

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 - 45 Orléans (02) - Tél.: (38) 66.06.60

ÉTUDE HYDROCHIMIQUE DE QUELQUES EAUX MINÉRALES FRANÇAISES

Applications des méthodes de traitement automatique

par

Melle M. LOUVRIER



Département **HYDROGÉOLOGIE**

B.P. 6009 - 45 Orléans (02) - Tél.: (38) 66.06.60

71 SGN 313 HYD

Septembre 1971

R E S U M E

Lorsque la quantité de données hydrogéochimiques devient trop importante (supérieure à 50), les moyens classiques de traitement, tels que calculs de rapports caractéristiques, diagrammes de SCHOELLER-BERKALOFF ou de PIPER..., nécessitent de longues opérations ; aussi les méthodes de calculs automatiques faisant appel aux ordinateurs présentent-elles un intérêt grandissant. Elles permettent l'exécution plus rapide et plus complète d'études hydrogéochimiques.

Ces programmes de traitement de résultats d'analyses faites sur le terrain ou au laboratoire ont été mis au point au département Hydrogéologie avec le concours du département Informatique : programmes de calculs hydrochimiques, de statistique élémentaire, d'analyse factorielle...

La présente étude, réalisée par le département Hydrogéologie dans le cadre des études méthodologiques, est une application de quelques-uns de ces programmes au traitement d'une soixantaine d'analyses d'eaux minérales françaises. L'utilisation conjointe du diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF souligne par ailleurs l'intérêt de cette méthode dans la classification et la comparaison des différentes familles d'eaux, et permet de poser le problème de l'originalité des eaux minérales.

S O M M A I R E

RESUME

INTRODUCTION

1. METHODES D'ETUDES PAR CALCUL AUTOMATIQUE

1.1. Les données

1.2. Les programmes

1.2.1. HYCH : Programme de calculs hydrochimiques élémentaires

1.2.2. GRAD : Programme de graphiques bidimensionnés

1.2.3. AFAC1 : Analyse factorielle des correspondances

1.2.3.1. Observations à partir d'un traitement ne faisant intervenir que des paramètres chimiques

1.2.3.2. Observations sur un traitement avec paramètres chimiques et physiques

1.2.4. PIPER

1.2.5. Conclusions

2. UTILISATION DU DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF

2.1. Le diagramme SCHOELLER-BERKALOFF comme moyen de comparaison

2.2. Originalité des eaux minérales

2.2.1. Minéralisation des eaux

2.2.2. Ces eaux ont-elles un faciès particulier ?

2.2.3. Où faut-il chercher l'originalité des eaux minérales ?

2.3. Relation entre le chimisme et le rôle thérapeutique des eaux minérales

2.4. Conclusions

3. CONCLUSIONS GENERALES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PLANCHES

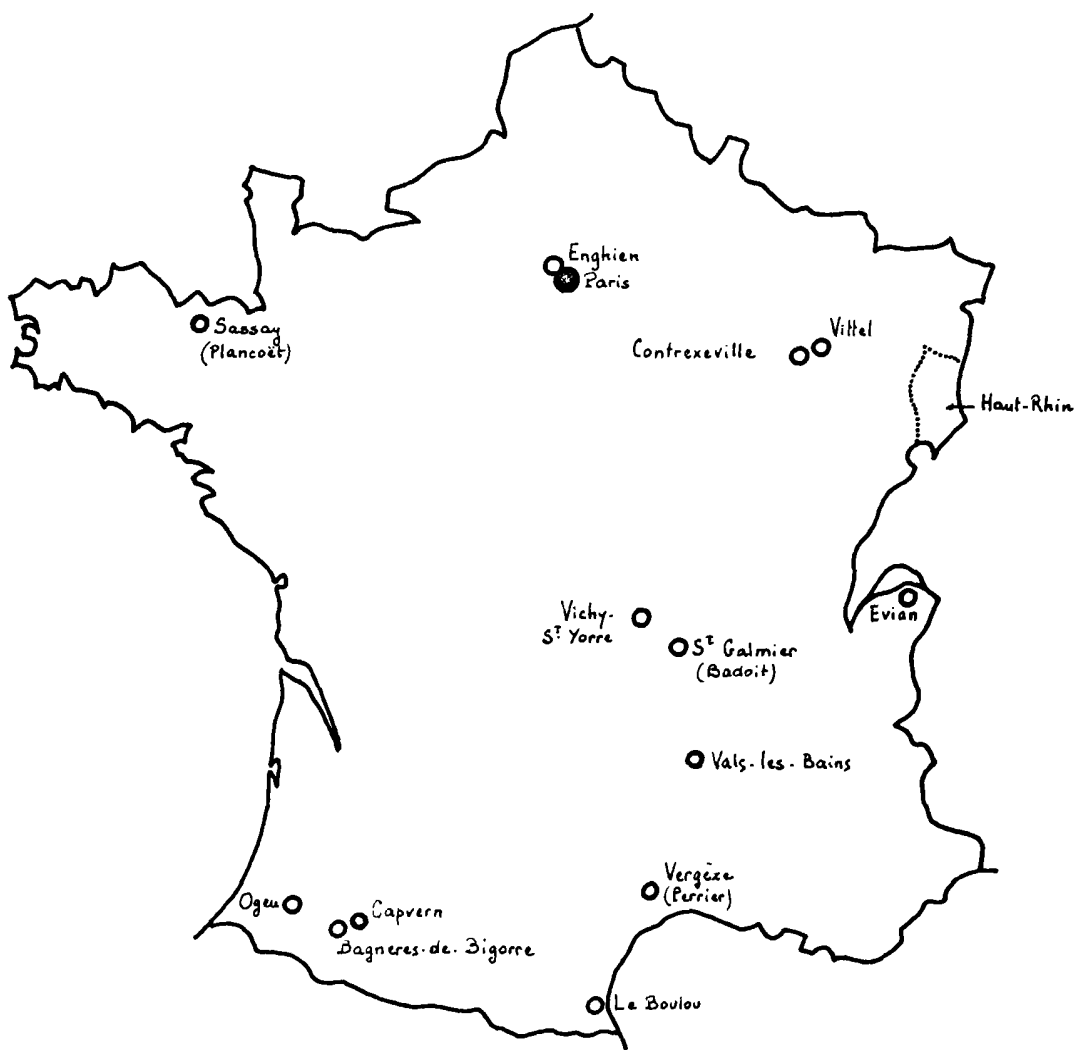
LISTE DES FIGURES

1. HYCH : Annexe 1 sort les données telles qu'elles sont entrées en machine
2. HYCH : Annexe 2 imprime les résultats des calculs de meq*, balance ionique, erreur, pourcentages...
3. GRAD : Comparaison de deux sommes globales (C+, A-)
4. GRAD : Comparaison somme globale (C+) - somme partielle (AT = CA + MG)
5. GRAD : Comparaison somme globale (A-) - élément (CO = HCO₃)
6. AFAC1 : Traitements avec :
 - 6.1. Paramètres chimiques seuls
 - 6.2. Paramètres chimiques et physiques (axes 1.2)
 - 6.3. Paramètres chimiques et physiques (axes 1.3)
7. Diagramme SCHOELLER-BERKALOFF : passage du faciès bicarbonaté calcique au faciès sulfaté calcique
8. Diagramme de PIPER
9. Comparaison eaux minérales - eaux souterraines banales
 - 9.1. Faciès bicarbonaté calcique
 - 9.2. Faciès sulfaté calcique
 - 9.3. Faciès chloruré sodique
 - 9.4. Faciès mixte

* meq = milliéquivalent

QUELQUES EAUX MINÉRALES FRANÇAISES

Eaux étudiées dans ce rapport .



INTRODUCTION

Beaucoup d'auteurs ont cherché à donner une définition de "l'eau minérale" : certains faisaient intervenir la température (mais les eaux minérales ne sont pas toutes chaudes) ; d'autres le taux de minéralisation (mais certaines d'entre elles sont très peu minéralisées, par exemple Evian) ; d'autres encore le mode de gisement ou l'origine de l'eau...

Il est difficile de trouver une définition physico-chimique des eaux dites minérales rigoureusement acceptable ; la seule admise actuellement est une définition administrative qui résulte du décret du 12 janvier 1922, modifié le 24 mai 1957, pris en application de la législation sur la répression des fraudes, qui stipule :

Article 1^{er} ...

"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. La déferrisation et le mélange entre eux d'eaux et de gaz de sources d'eaux minérales autorisées ne peuvent avoir lieu que dans les conditions fixées par le décret n° 57-404 du 28.3.57 sur la police et la surveillance des eaux minérales".

Donc, contrairement à celles proposées par les géologues, cette définition met essentiellement l'accent sur les propriétés thérapeutiques de ces eaux.

Ne pouvant traiter toutes les eaux minérales françaises, il a fallu faire un choix : d'où cette étude basée sur les eaux les plus connues et les plus embouteillées :

. Vichy	89 millions de cols en 1969			
. Saint-Yorre	205	"	"	"
. Badoit	55	"	"	"
. Vals les Bains	26	"	"	"
. Vittel	519	"	"	"
. Contrexéville	407	"	"	"
. Perrier	332	"	"	"
. Evian	548	"	"	"

auxquelles ont été comparées les eaux minérales :

- . d'Enghien (Seine-et-Oise)
- . des Pyrénées
- . du Massif Armoricaïn (Sassay : 16 millions de cols en 1969)
- . du Haut-Rhin

1. METHODES D'ETUDES PAR CALCUL AUTOMATIQUE

1.1. Les données

Cette étude repose sur des résultats d'analyses de la composition chimique d'eaux minérales, analyses de type classique, c'est-à-dire comprenant le dosage des éléments majeurs principaux :

- Cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+
- Anions : Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-

Aux concentrations des majeurs s'ajoutent :

- quelques renseignements qualitatifs sur l'existence d'éléments en traces dans l'eau ou de gaz dissous
- des renseignements relatifs au lieu de prélèvement de l'échantillon et quelques paramètres physiques de l'eau.

Ces analyses sont issues des "statistiques de l'industrie minérale" de 1961. Parmi celles-ci, beaucoup sont anciennes : pour un certain nombre de sources, les données sont le résultat de longues recherches dans d'anciens périodiques et de recalculs pour transformer en mg/l d'anions et cations, des compositions chimiques parfois exprimées en composition hypothétique (Dr. B. NINARD).

Du fait de l'origine très variée de ces analyses, il faut dès maintenant faire des réserves quant aux conclusions qu'on pourra tirer des traitements ultérieurs.

1.2. Les programmes de traitement

Des programmes de traitement automatique, certains conçus spécialement pour l'hydrochimie (ex. HYCH), d'autres d'intérêt plus général mais adaptables aux problèmes hydrochimiques (ex. traitements statistiques) permettent la réalisation rapide des calculs et représentations graphiques nécessaires à une étude :

1.2.1. HYCH transforme en meq/l les résultats des analyses chimiques exprimés en mg/l et permet ainsi la comparaison des eaux entre elles. Il calcule également la balance ionique et les pourcentages des différents ions. Il peut calculer, à la demande, un certain nombre de rapports d'éléments (fig. 1 et 2).

1.2.2. GRAD : programme de statistique élémentaire permettant de comparer les éléments deux à deux (en milliéquivalents) ; les analyses peuvent être représentées :

- par une croix indiquant leur position par rapport aux éléments représentés sur les deux axes orthogonaux (ou par un astérisque si plusieurs échantillons ont même position) ;
 - par le numéro du groupe dans lequel on a rangé l'analyse a priori ;
 - par le numéro repérant l'échantillon au cours de tout le traitement ;
- a) La comparaison des deux sommes globales A^- (somme totale des anions) et C^+ (somme totale des cations) permet de repérer les échantillons (encadrés sur la figure 3) qui s'écartent trop de la bissectrice où $A^- = C^+$ et d'éliminer ainsi ceux qui présentent un trop grand pourcentage d'erreur sur la balance ionique ; (l'erreur maximum admise étant fixée à 5 % depuis longtemps ; ce pourcentage moyen est basé sur la fiabilité des appareils de dosage, les erreurs d'estimation de l'expérimentateur... ; les méthodes de dosage, l'appareillage s'améliorant de plus en plus, les résultats sont de plus en plus précis ; aussi, actuellement, serait-il peut-être possible de diminuer la valeur du pourcentage d'erreur admis. Mais un certain nombre des analyses utilisées pour cette étude étant anciennes, les prélèvements et les dosages ayant été effectués dans des conditions dont on ne connaît pas le détail, il est préférable de conserver la marge d'erreur de 5 % ; celle-ci permet d'avoir une bonne estimation de la composition chimique des eaux et élimine tout de même les analyses à balance ionique mal équilibrée telles que certaines eaux pour lesquelles l'erreur dépassait 20 % (bicarbonates et gaz carbonique sans doute dosés ensemble)).

La figure 3 montre un exemple de graphiques où les échantillons sont repérés par leur numéro.

Au cours des interprétations ultérieures, il faudra éviter de tirer des conclusions trop hâtives quant à la position des échantillons dont la balance ionique est mal équilibrée ;

- b) Sur la figure 4 où les échantillons sont repérés par leur numéro de groupe (et il en sera ainsi sur les figures suivantes), le rapport de la somme partielle $CA + MG$ des alcalinoterreux AT à la somme totale des cations C^+ fait déjà apparaître plusieurs groupements ; on distingue (les chiffres entre parenthèses sont les numéros de groupe) :
- les eaux de Contrexéville (2) + Vittel Hépar (2) + les eaux du Gard (5) ainsi que Vittel (2) + Perrier (5) + les eaux d'Enghien (6) dont 90 à 100 % des cations sont des alcalinoterreux.
 - Badoit (3) un peu moins riche en alcalinoterreux.
 - Les eaux du Haut-Rhin (7) qui ont à peu près autant d'alcalins que d'alcalinoterreux.
 - Les deux groupes d'eaux de Vichy (1) et Vals (4) nettement plus alcalines.

Quelques remarques s'imposent :

- Les eaux des Pyrénées prises en exemple (8) n'ont pas beaucoup d'unité (elles viennent de bassins hydrologiques différents).

- Certaines eaux du bassin de Vichy (1) semblent avoir une composition chimique assez semblable à celle des eaux de Vals ; de telles similitudes de rapports ou de valeurs se retrouveront sur d'autres graphiques (ex. fig. 5).
- Une analyse du groupe des eaux de Vals s'individualise : c'est une eau dont la balance ionique est mal équilibrée : plus de 7 % d'erreur (13).

c) Rapport somme globale à élément (fig. 5) : l'étude des bicarbonates (CO) en fonction de la somme des anions (A-) montre une prépondérance des faciès bicarbonatés, la majeure partie des eaux ayant entre 75 et 100 % des anions représentés par HCO_3^- . Il se dégage tout de même quelques analyses où les bicarbonates sont moins importants :

- eaux d'Enghien avec $(\text{HCO}_3^-) \neq (\text{SO}_4^{2-}) + (\text{Cl}^-)$;
- eaux de Contrexéville, certaines de Vittel, quelques eaux du Haut Rhin et des Pyrénées où la somme des concentrations en SO_4^{2-} et Cl^- est très supérieure à celle en HCO_3^- .

d) Dans le cas présent, l'étude a pu être complétée par des comparaisons élément à élément : par exemple le rapport Ca/Mg distingue, parmi les eaux alcalino-terreuses, celles qui sont plus (ou aussi) magnésiennes (ex : Vals) que calciques ; et la comparaison K - Na montre que les eaux d'Enghien ont un rapport K/Na double ou triple de l'ensemble des autres eaux traitées.

Ainsi, à l'aide du programme GRAD peut-on déterminer le faciès d'une eau, mais cette méthode nécessite la réalisation d'un grand nombre de graphiques si on veut connaître les faciès avec suffisamment de précision (GRAD peut être d'un autre intérêt : dans le cas du traitement de données relatives à un ensemble homogène, ce programme permet de rechercher ou de vérifier s'il existe une corrélation entre divers éléments).

1.2.3. AFAC1 : Analyse factorielle des correspondances (dont la méthode a été mise au point par BENZECRI J.P. (1970)) :

Soit une population de n individus (échantillons représentés par leur analyse chimique) et m variables (les m éléments dosés par analyse). AFAC1 représente simultanément les n individus dans l'espace à m dimensions défini par les m variables et inversement, les m éléments dans un espace à n dimensions défini par les n individus.

En sortie, on obtient un graphique représentant le nuage des échantillons et les différents pôles-éléments. On peut demander la représentation du nuage selon plusieurs directions au choix, les graphes selon les axes 1-2 ou 1-3 (axes d'inertie principaux du nuage de points) rendant compte en général de 80 à 90 % de la variance totale de la population.

L'examen des graphes appelle quelques observations :

1.2.3.1. Traitement ne considérant que les paramètres chimiques (fig. 6.1)

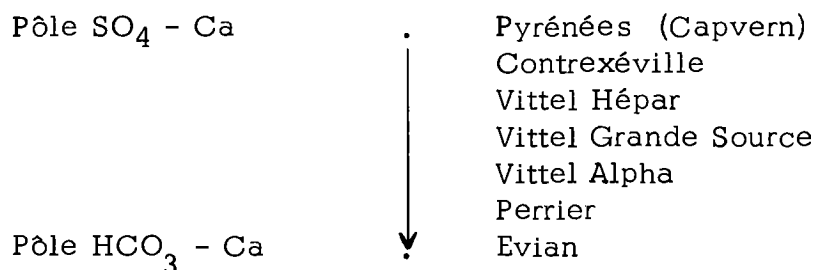
- les pôles :

- a) l'intersection des axes 1 et 3 correspond au centre de gravité du nuage ;
- b) les pôles-éléments sont répartis dans tout l'espace ;
- c) les pôles "sommés d'éléments" tels que AC ($= \text{Na}^+ + \text{K}^+$), AT ($= \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) et CS ($= \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) sont les barycentres des pôles dont ils représentent la somme ; ainsi, AC est aligné entre NA et K, et presque confondu avec NA ; les alcalins sont donc presque exclusivement représentés par le sodium pour l'ensemble de la population considérée ; AT, entre CA et MG, est tel que le rapport $\text{MG} \cdot \text{AT} / \text{AT} \cdot \text{CA}$ est environ de 2,5 ; ceci signifie que pour la population entière, il y a statistiquement environ 2 fois et demi plus de Ca^{2+} que de Mg^{2+} dissous dans les eaux (ceci est guère significatif puisque la population n'est pas homogène).

- le nuage d'échantillons :

- a) il montre un regroupement des eaux selon les différents faciès chimiques :
 - . Vichy bicarbonaté sodique
 - . Vals bicarbonaté sodique (plus potassique et magnésien)
 - . Badoit bicarbonaté plus alcalino-terreux
 - . Evian bicarbonaté calcique
 - . Perrier bicarbonaté calcique (plus riche en sulfates)
 - . Vittel bicarbonaté calcique ($+ \text{SO}_4^{2-}$) à sulfaté calcique
 - . Contrexéville sulfaté calcique
- b) ces graphiques permettent également de suivre l'évolution d'un faciès chimique net à un autre ; (ce genre d'observation peut être particulièrement intéressant dans l'étude d'un même aquifère : évolution du chimisme de l'eau d'une nappe avec l'éloignement de la zone d'alimentation par exemple...).

Exemple :



dont on peut suivre le passage $\text{SO}_4 \rightarrow \text{HCO}_3$ sur les diagrammes de SCHOELLER-BERKALOFF (fig. 7).

Mêmes observations avec la suite :

Pôle $\text{HCO}_3 - \text{Na}$.	Vichy
	↓	Haut Rhin
		Badoit
Pôle $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$.	Evian

c) de même qu'il fait ressortir les affinités, AFAC1 permet de distinguer les échantillons particuliers :

Exemple : Source Sassay à Plancoët (Côtes du Nord) à faciès mixte bicarbonate calcique sulfaté sodique. (point S sur la fig. 6.1)

d) Si on ne fait intervenir que des éléments ou des sommes d'éléments chimiques, AFAC1 n'apporte pas beaucoup plus de renseignements qu'un diagramme de PIPER, mais l'intérêt de ce programme d'analyse factorielle réside dans le fait qu'on peut choisir n'importe quel pôle ; ainsi a-t-on la possibilité de faire intervenir d'autres paramètres tels que pH, température, concentration, résistivité... et de tenter d'établir des corrélations et d'interpréter les phénomènes.

1.2.3.2. Introduction de paramètre physique : la température (fig. 6.2)

- les pôles :

On étudie la même série de données que précédemment. Tous les pôles chimiques sont maintenant regroupés dans la partie supérieure de l'espace, déterminant grossièrement un plan, alors que le pôle "température T" est nettement isolé dans l'hémisphère inférieur ; cette disposition montre qu'il y a un rapport entre les différents pôles chimiques mais que le facteur température est indépendant de tous les autres pour la population considérée.

- les échantillons :

On retrouve à peu près la même répartition des individus que dans le premier traitement, mais il y a distorsion du nuage et attirance vers le pôle T pour les eaux ayant une forte température à l'émergence. La position des points est ici fonction de la composition chimique et de la température.

Cette influence de la température est nette au niveau d'un groupement bien individualisé, par exemple celui des eaux du bassin hydrominéral de Vichy qui est caractérisé par un faciès homogène bicarbonaté sodique (fig. 6.1) ; sur la figure 6.2, le nuage de points correspondant aux eaux de ce bassin s'étale vers le pôle T, faisant apparaître celles dont la température est plus élevée. On trouve ainsi dans l'ordre :

(Eaux de St. Yorre)	
1. (Eaux de St. Priest Bramefant)	T de 12 à 14°C
(et St. Priest Pragoulin)	
(2. Vichy Célestins)	T = 17,3°C)
3. Vichy Hôpital	T = 34,4°C
4. Source Boussange (Bellerive)	T = 41,5°C
5. Vichy Grande Grille	T = 42,5°C

Ainsi, dans les conditions d'observations, il semblerait du point de vue statistique, que la température n'ait pas d'influence sur les rapports d'éléments des eaux du bassin de Vichy puisqu'on observe des rapports assez semblables pour toutes ces eaux, quelle que soit leur température à l'émergence.

On n'en conclura pas que la température n'a aucune influence sur la composition chimique des eaux, ce qui serait contraire aux lois de la chimie. Cependant, la variation du TDS (= Total Dissolved Solids calculé à partir des données des Annales des Mines) en fonction de la température à la source n'est pas significative pour confirmer la dépendance "Température-Chimie" des eaux de la région de Vichy-St. Yorre.

Le même faciès chimique, selon AFAC1 ou PIPER, des eaux du Bassin hydrominéral de Vichy peut faire supposer que toutes ces eaux ont un réservoir profond commun, et que varient leur vitesse de remontée vers la surface ou leur débit ou les deux à la fois... : les eaux "froides" pourraient résulter d'une remontée relativement lente de façon diffuse jusqu'à la surface, d'où un refroidissement progressif à travers les terrains de température plus faible. En ce qui concerne les eaux "chaudes" : remontée rapide par des chenaux mieux individualisés, de telle manière que la température de ces eaux est moins influencée par celle des terrains traversés et les eaux arrivent encore chaudes à l'émergence. D'autres hypothèses pourraient être avancées : eaux dont les températures correspondent à la température géothermique de deux aquifères de même lithologie, mais à des profondeurs différentes ? ou eaux juvéniles à vitesses de remontée variables ??...

Une étude très détaillée des conditions d'émergence des sources, de la géologie et de la géochimie locales apporterait des éléments supplémentaires pour la connaissance de la genèse de ces eaux minérales.

1.2.4. PIPER (fig. 8)

Quand on ne veut faire intervenir que les 7 cations et anions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), on peut utiliser un programme de tracé automatique de diagramme de PIPER. Le diagramme tracé à l'imprimante est déformé (pour des raisons de commodité de programmation avec l'ordinateur IBM 1130-8K) mais l'interprétation reste inchangée.

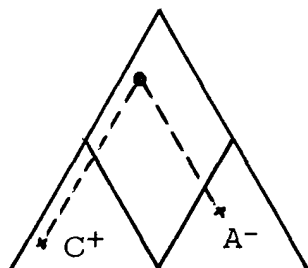


Diagramme non déformé

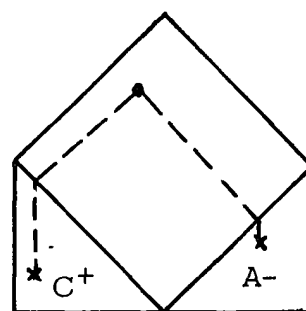


Diagramme déformé

On constate que la répartition des échantillons et les groupements sur le diagramme de PIPER sont bien les mêmes que sur le premier traitement AFAC1 (fig. 6.1) qui ne considérait que les paramètres chimiques.

(Pour les mêmes résultats avec les éléments majeurs, PIPER à l'imprimante met 10 fois moins de temps machine).

1.2.5. Conclusions :

Cette courte étude sur les eaux minérales françaises a donc été facilitée par l'utilisation des programmes de calcul automatique disponibles actuellement au département Hydrogéologie ; ces programmes de calcul et de statistique ne sont que des "outils rapides" pour l'élaboration des documents nécessaires à toute étude ; ils sont d'un maniement simple et toute étude hydrochimique portant sur un nombre d'analyses dépassant 50 devrait maintenant toujours commencer par l'utilisation de HYCH et PIPER, GRAD et AFAC1 n'étant utilisés qu'ensuite de façon réfléchie pour rechercher ou montrer l'existence de corrélations et interpréter...

Compte tenu de la dispersion des sources, de l'éloignement et de la grande variété des gîtes géologiques et géochimiques des eaux considérées, on ne peut avec l'aide des documents établis automatiquement, que faire une description typologique de ces eaux ; une étude plus approfondie en vue de déterminer l'origine des eaux et de leur chimisme, nécessiterait la prise en considération de la géologie, de la géochimie et de la climatologie locales... mais là n'est pas le but de cette étude.

2. UTILISATION DU DIAGRAMME SCHOELLER ET BERKALOFF

2.1. Le diagramme comme moyen de comparaison

Il a déjà été question de quelques procédés automatiques de comparaison d'analyses chimiques. Il est intéressant de faire, d'une façon systématique et automatique, un certain nombre de calculs de bases, ou de représenter toutes les analyses par un point dans le diagramme de PIPER... Mais il est possible également de visualiser la composition chimique d'une eau en utilisant le diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF : celui-ci représente chaque analyse par une ligne brisée, profil caractéristique de la concentration de chaque ion majeur en solution dans l'eau, les six échelles logarithmiques à égale distance les unes des autres, étant décalées de façon à aligner les valeurs unitaires des milliéquivalents des différents anions et cations.

Ces profils permettent de mettre en évidence la parenté des eaux entre elles ; c'est dans ce but que les diagrammes vont être utilisés par la suite ; ils peuvent aussi montrer le passage d'un faciès chimique à un autre comme l'illustre la figure n° 7.

2.2. Originalité des eaux minérales

2.2.1. La minéralisation des eaux

Dans la nature, toutes les eaux, quelles qu'elles soient, sont plus ou moins minéralisées. Au cours de leur trajet souterrain ou superficiel, les eaux dissolvent en quantités variables, en fonction de certains paramètres (pH, Eh, température, pression, produits de solubilité...) les sels des terrains traversés ; les quantités relatives des différents sels en solution confèrent à l'eau son faciès prédominant.

Le fait d'être minéralisées, n'est donc pas caractéristique des eaux minérales.

2.2.2. Ces eaux ont-elles un faciès particulier ?

On peut trouver, en France comme à l'étranger (ex : Afrique du Nord), des eaux ayant une composition chimique semblable à celle de certaines eaux dites minérales.

Prenons quelques exemples :

a) faciès bicarbonaté calcique (fig. 9.1)

On peut rapprocher la composition de l'eau "minérale" de la source Montfras à Chambon la Forêt dans le Loiret, issue des calcaires de Beauce aquitaniens (RS = 345,5 mg/l), de celle d'eau prélevée au Cap d'Ambès dans la nappe des sables lutétiens (RS = 230 mg/l) ou de celle d'une eau du N du Bassin Parisien (RS = 350 mg/l).

b) faciès sulfaté calcique (fig. 9.2)

Les eaux de la nappe phréatique dans l'Infracénomannien (grès, argiles, gypse, anhydrite) du plateau des phosphates au Maroc (eau concentrée par dissolution des sels des terrains encaissants : RS = 2670 mg/l) et celles de la nappe phréatique profonde du bassin de la Moulouya dans le Néogène continental (RS = 2550 mg/l) au Maroc également, ont beaucoup de similitude avec les eaux minérales sulfatées calciques de Vittel (RS = 2715 mg/l) et Contrexéville (RS = 1935 mg/l).

c) faciès chloruré sodique (fig. 9.3)

On peut de la même façon trouver des ressemblances entre des eaux de la nappe captive du Pliocène (alluvions fluviolacustres et croûtes salines) de la plaine du Rharb au Maroc et les eaux minérales de Balaruc-les-Bains dans l'Hérault.

d) faciès mixte : bicarbonaté calcique - chloruré sodique (fig. 9.4)

Un parallèle existe aussi entre une eau émergente d'un calcaire gréseux marocain ou de l'Albien en Normandie, et la source minérale de Sassay à Plancoët dans les Côtes du Nord (granulite, émergence au contact d'une couche de kaolin).

On pourrait citer encore de nombreux cas de ressemblance entre des eaux de nappes quelconques et des eaux dites "minérales" mais ces quelques exemples suffisent à prouver que le faciès chimique de ces dernières n'est pas "extraordinaire".

2.2.3. Où faut-il alors chercher l'originalité des eaux minérales ?

- a) leur température : certaines eaux ont attiré l'attention par leur haute température à la source (ex : Vichy Grande Grille 42,5°C.). Mais ce n'est pas une généralité, et la plupart des eaux minérales ont une température voisine de celle des eaux de nappes banales (ex : Sassay à Plancoët (Côtes du Nord) 11,9°C; Vittel 11°C).
- b) la radioactivité et les éléments traces : il est très difficile d'affirmer quoi que ce soit quant à ces paramètres car la très grande majorité des renseignements chimiques relatifs aux nappes ne sont en général que les analyses chimiques classiques, c'est-à-dire comportant seulement le dosage des anions et cations majeurs : Cl, SO₄, HCO₃, (NO₃), Ca, Mg, Na, K. Certaines eaux minérales sont radioactives, d'autres ne le sont pas. Il est probable que des eaux qui ont circulé dans des roches telles que des granites peuvent être aussi radioactives. Quant aux éléments traces, toutes les eaux, quelle que soit leur provenance, doivent en contenir, mais il est difficile d'en donner des preuves irréfutables car ceux-ci sont très rarement dosés.

2.3. Relation entre le chimisme et le rôle thérapeutique des eaux minérales

Les eaux minérales s'apparentent souvent à des eaux de nappes banales, et si on ne considère que les éléments majeurs, elles ne devraient pas avoir d'influence particulière sur la santé de l'homme.

2.3.1. La radioactivité

La valeur thérapeutique de la radioactivité dans les eaux donne lieu à de nombreuses discussions entre médecins hydrothérapeutes et le trop petit nombre de données dont ils disposent, ne leur permet pas de tirer de conclusions.

2.3.2. La température de l'eau

Elle n'a pas un rôle thérapeutique en elle-même, mais il est possible qu'une température élevée accélère l'action bienfaisante de certains composés de l'eau sur les fonctions biologiques déficientes du malade. Ainsi, les eaux de Vichy et de Vals peuvent traiter les mêmes maladies (maladies de la nutrition et de ses organes principaux : foie, estomac, diabète...) mais les indications de Vals sont moins nettes car ces eaux sont froides (A. ROBIN, 1923) ; de même l'action diurétique d'une eau est accélérée si celle-ci est à 20 ou 30°C au lieu d'être froide (P.L. VIOLLE, 1923).

2.3.3. Les éléments traces

Exemple : soient deux sources de Vichy :

- Grande Grille parmi les plus connues des sources de Vichy, très embouteillée, utilisée presque exclusivement en boisson
- Source Chomel, distante de 50 m de Grande Grille, très peu embouteillée, très utilisée pour les soins externes.

Ces eaux ont la même composition chimique au niveau des majeurs et des gaz ; cependant, elles ont un rôle thérapeutique différent ; ces eaux contiennent les éléments traces suivants :

<u>Grande Grille</u>	<u>Chomel</u>
Al - Fe - Mn	Al - Fe - Mn
Li -	Li -
Ba - Sr	Ba - Sr
	As - Br - F - I - P

Peut-être les traces supplémentaires As - Br - F - I et P confèrent-elles à Chomel les qualités que ne possède pas Grande Grille ?

Donc un même faciès hydrochimique majeur peut soigner des maladies différentes.

Inversement, des eaux de faciès hydrochimiques majeurs différents peuvent traiter à peu près les mêmes maladies.

Exemple :

	- Vittel Grande Source	- Contrexéville
. faciès :	sulfaté et bicarbonaté calcique	nettement sulfaté calcique
. traces :	Cu - Fe - Mn - Pb - Ba - Sr - B	Al - Fe - Mn B - Sr + 0,61 m μ Ci de radioactivité
. traitement :	goutte, lithiase rénale	goutte, infections et anomalies rénales et hépatobiliaires

2.4. Conclusions

Les eaux dites minérales ne semblent donc pas avoir un chimisme très particulier. Néanmoins, elles sont utilisées en thérapeutique. Il semble cependant difficile de dire sur quels critères il faut se baser pour définir la spécialisation d'une eau.

Cela ne peut se faire uniquement sur la composition chimique majeure, car température, radioéléments, et traces semblent jouer un rôle dans les indications et contre-indications de traitement de la maladie. En effet, des eaux de faciès hydrochimiques majeurs identiques semblent pouvoir traiter des maux différents et inversement.

D'autre part, une même eau peut avoir des effets antagonistes selon son mode d'emploi ; aussi le médecin doit-il très bien connaître l'action de l'eau sur l'organisme en fonction de son mode d'emploi, de la réaction du malade, et de l'évolution de la maladie.

3. CONCLUSIONS GENERALES

3.1. Les méthodes de travail

Les programmes de calcul ou de représentation automatiques permettent maintenant à l'hydrogéologue d'approfondir davantage l'interprétation : une partie seulement du temps passé autrefois en seuls calculs, est utilisée aujourd'hui par la calculatrice à faire tout le travail préparatoire long et fastidieux : calculs, graphiques, diagrammes, histogrammes... et sans risque d'erreur.

Mais il ne faut pas abandonner pour autant certaines méthodes non encore automatisées ; ainsi a-t-on vu l'intérêt des diagrammes de SCHOELLER BERKALOFF pour les comparaisons et visualisations de faciès chimiques, et montrer la parenté de certaines eaux entre elles.

3.2. Les eaux minérales

Un nombre assez important d'analyses chimiques d'eaux minérales a permis de montrer l'intérêt des programmes de traitement automatique déjà disponibles au département Hydrogéologie.

Du fait de l'hétérogénéité des données, de la grande diversité des sources et de leurs gites géologiques et géographiques, cette série de données, en plus de l'expérimentation des programmes informatiques, n'a pu donner lieu qu'à un traitement descriptif des eaux. Ainsi est-on parvenu à établir une typologie de certaines eaux minérales françaises.

De la considération de la température à l'émergence avec la composition chimique des eaux, dans les conditions d'observation et pour l'échantillon considéré, il semble ressortir que les quantités relatives d'ions dissous dans les eaux restent à peu près inchangées avec les grandes variations de température à la source.

Mais les eaux, ont en profondeur, un équilibre physico-chimique (fonction de la température, pression, pH, Eh...) différent de celui qu'elles ont en surface. Vu les origines variées et parfois anciennes des analyses, et ne connaissant pas les conditions dans lesquelles elles ont été effectuées (l'analyse des eaux minérales thermales en laboratoire, peut-être un certain temps après leur prélèvement, ne reflétant pas l'exacte composition chimique de l'eau à sa source et encore moins en profondeur) on ne peut que constater les rapprochements et regroupements que nous montrent les méthodes statistiques.

On a vu qu'il est difficile de définir ce qui fait l'originalité des eaux "minérales" (eaux qui ne semblent pas différer des eaux souterraines banales en ce qui concerne la composition chimique), et ce qui leur confère un

rôle thérapeutique si important. (Ici également, la même restriction quant à la véritable composition chimique des eaux minérales est à retenir).

Seuls ont été considérés, dans cette étude, le chimisme, la température, les éléments traces et la radioactivité des eaux, mais peut-être faut-il chercher ailleurs la raison de l'action bienfaisante des traitements par les eaux minérales ou thermominérales : dans le calme et le climat de la station par exemple ? En fait, il est probable que tous ces facteurs chimiques, climatiques et sédatifs soient liés. C'est au médecin hydrothérapeute qu'il appartient en définitive, en conjuguant données hydrochimiques et connaissances médicales, d'expliquer et de fournir un avis sur le côté curatif des eaux minérales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BENZECRI J.P. (1970)

Distances distributionnelle et métrique du Chi deux en analyse factorielle des correspondances.

(3è édition, Avril 1970, Laboratoire de Statistiques et mathématiques, Faculté des Sciences de Paris)

CASTANY G. (1963)

Traité pratique des eaux souterraines.

(Dunod, Paris 1963)

CAZES P., SOLETY P., VUILLAUME Y. (1971)

Exemple de traitement statistique de données hydrochimiques. Application aux nappes du Nord de la France.

(Rapport n° 71 SGN 098 HYD)

DEREC F. (1970)

Catalogue des programmes disponibles au département Hydrogéologie au 30.12.1970.

(Rapport n° 70 SGN 354 HYD)

GLANGEAUD L. (1953)

Origine des eaux minérales.

(Le monde souterrain, 18è année, n° 76-77, Avril-Juin 1953, Richesses hydrominérales de la France, Vol. 1, p. 925-927)

MARGAT J. (1961)

Les eaux salées du Maroc. Hydrogéologie et Hydrochimie.

(Notes et M. Serv. géol. Maroc, n° 151, Rabat 1961)

MARGAT J. (1962)

Mémoire explicatif de la carte géologique au 1/50 000 de la plaine du Tafilalt.

(Notes et M. Serv. géol. Maroc, n° 150 bis, Rabat 1962)

MONITION L. et NERAT DE LESGUISE M. (1960)

Note explicative de la carte hydrogéologique de la région de Casablanca.

(Notes et M. Serv. géol. Maroc, n° 131, Rabat 1960)

ROBIN A. (1923)

La spécialisation des eaux minérales fondée sur les indications de la maladie. Spécialisation fonctionnelle.

(Ann. Inst. Hyd. et Clim., t. 1, n° 1, Janvier-Avril 1923, p.45-54)

SCHOELLER H. (1962)

Les eaux souterraines.

(Masson et Cie, 1962)

SOLETY P. et VUILLAUME Y. (1970)

Possibilités actuelles de traitement automatique par ordinateur des données hydrochimiques.

(Rapport n° 70 SGN 233 HYD)

VIOLLE P.L. (1923)

La diurèse envisagée au point de vue hydrominéral.

(Ann. Inst. Hyd. et Clim., t. 1, n° 1, Janvier-Avril 1923, p.55-71)

Anonyme (1961)

Mémento médical des stations thermales françaises.

Anonyme (1961)

Statistiques de l'industrie minérale.

(Annales des Mines 1961)

Symboles utilisés pour les diagrammes AFAC1

<u>Symboles</u>	<u>Eaux</u>	<u>Groupe</u>
•	Bassin hydrominéral de Vichy-St. Yorre	1
◦	Bassin de Contrexéville-Vittel	2
▲	Badoit et sa réserve	3
⊙	Eaux de Vals (Ardèche)	4
●	Eaux de Perrier (Vergèze), Evian, Chambon la Forêt, Sassay	5
●	Eaux d'Enghien	6
○	Eaux du Haut Rhin	7
+	Eaux des Pyrénées	8
⊙	Pôles	

Remarques : Pour lire les graphiques, mettre tous les axes 1 dans la même direction (tous horizontaux de préférence).

NO.	CODE	SITUATION	A	L	T	RG	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				* *NUM*				
									CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3			
VJSGES (2)																					
CONTREXEVILL	*	GREAT SOURCE	*						11.2	475.0	2399.0	604.5	75.2	20.7	4.4	11.2	1473.9	0.0	335.5	0.0	51
CONTREXEVILL	*	LEGERE	*						11.1	550.0	2027.0	545.3	48.0	12.7	3.1	10.5	1210.0	0.0	345.2	0.0	50
CONTREXEVILL	*	PAVILLON	*						11.0	570.0	1935.0	509.5	48.6	12.6	3.8	11.1	1130.8	0.0	347.7	0.0	50
CONTREXEVILL	*	PRIMA	*						11.2	420.0	2614.0	570.5	132.8	10.1	0.8	9.4	1626.7	0.0	341.6	0.0	50
VITTEL		*ALPHA	*						11.5	1450.0	466.0	113.0	34.8	3.0	0.0	5.0	104.8	0.0	396.6	0.0	50
VITTEL		*BELLE SOURCE	*						11.0	1400.0	530.0	133.0	38.0	3.8	0.0	4.8	131.0	0.0	433.0	0.0	57
VITTEL		*BIENFAISANCE	*						11.0	1400.0	612.0	154.5	35.8	6.7	0.0	5.8	205.5	0.0	402.5	0.0	50
VITTEL		*ESSAR	*						11.5	430.0	2354.0	534.1	108.3	16.2	4.5	11.3	1410.1	0.0	397.7	0.0	57
VITTEL		*GDE SOURCE	*						11.0	1000.0	652.0	215.2	41.5	4.6	2.2	6.2	351.8	0.0	383.0	0.0	60
VITTEL		*HEPAR	*						11.0	410.0	2716.0	591.1	134.4	21.7	4.2	11.6	1672.4	0.0	369.4	0.0	61

Fig. 1

MEQ CATIONS					MEQ ANIONS				BALANCE			PC CATIONS				PC ANIONS			NO	
CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	ICA	TAN	ERR	TDS	CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	NO
30.2	6.1	0.7	0.1*	0.3	30.7	5.0	0.0*	37.3	36.6	1.0*	2523.*	81.0	10.5	2.4	0.3*	1.7	33.9	19.3	0.0*	5
27.3	4.1	0.6	0.1*	0.3	25.4	5.8	0.0*	31.9	31.4	0.7*	2182.*	65.5	12.5	1.7	0.2*	1.9	30.3	18.3	0.0*	5
25.5	4.1	0.5	0.1*	0.3	23.6	5.8	0.0*	30.2	29.7	0.8*	2064.*	64.4	13.4	1.8	0.3*	1.1	29.4	18.5	0.0*	5
28.5	11.1	0.4	0.0*	0.3	33.9	5.7	0.0*	40.1	39.8	0.3*	2691.*	71.2	27.0	1.1	0.1*	0.7	35.0	14.3	0.0*	5
5.6	2.9	0.2	0.0*	0.1	2.7	6.6	0.0*	8.7	8.9	-1.2*	658.*	64.8	33.5	1.7	0.0*	1.0	24.4	74.1	0.0*	50
6.6	3.1	0.2	0.0*	0.1	2.7	7.2	0.0*	10.0	10.1	-0.5*	743.*	60.0	31.7	1.7	0.0*	1.3	27.1	71.0	0.0*	57
7.7	3.1	0.3	0.0*	0.2	4.3	6.7	0.0*	11.0	11.2	-0.4*	611.*	70.2	27.1	2.0	0.0*	1.5	38.5	60.0	0.0*	5
26.7	9.1	0.7	0.1*	0.3	29.4	6.6	0.0*	36.5	36.3	0.3*	2482.*	73.1	24.7	1.7	0.3*	0.9	30.7	18.2	0.0*	5
10.8	3.5	0.2	0.1*	0.2	7.3	6.4	0.0*	14.5	13.7	2.1*	1004.*	74.3	23.7	1.4	0.4*	1.3	32.8	48.0	0.0*	6
29.6	11.1	0.7	0.1*	0.3	34.8	6.2	0.0*	41.8	41.3	0.6*	2804.*	70.7	25.8	2.3	0.3*	0.8	34.3	14.9	0.0*	6

Fig. 2

-1
1000 X 10 A-

GROUPEMENT 0

1 GRADUATION EN X = 33 UNITES

1 GRADUATION EN Y = 33 UNITES
28

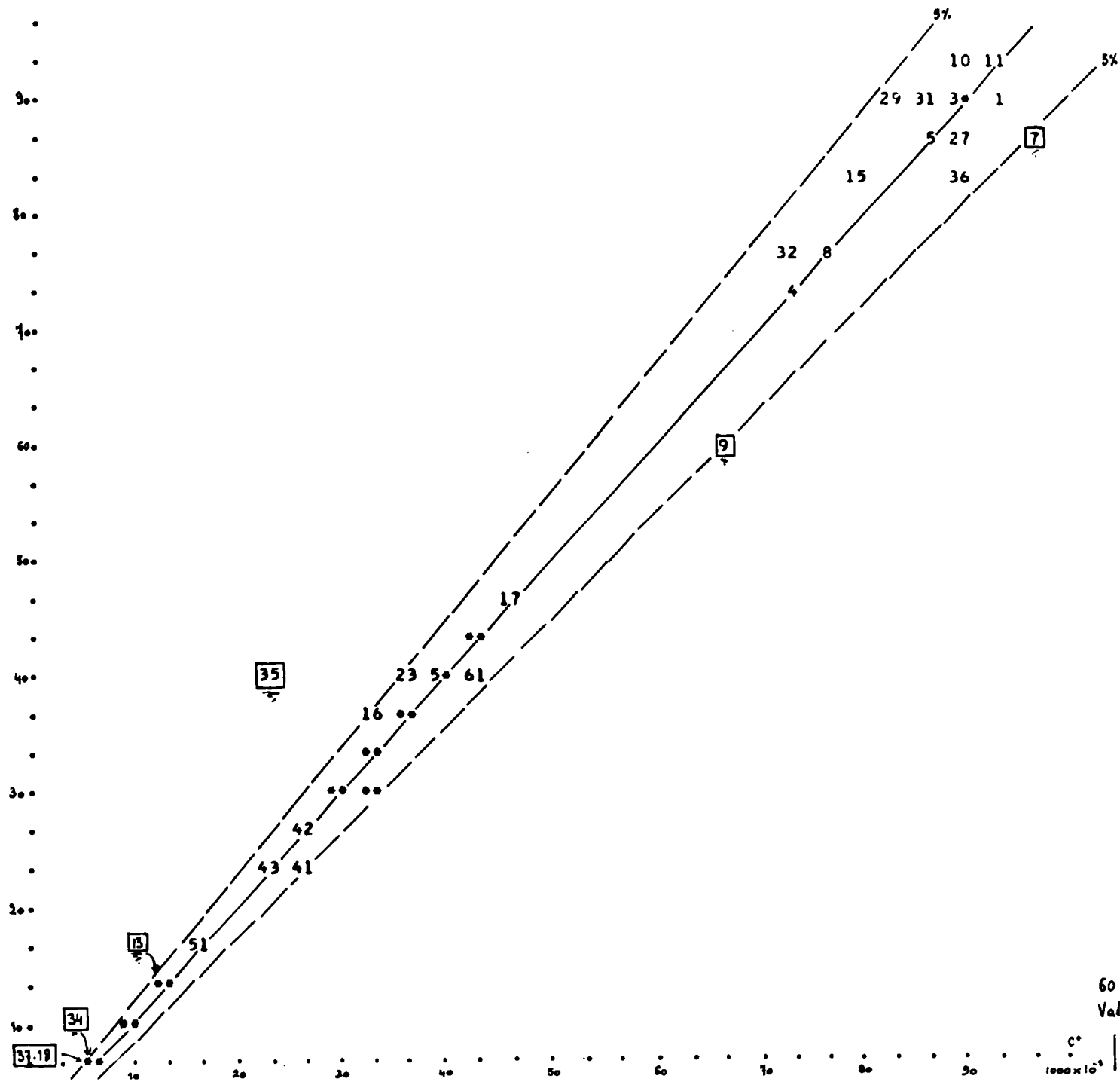


Fig. 3

7000 X 10⁻² AT

GROUPEMENT 0

1 GRADUATION EN X = 20 UNITES

1 GRADUATION EN Y = 140 UNITES

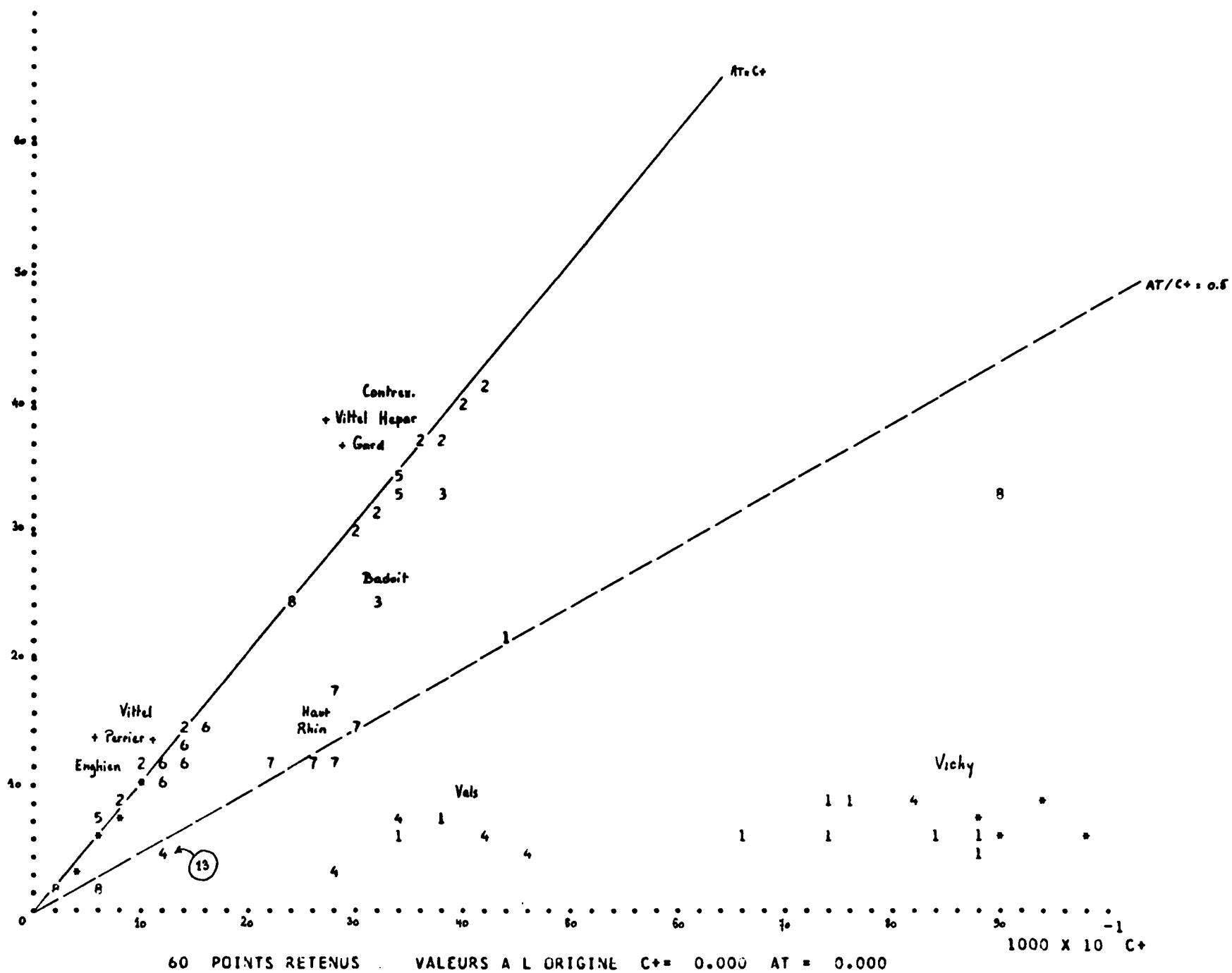


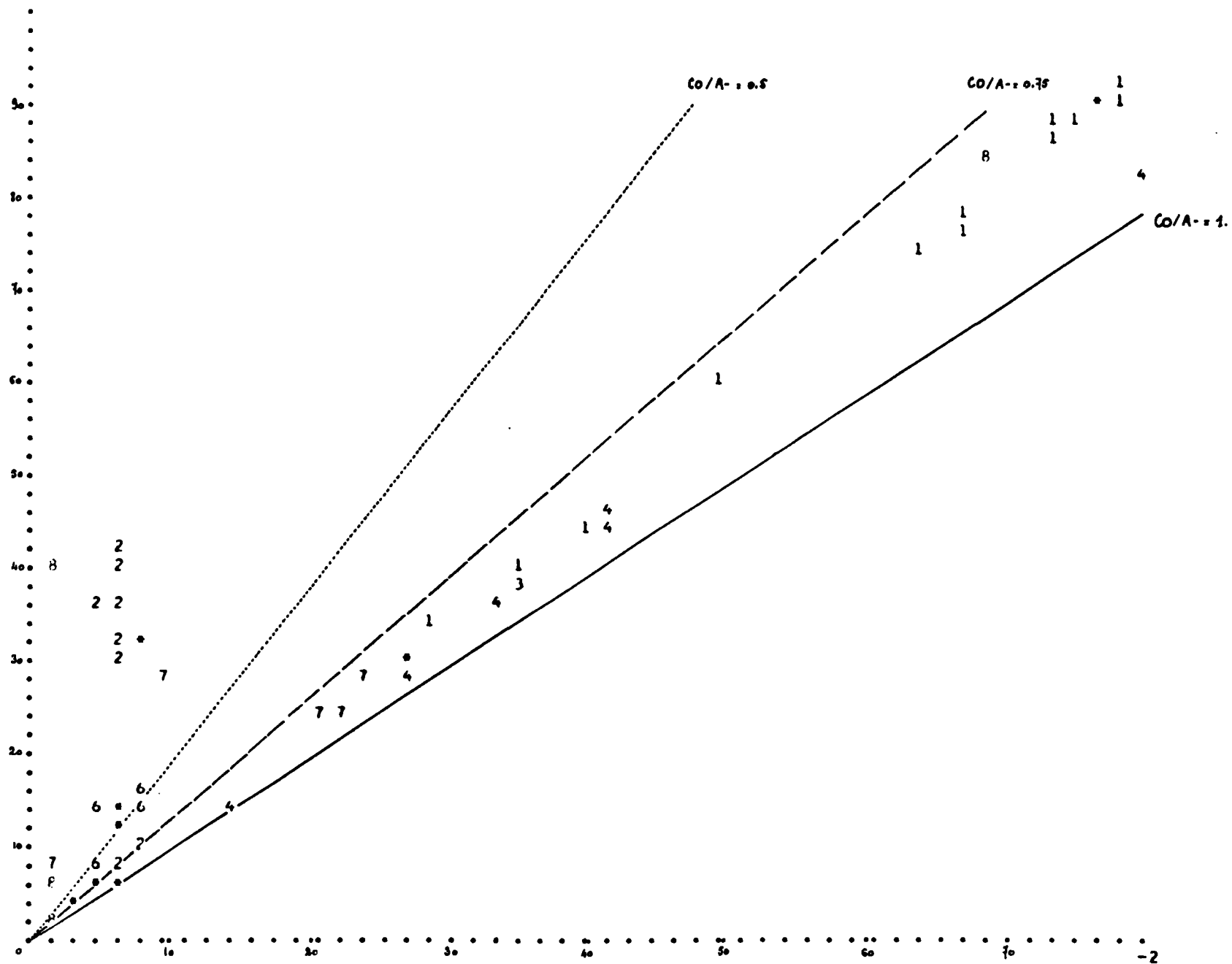
Fig. 4

1000 X 10⁻¹ A-

GROUPEMENT 0

1 GRADUATION EN X=160 UNITES

1 GRADUATION EN Y = 20 UNITES



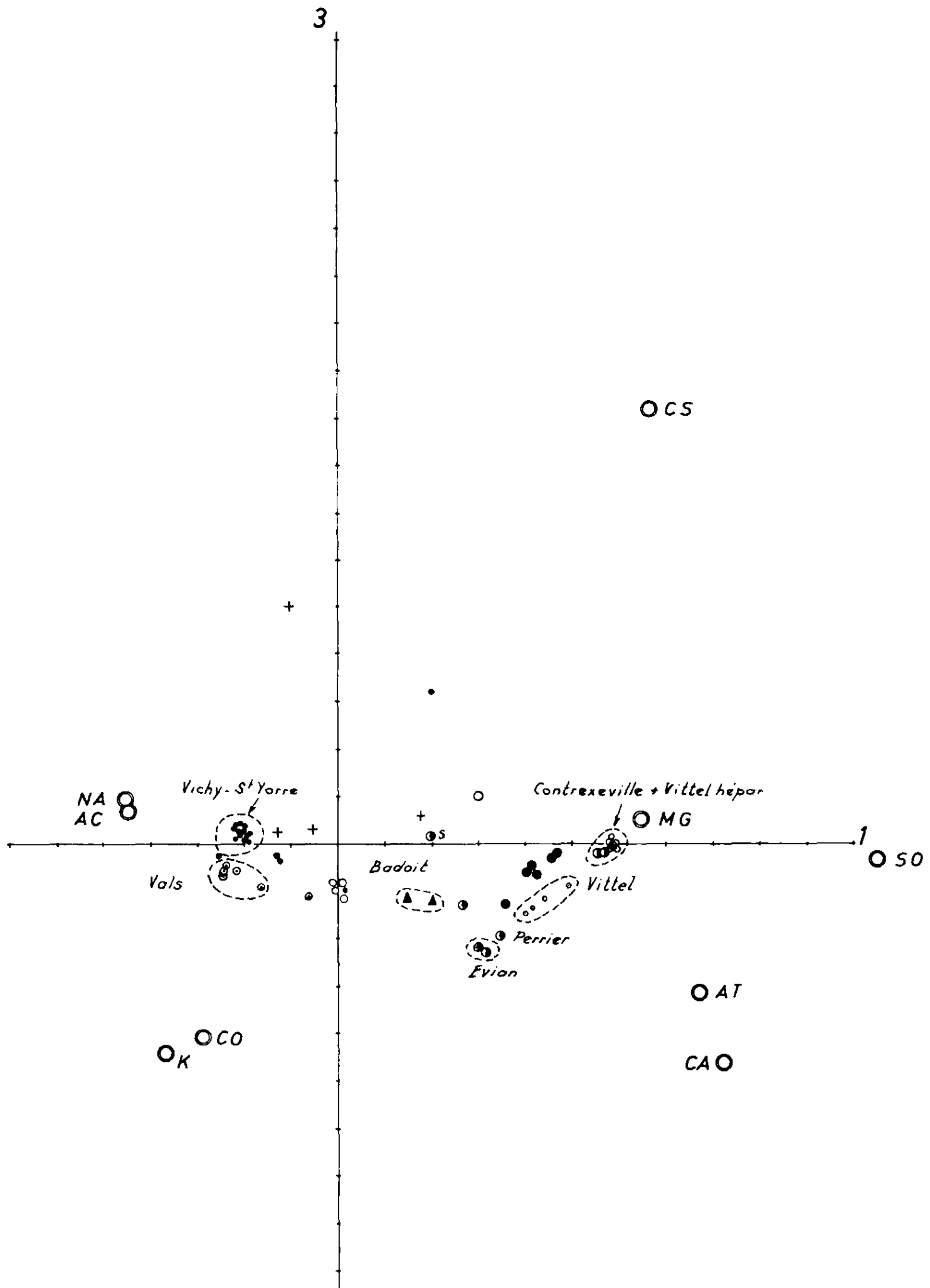
58 POINTS RETENUS

VALEURS A L ORIGINE CO= 0.000 A- = 0.000

8000 X 10⁻² CO

Fig.5

OCL



LES EAUX MINERALES FRANÇAISES

Direction 1 = 0,378 - Direction 3 = 0,030

Pourcent. 1 = 81,38 - Pourcent. 3 = 6,61

Echelle 1 et 3 = 4,9

LES EAUX MINÉRALES FRANÇAISES

Direction 1 = 0,271 - Direction 2 = 0,108

Pourcent 1 = 63,75 - Pourcent. 2 = 25,49

Echelle 1 et 2 = 9,3

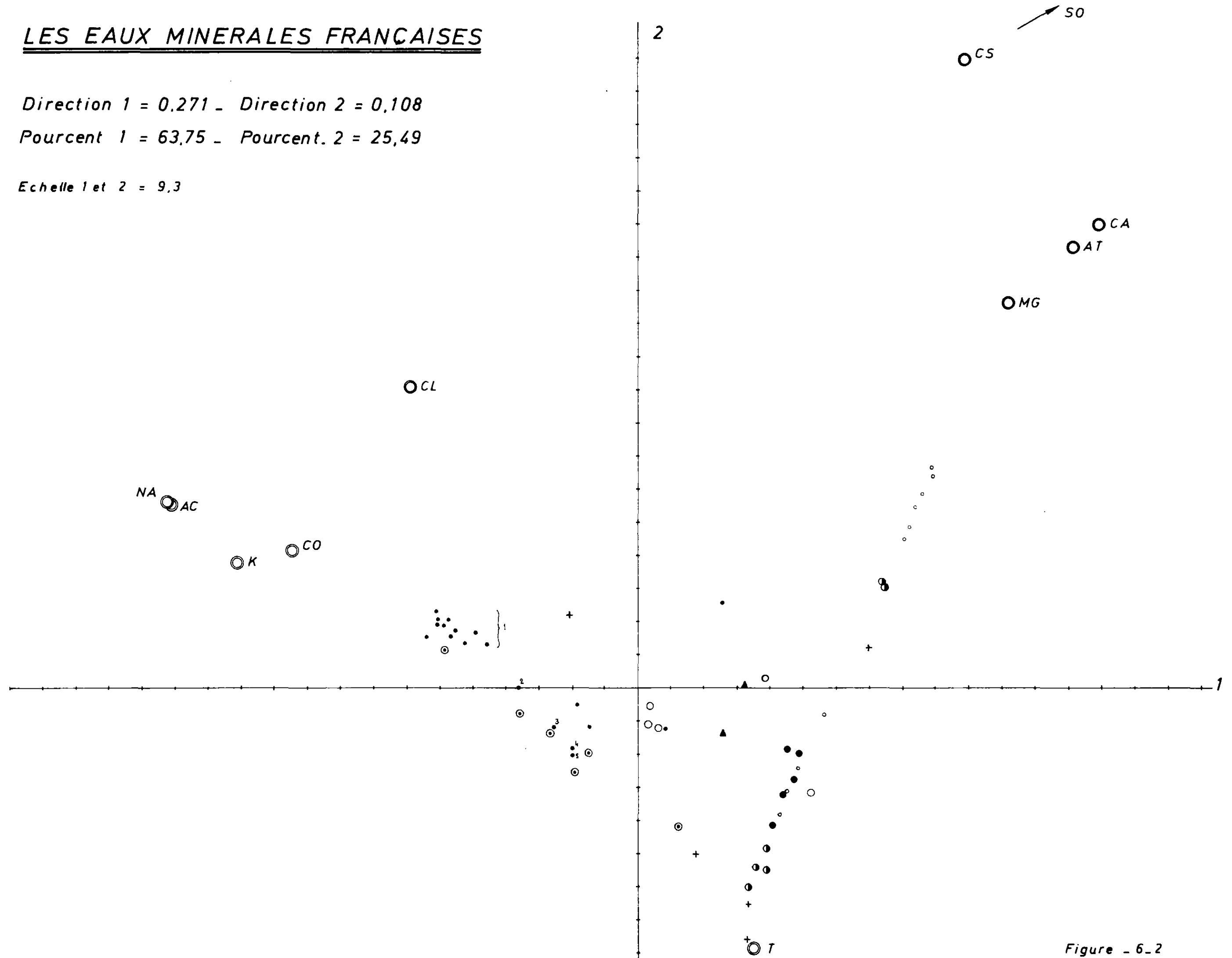
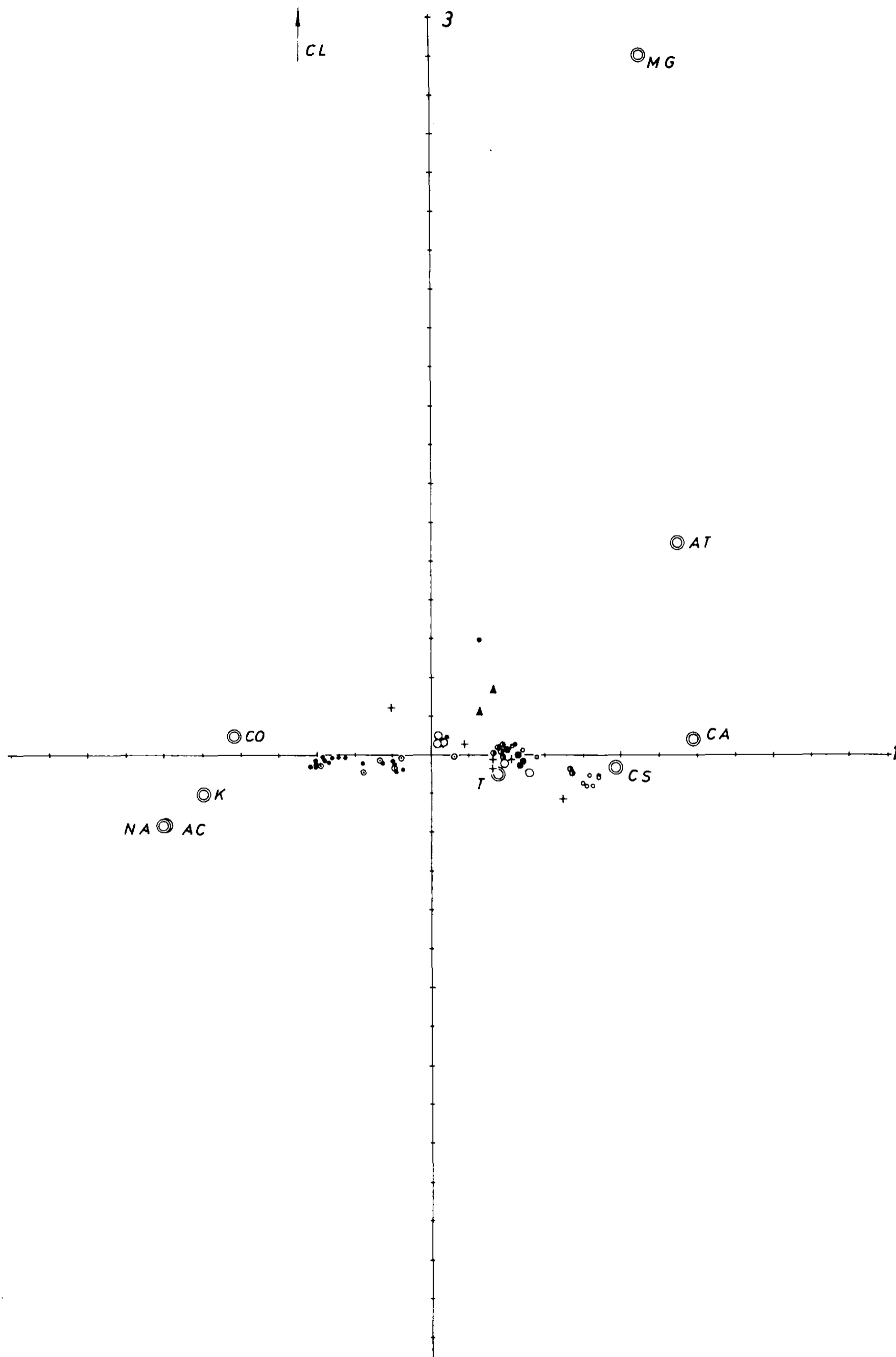


Figure - 6_2



LES EAUX MINERALES FRANÇAISES

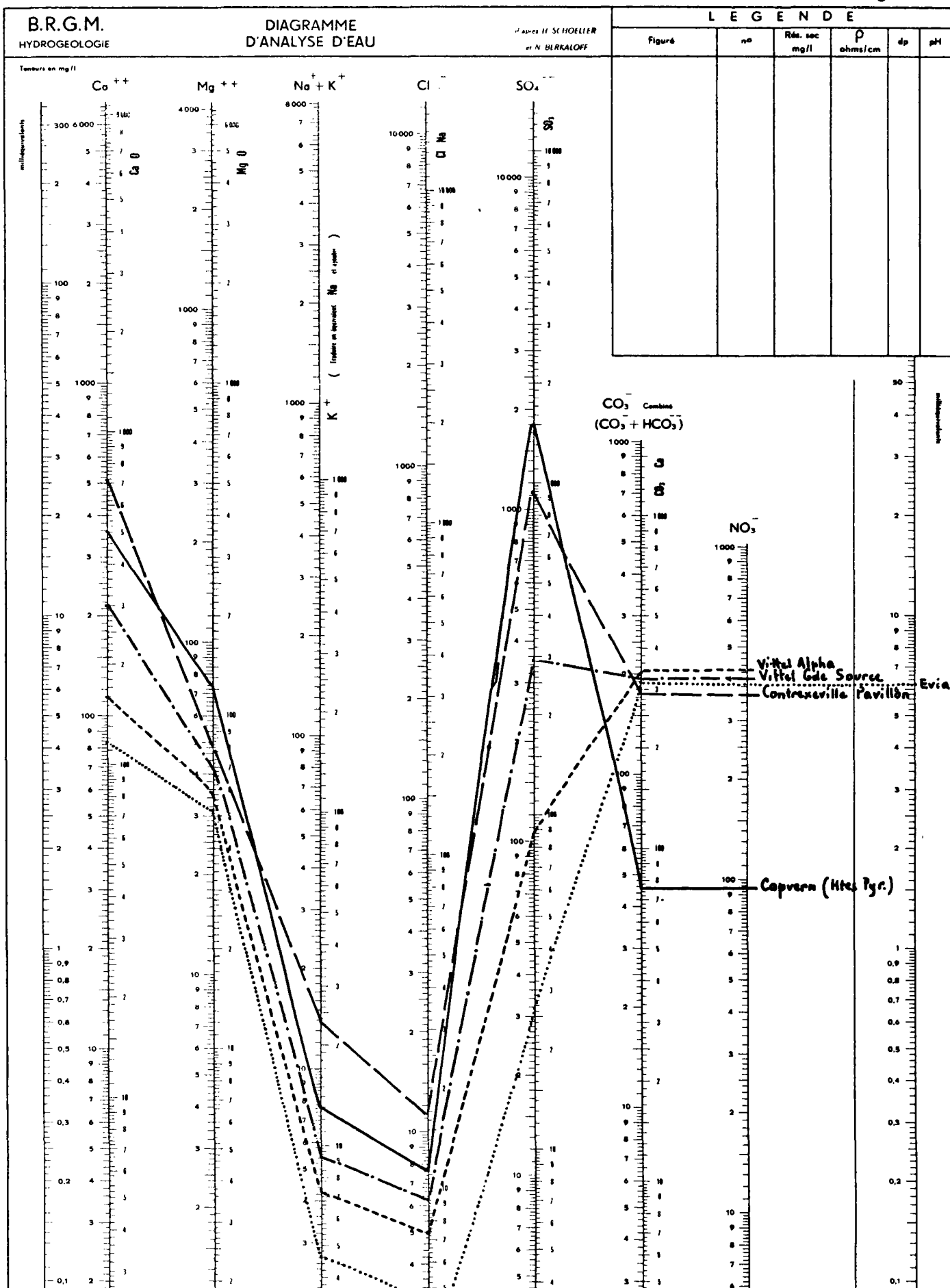
Direction 1 = 0,271 - Direction 3 = 0,027

Pourcent. 1 = 63,75 - Pourcent. 3 = 6,42

Echelle 1 et 3 = 4,6

⊙ 50

Fig. 7



EAUX MINERALES FRANCAISES

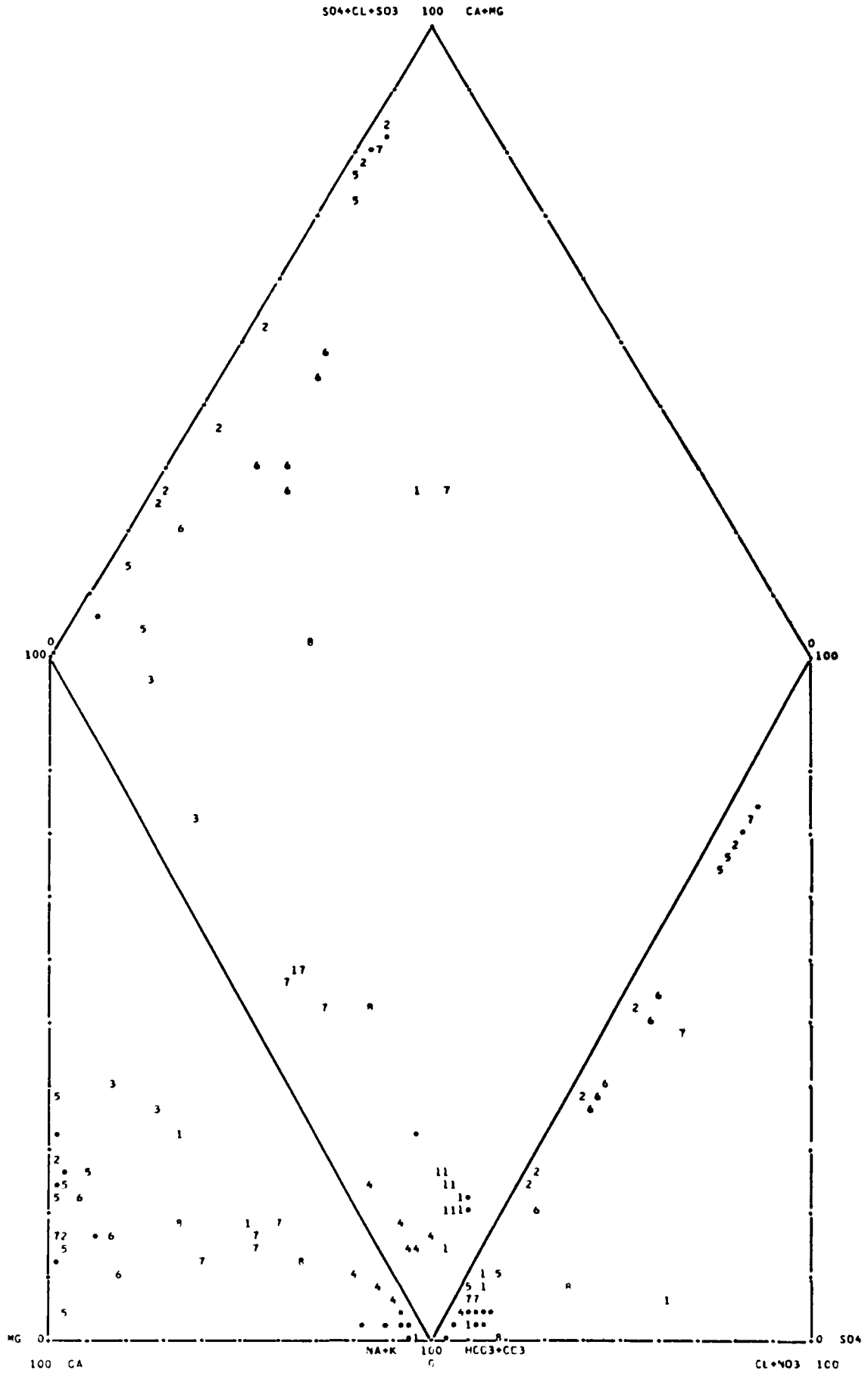


Fig. 9.2

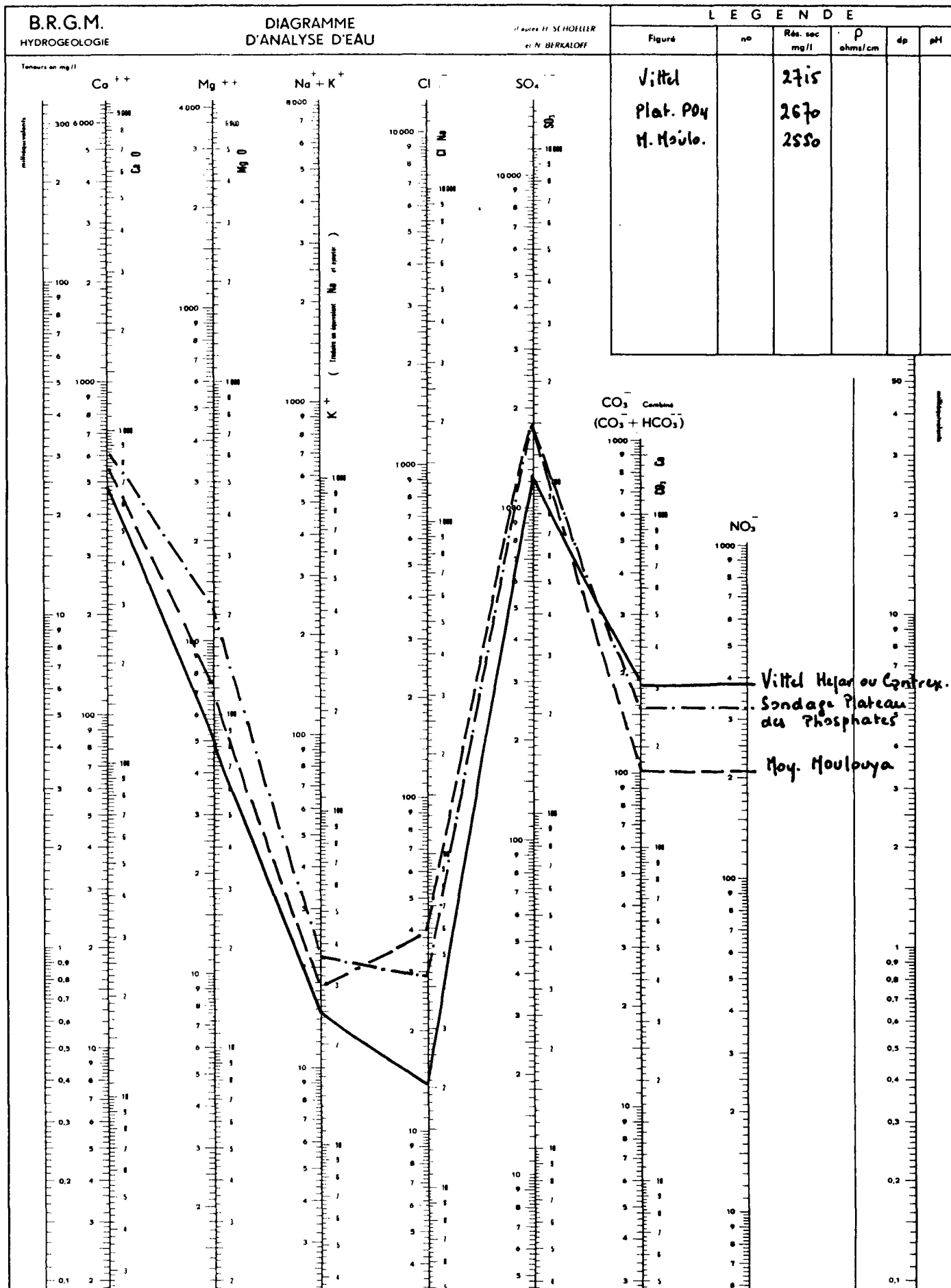


Fig. 9.4

