification. En revanche, la comparaison des résultats entre eux est certainement significative et c'est dans cette optique qu'il faut considérer les résultats.

D'autre part, les dosages ont été faits sur les résidus secs obtenus à partir de l'eau non filtrée. Cette méthode présente l'avantage de tenir compte de la floculation de beaucoup d'échantillons, due essentiellement à la précipitation d'hydroxydes ferriques à partir des ions ferreux qui entraînent avec eux une proportion importante d'éléments en trace (voir plus loin). Elle présente l'inconvénient de faire intervenir les éventuelles matières en suspension d'origine superficielle et de nature essentiellement argileuse qui peuvent introduire une erreur par excès qu'on ne peut guère estimer. Dans ces conditions, une trop grande précision dans les méthodes d'analyse serait inutile.

(e) *Conclusion sur la valeur des résultats d'analyses.*

Les remarques précédentes montrent que bien des résultats paraissent contestables.

Il est donc prudent pour le moment de ne pas leur accorder une valeur absolue et ils sont difficilement comparables à ceux qu'on peut trouver dans la littérature dont on ignore souvent la manière dont ils ont été acquis. Les dosages *in situ* sur des eaux thermominérales sont notamment assez rares.

En revanche, les 130 analyses disponibles ici sont très homogènes puisqu'elles ont toutes été obtenues par les mêmes méthodes et la comparaison des résultats entre eux est tout à fait justifiée. En ayant présentes à l'esprit les remarques ci-dessus il sera possible d'en tirer des conclusions valables.

2 – CONDITIONS DE CIRCULATION ET D'ÉMERGENCE DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

2.1 Préliminaire. Origine de l'eau alimentant les sources.

Il n'est question ici que de l'eau proprement dite et pas des substances qui y sont dissoutes. Comme aucune recherche particulière n'a été faite sur ce point au Cameroun, les différentes hypothèses qui se présentent vont être envisagées et la plus compatible avec les conditions régionales sera retenue.

D.E. White (1957b) a discuté les différentes origines possibles d'une eau souterraine :

— *L'eau météorique* est une eau qui a été récemment en relation avec la circulation atmosphérique et dont l'âge est faible comparé à celui des roches aquifères.

— *L'eau connée* ou *fossile* correspond à l'eau interstitielle des sédiments et des roches volcaniques extrusives. Le terme d'eau fossile a été proposé pour désigner l'eau connée qui baigne le sédiment dont elle est le milieu de dépôt. Mais la plupart du temps, l'eau fossile migre et devient de l'eau connée. L'expression *eau de formation* désigne l'eau présente dans les roches juste avant leur forage, c'est un terme non génétique utilisé pour des eaux d'âge et d'origine inconnus et qui ne doit pas remplacer le concept génétique d'eau connée ou fossile.

— *L'eau métamorphique* est celle qui est ou a été associée aux roches au cours de leur métamorphisme. Elle proviendrait en grande partie de la transformation des minéraux hydratés en minéraux anhydres. Une autre partie pourrait être un reliquat d'eau connée.

— *L'eau magmatique* est liée à un magma ou en dérive. Une partie peut être juvénile (cf. ci-dessous) mais une partie peut provenir du recyclage d'eau des types précédents par fusion partielle. On y distingue l'eau plutonique qui a été séparée du magma à de grandes profondeurs et l'eau volcanique qui a été séparée du magma en surface ou à faible profondeur.

— *L'eau juvénile* est de l'eau nouvelle issue d'un magma primaire qui n'a pas encore été en contact avec l'atmosphère.

Enfin, beaucoup d'eaux sont le résultat du mélange d'eaux de différentes origines. Ainsi des eaux d'origine profonde sont-elles fréquemment diluées au voisinage de la surface par des eaux météoriques.

Ces types ne sont pas indépendants les uns des autres et le schéma de la figure 6 illustre leurs relations mutuelles. Malheureusement les critères pratiques de

distinction entre ces différentes eaux sont très peu nombreux et pas toujours convaincants.

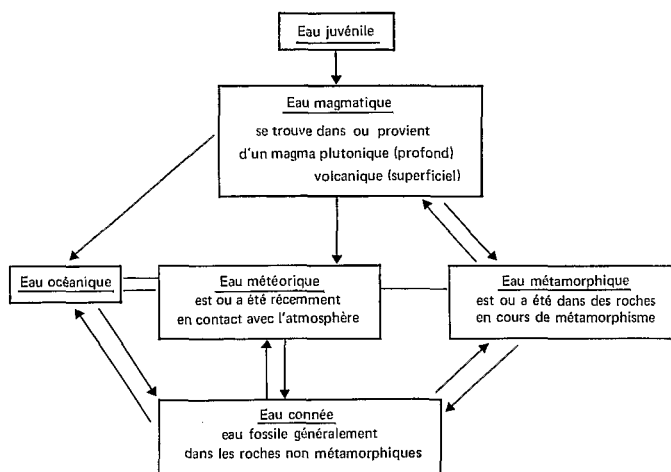


Fig. 6 Schéma illustrant les relations entre les différents types génétiques d'eaux.
(d'après White, 1957, b)

D'une part, certains éléments de la minéralisation peuvent témoigner d'une origine profonde, de même que les rapports des teneurs de certains éléments (les halogènes en particulier) peuvent être caractéristiques de tel ou tel type d'eau.

D'autre part, les compositions isotopiques de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) et de l'hydrogène (D/H), comparées à celles de l'eau océanique (Smow : Standard Mean Oceanic Water), varient suivant l'origine de l'eau : malheureusement seules les eaux météoriques sont bien caractérisées par la relation générale $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig, 1961). Les eaux connées le sont aussi dans la mesure où on admet qu'elles dérivent d'une eau océanique avec enrichissement en isotopes lourds. Les autres types ne sont pas caractérisés de façon absolue mais là où une influence magmatique est connue, comme dans les régions géothermiques, la composition isotopique des eaux de sources thermales montre par rapport aux eaux météoriques un enrichissement en oxygène 18 alors que le deutérium reste constant. Ce fait est interprété comme le résultat d'une réaction d'échange entre l'oxygène de l'eau météorique et celui des roches encaissantes (Gonfiantini, 1971, inédit) et on ne peut donc pas parler d'une véritable eau magmatique.

En conclusion, la distinction des différentes origines des eaux souterraines est délicate et, jusqu'à présent, on a seulement rencontré des eaux océaniques (eaux connées, eaux associées à des gisements pétrolifères) et des eaux météoriques, celles-ci ayant pu évoluer sous l'influence de phénomènes magmatiques, mais on n'a pas encore mis en évidence d'eau pouvant être qualifiée de juvénile ou de magmatique.

En particulier les études sur les eaux thermominérales du Massif Central (Fontes, Glangeaud *et al.*, 1963) et dans d'autres régions (Craig, Boato and White, 1956) concluent à l'origine météorique de ces eaux tout en admettant la présence possible d'une faible proportion d'eaux magmatiques n'excédant pas 5 à 10% du total (White, 1957a).

Il est donc raisonnable d'attribuer une origine semblable à la plupart des eaux thermominérales, comme le faisait déjà L. De Launay qui les considérait comme des eaux souterraines normales ayant suivi un parcours un peu particulier. C'est aussi probablement le cas des eaux du Cameroun, comme semble d'ailleurs l'indiquer l'étude géochimique de certaines d'entre elles (voir les eaux chlorurées).

Un argument essentiel à l'appui de cette hypothèse serait de vérifier à l'aide du bilan hydrologique complet que l'eau d'infiltration suffit à alimenter les nappes et les sources thermominérales. Malheureusement ce bilan est impossible à établir actuellement car il n'existe pratiquement aucune donnée sur les nappes et le débit des sources minérales. En outre il n'est pas certain que le débit total des sources soit supérieur aux erreurs de calculs d'un tel bilan.

2.2 Le circuit souterrain

L'allure générale du circuit est celle d'un siphon puisque d'une part nous admettons que l'eau est d'origine météorique, donc qu'elle descend par infiltration dans le sous-sol, et que d'autre part elle réapparaît aux émergences avec un mouvement ascendant.

L'aquifère est constitué en surface par une zone d'altération épaisse d'une à plusieurs dizaines de mètres et en profondeur par le socle cristallin et cristallophyllien traversé par des roches volcaniques. La première zone est perméable en petit tandis que la seconde est perméable en grand (diaclasses, fractures, failles, joints).

Dans le tronçon descendant du siphon, l'eau s'infiltre d'abord dans l'ensemble de la zone d'altération jusqu'à la nappe phréatique qui repose sur la roche non altérée. Ensuite elle continue à descendre dans les diaclasses, failles et fractures ouvertes dans le socle et mises en charge par la nappe phréatique.

L'eau remonte quand en un point de son parcours elle est soumise à une pression inférieure à la pression hydrostatique due à la colonne descendante : fissure rencontrant la surface à une altitude inférieure au niveau de la nappe dans la zone d'alimentation ou fissure servant de passage à des gaz sous pression venant de la profondeur. Dans le cas de sources de vallées, la différence de pression hydrostatique peut suffire à expliquer l'émergence mais pour les sources de plateaux dont les griffons sont à des cotes très peu inférieures - voire supérieures - à celles de la nappe phréatique, il est nécessaire de faire intervenir la force expansive des gaz pour expliquer l'émergence et nous verrons plus loin que la présence des gaz est aussi nécessaire pour expliquer la minéralisation des eaux. Enfin, le tronçon ascendant traverse à nouveau la zone d'altération où l'eau pourra plus ou moins se disperser latéralement.

D'autres considérations permettent de préciser les conditions de circulation. En effet, dans le cas d'eaux thermales, on doit supposer que l'écoulement descendant se fait assez lentement pour que l'eau s'échauffe au contact des roches encaissantes dont la température augmente en fonction du gradient géothermique local et que l'écoulement ascendant se fait au contraire assez rapidement pour que l'eau ne perde pas sa chaleur au contact des roches de plus en plus froides au fur et à mesure que l'on remonte. Ce sera le cas si le tronçon descendant est diffus dans un réseau de nombreuses cassures étroites (diaclasses) et si le tronçon ascendant est constitué d'une large fracture de pendage voisin de la verticale. On arrive ainsi au schéma clas-

sique de la circulation des eaux thermominérales qui représente assez bien ce qui se produit dans le cas presque général au Cameroun d'un aquifère cristallin (fig. 7).

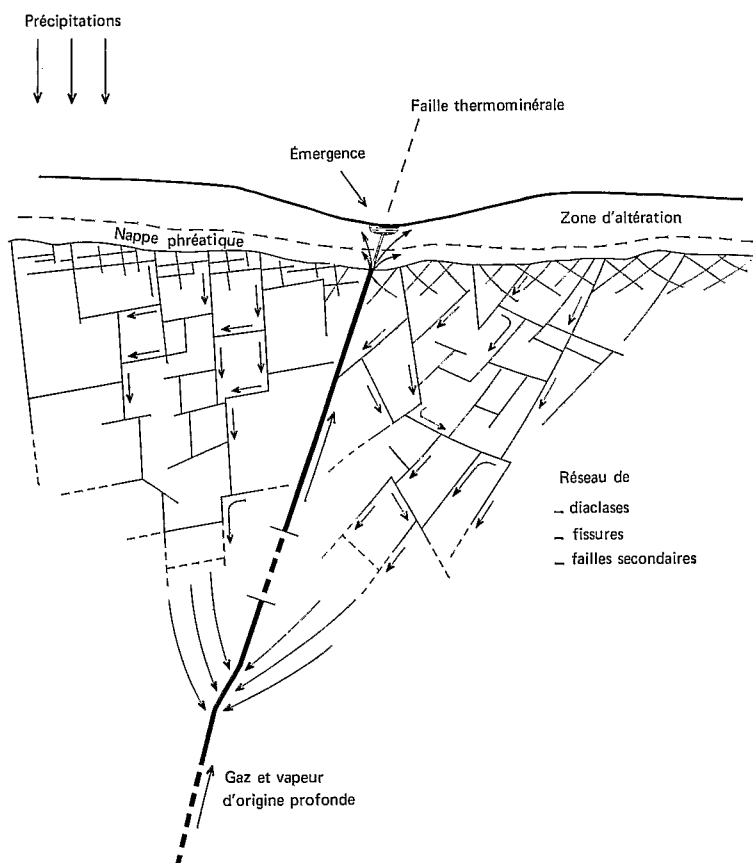


Fig. 7 Schéma de la circulation des eaux thermominérales en terrain fissuré.

Plusieurs conséquences importantes découlent de ce qui précède :

- les failles (ou systèmes de failles) qui constituent les tronçons ascendants sont profondes puisqu'elles servent à la remontée de fluides d'origine profonde, de l'anhydride carbonique le plus souvent. Elles affectent le socle sur plusieurs milliers de mètres ;
- les aires d'alimentation des sources sont probablement restreintes et limitées par les failles qui découpent le socle en blocs jouant le rôle d'aquifères plus ou moins indépendants. Ceci est vrai sans doute aussi pour les vallées : les sources qui s'y trouvent ne doivent pas être alimentées par des eaux venant des plateaux voisins sinon l'eau jaillirait à de grandes hauteurs : il existe par exemple une dénivellation de 600 mètres entre le fond de la vallée de la Mbéré et les plateaux au nord et au sud ;

- la longueur du parcours souterrain est relativement peu importante, de l'ordre de mille ou de quelques milliers de mètres et peut être estimée en fonction de la température de l'eau ;
- le régime de la source doit être sensible au régime hydrologique local. La nappe phréatique baisse au cours de la saison sèche entraînant une diminution de pression et par suite une diminution du débit à l'émergence. De telles observations n'ont pas été faites au Cameroun mais L. De Launay (*op. cit.* p. 193) en cite plusieurs en Europe : ainsi à Cauterets dans des conditions hydrodynamiques comparables, des variations de plus de 10% ont été mesurées, le débit minimal se produisant en été, ceci indépendamment des variations de pression atmosphérique qui ont une influence reconnue dans le régime des sources gazeuses ;
- le mot thermosiphon est souvent employé pour désigner le circuit des eaux thermominérales. Il est impropre quand il s'agit d'eaux minérales froides ce qui est le cas le plus fréquent au Cameroun et *ce sont les émanations gazeuses qui jouent le rôle le plus important dans la dynamique des eaux* même quand la chaleur intervient ;
- les sources thermominérales signalent la présence de failles profondes.

2.3 Les émergences

L'étude de l'émergence d'une source thermominérale est importante car c'est le seul point du circuit accessible à l'observation.

2.3.1 FACTEURS DE LOCALISATION.

D'une manière générale, l'émergence des eaux thermominérales se trouve à l'intersection de la faille ou du filon hydrominéral et d'une ligne de dépression topographique (De Launay, *op. cit.* p.44) car c'est évidemment là que l'eau a le plus de facilité pour s'écouler.

C'est bien ce que l'on peut observer au Cameroun, notamment dans l'Adamaoua où la grande majorité des émergences est située dans le fond des vallées du plateau, parfois dans le lit même des cours d'eau.

Certaines sources émergent à flanc de côteau (Ngol, Jichami par exemple) montrant ainsi que les failles ne recoupent pas les vallées mais leur sont parallèles. La situation des émergences thermominérales est intéressante à considérer dans une étude structurale régionale. Nous avons vu qu'au Cameroun les zones prospectées sont fréquemment recouvertes par des coulées volcaniques postérieures aux phénomènes de tectonique cassante et qui masquent donc les failles quand elles ne sont pas accompagnées de rejets verticaux importants. Le manteau d'altération a le même effet. La localisation des sources thermominérales est donc particulièrement précieuse pour repérer les failles.

Il est intéressant de revoir maintenant l'esquisse des grandes lignes structurales régionales à propos de laquelle avait été remarquée la coïncidence des directions définies par les alignements d'émergences avec celles qui sont définies par d'autres éléments tectoniques (voir carte n°2 h.t.).

Voyons les alignements remarquables.

Dans la région de Ngaoundéré, les sources jalonnent plusieurs lignes parallèles de direction N 117° E, comme les volcans quaternaires : d'une part les sources de Katil Foulbé (42), Say Houré (85), Mbawa (69), Laobalewa 1 (45), Laopanga (52), Bonjong (10), Laodoma (47), Laokoubong (50), d'autre part celles de Marboui (58), Laofuru (48), Laobalewa 2 (46), Marma (59), Marpa (60), et Vina (91), Matari (63), Kantalan (41).

Dans la région de Tignère, on trouve deux alignements remarquables l'un suivant la direction N 117° E : Djikim (19), Mayang (64), Nidounga (79), et Guisire (38), l'autre suivant N 28° E (ligne du Cameroun) : Falkouméré (24), Gasangel 1 (31), Djambutu (17), Galim (29). Ce dernier alignement correspond à une fracture importante dont il n'existe pas d'autre indice en surface : c'est l'extrême limite est du tchabal Mbabo.

Cette même direction se retrouve pour les alignements des sources proches de la frontière nigériane dans l'ouest de l'Adamaoua : Mayo Darlé (66), Nialan (77), Lelingel (55), Malam Djubairu (98), Déodéo (16), Donkéré (20). D'importants filons de quartz ont également cette direction. Dans la région de Déodéo, plusieurs sources jaillissent au contact d'un important filon de quartz témoin d'une ancienne fracture de direction N 73° E : Buriel 2 (97), Déodéo (16), Mamdugu (99), Mberduga (100).

Dans l'Ouest-Cameroun, les sources de la région de Mamfé sont alignées suivant N 105° E de part et d'autre des affleurements de terrains crétacés. Celles de la région de Nkongsamba marquent des directions N 58° E : Ngol (122), Manengouba (117), Baré (106 a et b) et N 142° E : Abang (101), Atoki (103), Ngol (122) d'une part, Bangen (121), Nsoug (124), Manengouba (117) d'autre part.

Ces derniers alignements matérialisent des failles qui divisent la chaîne volcanique allant du mont Cameroun au massif des Bamboutos en blocs surélevés ou abaissés : le mont Cameroun qui repose sur un horst, le graben de Tombel, le massif du Manengouba qui repose sur un horst, etc ...

Tout ceci montre l'apport de la prospection des sources thermominérales à l'étude tectonique régionale et permet de discerner les fractures de distension et les fractures de compression. En effet les fractures jalonnées par des émergences thermominérales doivent être suffisamment ouvertes pour permettre la circulation des eaux ; elles sont donc probablement dues à des mouvements tectoniques de distension et non de compression. Ainsi la grande faille qui constitue la bordure sud du plateau de l'Adamaoua est à l'origine une faille de compression accompagnée d'un important décrochement dont témoigne une mylonitisation intense. Elle a ensuite joué comme une faille de distension, entraînant la formation d'un demi-graben en partie comblé par des sédiments détritiques crétacés. Cette tectonique de distension a été plus intense vers l'est (fossé de la Mbéré) que vers l'ouest (vallée du Djérem) car le modèle en graben s'estompe progressivement d'est en ouest en même temps que diminue le nombre des sources thermominérales.

2.3.2 ALTITUDE DES ÉMERGENCES

L'altitude de l'émergence d'une source thermominérale est une donnée qui

n'a pas beaucoup de signification en elle-même. Il en est question surtout à titre d'information. On peut distinguer des sources de plateaux, de vallées et de plaines (fig.8).

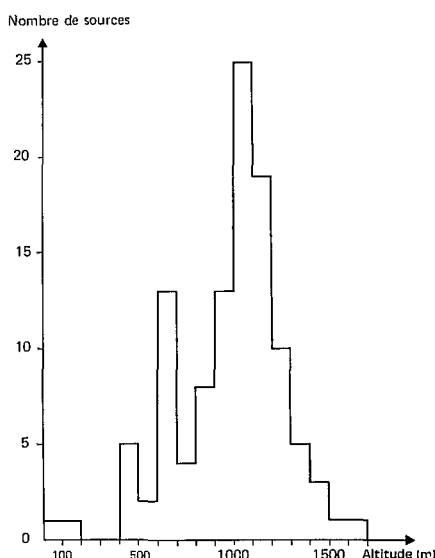


Fig. 8 Histogramme des altitudes de 111 sources thermominérales du Cameroun.

Les sources de plateaux (> 800 m) sont celles du plateau de l'Adamaoua, des plateaux bamiléké, bamoun et de la région de la Ring Road.

Les sources de vallées (de 400 à 800 m) sont celles des vallées de la Mbéré, du Djérem, du mayo Déo.

Les sources de plaines (< 400 m) sont celles de la région de Mamfé.

La distinction des plateaux et des vallées a toutefois un sens structural puisque les uns sont des horsts et les autres des vallées d'effondrement.

2.3.3 LES TYPES D'ÉMERGENCE

On distingue des émergences marécageuses et des émergences au rocher ou griffon.

— Les émergences marécageuses

Elles se produisent dans le cas général de la figure 7 lorsque la faille thermominérale doit traverser la zone d'altération ou une zone d'alluvions pour parvenir à la surface. Cette faille est alors mal définie et l'émergence est diffuse autour d'une zone centrale signalée éventuellement par des dégagements gazeux. C'est le type le plus fréquent et aussi le plus malaisé à étudier : les dépôts éventuels ne sont pas visibles, les prélèvements sont délicats à effectuer et l'eau est souvent mêlée de suspensions argileuses. En outre, il n'y a souvent aucun écoulement apparent, celui-ci se faisant sans doute latéralement dans la couche d'altération. Il s'ensuit une incer-

titude sur la représentativité de l'échantillon d'eau qui est prélevé en surface.

— *Les émergences au rocher ou griffons proprement dits*

On en compte 26 sur l'ensemble des sources étudiées. Elles sont situées dans les zones les plus accidentées où l'érosion est actuelle ou récente telles que l'Ouest-Cameroun. Ces griffons permettent des observations plus précises sur les qualités de l'eau et les phénomènes physicochimiques qui accompagnent l'émergence en particulier les différents dépôts. L'eau prélevée y est généralement propre et l'écoulement visible.

2.3.4 LES DÉPÔTS A L'ÉMERGENCE.

Faute d'un écoulement superficiel de la source, la présence de dépôts n'est pas toujours décelable mais il en existe presque toujours de nature et d'abondance variable. Ils sont évidemment liés au type de minéralisation de l'eau.

(a) *Dépôts calcaires*

Deux sources présentent d'importants dépôts de tufs et de travertins calcaires à l'émergence : Lobé (115) et Ngol (122). A Ngol ce dépôt est tel qu'il a pu être exploité pour la production de chaux vers 1940 (Gazel, 1947). En outre, l'extension des travertins montre que l'emplacement des émergences s'est déplacé à cause de leur obturation progressive par les dépôts.

La composition chimique de ces travertins est la suivante (en pourcentages pondéraux) :

	Lobé (1)	Ngol (2)
CO ₂	43.6	44.28
Ca O	51.8	53.90
Mg O	1.4	0.65
Na ₂ O	T	-
K ₂ O	1.8	-
SiO ₂	1.1	0.32
SO ₃	0.3	-
Cl	0.05	-
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	-	0.60
H ₂ O	0.20	-
Total	99.75	99.75

(1) Échantillon Dumort n° GCB 19. Analyse n° 9546 du Laboratoire du Service des Mines de Yaoundé (Dumort, 1966).

(2) Gazel, 1947.

D'autres sources présentent des dépôts peu importants, le plus souvent de simples pellicules carbonatées autour du griffon : Fossette (109), Yaisunu (95), Nyos (126), Ngok (75). Ce sont des eaux bicarbonatées calcomagnésiennes dont certaines sont thermales : Lobé (49°C), Ngol (31°C) et Fossette (29°C).

Des analyses par diffractométrie des rayons X (Laboratoire de Géologie Appliquée de Paris VI) ont précisé la composition minéralogique : calcite avec de faibles quantités d'aragonite et de quartz.

Le travertin de Fossette renferme des cendres volcaniques et celui de Yaisunu paraît ne plus se former actuellement.

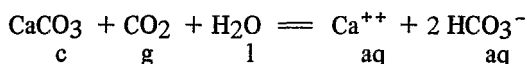
Les dépôts calcaires sont donc finalement peu nombreux.

Leur formation est bien entendu conditionnée par les teneurs des différents ions intervenant dans l'équilibre des carbonates et bicarbonates de calcium. Il est intéressant, à partir des compositions mesurées et des conditions de température et de pH observées à l'émergence, de vérifier l'état de saturation des eaux vis-à-vis du carbonate de calcium.

Il existe deux méthodes pour parvenir à ce résultat : la méthode graphique et le calcul de l'indice de saturation.

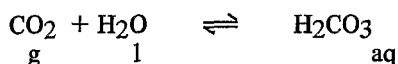
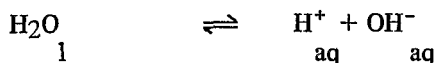
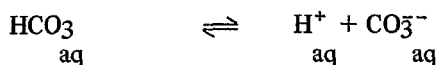
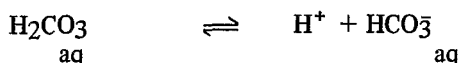
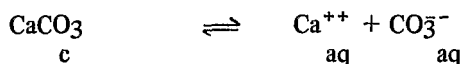
1 Méthode graphique.

La méthode graphique est basée sur l'étude de la réaction globale de l'équilibre du carbonate de calcium :



Les lettres placées en indices indiquent l'état des espèces chimiques :
c = cristallisé ; g = gaz ; l = liquide ; aq = en solution aqueuse.

Cette réaction est en fait la résultante des réactions élémentaires suivantes :



dont les constantes d'équilibre sont respectivement à 25°C et sous une atmosphère de pression totale :

$$K_{CaCO_3} = 10^{-8.3}$$

$$K_{H_2CO_3} = 10^{-6.4}$$

$$K_{HCO_3^-} = 10^{-10.3}$$

$$K_{H_2O} = 10^{-14.0}$$

$$K_{CO_2} = 10^{-1.47}$$

Appliquons la loi d'action de masse au premier équilibre :

$$\frac{(a_{Ca^{++}}) \cdot (a_{HCO_3^-})^2}{P_{CO_2}} = K$$

a représente l'activité des espèces ioniques et P la pression partielle du gaz.

K est la constante d'équilibre dépendant de la pression et de la température. Sous une pression totale constante de 1 atmosphère (condition à l'émergence), la valeur de K dépend seulement de la température :

$$t = 25^\circ C \quad K = 10^{-5.86}$$

$$t = 40^\circ C \quad K = 10^{-6.24}$$

$$t = 80^\circ C \quad = 10^{-7.25} \text{ (incertain)}$$

(in Garrels et Christ, 1965, p.89).

Passons en valeurs logarithmiques :

$$\log [(a_{Ca^{++}}) \cdot (a_{HCO_3^-})^2] = \log (P_{CO_2})$$

C'est l'équation d'une droite qui représente l'état d'équilibre (eau saturée en carbonate de calcium) et détermine dans le plan deux domaines : celui des eaux sursaturées et celui des eaux sous saturées.

Dans la pratique, on mesure les teneurs en calcium et en bicarbonate qu'on transforme en activités ioniques (Hem, 1961). Comme la mesure de P_{CO_2} est délicate, on calcule cette valeur à partir des équations de De Martini (1938). Ces équations sont déduites des différentes réactions ci-dessus. Elles permettent de calculer les teneurs à l'équilibre des différentes espèces chimiques en présence, à partir du pH et de la teneur en bicarbonate.

On a en première approximation (si $\text{pH} < 10$ et $a\text{H}^+ < a\text{HCO}_3^-$) :

$$\log(\text{PCO}_2) = -\log(\text{KCO}_2) - \log(\text{KH}_2\text{CO}_3) + \log(a\text{H}^+) + \log(a\text{HCO}_3^-)$$

En fonction de la température on a :

$$\log(\text{KCO}_2) + \log(\text{KH}_2\text{CO}_3) = -0.0068 t - 7.66$$

D'où $\log \text{PCO}_2$ et le point représentatif de l'eau dans le diagramme $\log [(a\text{Ca}^{++}) \cdot (a\text{HCO}_3^-)^2]$, $\log \text{PCO}_2$. La position du point par rapport à la droite de saturation définie précédemment permet de dire si l'eau est sursaturée ou non en carbonate de calcium donc si elle est ou non susceptible de former des dépôts calcaires.

2 Méthode de l'indice de saturation (Langelier, 1936)

Cette méthode est basée sur la comparaison du pH réel de l'eau au pH qu'elle aurait si elle était saturée en carbonate de calcium ($\text{pH}_s = \text{pH}$ à la saturation).

La différence entre les deux valeurs $\text{pH}-\text{pH}_s$ est l'indice de saturation Is . S'il est positif, l'eau est sursaturée, sinon elle est sous-saturée.

Le calcul de pH_s est exposé dans l'article de Langelier déjà cité :

$$\text{pH}_s = -\log(\text{KHCO}_3) + \log(\text{KCaCO}_3) - \log(a\text{Ca}^{++}) - \log(a\text{HCO}_3^-)$$

$$\text{Is} = \text{pH} + \log(\text{KHCO}_3) - \log(\text{KCaCO}_3) + \log(a\text{Ca}^{++}) + \log(a\text{HCO}_3^-)$$

On a en fonction de la température :

$$\log(\text{KHCO}_3) - \log(\text{KCaCO}_3) = -0.01517 t + 2.34$$

D'où les valeurs de Is pour chacune des eaux.

3 Résultats

Les deux méthodes ont été appliquées à 93 analyses, à l'aide d'un programme de calcul établi au Département of Earth and Planetary Sciences de la Johns Hopkins University de Baltimore (USA).

La figure 9 montre le résultat de la méthode graphique qui indique que 27 sources sont sursaturées et doivent donc déposer du carbonate de calcium à l'émergence. On y trouve effectivement celles dont les dépôts sont particulièrement importants : Ngol, Lobé, Fossette, Yaisunu. Pour les autres, les encroûtements sont assez discrets, de minces pellicules le plus souvent, sans doute à cause des conditions particulières d'émergence dans des puits, des cours d'eau ou des zones marécageuses. Voici la liste des sources sursaturées et des indices de saturation correspondants :

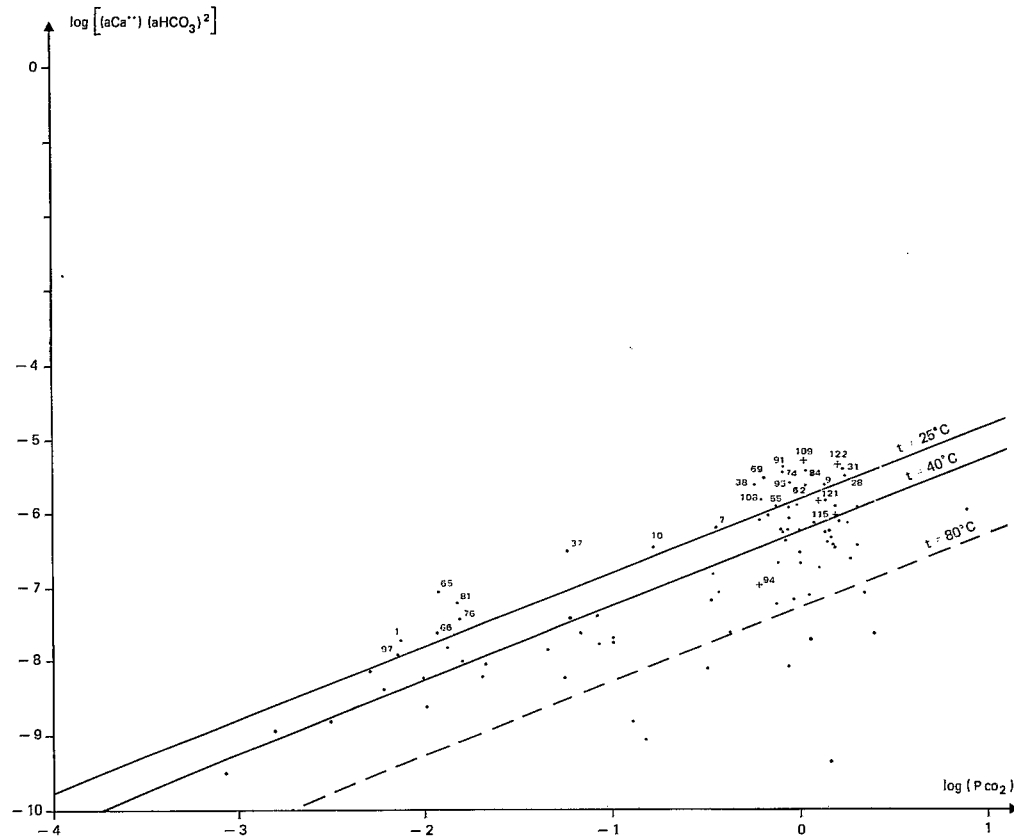


Fig. 9 État de saturation des eaux thermominérales du Cameroun vis-à-vis du carbonate de calcium, à l'émergence (+ : source thermique sursaturée).

1	Almé	0.25	69	Mbawa	0.35
7	Barkeje	0.10	74	Ngaoudamji	0.25
9	Béra	0.04	76	Ngoura	0.18
10	Bonjong	0.04	81	Patarlay	0.52
13	Burlel 1	0.33	84	Polla	0.38
28	Gade	0.00	91	Vina	0.51
31	Gasangel 1	0.03	94	Woulndé	0.25
37	Gounjel	0.54	95	Yaisunu	0.33
38	Guisire	0.52	97	Burlel 2	0.24
55	Lelingel	0.13	108	Fonga Kié	0.24
62	Masuel	0.37	109	Fossette	0.71
65	Mayo Baléo	0.75	115	Lobé	0.21
66	Mayo Darlé	0.15	121	Ndibisi	0.03
			122	Ngol	0.47

(b) *Dépôts siliceux*

Ce type de dépôt n'a été rencontré qu'une seule fois à proximité de la source thermale de Laopanga ($n^{\circ} 52$, $t = 40^{\circ}\text{C}$) mais il semble que ce dépôt ne soit pas contemporain, les émergences actuelles en étant complètement dépourvues. L'eau de cette source a toutefois la plus forte teneur en silice de l'ensemble des sources (74 mg/l). Ce dépôt se présente sous la forme soit d'un tuf siliceux à débris de plantes, soit d'une arène granitique recimentée, soit d'une croûte siliceuse. L'analyse diffractométrique des rayons X indique que la silice est finement cristallisée sous forme de cristobalite.

L'existence de ce dépôt ancien et l'absence de dépôts actuels montre une évolution dans le temps des caractéristiques physico-chimiques des eaux et de ce fait la constance de la composition chimique généralement observée à l'échelle de quelques années n'est sans doute plus exacte à l'échelle des temps géologiques.

(c) *Dépôts ferrugineux*

Outre le fait que la précipitation du carbonate de calcium est presque toujours accompagnée de celle d'hydroxydes de fer qui imprègnent les dépôts calcaires, on observe très fréquemment aux émergences des eaux bicarbonatées la *floculation du fer*. Ce phénomène a été remarqué depuis longtemps et a fait l'objet de nombreuses études dont Cazaux, Blanquet et Canellas (1952) ont tiré les conclusions. La floculation des eaux minérales consiste en :

- une oxydation des éléments réducteurs de ces eaux (Fe^{++} en particulier) qui apparaissent sous forme colloïdale puis précipitent ;
- un dégagement de CO_2 qui amène la formation de carbonates alcalino-terreux peu solubles se joignant au dépôt ;

— un entraînement mécanique des colloïdes originels qui provoque la disparition des éléments lourds de l'eau.

D'un point de vue physico-chimique, les phénomènes sont ceux qui ont été mentionnés précédemment à propos des analyses *in situ* et qui sont illustrés par la figure 10 :

- augmentation rapide du pH qui devient basique,
- augmentation du potentiel d'oxydo-réduction, l'eau réductrice à l'émergence devenant oxydante,
- augmentation de la teneur en oxygène dissous,
- diminution régulière de la conductivité par précipitation de carbonates alcalino-terreux,
- stabilité des ions alcalins et disparition d'une partie de la silice.

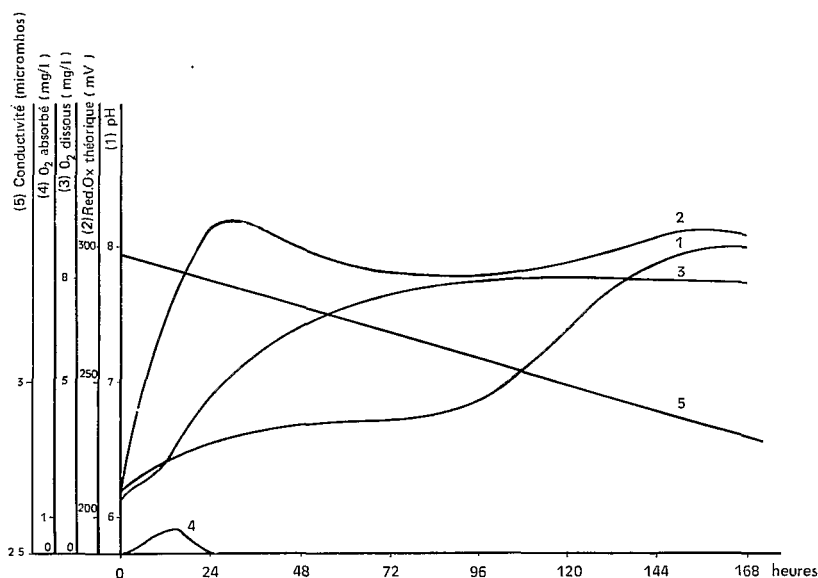


Fig. 10 Évolution de quelques caractéristiques d'une eau minérale bicarbonatée après son prélèvement (d'après Cazaux, Blanquet, Canellas, 1952).

Les auteurs précisent que la floculation se fait non à partir de colloïdes présents à l'émergence mais après la formation de colloïdes par l'oxygénation de l'eau. La floculation n'est qu'une partie des phénomènes de transformations de l'eau à l'émergence pour lesquels ils proposent le terme plus général de *métaplasie*.

De toutes façons cette transformation est responsable des accumulations ferrugineuses non consolidées que l'on rencontre à une quarantaine d'émergences même en l'absence de dépôts carbonatés visibles et c'est l'indication que *le milieu est réducteur à une certaine profondeur*.

2.4 Le débit

C'est une caractéristique essentielle à connaître si l'on envisage l'utilisation des eaux thermominérales. Elle renseigne aussi sur l'état de fracturation du sous-sol et la dimension des fractures.

Malheureusement un grand nombre de sources n'ont aucun débit superficiel faute d'une pression suffisante. Les débits sont alors impossibles à mesurer à moins d'effectuer des travaux d'aménagements pour permettre de faire des essais de pompage.

Les seuls renseignements disponibles concernent quelques unes des sources aménagées, encore n'ont-ils que peu de valeur car le rabattement correspondant au débit mesuré n'est pas indiqué sauf pour la source de Gade où l'auteur a suivi les travaux. Voici les résultats :

- Baré 5 l/mn
- Béra (1961) 45 l/mn
- Gbasum (1961) 35 l/mn
- Laokoubong 30 l/mn
- Marboui (1961) 50 l/mn
- Gadé (1969) 100 l/mn pour un rabattement de 3,30 m. Essai de courte durée. Débit déduit de la courbe de remontée.

3 – CARACTERES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

Nous allons examiner successivement la température, la conductivité et sa relation avec la minéralisation globale, les dégagements gazeux, les gaz dissous et le pH.

3.1 La température des eaux

3.1.1 TEMPÉRATURE ET CONDITIONS D'ÉMERGENCE

La température mesurée à l'émergence ne représente pas toujours la température de l'eau dans le filon hydrominéral. En effet, lorsque l'émergence est dans la zone d'altération et qu'il n'y a pas d'écoulement visible en surface, la température mesurée sera plus ou moins influencée par les conditions régnant dans la zone d'altération et dans l'atmosphère. Ceci a d'ailleurs été vérifié pour les sources qui ont été vues plusieurs fois et les écarts constatés peuvent aller jusqu'à 10°C dans des conditions d'émergence particulièrement mauvaises. Mais il est impossible de dire quelle mesure est la meilleure. Une eau thermique pourra donc être refroidie, une eau froide pourra être réchauffée si elle est exposée au soleil et les résultats varieront dans le temps.

En revanche, lorsque la source émerge d'un griffon rocheux, elle débite

toujours en surface et la température mesurée qui est bien celle de l'eau dans la fissure hydrominérale, reste sensiblement constante dans le temps ainsi qu'on a pu le vérifier.

Il est donc possible que certaines eaux apparaissent non thermales alors qu'elles le sont peut-être en profondeur mais il semble qu'elles ne le seraient alors que faiblement, les eaux thermales arrivant toujours franchement à la surface même à travers la zone d'altération.

3.1.2 LES SOURCES THERMALES

Rappelons que nous considérons comme thermale toute eau dont la température à l'émergence est supérieure à la température moyenne annuelle locale. Théoriquement cette température varie d'un point à un autre. Cependant les données climatologiques du Cameroun (Atlas du Cameroun — ORSTOM Yaoundé) montrent qu'on peut adopter la température de 23°C comme température critique pour l'ensemble des régions prospectées. Elle est très valable dans l'Adamaoua et un peu trop élevée pour l'Ouest-Cameroun.

L'histogramme de la figure 11 montre la distribution des températures de l'ensemble des sources : 50 ont une température inférieure à 23°C et 65 devraient donc être considérées comme thermales. En fait les remarques du paragraphe précédent incitent à être prudent avant de déclarer thermale une eau dont la température est trop voisine de 23°C et finalement il y a souvent doute quand la température est comprise entre 23 et 27°C .

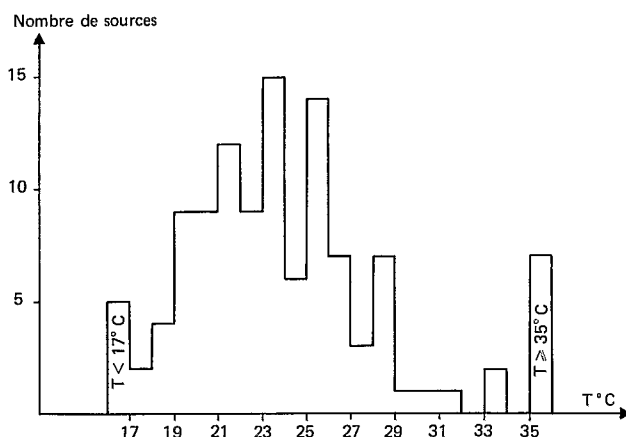


Fig. 11 Histogramme des températures de 114 sources thermominérales du Cameroun.

Il existe 19 sources certainement thermales :

N°	Noms	Températures	N°	Noms	Températures
94	Woulndé	74	87	Sep Sep	
115	Lobé	49		Djarandi	30
4	Bajao	40	109	Fossette	29
42	Katil Foulbé	40	104	Ayukaba	28.6
52	Laopanga	40	16	Déodéo	28.5
67	Mayo Lidi	37	121	Ndibisi	28.5
124	Nsoug	35	102	Ayio	28
123	Nilli	33.3	128	Ebinsi	28
100	Mberduga	33	130	Akan	27.6
122	Ngol	31	99	Mamdugu	26.8

D'autres le sont probablement mais peu :

125	Ntem	27	106	Baré	26.5
13	Burlel 1	27.3	119	Mélong	26.5
20	Donkéré	26.4	43	Koulania	26
107	Ebuku	26.4			

La localisation de ces sources thermales est caractéristique.

— *Dans les régions de volcanisme récent* : Laopanga et Katil près de Ngaoundéré ; Fossette près de Fouban ; Nilli près du mont Oku ; Nsoug, Ngol, Ndibisi, Ahio, Ebuku, Baré et Mélong autour et dans le massif de Manengouba ; Lobé près du mont Cameroun. Cependant toutes les sources de ces régions ne sont pas thermales.

— *Dans les vallées et sur les grandes failles d'effondrement* : Woulndé (vallée du mayo Baléo) ; Mayo Lidi, Mberduga, Déodéo, Mamdugu (vallée du mayo Déo, au pied du tchabal Mbabo) ; Burlel 1, Donkéré (vallée du mayo Déo, plus au nord) ; Ntem (ouest de la plaine Tikar) ; Bajao, Sep Sep Djarandi, Koulania (dans la vallée de la Mbéré) ; Ayukaba, Ebinsi, Akan (bord sud du bassin de Mamfé).

Quelle est l'origine de la thermalité des eaux minérales ?

Cette question a été examinée par de nombreux auteurs et les réponses apportées sont diverses. White et Brannock (1950) ont présenté une discussion générale

à propos des sources de chaleur possibles qui sont les suivantes :

- (1) l'accroissement normal de la température de la terre avec la profondeur (gradient géothermique) ;
- (2) la présence d'un corps rocheux chaud ou en fusion à relativement faible profondeur ;
- (3) la chaleur dégagée par la dislocation des roches dans des zones de fractures ;
- (4) les réactions chimiques exothermiques ;
- (5) l'énergie provenant de la désintégration d'éléments radioactifs.

Ces différentes possibilités ne s'excluent pas mutuellement mais certaines apparaissent comme secondaires et ne pouvant provoquer des échauffements importants : c'est le cas de *la chaleur dégagée par la désintégration d'éléments radioactifs*.

La chaleur dégagée par les réactions chimiques exothermiques est généralement considérée comme négligeable. En fait Ellis (1965) a montré qu'elle pouvait jouer un rôle important : ainsi à Wairakei (Nouvelle-Zélande) la chaleur produite par les réactions conduisant à l'altération des roches encaissantes (surtout les verres volcaniques) suffirait à expliquer le flux de chaleur écoulé dans cette région durant cent ans. Dans le cas de roches non volcaniques, les quantités de chaleur dégagées sont bien inférieures (entre le quart et la moitié). Il est donc nécessaire de tenir compte de ces phénomènes.

Quant à la chaleur produite par friction le long des plans de failles, c'est une possibilité non négligeable mais selon White et Brannock (*op. cit.*) elle devrait entraîner une corrélation entre l'âge des mouvements et la température des eaux qui n'a pas été constatée aux États-Unis. En fait l'âge des mouvements n'est pas seul en cause et leur intensité doit intervenir également. C'est pourquoi Chatterji et Guha (1969) attribuent à la thermalité d'un certain nombre de sources de l'Inde une origine en partie tectonique qui s'ajoute à l'influence du degré géothermique compte tenu du fait que selon eux la circulation souterraine des eaux météoriques ne peut se faire que jusqu'à des profondeurs limitées, où l'échauffement dû au gradient géothermique est également limité. Cette contribution de la chaleur due à des mouvements tectoniques lui paraît être nécessaire pour expliquer des températures supérieures à 40-45°C, c'est-à-dire qu'il pense que les eaux ne peuvent circuler dans des terrains éruptifs fracturés à des profondeurs supérieures à 700 ou 900 m en supposant un gradient géothermique de 33 m et une température moyenne annuelle de 18°C. En fait il existe peu de renseignements sur la profondeur que peut atteindre l'eau météorique par infiltration dans des terrains éruptifs fissurés mais si on admet l'origine profonde des fluides gazeux tels que l'anhydride carbonique (cf. les sources gazeuses paragraphe 3.3), les fissures par lesquelles ils remontent à la surface doivent atteindre des profondeurs bien supérieures, de l'ordre de quelques milliers de mètres.

Cette source de chaleur n'est donc pas à négliger mais les deux autres possibilités semblent être les plus importantes à savoir le *gradient géothermique* dont il a déjà été question ci-dessus et *la présence d'un corps magmatique chaud ou en fusion à faible profondeur*. Dans l'hypothèse d'un échauffement de l'eau météorique sous l'influence du gradient géothermique, L. De Launay (*op. cit.*) montre que l'eau doit

s'infiltrer lentement pour avoir la possibilité de s'échauffer et qu'elle doit remonter rapidement pour éviter qu'elle ne perde sa chaleur au contact des roches encaissantes plus froides, encore qu'en régime permanent ces pertes soient faibles (Goguel, 1971).

Cette remarque tendrait donc à montrer que si l'eau d'une source thermominérale est froide cela ne signifie pas forcément qu'elle n'a pas circulé à de grandes profondeurs mais tout aussi bien que ses conditions de circulation sont telles que, ou bien elle n'a pas eu le temps de s'échauffer au cours de son trajet descendant (infiltration rapide), ou bien elle a perdu sa thermalité pendant son trajet ascendant (remontée lente).

La dernière source de chaleur évoquée (corps magmatique chaud à faible profondeur) s'avère être primordiale dans le cas de champs géothermiques. Ainsi à Larderello (Italie) qui est un exemple type, la chaleur est fournie par des coupoles intrusives granitiques en voie de refroidissement qui se sont mises en place dans les terrains sédimentaires (Marinelli, 1963).

L'influence volcanique peut parfois être mise en évidence par certaines caractéristiques chimiques telles que des teneurs anormales en chlore et soufre. Au Cameroun, on n'observe toutefois aucune relation entre les teneurs en ion chlore et la thermalité des eaux bien que ces teneurs soient presque toujours supérieures au « fond » régional de 0.5 mé/l mais c'est le cas de beaucoup d'eaux non thermales.

D'une façon générale, une masse magmatique venue au voisinage de la surface provoquera une augmentation sensible du gradient géothermique et des échauffements importants.

Enfin les fluides venant de profondeurs plus grandes que celle de circulation de l'eau n'ont guère été pris en considération et lorsqu'il y en a ils peuvent contribuer à fournir de la chaleur.

Au Cameroun, on a vu que les eaux thermominérales ont des températures peu élevées, à l'exception de la source de Woulndé (74°C), et que, d'après les observations de surface, on pouvait distinguer des sources en relation avec les phénomènes volcaniques et d'autres en relation avec les phénomènes tectoniques. Si la chaleur est uniquement due à l'influence du gradient géothermique l'eau de la source la plus chaude qui est apparemment indépendante de phénomènes volcaniques récents, aurait atteint une profondeur d'environ 1700 m (gradient de 3°C/100 m et température moyenne annuelle de 23°C) ce qui ne semble pas excessif étant donné les rejets de l'ordre de 500 m constatés dans les mouvements tectoniques.

Bien que les sources des régions volcaniques ne soient pas très chaudes (Lobé 49°C) on peut admettre pour celles-ci l'influence d'un magma en cours de refroidissement à faible profondeur qui réchaufferait les eaux météoriques.

Finalement, la plupart des eaux thermominérales du Cameroun, froides et chaudes, circulent à faible profondeur. Mais à ce stade des connaissances régionales, on ne peut guère sortir du domaine des hypothèses et le gradient géothermique normal peut suffire à expliquer la thermalité des eaux minérales du Cameroun mais des influences magmatiques ne sont pas à exclure.

3.2 Conductivité, minéralisation globale et résidu sec

Ces trois caractéristiques sont étroitement liées :

- La conductivité se mesure facilement sur le terrain avec un pont de Kohlrausch et dépend directement de la quantité des ions en solutions ainsi que de leur nature et de la température de l'eau. Ordinairement les mesures de conductivité sont rapportées à la température de 18 ou 20°C. Toutefois pour tenir compte des conditions locales, il a paru logique de choisir ici comme référence la température de 25°C.

- La minéralisation globale a été déduite des analyses chimiques en calculant la somme des teneurs de tous les éléments présents à l'état ionique. C'est une propriété essentielle des eaux thermominérales qui permet de caractériser chaque source. Elle est étroitement liée à la conductivité à partir de laquelle il est possible d'estimer approximativement la minéralisation.

- Le résidu sec se mesure au laboratoire en évaporant une quantité connue d'eau. Il dépend de la température à laquelle on opère, les bicarbonates étant transformés en carbonates à partir de 110°C environ. La filtration qui a précédé au laboratoire la prise d'essai pour la détermination du résidu sec, rend impossible le contrôle de cette valeur par celle de la minéralisation en éliminant le précipité qui se forme entre le moment du prélèvement et celui de l'analyse. Il est également possible que les résidus secs n'aient pas été obtenus à des températures identiques. Les deux valeurs ne sont donc pas comparables et ce sont les valeurs plus homogènes des minéralisations globales qui seront considérées.

3.2.1 VARIATIONS DE LA MINÉRALISATION SUIVANT LES SOURCES

Les minéralisations des sources du Cameroun varient dans un assez vaste domaine comme l'indique l'histogramme de la figure 12.

L'eau la moins minéralisée est celle de la source de Koutaba (n° 114) avec une vingtaine de mg/l, qui est qualifiée de minérale à cause de sa forte teneur en anhydride carbonique dissous.

Les eaux les plus minéralisées sont celles des sources de la région de Mamfé avec des valeurs variant de 13 à 36 g/l. Le résidu sec mesuré est même beaucoup plus élevé que la minéralisation calculée : de 17 à 66 g/l ce qui paraît mieux s'accorder avec les valeurs de la conductivité. En fait les sources de cette région sont différentes des autres par le type de leur minéralisation et leur contexte géologique.

Et si on s'en tient aux sources situées dans un environnement cristallin, la minéralisation extrême est celle du lahoré Gesel (n° 111) avec une quinzaine de g/l, valeur assez exceptionnelle pour ce type de source.

Ce qui a été dit à propos des variations de la température d'une même source reste valable à propos de la minéralisation : les conditions d'émergence font que l'eau thermominérale est plus ou moins contaminée par des eaux superficielles et la conductivité, reflet de la minéralisation, varie dans le temps. Mais ici on peut

dire que les valeurs les plus élevées se rapprochent le plus de la réalité puisque le mélange avec des eaux de surface provoque une diminution de la minéralisation.

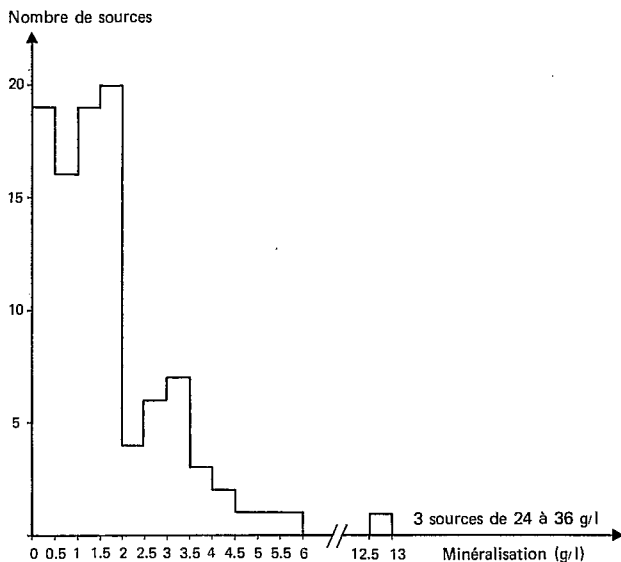


Fig. 12 Histogramme des minéralisations de 103 sources thermominérales du Cameroun.

En dehors des conditions d'émergence voyons maintenant ce qui peut déterminer la quantité de matières dissoutes dans l'eau.

3.2.2 FACTEURS DE LA MINÉRALISATION

On peut distinguer les facteurs liés aux terrains traversés et ceux qui tiennent à l'eau elle-même.

Les terrains traversés conditionnent la valeur de la minéralisation par leur *solubilité* et leur *texture*. Les roches sédimentaires d'origine chimique (calcaires, évaporites) sont plus facilement attaquées que celles qui sont d'origine détritiques (grès, etc ...). En ce qui concerne les roches cristallines on observe que les roches à texture microlitique résistent moins que celles qui montrent une texture grenue.

Toutefois une eau traversant un grès est susceptible d'être moins minéralisée qu'une eau traversant une roche volcanique.

Au Cameroun, les eaux de la région de Mamfé, les plus chargées en sels, ont dû traverser des niveaux sédimentaires salifères tandis que certaines eaux de la vallée de la Mbéré qui ont en partie traversé des grès sont très peu minéralisées par rapport à celles de l'Adamaoua qui ont traversé des roches cristallines.

De même on verra en examinant la nature de la minéralisation que certains éléments paraissent être mis en solution plus facilement dans les roches volcaniques que dans les roches grenues.

L'eau proprement dite joue un rôle par son pouvoir dissolvant. En fait l'eau pure à laquelle on peut assimiler l'eau météorique qui s'infiltre, a un faible pouvoir dissolvant vis-à-vis des roches cristallines, comme en témoignent les faibles minéralisations des eaux de surface ayant traversé de telles roches (quelques dizaines de mg/l - H. Schöeller, 1962 ; Chatonier, 1957), mais il est fortement augmenté par la présence d'autres substances, notamment d'anhydride carbonique dissous. Donc la *teneur en CO₂* et la *pression partielle de CO₂* sont des facteurs importants de la minéralisation. Mais il arrive que des eaux chargées en CO₂ soient très peu minéralisées (la source de Koutaba par exemple). Un autre facteur intervient donc qui doit être le *temps de contact* de l'eau avec les roches encaissantes au sujet duquel on a malheureusement peu de renseignements.

Une conséquence de ce qui précède est que *l'eau acquiert l'essentiel de sa minéralisation au cours de son trajet ascendant et après sa rencontre avec un agent minéralisateur.*

La *température de l'eau* devrait également avoir de l'influence, cependant son rôle *paraît secondaire surtout dans le contexte des roches cristallines.* Au Cameroun, il n'existe pas de relation simple entre la température des sources et la minéralisation. La source la plus chaude est bien moins minéralisée que beaucoup de sources froides et il existe d'ailleurs, sur un plan général, une catégorie de sources simplement thermales et très peu minéralisées qui sont situées dans les régions montagneuses (*Wildbäder* des auteurs germaniques, sources alpestres).

Finalement tous les facteurs énumérés jouent chacun leur rôle dans l'acquisition de la minéralisation de l'eau mais il est difficile de distinguer l'importance de leurs participations respectives car ils agissent en général simultanément et indépendamment les uns des autres sauf la température et la teneur en CO₂ dissous qui sont en relation inverse.

Il semble que les facteurs essentiels de la minéralisation, lorsque les roches traversées sont cristallines, soient la présence d'un élément minéralisateur - notamment l'anhydride carbonique - et le temps de contact avec les roches encaissantes.

3.2.3 RELATION MINÉRALISATION-CONDUCTIVITÉ

La minéralisation et la conductivité sont étroitement liées et directement proportionnelles : il est intéressant de préciser cette relation car la détermination de la conductivité, très facile sur le terrain, permettra d'avoir rapidement une estimation de la minéralisation globale.

Plusieurs auteurs ont abordé cette question en calculant la conductivité ou son inverse la résistivité à partir des concentrations des différents ions en solution (Guillerd, 1941 ; Dunlap et Hawthorne, 1951 ; Martin, 1958). Les résultats sont assez satisfaisants mais cette démarche est d'un intérêt limité car la conductivité est très facile à mesurer et les formules proposées ne permettent pas le calcul inverse. C'est cependant une manière de contrôler les analyses en comparant les valeurs de la conductivité mesurée et calculée.

D'autres auteurs se sont intéressés au problème inverse. La première tenta-

tive dans ce sens est celle d'un auteur russe, (Doroschewski, 1913), qui a proposé la relation :

$$M = \frac{K}{R} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} M \text{ en mg/l} \\ K = \text{constante} = 688.000 \\ R \text{ en ohm-cm à } 20^{\circ}\text{C} \end{array}$$

Cette formule fut modifiée par Vibert (1966) qui construisit un diagramme représentant la fonction $M = \varphi(R)$, satisfaisant pour des valeurs de M comprises entre 50 et 1500 mg/l, domaine trop restreint pour l'ensemble des eaux thermominérales.

Enfin les auteurs américains utilisent non pas la résistivité mais la conductivité (EC) ce qui est bien plus logique puisque M et EC sont directement proportionnelles. En outre ils relient la conductivité à la minéralisation représentée par la demi-somme des anions et des cations exprimée en milliéquivalents par litre (T). Cela paraît également plus logique car, du point de vue électrique, la teneur en équivalent grammes de chaque ion importe plus que son poids.

J. Logan (1961) compare les diverses formules proposées dans cette optique et montre que les plus valables sont celles qui ont été établies empiriquement (erreur standard inférieure à 6%). Elles varient en fonction de la valeur de la minéralisation et de la nature de l'anion dominant :

pour	$T < 1 \text{ mé/l}$	$EC = 100 T$
	$1 < T < 3 \text{ mé/l}$	$EC = 12.27 + 86.38 T + 0.835 T^2$
	$3 < T < 10 \text{ mé/l}$	$EC = T [95.5 - 5.54 (\log T)]$
	$T > 10 \text{ mé/l}$	eau bicarbonatée $EC = 90 T$ eau chlorurée $EC = 123 T^{0.9388}$ eau sulfatée $EC = 101 T^{0.9489}$
	$T > 1000 \text{ mé/l}$	méthode non utilisable

L'application de ces formules est facilitée par l'emploi de monogrammes. Cette méthode s'applique très bien aux sources thermominérales du Cameroun, la représentation graphique de la minéralisation en fonction de la conductivité (fig.13) étant identique à celle que présente Logan. Toutefois, l'expression de la minéralisation en mé/l est moins explicite qu'en mg/l.

J'ai donc cherché à relier la conductivité à la minéralisation globale (M) exprimée en mg/l. D'après la figure 14 il apparaît qu'une relation simple $M = EC$ permet d'obtenir une première approximation de la valeur de M à partir de EC pour les eaux bicarbonatées. Pour les eaux chlorurées et sulfatées, malgré le nombre d'échantillons plus limité, la relation $M = 0.83 EC$ peut être adoptée. Ces deux formules très simples traduisent assez bien la réalité pour des conductivités comprises entre 10^2 et 10^4 micromhos et il y a trop peu de données pour les étendre en dehors de ce domaine.

De toute façon, les valeurs ainsi obtenues ne sont que des estimations et doivent être utilisées comme telles.

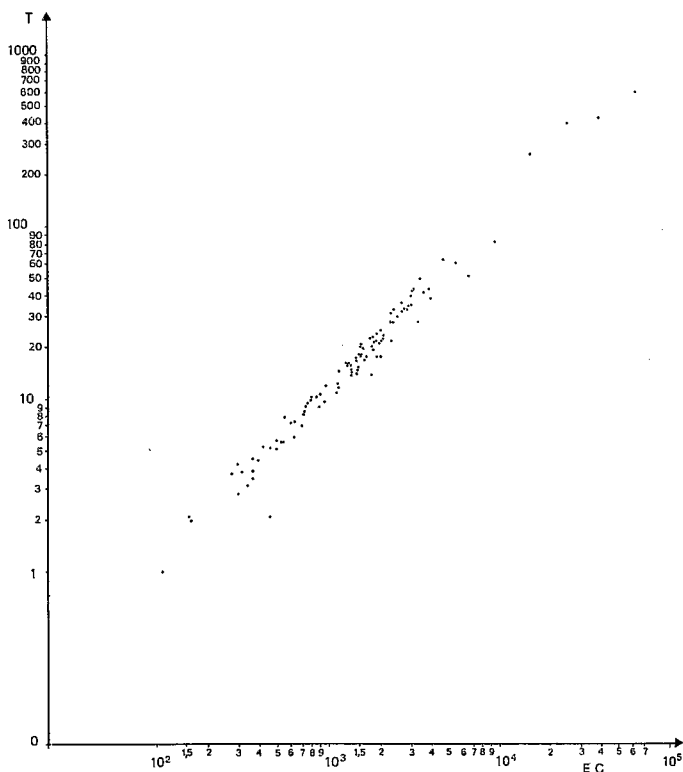


Fig. 13 La minéralisation (T) en fonction de la conductivité électrique (E. C.).
104 analyses. Coordonnées logarithmiques. E. C. en micromhos à 25 °C.
 $T = (\text{Anions} + \text{Cations}) / 2$ en mé / l.

3.3 Les sources gazeuses

Les eaux thermominérales du Cameroun sont fréquemment accompagnées de gaz qui s'échappent librement à l'émergence (gaz spontané) ou sont dissous dans l'eau.

Les dégagements gazeux les plus importants s'observent dans le massif du Manengouba mais ils existent dans l'ensemble des régions de volcanisme récent avec lequel ils sont en relation.

La composition chimique de ces gaz n'a pas été étudiée sauf ceux de la source de Baré (n° 106) dont on possède les analyses d'une douzaines d'échantillons (Geslin et Lepape, 1930). La composition centésimale moyenne est la suivante :

CO ₂	99.5 %	N ₂	0.438
O ₂	0.05	Gaz rares	0.00918
H ₂	néant	Carbures	0.00093

Il s'agit donc essentiellement d'anhydride carbonique. Les auteurs notent

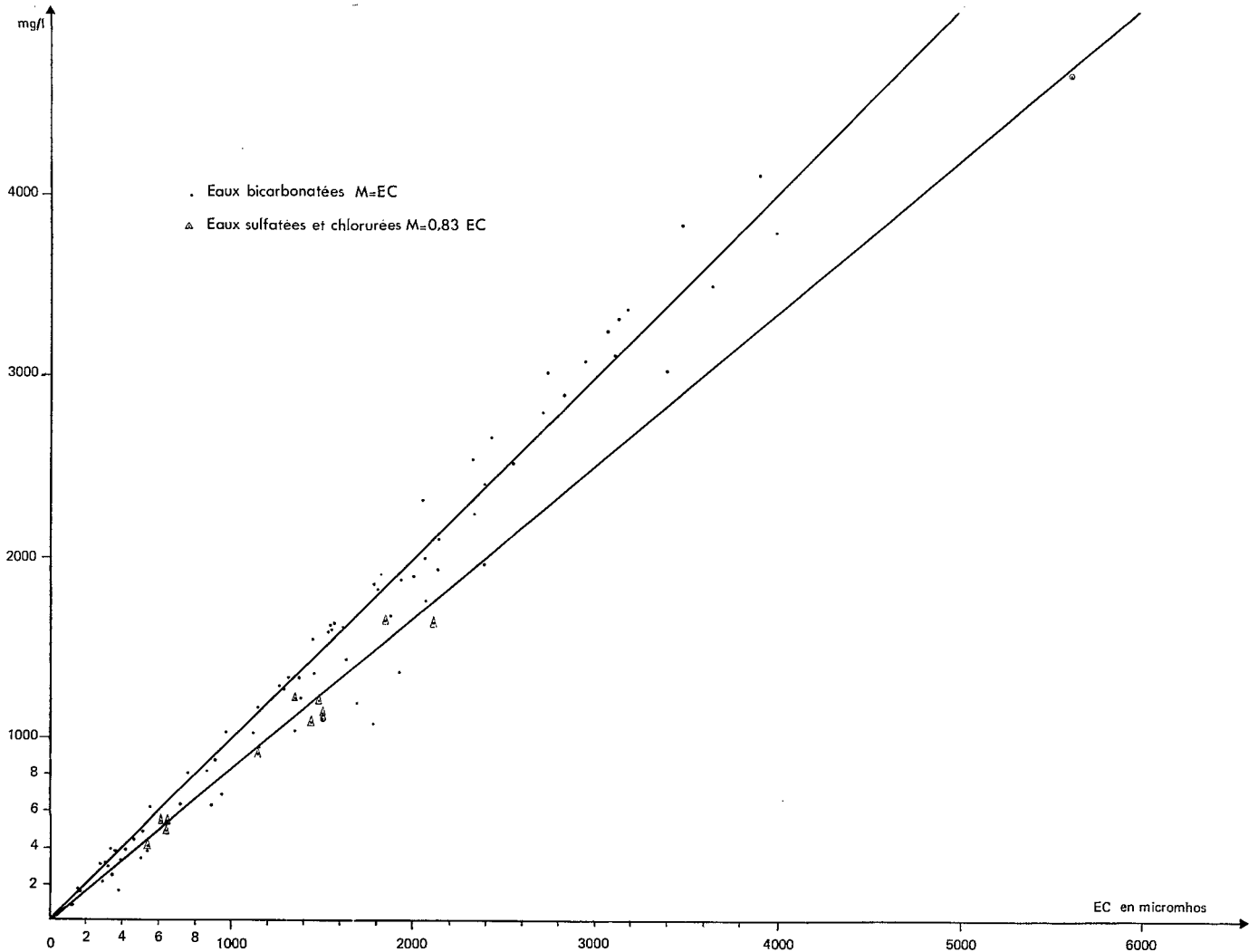


Fig. 14 La minéralisation (M) en fonction de la conductivité électrique (E.C.).
104 analyses. Coordonnées arithmétiques.

en outre la grande variabilité de la proportion d'oxygène d'un échantillon à l'autre, pour un résidu azoté très constant.

Il est probable que les gaz de toutes les sources situées dans un environnement volcanique semblable à celui de la source de Baré ont une composition analogue. Quant à ceux qui accompagnent les autres sources, notamment celles qui ont une localisation simplement tectonique, il est possible qu'ils aient une composition différente avec une plus grande proportion d'azote et peut-être des produits soufrés, ces gaz paraissant caractériser les eaux en relation avec de grandes profondeurs (De Launay, *op. cit.*, p. 118).

Bien que peu nombreuses, les données bibliographiques semblent indiquer que les gaz libres accompagnant les eaux sulfatées et sulfurées issues de terrains cristallins sont caractérisées par l'azote et sont moins abondants que les gaz caractérisés par l'anhydride carbonique, ainsi en France les sources sulfurées des Pyrénées et les sources sulfatées du N.W. du Massif Central et des Vosges (Jacquot et Willm, 1894, p. 43 ; Thuizat, 1973, p. 107).

En plus des gaz spontanés, une certaine quantité de gaz peut être dissoute dans l'eau. On a pu ainsi mesurer l'anhydride carbonique dissous et tester la présence de sulfure d'hydrogène dans les eaux du Cameroun. Les teneurs en CO_2 mesurées ne sont que des valeurs indicatives fonction des conditions d'émergence car, au voisinage de la surface, le brusque changement des conditions physico-chimiques entraîne des variations rapides des gaz dissous.

La figure 15 montre la répartition des valeurs mesurées et la figure 16 indique qu'à leur émergence les eaux ne sont pas saturées vis-à-vis de CO_2 , sauf la source d'Ebuku (n° 107).

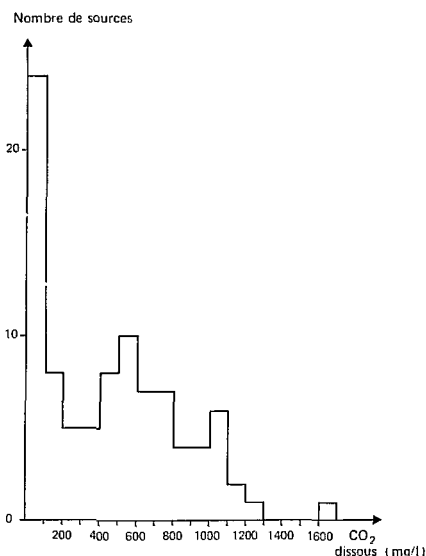


Fig. 15 Histogramme des teneurs en anhydride carbonique dissous (92 sources).

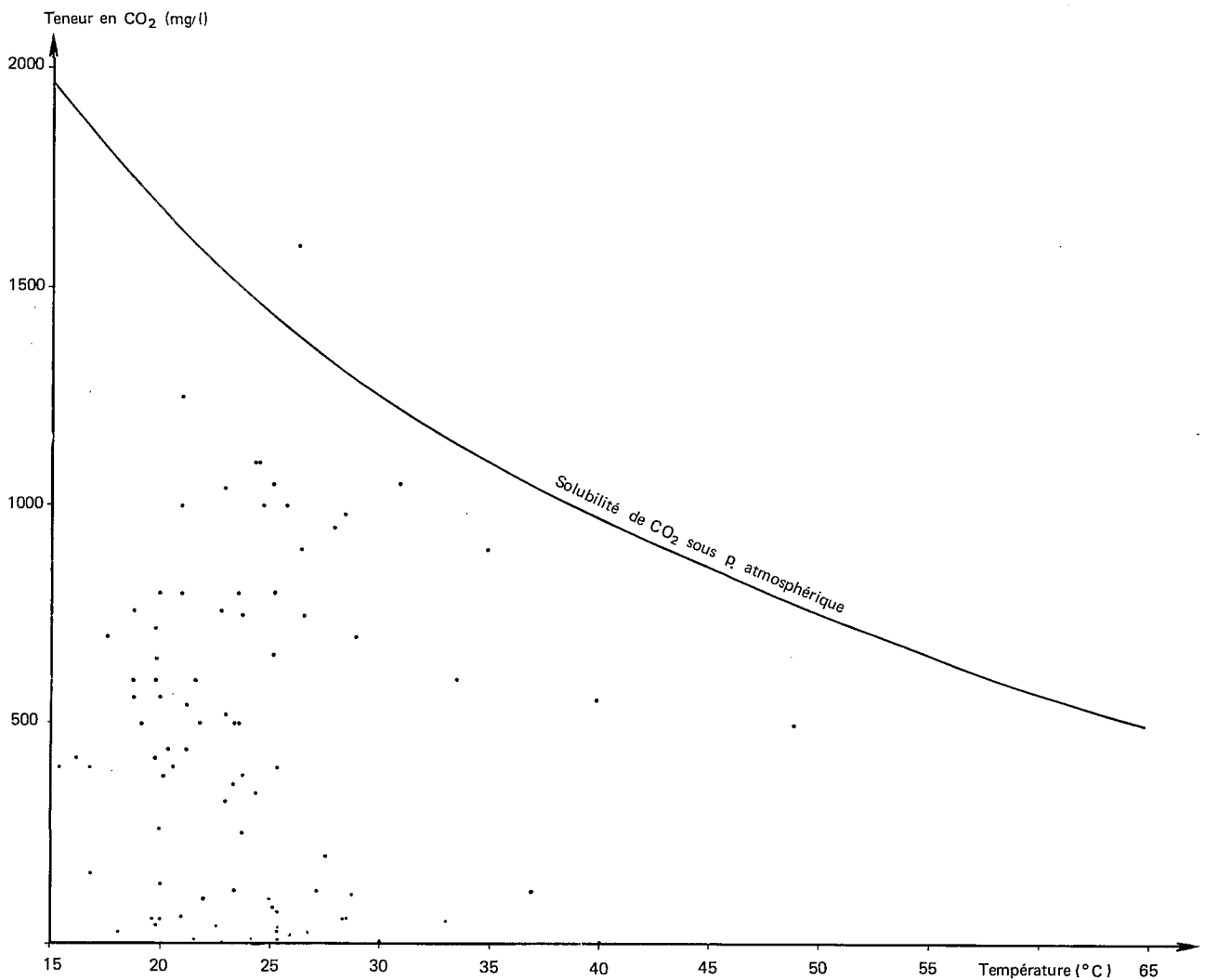


Fig. 16 État de saturation en CO₂ dissous des eaux thermominérales du Cameroun, à l'émergence (courbe de saturation tracée d'après les données du Traité de Chimie Minérale, sous la direction de P. Pascal, Masson édit., Paris, t. V, 1932, p. 165).

Mais d'un autre côté il y a presque toujours un excès de CO_2 libre dans l'eau car les valeurs mesurées ne permettent pas de vérifier les relations entre le pH, l'alcalinité et le CO_2 qui existent théoriquement dans les eaux en équilibre. Une partie seulement du CO_2 participe aux équilibres dont il a été question à propos des dépôts calcaires : c'est le CO_2 libre équilibrant qui a été calculé. Le reste est du CO_2 agressif.

Le sulfure d'hydrogène H_2S a été décelé à l'état dissous dans quatre sources thermales : Bajao (n° 4), Katil Foulbé (n° 42), Laopanga (n° 52) et Lobé (n° 115).

Étant donné le contexte géologique des sources, *l'origine des gaz spontanés et dissous ne peut être que profonde* : les roches du socle ne peuvent fournir ni l'anhydride carbonique, ni le sulfure d'hydrogène ou des sulfates qui par réduction pourraient donner lieu à la formation de H_2S . De plus, les fortes teneurs en CO_2 sont ici incompatibles avec un entraînement de CO_2 atmosphérique par les eaux météoriques.

Essayons de préciser ce qu'on peut entendre par origine profonde : existe-t-il des poches de gaz à une certaine profondeur ou bien les gaz sont-ils libérés progressivement à partir d'un magma en cours d'évolution ? On imagine mal l'existence de poches de gaz dans des roches cristallines, ce qui ne résoudrait d'ailleurs pas le problème de l'origine du gaz, mais on a observé très souvent que le CO_2 imprègne les terrains des régions volcaniques.

De plus, les inclusions fluides dans les minéraux des roches du faciès granulite contiennent une notable proportion de fluides carboniques (CO_2 , hydrocarbures) (Masson *et al.*, 1973 ; Touret, 1973 ; Zimmermann, 1973) témoignant de l'existence d'une phase fluide riche en CO_2 dans le milieu de formation de ces roches caractérisé par des températures de 700 à 800°C et des pressions de l'ordre de quelques kilobars correspondant à des profondeurs de 20 à 25 km. Ce fait constaté en de nombreuses régions du globe tend à montrer que le CO_2 est partout présent à plus ou moins grandes profondeurs et que des fractures importantes pourront lui permettre de s'échapper vers la surface.

C'est sans doute selon un tel schéma que s'expliquent la montée de fluides carboniques vers la surface à la fois dans le volcanisme et dans les sources thermominérales, ces deux phénomènes étant étroitement liés aux régions affectées par une tectonique cassante de grande amplitude.

Cet anhydride carbonique peut provenir du dégazage d'un magma (origine juvénile) mais il peut être également produit par le métamorphisme de minéraux carbonatés. Ainsi Muffler et White (1968) ont montré que le gaz carbonique du champ de Salton Sea (Californie) était issu du métamorphisme de dolomite et de calcite contenues dans les sédiments du Cénozoïque supérieur qui remplissent la fosse de Salton profonde d'environ 6000 m. Le volume de gaz qui a été extrait (l'exploitation est aujourd'hui abandonnée) est bien inférieur au volume théoriquement libéré et d'autre part l'analyse isotopique du carbone a indiqué que le rapport $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C} = -3.5\text{‰}$) correspondait à du carbone pouvant être issu de carbonates détritiques.

Une autre origine possible proposée par Vinogradov (1967) pour les produits carbonés des gaz volcaniques est l'oxydation du graphite disséminé dans les roches, par la vapeur d'eau dans des conditions de température et de pression élevées.

Ces différents processus ne sont pas incompatibles entre eux et contribuent à expliquer l'origine du CO_2 des sources thermominérales.

Les fluides sulfurés ont un comportement peut-être différent : ils accompagnent presque toujours l'anhydride carbonique dans le volcanisme mais on ne les connaît pas de façon sûre dans les inclusions des minéraux (Deicha, comm. orale).

Chemla *et al.* (1968), constatant l'abondance du CO_2 et l'absence des autres constituants habituels des émanations volcaniques (SO_2 , H_2 , H_2S , HCl , HF) dans les inclusions des nodules de péridotites et des enclaves homogènes issues de basaltes et de trachytes du Massif Central français, en arrivent à supposer que seul CO_2 serait en grande partie d'origine primaire et que les autres gaz pourraient être d'origine secondaire, introduits dans le magma au cours de sa migration, à partir des roches encaissantes par décomposition de certains minéraux. Cette théorie ne semble pas avoir été corroborée depuis.

3.4 Le pH des eaux thermominérales

Les eaux des sources thermominérales du Cameroun ont des pH compris entre 4 et 9 (fi. 17).

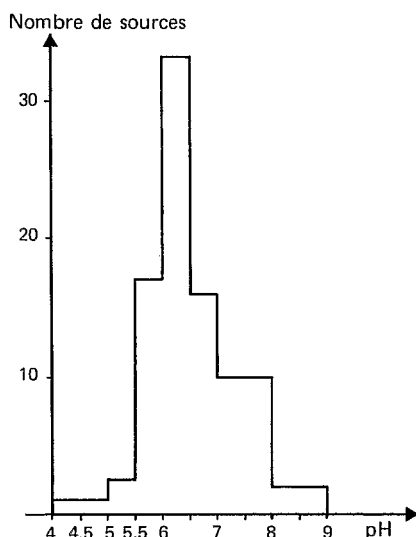


Fig. 17 Histogramme des pH des eaux thermominérales du Cameroun, à l'émergence (95 sources).

La majeure partie ont une réaction acide : ce sont les eaux bicarbonatées ayant de fortes teneurs en CO_2 dissous. Les deux valeurs les plus basses correspondent à des eaux chargées de CO_2 mais très peu minéralisées : Koutaba (n° 114) et Ndi (n° 120).

Les eaux à réaction neutre ou franchement basique correspondent à celles qui contiennent de notables proportions d'ions sulfates et chlorures et peu de bicarbonates, carbonates et CO_2 .

3.5 Conclusion

A l'issue de cette étude des caractères physico-chimiques des eaux, plusieurs points sont à retenir :

- les températures sont assez variables d'une source à l'autre ;
- les minéralisations globales varient aussi beaucoup ;
- de nombreuses sources sont gazeuses ;
- la plupart des eaux auraient pu dissoudre une plus grande quantité de substances si elles avaient séjourné plus longtemps en profondeur.

Nous allons maintenant étudier en détail la nature de la minéralisation des différentes sources en distinguant la minéralisation principale (éléments majeurs) et la minéralisation secondaire (éléments en traces). Cette séparation a un caractère arbitraire car tous les éléments empruntés aux roches encaissantes sont mis en solution simultanément mais elle tient compte des comportements et des domaines de concentration différents des deux groupes.

TROISIEME PARTIE

GÉOCHIMIE DES ÉLÉMENTS MAJEURS

Le problème qui se pose maintenant est double : d'une part décrire les eaux thermominérales d'un point de vue chimique et d'autre part interpréter les résultats c'est-à-dire essayer d'expliquer ce qui peut être à l'origine des teneurs des divers éléments dans chaque source et des variations d'une source à l'autre.

1 – DESCRIPTION DES ANALYSES. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

Il est indispensable d'avoir une vue globale de l'ensemble des analyses (présentées en annexes), ce qu'on ne peut obtenir que par l'intermédiaire d'une représentation graphique. Il existe une grande variété de diagrammes qui ont été clairement présentés par H. Schoeller (1956) et Castany (1967) :

graphique en colonnes (Collins, 1923),

diagrammes triangulaires (Hill ; Langelier, 1942),

diagrammes carrés,

diagrammes rayonnants (Girard, 1935 ; Frey, 1933 ; Tickel, 1921 ;
Telkessy *in* Maucha, 19320,

diagrammes logarithmiques verticaux (H. Schoeller).

Les plus utilisés sont les diagrammes triangulaires et logarithmiques et pour notre propos qui est de représenter globalement plus d'une centaine d'analyses, c'est le diagramme triangulaire de Piper (1944) qui est le plus commode (le Maréchal, 1970 et 1971).

Ce diagramme comporte 3 parties :

- un triangle pour les anions, dont les sommets correspondent à : $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$, Cl^- et SO_4^{--} ;
- un triangle pour les cations, dont les sommets correspondent à Ca^{++} , Mg^{++} et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$;
- un losange regroupe les deux triangles et il est divisé en 4 domaines correspondant à : HCO_3^- et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$
 HCO_3^- et $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$
 $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$ et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$
 $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^-$ et $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$

Les teneurs des différents ions sont exprimées en pourcentage de la somme des anions ou des cations calculée en milliéquivalents.

Chaque eau est alors représentée par un point dans chacune des parties et les eaux de compositions voisines se trouvent regroupées. Dans le cas des sources du Cameroun (fig: 18) on peut faire les remarques suivantes :

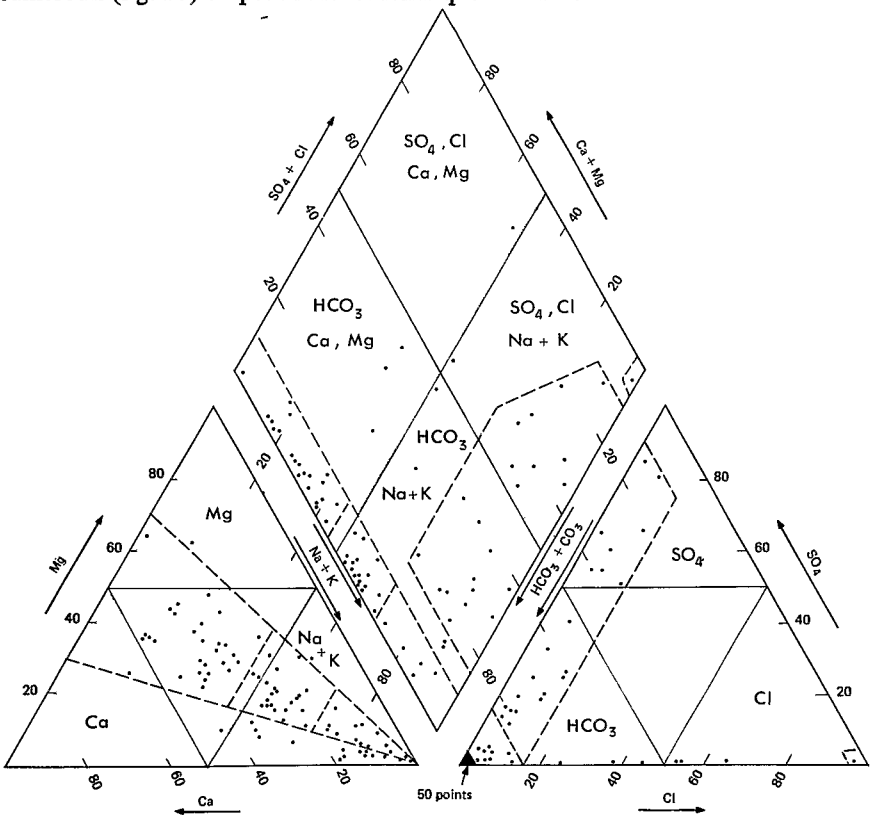


Fig. 18 Diagramme de Piper.

— l'anion le plus fréquent est le bicarbonate. Quelques eaux renferment des ions bicarbonates et sulfates ou bicarbonates et chlorures mais jamais on ne rencontre d'eaux avec les trois anions en proportions comparables.

— les cations sont mieux répartis dans l'ensemble des eaux bien que le sodium domine assez souvent. Il n'y a aucune source où prédomine nettement soit le calcium, soit le magnésium et ces deux cations sont associés en proportions assez voisines.

— enfin les groupements de points dans le losange montrent que la plupart des eaux sont bicarbonatées ou chlorurées sodiques.

Cette représentation graphique indique déjà les principaux types de composition chimique et aidera à établir une classification plus détaillée qui servira de base dans la recherche des corrélations entre la composition chimique et l'environnement géologique.

2 – CLASSIFICATION DES EAUX THERMOMINÉRALES

L. De Launay (*op. cit.*) distinguait les eaux salines (chlorurées et sulfatées), les eaux carbonatées, les eaux sulfurées sodiques, les sources alpestres ou indifférentes et les sources des régions volcaniques.

Des classifications plus détaillées ont ensuite été proposées ; les divisions principales reposent sur la nature de l'anion et les subdivisions sur la nature des cations (alcalins ou alcalino-terreux).

2.1 La classification de Jacquot et Willm (1894, p.25) reprise par Jadin et Astruc distingue les catégories suivantes :

(a) Eaux bicarbonatées

- sodiques

bicarbonatées
chlorobicarbonatées
ferrobicarbonatées
- calciques ou terreuses (même subdivision que ci-dessus)
- mixtes

(b) Eaux sulfureuses

- sodiques

sulfureuses
chlorosulfureuses
- calciques

sulfureuses
chlorosulfureuses
- nitratées

(c) Eaux sulfatées

- sodiques

sulfatées calciques et magnésiennes

- calciques

chlorosulfatées calciques

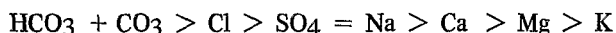
- (d) *Eaux chlorurées*
– sodiques
- (e) *Eaux ferrugineuses*
 - | bicarbonatées
 - | sulfatées
 - | crénatées
- (f) *Eaux radioactives*

Les crénates sont les sels de l'acide crénique, acide organique résultant de la décomposition des matières humiques.

Cette classification est surtout qualitative et manque d'homogénéité car elle place au même niveau des critères différents ainsi les teneurs en fer au niveau des teneurs en anions. En outre le critère de la teneur en fer se retrouve à différents niveaux : par exemple eaux ferrobicarbonatées et eaux ferrugineuses bicarbonatées n'ont pas lieu d'être distinguées. Enfin la distinction des eaux crénatées fait intervenir des espèces chimiques qui n'ont rien à voir avec le parcours souterrain de l'eau mais sont liées à des conditions d'émergence particulières.

2.2 La classification de Stabler (1911) est plus rigoureuse tout en étant établie dans le même esprit que la précédente.

Les teneurs sont exprimées en milliéquivalents par litre et chaque eau est représentée par une formule ou séquence du type de celle-ci :



Les différentes classes correspondent à la prédominance de chacun des anions et les cations définissent des sous-classes.

Ghafour (1968) a classé les sources thermominérales des Pyrénées selon ce principe en 5 types :

- (1) type bicarbonaté
 - | sodique
 - | calcomagnésien
- (2) type bicarbonaté sulfuro-sulfaté sodique
- (3) type sulfuro-sulfaté sodique
- (4) type chloruré sodique
- (5) type sulfaté calcique

2.3 La classification de Palmer (1911) est mentionnée pour mémoire. Elle est basée sur les notions de salinité et d'alcalinité primaires et secondaires déduites des groupements des ions entre eux : acides forts et bases alcalines déterminent la salinité primaire, acides forts et bases alcalino-terreuses déterminent la salinité secondaire, les acides faibles déterminent l'alcalinité.

Cette classification peu pratique est rarement utilisée d'autant plus que la reconstitution des sels à partir des ions est maintenant abandonnée à juste titre d'ailleurs car sa validité est très discutable.

2.4 La classification de Bogomolov et Silin Bektchourine (1955, p. 125) est voisine de celle de Stabler. On y retrouve 7 classes établies en fonction des ions dominants, un ion étant considéré comme dominant lorsque sa teneur en milliequivalents dépasse 25% de la somme des anions ou des cations suivant le cas :

- (1) eaux bicarbonatées HCO_3 représente plus de 25% des anions
- (2) eaux sulfatées
- (3) eaux chlorurées
- (4) eaux bicarbonatées, sulfatées
- (5) eaux bicarbonatées, chlorurées
- (6) eaux sulfatées, chlorurées
- (7) eaux sulfatées, chlorurées, bicarbonatées.

Chaque classe peut se subdiviser en 7 sous-classes :

- (1) eaux calciques
- (2) eaux magnésiennes
- (3) eaux sodiques
- (4) eaux calcomagnésiennes
- (5) eaux calcosodiques
- (6) eaux magnésiennes et sodiques
- (7) eaux calcomagnésiennes et sodiques.

La « statistique des eaux minérales de la France » donne une classification de ce type (Urbain, 1967) :

eaux bicarbonatées	sodiques
	calciques
eaux sulfatées	calciques
	sodiques
eaux sulfurées	sodiques
	calciques
eaux chlorurées	sodiques.

2.5 Classification des eaux thermominérales du Cameroun

Les classifications précédentes sont uniquement chimiques et à la lumière de ce qui a été dit auparavant et de ce qui a été rencontré au Cameroun, il paraît opportun de faire intervenir le critère du contexte géologique dans sa forme la plus générale à savoir la nature sédimentaire ou éruptive et cristallophyllienne des roches traversées par le « filon » thermominéral. En effet l'origine de la minéralisation est différente dans les deux cas.

Si les terrains traversés sont seulement sédimentaires et comprennent en particulier des niveaux évaporitiques et calcaires, l'ensemble de la minéralisation, anions et cations, proviendra de la dissolution de ces terrains tout au moins en majeure partie.

En revanche si les terrains traversés sont essentiellement éruptifs et cristallophylliens, la minéralisation a une origine double : la plus grande partie des anions

a une origine profonde et joue le rôle d'élément minéralisateur tandis que les cations proviennent surtout de l'hydrolyse et de l'attaque des roches traversées par les eaux chargées d'acide carbonique. Ceci sera confirmé plus loin au cours de l'étude détaillée des minéralisations.

Il paraît donc essentiel de distinguer deux grands groupes d'eaux thermominérales :

- les eaux de terrains sédimentaires,
- les eaux de terrains éruptifs et cristallophylliens.

Cette différenciation n'est pas toujours facile à faire notamment lorsqu'il existe une couverture sédimentaire et dans ce cas on pourra distinguer un troisième groupe d'eaux *mistes* qui sont bien illustrées par les eaux du bassin de Vichy dont une partie des cations peut provenir de niveaux sédimentaires.

Les eaux de terrains sédimentaires auront essentiellement les types suivants :

- type bicarbonaté calcique en terrain calcaire,
- type sulfaté calcique, pouvant évoluer en sulfuré calcique, en terrain gypseux,
- type chloruré sodique en terrain salifère.

Elles seront également caractérisées par de fortes minéralisations de plusieurs dizaines de grammes par litre.

Les principaux types d'eaux de terrains éruptifs et cristallophylliens seront les suivants :

- type bicarbonaté avec proportions variables des différents cations selon les roches traversées mais généralement prédominance du sodium. L'élément minéralisateur est l'anhydride carbonique ;
- type sulfaté ou sulfuré sodique avec comme élément minéralisateur le gaz sulfhydrique ou l'anhydride sulfureux ;
- type chloruré sodique avec comme élément minéralisateur l'acide chlorhydrique. Les eaux de ce type sont souvent hyperthermales ce qui est un moyen parmi d'autres de les distinguer des eaux semblables en terrains sédimentaires.

Il existe aussi des types intermédiaires correspondant aux eaux mixtes.

Classons maintenant les eaux du Cameroun à l'aide de ce cadre général et de la représentation graphique.

1 EAUX DE TERRAINS SÉDIMENTAIRES

Les seules qui ont été rencontrées sont celles de la région de Mamfé près de la frontière nigériane. Quatre sources ont été répertoriées : Ayukaba (104), Ebinsi (128), Mbakan (129) et Akan (130) mais d'autres sont connues (voir la carte).

Ce sont des eaux chlorurées sodiques, gazeuses, légèrement bicarbonatées et faiblement thermales. Il est possible que le gaz spontané soit de l'anhydride car-

bonique d'origine profonde et ces eaux auraient un caractère mixte mais très peu accentué étant donné la nette prédominance de la minéralisation chlorurée sodique.

Puisque ce sont les seules sources de ce type, examinons dès maintenant leur signification géologique et par la suite il sera uniquement question des sources situées dans un environnement cristallin ou cristallophyllien.

L'origine sédimentaire de la minéralisation (dissolution de niveaux évaporitiques) n'est pas manifeste puisqu'on ne connaît pas de tels niveaux à l'affleurement mais c'est précisément l'existence de ces sources jointe à certaines considérations structurales et paléogéographiques qui permet de supposer l'existence de tels niveaux en profondeur (Geze, 1943, p.93) :

- les valeurs de la minéralisation sont très élevées, jusqu'à 36 g/l et peut-être plus ;
- la nature de la minéralisation est presque exclusivement chlorurée sodique ;
- les sources sont strictement localisées sur les bords nord et sud du bassin sédimentaire de Mamfé ;
- elles marquent sans doute un système de failles qui permet d'attribuer à ce bassin une origine tectonique ;
- l'histoire géologique de ce bassin est mal connue. Ce que l'on en sait est déduit des études de Le Fur (1965) et de la synthèse des travaux de prospection pétrolière dans le delta du Niger publiée par Murat (1972).

Il ressort de ces travaux que la sédimentation dans la région de Mamfé date de l'Albien et du Cénomanien se limitant à un « golfe » dépendant du fossé d'Abakaliki au Nigéria lequel s'est ensuite soulevé et comporté comme un môle fermant le golfe de Mamfé. Les sédiments connus sont surtout détritiques, grossiers à fins avec des niveaux ligniteux et bitumineux ce qui fait penser que les conditions de dépôts ont été momentanément celles d'un bassin fermé de type paralique. Ceci semble d'ailleurs confirmé par les indices de galène, blende et pyrite (Le Fur, 1965) que l'on peut comparer à des dépôts sulfurés de couverture ou à des dépôts chimiques bien souvent contrôlés par des hauts-fonds paléogéographiques. Il est donc tout à fait possible que le golfe de Mamfé se soit comporté momentanément comme une lagune isolée du golfe du Niger. On pourrait expliquer alors la formation de niveaux évaporitiques marins et l'origine de la composition des eaux minérales de la région.

2 EAUX MIXTES

On est tenté de rattacher à ce groupe les eaux de quelques sources émergeant dans les vallées de la Mbéré et du Djérem en partie comblées par de puissantes formations gréseuses et conglomératiques à ciment argilo-ferrugineux : Malao (56), Barkeje (7), Yaisunu (95) et Sep Sep Djarandi (87).

Les 3 premières sont bicarbonatées ; la dernière est bicarbonatée sulfatée. Leurs anions ont une origine très probablement profonde. Comme les grès et conglomérats ne sont pas susceptibles de libérer d'importantes quantités de cations les minéralisations devraient être faibles. C'est le cas pour la source de Malao mais pas

pour les sources de Barkeje et Yaisunu où la couverture sédimentaire est sans doute peu épaisse. Quant à la source de Sep Sep Djarandi sa faible minéralisation, comparable à celle de Bajao (4) qui émerge directement du socle gneissique, est imputable à la nature des anions plutôt qu'au contexte géologique.

Donc la nature de la couverture sédimentaire fait que l'on n'a pas d'eaux minérales mixtes typiques au Cameroun et on considérera les eaux des sources précédentes comme des eaux de terrains éruptifs et cristallophylliens, les sédiments gréseux à ciment argilo-ferrugineux n'étant pas susceptibles d'avoir une influence notable sur la minéralisation.

3 EAUX DE TERRAINS ÉRUPTIFS ET CRISTALLOPHYLLIENS

La presque totalité des eaux thermominérales du Cameroun se rattache donc à ce groupe que nous allons subdiviser en fonction de la nature des anions prédominants puis des cations.

L'examen des analyses et du diagramme de Piper montre que l'anion bicarbonate est toujours présent, prédominant ou non, et que les anions chlorure et sulfate, tout en étant présents dans la plupart des eaux, ont soit des concentrations faibles correspondant, semble-t-il à un fond géochimique, soit des concentrations plus élevées qui paraissent plus significatives. En première analyse le fond géochimique de Cl^- et SO_4^{--} est représenté par des teneurs inférieures à 0.5 mé/l environ et lorsque leurs concentrations ne dépassent pas ces valeurs l'ion bicarbonate représente plus de 90% des anions. Dans le cas contraire, il apparaît que le sodium devient le cation prédominant.

A partir de cette remarque la classification suivante a été établie :

(1) *Type bicarbonaté simple* : HCO_3^- représente au moins 90% des anions. 65 sources sont de ce type et se subdivisent en :

— *type bicarbonaté sodique*, $\text{Na} > 75\%$ des cations, 4 sources : Galim (29), Woulndé (94), Malao (56), Gesel (111) ;

— *type bicarbonaté sodique calcomagnésien*, $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$, 31 sources : Falkoumre (24), Lawel (54), Nidounga (79), Mayang (64), Gasangel 1 (31), Djambutu (17), Béra (9), Bajanga (3), Ngoura (76), Gbengubu (34), Ba (2), Sambolabbo (86), Gasangel 2 (32), Lelingel (55), Sorbere (90), Guisire (38), Sep Sep Maloko (88), Abang (101), Ahio (102), Atoki (103), Bambui (105), Baré 1 (106), Ebuku (107), Koutaba (114), Lüh (116), Manengouba (117), Mbuedum (118), Mélong (119), Foundong (110), Nilli (123), Ndibisi (121) ;

— *type bicarbonaté sodique magnésien calcique*, $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$, 2 sources : Gangasaou (30), Laobala (44) ;

— *type bicarbonaté calcosodique et magnésien*, $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$, 5 sources : Marboui (58), Barkeje (7), Yaisunu (95), Baré 2 (106), Jichami (112) ;

— *type bicarbonaté calcomagnésien et sodique*, $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$, 9 sources : Say Hourri (85), Perki (82), Laobalewa 1 (45), Marpa (60), Gade (28), Polla (84), Vouré Mba (92), Vouré Yelél (93), Ngol (122) ;

— *type bicarbonaté magnésien calcosodique*, $Mg > Ca > Na$, 13 sources : Masola (61), Bajere (5), Laopanga (52), Masuel (62), Mbawa (69), Ngaoudamji (74), Ngok (75), Gounjel (37), Kadam (40), Mandim (6), Fossette (109), Kuchuantium (113), Nyos (126) ;

— *type bicarbonaté sodique et potassique*, $Na > K > Ca + Mg$, 1 source : Nsoug (124).

(2) *Type bicarbonaté sulfaté et sulfaté bicarbonaté sodique.*

$HCO_3 > SO_4 > Cl$ ou $SO_4 > HCO_3 > Cl$

$Na > 50\%$ des cations

23 sources : Nagese (71), Koulania (43), Sep Sep Djarandi (87), Bajao (4), Nialan (77), Mamdugu (99), Mayo Lidi (67), Mberduga (100), Lasum (53), Mayo Baléo (65), Patarlay (81), Burlel 1 (13), Laokoubong (50), Gbasum (33), Mama (57), Minim (70), Nalti (72), Bemlari (8), Burlel 2 (97), Déodéo (16), Malam Jubairu (98), Donkéré (20), Ntem (125).

(3) *Type bicarbonaté chloruré et chloruré bicarbonaté sodique.*

$HCO_3 > Cl > SO_4$ ou $Cl > HCO_3 > SO_4$

$Na > 50\%$ des cations

9 sources : Vina (91), Bonjong (10), Almé (1), Katil Foulbé (42), Dua (22), Laofuru (48), Mayo Darlé (66), Fonga Kie (108), Lobé (115).

Cette classification accorde une valeur particulière aux ions chlorure et sulfate et le choix de teneurs significatives pour ces ions peut paraître arbitraire. En fait cette manière de voir s'est trouvée corroborée par l'étude statistique de l'ensemble des résultats auquel a été appliquée l'analyse factorielle des correspondances (le Maréchal et Teil, 1973). Cette méthode d'analyse des données (ici les teneurs en divers éléments d'un certain nombre d'échantillons) permet entre autres choses, de différencier plusieurs groupes de sources suivant des éléments caractéristiques (facteurs). C'est un traitement statistique pour lequel aucune hypothèse n'est faite au départ.

Les résultats indiquent qu'en premier lieu il faut séparer les eaux bicarbonatées des eaux sulfatées et chlorurées, en deuxième lieu séparer les eaux sulfatées des eaux chlorurées et en troisième lieu distinguer eaux sodiques et eaux calcomagnésiennes. Le tableau 5 présente ces résultats illustrés par le graphique de la figure 19 qui représente dans le plan des deux premiers axes factoriels la projection des points représentatifs des échantillons et des éléments analysés (pour des explications plus détaillées se reporter à l'article mentionné ci-dessus).

Le graphique montre les 3 zones où se regroupent les échantillons. Elles sont caractérisées chacune par un anion : HCO_3 , Cl et SO_4 . Les échantillons compris dans chaque zone correspondent à ceux de la classification.

Le même résultat est donc obtenu par deux voies différentes : un raisonnement intuitif et un calcul mathématique.

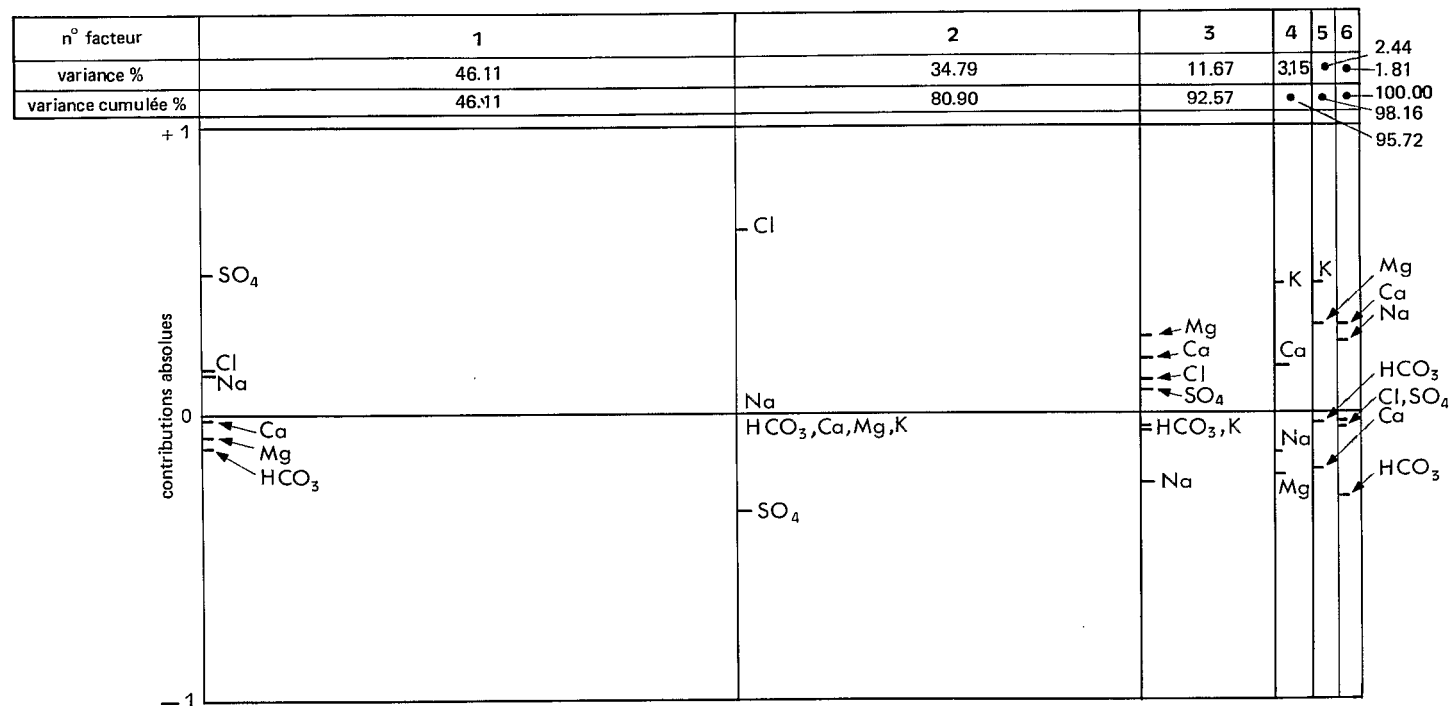


Tableau 5 Analyse factorielle des correspondances. Éléments majeurs (7 variables, 97 échantillons).

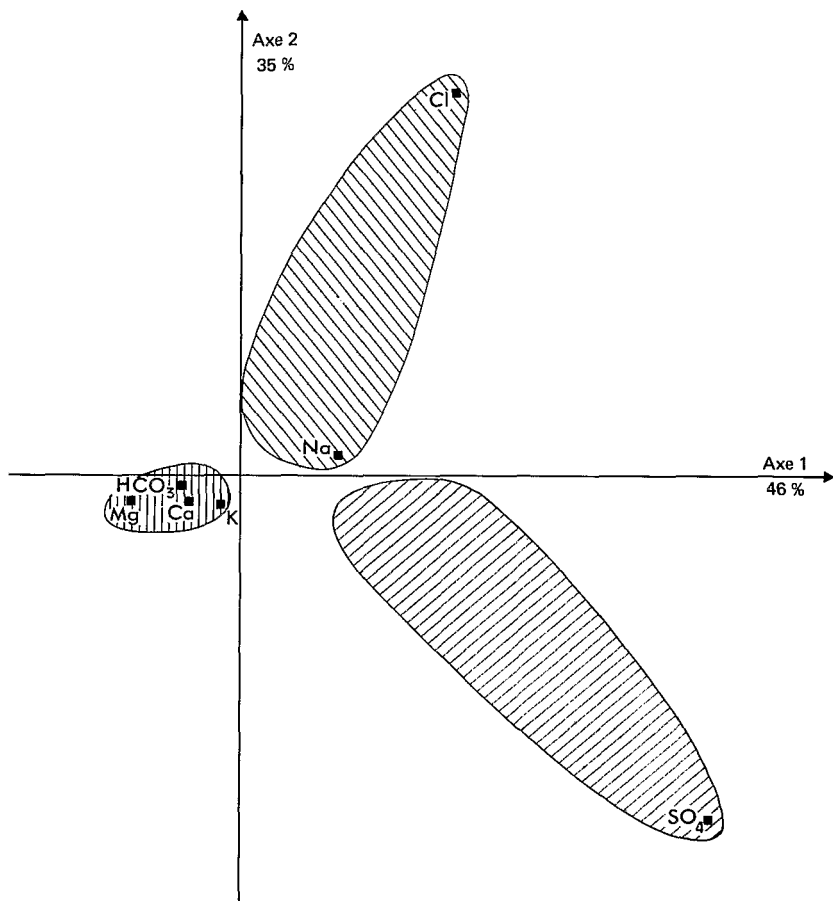


Fig. 19 Analyse factorielle des correspondances. Éléments majeurs.
Projection dans le plan des axes 1 et 2. (7 variables, 97 échantillons).

Ceci indique bien que les teneurs en Cl^- et SO_4^{2-} deviennent caractéristiques à partir d'un certain seuil.

Il ne suffit donc pas pour définir ces eaux de considérer les seules proportions relatives des anions, il faut en plus considérer les teneurs en valeurs absolues : certaines eaux seront caractérisées par Cl^- ou SO_4^{2-} même si les teneurs de ces ions sont inférieures à celles de HCO_3^- .

En d'autres termes *la présence de bicarbonates dans les eaux thermominérales du Cameroun issues de terrains éruptifs est générale : c'est un élément ubiquiste tandis que la présence de Cl^- et SO_4^{2-} en teneurs caractéristiques est localisée dans un nombre limité de sources.*

3 – CORRÉLATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS MAJEURS

Le problème est de savoir s'il existe des relations entre les teneurs des divers ions d'une source à l'autre. Ceci a été étudié dans la note de le Maréchal et Teil mentionnée précédemment dont les résultats sont rappelés (tableau 6 et fig. 20).

3.1 Corrélations entre les anions

Tableau 6 COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES TENEURS EN ÉLÉMENTS MAJEURS EXPRIMÉES EN ME/L.
107 échantillons sauf Na et K (97). Seuil de signification : 0.20
Les coefficients supérieurs au seuil de signification sont soulignés.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃
Ca	1.00						
Mg	<u>0.78</u>	1.00					
Na	0.18	0.03	1.00				
K	<u>0.23</u>	0.12	<u>0.31</u>	1.00			
Cl	<u>0.22</u>	0.04	<u>0.80</u>	0.07	1.00		
SO ₄	-0.04	-0.16	0.11	-0.10	-0.03	1.00	
HCO ₃	<u>0.73</u>	<u>0.71</u>	<u>0.42</u>	<u>0.48</u>	<u>0.21</u>	-0.26	1.00

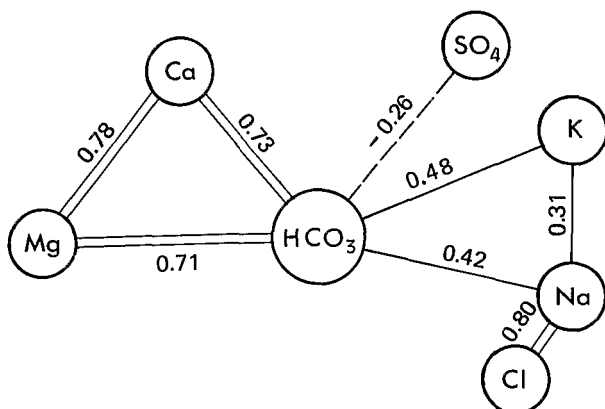


Fig. 20 Schéma illustrant les corrélations entre les éléments majeurs.

Le seuil de signification de 0.20 est une valeur théorique qu'il convient de corriger en fonction de l'intervalle de confiance. Il faut en fait considérer la valeur de 0.20 comme la limite inférieure de cet intervalle, le véritable seuil de signification étant le coefficient de corrélation correspondant à la limite supérieure de cet intervalle. Isnard *et al.* (1972) donnent un nomogramme qui permet de déterminer ce seuil qui vaut 0.38 pour un effectif de 100 échantillons. Donc les coefficients de corrélation inférieurs à 0.38 en valeur absolue n'ont pas ou peu de signification.

Il n'existe pas de corrélations significatives entre les teneurs en anions des différentes sources : Cl et SO₄ sont complètement indépendants, Cl⁻ et HCO₃⁻ montrent une très faible corrélation positive tandis que SO₄⁻ et HCO₃⁻ montrent une faible corrélation négative c'est-à-dire que moins il y aurait de bicarbonate plus il y aurait de sulfate.

Donc lorsqu'on passe d'une source à l'autre les teneurs des anions ne sont pas liées entre elles.

On est obligé d'admettre pour les anions la même origine profonde que pour les gaz, les premiers dérivant des seconds par dissolution dans l'eau. Il n'a pas été question du chlore à propos des gaz puisqu'il n'y a pas de preuve de l'existence d'espèces chlorées dans les gaz des sources du Cameroun mais l'origine de l'anion chlorure est certainement analogue à celle de l'anion bicarbonate. L'existence de chlorures en phase vapeur dans les fluides hydrothermaux est d'ailleurs un fait reconnu (White, 1957), corroboré par la prédominance du chlorure de sodium dans les inclusions des minéraux des gangues des gisements métallifères (Barton, 1959). Il en sera encore question plus loin.

L'origine profonde du soufre des sulfates paraît claire si l'on observe que les eaux sulfatées sont les seules dont le pH soit basique. En effet le lessivage de pyrites ne peut avoir lieu qu'en présence d'oxygène et produit des eaux très acides. Donc même en supposant une certaine neutralisation, le pH devrait être acide plutôt que basique. L'origine des sulfates des eaux du Cameroun est donc à rechercher dans l'oxydation secondaire de H₂S provenant de l'intérieur de la croûte terrestre.

Dans ces conditions les proportions relatives des anions observées devraient refléter celles qui existent le cas échéant dans le fluide gazeux venant depuis la profondeur. Le résultat précédent montrerait alors que ces proportions varient de façon quelconque d'un point à un autre tout en ne variant que peu ou pas dans le temps en un même endroit puisque la composition chimique de l'eau d'une source reste sensiblement constante.

Des observations faites au Japon sur les eaux thermales de Tamagawa (Ichikuni, 1959) ont permis d'arriver à des conclusions comparables à savoir l'existence de fluides magmatiques avec HCl, H₂S, SO₂ mais sans SO₄⁻ qui proviendrait de l'oxydation de certains composés soufrés à faible profondeur, *les teneurs en Cl et SO₄ étant d'autre part complètement indépendantes*. Toutefois la forte acidité de ces eaux, due à la présence de SO₂, les différencie de celles du Cameroun.

3.2 Corrélations entre les anions et les cations et entre les cations

Les anions jouent un rôle actif dans l'acquisition de la minéralisation puis-

qu'ils confèrent à l'eau son pouvoir lixiviant, tandis que les cations jouent un rôle passif puisqu'ils résultent de l'attaque des roches encaissantes.

Dans ce cas il faut s'attendre à ce que les teneurs des cations varient dans le même sens que celles des anions et soient donc corrélées positivement avec elles. C'est effectivement ce que l'on constate pour les bicarbonates, un peu pour les chlorures mais pas du tout pour les sulfates.

Les cations alcalino-terreux, Ca et Mg, sont étroitement liés au bicarbonate (0.73 et 0.71) tandis que les alcalins, Na et K, le sont beaucoup moins (0.42 et 0.48). *Donc la mise en solution de Ca et Mg dépend essentiellement de la présence de l'ion bicarbonate.*

La corrélation chlorure-sodium est remarquable (0.80) : *la teneur en Cl commande directement la teneur en Na* qui dépend dans une moindre mesure de la teneur en HCO_3 .

Le potassium n'est lié qu'avec l'ion bicarbonate.

Un fait remarquable est l'absence de corrélation de l'ion sulfate avec les cations comme avec les anions. Ceci vient à l'appui *du fait que les éléments soufrés venant de la profondeur sont émis sous forme réduite (S^{-2} , S^0) et non sous forme oxydée (S^{+4} , S^{+6})*. En effet les composés oxydés du soufre, SO_2 , SO_3 , sont susceptibles de former des solutions aqueuses fortement agressives et s'ils arrivaient de la profondeur sous cette forme ils attaqueraient les roches encaissantes et on devrait observer des corrélations entre les teneurs en SO_4 et les teneurs en cations. En revanche les solutions aqueuses des composés réduits très peu dissociés (H_2S , S) sont faiblement agressives et ne provoquent pas à elles seules la mise en solution de quantités importantes de cations. Par conséquent l'existence de l'ion sulfate à l'émergence doit être attribuée à une oxydation secondaire se produisant dans la zone superficielle. L'équilibre ionique se rétablit alors aux dépens des ions bicarbonates.

L'existence d'un milieu réducteur en profondeur est confirmée par le comportement du fer dont les composés oxydés précipitent à l'émergence.

La forte corrélation positive (0.78) entre les cations calcium et magnésium traduit l'analogie des comportements géochimiques de ces deux éléments en solution.

La relation calcium-magnésium peut d'ailleurs se déduire de l'examen du diagramme de Piper (triangle des cations) : la plus grande partie des points représentatifs est groupée dans un faisceau correspondant à une variation du rapport Mg/Ca de 2 à 0.6 avec une valeur moyenne de 0.9.

Il faut enfin noter l'absence de corrélation entre les éléments alcalins et alcalino-terreux que l'on peut attribuer à la différence du comportement de ces éléments en solution et peut-être aussi dans une moindre mesure à une différence d'origine dont il sera question un peu plus loin.

4 – CORRÉLATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS MAJEURS ET LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Il s'agit ici d'essayer d'interpréter les variations de composition chimique en fonction des particularités géologiques locales. Pour cela tous les éléments de la minéralisation, les anions puis les cations, vont être successivement examinés.

4.1 Les anions

1 LES BICARBONATES

Presque toutes les sources renferment des bicarbonates et beaucoup sont accompagnées de dégagements gazeux comprenant surtout de l'anhydride carbonique. Les teneurs observées sont telles que l'origine de ces substances est en majeure partie profonde.

Les sources les plus bicarbonatées se situent dans les régions du mont Cameroun, du massif du Manengouba, de la Ring Road, du pays bamoun, de Tignère, de Ngaoundéré. Ce sont les régions où se sont produits d'importants phénomènes volcaniques tertiaires et quaternaires. Toutefois là où les manifestations sont les plus récentes les dégagements gazeux sont les plus abondants ainsi que les teneurs en CO_2 dissous (massif du Manengouba et région de Ngaoundéré). En outre, les eaux sont encore faiblement thermale. Partout où l'on observe ces sources bicarbonatées avec ou sans dégagement gazeux, il existe des témoins de phénomènes volcaniques à proximité.

Ceci vient appuyer l'opinion souvent rencontrée qui considère les sources gazeuses bicarbonatées comme des manifestations tardives du volcanisme (Gèze, 1972 ; Bullard, 1962) car seuls des gaz peuvent circuler une fois que sont plus ou moins obturées les cheminées et les fissures qui ont livré passage aux laves. Il s'agit donc d'une survivance des communications qui se sont établies entre les zones profondes et la surface de la Terre.

2 LES CHLORURES

Il a été question précédemment d'un seuil de signification pour les teneurs en Cl et SO_4 . C'est un fait que beaucoup d'analyses montrent au moins une faible teneur en chlorure à côté d'autres nettement plus élevées.

Les faibles teneurs s'expliquent aisément par le lessivage des roches encaissantes : en effet Goldschmidt (1958) mentionne une teneur moyenne de 500 ppm dans les roches magmatiques. D'autre part les expériences de lixiviation des roches volcaniques (Ellis and Mahon, 1964) indiquent des teneurs variant de 360 ppm dans les basaltes à 990 ppm dans les ponces rhyolitiques, le chlore de ces roches étant assez facilement mis en solution, les résultats variant évidemment avec la température, la pression et le temps de réaction. Dans ces conditions il est tout naturel de trouver uniformément dans toutes les eaux thermominérales un peu de chlorure.

Quant aux plus fortes teneurs, supérieures à 0.5 mé/l pour fixer les idées,

il est nécessaire de leur attribuer une origine profonde. On peut distinguer deux groupes :

- des eaux dont les teneurs varient de 0.5 à 2 mé/l. Ce sont en même temps des sources sulfatées et on note que la plupart des sources sulfatées sont caractérisées également par une élévation de la concentration en Cl. Par exemple : Bajao, Bemlari, Béra, Burel 1, Déodé, Gbasum, etc...

- d'autre part des eaux présentant de plus fortes teneurs en Cl ; ce sont celles qui ont été classées dans les sources chlorurées, mises à part celles de Katil Foulbé et Dua, et leur localisation est intéressante :

Bonjong, Vina et Laofuru dans la zone du volcanisme quaternaire de l'Adamoua ;

Lobé dans la zone du volcanisme quaternaire à actuel du mont Cameroun ;

Gesel et Fonga Kié dans la zone du volcanisme de Bamenda ;

Fossette dans la zone du volcanisme quaternaire de Fouban (une incertitude existe pour cette dernière source car le laboratoire n'a pas trouvé trace de Cl alors que les essais de terrain en indiquaient 37 mé/l, mais étant donné l'environnement des sources chlorurées il est assez probable que celle de Fossette en soit une) ;

Almé au pied du massif post-tectonique ultime de Genfalabbo, d'âge probablement tertiaire ;

Mayo Darlé au pied d'un massif de granite post-tectonique ultime daté fin Secondaire début Tertiaire (âge roche totale 65 ± 12 MA, Lasserre, 1966a).

Les sources fortement chlorurées semblent donc être localisées dans les régions de volcanisme récent (Quaternaire à Actuel) et à proximité des massifs post-tectoniques ultimes dont la mise en place est souvent datée du Tertiaire. Toutefois la réalité de cette dernière association est moins sûre étant donné qu'elle est seulement contrôlée par deux sources.

La présence de chlorure d'hydrogène dans les exhalaisons volcaniques est bien connue et l'association sources chlorurées-volcanisme n'est pas surprenante. L'origine volcanique des chlorures de certaines eaux minérales du Massif Central (La Bourboule, Royat, St Nectaire) a d'ailleurs été invoquée par Jacquot et Willm (*op. cit.* p.44). Il convient cependant de noter la durée de l'activité chlorurée après les phases paroxysmales du volcanisme car on entend parler le plus souvent de sources chlorurées et de gaz volcaniques chlorurés dans des zones de volcanisme actif et il semble donc bien que du chlorure d'hydrogène d'origine profonde continue à se dégager assez longtemps après les phases majeures de l'activité volcanique.

En ce qui concerne les relations possibles de certaines sources chlorurées avec les massifs ultimes, on sait que ces derniers sont des massifs de type subvolcaniques dont la mise en place est souvent accompagnée d'un cortège filonien traduisant le rôle d'une phase pneumatolytique mettant en jeu des chlorures qu'on retrouve dans des minéraux des pegmatites (Goldschmidt, *op. cit.*, p.588). Bien que ceux-ci n'aient pas été observés au Cameroun, faute peut-être d'études suffisamment détaillées, l'existence des sources chlorurées dans ce contexte géologique pourrait trouver là une explication logique.

A ces données viennent s'ajouter celles de Holland (1972) concernant les

solutions que libère un magma granitique au cours de sa cristallisation :

- libération d'une quantité d'eau non négligeable : entre 1 et 5% de la masse du magma.
- mobilisation par cette eau de fortes concentrations de NaCl (jusqu'à saturation) dont témoignent les inclusions des minéraux constitutifs des intrusions. Ces solutions chlorurées sont susceptibles d'entraîner d'autres métaux en concentrations intéressantes, tels Pb, Zn, Sn. Le rôle particulier du chlore est souligné par ses teneurs pondérales de 0.3 à 0.5% dans des biotites associées à des gisements de métaux usuels alors que la moyenne générale est de 0.1%.
- migration de ces solutions, précipitation par abaissement de la température et formation de minerais.

L'analogie est frappante entre ces données et le contexte de la source chlorurée et bicarbonatée sodique de Mayo Darlé (n° 66) qui émerge à proximité immédiate du massif granitique intrusif d'âge tertiaire qui porte le même nom et présente des minéralisations de cassitérite dans des filons de greisen (cf. partie géologie). Si cette liaison est bien réelle, elle montrerait que des solutions concentrées de chlorure de sodium d'origine magmatique contribuent à alimenter certaines sources thermominérales. La très forte corrélation entre les teneurs en Cl et en Na constatée précédemment s'expliquerait ainsi aisément (notons que cette corrélation ne tient pas compte des sources chlorurées sodiques de la région de Mamfé) par l'origine en partie commune de ces deux éléments, en partie seulement car l'altération des roches libère aussi du sodium.

Ce type de source pourrait alors être considéré comme un témoin tardif de la mise en place d'intrusions de type subvolcanique. En outre étant donné le rôle fondamental que semble jouer le chlore dans la genèse de certains gîtes filoniens, ce type de source pourrait constituer un critère de prospection intéressant. De même que la source de Mayo Darlé peut être associée au gisement stannifère du même nom, le massif de Genfalabbo mériterait d'être étudié en détail du fait de la présence de la source d'Almé (n° 1) bicarbonatée et chlorurée sodique, au pied de ce massif.

On est ainsi amené à penser qu'une partie du sodium des eaux chlorurées associées au volcanisme a la même origine magmatique que le chlore, rejoignant en cela les conclusions de Thuizat (1973) à propos de la minéralisation des eaux de Chatelguyon (Puy-de-Dôme) : les expériences de lixiviation des roches encaissantes (syéno-diorites) par de l'eau bidistillée saturée en CO₂ dissous, permettent d'obtenir des solutions de composition voisine de l'eau thermominérale sauf pour le sodium un peu déficitaire, ce qui fait admettre à cet auteur un apport de Na d'origine profonde. Bien que les conditions expérimentales ne soient pas exactement celles de la nature, ce résultat constitue cependant une précieuse indication.

3 LES SULFATES

Des remarques analogues à celles qui viennent d'être faites à propos des sources chlorurées peuvent être faites pour les sources sulfatées : l'anion sulfate est présent dans presque toutes les eaux mais sa teneur ne devient significative qu'à partir d'environ 1 mé/l : en-dessous sa présence est attribuable au soufre qui existe dans les roches magmatiques en faible quantité : 0.052% d'après Clarke et Washington (*in*

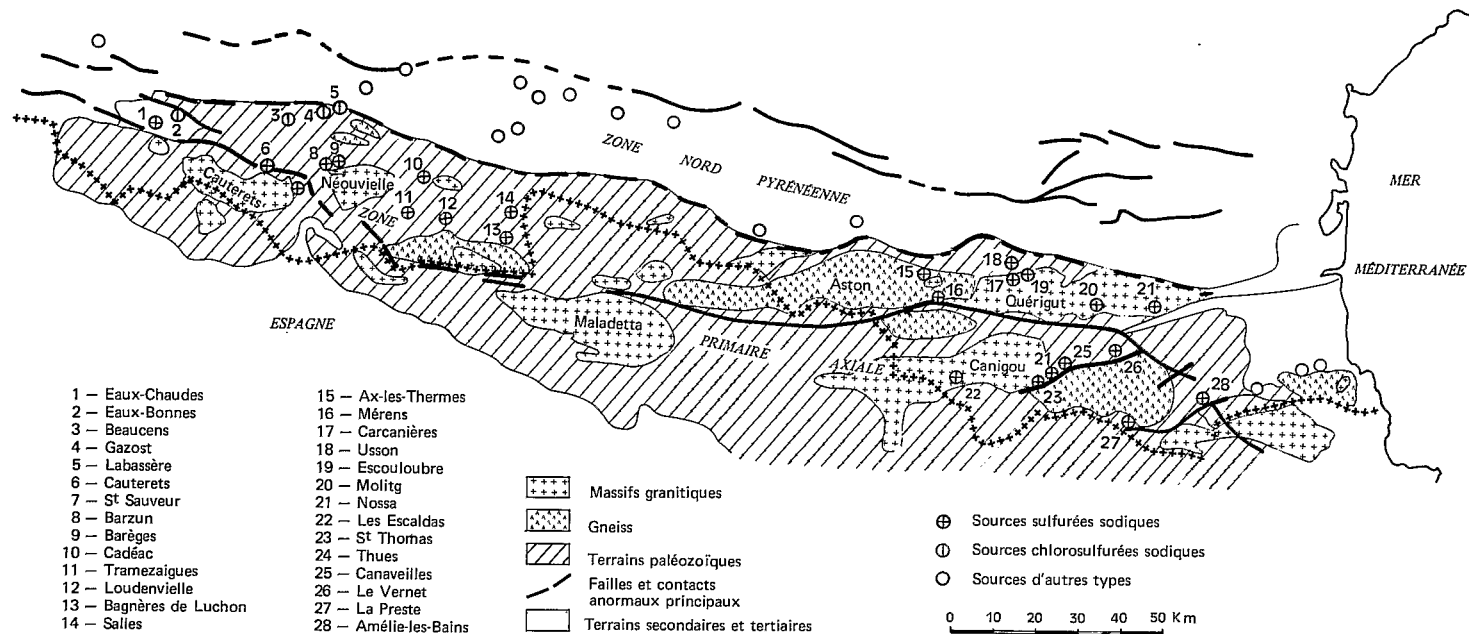


Fig. 21 Esquisse structurale des Pyrénées centrales et orientales.
Localisation des principales sources thermominérales.
(d'après Ghafouri, 1968).

Goldschmidt, *op. cit.* p. 524), de 100 à 500 ppm dans des roches volcaniques semblables à celles utilisées par Ellis et Mahon dans leurs essais de lixiviation déjà mentionnés à propos du chlore.

Le lessivage des roches peut donc expliquer les faibles teneurs en sulfates rencontrées qui constituent une sorte de « fond géochimique ». Pour les teneurs plus élevées qui atteignent 27 mg/l à la source de Donkéré (n° 20) il faut attribuer au soufre une origine profonde sous forme de gaz sulfureux ou sulfhydrique comme il a été dit précédemment à propos des corrélations entre les anions.

Il est alors intéressant de considérer la localisation des sources notablement sulfatées :

Mama (57), Gbasum (33), Nagese (71), Koulania (43), Sep Sep Djarandi (87) et Bajao (4) jalonnent d'ouest en est le fond du fossé Djérem-Mbére ;

Minim (70) et Laokoubong (50) sont sur la grande faille limitant le plateau de Ngaoundéré à l'ouest (peu marquée sur le terrain) ;

Burlet 2 (97), Malam Jubairu (98), Mamdugu (99), Mberduga (100), Déodéo (16) jalonnent d'importantes fractures au N du tchabal Mbabo ;

Donkéré (20), Lasum (53), Patarlay (81), Burlet 1 (13), Bemlari (8) et Mayo Baléo (65) marquent les vallées du mayo Déo et du mayo Baléo ;

Nalti (72) est au N du hosséré Genfalabbo.

Toutes ces sources sont donc en relation avec les failles les plus importantes si on considère l'amplitude des rejets qui les accompagnent. Ce sont aussi probablement les failles les plus profondes ce qui est corroboré par le fait que les eaux de ces sources sont presque toujours thermales encore que faiblement (températures voisines de 30°C).

Les exemples de sources sulfatées dans un contexte de roches cristallines ne manquent pas, mais on cite le plus souvent des eaux très chaudes et très acides associées à des phénomènes volcaniques actifs comme en Nouvelle-Zélande (Ellis and Mahoné *op. cit.*) et aux États-Unis (White, 1957).

Cependant il existe des sources très comparables dans le Massif Central (Évaux-les-Bains, Nérès, Bourbon-l'Archambault), dans les Vosges (Plombières, Luxeuil-les-Bains, Bains-les-Bains) et en Bohême (Karlsbad, Marienbad). Ce sont toutes des eaux thermales sulfatées et bicarbonatées émergeant dans des terrains cristallins (De Launay, *op. cit.* p.282 à 305) à la faveur de failles souvent anciennes ayant joué récemment et marquées par des filons quartzeux. De Launay explique les fortes teneurs en sulfate des sources de Karlsbad par la présence de pyrite dans les fissures mais ne faudrait-il pas plutôt expliquer la présence de pyrite par des venues sulfureuses profondes ? En outre Hoppe (1972) note l'association des sources sulfatées de Karlsbad aux fractures des roches granitiques, comme au Cameroun.

Les griffons de ces sources sont marqués par des dépôts de barytine. Le baryum a son origine dans les roches encaissantes qui n'ont pas pu le libérer en présence des fortes teneurs en ions sulfates ceux-ci n'existaient donc pas au moment de l'attaque des roches et le soufre était très probablement présent dans l'eau à

l'état réduit. On notera également que, comme certaines sources sulfatées du Cameroun (vallée du Mayo Déo), les sources de Karlsbad sont très minéralisées (5 g/l) tandis que celles des Vosges ressemblent plus à celle de Bajao ou de Sep Sep Djarandi avec des minéralisations de l'ordre de 500 mg/l.

Un autre terme de comparaison est fourni par les sources sulfurées des Pyrénées dont on trouvera une bonne étude dans l'ouvrage de Jacquot et Willm (1894) et une synthèse récente par Ghafouri (1968). Jacquot et Willm (*op. cit.* p. 329) en dénombrent 220 et il serait vain de vouloir les énumérer. Sur le plan géologique elles jalonnent la zone primaire axiale du massif des Pyrénées (voir carte, fig. 21) et plus particulièrement le pli-faïlle de Mérens et ses accidents transversaux. Elles jaillissent souvent à la faveur de contacts par failles entre terrains cristallins ou cristallophylliens et sédimentaires d'âge primaire et l'on sait que ces failles sont des accidents tectoniques très importants. Sur le plan géochimique ce sont des eaux thermales peu minéralisées (0.2 à 0.5 g/l) bicarbonatées, sulfatées et sulfurées sodiques. On les nomme sulfurées mais en fait bicarbonates et sulfates sont presque toujours présents en quantités parfois supérieures à celles des sulfures. Il y a donc une nette ressemblance avec les eaux de Bajao ou de Sep Sep Djarandi bien que là les sulfures n'aient pas été dosés avec précision et aussi malgré la différence des styles tectoniques : tectonique cassante au Cameroun et tectonique plus souple dans les Pyrénées.

On a beaucoup écrit sur l'origine du soufre de ces sources et une opinion couramment répandue est de l'attribuer à la lixiviation des sulfures métalliques dont on connaît des gisements dans la région. Cette hypothèse est incompatible avec l'insolubilité quasi totale des sulfures en milieu réducteur (excepté les sulfures alcalins et alcalino-terreux inconnus à l'état naturel). On a d'ailleurs pu observer leur formation au griffon de certaines sources, en dehors des Pyrénées il est vrai, aux dépens des matériaux utilisés pour leur captage. Ainsi, chalcosine, chalcopyrite, tétraédrite, galène, pyrite ... ont été rencontrées dans les anciens travaux romains à Bourbonne les Bains (Daubrée, 1887, t. II, p. 76). Donc, encore une fois, est-ce que ce ne sont pas les filons sulfurés qui se sont formés à partir de circulations hydrothermales sulfurées et non l'inverse ? Le soufre aurait alors une origine profonde et les sources sulfurées pourraient être considérées comme des « fuites » d'un système hydrothermal profond, d'où leurs températures généralement élevées.

C'est sans doute dans ce sens qu'il faut comprendre la comparaison des sources thermominérales et des filons métallifères qui a été faite aussi bien par Daubrée que par De Launay (*op. cit.* p. 338). Ces auteurs y voyaient même le modèle qui permet de comprendre l'origine des gisements hydrothermaux et ce problème sera évoqué dans la 5^{ème} partie.

Il est enfin remarquable que toutes les eaux sulfatées soient essentiellement sodiques comme d'ailleurs les eaux analogues d'autres régions. Ceci s'explique mal d'autant plus qu'il n'y a pas de corrélation générale entre SO_4 et Na. Toutefois il semble qu'il en existe une si on ne considère que ce seul type d'eau.

En résumé dans un contexte de roches cristallines et cristallophylliennes, le soufre des eaux sulfurées ou sulfatées a très probablement une origine profonde. Son état d'oxydation et son abondance à l'émergence sont sans doute en relation avec les conditions de circulation de l'eau qui permettent plus ou moins son oxyda-

dation. *De plus les eaux sulfatées sont associées aux failles qui paraissent les plus profondes.*

4 CONCLUSIONS SUR L'ORIGINE ET LA GÉOCHIMIE DES ANIONS

Nous avons donc conclu à l'origine essentiellement profonde des éléments carbone, chlore et soufre qui sont à la base de la minéralisation anionique des sources du Cameroun. Leur présence est associée à des phénomènes volcaniques, magmatiques ou tectoniques.

Ces trois éléments auxquels il faut ajouter la vapeur d'eau et l'azote constituent la plus grande partie des gaz ou produits fumerolliens que l'on rencontre dans un volcanisme actif et que l'on peut différencier suivant leur température, elle-même fonction de la distance du foyer éruptif et du temps écoulé depuis la phase paroxysmale.

On observe successivement (Gèze, 1972) les *fumerolles sèches* de température supérieure à 500°C à base de F, Cl₂, Cl⁻, puis les *fumerolles acides ou chlorhydriques* de température comprise entre 300 et 500°C, composées de beaucoup de vapeur d'eau, HCl, SO₂ (et H₂S + CO₂) puis les *fumerolles alcalines ou ammoniacales* de 100 à 300°C se composant de beaucoup de vapeur d'eau, H₂S, un peu de CO₂, Cl⁻ et NH₄⁺, puis les *fumerolles froides ou sulfhydriques* de 40 à 100°C avec vapeur d'eau, H₂S et CO₂, et enfin les *mofettes* à température ordinaire qui sont de simples dégagements de CO₂ soulignant la fin d'un cycle volcanique.

Les phénomènes sont certainement plus complexes. En effet, examinant la question des gaz volcaniques, Krauskopf (1967) montre, à partir de données analytiques et de considérations thermodynamiques et géochimiques que les gaz originellement dissous dans les laves sont assez semblables d'un volcan à l'autre et que le facteur température permet d'expliquer en partie les variations de composition qui subsistent même après avoir fait la part de la contamination atmosphérique. H₂O, CO₂, HCl et H₂S pourraient être les principaux gaz dissous dans le magma en profondeur car leur existence est favorisée par une pression totale élevée. La prédominance de SO₂ et H₂ à haute température et celle de H₂S et CO₂ à basse température s'expliquent très bien par des déplacements d'équilibre provoqués par la diminution de la température. Mais il n'est pas possible actuellement de distinguer les changements dus au temps et à la distance d'un foyer éruptif de ceux qui sont dus à la température.

On peut toutefois retenir d'une façon générale que l'état d'activité volcanique et la composition des gaz sont en relation par l'intermédiaire de la température. Dans ce sens il est intéressant de faire le rapprochement entre l'activité volcanique et les types d'eau minérale.

En effet, les sources chlorurées et certaines sources bicarbonatées sont en relation soit avec le volcanisme récent (mont Cameroun, pays bamoun, Adamaoua), soit, mais de façon moins sûre, avec des massifs subvolcaniques (Mayo Darlé, Almé) tandis qu'ailleurs on a seulement des sources bicarbonatées avec souvent des dégagements de CO₂.

Le type chimique des sources thermominérales associées au volcanisme refléterait donc l'évolution des gaz volcaniques en fonction de la température et pourrait renseigner sur l'état de l'activité volcanique régionale.

Ainsi les émanations volcaniques sulfurées sont les plus brèves (fumerolles sulfurées au sommet du mont Cameroun et H_2S dissous dans l'eau de la source de Lobé), les émanations chlorurées persistent plus longtemps, et enfin les émanations de gaz carbonique se prolongent encore plus avec une large extension.

4.2 Les cations

Si les anions ne pouvaient provenir des roches traversées par les eaux minérales, les cations au contraire trouvent là leur origine en grande partie. En effet même s'il est possible que dans certaines conditions de température et de pression des halogénures alcalins soient émis sous forme gazeuse à partir d'un magma (*cf.* certains gaz et vapeurs volcaniques), si ce magma est profond, l'évolution des conditions physico-chimiques entre la profondeur et la surface entraînera la condensation de ces produits qui n'atteindront pas la surface sauf s'ils sont repris par une phase aqueuse. C'est ce qu'on retrouve dans les schémas proposés par White (1957a) pour expliquer la formation des eaux thermales d'origine volcanique.

C'est aussi une des conclusions de la discussion sur les eaux chlorurées du Cameroun qui a montré que dans ce cas une partie du sodium était probablement d'origine magmatique, sinon il n'y a pas lieu d'invoquer une telle origine pour les autres cations qui sont d'ailleurs moins entraînés que le sodium par les solutions chlorurées comme l'indiquent les travaux de Holland (1972, *op. cit.*).

D'autre part, des recherches expérimentales ont montré que des roches ou des minéraux silicatés étaient susceptibles de libérer des quantités de substances suffisantes pour expliquer la minéralisation des eaux thermominérales, après attaque par de l'eau dans différentes conditions de température et de pression et en présence d'anhydride carbonique (Pedro, 1960 ; Lagache, 1965 ; Ellis and Mahon, 1964 et 1967 ; Trichet, 1970 ; etc ...). Les résultats furent positifs et cette origine de la minéralisation en cations des eaux thermominérales ne fait plus de doute.

L'étude des cations, de leurs teneurs et de leurs proportions relatives devrait donc être précédée de celle des mécanismes d'attaque des différentes roches dans des conditions hydrothermales. Mais c'est un problème thermodynamique infiniment complexe où interviennent un très grand nombre d'espèces chimiques solides et en solution ainsi que des conditions de température et de pression mal connues et évoluant d'un point à un autre du circuit hydrothermal. Il commence à être étudié dans son ensemble (Fouillac et Michard, 1973) et ne sera pas abordé.

Ceci étant, la répartition des cations dans la minéralisation des sources du Cameroun appelle deux remarques importantes :

- les eaux de types chloruré ou sulfaté sont essentiellement sodiques avec relativement peu de calcium et de magnésium ;
- les eaux de type bicarbonaté présentent des proportions très variables des différents cations.

Le premier point pourrait s'expliquer par la solubilité du sodium plus grande que celles du calcium et du magnésium en présence d'ions chlorures et sulfates. Cependant les limites de solubilité (dans l'eau pure il est vrai) sont loin d'être atteintes et on comprend mal ce qui empêche le calcium et le magnésium, libérés en même temps que le sodium, d'être maintenus en solution et a priori on devrait avoir des proportions des différents cations aussi variées qu'avec les eaux bicarbonatées. En fait on se heurte au problème d'équilibre thermodynamique posé précédemment. Cette particularité doit s'interpréter en termes de différences de solubilité et de stabilité mais cette « explication » ne résoud pas la question.

Quant au deuxième point évoqué, il trouve une interprétation simple dans la nature variable des roches traversées par le filon hydrominéral.

Cependant le domaine de nos connaissances est limité à la surface et il est difficile d'extrapoler vers la profondeur surtout lorsqu'il s'agit de roches cristallines. On en est donc réduit à des conjectures très imprécises mais on va voir que cela suffit pour faire correspondre les principaux types d'eaux à des environnements géologiques et plus particulièrement pétrographiques déterminés.

1 LE SODIUM ET LE POTASSIUM

Le sodium est un élément très répandu dans l'ensemble des roches ignées et cristallophylliennes et ses composés sont très solubles. On le rencontre essentiellement dans des feldspaths, des feldspathoïdes, des pyroxènes et des amphiboles et c'est le cation dominant dans 70 des eaux de sources.

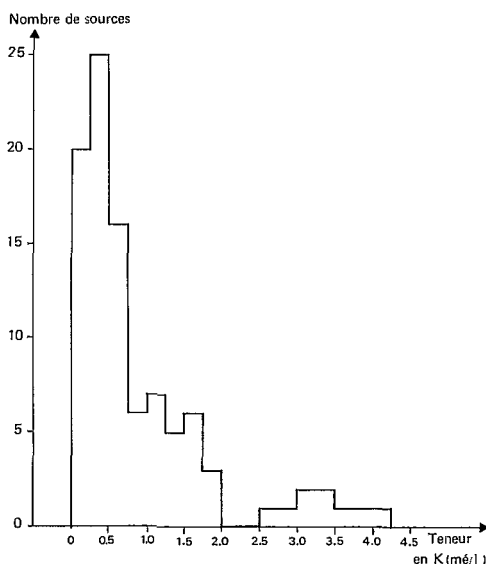


Fig. 22 Histogramme des teneurs en potassium dans les eaux thermominérales du Cameroun (97 échantillons).

Le potassium est présent dans de nombreux minéraux : feldspaths, feldspathoïdes et micas, mais se trouve généralement enrichi dans les roches acides de sorte que le rapport pondéral Na/K diminue lorsqu'on passe des gabbros aux granites (Rankama and Sahama, 1950, p.430).

La prédominance de Na sur K dans les eaux est un fait général qui est bien expliqué par la plus grande stabilité des feldspaths et des micas potassiques d'une part, par l'absorption et la mobilisation de K dans les minéraux néoformés au cours de l'altération d'autre part.

Les teneurs de ces deux ions sont en outre corrélées positivement : le coefficient de corrélation est faible (0.31) mais significatif. Ceci pourrait provenir d'une corrélation préexistante dans les roches alcalines et calco-alcalines qui constituent la plus grande partie du soubassement régional.

Enfin l'histogramme des teneurs en potassium (fig. 22) montre que la plupart d'entre elles sont inférieures à 1 mé/l tandis qu'une douzaine de sources ont des teneurs de 2 à 4 mé/l et ont des localisations particulières :

N°	Noms	teneurs en K (mé/l)	Na/K	N°	Noms	teneurs en K (mé/l)	Na/K
29	Galim	1.97	10.6	92	Vouré Mba	2.62	2.95
17	Djambutu	3.92	3.2	93	Vouré Yelel	1.97	2.97
31	Gasangel 1	3.10	6.2	55	Lelingel	3.59	4.1
54	Lawel	1.74	7.2	90	Sorbere	3.08	3.5
79	Nidounga	3.38	4.4	38	Guisire	1.97	7.6
24	Falkoumré	3.38	4.6	9	Béra	2.77	5.7
				124	Nsoug	4.10	1.14

Ces fortes concentrations en potassium sont sans rapport avec la minéralisation globale et correspondent à des « anomalies » régionales. Il est donc logique de chercher à les rattacher à un caractère géologique particulier sans doute la présence de roches plus riches en potassium susceptibles de le libérer plus facilement que d'autres, telles que des rhyolites ou d'autres roches volcaniques acides.

Ce pourrait être effectivement le cas si l'on considère les affleurements de surface : la source thermale de Nsoug émerge en plein massif du Manengouba à la faveur d'une faille marquée par une brèche volcanique à éléments rhyolitiques, de plus Gèze (1943, p. 185-6) a reconnu dans ce même massif un pointement de rhyolites hyperalcalines qui sont peut-être plus répandues dans ce massif qu'il n'y paraît.

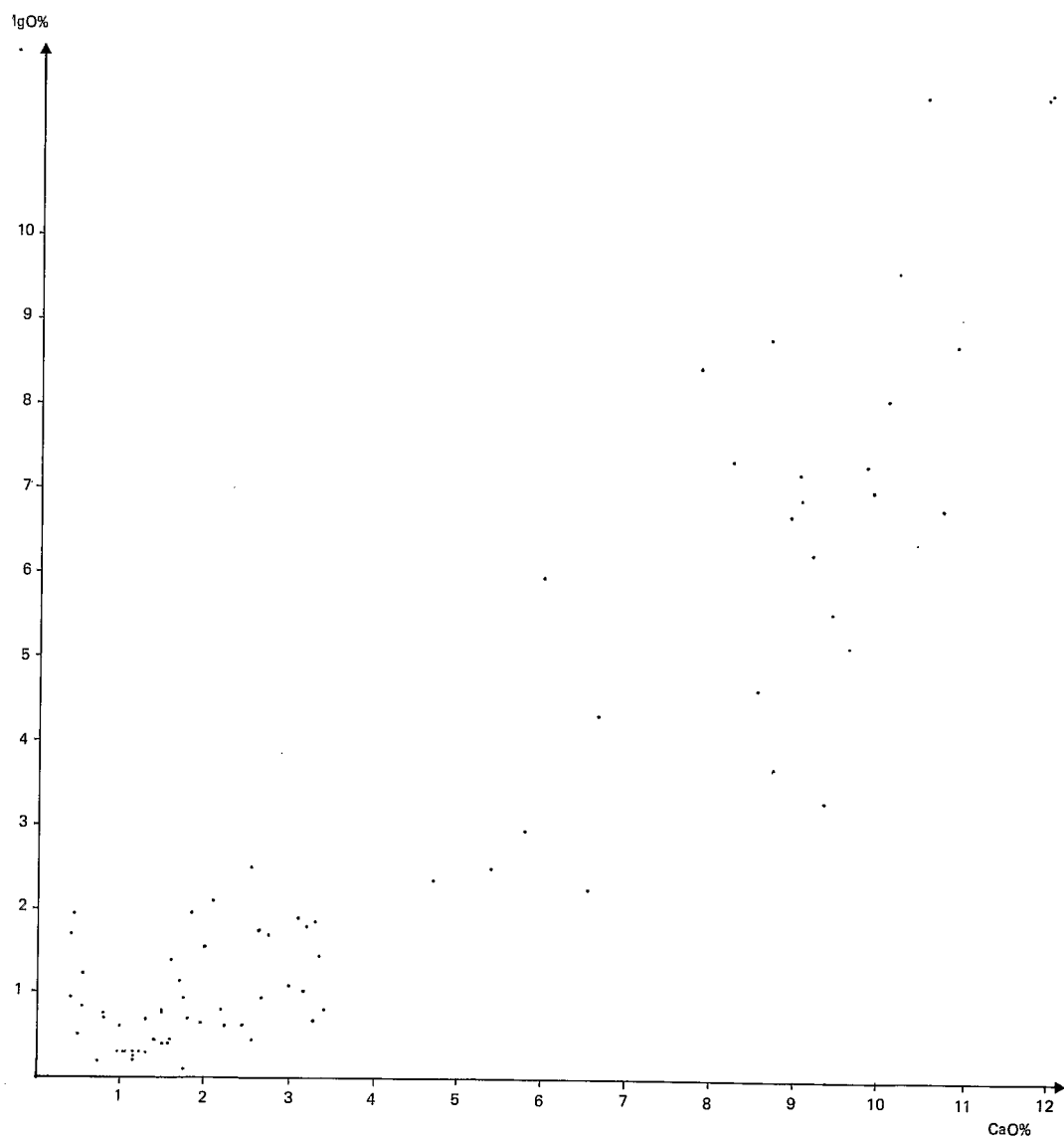


Fig. 23 Teneurs en CaO et MgO des roches éruptives et cristallophylliennes de l'Adamaoua et de l'ouest du Cameroun (cf. Tableau 1, h. t.).

On ne trouve pas d'affleurements rhyolitiques à proximité des sources de Béra et de Guisire.

De même, pour expliquer l'anomalie de la région qui va de Galim à Falkoumré (30 km), on ne dispose que d'un petit affleurement de rhyolite à l'Ouest de Falkoumré (Guiraudie, 1955). Mais l'existence de massifs aveugles à faible profondeur est possible.

En revanche les quatre autres sources émergent dans une région où les pointements rhyolitiques sont nombreux (Koch, 1953). Celle de Lelingel en particulier est entourée de quatre pointements.

Ces rapprochements n'ont évidemment pas valeur de preuves. Il semble toutefois hautement probable que *les teneurs anormalement élevées en potassium sont dues au lessivage de rhyolites ou de roches appartenant à leur cortège telles que les microgranites et les granites potassiques et, si ces roches sont inconnues à l'affleurement, elles existent en profondeur et sont traversées par le circuit hydrominéral.*

2 LE CALCIUM ET LE MAGNÉSIUM

On rencontre ces deux éléments ensemble dans des pyroxènes et des hornblendes, le calcium seul dans la série des feldspaths plagioclases et des grenats, le magnésium seul dans l'olivine, la cordiérite, des micas et des chlorites. Ils sont beaucoup plus abondants dans les roches basiques que dans les roches acides et d'une façon générale l'enrichissement de l'un accompagne l'enrichissement de l'autre si on excepte bien sûr les roches ultrabasiques qui sont les plus riches en magnésium et parmi les plus pauvres en calcium mais on ne connaît pas de telles roches dans les régions concernées, du moins en surface. C'est pourquoi le graphique des teneurs en MgO en fonction des teneurs en CaO des roches éruptives et cristallophylliennes de l'Adamaoua et de l'Ouest-Cameroun fait ressortir une corrélation positive entre ces deux éléments (fig. 23).

Ceci se retrouve de manière très significative dans les eaux minérales où le coefficient de corrélation entre les teneurs en Ca et Mg est de 0.78, valeur très élevée due aussi au fait que la mise en solution de ces deux éléments est en relation avec la présence de l'ion bicarbonate ce qui se traduit par deux corrélations positives HCO_3^- - Ca et HCO_3^- - Mg également très élevées : 0.73 et 0.71.

On peut dire finalement que les eaux dans lesquelles Ca, Mg, Ca et Mg ou $\text{Ca} + \text{Mg}$ sont en quantités supérieures à Na ont été en contact surtout avec des roches basiques : amphibolites, pyroxénites, gneiss à amphibole, basaltes, etc

Alors que la plupart du temps les teneurs en calcium sont supérieures aux teneurs en magnésium, il existe un groupe de sources, énumérées ci-dessous, où c'est l'inverse (Mg/Ca supérieur à 1), et il est intéressant de noter qu'il s'agit surtout d'« anomalies régionales » comme pour les fortes teneurs en potassium et non de fortes teneurs accidentelles.

N°	Noms	Mg/Ca	N°	Noms	Mg/Ca
30	Gangasaou	3.09	62	Masuel	1.14
44	Laobala	1.89	52	Laopanga	1.15
74	Ngaoudamji	2.82	69	Mbawa	1.76
75	Ngok	1.26	85	Say Houri	1.00
37	Gounjel	1.09	6	Mandim	1.15
40	Kadam	1.00	21	Dotia	1.29
11	Borkou	1.62	36	Gogarma	1.11
27	Doua	1.22	24	Falkoumre	1.03
87	Sep Sep Djarandi	1.00	53	Lasum	1.42
4	Bajao	2.40	101	Abang	1.30
61	Masola	1.22	103	Atoki	1.03
5	Bajere	1.03	121	Ndibisi	1.17
46	Laobalewa 2	1.33	109	Fossette	1.62
51	Laopaba	1.29	113	Kuchuantium	1.75
			126	Nyos	1.85

Parmi ces sources, celles de la région de Ngaoundéré déterminent deux alignements approximativement orientés N 120° E suivant la direction d'allongement général du (ou des) trapp basaltique auquel on peut assimiler les épanchements de cette région (voir la partie volcanisme). Or les eaux à forte proportion de magnésium doivent être associées à des roches particulièrement riches en cet élément c'est-à-dire des roches basiques voire ultrabasiques, soit que de telles roches aient pu se mettre en place sous le plateau de Ngaoundéré à la faveur des épanchements basaltiques, soit que les eaux suivent les fissures qui ont servi à la montée du magma basaltique et qui sont maintenant remplies de basalte refroidi.

Cette hypothèse rejoint les conclusions de l'étude géophysique du fossé de la Mbéré, qui constitue la bordure sud du plateau de Ngaoundéré (Collignon, 1970, repris par le Maréchal et Vincent, 1971) encore que certaines des sources précédentes soient assez éloignées de ce fossé :

« la gravimétrie met en évidence une dissymétrie importante entre les bords nord et sud de la vallée de la Mbéré - la faille nord ayant un rejet nettement supérieur - et montre l'insuffisance d'un modèle simple de faille pour rendre compte des anomalies observées sur le versant septentrional. Pour cela il faut ajouter à l'effet d'une faille isolée celui d'une répartition de densités superficielles et légères dans la vallée, lourdes et profondes sur le plateau du nord ;

— le magnétisme précise que ce deuxième effet s'accompagne d'un contraste d'aimantation qui ne peut s'expliquer que par la *présence de roches très basiques orientées parallèlement au fossé* ».

L'orientation dont il est question ne coïncide pas avec celle de l'alignement des sources magnésiennes mais le point important est l'existence à peu près certaine de roches très basiques dans le sous-sol ; leur extension est peut-être plus importante que ne l'indique l'étude géophysique qui ne concerne qu'une région limitée.

Cette conclusion peut s'étendre aux autres sources magnésiennes : Fossette (109) et Kuchuantium (113) à l'ouest de Fouban et Nyos (126) près de la Ring Road. Pour cette dernière source le rôle des roches ultrabasiques est confirmé par la présence de nombreuses enclaves de dunite, composée seulement de forstérite, dans les basaltes émis par quelques petits volcans quaternaires situés à proximité immédiate de la source.

3 CONCLUSIONS A L'ÉTUDE DES CATIONS

Finalement l'étude des cations a mis en évidence plusieurs associations *types de roches traversées* – *types d'eaux thermominérales*, à savoir :

$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} + \text{Mg}$ eaux sodiques calco-magnésiennes –
socle granito-gneissique

$\text{Ca} + \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$ eaux calcomagnésiennes sodiques –
roches volcaniques basiques

forte teneur en K ($\text{K} > 2 \text{ mé/l}$) – rhyolites

forte teneur en Mg ($\text{Mg} > \text{Ca}$) – roches ultrabasiques

Ces associations sont tout à fait logiques et analogues à celles qui ont déjà été mises en évidence pour les eaux de terrains sédimentaires dans d'autres régions du globe. Ce sont des indications qualitatives intéressantes à connaître pour des études géologiques régionales.

Il ne faut cependant pas oublier que la composition d'une eau minérale résulte la plupart du temps du lessivage de plusieurs types de roches et que c'est celui qui est le mieux représenté qui donnera à l'eau un caractère géochimique particulier.

Par ailleurs si l'acquisition des cations se fait aux dépens des roches traversées il en résulte pour celles-ci des modifications importantes qui seront envisagées plus loin après l'étude de la silice et celle du fer.

4 LA SILICE

L'altération des roches à laquelle est attribuée la mise en solution des cations Na, K, Ca et Mg provoque de ce fait la destruction de minéraux silicatés et la libération de silice. C'est pourquoi toutes les eaux thermominérales contiennent de la silice en quantités variables.

Cette silice est bien due à la destruction des silicates et non à celle du quartz (très peu soluble) comme le montre le graphique des teneurs en silice en fonction de la température à l'émergence (fig. 24). La position des points représentatifs indique que les eaux sont sursaturées vis-à-vis du quartz mais aussi largement sous-saturées vis-à-vis de la silice amorphe.

Les courbes de solubilité sont valables pour de l'eau pure et la sous-saturation théorique doit être revue en fonction de la présence d'autres substances qui peuvent intervenir pour former des silicates. Ainsi H. Schoeller (1968) et Ghafouri (1968) remarquent que les teneurs en silice des sources thermominérales des Pyrénées sont limitées à environ 100 mg/l quelle que soit la température et attribuent

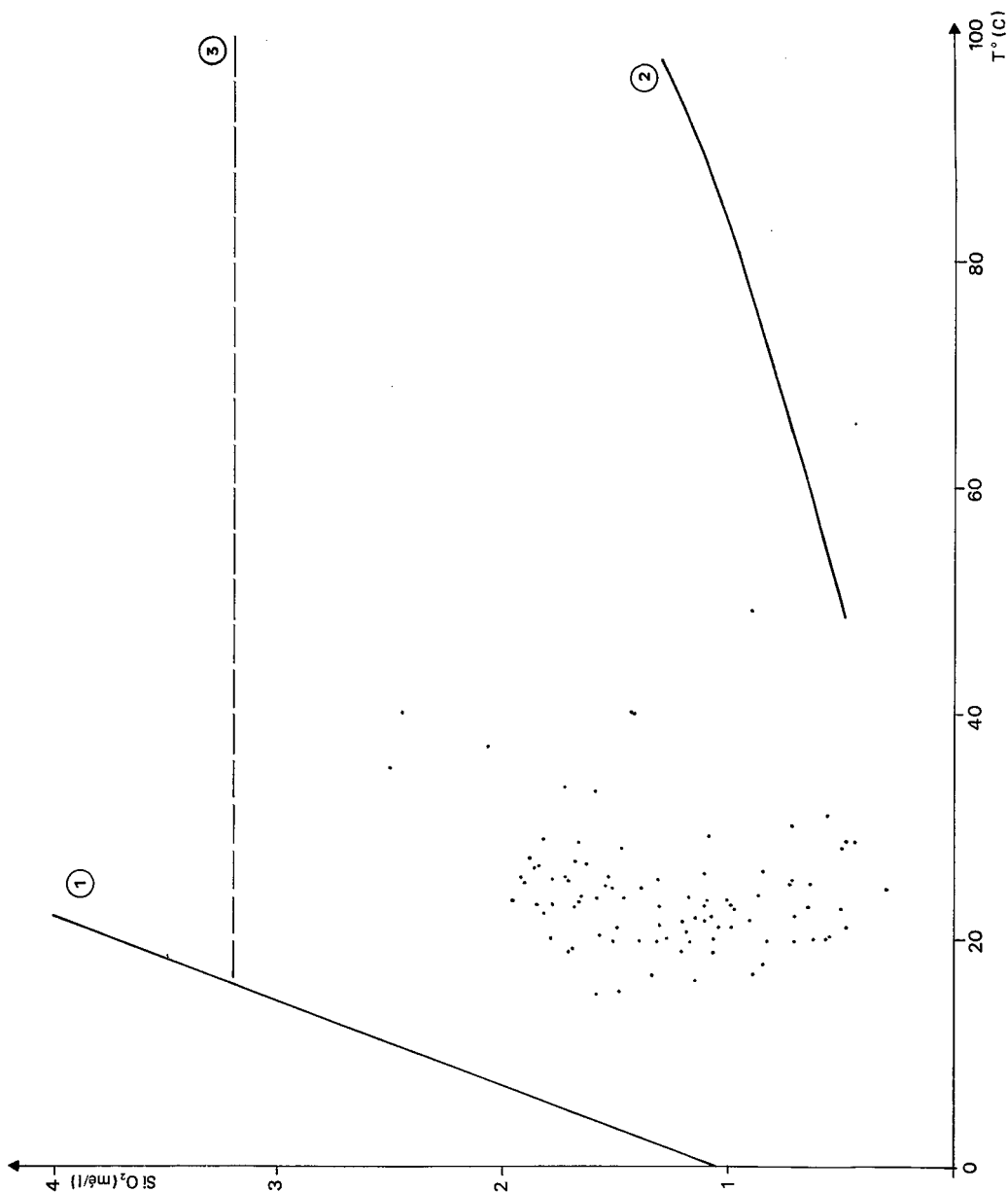


Fig. 24 Teneurs en silice des eaux thermominérales du Cameroun en fonction de la température.

1. Courbe de solubilité de la silice amorphe ($\text{pH} < 9$) (Alexander *et al.*, 1954, *in* White, Brannock, Murata, 1956).
2. Courbe de solubilité du quartz (*in* Mahon, 1966).
3. Limite supérieure des teneurs en silice des eaux thermominérales des Pyrénées (H. Schoeller, 1968).

cette limitation à l'équilibre silice amorphe-silicates. Ceci sera confirmé plus loin par l'application des diagrammes établis par Helgeson *et al.* (1969) pour représenter les équilibres de différents minéraux en présence de solutions aqueuses contenant les principaux cations.

Il apparaît donc qu'il n'y a pas de relation nette entre la teneur en silice et la température des eaux de sources à leur émergence mais que l'équilibre silice-silicates de néoformation est un facteur limitant dans le domaine des faibles températures.

En revanche le rôle de ce facteur paraît moins important dans les systèmes à très haute température associés aux régions de volcanisme actif où les teneurs en silice atteignent plusieurs centaines de mg/l. Mais de toutes façons, comparées aux cations, les proportions de silice effectivement évacuées sont assez faibles et la plus grande partie reste liée à l'alumine.

5 LE FER

Beaucoup d'eaux thermominérales contiennent du fer à l'état dissous en quantités variables. Comme il est sous forme réduite, il s'oxyde rapidement à l'émergence en provoquant le phénomène de floculation (voir plus haut à propos des dépôts ferrugineux). A partir d'une teneur en fer de 5 mg/l, soit 7.1 mg/l de Fe_2O_3 , on pourra dire qu'une eau est ferrugineuse.

Bien que beaucoup de sources du Cameroun montrent cette floculation, les dosages du fer n'indiquent que peu de teneurs élevées sans doute à cause des conditions d'émergence en particulier de la traversée de la zone d'altération suffisamment aérée pour provoquer la précipitation des hydroxydes de fer avant l'arrivée à la surface et les résultats ne traduisent probablement pas la réalité. D'ailleurs les eaux de l'Ouest-Cameroun montrent des teneurs en fer généralement supérieures à celles des eaux de l'Adamaoua sans doute à cause de cette différence dans les conditions d'émergence.

Dans les eaux thermominérales la présence du fer est déterminée en premier lieu par la présence d'anhydride carbonique et d'ion bicarbonate. D'ailleurs malgré la mauvaise qualité des résultats obtenus ici, il s'est dégagé une corrélation faiblement positive entre les teneurs en CO_2 dissous et les teneurs en fer (coefficient de 0.23 pour 74 échantillons, à la limite du seuil de signification).

D'autre part la solubilité du fer dans les eaux minérales est conditionnée non seulement par la solubilité du carbonate ferreux, mais aussi, semble-t-il, par la formation de complexes ferrochlorés lorsque c'est possible (Dauphin *et al.*, 1965) ceci afin d'expliquer les teneurs en fer anormalement élevées de certaines eaux bicarbonatées chlorurées. Toutefois les teneurs les plus élevées observées au Cameroun ne sont pas associées à des eaux bicarbonatées chlorurées sauf pour la source de Fossette (n° 109) mais avec l'incertitude qui a été dite sur sa teneur en chlore.

En fin de compte le comportement du fer est bien particulier et dans cette étude, il apparaît impossible d'établir une corrélation entre les concentrations de cet élément et le sous-sol.

5 – ALTÉRATIONS HYDROTHERMALES

Les eaux thermominérales entraînent avec elles des quantités importantes de Na, K, Ca, Mg, Fe, SiO₂ aux dépens des roches qu'elles traversent. C'est l'altération hydrothermale dont résultent des modifications minéralogiques et pétrographiques importantes envisagées ici.

En fait cette étude sera limitée car il n'a pas été possible d'observer les roches altérées au cours de l'étude des sources du Cameroun à cause de l'altération superficielle météorique trop intense. Toutefois la littérature géologique fournit quelques indications qu'il est intéressant de mentionner. En outre la question de l'altération des roches est inséparable de celle de la minéralisation des eaux et on verra de quelle manière on peut se faire une idée des résultats de l'altération.

Enfin on tentera de faire une estimation de l'importance de l'altération.

5.1 Observation de quelques altérations dues à des circulations hydrothermales

Ellis and Mahon (1964, p. 1352) donnent la composition minéralogique du produit de l'altération de rhyolites dans les provinces géothermiques de Nouvelle-Zélande obtenu dans des forages : il s'agit d'un assemblage de zéolites calciques, de feldspaths secondaires riches en potassium et d'hydromica.

Daubrée (1887, t. 3, p. 51 et suivantes) signale la formation de zéolites et de diverses formes de silice (opale, calcédoine, jaspé) à Plombières, Luxeuil, Bourbonne-les-Bains et en Algérie. Il mentionne également (p. 178) la possibilité de formation de kaolin sous l'influence d'émanations originaires de la profondeur et pas seulement celle des agents superficiels.

Les sources de Karlovy Vary (anciennement Karlsbad) en Tchécoslovaquie ont provoqué l'altération d'un granite avec formation de kaolinite (cité par Nicolas, 1956, p.52) jusqu'à une distance d'environ 50 mètres de la fissure hydrominérale.

Enfin de nombreux gisements de kaolin sont dus à des altérations par des eaux thermominérales chargées d'anhydride carbonique (Nicolas, *op. cit.*). Il semble donc que la kaolinisation et la zéolitisation soient les manifestations essentielles de l'altération par la circulation des eaux thermominérales bicarbonatées, même à faible température.

En dehors des altérations se produisent de simples dépôts mentionnés ici pour mémoire. Il a été question précédemment de ceux que l'on rencontre à l'émergence mais il en existe aussi tout au long des circuits. Ils sont dus aux changements des conditions d'équilibre thermodynamique entre la profondeur et la surface qui entraînent des précipitations successives selon des processus comparables à ceux qui ont donné naissance à beaucoup de filons métallifères.

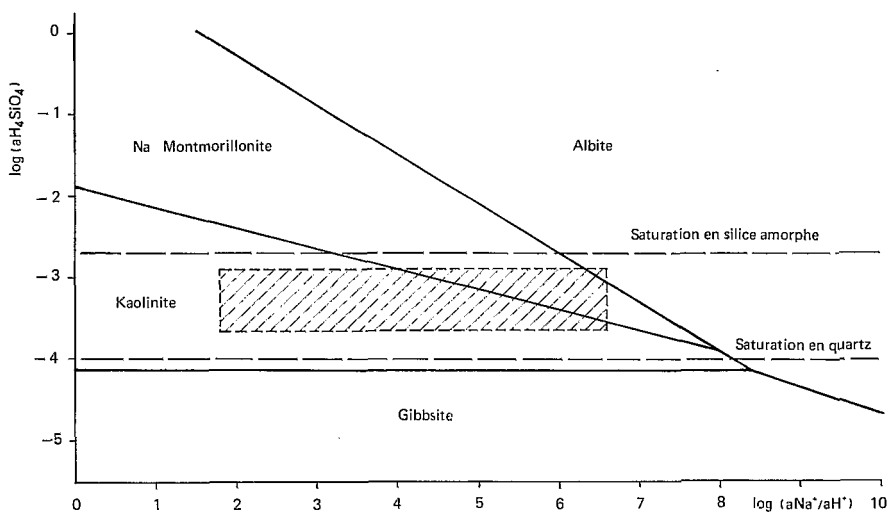


Fig. 25 Le système $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ à 25°C sous 1 Atm.
(d'après Helgeson, Brown, Leeper, 1969, p. 20).
En hachuré, domaine des eaux thermominérales du Cameroun.

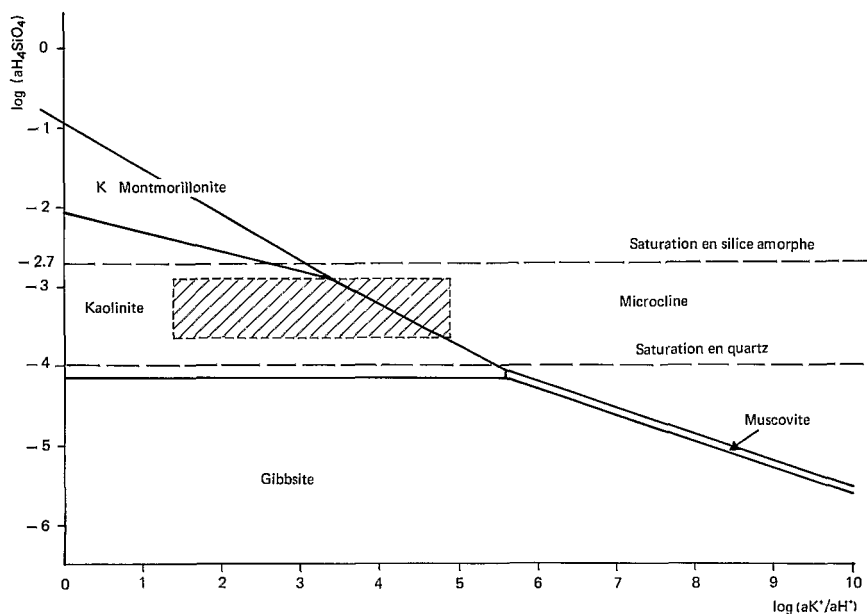
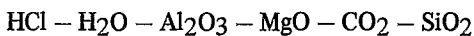
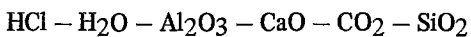
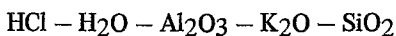
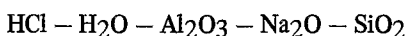


Fig. 26 Le système $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ à 25°C sous 1 Atm.
(d'après Helgeson, Brown, Leeper, 1969, p. 17).
En hachuré, domaine des eaux thermominérales du Cameroun.

5.2 Équilibre des eaux thermominérales vis-à-vis des minéraux d'altération et des roches encaissantes

Les eaux thermominérales sont considérées ici comme des solutions aqueuses renfermant diverses espèces chimiques en contact avec des roches. Il est donc intéressant de voir si les solutions et les minéraux sont en équilibre.

Le problème théorique n'a pas été étudié dans son ensemble mais en considérant séparément chacun des cations principaux. Ainsi Helgeson, Brown and Leeper (1969) ont étudié successivement les systèmes qui sont chacun une représentation partielle du système eau minérale-roche en contact :



Ils ont déterminé sous 1 atmosphère de pression totale et à différentes températures les domaines d'équilibre des espèces minérales intervenant dans chaque système, à savoir :

- Gibbsite-Kaolinite-Montmorillonite sodique-Albite,
- Gibbsite-Kaolinite-Montmorillonite potassique-Microcline-Muscovite,
- Gibbsite-Kaolinite-Montmorillonite calcique-Zéolite calcique,
- Gibbsite-Kaolinite-Montmorillonite magnésienne-Chlorite magnésienne

en fonction des activités des divers ions présents : H_4SiO_4 , H et selon le cas Na, K, Ca ou Mg.

Comme la plupart des sources ne sont pas thermales, la température de 25°C a été choisie comme référence et de toutes façons il n'y a pas de modification très importante des diagrammes entre 25 et 100°C.

Les points représentatifs des eaux thermominérales du Cameroun définies par leur activité en silice $a(\text{H}_4\text{SiO}_4)$ et les rapports $a \text{ Na}/a \text{ H}$, $a \text{ K}/a \text{ H}$, $a \text{ Ca}/(a \text{ H})^2$ ou $a \text{ Mg}/(a \text{ H})^2$ ont été ensuite reportés sur chacun des diagrammes (fig. 25 à 28).

On constate que les eaux sont en équilibre avec la kaolinite ou la montmorillonite sodique sur la figure 25, avec la kaolinite ou le microcline sur la figure 26, avec la kaolinite ou la zéolite calcique sur la figure 27 et avec la kaolinite ou la montmorillonite magnésienne sur la figure 28.

Ces résultats vont dans le même sens que les observations rapportées précédemment et montrent que les altérations hydrothermales provoquées par les eaux thermominérales du Cameroun consistent très probablement en une kaolinisation associée à une zéolitisation et parfois la formation de montmorillonite sodique et magnésienne, que J. Nicolas a d'ailleurs trouvée dans les fractions fines des kaolins de Bretagne.

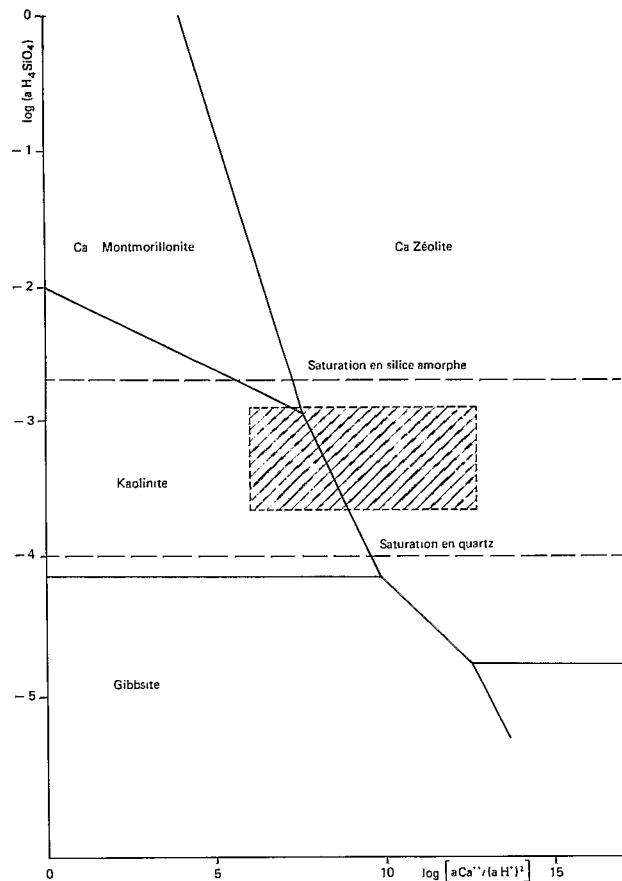


Fig. 27 Le système $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CO}_2 - \text{SiO}_2$ à 25°C sous 1 Atm.

(d'après Helgeson, Brown, Leeper, 1969, p. 23 et p. 26). En hachuré, domaine des eaux thermominérales du Cameroun.

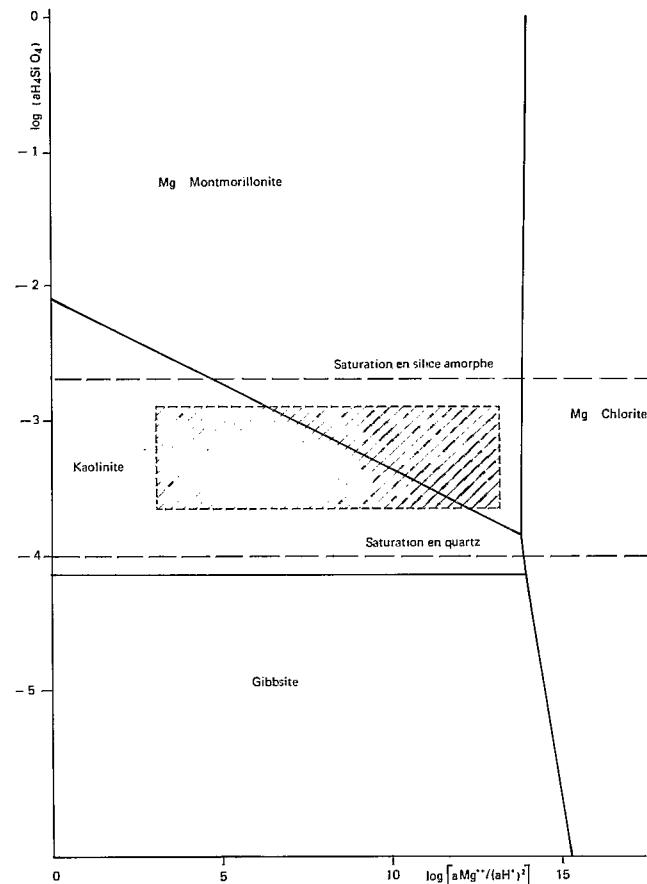


Fig. 28 Le système $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{CO}_2 - \text{SiO}_2$ à 25°C sous 1 Atm.

Il ne faut cependant pas oublier que les raisonnements précédents ont été faits dans des conditions de surface ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $P = 1 \text{ atm}$) et il est probable qu'en profondeur les associations minérales résultant de l'altération soient un peu différentes. Les diagrammes d'Helgeson *et al.* indiquent que les domaines d'équilibre varient assez peu avec la température mais on ne connaît pas l'influence de la pression. Les observations de Ellis et Mahon (*op. cit.*) dans un forage de Nouvelle-Zélande sont peut-être un reflet de ce qu'on rencontre vers la profondeur (association zéolite calcique, feldspath potassique et hydromica).

Un fait demeure de toutes façons important : c'est l'association fréquente de gisements de kaolin à des circulations d'eaux thermominérales chargées de CO_2 , anciennes ou contemporaines.

5.3 Importance de l'altération

Puisque certaines sources thermominérales sont en relation avec des manifestations volcaniques datant de la fin du Tertiaire et du début du Quaternaire, leur existence date probablement des mêmes époques et les circuits hydrothermaux pourraient donc fonctionner depuis plusieurs centaines de milliers d'années. Si, comme il a été dit, une partie des substances dissoutes vient des roches traversées ces dernières ont perdu d'énormes quantités de matières.

Prenons l'exemple de la source de Karlovy Vary avec un débit de 32,8 l/s et une teneur en sodium de 1566 mg/l (Kacura *et al.*, 1969), elle évacue plus de 1600 T de sodium par an. Si la source existe depuis 500.000 ans cela représente 8.10^8 T de sodium. Supposons que tout ce sodium provienne du granite de Karlsbad. Des analyses de ce granite sain et altéré mentionnées par J. Nicolas (*op. cit.* p. 52) indiquent qu'environ 3.07% de Na_2O ont été libérés soit 2.3% de Na c'est-à-dire 23 kg de Na par tonne de roche. Donc la quantité de roche altérée serait de $3.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$.

En considérant que la minéralisation est acquise surtout le long du trajet ascendant, la température de 78°C indiquant une profondeur d'environ 2000 m, la section altérée serait de $6.5 \times 10^6 \text{ m}^2$ soit 6.5 km^2 c'est-à-dire un carré d'environ 2.5 km de côté. Ces chiffres paraissent extrêmes d'autant que l'altération du granite de Karlsbad ne dépasse pas 50 m autour du griffon et que les dimensions des masses kaolinisées ayant une telle origine sont généralement plus restreintes. Plusieurs possibilités se présentent pour expliquer cette apparente incompatibilité :

- modification des caractéristiques physicochimiques des eaux avec le temps,
- altération plus importante vers la profondeur,
- déplacement du filon hydrominéral et du griffon,
- enfin la source pourrait exister depuis moins longtemps.

Au Cameroun toutefois les sources ont des minéralisations généralement plus faibles, les débits paraissent bien moindres et par conséquent les volumes altérés seraient également diminués. Quoi qu'il en soit il est très difficile de faire un bilan de l'altération faute de données qu'il est pratiquement impossible d'obtenir sur l'évolution dans le temps des sources thermominérales.

QUATRIEME PARTIE

GÉOCHIMIE DES ÉLÉMENTS EN TRACES

1 – GÉNÉRALITÉS

— La présence d'éléments à très faibles teneurs dans les eaux thermominérales a été reconnue depuis longtemps et il est fréquent de leur attribuer un rôle thérapeutique primordial.

Les éléments les plus souvent cités sont le nickel, le cobalt, le cuivre, le plomb, le manganèse, mais aussi le chrome, le vanadium, le zinc, le molybdène, le baryum, le strontium, le lithium, etc... Mais si l'on mentionne dans la littérature l'un ou l'autre de ces éléments à propos de telle ou telle source, il n'existe aucune étude générale les concernant aussi avons-nous analysé systématiquement un certain nombre d'entre eux dans les eaux thermominérales du Cameroun en vue d'étudier leur comportement.

— Les éléments envisagés ici sont : le manganèse, le plomb, le molybdène, l'étain, le vanadium, le cuivre, le nickel, le cobalt, le titane, le chrome, le strontium, le baryum et le lithium (voir tableaux 3a et 3b, h. t.). Le zinc, le gallium et l'argent ont parfois été décelés mais en quantités trop faibles pour être mesurables.

— La méthode d'analyse utilisée (spectrographie d'émission dans l'arc) fournit des résultats seulement semi quantitatifs donc peu précis. Par ailleurs les teneurs présentes se sont parfois trouvées en dehors du domaine d'application de la méthode, soit trop faibles, soit trop fortes. Dans le cas de concentrations trop faibles on a choisi conventionnellement comme valeur le tiers du seuil de détection. Mais lorsque les concentrations étaient trop fortes, les résultats n'ont pas pu être utilisés. C'est le cas du strontium pour lequel la méthode d'analyse est inadaptée. Il fait partie de la minéralisation secondaire des eaux qui comprend les éléments ayant des concentrations intermédiaires entre celles des éléments majeurs (minéralisation principale) et celles des traces (minéralisation accessoire). Dans cette catégorie se placent également le fluor, le brome, l'iode, l'arsenic, l'aluminium, le fer parfois, etc ...

— Une seule analyse a été faite pour chaque source et une trentaine d'échantillons n'ont pas été analysés. Tout ceci limite donc la valeur des résultats obtenus et les conclusions qu'on peut en tirer, en particulier pour le cobalt, le nickel, le plomb, le molybdène et le chrome dont la moitié au moins des concentrations sont inférieures au seuil de détection.

— Les résultats ont été exploités d'abord d'une manière globale à l'aide de méthodes statistiques puis d'une manière détaillée en examinant la répartition des teneurs de chaque élément en fonction des caractéristiques des différentes sources.

— Enfin l'analyse spectrographique des éléments en traces des eaux minérales a fait l'objet d'une étude méthodologique particulière à Clermont-Ferrand (Pépin *et al.*, 1973).

Les auteurs définissent pour les éléments en traces des eaux minérales un domaine de concentrations de 1 à 100 microgrammes par litre ce qui exclut de leurs déterminations le strontium, le lithium et le baryum. Seul le manganèse peut être mesuré sur le résidu sec total, les autres éléments Ag, Cu, Mo, Ni, Pb, Sn, V doivent être pré-concentrés par extraction. Les résultats obtenus au Cameroun montrent également que la détermination de Sr, Li et Ba relève de méthodes moins sensibles et que c'est aussi parfois le cas de Mn et Ti.

Enfin il est intéressant de constater que les résultats fournis pour des sources bicarbonatées du Massif Central sont du même ordre de grandeur que ceux que l'on a pour les eaux du Cameroun, ces derniers ayant tous été obtenus à partir des résidus secs totaux.

2 – TENEURS DES ÉLÉMENTS EN TRACES ET RÉSIDU SEC

Le premier problème examiné est celui de la variation de la concentration globale des éléments en traces en fonction du résidu sec. Le diagramme de la figure 29 montre que les deux valeurs sont à peu près directement proportionnelles compte tenu des imprécisions dans la détermination des traces.

Ceci vérifie que les éléments en traces ont la même origine que le reste de la minéralisation et qu'ils sont extraits des roches encaissantes comme les cations. Sa-

chant d'autre part que certains types de roches sont caractérisés par des enrichissements en certains éléments en traces, on devrait pouvoir différencier les eaux thermominérales par leurs éléments en traces comme on a pu le faire avec les cations majeurs, suivant les types de roches traversées. Ceci sera étudié plus loin.

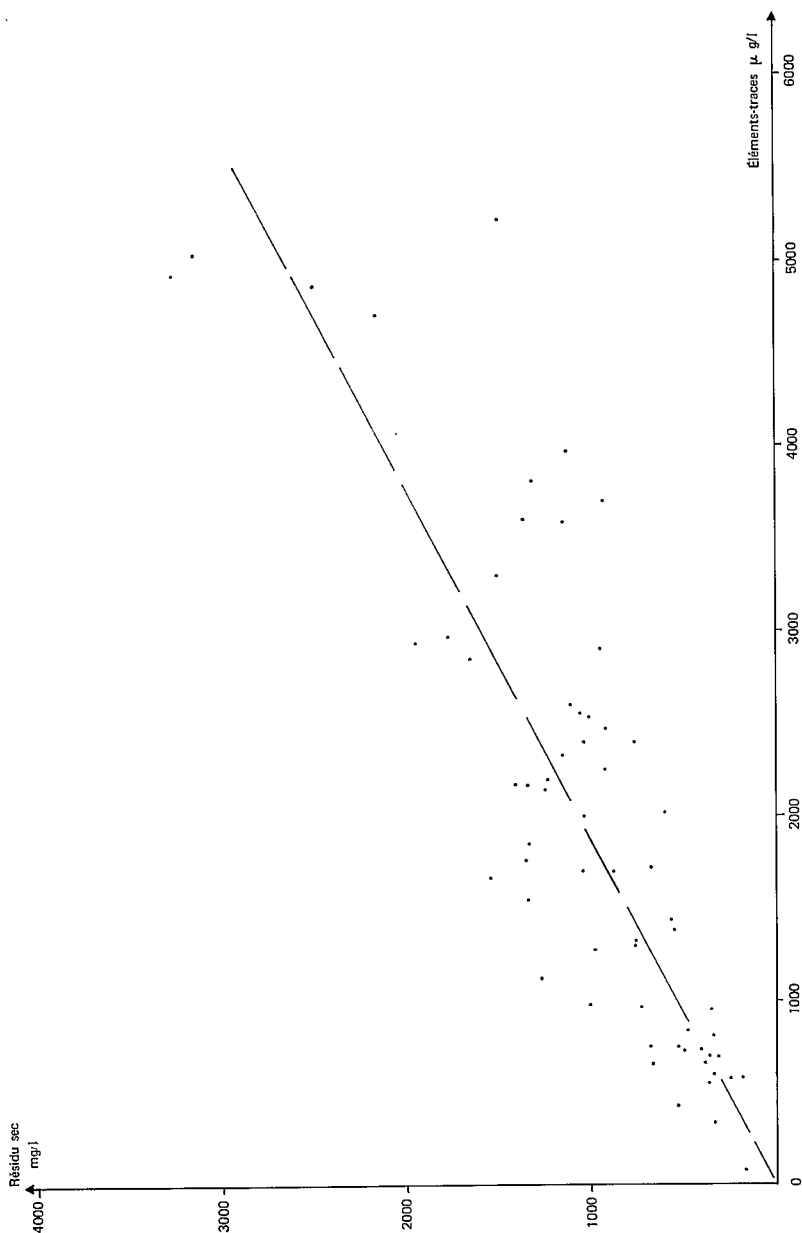


Fig. 29 Résidu sec et éléments en traces dans les eaux thermominérales du Cameroun.

3 – ABONDANCE RELATIVE DES ÉLÉMENTS. COMPARAISON AVEC LES ROCHES IGNÉES ET LES EAUX DE RIVIERES.

L'abondance relative des éléments en traces dans les eaux, établie à partir des moyennes arithmétiques de leurs teneurs est comparée à leur abondance dans la lithosphère telle qu'elle ressort des données de Goldschmidt (1962).

	Eaux minérales (mg/l)	Lithosphère (ppm)	Rapport roche/eau
Sr	+ 1 000	150	0.15
Li	350	65	0.19
Ba	320	430	1.34
Mn	210	1 000	4.75
Ti	175	4 400	25
V	35	150	4.3
Sn	16	40	2.5
Cu	15	70	4.7
Pb	9	16	1.78
Cr	8	200	25
Mo	7	2.3	0.33
Ni	6.5	100	15.4
Co	2.5	40	16

Si l'on classe les rapports des teneurs dans les roches et dans les eaux minérales par valeurs décroissantes, ce qui traduit l'enrichissement relatif des eaux par rapport aux roches, on obtient la succession suivante :

Ti, Cr, Co, Ni, Mn, Cu, V, Sn, Pb, Ba, Mo, Li, Sr.

Cette succession correspond sensiblement à l'ordre de mobilité croissante des éléments étudiés ce qui s'accorde avec l'acquisition de la minéralisation accessoire des eaux par altération des roches encaissantes, en expliquant les différences dans les abondances relatives des éléments par leurs différences de mobilité.

Ces résultats sont donc tout à fait conformes à ce que l'on pouvait prévoir.

Par ailleurs une vingtaine d'eaux de rivières de l'Adamaoua ont été analysées à fin de comparaison avec les eaux de sources thermominérales (tableaux 7 h. t.). Comme pour ces dernières, la minéralisation accessoire est directement proportionnelle au résidu sec (fig. 30). Les teneurs des éléments en traces ont été comparées à l'aide d'un diagramme semi-logarithmique (fig. 31). Les profils obtenus ont des allures assez voisines ce qui indique que les teneurs dans les eaux de sources et de rivières

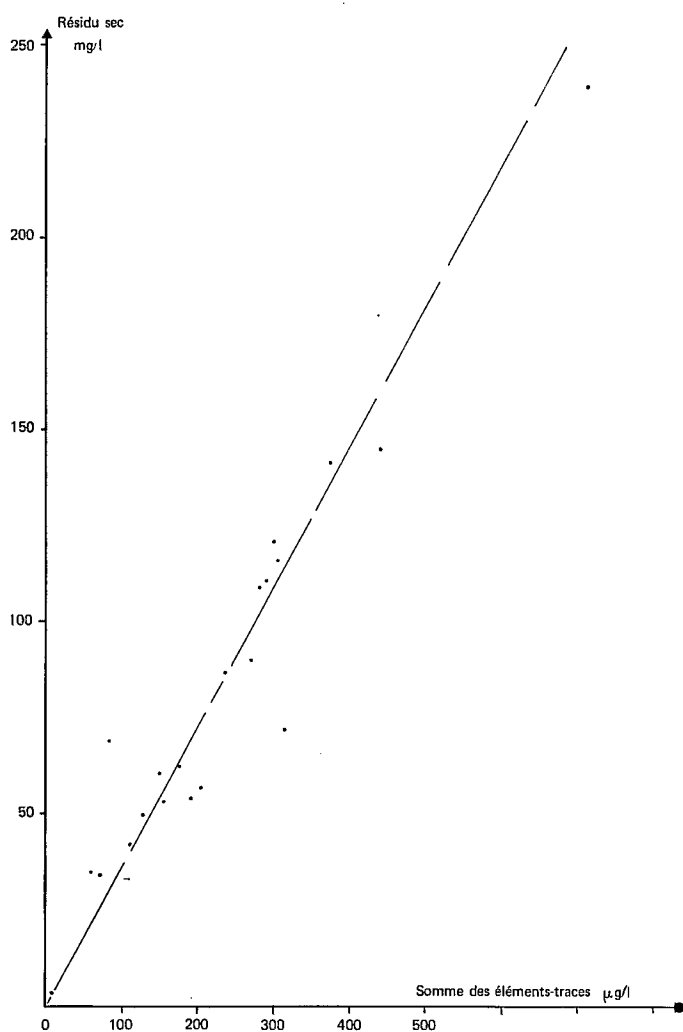


Fig. 30 Résidu sec et éléments en traces dans les eaux de rivières de l'Adamaoua.

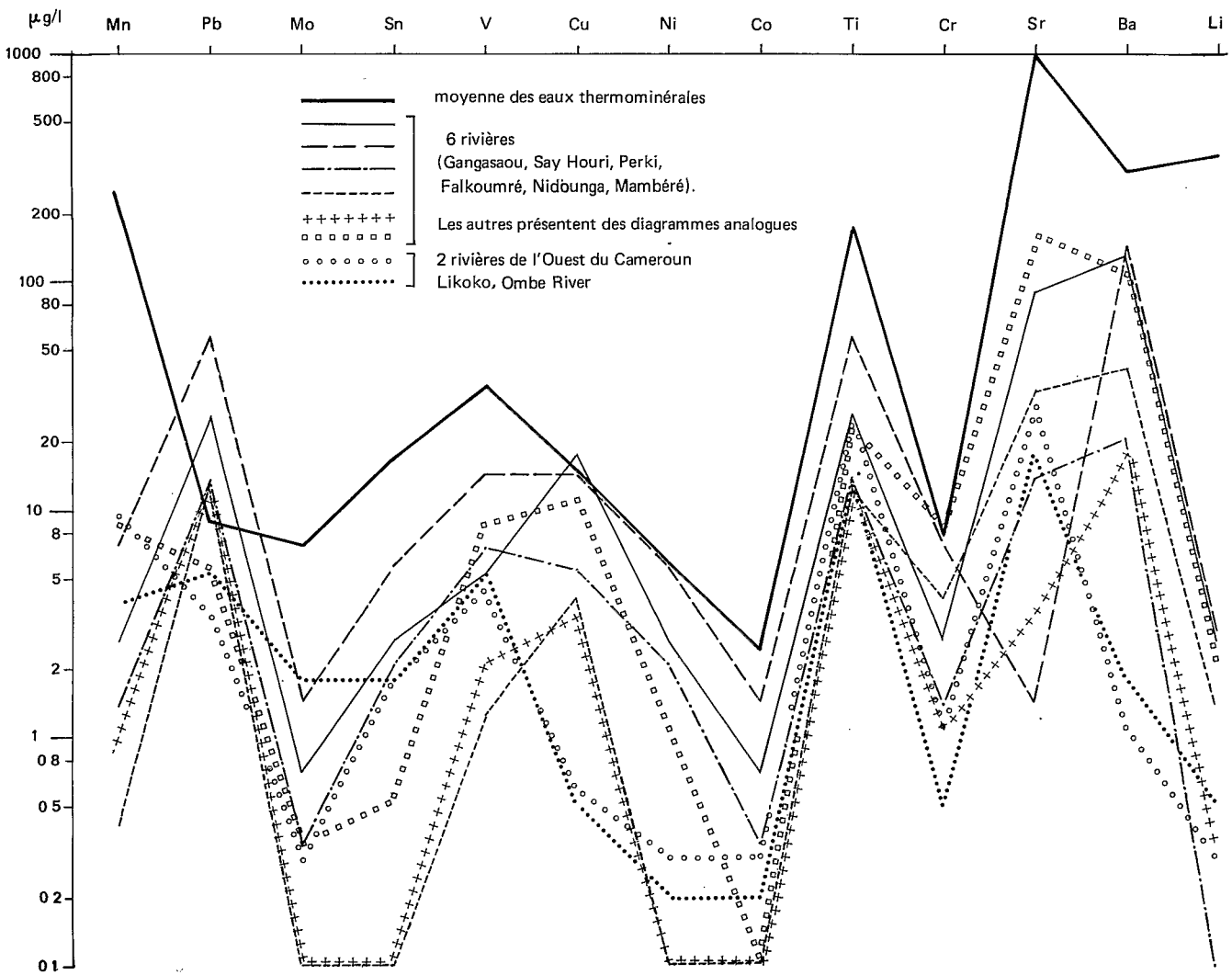


Fig. 31 Les éléments en traces dans les eaux de rivières et les eaux thermominérales du Cameroun. Diagramme semi-logarithmique.

sont en proportions analogues mais qu'elles sont plus faibles dans les rivières. Toutefois on note une plus grande richesse en lithium des eaux de sources qu'on peut expliquer par l'état d'altération des roches superficielles d'où les eaux de rivières tirent leur minéralisation, les minéraux lithinifères étant détruits très tôt au cours de l'altération et le lithium étant facilement évacué.

Blot, Pion et Wackermann (1973) ont obtenu un résultat comparable en étudiant les corrélations entre les concentrations de nombreux éléments dans les roches, les manteaux d'altération et les sols au Sénégal oriental et en Haute-Volta. Des corrélations positives existent à tous les niveaux des profils pour tous les éléments *sauf le lithium*, l'aluminium et dans une moindre mesure le chrome. En ce qui concerne le lithium, ceci est interprété par le lessivage de cet élément dès le début de l'altération.

On note également une plus grande richesse relative des rivières en plomb et, dans une moindre mesure, en cuivre ce qui est difficilement explicable. Il s'agit peut-être d'une contamination accidentelle des échantillons (emploi d'eau non distillée au cours du traitement) d'autant plus que les analyses faites ultérieurement sur des eaux de rivières de la région du mont Cameroun ne présentent pas ces anomalies.

Il apparaît donc que la minéralisation accessoire des eaux de sources et des eaux de rivières diffèrent seulement par leur valeur globale et par leur proportion de lithium.

4 – ÉTUDE STATISTIQUE DES ÉLÉMENTS EN TRACES

4.1 Distribution des teneurs des éléments en traces.

Les histogrammes des teneurs des différents éléments, construits en coordonnées semi-logarithmiques mettent en évidence leur mode de distribution (fig.32).

La forme des courbes a été considérée comme suffisamment voisine de celle d'une distribution log-normale idéale, afin de pouvoir calculer les corrélations entre les teneurs.

4.2 Corrélations entre les éléments en traces.

Les résultats ci-dessous sont ceux du calcul des coefficients de corrélation présentés dans une note en cours de publication (le Maréchal et Teil, 1973) et rappelés dans les tableaux 8 et 9. il est nécessaire également de se rappeler la signification de ces coefficients : ils expriment le degré de dépendance qui existe entre les teneurs de deux éléments dans des échantillons appartenant à un ensemble homogène. Une fois ces coefficients déterminés on s'applique généralement à les interpréter en termes géologiques. Matheron indique que la relation exprimée par le coefficient de corrélation est une expression de la loi d'action de masse si ce coefficient est voisin de 1, c'est-à-dire qu'il existe probablement un équilibre géochimique entre les deux éléments considérés (Matheron, 1962, *in* Lepeltier, 1969).

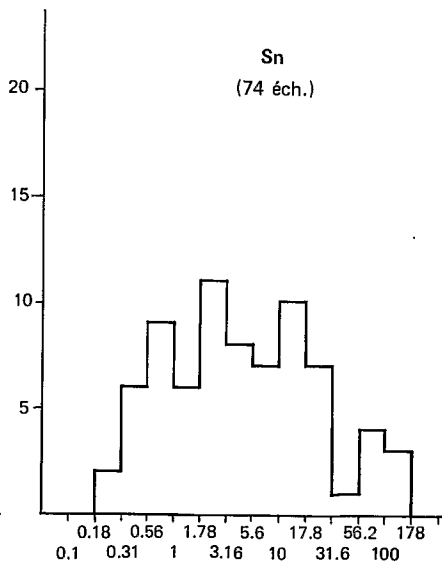
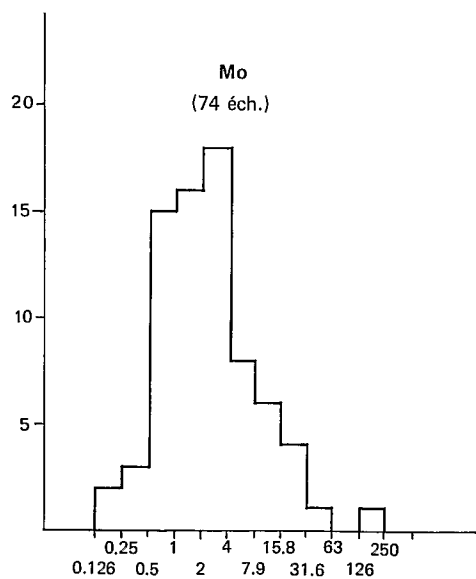
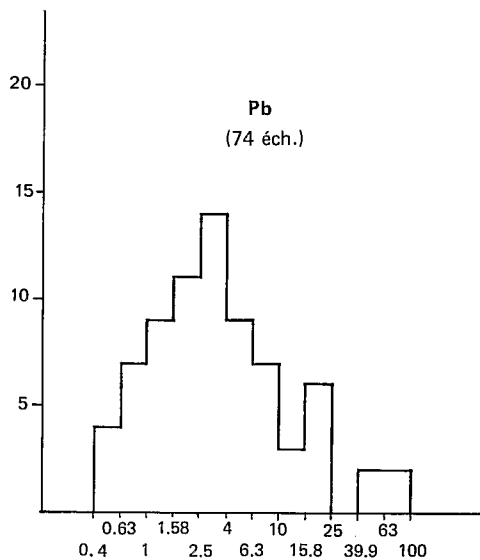
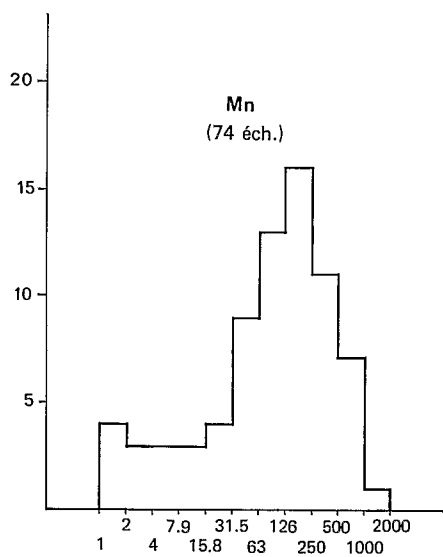


Fig. 32a Histogrammes des teneurs des éléments en traces.
Coordonnées semi - logarithmiques.

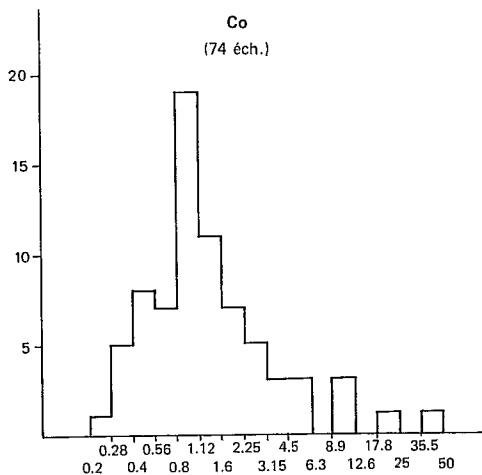
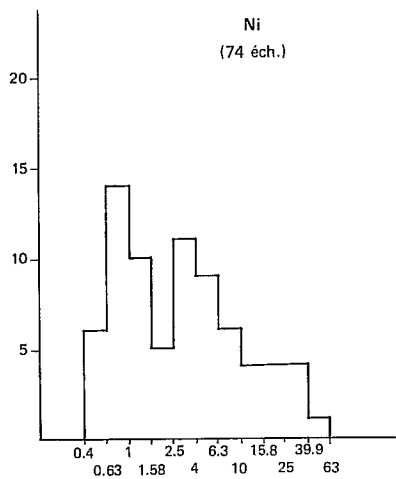
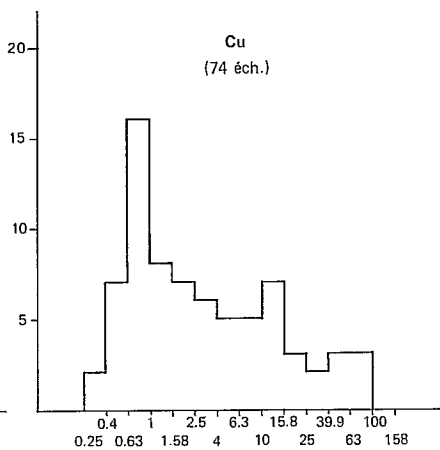
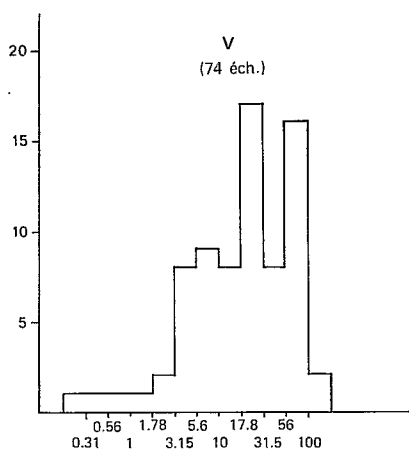


Fig. 32b Histogrammes des teneurs des éléments en traces.
Coordonnées semi-logarithmiques.

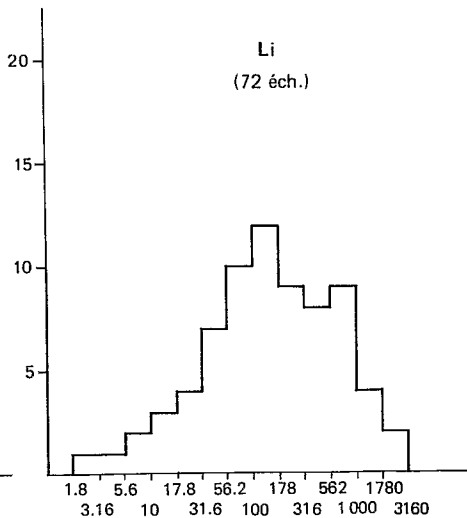
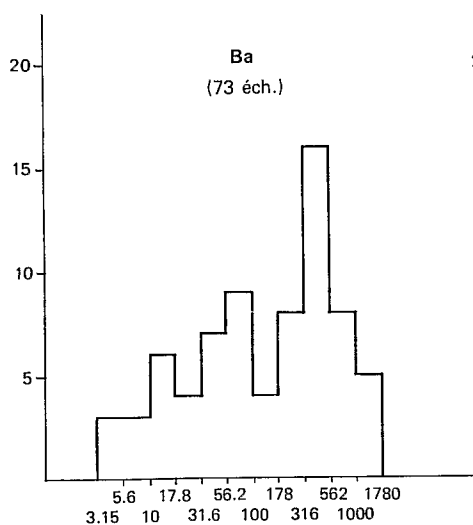
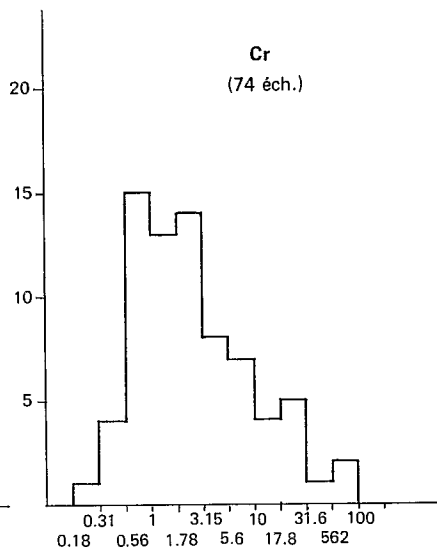
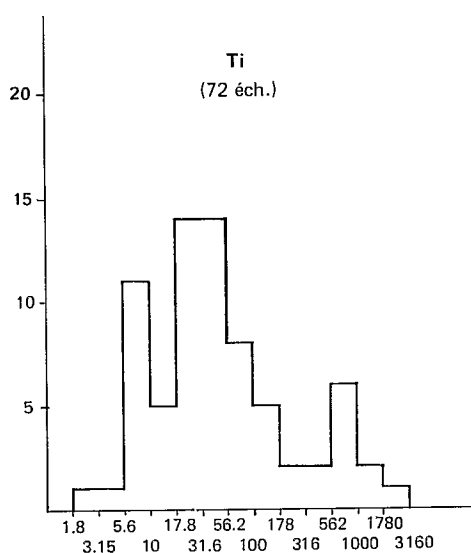


Fig. 32c Histogrammes des teneurs des éléments en traces.
Coordonnées semi - logarithmiques.

Tableau 8 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES LOGARITHMES
DES TENEURS DES ÉLÉMENTS EN TRACES

(72 échantillons, seuil de signification théorique : 0.23, réel : 0.43).

Les coefficients supérieurs au seuil de signification sont soulignés.

	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Ba	Li
Mn	1.00											
Pb	0.20	1.00										
Mo	<u>-0.41</u>	0.12	1.00									
Sn	<u>0.43</u>	0.08	-0.19	1.00								
V	0.24	<u>0.45</u>	0.13	<u>0.39</u>	1.00							
Cu	-0.04	0.10	0.11	<u>0.41</u>	<u>0.48</u>	1.00						
Ni	0.27	0.27	0.05	<u>0.61</u>	<u>0.46</u>	<u>0.42</u>	1.00					
Co	<u>0.43</u>	0.22	-0.14	<u>0.48</u>	<u>0.30</u>	0.20	<u>0.61</u>	1.00				
Ti	<u>0.33</u>	0.20	0.06	<u>0.61</u>	<u>0.43</u>	<u>0.53</u>	<u>0.70</u>	<u>0.46</u>	1.00			
Cr	0.02	0.20	0.07	<u>0.58</u>	<u>0.63</u>	<u>0.77</u>	<u>0.58</u>	<u>0.30</u>	<u>0.63</u>	1.00		
Ba	<u>0.36</u>	<u>0.44</u>	0.05	<u>0.35</u>	<u>0.51</u>	<u>0.39</u>	<u>0.46</u>	<u>0.37</u>	<u>0.51</u>	<u>0.42</u>	1.00	
Li	-0.16	0.19	0.27	0.01	0.29	0.15	0.10	0.13	-0.05	0.20	0.17	1.00

Les corrélations entre les éléments en traces des eaux thermominérales du Cameroun sont illustrées par le schéma de la fig. 33. Plusieurs éléments sont assez fortement corrélés entre eux : titane, chrome, étain, cuivre, nickel et cobalt. L'étain mis à part, ces éléments sont connus pour avoir des affinités prononcées pour les roches basiques et il paraît naturel que l'altération de roches basiques provoque des augmentations concomitantes des teneurs en ces éléments malgré leur faible mobilité.

Ces fortes corrélations traduisent donc à la fois l'enrichissement sélectif d'un certain type de roches en ces éléments et l'analogie de leur comportement vis-à-vis de l'altération (faible mobilité). Ces deux constatations trouvent une interprétation simple dans l'application à la géochimie de la théorie du champ cristallin ou théorie du champ des ligands. Cette théorie explique par des considérations de structure électronique et de champ électrostatique les différences de stabilité des ions des éléments de transition dans les édifices cristallins. Ainsi les ions Ni^{2+} , Cr^{3+} , Mn^{4+} , V^{2+} puis Co^{2+} , Ti^{2+} et Cu^{2+} subissent le plus l'effet de champ cristallin et sont les plus stables dans des sites cristallins octaédriques. On en déduit leur fixation précoce au cours de la cristallisation magmatique (Allègre, Javoy et Michard, 1968) et leur commune difficulté à être mis en mouvement dans les phénomènes d'altération (Treuil et Faucherre, 1970).

La présence de l'étain dans ce groupe s'explique mal.

Le vanadium est corrélé moins fortement avec les éléments précédents ce qui peut refléter son affinité moins marquée pour les roches basiques. En outre il est lié au plomb comme le baryum qui présente par ailleurs de nombreuses corrélations mais assez faibles. De même pour le manganèse.

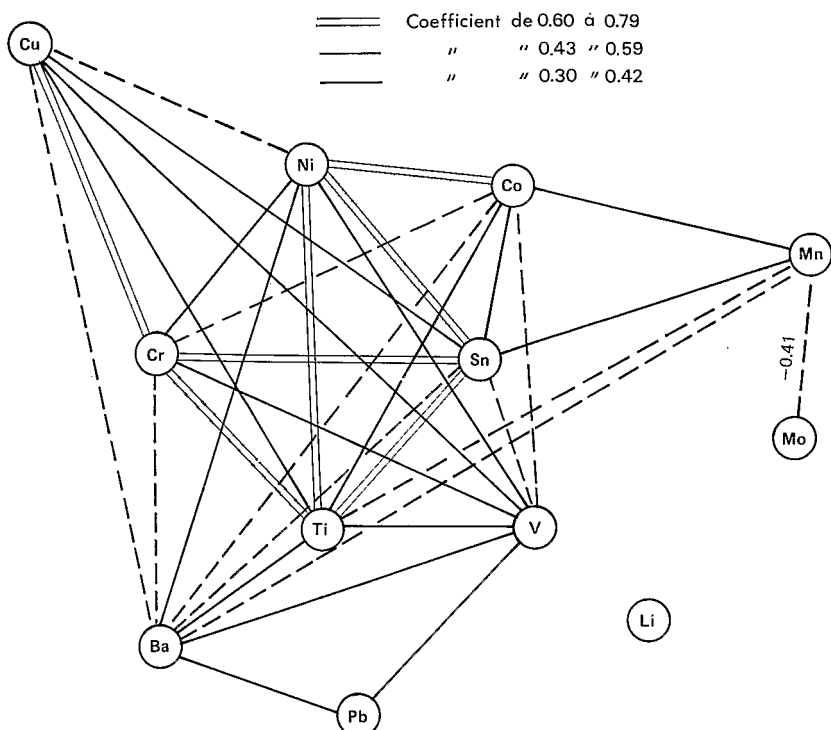


Fig. 33 Schéma illustrant les corrélations entre les éléments en traces.

Enfin on note l'absence de corrélation du lithium et celle, négative, du molybdène avec le manganèse.

Ces dernières corrélations n'ont pas reçu d'interprétation simple peut-être du fait de la plus grande complexité des affinités géochimiques des éléments concernés.

4.3 Corrélations entre les éléments en traces et le reste de la minéralisation.

On relève des corrélations significatives dans le tableau 9.

L'anhydride carbonique dissous est en relation directe avec Ca, Mg, K, HCO_3 ce qui confirme son rôle prépondérant dans la mise en solution des cations et la formation de l'anion bicarbonate. De même sa corrélation négative avec SO_4 vient à l'appui de l'hypothèse faite sur la formation de cet anion à partir d'hydrogène sulfuré aux dépens de CO_2 dissous.

La silice n'est corrélée avec aucun élément et montre ainsi un comportement tout à fait indépendant.

Le plomb est faiblement lié positivement au calcium ; c'est un élément que

Tableau 9 : COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE L'ENSEMBLE DES ÉLÉMENTS DE LA MINÉRALISATION

calculés à partir des teneurs en mg/l et $\mu\text{g/l}$

(74 échantillons, 22 variables, seuil de signification théorique 0.23, réel 0.43).

Les coefficients significatifs sont soulignés.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	H CO ₃	CO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Ba	Li	
Ca	1.00																						
Mg	<u>0.73</u>	1.00																					
Na	0.18	0.00	1.00																				
K	0.19	0.09	0.20	1.00																			
Cl	0.27	0.06	<u>0.86</u>	0.12	1.00																		
SO ₄	-0.07	-0.20	0.09	-0.11	-0.06	1.00																	
H CO ₃	<u>0.76</u>	<u>0.74</u>	<u>0.37</u>	<u>0.34</u>	<u>0.30</u>	<u>0.31</u>	1.00																
CO ₂	<u>0.50</u>	<u>0.43</u>	-0.00	<u>0.40</u>	<u>0.03</u>	<u>0.39</u>	<u>0.62</u>	1.00															
Fe ₂ O ₃	0.04	0.12	-0.06	-0.00	-0.11	0.04	0.09	0.23	1.00														
SiO ₂	0.03	-0.07	-0.03	0.15	-0.10	0.16	-0.07	0.08	0.11	1.00													
Mn	0.03	0.11	-0.04	0.07	-0.09	-0.07	0.11	0.30	0.12	-0.04	1.00												
Pb	<u>0.35</u>	0.14	0.09	0.11	0.23	0.04	0.19	0.09	0.05	0.10	0.03	1.00											
Mo	-0.12	-0.09	0.07	-0.10	0.06	0.03	-0.13	-0.19	-0.11	-0.12	-0.16	-0.07	1.00										
Sn	0.05	0.14	-0.13	-0.06	-0.10	-0.14	0.02	0.07	<u>0.56</u>	0.07	0.18	-0.03	-0.10	1.00									
V	0.21	<u>0.35</u>	-0.00	0.05	0.02	-0.17	0.20	-0.01	0.01	-0.04	0.23	0.16	-0.10	<u>0.42</u>	1.00								
Cu	0.00	0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.14	-0.06	-0.16	0.03	0.06	0.10	-0.06	-0.04	<u>0.63</u>	<u>0.65</u>	1.00							
Ni	0.04	0.11	-0.04	0.05	-0.03	0.04	-0.01	-0.03	<u>0.37</u>	0.15	0.25	0.08	-0.08	<u>0.73</u>	<u>0.46</u>	<u>0.57</u>	1.00						
Co	-0.01	0.10	0.13	0.17	0.03	0.07	0.10	0.00	0.15	-0.17	<u>0.57</u>	-0.00	-0.04	<u>0.23</u>	<u>0.38</u>	0.17	<u>0.47</u>	1.00					
Ti	-0.15	-0.10	0.00	-0.01	-0.06	0.15	-0.13	-0.17	<u>0.48</u>	0.25	0.04	-0.07	-0.06	<u>0.46</u>	0.14	<u>0.33</u>	<u>0.66</u>	0.29	1.00				
Cr	0.01	0.06	-0.13	-0.05	-0.06	-0.12	0.07	-0.01	0.20	0.11	0.04	-0.06	-0.04	<u>0.70</u>	<u>0.47</u>	<u>0.64</u>	<u>0.73</u>	0.11	<u>0.44</u>	1.00			
Ba	<u>0.43</u>	<u>0.35</u>	0.09	0.09	0.09	-0.01	0.25	0.04	0.00	0.13	0.28	0.13	-0.10	<u>0.38</u>	<u>0.34</u>	<u>0.55</u>	<u>0.38</u>	0.15	0.28	0.29	1.00		
Li	0.27	0.29	<u>0.39</u>	0.06	0.20	-0.12	<u>0.50</u>	0.15	0.06	-0.14	0.04	0.03	-0.00	0.06	0.35	0.07	-0.02	0.22	-0.16	0.01	-0.04	1.00	

l'on rencontre dans les minéraux potassiques plutôt que calciques (Goldschmidt, p. 399) mais les premiers sont moins facilement altérables.

L'étain, le nickel et le titane sont liés au fer. On connaît les affinités de Ni et Ti avec le fer. Celles de l'étain sont moins marquées mais le sphène contient souvent de l'étain et Goldschmidt en signale des traces dans des ilménites (*op. cit.* p.314).

Le lithium est le seul élément en trace lié à l'anion bicarbonate peut-être parce que sa mise en solution est commandée par cet anion. On pourrait aussi penser à une origine profonde de cet élément comme pour HCO_3 ce qui expliquerait en outre les proportions de lithium plus grandes dans les eaux thermominérales que dans les eaux de surface mais l'absence de corrélation entre Li et CO_2 dissous semble être en contradiction avec cette hypothèse.

Enfin l'absence de corrélation négative entre SO_4 et Ba peut surprendre compte tenu de la valeur très faible du produit de solubilité du sulfate de baryum. L'état de saturation des eaux minérales vis-à-vis de ce corps a donc été examiné à l'aide du graphique de la figure 34 où la concentration en SO_4 est portée en fonction de la concentration en Ba. L'équilibre théorique est défini par :

$$[\text{Ba}] \times [\text{SO}_4] = 10^{-9.97} \text{ à } 25^\circ\text{C} \text{ et } 10^{-9.7} \text{ à } 50^\circ\text{C}$$

d'après Hodgman (1951).

Pour tenir compte des unités couramment employées et de la représentation en coordonnées logarithmiques cette équation devient :

$$\begin{aligned} \log (\text{Ba}) + \log (\text{SO}_4) &= 1.466 \text{ à } 25^\circ\text{C} \\ &1.731 \text{ à } 50^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ba étant exprimé en microgrammes par litre et SO_4 en milliéquivalents par litre.

On constate qu'un grand nombre d'eaux sont sous-saturées mais beaucoup sont sursaturées notamment la majeure partie des eaux sulfatées. Cette anomalie n'est peut-être qu'apparente car la détermination des teneurs en Ba est très imprécise et les valeurs du produit de solubilité ne font pas intervenir l'influence éventuelle de la présence d'autres ions qui est sans doute importante, comme le fait remarquer H. Schoeller (1956) dans l'étude des eaux de gisements dans lesquelles on trouve des produits de solubilité jusqu'à 100 fois supérieurs à ceux qui sont mesurés dans l'eau pure. Cependant, les eaux étudiées ici sont relativement peu minéralisées et il est difficile de conclure.

En résumé l'étude des corrélations entre les éléments en traces montre qu'il existe une analogie de la répartition et des proportions de certains éléments dans les eaux et dans la lithosphère. Les associations les plus nettes dans les roches apparaissent aussi dans les eaux thermominérales.

Étudions maintenant la distribution géographique des teneurs des différents éléments.

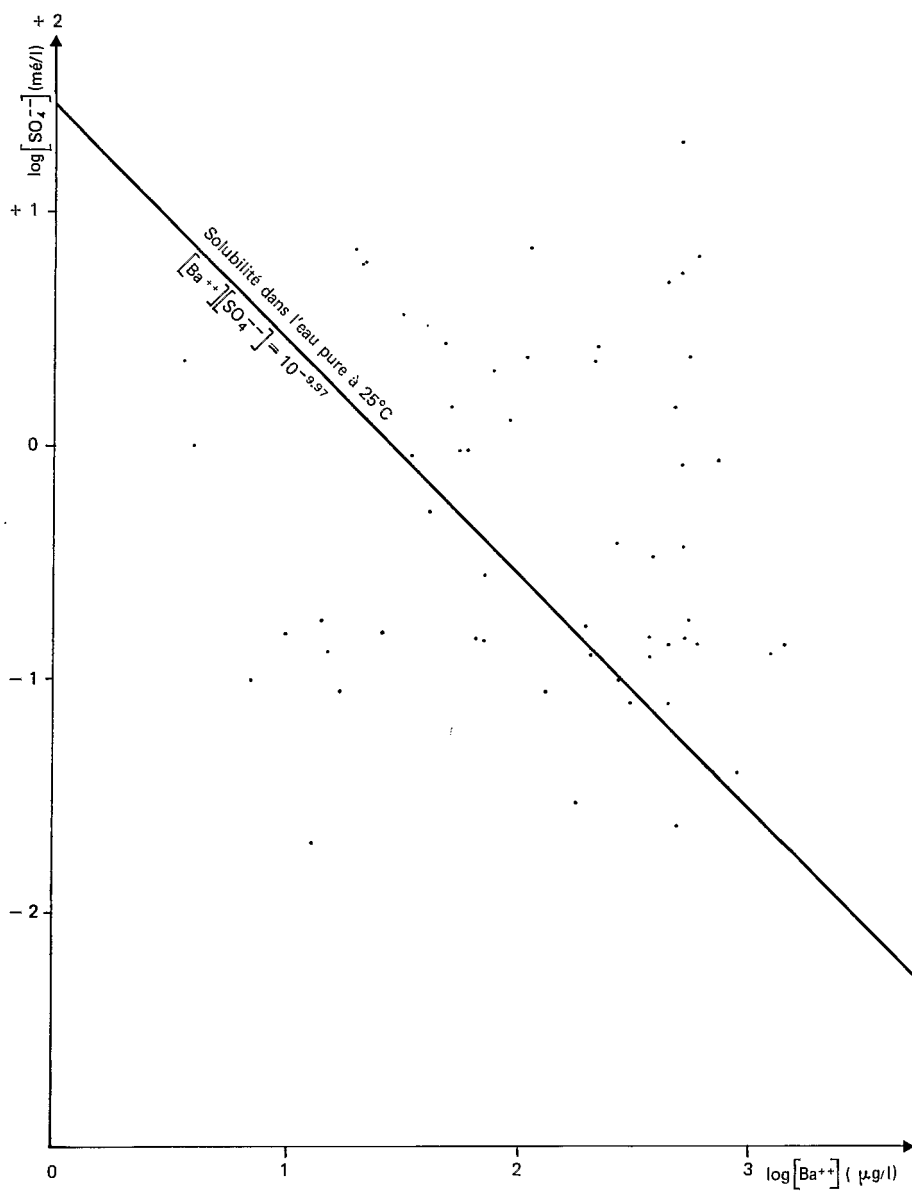


Fig. 34 Saturation des eaux thermominérales du Cameroun vis - à - vis du sulfate de baryum.

5 – DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DES TENEURS EN ÉLÉMENTS EN TRACES

Le problème posé ici est d'une part de voir si on peut mettre en relation certains types chimiques d'eaux ou un environnement géologique particulier avec de fortes concentrations de certains éléments en traces, d'autre part de mettre en évidence d'éventuelles anomalies dans les teneurs des traces.

5.1 Caractérisation des eaux thermominérales par les éléments en traces.

Cette question a été abordée d'une façon globale à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances (le Maréchal et Teil, 1973) appliquée à l'ensemble des éléments analysés mais à un effectif restreint d'échantillons (59) à cause des analyses incomplètes.

Cette méthode statistique met en évidence sous forme de facteurs les éléments qui peuvent servir à caractériser l'ensemble des échantillons. Le tableau 10 indique que les principaux facteurs sont définis par les teneurs en Ti, Li, CO₂, Ba, Mo, Mn qui pourraient donc théoriquement servir de base à une classification des eaux thermominérales du Cameroun.

Ce résultat est assez accessoire puisque les éléments majeurs ont déjà fourni une bonne classification. En revanche la représentation graphique des résultats permet de mettre en évidence d'éventuelles relations entre les échantillons et entre les éléments, et de voir quels éléments caractérisent quels échantillons.

La représentation a été faite dans deux plans ; celui des axes 1 et 2 et celui des axes 2 et 3 (fig. 35 et 36). Certains résultats acquis antérieurement sont confirmés telles les corrélations entre Ni, Cr, Sn, Co, Cu et V. mais on constate en plus les rapprochements de CO₂ avec Mn et de SO₄ avec Cu et l'ensemble des éléments énumérés précédemment. Il ne semble pas qu'il y ait d'autres groupements montrant des relations entre les éléments majeurs et les traces.

L'association Mn-CO₂ dissous est conforme à la théorie du champ cristallin : En effet dans la lithosphère, le manganèse se trouve à l'état manganeux, Mn²⁺, et ne subit pas l'effet de champ cristallin. Il est donc facilement libéré et se met en équilibre avec CO₂ dissous un peu comme le calcium auquel il est parfois associé dans certains minéraux (épidote, wollastonite, axinite, carbonates).

L'association de SO₄ avec Cu et Ni, Cr, etc ... est intéressante car l'étude des éléments majeurs indiquait que les grands types chimiques d'eaux, bicarbonatées, chlorurées, sulfatées, n'étaient pas en relation avec des environnements pétrographiques particuliers dont dépendaient seulement les proportions des cations, mais avec des facteurs structuraux (grandes failles, volcanisme).

Ici au contraire il semble qu'il existe une relation entre les eaux sulfatées et

Tableau 10 Analyse factorielle des correspondances.
Ensemble des variables. (22 variables, 59 échantillons).

n° facteur	1	2	3	4	5	6	
variance %	31.72	23.65	14.54	10.83	8.27	3.14	
variance cumulée %	31.72	55.37	69.91	80.73	89.00	92.15	
+ 1				Mo			
					Mn		
Ti		Li	Ti			V	
Ba		Mo				Cu	
0		Ti	CO ₂	Mn		Cr	
CO ₂				Li		Sn	
Li		Mn			CO ₂		
		CO ₂					
			Ba				
- 1							

contributions absolues

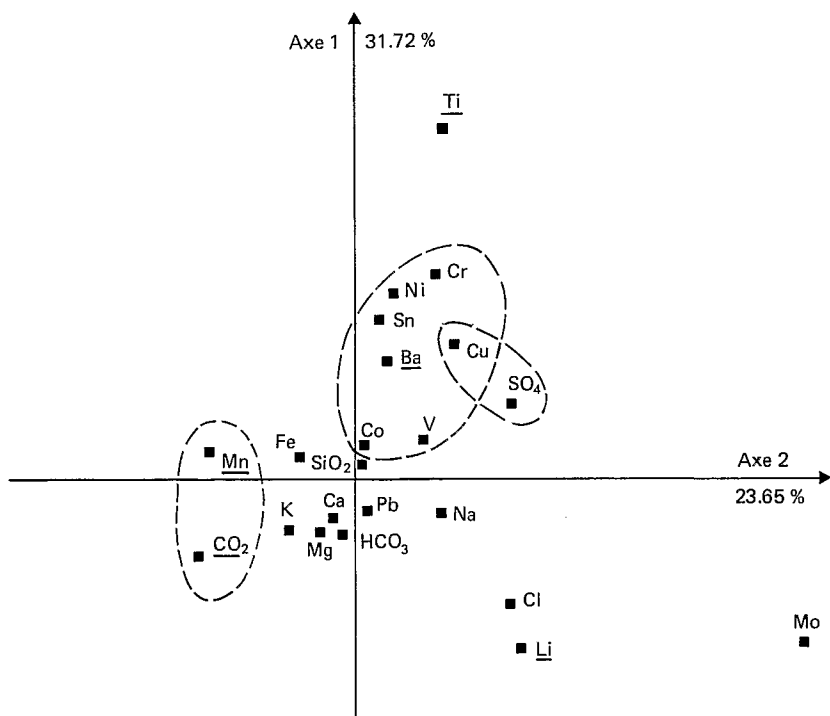


Fig. 35 Analyse factorielle des correspondances. Ensemble des variables.
Projection dans le plan des axes 1 et 2 (59 échantillons, 22 variables).

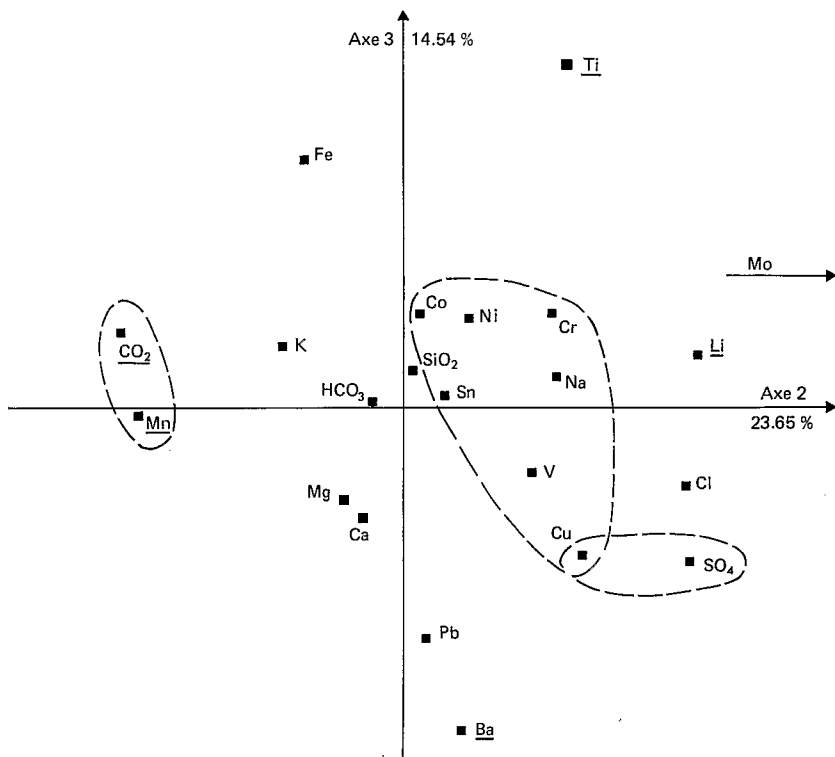


Fig. 36 Analyse factorielle des correspondances. Ensemble des variables.
Projection dans le plan des axes 2 et 3 (59 échantillons, 22 variables).

le groupe d'éléments en traces qui caractérisent plus spécialement les roches basiques ce qui conduit à faire le rapprochement *eaux sulfatées-grandes failles-roches basiques*, qu'on peut interpréter en disant que les grandes failles atteignent en profondeur des roches basiques ou ont permis à de telles roches de monter vers la surface et que les eaux thermominérales les ont lessivées dans la partie profonde de leur circuit ce qui ne soulève pas d'objection.

Il est peut-être normal finalement qu'aucune association cations-éléments en traces n'apparaisse, car seules les sources bicarbonatées ont des proportions assez variables de cations, les sources sulfatées et chlorurées étant essentiellement sodiques quel que soit le contexte pétrographique.

5.2 Recherche d'anomalies dans les teneurs en éléments en traces.

Avant de parler d'anomalies il est nécessaire de définir des teneurs moyennes. Une telle démarche est quelque peu arbitraire dans la mesure où l'environnement géologique des sources et des circuits hydrothermaux n'est pas parfaitement homogène. D'autre part faut-il raisonner sur les concentrations dans les eaux ou dans les résidus secs ? Comme la somme des éléments en traces en microgrammes par litre est à peu près proportionnelle au poids du résidu sec, il serait plus logique de travailler sur les teneurs en ppm de résidu sec. En fait on a pu vérifier que l'on obtenait des résultats analogues par les deux méthodes, les fortes teneurs dans les résidus secs correspondant aux fortes concentrations dans les eaux et ce sont ces dernières qui ont été utilisées.

Les valeurs adoptées pour la moyenne (fond géochimique) et la limite inférieure de l'anomalie sont celles que l'on utilise habituellement en géochimie dans le cas de distributions log-normales (Lepeltier, 1969) bien que les distributions étudiées ici s'en écartent plus ou moins. Ce ne seront donc que des estimations.

La teneur moyenne, b , est égale à la moyenne géométrique.

La limite inférieure de l'anomalie, t , est égale à la moyenne augmentée de deux fois l'écart-type, s : $t = b + 2s$.

Les calculs de b et s ont été faits sur 72 échantillons à l'aide d'un ordinateur. Les résultats arrondis sont donnés dans le tableau 9.

On détermine ainsi les éléments qui présentent des teneurs anormales qu'on peut considérer comme des anomalies géochimiques et les sources correspondantes.

Le manganèse, le vanadium, le cuivre et le baryum ne présentent pas de teneurs anormales.

Le plomb 4 anomalies : Vina (n° 91), Guisire (38), Ngok (75) et Baré 1 (106a).

Le molybdène 5 anomalies : Laokoubong (50), Laopanga (52), Sep Sep Djarandi (87), Vouré Mba (92) et Burlé 2 (97).

L'étain 2 anomalies : Bajere (5) et Sep Maloko (88).

Tableau 11 MOYENNE ET ANOMALIE GÉOCHIMIQUE DES TENEURS EN ÉLÉMENTS TRACES DANS LES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN (72 ÉCHANTILLONS).

	Moyenne $\mu\text{g/l}$	Limite inférieure de l'anomalie $\mu\text{g/l}$
Mn	80	2 900
Pb	3.5	43
Mo	2.3	27
Sn	5	130
V	20	270
Cu	7	110
Ni	3	35
Co	1.3	10
Ti	50	1 000
Cr	3	40
Ba	125	3 300
Li	150	3 000

Le nickel 2 anomalies : Bajere (5) et Marpa (60).

Le cobalt 5 anomalies : Bembari (8), Gangasaou (30), Mayang (64), Nalti (72) et Vouré Mba (92).

Le titane 5 anomalies : Bajere (5), Masola (61), Nalti (72), Burel 1 (13) et Lasum (53).

Le chrome 2 anomalies : Bajere (5) et Masola (61).

Le lithium 1 anomalie : Fonga Kie (108).

Outre ces « anomalies », on constate que les fortes teneurs en cuivre et en molybdène sont associées en partie aux sources sulfatées, résultat nouveau pour Mo mais déjà trouvé pour Cu dans l'analyse statistique. Enfin il n'apparaît pas de localisation particulière tant pour les anomalies que pour les fortes teneurs en général qui sont disséminées dans l'ensemble des régions prospectées, cependant les plus fortes concentrations sont le fait d'un nombre restreint de sources, en particulier :

Bajere (5) pour Sn, Ni, Ti, Cr, Mn, V, Cu ;
 Masola (61) pour Ti, Ca, Mn, V, Cu, Sn, Ni ;
 Sep Sep Maloko (88) pour Sn, Mn, Pb, Ni, Ti, Cr ;
 Marpa (60) pour Ni, Sn, V, Cu, Ti, Cr ;
 Gangasaou (30) pour Co, Mn, V, Ni ;
 Mayang (64) pour Co, Mn, V, Ti, Cr ;
 Perki (82) pour Pb, V, Cu, Cr.

Étant donné l'imprécision des données de base il paraît délicat de vouloir donner à ces résultats une trop grande signification notamment d'assimiler les anomalies et les teneurs les plus élevées à des indices de concentrations métallifères du sous-sol. C'est une interprétation possible mais elle n'est sans doute pas unique.

6 – CONCLUSION A L'ÉTUDE DES ÉLÉMENTS EN TRACES

La spectrographie d'émission dans l'arc permet de doser un certain nombre d'éléments en traces dans les eaux thermominérales : Mn, Pb, Mo, Sn, V, Cu, Ni, Co, Ti, Cr. La précision des résultats dépend du mode opératoire. La concentration des éléments Li, Ba et Sr est suffisamment importante pour être mesurée par des méthodes moins sensibles. D'autres éléments tels que Ag, Zn, Ga ont seulement été détectés et n'ont pu être dosés à cause de leur concentration trop faible.

L'abondance relative de ces éléments dans les eaux est analogue à celle qu'on trouve dans les roches.

L'étude des corrélations fait apparaître des associations en relation avec les affinités géochimiques des éléments dans les roches notamment dans les roches basiques.

La mise en évidence d'anomalies géochimiques se heurte d'une part à l'imprécision des données et d'autre part à des difficultés d'interprétation à cause des connaissances très limitées que l'on a du sous-sol. La démarche inverse qui consisterait à définir ce sous-sol à partir de la composition des eaux n'est pas possible faute d'études de référence voire même de recherches expérimentales. Les résultats obtenus ici ne doivent être considérés que comme des indications d'anomalies géochimiques possibles dans l'environnement géologique des sources concernées.

A PROPOS DE QUELQUES PROBLEMES PARTICULIERS

1 — CLASSIFICATION GÉNÉTIQUE DES EAUX THERMOMINÉRALES

Au terme de cette étude il est intéressant de replacer les sources du Cameroun dans le cadre plus général de l'ensemble des eaux minérales qui existent dans la croûte terrestre en considérant non seulement celles qui émergent naturellement mais aussi celles que l'on rencontre dans des forages ou des exploitations minières.

Le choix s'est porté pour cela sur le cadre de la classification génétique proposée par les Russes (Ivanov *et al.*, 1968) et établie à partir de l'étude des sources d'URSS. Les auteurs remarquent que les caractères physiques et chimiques sont déterminés par la combinaison des facteurs essentiels suivants :

- l'origine et la composition des eaux dont dérivent les eaux minérales, essentiellement eaux d'infiltration météoriques et eaux d'origine marine, ces dernières pouvant être liées soit à un type de sédimentation ordinaire, soit à des bassins salifères (les eaux formées à partir des exhalaisons magmatiques ou volcaniques ayant une importance très restreinte de même que les eaux dites juvéniles ne sont pas prises en considération) ;

- la composition des formations aquifères notamment la présence dans ces roches de sels hydrosolubles et de substances organiques ;

- l'environnement structural géotectonique, les conditions paléohydrogéologiques, les particularités des échanges d'eau actuels et le degré de lessivage des sels solubles ;

**Tableau 12 LES PRINCIPAUX TYPES GÉNÉTIQUES D'EAUX MINÉRALES
DE LA CROUTE TERRESTRE (d'après Ivanov et al., 1968)**

	A - Régions sans activité magmatique récente	B - Régions à activité thermomé- tamorphique profonde d'âge récent	C - Régions à volcanisme actif actuel
1 - Dans les roches éruptives et métamorphiques	Eaux thermales siliceuses fai- blement miné- ralisées conte- nant de l'azote	Eaux froides bicarbonatées à CO ₂ - Miné- ralisation peu élevée	-
2 - Dans des dépôts sédimentaires	Eaux à N ₂ et méthane - Com- position, miné- ralisation et température variées - dont les eaux à Br et I	Eaux à CO ₂ de composition et minéralisation variées, parfois enrichies de As, B, H ₂ , SiO ₂	-
3 - Dans des roches sédimentaires surtout carbona- tées enrichies en matières organi- ques	Eaux à H ₂ S, N ₂ , CH ₄ , de composition, minéralisation et température variées	-	-
4 - Dans des roches à minéralisation sulfurée	Eaux à N ₂ , acides, sulfatées et eaux de mine	-	-
5 - Dans des roches à concentration secondaire d'élé- ments radioactifs	Eaux à N ₂ , Ra de composition et minéralisa- tion variées	Eaux à CO ₂ , Ra de composition variée et faible minéralisation	-
6 - Dans des roches volcaniques près de la surface	-	-	Eaux thermales à H ₂ S, CO ₂ , acides, sulfatées et sulfatées chlorurées, fu- merolles
7 - Dans des forma- tions volcaniques et volcanosédi- mentaires (dans des conditions profondes)	-	-	Eaux hyper- thermales à CO ₂ ou CO ₂ - N ₂ , silice, souvent B et presque pas de sulfates

- l'activité magmatique profonde récente et l'activité volcanique actuelle ;
- le développement de processus biochimiques dans les roches sédimentaires.

Les observations semblant montrer le rôle particulièrement important de l'activité magmatique, les auteurs distinguent trois principaux types de régions hydrominérales :

- A. les régions sans activité magmatique récente,
- B. les régions où se sont déroulés des phénomènes magmatiques profonds et thermométamorphiques assez récents,
- C. les régions de volcanisme actif contemporain.

A l'intérieur de ces régions le contexte géologique et l'origine primaire de l'eau permettent de différencier des types d'eaux minérales définis par leur minéralisation et plus spécialement la nature des gaz qui les accompagnent.

D'où le tableau 12.

L'examen de ce tableau montre que chaque type d'eau est caractérisé souvent par la composition des émanations gazeuses qui l'accompagnent : produits azotés, carbonés, soufrés ou chlorés qui jouent un rôle important dans la détermination de la minéralisation. Ce rôle est également apparu à la suite de la discussion sur la nature et l'origine des anions des eaux du Cameroun et il est évident qu'une étude systématique des émanations gazeuses aurait permis de le préciser davantage.

Malgré cette incertitude sur la composition des gaz les sources du Cameroun peuvent être reconsidérées à la lumière de cette classification.

Les eaux de la région de Mamfé sont issues de dépôts sédimentaires et montrent en particulier l'influence de niveaux évaporitiques. Mais il existe aussi des niveaux riches en matières organiques. En outre des coulées de basaltes et des massifs subvolcaniques, notamment le massif du Nda Ali, témoignent d'une activité magmatique régionale. Malheureusement elle n'est pas datée et 4 types génétiques sont donc possibles, A₂, B₂, A₃, B₃, parmi lesquels seule la connaissance des gaz émis permettrait de choisir. Ivanov ne mentionne pas de type d'eau correspondant à B₃ mais il n'y a aucune raison pour qu'il n'en existe pas.

Ensuite il y a les sources des régions à volcanisme quaternaire Ngaoundéré, Foubot, mont Cameroun. Ce contexte magmatique n'a pas été envisagé par Ivanov mais il paraît nécessaire de l'individualiser ici. Ses caractères sont intermédiaires entre ceux des catégories B et C. L'environnement pétrographique est constitué de roches éruptives et métamorphiques.

Enfin les autres sources appartiennent aux catégories A₁ ou B₁ avec un environnement pétrographique assez voisin du précédent.

Cette classification génétique est sans doute imparfaite, notamment elle n'accorde pas une place particulière au sulfure d'hydrogène en dehors du contexte du volcanisme actif alors qu'il paraît jouer un rôle important dans une catégorie d'eaux du Cameroun et d'autres régions sans relations avec ce phénomène. Cependant elle met en relief des critères de différenciation dont il sera certainement fructueux d'examiner la validité, dans d'autres régions.

En fait l'idée d'une classification de toutes les eaux naturelles basée sur la nature et les proportions des gaz dissous est assez ancienne. Il semble qu'on la doive à W. Vernadski et dans l'article dont est extrait l'épigraphe de ce mémoire on peut lire :

« L'eau est toujours une solution gazeuse (...). L'équilibre eau + gaz $\rightleftharpoons$ gaz dissous peut être pris comme base de la classification des eaux naturelles ».

En fonction de la nature des gaz dissous les plus importants, Vernadski propose les 6 classes principales suivantes :

eaux oxygénées,
eaux carboniques,
eaux azotiques,
eaux méthaniques,
eaux hydrosulfureuses,
eaux hydrogénées (rares).

Ce point de vue n'a guère été pris en considération ailleurs qu'en URSS alors qu'il paraît essentiel comme le montre l'étude des sources thermominérales.

2 – SOURCES THERMOMINÉRALES ET FILONS HYDROTHERMAUX

Le rapprochement qui est fait entre les sources thermominérales et les filons métallifères hydrothermaux a été évoqué précédemment. L'analogie se limite en fait à la similitude morphologique de la faille hydrominérale et du filon hydrothermal. Les teneurs des eaux minérales en éléments métalliques sont incapables de rendre compte de la constitution des gisements hydrothermaux et les conditions thermodynamiques de circulation des eaux ne peuvent être comparées à celles des fluides hydrothermaux telles qu'on peut les déduire de l'étude des conditions de cristallisation des espèces minérales (étude des paragenèses, des domaines de stabilité, des inclusions fluides). ceci rend compte des différences essentielles qui existent entre les deux phénomènes et qui concernent l'origine des métaux et leur mode de transport.

Dans les eaux thermominérales les métaux sont très probablement libérés par les roches encaissantes au fur et à mesure de leur altération puis transportés sous une forme qui n'est pas encore bien déterminée.

Le problème des filons hydrothermaux a été examiné en détail par Krauskopf (1967). Il semble que les métaux soient libérés par un magma et qu'ils soient transportés sous forme de fluides gazeux (des halogénures notamment) du moins pendant un certain trajet car la cristallisation de la plupart des minerais filoniens se fait en milieu liquide.

La question du mode de transport des métaux en milieu liquide n'a pas encore reçu de réponse totalement satisfaisante mais l'intervention d'ions et de molécules complexes sulfurées et chlorurées est très probable.

Un autre argument en faveur de l'indépendance des deux phénomènes est

que les fluides liés aux phénomènes ignés et qui sont supposés donner naissance aux filons hydrothermaux tendent à obturer les chemins que les mouvements tectoniques leur ouvrent, précisément en formant ces filons. Cette constatation de simple bon sens est confirmée à l'échelle des circulations capillaires par l'observation des inclusions fluides secondaires qui jalonnent des fissures microscopiques (Boulanger et Deicha, 1968). La cimentation de ces fissures est d'autant plus complète que la température et la pression des fluides qui ont circulé sont plus élevées. De plus les solutions gazeuses riches en constituants fugaces sont plus actives dans cette cimentation que les solutions purement aqueuses, de même pour les solutions à forte teneur en substances solubles.

Il en résulte une opposition entre les systèmes hydrothermaux qui se ferment sur eux-mêmes et les systèmes de sources thermominérales qui restent ouverts et tendent à s'ouvrir encore plus par l'altération le long des chenaux de circulation et l'évacuation d'une partie des produits de cette altération vers la surface.

Finalement il semble bien que ces phénomènes ont peu de rapports entre eux en dehors de la circulation dans des réseaux de fractures.

3 – SOURCES THERMINÉRALES ET ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

La production d'énergie d'origine géothermique repose sur l'utilisation de vapeur d'eau naturelle généralement issue de la vaporisation d'eau surchauffée présente dans le sous-sol sous pression élevée. Cette forme d'énergie est la moins onéreuse de toutes et l'intérêt qu'elle suscite ne cesse de grandir depuis quelques années. La prospection géothermique a pour but la découverte de gisements d'eau chaude lesquels supposent l'existence d'un réservoir, d'une source de chaleur et d'eau présentant des propriétés thermodynamiques favorables. Les techniques actuelles de prospection font donc appel d'une part à des méthodes géophysiques pour déceler des réservoirs, à des méthodes géothermométriques pour détecter des anomalies de température et à des méthodes géochimiques pour déceler les propriétés des fluides profonds.

L'intérêt des sources thermominérales dans cette prospection réside dans le fait qu'elles peuvent être parfois les témoins d'un réservoir géothermique dont elles seraient des fuites. Leur étude apporte alors de précieux renseignements.

Il était donc normal d'aborder l'examen des sources thermominérales du Cameroun dans cette optique afin de mettre en évidence d'éventuels indices favorables à l'existence d'une source d'énergie géothermique. Nous examinerons successivement les critères thermiques, les critères structuraux et les critères géochimiques.

3.1 Critères thermiques.

Les premiers indices favorables sont les sources thermales. Les zones intéressantes à ce point de vue sont :

— la région du volcanisme quaternaire de Ngaoundéré avec deux sources à 40°C (Laopanga et Katil Foulbé),

- la région du volcanisme quaternaire du pays bamoun avec une source à 29°C (Fossette),
- la région du volcanisme quaternaire à actuel du mont Cameroun avec les sources de Lobé à 49°C,
- la région des sources de Woulndé à 74°C.

On ne peut que remarquer la faible ampleur de ces manifestations superficielles. En soi ce n'est pas un inconvénient et en supposant l'existence d'un réservoir cela indiquerait qu'il est bien fermé (comme dans la région de Monte Amiata en Toscane). Toutefois les manifestations de surface, quand elles existent, sont la plupart du temps plus importantes.

3.2 Critères structuraux.

Il s'agit de savoir quelles sont les possibilités d'existence d'un réservoir offertes par le sous-sol des régions définies précédemment.

Si l'on excepte les environs du mont Cameroun le sous-sol est constitué par le socle parfois recouvert de formations volcaniques. Dans ce contexte il est assez peu probable de rencontrer un réservoir important sauf dans le cas d'une intense fracturation des roches et d'une couverture formée par des niveaux altérés plus ou moins imperméables, cette altération pouvant être de type hydrothermal, provoquée par les fluides chauds (*self-sealing* de Facca et Tonani, 1967). Mais aucune observation dans ce sens n'a été faite au Cameroun.

Dans les environs du mont Cameroun se trouvent des terrains sédimentaires, en particulier la source de Lobé est située dans une série à intercalations volcano-sédimentaires dont la structure a pu être étudiée par les méthodes géophysiques au cours de la prospection pétrolière par la *Gulf Oil Company of Cameroon*. Des structures anticlinales auraient été décelées, qui pourraient être compatibles avec l'existence d'un réservoir géothermique.

3.3 Critères géochimiques.

Ces critères concernent directement les eaux thermominérales. Si une eau thermominérale provient d'un réservoir géothermique, certaines de ses caractéristiques géochimiques pourront renseigner sur les conditions physicochimiques régnant dans le réservoir en particulier la température et l'état physique des fluides géothermiques. Une étude détaillée des méthodes géochimiques utilisées actuellement dans la prospection géothermique est donnée par Tonani (1971), mais seuls vont être examinés les renseignements que peuvent fournir les données analytiques disponibles.

Ces données permettent seulement d'avoir des indications sur la température des fluides en profondeur. Il s'agit essentiellement de la teneur en silice.

La silice ne se met en équilibre que lentement et sa teneur à l'émergence témoigne de la température de l'eau au moment où l'équilibre est atteint. Donc s'il y a sur-saturation en silice pour la température de l'eau à l'émergence on déduira la température du réservoir à partir des courbes de solubilité de la silice en fonction de la température.

Si on se réfère au graphique de la figure 24 on voit que toutes les eaux sont sous-saturées et qu'en conséquence il ne semble pas qu'elles soient issues d'un réservoir où règnent des températures beaucoup plus élevées que celles qui sont mesurées à l'émergence. Ceci est un critère vraiment défavorable quant à l'existence d'une source d'énergie géothermique. (p. 97).

La méthode d'estimation de la température basée sur la mesure de la sous-saturation en carbonate de calcium n'est pas applicable ici à cause des dégagements de gaz carbonique.

Quant à celle qui est basée sur le rapport Na/K, Tonani la juge très délicate à mettre en pratique.

Finalement l'ensemble des critères examinés semblent suffisamment concordants pour dire que les sources thermales du Cameroun ne constituent pas des indices de sources d'énergie géothermique, en émettant toutefois quelques réserves pour la bordure occidentale du mont Cameroun.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les sources thermominérales du Cameroun, hormis celles de la région de Mamfé, ont un contexte pétrographique commun : les eaux sont issues du socle éruptif et métamorphique. Les différentes parties de cette étude ont conduit à des interprétations et des conclusions intéressantes qui concernent essentiellement la tectonique et la géochimie, ce terme étant pris dans son sens le plus large, mais qui sont pour la plupart spécifiques de cette catégorie de sources.

Du point de vue tectonique les conclusions intéressent la géologie structurale du Cameroun et découlent de la relation, reconnue depuis longtemps, qui existe entre la localisation des sources et les failles : les griffons jalonnent la plupart des directions tectoniques, pas toujours des accidents majeurs mais souvent des accidents secondaires transversaux par rapport aux précédents.

Les failles thermominérales sont caractérisées par le fait qu'elles sont ouvertes de manière à permettre le passage des fluides et par le fait qu'elles doivent avoir une grande extension verticale pour permettre l'ascension des fluides d'origine profonde. Ce sont donc des cassures importantes qui ont joué ou rejoué à des époques relativement récentes, voire actuelles. Ceci a permis de découvrir une grande fracture très probable à l'est du tchabal Mbabo et de souligner d'une part les mouvements tectoniques récents tels ceux du bassin de Mamfé et de la vallée du mayo Déo et d'autre part les directions auxquelles sont associées les manifestations volcaniques quaternaires.

Du point de vue géochimique les conclusions débordent le cadre géographique de cette étude et leur importance est grandement liée au fait que les eaux sont issues uniquement du socle granito-gneissique. En effet, ceci a conduit à interpréter les différences de minéralisations en fonction de facteurs qui ne sont pas seulement statiques comme peut l'être la composition pétrographique et minéralogique des roches du sous-sol, mais aussi dynamiques comme le volcanisme et la tectonique.

Tout d'abord a été admise l'hypothèse de mieux en mieux étayée et la plus couramment admise aujourd'hui de l'origine météorique de la plus grande partie des eaux qui alimentent les sources thermominérales.

Ensuite nous avons remarqué que la thermalité était généralement faible, qu'elle était en relation soit avec des manifestations volcaniques quaternaires, soit avec des mouvements tectoniques de grande amplitude verticale et que sauf peut-être dans ce dernier cas les eaux ne circulent pas à de grandes profondeurs. La source de Wouindé avec sa température de 74°C fait toutefois figure d'exception.

La question des émanations gazeuses à l'émergence n'a été que rapidement évoquée faute d'analyses systématiques. La présence de gaz carbonique est certainement la plus fréquente et celle d'azote est possible dans les sources qui ne sont pas liées au volcanisme.

La géochimie des eaux a été étudiée de manière approfondie. Pour expliquer l'origine de la minéralisation il a fallu séparer nettement les anions et les cations. Les cations proviennent de la lixiviation des roches encaissantes et les principales variations de leurs proportions ont pu être rapportées à des variations pétrographiques qui, sans être formellement prouvées, sont très probables en considérant la géologie de surface.

Les anions présentent un intérêt particulier. Ne pouvant avoir la même origine que les cations il faut admettre qu'ils proviennent de la dissolution dans l'eau de fluides issus de l'intérieur de la croûte terrestre. De ce fait l'existence de différences dans la composition anionique traduit les différences de composition de ces fluides. Au Cameroun certains composés paraissent spécifiques de l'environnement géologique : l'élément chlore serait lié aux phénomènes volcaniques en général et le soufre aux phénomènes tectoniques, tandis que l'anhydride carbonique apparaît comme ubiquiste avec toutefois un maximum d'activité dans un environnement volcanique.

Une réserve doit cependant être faite au sujet de la relation entre minéralisation soufrée et tectonique : le style tectonique est important à considérer car dans les Pyrénées un grand nombre de sources sont effectivement caractérisées par la présence de l'élément soufre alors que dans les Alpes ce n'est pas le cas. Il semble que les circuits hydrominéraux alpestres ne reçoivent aucun apport de fluides profonds.

Ces fluides ont une importance primordiale car c'est par leur intermédiaire que l'eau peut se minéraliser de façon notable. En outre ils constituent une analogie intéressante entre les sources thermominérales et le volcanisme. Ils sont l'élément moteur important dans la dynamique des eaux et celle du magma et ils manifestent le dégazage permanent de l'intérieur de la terre, sans d'ailleurs qu'il s'agisse forcément d'un dégazage primaire c'est-à-dire de gaz juvéniles. Dans un tel contexte géologique l'étude géochimique de gaz spontanés est donc aussi impérative que celle des eaux qu'ils accompagnent.

Ces remarques viennent étayer les bases de la classification génétique des eaux thermominérales proposée par les Russes.

L'analyse semi-quantitative des éléments en traces montre de manière assez nette malgré son imprécision qu'ils ont la même origine que les cations ce qui est normal puisque toutes les roches en contiennent à l'état dispersé soit dans des fissures, soit dans les réseaux cristallins. Il ne paraît pas possible qu'il y ait un rapport entre ces éléments et d'éventuels gisements de type hydrothermaux car les minerais sont la plupart du temps de nature sulfurée, donc extrêmement peu solubles. D'autre part

la mise en place de tels gisements ne peut pas avoir de rapports directs avec les sources thermominérales à cause des conditions thermodynamiques très différentes.

Tout au plus peut-on supposer que les fluides qui arrivent dans le système aquifère d'une source sont parfois les constituants les plus fugaces d'un fluide hydrothermal ayant circulé à de plus grandes profondeurs, lequel pourrait être générateur de minéralisations hydrothermales. Dans ce cas il s'agit de « fuites » d'un système hydrothermal profond, le mot hydrothermal étant peut-être impropre car si l'eau y joue un rôle important, la présence d'autres éléments notamment le chlore, est indispensable pour expliquer la migration des éléments métalliques.

Enfin en ce qui concerne l'énergie géothermique les résultats sont assez défavorables à l'existence de sources d'énergie de ce type au Cameroun sauf peut-être dans la région située à l'Ouest du mont Cameroun où des études plus poussées sont nécessaires.

Toutes ces conclusions sont basées sur l'examen des résultats des analyses chimiques classiques des eaux mais au cours de l'étude il est apparu que la connaissance de plusieurs données supplémentaires aurait permis des développements plus approfondis. Il s'agit notamment des compositions isotopiques des eaux et des gaz qui auraient permis de conclure plus sûrement à propos de leurs origines respectives et de la composition des gaz spontanés et dissous qui auraient sans doute permis une distinction encore plus nette entre les différents types d'eaux thermominérales. En fait l'acquisition systématique de ces données aurait nécessité des moyens dépassant le cadre de cette étude envisagée d'abord d'un point de vue extensif. Par ailleurs sans mésestimer l'intérêt que présenteraient de telles recherches systématiques il serait peut-être préférable de les entreprendre seulement maintenant au terme de ce premier travail d'ensemble, d'une manière moins générale mais aussi valable, en choisissant un nombre limité de sources spécialement intéressantes à étudier.

L'étude des sources du Cameroun souligne cependant que tout programme de recherches sur des eaux thermominérales doit pour être complet, comprendre des analyses isotopiques et des analyses de gaz au même titre que des analyses chimiques traditionnelles.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEGRE (C.J.), JAVOY (M.), MICHARD (G.), 1968. Étude de la distribution et de l'abondance des éléments de transition dans l'écorce terrestre, comparées à celles des terres rares. *in* AHRENS (L.H.) - *Origin and distribution of the elements*. Pergamon Press, p. 913-928.
- ARMAND (L.), 1934. Étude des sources gazeuses et particulièrement des sources obtenues par forage dans le bassin de Vichy. *Ann. Mines*, 5, 5, p. 341-431.
- ARMAND (L.) et BLANQUET (J.), 1934. Méthodes physiques et chimiques de contrôle des eaux minérales. *Ann. Mines*, 5, 2, p. 69-78.
- AVERIEV (V.V.), 1967. Hydrothermal process in volcanic areas and its relations to magmatic activity. *Bull. Volcanol*, 30, p.51-62.
- BARTON (P.B.), 1959. The chemical environment of ore deposition and the problem of low-temperature ore transport. *in* *Researches in Geochemistry*, P.H. Abelson, edit. t I, p. 279-300.
- BELINGA (S.E.), 1966. Contribution à l'étude géologique, minéralogique et géochimique des formations bauxitiques de l'Adamaoua (Cameroun). Thèse, 3e cycle, Paris, 155 p. multigr.
- BELINGA (S.E.), 1972. L'altération des roches basaltiques et le processus de bauxitisation dans l'Adamaoua (Cameroun). Thèse Doctorat d'État, Paris VI, 571 p. multigr.
- BLACK (R.) and GIROD (M.), 1970. Late paleozoic to recent igneous activity in West Africa and its relationship to basement structure. *in* *African Magmatism and Tectonics*, T.N. Clifford and I.G. Gass, edit., Oliver and Boyd, Edinburgh, p. 185-210.
- BLOT (A.), PION (J.C.), WACKERMANN (J.M.), 1973. Un exemple de corrélation de rang en géochimie : les altérations du socle birrimien en zone tropicale sèche (Sénégal oriental et Haute-Volta). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, V, 1, p.25-34.

- BOGOMOLOV (G.V.) et SILINE BEKTCHOURINE (A.I.), 1955. Hydrogéologie spécialisée. Ann. du service d'Information géologique du BRGM, n° 37 - Traduit du russe en 1959, 236 p.
- BOULANGER (D.) et DEICHA (G.), 1969. L'imbibition des roches par les fluides géochimiques comme modèle capillaire des circulations de solutions thermominérales. *Internat. Geol. Congr., 23e Sess. 1968*, vol.17, p.97-19.
- BUISSON (E.M.), 1930. Contribution à l'étude hydrogéologique de la source minérale de Baré. *Cameroun agricole, forestier et minier*, Yaoundé, oct. 1930, n° 2, p. 10-14.
- BUISSON (E.M.), 1931. Les données récentes sur la source minérale de Baré (Cameroun). *Togo-Cameroun*, n° 1, Janv. 1931, p. 5-8.
- BULLARD (F.M.), 1962. Volcanoes. Sté Fse d'Éd. Nelson, Paris, 441 p.
- CADISCH (J.), 1969. Die Mineralquellen der Schweiz. *Internat. Geol. Congr., 23e Sess, 1968*, vol. 18, p. 133-137.
- CASTANY (G.), 1967. Traité pratique des eaux souterraines (chap. 23 : Eaux thermominérales, p. 588-645). Dunod, Paris, 2e éd., 661 p.
- CAZAL (A.), CLIN (M.), MOUSSIE (B.) *et al*, 1971. Application de la radiométrie infrarouge aéroportée en géothermie. *Ann. des Mines*, mai 1971, p.61-72.
- CAZAUX (P.), BLANQUET (P.), CANELLAS (J.), 1952. Remarques sur le phénomène de floculation des eaux minérales. *Ann. Inst. Hydrol. et Climatol*, 23, 72, p. 19-28.
- CHATERJI (G.C.) and GUHA (S.K.), 1969. The problem of origin of high temperature springs of India. *Internat. Geol. Congr, 23e Sess. 1968*, vol. 17, p.141-149.
- CHATONIER (D.), 1957. Contribution à l'étude de la minéralisation des eaux en rapport avec la composition chimique du sous-sol. Thèse, Faculté mixte de Médecine et Pharmacie de Clermont Ferrand.
- CHATONIER (D.) et LASSERRE (M.), 1960. Principales sources minéralisées de l'Adamaoua. *Bull. Soc. géol. Fr., 7e série*, t 2, p. 19-27.
- CHEMLA (M.), TOURAY (J.C.), BROUSSE (R.) *et al*, 1968. Abondance relative des gaz inclus dans quelques minéraux magmatiques d'origine profonde. *in* AHRENS, L.H. Origin and distribution of the elements, Pergamon Press, p. 971-979.
- CHEVASSUS-AGNES (A.M.), 1968. Contribution à une étude physique du fossé tectonique de la Mbéré à la hauteur du Village de Djohong (Adamaoua, Cameroun). T.E.R., Bordeaux, 113 p.

- CHEVASSUS-AGNES (A.M.), 1971. Aspects géomorphologiques du fossé tectonique de la rivière Mbéré et de sa bordure méridionale. Région de Djohong (Adamaoua, Cameroun). *Rev. Géom. Dynam.*, n° 4, p 145-160.
- CLIFFORD (T.N.), 1970. The structural framework of Africa. in *African Magmatism and Tectonics*, T.N. Clifford and I.G. Gass Edit., Oliver and Boyd, Edinburgh, p. 1-26.
- COLLINS (D.W.), 1923. Graphic representation of water analysis. *Ind. and Eng. Chemistry*, 15, n° 4, p. 394.
- CRAIG (H.), 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, p. 1702.
- CRAIG (H.), BOATO (G.), WHITE (D.E.), 1954. Isotopic geochemistry of thermal waters. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 65, p. 1243.
- DAUBREE (A.), 1887. Les eaux souterraines : — à l'époque actuelle (t. 1 et 2), — aux époques anciennes (t. 3). Dunod édit., Paris, 3 vol. 455 + 302 + 443 p.
- DAUPHIN (J.), DAUPHIN (S.), CHATONIER (D.) *et al.*, 1965. L'équilibre du fer dans les eaux minérales bicarbonatées chlorurées. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t 260, n° 7, p. 2031-2032.
- DELCROIX (G.), 1937. Enquête sur le lahoré de Ngaoundéré. *Bull. Soc. d'Ét. Camerounaises*, n° 2, p. 43-52.
- DE MARTINI (F.E.), 1938. Corrosion and the Langelier Calcium Carbonate Saturation Index. *Jour. A.W.W.A.*, 30, p.85.
- DOROSCHEWSKI et DWOTSCHANTSCHNICK, 1913. *Journal Soc. chim. russe*, t. 45.
- DUMORT (J.C.), 1966. Rapport de fin de mission. C.G.I. BUEA-DOUALA-W. Rapport BRGM. n° YAO-66-A5⁵, Service des Mines, Yaoundé.
- DUMORT (J.C.), 1967. Caractères chimiques de trois volcanismes du Cameroun. (Rapport de la mission métallogénie prévisionnelle des volcanismes du Cameroun). *Bull BRGM.*, n° 3, p.21-75.
- DUMORT (J.C.), 1968. Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 avec notice explicative. Feuille Douala-Ouest. *Dir. Mines et Géol. du Cameroun*, Yaoundé, 69 p.
- DUNLAP (H.F.) and HAWTHORNE (R.R.), 1951. The calculation of water resistivities from chemical analyses. *Journ. of Petroleum Technology*, sect. 1, technical note, v. 67, p. 17.
- DUPLAN (L.), 1973. Les grands linéaments de la France. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 276, 22, p. 2947-2949.

- ELLIS (A.J.), 1965. Geochemistry in volcanic hydrothermal areas. in Problems of geochemistry, Khitarov edit. 1965, Israel Program for Scientific Translation, 1969, p. 176-189.
- ELLIS (A.J.), MAHON (W.A.J.), 1964. Natural hydrothermal systems and experimental hot water rock interactions (I). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28, 8, p. 1323-1357.
- ELLIS (A.J.), MAHON (W.A.J.), 1967. Natural hydrothermal systems and experimental hot water-rock interactions (II). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, 4, p. 519-538.
- FACCA (G.) et TONANI (F.), 1967. The self-sealing geothermal field. *Bull. Volcanologique*, 30, p.271-273.
- FICKENDEY (D.), 1911. Die Mineralquellen in Banjo und Ngaundere. - Amstblatt für das Schutzgebiet Kamerun, Buea, 15 déc., 1911, n° 24, p. 549-50. Arch. du Service des Mines Yaoundé.
- FONTES (J.C.), GLANGEAUD (L.), GONFIANTINI (R.), *et al.*, 1963. Composition isotopique et origine des eaux et gaz thermaux du Massif Central. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 256, 2, p. 472-474.
- FOUILLAC (C.) et MICHARD (G.), 1973. Évaluation des quantités d'éléments solubilisés lors de l'altération des minéraux alumino-silicatés (résumé). 1ère réunion ann. Sci. Terre, Paris, mars 1973, p.191.
- FOURMARIER (P.), 1958. Hydrogéologie (3e partie : Les eaux thermales et les eaux minérales p. 237-259). Masson, Paris, 2e édi., 294 p.
- FREY (R.), 1933. Les analyses d'eau et leur interprétation géologique. *Mém. Serv. Mines et Carte Géol. Maroc*, n° 26, 68 p.
- GANEEV (I.G.), 1968. On the dissolution mechanism and migration forms of silica in Alkaline hydrothermal solutions. *Geochemistry Internat.*, 5, 3, p.613.
- GARRELS (R.M.), 1959. Genesis of some ground water from igneous rocks. in Researches in Geochemistry, P.H. Abelson edit. t II, p. 405-420.
- GARRELS (R.M.) and CHRIST (C.L.), 1965. Solutions, Minerals, and Equilibria. Harper's geoscience series, New York, 450 p.
- GAZEL (J.), 1947. Le calcaire au Cameroun Français. *Bull. Soc. d'Ét. Camerounaises* n° 17-18, p.21-39.
- GAZEL (J.), et GERARD (G.), 1954. Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 avec notice explicative, feuille Batouri-Est. *Dir. Mines et Géol.*, Yaoundé, 43 p.
- GAZEL (J.) *et al.*, 1956. Carte géologique du Cameroun à 1/1.000.000. Atlas du Cameroun, ORSTOM, Yaoundé.

- GESLIN (M.) et LEPAPE (A.), 1930. Sur la composition (gaz ordinaires et gaz rares) des gaz spontanés de la source Baré (Terri. du Cameroun). *Bull. Soc. fr. Minéral.*, 53, p. 274-278.
- GEZE (B.), 1943. Géographie physique et géologie du Cameroun Occidental. *Mém. du Muséum d'Hist. Nat.*, 17, p. 1-272.
- GEZE (B.), 1972. Les roches volcaniques et la volcanologie. in *Géologie tome 1. Encyclopédie de la Pléiade*, NRF édit, Paris, p. 532-606.
- GHAFOURI (M.R.H.), 1968. Étude hydrogéologique des sources thermominérales des Pyrénées. Thèse. Doct. Univ. Mention SCI. Bordeaux, 280 p. multigr.
- GLANGEAUD (L.), BLAVOUX (B.), FONTES (J.C.) *et al.*, 1967. Utilisation des méthodes isotopiques dans l'étude des eaux minérales. *Presse thermique et climatique*, 104, p. 66-69.
- GOGUEL (J.), 1971. La température des eaux souterraines. *Presse thermique et climatique*, 108, 3, p. 149-151.
- GOLDSCHMIDT (V.M.), 1962. *Geochemistry*. Alex Muir, ed., London, 730 p.
- GONI (J.), 1966. Contribution à l'étude de la localisation et de la distribution des éléments traces dans les minéraux et les roches granitiques. *Mém. BRGM*, n° 45, 68 p.
- GUILLERD (A.), 1941. Contrôle de l'analyse d'une eau minérale par sa résistivité électrique. *Ann. Inst. Hydrol. et Climat.*, 13, 48, p.131-141.
- GUIRAUDIE (C.), 1955. Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 avec notice explicative, feuille Ngaoundéré-Ouest. *Dir. Mines et Géol. du Cameroun*, Yaoundé, 23 p.
- HELGESON (H.C.), BROWN (T.H.), LEEPER (R.H.), 1969. Handbook of theoretical activity diagrams depicting chemical equilibria in geologic system involving minerals and aqueous phase at one atm. and 0-300°C. Freeman, Cooper and Co, San Francisco, 256 p.
- HEM (J.D.), 1961. Calculation and use of ion activity. *U.S. Geol. Surv. Water supply paper*, 1535 C, 17 p.
- HODGMAN (C.D.), 1951. Handbook of chemistry and physics. 33e éd., Cleveland.
- HOLLAND (H.D.), 1972. Granites, Solutions, and Base Metal Deposits. *Economic Geology*, 67, 3, p. 281-301.
- HOPPE (W.), 1972. Zurfrage der Herkunft des Kochsalzgehalts der Mineralwasser in ostthüringisch-vogtländischen Schiefergebirge und der angrenzenden Gebiete. *Geologie*, Berlin, 21, 2, p. 133-148.
- HUMBEL (F.X.), 1966. Contribution pédologique à l'étude géomorphologique de l'Adamaoua. ORSTOM, Yaoundé, 27 p. multigr.

- ICHIKUNI (M.), 1959. Une considération sur la formation de l'ion sulfate dans les eaux thermales. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 17, n° 1-2, p. 6-10.
- ISNARD (P.), MALLET (J.L.), CAZES (P.) *et al.*, 1972. Corrélations géologiques. Méthodes statistiques de traitement des données. *in* Traité d'Informatique Géologique, Masson édit., Paris, p. 379-536.
- IVANOV (V.V.), 1967. Principal geochemical environments and processes of the formation of hydrothermal waters in regions of recent volcanic activity. *in* Chemistry of the Earth's Crust, vol. 2, p.260-281. A.P. Vinogradov édit. - Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1967.
- IVANOV (V.V.), BARABANOV (L.N.), PLOTNIKOVA (G.N.), 1968. The main genetic types of the Earth's Crust mineral waters and their distribution in the USSR. *Internat. Geol. Congr., 23e Sess.*, 1968, t.17, p.33-39.
- JACQUOT (E.) et WILLM, 1894. Les Eaux Minérales de la France. Librairie Polytechnique Béranger, Paris, 602 p.
- KACURA (G.), FRANKO (O.), GAZDA (S.), *et al.*, 1969. Thermal and Mineral Waters of Czechoslovakia. *Internat. Geol. Congr., 23e Sess.*, 1968, t. 18, p.17-29.
- KISSIN (I.G.), PAKHOMOV (S.I.), 1967. The possibility of carbon dioxide generation at depth at moderately high temperatures. Dokl. Earth. Sci. Sect, trad.U.S. de Dokl. Akad. Nauk. S.S.S.R., 174, 6, p. 181-183.
- KOCH (P.), 1953. Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 avec notice explicative, feuille Banyo. *Dir. Mines et Géol. Cameroun*, Yaoundé, 47 p.
- KOCH (P.), 1955. Le Précambrien de la frontière occidentale du Cameroun central. Thèse Doct. Ing. Nancy. Texte réduit et modifié *in* Bull. Dir. Mines Géol. Cameroun, 1959, n° 3, 302 p.
- KRAUSKOPF (K.B.), 1967. Introduction to geochemistry. Mac Graw Hill, New York, 721 p.
- KRENKEL (E.), 1925. Geologie Afrikas (3 vol.). Berlin, Bornträger, 1918 p., 47 pl., 411 fig.
- LAGACHE (M.), 1965. Contribution à l'étude de l'altération des feldspaths dans l'eau entre 100 et 200°C sous diverses pressions de CO₂ et application à la synthèse des minéraux argileux. *Bull. Soc. fr. Minéral. Crist.*, 88, p. 223-253.
- LANGELIER (W.F.), 1936. The analytical control of anticorrosion water treatment. *J.A.W.W.A.*, 28, 10, p. 1500-1521.
- LANGELIER (W.F.), 1942. Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *J.A.W.W.A.*, 34, p. 335-352.
- LASSERRE (M.), 1958. Étude géologique de la partie orientale de l'Adamaoua (Cameroun Central). Thèse Univ. Clermont, 206 p. multigr., 1 carte h.t.

- LASSERRE (M.) et CHATONIER (D.), 1958. Les principales sources minéralisées de l'Adamaoua (Cameroun Central). Thèse (2e sujet) Univ. Clermont XXV, 50 p. multigr., 2 cartes h.t.
- LASSERRE (M.), 1961. Étude géologique de la partie orientale de l'Adamaoua. Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000. Feuille Ngaoundéré-Est. *Bull. Dir. Mines et Géol. du Cameroun*, n° 4, Yaoundé, 130 p. Ce mémoire est un résumé des deux thèses citées précédemment.
- LASSERRE (M.), 1966-a. Confirmation de l'existence d'une série de granites tertiaires au Cameroun. *Bull. BRGM*, n° 3, p. 141-148.
- LASSERRE (M.), 1966-b. Nouvelles mesures d'âges absolus par la méthode au strontium-rubidium concernant les formations cristallines et cristallophylliennes du Cameroun. BRGM, Yaoundé et Paris. 17+IX p. multigr.
- LASSERRE (M.), 1969-a. Cameroun : Examen des résultats géochronologiques obtenus depuis 1967. *Ann. Fac. Sc. Clermont Ferrand*, n° 41, p. 29-31, 5e Coll. Géol. Afr.
- LASSERRE (M.), 1969-b. Remarques sur la géologie du Cameroun. *Ann. Fac. Sc. Clermont-Ferrand*, 41, p. 32-33, 5e Coll. Géol. Afr.
- LASSERRE (M.) et VIVIER (G.), 1973. Étude géochimique des massifs cristallins du Cameroun. 7e Coll. Géol. Afr., Florence, avril 1973.
- LAUNAY (L. de), 1899. Recherche, Captage et Aménagement des sources thermominérales. Librairie Polytechnique Baudry Paris, 642 p.
- LE FUR (Y.), 1965. Mission socle-crétacé. Rapport BRGM non publié.
- LE MARÉCHAL (A.), 1969. Inventaire des sources thermominérales de l'Adamaoua. ORSTOM, Yaoundé, 96 p. multigr.
- LE MARÉCHAL (A.), 1970. Les sources thermominérales de l'Adamaoua. Analyses chimiques et utilisation. ORSTOM, Yaoundé, 32 p. multigr.
- LE MARÉCHAL (A.), 1971. Les sources thermominérales de l'Ouest-Cameroun. ORSTOM, Yaoundé, 52 p. multigr.
- LE MARÉCHAL (A.) et TEIL (H.), 1973. Applications de quelques traitements statistiques aux données hydrochimiques des sources thermominérales du Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol V, n° 2, à paraître.
- LE MARÉCHAL (A.) et VINCENT (P.M.), 1971. Le fossé crétacé du Sud Adamaoua (Cameroun). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. III, n° 1, p. 67-83.
- LEPELTIER (C.), 1969. A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic geology*, 64, p. 538-550.

- LOGAN (J.), 1961. Estimation of electrical conductivity from chemical analysis of natural waters. *Jour. Geophys. Research*, 66, p. 2479-2483.
- LOPEZ DE AZCONA (J.M.), 1969. Aguas minerales y termales de Espana. *Internat. Geol. Congr.*, 23e Sess., 1968, t. 18, p. 113-125.
- LOUVRIER (N.) et MONITION (L.), 1971. Acquisition de la composition chimique des eaux minérales. *Presse thermale et climatique*, Fr, 108, 3, p. 141-148.
- LOUVRIER (N.) et VUILLAUME (Y.), 1971. Études des sources thermominérales à l'aide des méthodes statistiques et isotopiques. *Presse thermale et climatique*, Fr, 108, 3, p. 152-154.
- MARCE (A.), 1971. Éléments d'hydrogéologie isotopique. Applications aux sources minérales d'Évian et du Mont Dore. *Presse thermale et climatique*, Fr, 108, 3, p.
- MARCILLE (M.R.), 1959. Analyse des eaux notablement minéralisées. *Chim. Anal.*, Fr., t 8, 41, n° 3, p. 105-109.
- MARINELLI (G.), 1963. L'énergie géothermique en Toscane. *Ann. Soc. Géol. de Belg.*, 85, n° 10, p. B 417 - 438.
- MARTIN (M.), 1958. Relation entre la résistivité des eaux et leur composition chimique. *Rev. Inst. Fr. Pétrole et Ann. Comb. liquides*, 13, 6, p. 987-996.
- MASSON (D.), MARTIN (R.), RICHARD (C.), *et al.*, 1973. Étude par chromatographie gazeuse des fluides carboniques du faciès granulite. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 276, sér. D, n° 4, p. 461 - 464.
- MAUCHA (R.), 1932. Hydrochemische Methoden in der Limnologie. Die Binnengewässer von Aug. Thienemann, 12, 87-89.
- MICHARD (G.) et TREUIL (M.), 1969. Réflexions sur l'utilisation des corrélations entre éléments traces en géochimie. *Bull. Soc. Géol. France*, 7, XI, p.595-598.
- MORET (L.), 1946. Les sources thermominérales. Hydrogéologie - Géochimie-Biologie. Masson éd., Paris, 146 p.
- MUFFLER (L.J.P.) and WHITE (D.E.), 1968. Origin of CO₂ in the Salton Sea Geothermal system, Southeastern California, USA. *International. Geol. Congr.*, 23e Sess., 1968, vol.17, p. 185-194.
- MURAT (R.C.), 1972. Stratigraphy and Palaeogeography of the Cretaceous and lower Tertiary in Southern Nigeria. *in African Geology*, University of Ibadan, déc.1970, Dessauvage and Whiteman, édit., Ibadan 1972, p. 251-266.
- NICOLAS (J.), 1956. Contribution à l'étude géologique et minéralogique de quelques gisements de kaolin bretons. Thèse, Fac. Sci, Paris, 254 p.
- PALMER (C.), 1911. The geochemical interpretation of water analysis. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, n° 479, 31 p.

- PASSARGE (S.), 1910. Geomorphologische Probleme aus Kamerun. Zeit. der Gesell. für Erdkunde, Berlin, p. 448-465.
- PEDRO (G.), 1960. Altération expérimentale des roches sous atmosphère de CO₂. C.R. Acad. Sci., Paris, 250, p. 2035-2037.
- PEDRO (G.), 1968. Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse, Fac Sci. Paris, Édit. INRA Paris.
- PEIRIER, 1928. Eau de Baré. Prétexte d'un futur sanatorium. *Journal officiel des Territoires du Cameroun*, n° 195 du 15/7/1928.
- PEPIN (D.), PETIT (J.), GARDES (A.), *et al.*, 1973. Étude spectrographique des éléments traces des eaux minérales. 1 - Analyse directe du résidu sec. 2 - Dosage de quelques éléments après extraction : Cu, Ni, Sn, Ag, Pb, V, Mo. *Analisis*, 2, 5, p. 337-342. et 2, 8, p. 549-555.
- PERONNE (Y.), 1969. Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 avec notice explicative. Feuille Wum-Banyo. *Dir. Mines et Géol. Cameroun*, Yaoundé, 49 p.
- PINTA (M.), 1962. Recherches et dosage des éléments traces. Dunod, Paris, 726 p.
- PIPER (A.M.), 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 25, p. 914-923.
- RANKAMA (K.) and SAHAMA (T.G.), 1950. Geochemistry. Chicago Univ. Press, 912 p.
- ROBERT (D.), 1970. Le thermalisme, une clé vers la géologie du socle. *Rev. Industr. Minérale, Fr*, 52, n° 4, p. 265-79.
- ROBERSON (C.E.), FETH (J.H.), SEABER (P.R.) *et al.*, 1963. Differences between field and laboratory determination of pH, alkalinity and specific conductance of natural water. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 475 C, p. 212-215.
- ROCH (E.), 1953. Itinéraires géologiques dans le nord du Cameroun et le sud-ouest du Territoire du Tchad. *Bull. Serv. Mines, Yaoundé*, n° 1, 132 p.
- SCHOELLER (H.), 1956. Géochimie des eaux souterraines. Application aux eaux des gisements de pétrole. I.F.P., Édition Technip., Paris, 213 p.
- SCHOELLER (H.), 1962. Les eaux souterraines. Masson édit. Paris, 642 p.
- SCHOELLER (H.), 1968. La silice des sources thermominérales des Pyrénées. *C.R. Acad. Sci. Fr*, D, 266, 22, p. 2175-2177.
- SHARMA (G.D.), 1970. Influence of CO₂ on silica in solution. *Geochem. J. Jap.*, 3, 4, p. 213-223.
- STABLER, 1911. The mineral analysis of water for industrial purposes and its interpretation. *U.S. Geol. Surv. Water-supply paper*, n° 274.

- SUCHEL (J.B.), 1971. La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Université du Cameroun. Fac. Lettres et Sciences humaines, 286 p. multigr.
- THUIZAT (R.), 1973. I. Les sources thermominérales de Chatelguyon et leur environnement géologique (Massif Central Français). II. Étude de la composition isotopique de l'argon contenu dans les gaz d'accompagnement de certaines sources minérales du Puy de Dôme, de l'Allier, du Cantal et de la Creuse. Thèse Docteur de Spécialité (Pétrographie). Clermont Ferrand, 145 p. multigr.
- TONANI (F.), 1971. La géochimie parmi les méthodes de prospection de l'énergie géothermique. *Ann. Mines*, mai 1971, p.41-60.
- TOURET (J.), 1973. Les fluides carboniques du faciès granulite. 1ère réunion ann. Sci. Terre. Paris, mars 1973, p.399.
- TREUIL (M.), FAUCHERRE (J.) et MACQUAR (J.C.), 1970. Contribution à l'étude du comportement géochimique de quelques éléments métalliques dans la sédimentogenèse. *Mineral. Deposita* (Berl.), 5, p. 1-22.
- TRICHET (J.), 1970. Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques. Trav. Labo. Géol. Ec. Norm. Sup. Paris, n° 4, 152 p.
- URBAIN (P.), 1967. Géochimie et hydrogéologie des enveloppes aqueuses et des eaux thermominérales. Paris, Libr. sci. tech. A. Blanchard, 115 p.
- VERNADSKI (W.), 1930. Sur la classification et sur la composition chimique des eaux naturelles. *Bull. Soc. Fr. Minéral*, 53, p. 417-443.
- VIBERT (A.), 1966. Résistivité électrique et minéralisation globale. *Techn. Sci. Municip., Fr*, 61, 1, p. 51-55.
- VINCENT (P.M.), 1968. Attribution au Crétacé de conglomérats métamorphiques de l'Adamaoua (Cameroun). *Ann. Fac. Sci. Cameroun*, n° 1, p.69-76.
- VINCENT (P.M.), 1969-a. Le problème des relations entre caldeiras et ring-structures ; l'exemple du Cauldron de Golda Zuelva (Cameroun). Int. Symp. on Volcanology (I.A.V.C.E.I.) « Volcanoes and their roots », Oxford, septembre 1969.
- VINCENT (P.M.), 1969-b. Mécanisme de la mise en place d'un trapp composite : le Tarso Ourari, Tibesti (Sahara du Tchad). *Ann. Fac. Sc. Cameroun*, 1969, n° 3, p. 93-99.
- VINCENT (P.M.), 1971, New data about Cameroon Mountain volcano. Proceedings of sixth Coll. on African Geology, Leicester, 1971. *Jour. of the Geol. Soc.*, London, v. 127, p. 414-415.
- VINCENT (P.M.), 1973. Le Cameroun. *in Encyclopedia of Earth Sciences*, vol 8, ed. by R.W. Fairbridge, New York (à paraître).

- VINCENT (P.M.) et ARMSTRONG (R.L.), 1973. Le volcanisme du plateau Kapsiki (Nord-Cameroun) et les formations sédimentaires sous-jacentes. *7ème Coll. Géol. Africaine*, Florence, avril 1973.
- VINOGRADOV (A.P.), 1967. Gas regime of the earth. *in* Chemistry of the Earth's crust, vol. 2, p. 1-19, A.P. Vinogradov, édit. Israel program for scientific translations, Jerusalem 1967.
- WEECKSTEEN (G.), 1957. Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 avec notice explicative. Feuille Douala-Est. *Dir. Mines et Géol. Cameroun*, Yaoundé, 30 p.
- WHITE (D.E.), 1957-a. Thermal waters of volcanic origin. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 68, p. 1637-1658.
- WHITE (D.E.), 1957-b. Magmatic, connate and metamorphic waters. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 68, p. 1659-1682.
- WHITE (D.E.) et BRANNOCK (W.W.), 1950. The sources of heat and water supply of thermal springs, with particular reference to Steamboat springs (Nevada). *Trans. Amer. Geophys. Un.*, 31, 4, p. 566-574.
- WHITE (D.E.), BRANNOCK (W.W.), MURATA (K.J.), 1956. Silica in hot spring waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 10, p. 27-59.
- WHITE (D.E.) and WARING (G.A.), 1963. Volcanic Emanations. *in* Data of Geochemistry, *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 440 K, K 1 à K 29.
- WILSON (R.C.), 1928. Notes on the geology of the Mamfe Division Cameroons Province. *Geol. Surv. Nigeria, Occ. Paper*, n°6.
- ZIMMERMANN (J.L.), 1973. Étude par spectrométrie de masse de la composition des fluides dans quelques cordiérites du Sud de la Norvège. 1ère réunion ann. Sci. Terre, Paris, mars 1973, p. 418.

ANNEXES

TABLEAU 1 - COMPOSITION CHIMIQUE DES ROCHES DU SOCLE

Nos 1 à 15 : région de l'ADAMAOUA

Nos 16 à 28 : ouest de l'ADAMAOUA : région de BANYO

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	71.96	71.50	72.60	71.75	66.45	66.45	65.87	72.65	74.85	64.10	67.2	63.97	75.45
Al ₂ O ₃	13.32	13.65	13.20	14.2	17.0	14.60	16.41	14.60	14.00	16.25	16.25	16.01	13.25
Fe ₂ O ₃	0.76	1.90	1.85	1.35	1.52	2.15	1.92	0.60	1.10	2.60	1.28	3.41	1.30
FeO	2.48	1.00	0.70	1.2	2.01	1.80	0.72	0.85	0.35	2.35	2.59		0.15
MgO	0.41	0.80	0.60	0.78	1.55	1.90	0.29	1.15	T	1.80	0.95	1.85	0.70
CaO	1.57	1.50	1.00	1.5	1.99	3.10	1.31	1.70	0.75	3.20	1.76	3.30	0.80
Na ₂ O	4.10	3.60	3.40	3.79	2.86	3.55	4.01	3.55	3.50	4.70	2.40	3.40	3.75
K ₂ O	3.74	4.95	4.80	2.78	3.94	4.50	5.84	4.55	4.60	4.35	6.04	5.03	4.80
TiO ₂	0.30	0.45	0.20	0.36	0.25	0.65	0.22	0.10	0.25	0.45	0.1	0.91	0.20
P ₂ O ₅	0.15	0.40	0.70	0.06	0.46	0.50	1.69	0.10	0.10	0.30	0.48	0.32	0.20
MnO	0.50	T	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	T	0.05	0.1	-	-	T
H ₂ O ⁺	0.14	0.05	0.35	0.33	1.40	0.55	1.15	0.40	0.40	0.55	0.7	0.61	0.30
H ₂ O ⁻	0.43	0.00	0.41	1.92	0.26	0.05	0.20	0.10	0.00	0.05	0.42		0.00
Total	99.86	99.80	99.86	100.06	99.73	99.85	99.66	100.35	99.95	100.90	100.17	98.81	99.60

	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
SiO ₂	76.40	75.55	75.30	74.70	69.65	69.10	68.36	71.70	74.50	71.00	75.05	75.25	76.10
Al ₂ O ₃	13.15	13.40	13.40	14.10	14.60	17.15	12.69	13.30	11.45	14.80	12.05	11.00	10.60
Fe ₂ O ₃	0.70	1.10	0.10	0.70	0.70	T	6.62	1.30	T	1.55	2.50	2.65	2.15
FeO	0.30	0.30	0.98	0.23	1.57	1.06	0.60	2.24	1.84	0.60	0.15	0.45	0.15
MgO	0.85	1.25	0.38	0.72	2.10	0.95	0.63	0.25	1.95	1.40	0.00	1.95	1.70
CaO	0.55	0.55	1.50	1.28	2.10	2.65	2.44	1.15	1.83	1.60	0.50	0.45	0.40
Na ₂ O	3.45	3.20	3.45	3.60	3.54	3.60	3.41	3.85	2.80	3.55	3.70	3.80	3.35
K ₂ O	4.10	4.40	4.80	4.05	4.50	5.10	4.53	4.50	5.30	5.05	4.25	4.15	4.25
TiO ₂	T	T	0.30	0.15	0.40	0.55	0.55	0.30	0.30	0.35	0.20	0.40	0.45
P ₂ O ₅	T	T	0.04	0.09	0.04	0.28	0.16	0.08	0.03	0.10	0.80	0.10	0.15
MnO	0.05	0.05	-	-	-	-	-	-	-	T	T	T	T
H ₂ O ⁺	0.05	0.20	0.35	0.30	0.75	0.30	0.68	0.52	0.40	0.40	0.85	0.30	0.60
H ₂ O ⁻	0.10	0.00	0.20	0.20	0.10	0.10	0.06	0.28	0.20	0.18	0.15	0.00	0.00
Total	99.70	100.00	100.80	100.12	100.05	100.84	100.73	99.47	100.60	100.50	100.20	100.50	99.90

TABEAU 1

COMPOSITION CHIMIQUE DES ROCHES DU SOCLE

ORIGINE DES ANALYSES

- 1 — Granite à biotite de Ngaoundéré. Éch. G (56) 137. Analyse n° 7163. Direction des Mines et de la Géologie. Yaoundé, 1956. Analyste Pollet (M. Lasserre).
- 2 — Granite de Ngaoundéré. Éch. Cam 76. Analyse n° 5194. Département de Géologie et de Minéralogie. Clermont-Ferrand, 1970. Analyste S. Couturié (M. Lasserre).
- 3 — Granite de Ngaoundéré. Éch. Cam 312. Analyse n° 4339. Département Géol. Min. Clermont-Ferrand, 1968. Analyste Mme Cantagrel (M. Lasserre).
- 4 — Granite de Ngaoundéré (bordure). Éch. G (56) 134. An. n°7161. D.M.G. Yaoundé, 1956. Analyste Pollet (M. Lasserre).

Ces quatre échantillons représentent le type des granites syntectoniques tardifs parfois circonscrits, à tendance alcaline, souvent à structure porphyroïde.

- 5 — Granite syntectonique tardif monzonitique à biotite, Km 40 de la route Ngaoundéré-Meiganga. Éch. G (56) 126. An. n°D471. D.M.G. Yaoundé, 1957. Analyste Pollet (M. Lasserre).
- 6 — Granite syntectonique ancien à biotite de Maina, Km 20 de la route Ngaoundéré-Minim. Éch. Cam. 77. An. n° 4580. Départ. Géol. Min. Clermont-Ferrand, 1969. Analyste S. Couturié (M. Lasserre).
- 7 — Granite syntectonique tardif alcalin. Km 80 de la route Ngaoundéré Meiganga. Éch. G (54) I. An. n° D463. D.M.G. Yaoundé, 1957. Analyste Pollet (M. Lasserre).
- 8 — Granite syntectonique ancien de Gumbela route Ngaoundéré-Meiganga. Éch. Cam 73. An. n° 4182. Départ. Géol. Min. Clermont-Ferrand, 1968. Analyste S. Couturié (M. Lasserre).
- 9 — Granite syntectonique ancien d'Anloa NE de Ngaoundéré. Éch. Cam. 75. An. n° 4349. Dépt. Géol. Min. Clermont-Ferrand, 1968. Analyste Mme Sérangé (M. Lasserre).
- 10 — Granite syntectonique tardif du Djérem discordant. Éch. G (57) 12. An. n° 877. Dépt. Géol. Min. Clermont-Ferrand. Analyste P. Lapadu - Hargues (M. Lasserre).
- 11 — Granite de Ouak. N de Ngaoundéré. Calcoalcalin porphyroïde. Éch. G (56) 12. Analyse n° D468. D.M.G. Yaoundé, 1957. Analyste Pollet (M. Lasserre).
- 12 — Granite syntectonique ancien tchabal Barkedje près de Martap (Adamaoua). Éch. Ba 1. Analyse Labo. Géol. Appli. Paris, 1966. (cf. Belinga, 1966).

TABLEAU 1 (suite) - COMPOSITION CHIMIQUE DES ROCHES DU SOCLE
Nos 29 à 45 : ouest du CAMEROUN

	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
SiO ₂	55.62	51.06	66.60	60.40	68.40	73.40	57.20	71.70	61.40	65.40	68.00	64.90	72.00
Al ₂ O ₃	16.84	19.87	15.90	18.90	14.00	13.50	17.00	14.80	17.80	17.60	16.50	17.50	16.40
Fe ₂ O ₃	3.99	4.00	0.08	0.64	2.03	1.21	0.85	0.78	1.55	1.05	0.94	0.91	0.14
FeO	5.14	5.64	6.77	5.40	3.06	1.57	5.20	2.14	4.27	2.06	1.64	2.64	0.85
MgO	4.33	5.97	2.52	2.48	1.44	0.47	2.95	0.22	2.34	0.80	0.67	1.11	0.47
CaO	6.67	6.00	2.55	5.41	3.34	1.61	5.82	1.17	4.72	2.22	1.95	3.00	1.39
Na ₂ O	3.07	2.10	1.86	3.38	4.45	4.12	4.29	2.50	3.86	3.74	3.65	3.92	3.72
K ₂ O	1.63	2.16	2.10	1.38	1.68	2.27	3.10	5.30	2.06	4.40	5.00	4.06	3.95
TiO ₂	0.95	1.85	0.75	0.60	0.12	0.10	0.40	0.15	0.25	0.28	0.20	0.45	0.05
P ₂ O ₅	0.31	0.84	0.11	0.17	0.17	0.10	0.73	0.10	0.16	0.20	0.14	0.23	0.08
MnO	-	-	0.21	0.14	0.04	0.04	0.11	0.11	0.18	0.07	0.04	0.07	T
H ₂ O ⁺	0.72	0.49	0.76	0.60	1.20	1.00	1.40	0.70	1.10	1.80	1.10	0.90	0.70
H ₂ O ⁻	0.04	0.07	0.24	0.20	0.30	0.30	0.50	0.10	0.10	0.40	0.30	0.30	0.20
Total	99.29	100.05	100.45	99.70	100.23	99.69	99.55	99.77	99.79	100.02	100.13	99.99	99.95

	40	41	42	43	44	45
SiO ₂	73.60	65.50	71.80	64.40	65.60	67.10
Al ₂ O ₃	15.80	16.70	15.00	16.70	19.10	14.90
Fe ₂ O ₃	0.27	0.88	0.45	1.67	1.27	0.90
FeO	1.00	0.78	0.25	2.38	1.71	3.35
MgO	0.30	0.30	0.10	1.68	0.70	T
CaO	1.17	1.03	1.75	2.74	1.78	2.56
Na ₂ O	3.65	6.55	2.60	4.50	4.05	3.50
K ₂ O	5.00	5.50	4.50	4.60	4.75	6.00
TiO ₂	0.08	T	-	0.17	0.40	0.90
P ₂ O ₅	0.06	0.16	0.10	0.30	0.16	0.36
MnO	T	T	0.02	0.07	0.03	0.07
H ₂ O ⁺	0.60	1.65	2.35	0.40	0.65	0.20
H ₂ O ⁻	0.20	0.75	1.15	0.10	0.25	0.10
Total	99.73	99.80	100.07	99.71	100.45	99.84

- 13 — Granite intrusif d'Anloa discordant NE de Ngaoundéré. Éch. Cam 75. An. n° 4239. Dépt. Géol. Min. Clermont-Ferrand, 1968. Analyste Mme Cantagrel (M. Lasserre).
- 14 — Idem. Éch. Cam 142. An. n° 6114. 1972. Analyste Mme Sérange (M. Lasserre).
- 15 — Idem. Éch. Cam 143. An. n° 6114. 1972. Analyste Mme Sérange (M. Lasserre).
- 16 — Granite à 2 micas NE de Banyo. Éch. PK 49-330. An. D.M.G. Yaoundé (P. Koch).
- 17 — Éch. PK 49-416 (P. Koch).
- 18 — Granite à amphibole PK 49-293 (P. Koch).
- 19 — Granite porphyroïde à biotite PK 50-43 (P. Koch).
- 20 — Granite porphyroïde à amphibole PK 49-367 (P. Koch).
- 21 — Granite à biotite PK 49-361 (P. Koch).
- 22 — Granite à biotite PK 49-365 (P. Koch).
- 23 — Granite ancien de Sabongari. Cam. 205. An. n° 4183. Dpt. Géol. Min. Clermont-Ferrand, 1968. Analyste S. Couturié (M. Lasserre).
- 24 — Granite ultime de Sabongari. Cam 203. An. n° 4240. Dépt. Géol. Min. Clermont-Ferrand, 1968. Analyste Mme Cantagrel (M. Lasserre).
- 25 — Idem. Cam 204. An. n° 5236. Clermont-Ferrand, 1970. Mme Couturié (M. Lasserre).
- 26 — Microgranite ultime de Sabongari. Cam. 202. An. n° 5237. Clermont-Ferrand, 1970. Mme Couturié (M. Lasserre).
- 27 — Gneiss à amphibole 3 km au N de Banyo. PK 52-44 (P. Koch).
- 28 — Gneiss à amphibole et pyroxène 11 km au S de Banyo. PK 53-89. (P. Koch).
- 29 — Gneiss à biotite, sillimanite, grenat. DCB 205. An. n° 501. (J.C. Dumort).
- 30 — Gneiss à biotite, DCB 350. An. n° 502. (J.C. Dumort).
- 31 — Gneiss à biotite et hornblende verte. DCB 13. An. n° 9464. (J.C. Dumort).
- 32 — Gneiss à biotite. DCB 14. An. n° 9465 (J.C. Dumort).
- 33 — Gneiss à biotite et hornblende verte. DCB 26. An. n° 9467 Yaoundé (J.C. Dumort).
- 34 — Gneiss à biotite et hornblende verte. DCB 36. An. n° 9469. Yaoundé (J. C. Dumort).
- 35 — Gneiss à biotite et hornblende verte. DCB 37. An. n° 9470. Yaoundé (J.C. Dumort).
- 36 — Granite d'anatexie entre Mamfé et Kumba DCB 39. An. n° 9471 (J.C. Dumort).
- 37 — Granite d'anatexie entre Mamfé et Kumba. DCB 42. An. 9472. (J.C. Dumort).
- 38 — Granite d'anatexie entre Mamfé et Kumba. DCB 44. An. 9473. (J.C. Dumort).

- 39 – Granite d'anatexie entre Mamfé et Kumba. DCB 47. An. 9474 (J. C. Dumort).
- 40 – Granite d'anatexie entre Mamfé et Kumba. DCB 48. An. 9475 (J. C. Dumort).
- 41 – Granite à 2 micas de Bamenda DCB 141. An. 9475 (J. C. Dumort).
- 42 – Granite à 2 micas syntectonique non circonscrit de Bangangté. DCB 141. An. 9524 (J. C. Dumort).
- 43 – Granite à biotite syntectonique non circonscrit entre Mamfé et Bamenda. DCB 388 An. 9678 (J. C. Dumort).
- 44 – Granite à biotite et hornblende verte syntectonique circonscrit S de Mamfé. DCB 97 An. 9519 (J. C. Dumort).
- 45 – Granite porphyroïde syntectonique circonscrit de Kompani DCB 1056. An. 9568. (J. C. Dumort).

**TABLEAU 2 – RÉPERTOIRE ET LOCALISATION
DES SOURCES THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN**

N °	Nom	Arrondissement	Long. (E du Méridien international)	Lat. (Nord)
ADAMAOUA				
1	ALME	Tignère	12°27' 55"	7°48' 25"
2	BA	Meiganga	14 43 30	6 56 35
3	BAJANGA	Ngaoundéré	14 00 35	7 17 10
4	BAJAO	Meiganga	18 06 10	7 08 55
5	BAJERE	Ngaoundéré	13 45 30	7 16 00
6	BAKARI BATA ou MANDIM	Ngaoundéré	14 14 40	7 03 35
7	BARKEJE	Meiganga	14 45 40	7 00 50
8	BEMLARI	Tignère	12 13 30	7 44 25
9	BERA	Ngaoundéré	13 51 25	7 14 45
10	BONJONG	Ngaoundéré	13 37 35	7 16 40
11	BORKOU	Tcholliré	14 29 55	7 16 00
12	BUDEL	Tignère	12 13 50	7 58 30
13	BURLEL 1	Tignère	12 18 55	7 37 15
14	DAMFILI	Tibati	13 00 00	6 96 00
15	DARSO	Tibati	13 07 30	6 46 45
16	DÉODÉO	Tignère	12 02 10	7 28 25
17	DJAMBUTU	Tignère	12 31 20	7 08 55
18	DJAORO AYUBA	Ngaoundéré	13 43 45	7 22 10
19	DJIKIM	Tignère	12 41 15	7 17 05
20	DONKERE	Tignère	12 13 35	7 46 25
21	DOTIA	Ngaoundéré	13 41 05	6 35 30
22	DOUA	Tcholliré	14 37 30	7 08 40
23	DZIR KOYA	Meiganga	14 40 25	6 56 00
24	FALKOUMRE	Tignère	12 35 30	7 19 35
25	FARO	Ngaoundéré	13 05 45	7 23 20
26	FUFANA	Ngaoundéré	13 07 25	7 22 25
27	FURUM	Tignère	12 13 05	7 59 00
28	GADE	Tcholliré	14 37 05	7 12 35
29	GALIM	Tignère	12 28 20	7 05 35
30	GANGASAOU	Ngaoundéré	13 46 35	7 33 35
31	GASANGEL 1	Tignère	12 31 40	7 12 50
32	GASANGEL 2	Banyo	11 55 50	7 03355
33	GBASUM	Meiganga	14 07 30	6 42 10
34	GBENGUBU	Meiganga	14 26 30	6 46 30

35	GIE	Ngaoundéré	14°24' 55	7°06' 20"
36	GOGARMA	Ngaoundéré	14 15 30	7 18 25
38	GUISIRE	Tignère	12 24 25	7 25 10
39	IDOJE	Ngaoundéré	13 11 20	7 19 55
40	KADAM	Ngaoundéré	14 15 50	7 18 30
41	KANTALAN	Ngaoundéré	13 20 40	7 21 15
42	KATIL FOULBE	Ngaoundéré	13 56 00	7 06 00
43	KOULANIA	Meiganga	14 25 15	6 45 50
44	LAOBALA	Ngaoundéré	13 58 45	7 27 55
45	LAOBABLEWA 1	Ngaoundéré	13 42 25	7 11 00
46	LAOBABLEWA 2	Ngaoundéré	13 32 30	7 12 20
47	LAODOMA	Ngaoundéré	13 32 40	7 18 20
48	LAOFURU	Ngaoundéré	13 35 25	7 12 10
49	LAOGEFI	Ngaoundéré	13 30 00	7 18 05
50	LAOKOUBONG	Ngaoundéré	13 23 50	7 22 20
51	LAOPABA	Ngaoundéré	13 25 25	7 08 50
52	LAOPANGA	Ngaoundéré	13 41 00	7 11 10
53	LASUM	Tignère	12 17 35	7 44 10
54	LAWEL	Tignère	12 37 30	7 17 00
55	LELINGEL	Banyo	11 45 00	6 56 55
56	MALAO	Meiganga	14 02 20	6 46 40
57	MAMA	Meiganga	13 54 20	6 39 15
58	MARBOUI	Ngaoundéré	13 43 15	7 06 05
59	MARMA	Ngaoundéré	13 29 25	7 13 30
60	MARPA	Ngaoundéré	13 31 25	7 11 55
61	MASOLA	Ngaoundéré	13 46 40	7 17 10
62	MASUEL	Ngaoundéré	13 28 45	7 22 05
63	MATARI	Ngaoundéré	13 28 10	7 16 30
64	MAYANG	Tignère	12 38 50	7 17 50
65	MAYO BALÉO	Tignère	12 16 00	7 41 25
66	MAYO DARLÉ	Banyo	11 32 50	6 30 00
67	MAYO LIDI	Tignère	12 06 55	7 23 05
68	MAYO SUFI	Tibati	12 40	6 47
69	MBAWA	Ngaoundéré	13 49 20	7 09 10
70	MINIM	Tibati	12 48 40	6 57 35
71	NAGESE	Meiganga	14 22 45	6 46 45
72	NALTI	Tignère	12 28 00	7 49 30
73	NDOETAYO	Ngaoundéré	13 05 55	7 23 40
74	NGAOUNDAMJI	Ngaoundéré	14 08 55	7 17 35
75	NGOK	Ngaoundéré	14 14 25	7 20 05
76	NGOURA	Ngaoundéré	14 24 20	7 00 20
77	NIALAN	Banyo	11 35 25	6 37 00
78	NIAMSUMRE	Banyo		
79	NIDOUNGA	Tignère	12 37 45	7 18 00
80	OASENDE	Meiganga	13 55 45	6 41 25
81	PATARLAY	Tignère	12 19 40	7 37 35
82	PERKI	Tignère	12 40 40	7 21 00
83	PINKOU	Tignère		
84	POLLA	Tignère	12 54 35	7 28 40
85	SAY HOURI	Ngaoundéré	13 53 55	7 07 20
86	SAMBOLABBO	Banyo	11 59 30	7 04 30
87	SEP SEP DJARANDI	Meiganga	14 58 40	7 05 00
88	SEP SEP MALOKO	Meiganga	13 27 50	6 21 20
89	SOFOL	Tignère	12 14 00	7 57 05
90	SORBERE	Banyo	11 48 15	6 55 10
91	VINA	Ngaoundéré	13 35 45	7 13 10

92	VOURE MBA	Banyo	11°54' 50"	6°59' 30"
93	VOURE YELEL	Banyo	11 55 45	6 58 55
94	WOULNDE	Tignère	12 28 30	7 26 10
95	YAISUNU	Meiganga	14 48 20	7 01 35
96	YOUNGOUAWA	Tignère	12 36 45	7 17 05
97	BURLEL 2	Tignère	12 01 25	7 29 25
98	MALAM JUBAIRU	Tignère	12 03 50	7 28 15
99	MAMDUGU	Tignère	12 04 20	7 29 25
100	MBERDUGA	Tignère	12 09 20	7 30 00

OUEST-CAMEROUN

101	ABANG	Manjo	9 45 50	4 56 40
102	AHIO-EKANJO	Bangen	9 41 30	4 56 30
103	ATOKI	Manjo	9 46 35	4 55 15
104	AYUKABA	Mamfé	9 08 50	5 41 55
105 a et b	BAMBUI 1 et 2	Bamenda	10 16 25	6 02 35
			10 15 25	6 01 50
106 a et b	BARE 1 et 2	Mélong	9 58 00	5 00 35
			9 57 20	5 00 30
107	EBUKU	Mélong	9 58 10	5 02 50
108	FONGAKIE	Bamenda	10 15 45	6 03 25
109	FOSSETTE	Foumbot	10 38 40	5 29 25
110	FOUNDONG METEUF	Wum	10 14 20	6 19 25
111	GESEL	Ndop	11 20 25	6 01 15
112	JICHAMI	Njinikom	10 22 50	6 09 15
113	KUCHUANTUM	Foumban	10 38 55	5 36 45
114	KOUTABA	Foumban	10 50 10	5 42 10
115	LOBE	Ekundu Titi	9 05 25	4 34 25
116	LUIH	Bamenda	10 15 00	6 06 05
117	MANENGOUBA	Nkongsamba	9 53 10	4 57 20
118	MBUEDUM	Mélong	9 55 20	5 08 30
119	MELONG	Mélong	9 59 05	5 09 45
120	NDI	Wum	10 18 20	6 26 30
121	NDIBISI	Bangen	9 45 00	5 06 00
122	NGOL	Manjo	9 46 10	4 51 45
123	NILLI	Njinikom	10 16 30	6 02 00
124	NSOUNG	Manjo	9 49 55	5 00 00
125	NTEM	Nwa	11 00	6 20
126	NYOS	Wum	10 17 55	6 27 15
127	BALIKUMBAT	Ndop		
128	EBINSI	Mamfé	9 09 15	5 41 20
129	MTAKAN	Mamfé	9 08 55	5 40 40
130	AKAN-MBENIAN	Mamfé	9 01 25	5 42 55
131	EPEN	Bangen		

SOURCES SIGNALÉES NON VUES

GORKO YAGA	Tignères
MABOR	-
MBANA	-
LISE	-
LASUM 2	-
MAKONG	-
AMARUABI	-
JOLDU	-
KOJOLI	-
KOLBILA	-
KULA	-
LAMTI	-
MAFU	-
MAYO SELBE	-
TAPARE	-
TIKARE	-
WAJIRI	-
YUWARE	-
NGULNGA KARO	-
HAMAN FAJIRI	Banyo
LOFINGEL	Banyo

TABLEAU 3 a
ANALYSES DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN
(p. 158 à 163)

Unités :

Température en degrés Celsius

Conductivité en micromhos par cm à 25°C

Teneurs de HCO_3 , CO_3 , Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, en milliequivalents par litre.

Minéralisation, résidu sec, CO_2 , SiO_2 et Fe_2O_3 en milligrammes par litre.

Éléments traces en microgrammes par litre.

T = traces

— = non déterminé

+ = supérieur à

Les échantillons marqués d'un astérisque ont été analysés seulement au laboratoire sauf pH et conductivité.

TABLEAU 3 a - ANALYSES DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temp.	22.0	19.6	23.8	40.0	19.8	20.0	23.0	25.4	18.8	16.8
pH	7.8	6.6	5.8	8.7	5.7	5.9	6.5	6.9	6.2	6.7
Cond.	810	380	905	500	795	165	1605	1350	3640	1910
HCO ₃	8.0	3.8	9.8	1.6	10.0	2.0	20.1	6.0	42.0	16.0
CO ₃	0	0	0	11.2	0	0	0	0	0	0
Cl	2.0	0.15	0.1	0.56	0.1	0.14	0.21	0.91	0.91	5.2
SO ₄	0.15	0.28	0.1	0.99	0	0.13	0.09	6.98	2.8	0.1
Som.An.	10.15	4.23	10.0	4.35	10.1	2.27	20.4	13.89	45.71	21.3
Ca	1.2	1.35	2.8	0.05	3.2	0.65	8.0	1.75	2.6	7.0
Mg	0.8	0.35	2.6	0.125	3.3	0.75	4.5	0.3	9.4	6.2
Na	8.52	3.30	5.04	5.78	3.09	0.26	6.78	10.7	15.78	8.3
K	0.36	0.07	1.72	0.05	0.39	0.05	0.44	0.49	2.77	0.77
Som.Cat.	10.88	5.07	12.26	6.006	9.98	1.71	19.72	13.84	37.55	22.27
Min.	810	360	880	340	795	160	1620	1045	3505	1600
R.S.	534	327	746	364	920	163	1388	1135	2268	1354
CO ₂	100	56	375	0	420	56	320	70	760	160
SiO ₂	21.0	35.2	49.6	42.6	45.45	16.8	53.4	51.4	36.0	26.40
Fe ₂ O ₃	00.14	0.07	2.80	0.07	10.81	3.70	0.06	12.72	0	2.16
Mn	27	3	150	0.4	270	16	-	560	-	270
Pb	16	3	2	1.1	2.8	0.5	-	3.4	-	4
Mo	11	3	2	11	1	0.1	-	3.4	-	1.3
Sn	C.5	0.3	22	0.4	140	4.8	-	11	-	1.3
V	27	80	60	1.1	73	0.5	-	11	-	130
Cu	21	6.5	22	11	73	4.8	-	11	-	40
Ni	0.5	1	7.5	1.1	46	0.5	-	17	-	1.3
Co	0.5	0.3	0.7	0.4	2.8	1.6	-	11	-	1.3
Ti	42	10	150	11	+920	4.8	-	340	-	130
Cr	1.6	1	7.5	1.1	90	C.5	-	1	-	13
Sr	+530	+330	+750	360	+920	16	-	340	-	+1300
Ba	530	65	7.5	3.6	920	16	-	110	-	270
Li	160	98	110	280	180	16	-	34	-	1300

	11 K	13	14 K	15 K	16	17	20 K	21 K	22 K	23 K
Temp.	16.8	27.3	25.6	22.6	28.5	19.8	26.4	19.4	22.2	28.0
pH	-	7.55	-	-	6.8	5.9	-	-	-	-
Cond.	280	1635	340	365	1920	2540	3150	350	360	440
HCO ₃	15.5	15.5	3.1	3.5	7.0	30.0	0.10	3.9	2.7	3.8
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0	1.06	0	T	1.27	0.18	0.7	0	0.82	0
SO ₄	0	2.3	0	0	10.9	0.19	27.0	0	0	0
Som.An.	2.8	18.86	3.1	3.5	19.17	30.37	27.8	3.9	3.52	3.8
Ca	2.1	1.4	2.2	0.90	2.6	8.2	6.10	0.85	0.69	1.7
Mg	1.3	0.6	0.92	0.58	1.2	5.8	1.93	1.1	0.11	0.54
Na	-	12.61	0.2	2.1	12.61	12.43	-	-	4.1	-
K	-	0.56	T	T	0.54	3.92	-	-	0.09	-
Som.Cat.	-	15.17	3.32	3.58	16.95	30.35	-	-	4.38	-
Min.	-	1440	250	285	13.70	2520	-	-	380	-
R.S.	240	1095	210	270	1347	1490	2300	320	295	250
CO ₂	-	120	-	-	60	720	-	-	-	-
SiO ₂	45	56.2	21	69	49.6	39.45	15	68.5	108	34
Fe ₂ O ₃	-	3.89	-	-	0.62	0.26	-	-	-	-
Mn	-	110	-	-	40	-	-	-	-	-
Pb	-	1.1	-	-	13	-	-	-	-	-
Mo	-	3.3	-	-	4	-	-	-	-	-
Sn	-	1.1	-	-	4	-	-	-	-	-
V	-	22	-	-	20	-	-	-	-	-
Cu	-	11	-	-	1.3	-	-	-	-	-
Ni	-	11	-	-	4	-	-	-	-	-
Co	-	1.1	-	-	1.3	-	-	-	-	-
Ti	-	1100	-	-	40	-	-	-	-	-
Cr	-	1.1	-	-	1.3	-	-	-	-	-
Sr	-	880	-	-	+1300	-	-	-	-	-
Ba	-	220	-	-	13	-	-	-	-	-
Li	-	110	-	-	270	-	-	-	-	-

TABLEAU 3a (suite) – ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

	24	28	29	30	31	32	33	34	36 ^x	37
Temp.	28.0	19.8	19.8	20.2	17.6	22.8	21.6	29.0	25.6	21.6
pH	6.2	6.0	6.25	6.2	6.2	5.7	7.55	7.35	-	7.2
Cond.	2940	2420	4000	2060	3900	1310	950	275	520	1280
HCO ₃	39.0	34.0	52.0	22.0	55.0	16.0	1.9	3.7	3.6	16.0
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0.28	0.17	0.21	0.28	0.32	0.28	1.0	0.14	0.	0.28
SO ₄	0.14	0	0.26	0.04	0	0.08	6.07	0.06	0	0.14
Scm.An.	39.42	34.17	52.47	22.32	55.32	16.36	8.97	3.90	3.6	16.42
Ca	5.9	16.0	2.4	2.2	7.2	4.6	1.8	1.25	0.65	5.5
Mg	6.1	12.0	1.2	6.8	3.8	3.65	0.2	0.4	0.72	6.0
Na	15.57	4.3	20.87	11.65	19.13	7.04	8.43	1.96	-	3.43
K	3.38	0.64	1.97	1.33	3.10	1.13	0.18	0.07	-	0.64
Com.Cat.	30.95	32.94	26.44	21.98	33.23	16.42	10.61	3.68	-	15.57
Min.	3080	2665	3800	1760	4115	1335	680	310	-	1280
R.S.	1733	1791	2697	4173	2592	1029	721	240	390	1108
CO ₂	520	650	600	380	700	760	12	20	-	200
SiO ₂	29.4	41.6	21.15	16.35	25.1	38.0	27.0	33.2	19	33.0
Fe ₂ O ₃	0	1.9	0	0.73	0	-	0.07	0.01	-	-
Mn	-	180	-	1500	-	100	2.2	-	-	-
Pb	-	1.8	-	4.4	-	3.1	2.2	-	-	-
Mo	-	1.3	-	1.5	-	1	7.2	-	-	-
Sn	-	9	-	74	-	15	0.7	-	-	-
V	-	5.4	-	150	-	51	22	-	-	-
Cu	-	5.4	-	44	-	10	14.4	-	-	-
Ni	-	5.4	-	29	-	3.1	2.2	-	-	-
Co	-	1.8	-	44	-	4	0.7	-	-	-
Ti	-	54	-	150	-	31	22	-	-	-
Cr	-	1.8	-	15	-	3.1	2.2	-	-	-
Sr	-	1400	-	+1470	-	+1000	+720	-	-	-
Ba	-	900	-	+1470	-	310	22	-	-	-
Li	-	54	-	300	-	820	140	-	-	-

	38	40	41 ^x	42	43	44	45	46 ^x	48	49 ^x
Temp.	25.4	21.2	21.0	40.0	26.0	18.8	23.4	20.8	24.4	17.6
pH	6.6	5.9	-	7.4	7.5	6.4	6.1	-	5.8	-
Cond.	3100	1145	640	415	390	2710	1565	290	1685	840
HCO ₃	40.0	14.5	5.9	3.6	2.8	36.0	20.0	2.8	8.0	8.0
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0.7	0.14	0.18	0.44	0.42	0.63	0.21	T	9.72	0.2
SO ₄	0.38	0.17	T	0.16	0.97	T	0.36	0	0.08	0
Scm.An.	41.03	14.81	6.08	4.2	4.19	36.63	20.57	2.8	17.80	8.2
Ca	9.0	5.0	1.6	0.6	1.7	4.5	8.0	1.5	4.4	6.0
Mg	5.2	5.0	1.3	0.1	0.4	8.5	6.5	2.0	4.35	4.7
Na	14.87	4.0	3.0	5.57	2.74	14.83	6.20	-	8.57	-
K	1.97	0.44	0.24	0.1	0.10	1.1	0.51	-	0.49	-
Scm.Cat.	31.04	14.44	6.14	6.37	4.94	28.93	21.21	-	17.81	-
Min.	3115	1165	490	390	330	2800	1645	-	1195	-
R.S.	1937	1004	450	332	312	1950	1307	210	1178	540
CO ₂	400	540	-	14	20	600	360	-	340	-
SiO ₂	57.6	39.2	69	42.6	25.2	31.6	58.8	51	41.2	68.5
Fe ₂ O ₃	2.50	-	-	1.97	0.0	0	6.29	-	0.50	-
Mn	39	10	-	33	94	-	200	-	120	-
Pb	58	3	-	1	3.1	-	3.9	-	1.2	-
Mo	2	10	-	1	3.1	-	1.3	-	1.2	-
Sn	2	20	-	3.3	0.9	-	100	-	5.9	-
V	39	100	-	0.3	78	-	100	-	12	-
Cu	2	30	-	17	31	-	65	-	3.5	-
Ni	5.8	10	-	1	0.9	-	10	-	3.5	-
Co	5.8	1	-	1	0.3	-	1.3	-	1.2	-
Ti	58	100	-	66	9.4	-	390	-	35	-
Cr	2	30	-	3.3	9.4	-	25	-	1.2	-
Sr	+1900	+1000	-	100	+310	-	+1300	-	1200	-
Ba	390	200	-	10	62	-	+1300	-	350	-
Li	390	1000	-	100	94	-	260	-	120	-

TABLEAU 3a (suite) – ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

	50	51 *	52	53	54	55	56	57	58	60
Temp.	18.1	22.0	40.0	28.8	16.8	21.6	25.4	24.2	21.2	15.4
pH	7.8	-	6.0	7.1	6.0	6.4	8.1	7.0	6.2	6.0
Cond.	720	355	1870	1370	2390	2820	300	895	1930	1260
HCO ₃	5.7	2.4	20.0	18.2	30.0	34.0	3.2	0.9	22.0	16.4
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0.28	0.2	0.70	0.85	0.14	1.84	0.21	0.70	0.5	0.14
SO ₄	1.48	0	0.87	2.4	0.13	1.46	0.15	6.88	0.61	0
Som.An.	7.46	2.6	21.57	16.45	30.27	37.3	3.56	8.48	23.37	16.54
Ca	0.8	0.38	6.5	0.95	7.6	7.55	0.35	1.64	9.4	7.5
Mg	0.2	0.49	7.5	1.35	4.4	3.95	0.10	0.16	6.6	5.5
Na	7.83	-	7.26	9.70	12.57	14.65	4.43	7.83	8.43	2.43
K	0.21	-	0.51	0.46	1.74	3.59	0.05	0.18	0.54	0.36
Som.Cat.	9.04	-	21.77	12.46	26.31	29.74	4.93	9.81	24.97	15.79
Min.	635	-	1680	1225	2405	2895	315	630	1880	1290
R.S.	518	260	1492	1135	1254	1645	235	667	1334	1141
CO ₂	24	-	560	110	400	600	8	8	440	400
SiO ₂	-	18	73.9	54.6	40.0	29.2	-	-	54.4	44.4
Fe ₂ O ₃	2.93	-	0.24	1.36	0.37	0.26	2.79	0.28	1.99	0.75
Mn	41	-	300	110	-	160	0.2	13	-	110
Pb	1.6	-	4.5	3.4	-	16	2.3	2	-	3.4
Mo	52	-	30	3.4	-	1.6	4.7	2	-	1.1
Sn	5.2	-	15	11	-	1.6	0.2	0.7	-	110
V	10	-	75	17	-	49	4.7	6.7	-	91
Cu	1.6	-	45	11	-	1.6	2.3	6.7	-	91
Ni	1.6	-	1.5	11	-	4.9	2.3	2	-	34
Co	0.5	-	1.5	3.4	-	1.6	0.2	0.7	-	1.1
Ti	10	-	120	1100	-	49	12	6.7	-	570
Cr	0.5	-	15	3.4	-	1.6	2.3	2	-	34
Sr	+520	-	+1500	1100	-	+1600	+230	670	-	+1100
Ba	52	-	750	560	-	490	70	20	-	+1100
Li	52	-	450	90	-	290	230	20	-	230

	61	62	63 *	64	65	66	67	68 *	69	70	71
Temp.	18.2	18.8	23.0	20.0	25.2	22.8	37.0	21.8	15.0	22.8	19.8
pH	5.4	6.3	-	6.3	7.9	7.6	6.8	-	6.5	8.9	7.1
Cond.	865	3170	650	970	1845	1500	1140	110	3120	530	640
HCO ₃	10.0	42.4	5.3	13.0	16.0	8.0	8.6	1.0	42.0	1.2	3.6
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0
Cl	0.14	0.41	0.12	0.21	1.12	7.80	0.63	0	0.28	0.59	0.42
SO ₄	0.08	0.22	0	0	5.0	0.14	2.63	0	0.27	2.33	2.72
Som.An.	10.22	43.04	5.42	13.21	22.1	15.94	11.86	1.0	42.55	4.52	6.74
Ca	3.6	16.8	4.0	2.2	1.6	1.6	1.0	0.4	11.6	0.22	2.8
Mg	4.4	19.2	2.8	2.3	0.35	0.4	0.5	0.22	20.4	0.03	1.2
Na	2.43	7.65	-	5.91	14.30	11.30	9.87	0.4	10.17	6.65	4.0
K	0.46	0.59	-	0.69	0.85	0.28	0.41	T	0.82	0.08	0.13
Som.Cat.	10.89	44.24	-	10.80	17.10	13.58	11.78	1.02	42.99	6.38	8.13
Min.	820	3370	-	1030	1655	1110	940	80	3325	380	540
R.S.	933	1833	410	588	1534	915	750	140	1785	358	491
CO ₂	500	560	-	260	80	-	120	-	600	0	36
SiO ₂	50.8	51.15	36.5	18.75	51.4	19.2	62.2	36	47.25	49.0	24.6
Fe ₂ O ₃	18.59	7.51	-	-	31.81	0.10	2.32	T	-	0.68	0.06
Mn	280	-	-	590	230	910	75	-	-	3.6	98
Pb	2.8	-	-	1.8	4.6	23	11	-	-	3.6	1.5
Mo	0.9	-	-	0.6	4.6	2.7	2.2	-	-	11	0.5
Sn	93	-	-	13	15	2.7	2.2	-	-	1.1	1.5
V	75	-	-	59	23	27	11	-	-	7.2	9.8
Cu	47	-	-	18	15	2.7	0.7	-	-	11	9.8
Ni	28	-	-	5.9	15	2.7	2.2	-	-	1.1	1.5
Co	2.8	-	-	12	4.6	0.9	0.7	-	-	0.3	0.5
Ti	+940	-	-	120	770	27	22	-	-	36	15
Cr	93	-	-	12	4.6	0.9	0.7	-	-	3.6	1.5
Sr	750	-	-	+590	1500	+920	+750	-	-	+360	+490
Ba	470	-	-	+590	460	460	220	-	-	3.6	49
Li	93	-	-	13	150	91	220	-	-	110	49

TABLEAU 3a (suite) – ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

	72	74	75	76	77	79	80	81	82	84
Temp.	24.5	20.0	20.4	21.0	23.4	20.6	19.8	25.0	20.0	21.8
pH	7.1	6.3	5.8	7.5	6.8	6.3	-	7.7	5.8	6.3
Cond.	1140	3470	1450	745	1475	2890	405	1350	315	2730
HCO ₃	4.4	50.0	17.2	8.4	9.0	36.0	2.6	12.4	3.4	40.0
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0.75	0.15	0.14	0.28	1.69	0.28	0	0.84	0.14	0.21
SO ₄	6.44	0.13	0.15	0.09	5.46	0.19	T	2.30	0.18	0.06
Som. An.	11.61	50.28	17.49	8.77	15.15	36.47	2.6	15.63	3.72	40.27
Ca	2.0	11.0	6.2	2.0	2.3	6.6	0.69	1.8	2.2	15.5
Mg	1.2	31.0	7.8	1.6	0.6	5.4	C	0.8	1.0	12.0
Na	8.87	6.57	2.64	5.83	11.13	14.20	-	11.26	0.52	4.09
K	1.33	0.9	0.56	0.49	0.56	3.38	-	0.46	0.13	0.62
Som. Cat	13.40	49.42	17.20	9.92	14.59	30.27	-	14.22	3.85	32.21
Min.	915	3840	1360	740	1205	2895	-	1225	295	3620
R.S.	2067	2500	1228	559	1033	1718	-	1063	557	2346
CO ₂	-	800	440	60	120	400	-	100	135	500
SiO ₂	45.4	38.0	47.0	44.6	32.6	35.4	23.5	57.2	31.65	34.2
Fe ₂ O ₃	33.06	0.14	-	0.14	0.21	0.80	-	6.23	0	-
Mn	310	500	240	66	150	-	-	530	56	-
Pb	6.2	7.5	61	2	21	-	-	3.2	17	-
Mo	6.2	2.5	1.2	13	3.1	-	-	1	0.6	-
Sn	31	2.5	24	9.9	1	-	-	5.3	17	-
V	31	75	98	66	31	-	-	11	56	-
Cu	21	50	24	20	1	-	-	11	83	-
Ni	31	7.5	24	6.6	3.1	-	-	11	0.6	-
Co	21	2.5	1.2	C.7	1	-	-	1	0.6	-
Ti	2100	75	61	660	31	-	-	320	56	-
Cr	10	2.5	12	20	1	-	-	1	11	-
Sr	62	+2500	+1200	+660	+1040	-	-	530	+560	-
Ba	620	1250	370	130	520	-	-	110	560	-
Li	62	370	37	66	210	-	-	85	17	-

	85	86	87	88	90	91	92	93	94	95
Temp.	16.2	22.6	30.0	23.0	22.0	20.0	23.8	23.6	74.0	23.0
pH	6.1	6.2	8.45	6.0	5.9	6.4	5.3	5.9	6.6	6.3
Cond.	1550	300	540	705	2130	5630	2050	1780	1530	2320
HCO ₃	20.0	3.2	3.04	7.0	25.0	41.0	28.0	22.4	19.0	31.5
CO ₃	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0.21	0.29	0.49	0.17	0.56	32.4	0.14	0.14	0.63	0.14
SO ₄	0.14	0.02	0.92	0.15	0.04	T	0.95	0.27	0.37	0.14
Som. An.	20.35	3.52	4.85	7.32	25.60	70.4	29.09	22.91	20.0	31.78
Ca	7.0	0.45	0.1	1.8	6.5	20.0	9.0	8.5	1.6	16.0
Mg	7.0	0.65	0.1	1.7	4.0	12.0	8.0	6.5	0.8	6.8
Na	5.78	0.70	6.26	2.35	10.78	16.96	7.76	5.27	13.13	8.04
K	0.26	0.31	0.05	0.74	3.08	1.81	2.62	1.97	1.18	0.51
Som. Cat	20.04	2.11	6.51	6.59	24.36	50.27	27.38	22.84	16.71	31.35
Min.	1605	250	410	580	2095	4650	2315	1855	1590	2540
R.S.	1242	-178	352	750	1152	3262	1138	1053	1122	1825
CO ₂	420	36	0	-	-	560	750	500	200	1040
SiO ₂	34.2	14.6	21.2	55.5	32.2	53.6	35.0	43.6	36.6	53.4
Fe ₂ O ₃	0	-	0.07	55.77	-	2.25	0.10	0.04	C.72	3.58
Mn	37	+180	3.5	220	230	65	1.1	3.2	220	910
Pb	12	1.8	1.1	22	1.1	98	11	3.2	3.4	1.8
Mo	12	0.2	180	2.2	1.1	3.3	34	1	3.4	1.8
Sn	3.7	0.2	0.3	150	9.2	3.3	35.7	5.3	34.	1.8
V	37	5.3	3.5	22	3.4	65	57	53	34	5.3
Cu	3.7	5.3	11	22	3.4	3.3	23	21	56	5.3
Ni	3.7	0.5	1.1	22	3.4	9.8	23	3.2	1.1	5.5
Co	1.2	1.8	0.3	0.7	1.1	3.3	11	1	1.1	1.8
Ti	37	8.9	11	750	34	98	23	21	220	55
Cr	3.7	0.5	0.3	22	1.1	3.3	34	10	11	1.8
Sr	-1200	+180	+350	750	920	+3300	1100	+1100	+1100	1500
Ba	620	180	35	370	920	650	57	530	+1100	1500
Li	120	18	+350	37	110	650	910	840	1100	55

TABLEAU 3a (suite) – ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

	97	98	99	100	101	102	103	104	105b ^x	106a
Temp.	25.4	23.3	26.0	33.0	25.2	28.0	23.6	28.6	26.0	25.8
pH	7.7	7.1	7.1	6.7	5.6	5.9	6.3	6.8	-	5.9
Cond.	1440	2110	605	725	460	1365	2330	39500	1780	1520
HCO ₃	6.0	3.0	4.0	6.0	5.4	16.2	31.0	13.0	12.0	18.4
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6	0
Cl	0.7	0.35	0.28	0.14	0.28	1.22	0.28	462	0.24	0.82
SO ₄	7.78	19.9	2.10	1.30	0.09	0.16	0.18	0.05	0	0.38
Som.An.	14.48	23.25	6.38	7.44	5.77	17.58	33.24	475.05	13.84	19.60
Ca	1.5	9.9	1.4	1.8	1.0	3.3	6.9	2.2	0.36	5.7
Mg	0.4	2.6	0.8	0.9	1.3	3.0	7.1	4.05	3.6	2.1
Na	11.17	10.82	5.70	6.30	2.20	6.52	8.30	369.6	9.4	7.83
K	0.87	0.41	0.36	0.31	0.33	1.02	0.49	1.61	0.6	1.00
Som.Cat	13.94	23.73	8.26	9.31	4.83	13.84	22.79	377.46	13.96	16.63
Min.	1090	1645	540	635	445	1335	2240	25845	1080	1515
R.S.	1038	1768	399	468	338	866	1402	27232	920	906
CO ₂	26	24	24	50	660	950	800	60	-	1000
SiO ₂	46.0	49.6	50.2	50.6	39.4	44.2	47.2	13.0	42	32.9
Fe2O ₃	1.53	1.89	0.34	1.09	14.19	4.06	9.52	0.34	-	11.73
Mn	52	180	0.4	4.7	+340	690	280	-	-	450
Pb	10	26	0.4	4.7	6.8	3.7	14	-	-	91
Mo	21	5.3	4	4.7	0.3	0.9	1.4	-	-	0.9
Sn	1	1.8	0.4	1.4	17	0.9	1.4	-	-	9.1
V	10	26	8	14	5.1	4.3	21	-	-	27
Cu	1	1.8	8	9.4	1.7	0.9	1.4	-	-	9.1
Ni	3.1	5.3	1.2	1.4	3.4	0.9	1.4	-	-	0.9
Co	1	1.8	0.4	0.5	3.4	0.9	1.4	-	-	0.9
Ti	31	53	20	70	68	8.7	1.4	-	-	27
Cr	1	1.8	4	4.7	1	0.9	1.4	-	-	0.9
Sr	+1000	+1800	+400	+470	340	260	420	-	-	910
Ba	210	530	80	94	17	26	14	-	-	270
Li	310	350	200	140	10	630	1400	-	-	450

	106b	107	108	109	110 ^x	111	112	113	114
Temp.	26.5	26.4	23.4	29.0	25.0	21.0	21.0	23.8	24.4
pH	5.2	5.8	6.6	6.5	-	7.4	6.2	6.4	4.0
Cond.	510	1540	4710	6700	555	15500	1800	1115	46
HCO ₃	6.1	21.0	46.0	57.0	6.8	272	25.0	14.0	0.4
CO ₃	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0
Cl	0.12	0.58	28.2	0	0.16	29.9	0.20	0.94	0.06
SO ₄	T	T	T	0.53	0	0.5	T	0.02	T
Som.An.	6.22	21.58	74.2	57.53	7.36	292.4	25.20	14.96	0.46
Ca	2.2	4.1	5.2	12.8	1.0	3.5	7.1	1.4	0.05
Mg	1.4	1.9	1.3	20.7	1.4	1.75	3.9	2.45	0.05
Na	1.69	7.29	50	13.8	5.4	226	4.34	1.52	2.08
K	0.18	1.28	0.46	0.36	0.7	3.35	0.36	1.38	1.64
Som.Cat.	5.47	14.57	56.96	47.66	8.5	234.6	15.70	6.75	3.77
Min.	485	1625	5090	4340	620	14655	1830	1030	-
R.S.	378	1004	3140	4178	420	13168	1100	663	16
CO ₂	900	1600	500	700	-	1250	1000	250	1100
SiO ₂	55.0	55.6	30.0	32.4	21.3	14.2	31.2	25.8	8.6
Fe2O ₃	0	5.14	0.60	39.9	-	1.6	3.72	0.91	0.04
Mn	+380	100	65	63	-	-	220	100	-
Pb	3.8	1	3	4	-	-	1	0.6	-
Mo	3.8	1	3	4	-	-	3.3	0.6	-
Sn	0.4	1	3	63	-	-	16	0.6	-
V	11	10	31	84	-	-	33	2	-
Cu	1.1	1	3	12	-	-	1	0.6	-
Ni	0.4	1	3	4	-	-	1	0.6	-
Co	0.4	1	3	4	-	-	1	0.6	-
Ti	38	10	31	21	-	-	11	2	-
Cr	1.1	1	3	4	-	-	1	0.6	-
Sr	190	800	1600	+4200	-	-	+1100	20	-
Ba	38	30	160	42	-	-	330	7	-
Li	3.8	30	3100	2100	-	-	880	530	-

TABLEAU 3a (fin) – ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX THERMOMINÉRALES DU CAMEROUN

	I15	I16	I17	I18	I19	I20	I21	I22	I23	I24
Temp.	49.0	21.0	25.2	24.6	26.6	25.2	28.5	31.0	33.3	35.0
pH	6.2	6.2	5.9	6.0	6.3	4.9	6.3	6.25	6.15	5.7
Cond.	9500	2135	1445	2000	2060	155	3390	3060	2380	755
HCO ₃	32.0	24.5	20.5	24.5	26.0	1.8	42.4	42.0	26.0	8.0
CO ₃	C	0	0	0	0	0	C	0	0	0
Cl ₃	59.5	0.96	0.26	0.60	0.56	0.10	0.5	0.32	0.40	0.24
SO ₄	0.84	0.02	T	T	T	T	T	C:15	T	T
Som. An	92.34	25.48	20.76	25.10	26.56	1.9	42.9	42.47	26.40	8.24
Ca	8.5	5.0	3.8	4.9	4.65	0.4	4.6	17.5	4.2	1.25
Mg	4.3	3.25	1.95	3.2	3.6	0.5	5.4	13.5	2.8	0.95
Na	65.2	8.69	6.43	7.82	8.43	0.78	2.0	5.91	9.95	4.69
K	1.74	1.74	1.07	1.69	1.56	0.68	1.08	0.26	0.47	4.10
Som. Cat.	79.74	18.68	13.25	17.61	18.24	2.36	13.18	37.17	17.42	10.99
Min.	5890	1935	1550	1900	1995	170	3030	3250	1965	805
R.S.	5295	1335	984	1273	1329	96	2146	1340	1543	516
CO ₂	500	800	1050	1100	750	800	980	1050	600	900
SiO ₂	26.6	29.4	53.2	44.6	48.8	21.2	14.2	16.6	51.8	74.4
Fe ₂ O ₃	0.11	5.36	16.10	5.72	2.64	1.64	0.41	15.40	1.60	5.07
Mn	16	130	990	250	40	-	320	27	46	150
Pb	5	1.3	1	1.3	1.3	-	2	1.3	1.5	0.5
Mo	26	1.3	1	1.3	1.3	-	2	1.3	1.5	0.5
Sn	5	13	20	3.8	6.6	-	2	27	1.5	5.2
V	26	27	30	13	20	-	11	1.3	31	7.7
Cu	5	1.3	1	1.3	1.3	-	2	1.3	15	0.5
Ni	5	1.3	1	1.3	1.3	-	2	1.3	1.5	2.6
Co	5	1.3	1	1.3	1.2	-	2	1.3	1.5	0.5
Ti	-	40	30	6.4	270	-	-	27	15	15
Cr	5	1.3	1	1.3	1.3	-	2	1.3	1.5	0.5
Sr	-5300	+1300	150	630	1300	-	2100	-1300	770	77
Ba	530	13	49	64	40	-	64	67	15	5
Li	-5300	13	10	130	130	-	+2100	670	770	150

	I25 #	I26	I28	I29	I30
Temp.	27.0	24.8	28.0	25.4	27.6
pH	-	6.15	6.7	-	6.5
Cond.	1500	1820	51000	25500	63400
HCO ₃	4.3	26.5	-	5.5	23.5
CO ₃	0.3	0	0	0	0
Cl	0.4	0.18	546	270.5	600
SO ₄	9.8	T	0.13	0.14	0.15
Som. An	14.8	26.68	-	276.1	623.65
Ca	0.8	6.5	-	1.1	6.0
Mg	0.36	12.0	-	0.85	8.0
Na	14	0.17	401	122.6	567.7
K	0.9	0.15	2	1.5	0.66
Som. Cat.	16.06	18.62	-	126.0	582.36
Min.	1135	1910	-	12850	36045
R.S.	1100	1124	32220	17052	66472
CO ₂	-	1000	-	35	200
SiO ₂	30	19.0	14.8	12.0	24.6
Fe ₂ O ₃	-	19.0	0.30	2.22	6.31
Mn	-	110	-	-	-
Pb	-	1	-	-	-
Mo	-	1	-	-	-
Sn	-	11	-	-	-
V	-	3.3	-	-	-
Cu	-	1	-	-	-
Ni	-	3.3	-	-	-
Co	-	1	-	-	-
Ti	-	34	-	-	-
Cr	-	1	-	-	-
Sr	-	33	-	-	-
Ba	-	11	-	-	-
Li	-	3	-	-	-

TABLEAU 3 b - TENEUR EN ELEMENTS TRACES DES RESIDUS SECS DES EAUX DE SOURCES THERMOMINERALES DU CAMEROUN (en ppm)

● le signe - signifie : inférieur à

● le signe + signifie : supérieur à

Analyses effectuées au Laboratoire des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à Bondy (M. PINTA).

N°	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li
1	50	30	20	-3	50	40	-3	-3	80	3	+1000	1000	200
2	10	10	10	-3	250	20	-10	-3	30	3	+1000	200	300
3	200	-10	3	30	80	30	10	-3	200	10	+1000	-30	150
4	-3	3	30	-3	-10	30	-10	-3	30	3	1000	-30	800
5	300	-10	-3	150	80	80	50	3	+1000	100	+1000	1000	200
6	100	10	-3	30	-10	30	-10	10	30	3	100	100	100
9	500	3	3	10	10	10	15	10	300	-3	300	100	20
10	200	-10	-3	-3	100	30	-3	-3	100	10	+1000	200	1000
13	100	-3	3	-3	20	10	10	-3	1000	-3	800	200	100
16	30	10	3	3	15	-3	-10	-3	30	-3	+1000	-30	200
28	100	-3	-3	5	-10	3	-10	-3	30	-3	800	500	30
30	1000	-10	-3	50	100	30	20	30	100	10	+1000	+1000	200
32	100	3	-3	15	50	10	-10	-3	30	3	+1000	300	800
33	3	-10	10	-3	30	20	-10	-3	30	3	+1000	30	200
38	20	30	-3	-3	20	-3	-10	3	30	-3	+1000	200	200
40	10	-10	10	20	100	30	10	-3	100	30	+1000	200	1000
42	100	-10	3	10	-3	50	3	3	200	10	300	30	300
43	300	10	10	3	250	100	-10	-3	30	30	+1000	200	300
45	150	-10	10	80	80	50	8	-3	300	20	+1000	+1000	200
48	100	-3	-3	5	10	3	-10	-3	30	-3	1000	300	100
50	80	-10	100	10	20	3	-10	-3	20	-3	+1000	100	100
52	200	-10	20	10	50	30	-3	-3	80	10	+1000	500	300
53	100	3	3	10	15	10	10	3	1000	3	1000	500	80
55	100	10	-3	-3	30	-3	-10	-3	30	-3	+1000	300	250
56	-3	10	20	-3	20	20	10	-3	50	10	+1000	300	1000
57	20	-10	3	-3	10	10	-10	-3	10	3	1000	30	30
60	100	-10	-3	100	80	80	30	-3	500	30	+1000	+1000	200

N°	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li
61	300	-10	-3	100	80	50	30	3	+1000	100	800	500	100
64	1000	-10	-3	30	100	30	10	20	200	20	+1000	+1000	30
65	150	3	3	10	15	10	10	3	500	3	1000	300	100
66	1000	25	3	3	30	3	-10	-3	30	-3	+1000	500	100
67	100	15	3	3	15	-3	-10	-3	30	-3	+1000	300	300
70	10	10	30	3	20	30	-10	-3	100	10	+1000	-30	300
71	200	-10	-3	3	20	20	-10	-3	30	3	+1000	100	100
72	150	3	3	15	15	10	15	10	1000	5	30	300	30
74	200	-10	-3	-3	30	20	-10	-3	30	-3	+1000	500	150
75	200	50	-3	20	80	20	20	-3	50	10	+1000	300	20
76	100	-10	20	15	100	30	10	-3	1000	30	+1000	200	100
77	150	20	3	-3	30	-3	-10	-3	30	-3	+1000	500	200
81	500	3	-3	5	10	10	10	-3	300	-3	500	100	80
82	100	30	-3	30	100	150	-3	-3	100	20	+1000	1000	30
85	30	10	10	3	30	3	3	-3	30	-10	+1000	500	100
86	+1000	10	-3	-3	30	30	-10	10	50	3	+1000	1000	100
87	10	3	500	-3	10	30	-10	-3	30	-3	+1000	100	+1000
88	300	30	3	200	30	30	30	-3	1000	30	1000	500	50
90	200	-3	-3	8	-10	3	-10	-3	30	-3	800	800	100
91	20	30	-3	-3	20	-3	-10	-3	30	-3	+1000	200	200
92	-3	10	30	5	50	20	20	10	20	30	1000	50	800
93	3	3	-3	5	50	20	-10	-3	20	10	+1000	500	800
94	200	-10	3	30	30	50	-3	-3	200	10	+1000	+1000	1000
95	500	-3	-3	-3	-10	3	-10	-3	30	-3	800	800	30

TABLEAU 3 b (suite) – TENEUR EN ELEMENTS TRACES DES RESIDUS SECS DES EAUX
DE SOURCES THERMOMINERALES DU CAMEROUN (en ppm)

N°	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li
97	100	-3	3	-3	-10	5	-10	-3	30	-3	800	300	100
98	100	15	3	-3	15	-3	-10	-3	30	-3	+1000	300	200
99	-3	-3	10	-3	20	20	-10	-3	50	10	+1000	200	500
100	10	10	10	3	30	20	-10	-3	150	10	+1000	200	300

N°	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li
101	+1000	20	-3	50	15	5	10	10	200	3	1000	50	30
102	800	10	-3	-3	5	-3	-3	-3	10	-3	300	30	800
103	200	10	-3	-3	15	-3	-3	-3	10	-3	300	-30	1000
106a	500	100	-3	10	30	10	-3	-3	30	-3	1000	300	500
106b	+1000	10	10	-3	30	3	-3	-3	100	3	500	100	10
107	100	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	10	-3	800	30	30
108	20	-3	-3	-3	10	-3	-3	-3	10	-3	500	50	1000
109	15	-3	-3	15	20	3	-3	-3	5	-3	+1000	-30	500
112	200	-3	3	15	20	-3	-3	-3	10	-3	+1000	300	800
113	150	-3	-3	-3	3	-3	-3	-3	3	-3	30	-30	800
115	3	-3	5	-3	5	-3	-3	-3	nd	-3	+1000	100	+1000
116	100	-3	-3	10	20	-3	-3	-3	30	-3	+1000	-30	10
117	1000	-3	-3	20	30	-3	-3	-3	30	-3	150	50	10
118	200	-3	-3	3	10	-3	-3	-3	5	-3	500	50	100
119	30	-3	-3	5	15	-3	-3	-3	200	-3	1000	30	100
120	800	20	-3	10	5	3	15	-3	200	10	30	-30	-10
121	150	-3	-3	-3	3	-3	-3	-3	3	-3	30	-30	800
122	20	-3	-3	20	-3	-3	-3	-3	20	-3	+1000	50	500

N°	Mn	Pb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li
123	30	-3	-3	-3	20	-3	-3	-3	10	-3	500	-30	500
124	300	-3	-3	10	15	-3	5	-3	30	-3	150	-30	300
126	100	-3	-3	10	3	-3	3	-3	30	-3	30	-30	-10

TABLEAU 7

ANALYSES DE QUELQUES EAUX DE RIVIERES DU CAMEROUN (mêmes unités que les analyses d'eaux thermominérales)

Les numéros correspondent à ceux des sources thermominérales.

ex. : l'échantillon 204 a été prélevé dans une rivière à proximité
immédiate de la source n° 4

204	mayo	Mbére
205	mayo	Bajere
208	mayo	Déo
209	mayo	Béra
210	mayo	Bonjong
224	mayo	Falkoumré
228	mayo	Jijugu
229	mayo	Vouré Galim
230	mayo	Gangasaou
244	mayo	Bala
252	mayo	Mambéré
254	mayo	Paro
258	mayo	Marboui
260	mayo	Marpa
261	mayo	Masola
262	mayo	Masuel
279	mayo	Nidounga
282	mayo	Perki
285	mayo	Say Houri
291	mayo	Vina
294	mayo	Woulndé
Yoké	Yoké river à Muyuka (est du Mt Cameroun)	
Puits	à Ngaoundéré	

TABLEAU 7 a - ANALYSE DE QUELQUES EAUX DE RIVIERES DU CAMEROUN

	204	205	208	209	210	224	228	229	230	244
Temp.	27.0	17.2	31.2	17.2	19.6	20.0	20.2	20.4	19.6	18.0
pH	7.7	5.5	7.85	7.2	6.5	6.0	6.9	6.7	6.9	7.0
Cond.	134	26	102	37	106	41	42.5	29	72	97
HCO ₃	1.5	0.4	1.0	0.5	1.1	0.6	0.6	0.4	1.2	1.0
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl ₃	0.08	0.08	0.1	0.1	0.14	0.1	0.1	0.07	0.1	0.08
SO ₄	0.12	0	0.17	0	0	0	0.13	0	0	0
Som.An.	1.70	0.48	1.27	0.6	1.24	0.7	0.83	0.47	1.3	1.08
Ca	0.475	0.04	0.35	0.1	0.3	0.2	0.16	0.15	0.4	0.5
Mg	0.425	0.10	0.2	0.2	0.5	0	0.24	0	0.4	0.3
Na	0.78	0.04	0.57	0.17	0.45	0.22	0.17	0.35	0.22	0.37
K	0.07	0	0.13	0.03	0.10	0.03	0.05	0.05	0.08	0.05
Som.Cat.	1.75	0.24	1.25	0.50	1.35	0.45	0.62	0.55	1.35	1.22
Min.	135	31	100	43	98.5	50	58.3	37.5	36	87.2
R.S.	129	53	109	62	142	42	50	87	90	116
CO ₂	8	16	8	8	28	8	8	10	4	16
SiO ₂	20.0	14.25	14.6	9.45	8.55	7.05	7.8	11.55	10.2	10.95
Fe ₂ O ₃	-	0.46	0.93	1.13	2.40	0.94	-	-	T	0.43
Mn	-	1.6	22	12	1.4	0.4	10	4.4	3	12
Pb	-	16	3.3	6.2	28	13	2.5	9	27	5.8
Mo	-	0.5	1.1	0.06	0.7	0.04	0.05	0.4	0.7	0.3
Sn	-	1.6	0.3	0.2	1.4	0.04	0.1	2.6	2.7	0.6
V	-	5.3	6.5	5.0	14	1.3	1.5	3.7	5.4	9.3
Cu	-	5	5	4	14	4	3	9	18	12
Ni	-	1.6	1	0.3	1.4	0.04	0.05	3	3	1
Co	-	0.5	0.1	0.06	0.7	0.04	0.05	0.4	0.7	0.1
Ti	-	16	16	20	30	13	10	9	27	20
Cr	-	1.6	5	5	1.4	0.4	3	4	3	3
Sr	-	+50	+110	60	+140	34	50	+90	90	+120
Ba	-	50	110	60	140	40	50	90	120	120
Li	-	1.6	2	1	1.4	1	1	5	3	1

	252	254	258	260	261	262	279	282	285	291	294
Temp.	17.6	18.8	16.2	18.2	17.6	17.2	17.6	20.4	17.4	24.8	22.0
pH	7.6	6.6	7.0	7.1	6.6	6.3	6.4	6.75	7.2	7.1	7.3
Cond.	85	47.5	26.5	50.2	17.9	24.5	54.5	142	17	54.5	125
HCO ₃	1.2	0.6	0.4	0.6	0.2	0.3	0.4	1.6	0.7	0.6	1.4
CO ₃	0.1	0.08	0.	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl ₃	0	0.24	0.1	0.08	0.08	0.08	0.10	0.1	0.1	0.09	0.08
SO ₄	0	0.24	0.14	0	0	0	0	0.14	0	0.05	0
Som.An.	1.3	0.92	0.64	0.60	0.20	0.36	0.5	1.04	0.8	0.74	1.48
Ca	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.15	0.4
Mg	1.0	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0	0.25	0.6
Na	0.30	0.24	0.17	0.35	0.02	0.10	0.26	0.8	0.09	0.22	0.74
K	0.08	0.03	0.03	0.07	0	0	0.05	0.05	0.03	0.05	0.08
Som.Cat	1.78	0.47	0.05	0.72	0.22	0.30	0.51	2.05	0.42	0.67	1.82
Min.	107	62	45.1	54.6	22.8	27.3	39	146	56	55	123
R.S.	111	72	57	61	34	3	69	145	35	240	121
CO ₂	12	8	12	12	4	10	4	20	4	8	5
SiO ₂	16.05	12.60	8.25	14.45	11.55	13.65	9.15	21.15	9.15	14.2	22.85
Fe ₂ O ₃	1.83	0.79	2.69	0.84	0.84	0.73	0.17	0.26	0.57	-	0.34
Mn	8.9	11	3	6	1	0.6	1.4	4.4	1	48	9.7
Pb	5.6	72	57	3	10	0.1	14	9	14	48	6
Mo	0.3	0.4	0.05	0.2	0.03	0.003	0.3	0.4	0.03	0.7	0.4
Sn	0.5	2.9	0.6	0.2	0.3	0.1	2.1	2.6	0.03	7.2	0.6
V	8.9	7.2	2.8	3	1.0	0.06	6.9	8.7	2.1	12	9.7
Cu	11	6	6	4	3	0.2	5	9	3	14	12
Ni	1	3	0.6	0.06	0.3	0.003	2	3	0.03	2	1
Co	0.1	0.4	0.05	0.06	0.03	0.003	0.3	0.4	0.03	0.2	0.1
Ti	20	72	60	6	10	0.6	14	9	14	70	10
Cr	9	1.4	3	3	1	0.03	1.4	4	1	20	7
Sr	+110	72	17	+60	10	3	14	+90	3.5	240	+120
Ba	110	72	60	60	30	+3	20	90	17	240	120
Li	2	4	1.7	0.9	2	0.03	0.06	5	0.3	7	1

TABLEAU 7 a (fin) – ANALYSE DE QUELQUES EAUX DE RIVIERES DU CAMEROUN

	Yoke River	Puits Ngaoundéré
Temp.	25.0	23.2
pH	7.4	5.1
Cond.	230	41.5
HCO ₃	2.3	0.55
CO ₃	0	0
Cl ⁻	0.02	0.1
SO ₄	0.16	T
Som.An.	2.48	0.65
Ca	0.5	0.2
Mg	0.7	0.1
Na	1.04	0.13
K	0.15	0.07
Som.Cat.	2.39	0.50
Min.	196	48
R.S.	155	54
CO ₂	12	60
SiO ₂	17.8	20.55
Fe ₂ O ₃	0.50	0
Mn	15	54
Pb	3.1	5.4
Mo	0.5	0.2
Sn	0.1	0.3
V	3.1	4.3
Cu	0.1	11
Ni	0.1	1
Co	0.1	0.4
Ti	46	5
Cr	1.5	4
Sr	15	+54
Ba	1.5	54
Li	0.5	1

TABLEAU 7 b – TENEURS EN ÉLÉMENTS TRACES DES RÉSIDUS SECS
D'EAUX DE RIVIERES DU CAMEROUN (en /pm)

Voir tableau 7 a pour la signification des numéros

— inférieur à
+ supérieur à

n°	Mn	Fb	Mo	Sn	V	Cu	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li
205	30	300	10	30	100	100	30	10	300	30	+ 1000	+ 1000	30
208	200	30	10	3	60	50	10	- 3	150	50	+ 1000	1000	20
209	200	100	- 3	3	80	60	5	- 3	300	80	1000	+ 1000	20
210	10	200	5	10	100	100	10	5	200	10	+ 1000	1000	10
224	10	300	- 3	- 3	30	100	- 3	- 3	300	10	800	1000	30
228	200	50	- 3	3	90	60	- 3	- 3	200	60	1000	1000	20
229	50	100	5	30	1000	100	30	50	100	50	+ 1000	1000	60
230	30	300	8	30	60	200	30	8	300	30	1000	+ 1000	30
244	100	50	3	5	80	100	8	- 3	200	80	+ 1000	+ 1000	10
252	80	50	3	5	80	100	10	- 3	200	80	+ 1000	1000	20
254	20	1000	5	40	100	80	40	5	1000	20	1000	1000	60
258	50	1000	- 3	10	50	100	10	- 3	1000	50	300	1000	30
260	100	50	- 3	2	50	60	- 3	- 3	100	50	+ 1000	+ 1000	15
261	30	300	- 3	10	30	100	10	- 3	300	30	300	1000	60
262	200	50	- 3	30	20	80	- 3	- 3	200	10	1000	+ 1000	10
278	20	200	5	20	1000	80	30	5	200	20	200	300	- 3
282	50	400	10	40	100	100	40	10	400	50	1000	1000	20
285	20	400	- 3	- 3	60	160	- 3	- 3	400	30	100	500	10
291	200	200	3	20	50	60	10	- 3	300	80	1000	1000	30
294	80	50	3	5	80	100	10	- 3	80	60	+ 1000	+ 1000	10
Yoké	100	20	3	- 3	20	- 3	- 3	- 3	300	10	100	- 30	-10
Puits	1000	100	3	5	80	200	20	8	100	80	+ 1000	+ 1000	20

TABLE DES FIGURES

N°	Page
1 : Schéma oro-hydrographique des régions étudiées.	10
2 : Pluviosité moyenne annuelle au Cameroun.	13
3 : Températures moyennes annuelles au Cameroun.	14
4 : Teneurs en alcalins et alcalino-terreux du socle granito-gneissique du Cameroun.	19
5 : Teneurs en alcalins et alcalino-terreux des roches volcaniques du Cameroun.	23
6 : Schéma illustrant les relations entre les différents types génétiques d'eaux.	40
7 : Schéma de la circulation des eaux thermominérales en terrain fissuré.	42
8 : Histogramme des altitudes de 111 sources thermominérales du Cameroun.	45
9 : État de saturation des eaux thermominérales du Cameroun vis-à-vis du carbonate de calcium à l'émergence.	50
10 : Évolution de quelques caractéristiques d'une eau minérale bicarbonatée après son prélèvement.	52
11 : Histogramme des températures des eaux thermominérales du Cameroun.	54
12 : Histogramme des minéralisations de 103 sources thermominérales du Cameroun.	59
13 : La minéralisation (T) en fonction de la conductivité électrique (EC).	62
14 : La minéralisation (M) en fonction de la conductivité électrique (EC).	63
15 : Histogramme des teneurs en anhydride carbonique dissous.	64
16 : État de saturation en CO ₂ dissous des eaux thermominérales du Cameroun à l'émergence.	65
17 : Histogramme des pH des eaux thermominérales du Cameroun à l'émergence.	67
18 : Diagramme de Piper.	70
19 : Analyse factorielle des correspondances. Éléments majeurs. Projection dans le plan des axes 1 et 2.	79
20 : Schéma illustrant les corrélations entre les éléments majeurs.	80
21 : Esquisse structurale des Pyrénées centrales et orientales. Localisation des principales sources thermominérales	86

22 : Histogramme des teneurs en potassium dans les eaux thermominérales du Cameroun.	page 91
23 : Teneurs en CaO et MgO des roches éruptives et cristallophylliennes de l'Adamaoua et de l'ouest du Cameroun.	93
24 : Teneurs en silice des eaux thermominérales du Cameroun en fonction de la température.	97
25 : Le système HCl-H ₂ O-Al ₂ O ₃ - Na ₂ O - SiO ₂ à 25°C sous 1 Atm.	100
26 : Le système HCl-H ₂ O-Al ₂ O ₃ - K ₂ O - SiO ₂ à 25°C sous 1 Atm.	100
27 : Le système HCl-H ₂ O-Al ₂ O ₃ - CaO-CO ₂ - SiO ₂ à 25°C sous 1 Atm.	102
28 : Le système HCl-H ₂ O-Al ₂ O ₃ -MgO-CO ₂ - SiO ₂ à 25°C sous 1 Atm.	102
29 : Résidu sec et éléments en traces dans les eaux thermominérales du Cameroun.	106
30 : Résidu sec et éléments en traces dans les eaux de rivières de l'Adamaoua.	108
31 : Les éléments en traces dans les eaux de rivières et les eaux thermominérales du Cameroun.	109
32 : Histogrammes des teneurs des éléments en traces. (a, b, c)	111
33 : Schéma illustrant les corrélations entre les éléments en traces.	115
34 : Saturation des eaux thermominérales du Cameroun vis-à-vis du sulfate de baryum.	118
35 : Analyse factorielle des correspondances. Ensemble des variables. Projection dans le plan des axes 1 et 2.	121
36 : Analyse factorielle des correspondances. Ensemble des variables. Projection dans le plan des axes 2 et 3.	121

LISTE DES TABLEAUX

N°		page
1	: Compositions chimiques des roches du socle.	148 à 152
2	: Répertoire et localisation des sources thermominérales du Cameroun.	153 à 156
3a et 3b	: Analyses des eaux thermominérales du Cameroun.	157 à 165
4	: Évolution de certaines caractéristiques de quelques eaux thermominérales entre l'instant du prélèvement et celui de l'analyse au laboratoire.	37
5	: Analyse factorielle des correspondances. Éléments majeurs.	78
6	: Coefficients de corrélation entre les teneurs en éléments majeurs.	80
7a et 7b	: Analyse des eaux de rivières de l'Adamaoua.	166 à 168
8	: Coefficients de corrélation entre les logarithmes des teneurs en éléments traces.	114
9	: Coefficients de corrélation entre l'ensemble des éléments de la minéralisation.	116
10	: Analyse factorielle des correspondances. Ensemble des variables.	120
11	: Moyenne et anomalie géochimique des teneurs en éléments traces dans les eaux thermominérales du Cameroun.	123
12	: Les principaux types génétiques d'eaux minérales de la croûte terrestre.	126

TABLE DES MATIERES

	page
<i>Avant propos</i>	3
<i>Introduction</i>	6

PREMIERE PARTIE

CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DES L'ÉTUDE

1	<i>Caractères physiques des régions étudiées</i>	11
	1.1 Orographie	11
	1.2 Hydrographie	12
	1.3 Climatologie	15
2	<i>Grands traits de la géologie régionale</i>	15
	2.1 Pétrographie et stratigraphie	16
	2.1.1 Le socle	16
	2.1.2 Les séries sédimentaires faiblement métamorphisées ..	18
	2.1.3 Les séries sédimentaires non métamorphisées	19
	2.1.4 Le volcanisme	20
	Conclusion sur le volcanisme	22
	2.2 Géologie structurale	24
	2.2.1 Le socle plissé et fracturé	24
	2.2.2 Les appareils volcaniques	28
	2.2.3 Les massifs plutoniques intrusifs	28
	2.2.4 Le réseau hydrographique	28
	2.2.5 Les sources thermominérales	29
	2.2.6 Conclusion	29

DEUXIEME PARTIE

LES SOURCES THERMOMINÉRALES

1	<i>Historique – Méthodes d'étude – Résultats des analyses physico-chimiques</i>	30
	1.1 Historique	30
	1.2 Inventaire	31
	1.3 Méthodes d'études <i>in situ</i> et au laboratoire	32
	1.4 Les résultats : présentation et critiques	34

	page
2 Conditions de circulation et d'émergence des eaux thermominérales ...	39
2.1 Préliminaire : origine de l'eau alimentant les sources	39
2.2 Le circuit souterrain	41
2.3 Les émergences : localisation, altitude, dépôts	43
3 Caractères physico-chimiques des eaux	53
3.1 La température	53
3.2 Conductivité, minéralisation globale et résidu sec	58
3.3 Les sources gazeuses	62
3.4 Le pH des eaux thermominérales	67
3.5 Conclusions	68

TR OISIEME PARTIE

GÉOCHIMIE DES ÉLÉMENTS MAJEURS

1 Description des analyses — Représentation graphique	69
2 Classification des eaux thermominérales	71
2.1 Classification de Jacquot et Willm	71
2.2 Classification de Stabler	72
2.3 Classification de Palmer	72
2.4 Classification de Bogomolov et Silin Bektchourine	73
2.5 Classification des eaux du Cameroun	73
3 Corrélations entre les éléments majeurs	80
3.1 Corrélations entre les anions	80
3.2 Corrélations anions-cations et entre les cations	81
4 Corrélations entre les éléments majeurs et le contexte géologique	83
4.1 Anions	83
4.1.1 Les bicarbonates	83
2 Les chlorures	83
3 Les sulfates	85
4 Conclusions sur l'origine et la géochimie des anions	89
4.2 Cations	90
4.2.1 Le sodium et le potassium	91
2 Le calcium et le magnésium	94
3 Conclusions sur l'origine et la géochimie des cations	96
4 La silice	96
5 Le fer	98
5 Altération hydrothermale	99
5.1 Observations de quelques altérations dues à des circulations hydrominérales	99
5.2 Équilibre des eaux thermominérales vis-à-vis des minéraux d'altération et des roches encaissantes	101
5.3 Importance de l'altération	103

QUATRIEME PARTIE

GÉOCHIMIE DES ÉLÉMENTS EN TRACES

	page
1 Généralités	104
2 Teneurs des éléments en traces et résidu sec	105
3 Abondance relative des éléments. Comparaison avec les roches ignées et les eaux de rivière	107
4 Étude statistique des éléments en traces	110
4.1 Distribution des teneurs des éléments en traces	110
4.2 Corrélations entre les éléments en traces	110
4.3 Corrélations entre les éléments en traces et le reste de la minéralisation	115
5 Distribution géographique des teneurs des éléments en traces	119
5.1 Caractérisation des eaux thermominérales par les éléments en traces	119
5.2 Recherche d'anomalies	122
6 Conclusions	124

CINQUIEME PARTIE

A PROPOS DE QUELQUES PROBLÈMES PARTICULIERS

1 Classification génétique des eaux thermominérales	125
2 Sources thermominérales et filons hydrothermaux	128
3 Sources thermominérales et énergie géothermique	129
Conclusions générales	132
Bibliographie	135
Annexes	147
Table des figures	169
Liste des tableaux	171
Table des matières	173

Fabrication – Coordination
Hélène DARDENNE

Réalisation Pierre Roulland
Les Editions du Sextant
94170 Le Perreux-sur-Marne
Dépôt légal 1021 - 4e trimestre 1976

O.R.S.T.O.M.

Direction générale :

24, rue Bayard, 75008 PARIS

Services Scientifiques Centraux :

70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY

O.R.S.T.O.M. Éditeur Dépôt légal 4^e trim. 1976

I.S.B.N. : 2.7099-0428-4

CARTE GÉOLOGIQUE DE L'OUEST DU CAMEROUN ET DE L'ADAMAOUA

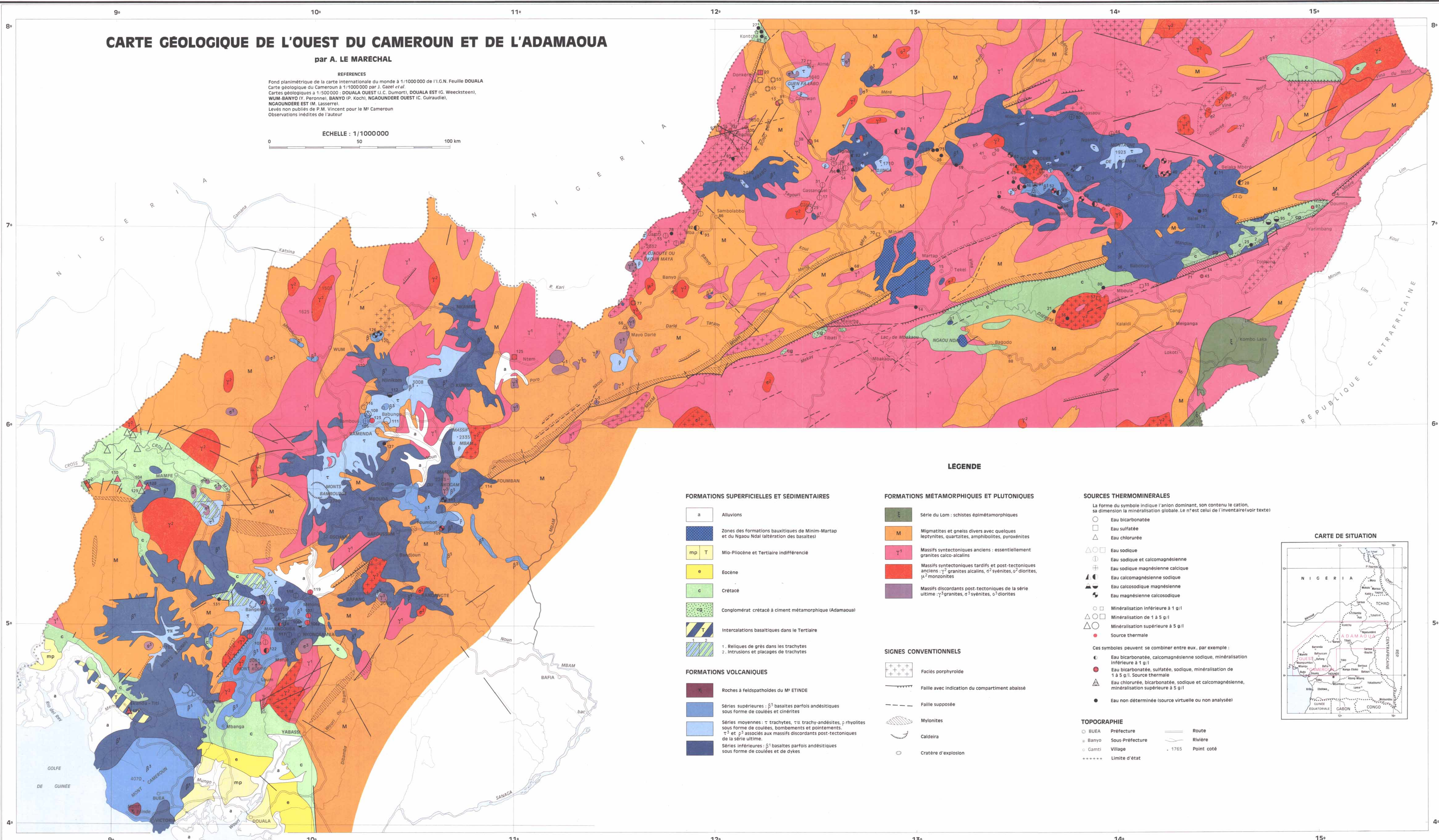
par A. LE MARECHAL

REFERENCES

Fond planimétrique de la carte internationale du monde à 1/1000 000 de l'I.G.N. Feuille DOUALA
Carte géologique du Cameroun à 1/1000 000 par J. Gazel *et al.*
Cartes géologiques à 1/500 000 : DOUALA OUEST (J.C. Dumortier), DOUALA EST (C. Weecksteen),
WUM-BANYO (Y. Peronne), BANYO (P. Koch), NGAOUNDERE OUEST (C. Guiraudie),
NGAOUNDERE EST (M. Lasserre).
Levés non publiés de P.M. Vincent pour le M^e Cameroun
Observations inédites de l'auteur

ECHELLE : 1/1000000

0 50 100 km



LEGENDE

FORMATIONS SUPERFICIELLES ET SEDIMENTAIRES

- a Alluvions
- Zones des formations bauxitiques de Mimim-Martap et du Ngaou Ndal (altération des basaltes)
- mp T Mio-Pliocène et Tertiaire indifférencié
- e Eocène
- c Crétacé
- cg Conglomérat crétacé à ciment métamorphique (Adamaoua)
- T Intercalations basaltiques dans le Tertiaire
- 1. Reliques de grès dans les trachytes
- 2. Intrusions et placages de trachytes

FORMATIONS VOLCANIQUES

- Yi Roches à feldspathoïdes du M^e ETINDE
- Séries supérieures : β^2 basaltes parfois andésitiques sous forme de coulées et cinérites
- Séries moyennes : τ trachytes, $\tau\alpha$ trachy-andésites, ρ rhyolites sous forme de coulées, bombements et pointements, τ^3 et β^2 associés aux massifs discordants post-tectoniques de la série ultime
- Séries inférieures : β^1 basaltes parfois andésitiques sous forme de coulées et de dykes

FORMATIONS METAMORPHIQUES ET PLUTONIQUES

- Ξ Série du Lom : schistes épi-métamorphiques
- M Migmatites et gneiss divers avec quelques leptynites, quartzites, amphibolites, pyroxénites
- Y¹ Massifs syntectoniques anciens : essentiellement granites calco-alcalins
- Massifs syntectoniques tardifs et post-tectoniques anciens : Y¹ granites alcalins, σ^2 syénites, σ^2 diorites, μ^2 monzonites
- Massifs discordants post-tectoniques de la série ultime : Y³ granites, σ^2 syénites, σ^2 diorites

SIGNES CONVENTIONNELS

- Facès porphyroïde
- Faïlle avec indication du compartiment abaissé
- Faïlle supposée
- Mylonites
- Caldeira
- Cratère d'explosion

SOURCES THERMINERALES

- La forme du symbole indique l'anion dominant, son contenu le cation, sa dimension la minéralisation globale. Le n° est celui de l'inventaire (voir texte)
- Eau bicarbonatée
 - Eau sulfatée
 - Eau chlorurée
 - Eau sodique
 - Eau sodique et calcomagnésienne
 - Eau sodique magnésienne calcique
 - Eau calcomagnésienne sodique
 - Eau calcosodique magnésienne
 - Eau magnésienne calcosodique
 - Minéralisation inférieure à 1 g/l
 - Minéralisation de 1 à 5 g/l
 - Minéralisation supérieure à 5 g/l
 - Source thermique
- Ces symboles peuvent se combiner entre eux, par exemple :
- Eau bicarbonatée, calcomagnésienne sodique, minéralisation inférieure à 1 g/l
 - Eau bicarbonatée, sulfatée, sodique, minéralisation de 1 à 5 g/l. Source thermique
 - Eau chlorurée, bicarbonatée, sodique et calcomagnésienne, minéralisation supérieure à 5 g/l
 - Eau non déterminée (source virtuelle ou non analysée)

TOPOGRAPHIE

- BUEA Préfecture
- Banyo Sous-Préfecture
- Gamti Village
- Route
- Rivière
- Point coté
- 1765
- Limite d'état

CARTE DE SITUATION

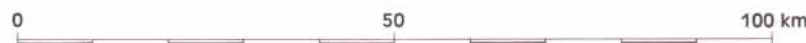


DIRECTIONS STRUCTURALES DE L'OUEST DU CAMEROUN ET DE L'ADAMAOUA

par A. LE MARECHAL

REFERENCES
Fond planimétrique de la carte internationale du monde à 1/1000 000 de l'I.C.N. Feuille DOUALA
Carte géologique du Cameroun à 1/1000 000 par J. Gazez *et al.*
Cartes géologiques à 1/500 000 : DOUALA OUEST (J.C. Dumort), DOUALA EST (G. Weecksteen),
WUM-BANYO (V. Peronne), BANYO (P. Koch), NGAOUNDERE OUEST (C. Guiraudie),
NGAOUNDERE EST (M. Lasserre).
Levés non publiés de P.M. Vincent pour le M. Cameroun
Observations inédites de l'auteur

ECHELLE : 1/1000 000



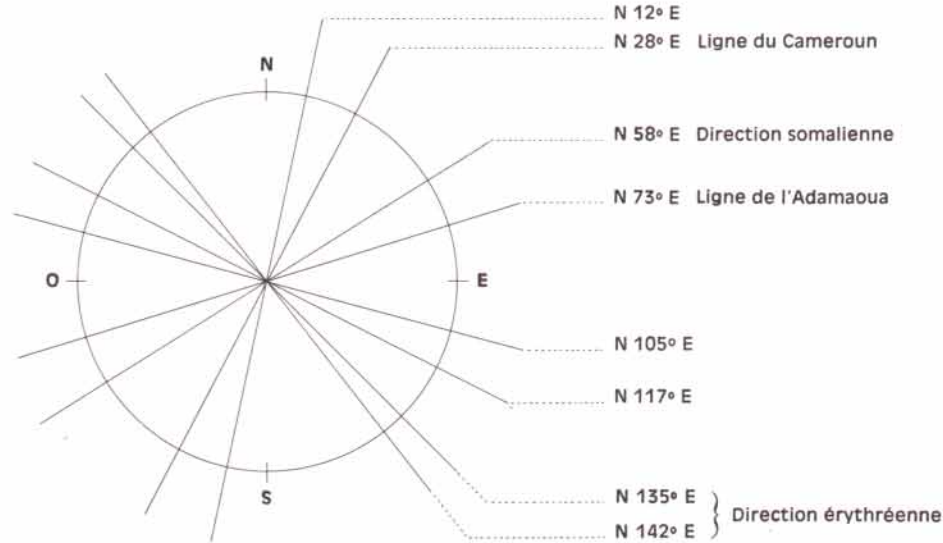
TECTONIQUE

- Trait de faille
- Trait de linéament
- Axe de synclinal
- Axe d'anticlinal
- Direction tectonique
- Myonites
- Massif plutonique intrusif post-tectonique

EDIFICES VOLCANIQUES

- Cratères, puits
- Caldeira
- Cratère d'explosion
- Edifice non déterminé
- Piton
- Dyke

PRINCIPALES DIRECTIONS LINEAMENTAIRES



LEGENDE

SOURCES THERMINERALES

- La forme du symbole indique l'anion dominant, son contenu le cation, sa dimension la minéralisation globale. Le n° est celui de l'inventaire (voir texte).
- Eau bicarbonatée
 - Eau sulfatée
 - Eau chlorurée
 - Eau sodique
 - Eau sodique et calcomagnésienne
 - Eau sodique magnésienne calcique
 - Eau calcomagnésienne sodique
 - Eau calcosodique magnésienne
 - Eau magnésienne calcosodique
 - Minéralisation inférieure à 1 g/l
 - Minéralisation de 1 à 5 g/l
 - Minéralisation supérieure à 5 g/l
 - Source thermique
- Ces symboles peuvent se combiner entre eux, par exemple :
- Eau bicarbonatée, calcomagnésienne sodique, minéralisation inférieure à 1 g/l
 - Eau bicarbonatée, sulfatée, sodique, minéralisation de 1 à 5 g/l. Source thermique
 - Eau chlorurée, bicarbonatée, sodique et calcomagnésienne, minéralisation supérieure à 5 g/l
 - Eau non déterminée (source virtuelle ou non analysée)

TOPOGRAPHIE

- BUEA Préfecture
- Banyo Sous-Préfecture
- Gamti Village
- Limite d'état
- Route
- Rivière
- Point coté

CARTE DE SITUATION

