

## UN PROGRAMME DE CALCUL PERMETTANT LA DÉTERMINATION DES MINÉRAUX EN COURS DE DISSOLUTION ET EN VOIE DE FORMATION À PARTIR DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX D'ARÈNES MÉTÉORIQUES

Jean-Marie WACKERMANN (1), Pierre TREMBLAY (2)

(1) O.R.S.T.O.M., Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex.

(2) Laboratoire de Géochimie Sédimentaire, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex.

### RÉSUMÉ

*Des relations exponentielles, empiriques, liant les concentrations des ions majeurs et la conductivité électrique d'une solution, permettent de définir les espèces minérales en cours de dissolution et en voie de formation dans l'arène drainée. Leur détermination est facilitée par l'emploi d'une calculatrice programmable.*

MOTS-CLÉS : Géochimie — Minéralogie — Eaux souterraines — Eaux de surface — Modèle — Programme de calcul.

### ABSTRACT

A PROGRAM FOR DETERMINATION OF THE DISSOLVED AND NEOGENETIC MINERALS IN WEATHERING MANTLES, DATING FROM THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE RELATED WATERS

*A model has been designed to evaluate ionic concentrations in ground and superficial waters versus electrical conductivity. The related parameters allow the determination, using a program, of the dissolved and neofomed mineral species.*

KEY WORDS : Geochemistry — Mineralogy — Groundwaters — Superficial waters — Model — Program.

### INTRODUCTION

L'étude d'inventaires d'eaux souterraines et superficielles, de régions tempérées et tropicales, et des arènes supergènes dont elles sont issues, a permis d'élaborer un modèle qui décrit la distribution des teneurs des éléments majeurs dissous dans les solutions, en fonction de leur conductivité électrique (WACKERMANN, 1980, 1981). Pour chacun des ions, la concentration  $c$  est liée à la conductivité électrique  $\sigma$ , recalculée pour la température de référence de 25 °C, par les relations :

$$c = b \cdot \sigma^a \quad \text{ou} \quad \log(c) = a \cdot \log(\sigma) + \log(b) \quad (1)$$

Les unités utilisées sont, pour  $c$  et  $b$  : le milligramme par litre, le milliéquivalent (II<sup>+</sup>) par litre ou la molécule-gramme par litre ; pour  $\sigma$  : le microsiemens par centimètre.

### LA DISSOLUTION DES MINÉRAUX

Lorsque les phénomènes de néoformations minérales sont d'importance réduite à l'égard des apports dus aux dissolutions des minéraux, primaires ou secondaires, les points figuratifs du couple de valeurs concentration-conductivité sont répartis, pour chaque élément, sur une famille de courbes. En coordonnées bilogarithmiques, la famille de courbes est constituée par des droites parallèles dont le coefficient angulaire  $a$ , positif, est spécifique de l'ion considéré. L'ordonnée à l'origine ( $\log b$ ), relative à la conductivité de référence  $\sigma = 1$  microsiemens par cm, est caractéristique du minéral, hôte de l'élément, en cours de dissolution. La distribution du calcium est illustrée par le diagramme de la figure 1. Les tableaux I et II présentent les différentes valeurs des coefficients angulaires  $a$  et des paramètres  $b$  (en molécules par

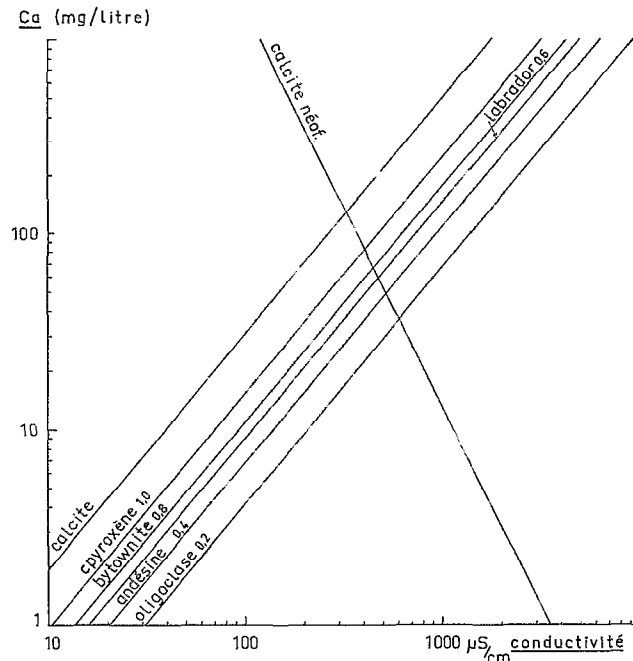


FIG. 1. — Distribution des teneurs en calcium en fonction de la conductivité des solutions.

litre x microsiemens par cm) obtenues à partir des différents inventaires d'eaux naturelles étudiés.

Si plusieurs minéraux hôtes d'un élément sont présents dans la formation aquifère, la concentration de cet élément dans la solution est déterminée par le paramètre  $b$  le plus élevé (courbe la plus à gauche). Les teneurs des différents éléments dissous croissent lorsque la conductivité de la solution (fonction de la charge globale) augmente, selon un processus d'auto-entraînement.

L'équilibre obligatoire entre les charges positives et les charges négatives, au sein d'une solution, amène à définir une concentration maximale pour les ions  $\text{HCO}_3^-$ , dans le cas où les autres anions ont des teneurs négligeables. Cette concentration maximale  $c_m$ , imposée par la charge cationique totale, peut être estimée à l'aide d'une relation empirique ( $c_m$  en molécules-gramme par litre) :

$$c_m = 1,09 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{1,01} \quad (2)$$

Le rapport entre la concentration effective et la concentration maximale indique le *taux* de l'ion  $\text{HCO}_3^-$  par rapport aux autres anions. Il est calculé au cours du programme (TAUX).

#### LES NÉOFORMATIONS MINÉRALES

Dans le cas où les solutions se concentrent, en raison d'une faible vitesse de percolation ou d'une

évaporation du solvant, les ions peuvent se combiner entre eux dans des édifices cristallins secondaires. Les points représentatifs du couple de variables concentration-conductivité suivent une courbe, ou une famille de courbes, déterminées également par les relations (1). L'utilisation de coordonnées bilogarithmiques permet, en effet, une représentation linéaire, comme dans le cas de la dissolution. L'abaissement des teneurs en calcium, dû à la précipitation de la calcite, est ainsi marqué par une droite à coefficient angulaire négatif (fig. 1). Les néogénèses de silicates phylliteux sont représentées, sur le diagramme relatif à  $\text{SiO}_2$ , par des droites parallèles dont l'ordonnée à l'origine ( $\log b_n$ ) décroît dans l'ordre : silice amorphe-smectites-intergrades-kaolinite-allophanes (WACKERMANN, 1980).

Le tableau III rassemble les valeurs des coefficients angulaires  $a_n$  et des paramètres  $b_n$  déterminées à partir des eaux naturelles étudiées.

#### MÉTHODES D'INTERPRÉTATION

On peut déduire des propriétés exposées ci-dessus une méthode d'estimation des concentrations des éléments majeurs dans une solution, dont a été mesurée la conductivité électrique, en fonction de la composition minéralogique de la formation aquifère. Inversement, le bilan analytique d'une solution permet de déterminer la liste des espèces minérales,

TABLEAU I

## Minéraux en cours de dissolution

Paramètres relatifs aux ions majeurs des solutions :  $a$  = coefficient angulaire ;  $b$  = paramètre spécifique du minéral (mol. l<sup>-1</sup> x microS.cm<sup>-2</sup>) ;  $n$  = nombre d'atomes par molécule (minéral).

minéral	$n$	$b$	minéral	$n$	$b$
$\text{Ca}^{++}$ $a = 1,20$			$\text{K}^+$ $a = 0,94$		
calcite	1,0	$3,105 \cdot 10^{-6}$	leucite	1,0	$1,958 \cdot 10^{-6}$
gypse	1,0	$2,777 \cdot 10^{-6}$	microcline	1,0	$1,339 \cdot 10^{-6}$
clinopyroxène	1,0	$1,535 \cdot 10^{-6}$	orthose	1,0	
bytownite	0,8	$1,084 \cdot 10^{-6}$	muscovite	1,0	$7,660 \cdot 10^{-7}$
amphibole	1,0	$9,680 \cdot 10^{-7}$	biotite	1,0	$7,142 \cdot 10^{-7}$
labrador	0,6	$9,009 \cdot 10^{-7}$	illite	0,7	$4,712 \cdot 10^{-7}$
andésine	0,4	$6,779 \cdot 10^{-7}$	$\text{SiO}_2$ $a = 0,91$		
oligoclase	0,2	$4,189 \cdot 10^{-7}$	albite	3,0	$1,159 \cdot 10^{-5}$
$\text{Mg}^{++}$ $a = 1,36$			microcline	3,0	$1,117 \cdot 10^{-5}$
olivine	1,8	$8,106 \cdot 10^{-7}$	smectite	3,9	$9,360 \cdot 10^{-6}$
serpentine	2,9	$5,737 \cdot 10^{-7}$	oligoclase	2,8	$9,158 \cdot 10^{-6}$
smectite	0,5	$5,142 \cdot 10^{-7}$	smectite	3,8	$8,723 \cdot 10^{-6}$
orthopyroxène	1,0	$3,565 \cdot 10^{-7}$	talc	4,0	$8,453 \cdot 10^{-6}$
chlorite	5,0	$2,624 \cdot 10^{-7}$	leucite	2,0	$7,712 \cdot 10^{-6}$
talc	3,0	$2,143 \cdot 10^{-7}$	smectite	3,6	$7,498 \cdot 10^{-6}$
biotite	3,0	$1,971 \cdot 10^{-7}$	amphibole	4,0	$7,358 \cdot 10^{-6}$
amphibole	2,5	$1,224 \cdot 10^{-7}$	andésine	2,6	$7,116 \cdot 10^{-6}$
clinopyroxène	1,0	$6,504 \cdot 10^{-8}$	orthopyroxène	1,0	
$\text{Na}^+$ $a = 1,18$			clinopyroxène	1,0	$6,518 \cdot 10^{-6}$
néphéline	1,0	$4,794 \cdot 10^{-6}$	illite	3,5	$6,422 \cdot 10^{-6}$
albite	1,0	$1,765 \cdot 10^{-6}$	smectite	3,4	$6,390 \cdot 10^{-6}$
oligoclase	0,8	$1,202 \cdot 10^{-6}$	labrador	2,4	$5,566 \cdot 10^{-6}$
andésine	0,6	$7,629 \cdot 10^{-7}$	intergrade	3,2	$5,393 \cdot 10^{-6}$
labrador	0,4	$4,020 \cdot 10^{-7}$	bytownite	2,2	$4,035 \cdot 10^{-6}$
bytownite	0,2	$1,240 \cdot 10^{-7}$	muscovite	3,0	$3,622 \cdot 10^{-6}$
$\text{Cl}^-$ $a = 1,46$			kaolinite	2,0	$3,448 \cdot 10^{-6}$
amphiboles		$1,519 \cdot 10^{-7}$	néphéline	1,0	$3,177 \cdot 10^{-6}$
micas		$7,954 \cdot 10^{-8}$	biotite	3,0	$3,136 \cdot 10^{-6}$
			olivine(90% fo)	1,0	$3,036 \cdot 10^{-6}$
			serpentine	2,0	$2,919 \cdot 10^{-6}$
			allopheane	1,8	$2,480 \cdot 10^{-6}$
			chlorite	3,0	$1,226 \cdot 10^{-6}$

en cours de dissolution et en voie de formation, présentes dans la formation drainée. Cette méthode définit le minéral présent, hôte de l'élément considéré, dont le paramètre  $b$  est le plus élevé. L'ensemble des espèces répertoriées, à partir des différents éléments majeurs, fournit généralement la composition minéralogique globale de la formation. Néanmoins, dans certains cas, la présence d'un minéral très soluble, ne comportant que deux éléments (péridot), oblitère dans cette méthode un autre minéral, de composition voisine, mais moins soluble (serpentine).

La méthode de traitement graphique s'avère simple et rapide dans le cas d'un nombre réduit d'analyses. La proximité du point figuratif du couple de valeurs concentration-conductivité par rapport à l'une des courbes de référence d'un diagramme bilogarithmique indique que la solution a été en contact avec le minéral, en cours de dissolution ou en voie de formation, correspondant. Dans le cas d'une espèce minérale à composition définie (microcline, gypse, etc.) l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs de référence ne dépasse pas 10 %.

TABEAU II

Minéraux en cours de dissolution

Paramètres relatifs aux ions OH<sup>-</sup> (pH) :  $a$  = coefficient angulaire = 0,25 ;  $b$  = paramètre spécifique du minéral (unités pH)

minéral	$\underline{b}$
carbonates	7,90
silicates I <sup>res</sup>	7,28
smectites	6,89
intergrades	6,50
kaolinite	5,44
allophanes	4,98

en règle générale. Dans le cas des espèces à substitutions progressives (plagioclases, pyroxènes, carbonates, etc.) la position du point figuratif permet de déterminer le terme isomorphe concerné.

Cette méthode est fastidieuse pour un nombre élevé de données, et, dans ce cas, le recours au calcul s'impose. A cet effet, la relation (1) conduit au calcul des paramètres  $b$  et  $b_n$ , pour chaque ion majeur :

$$b - c \cdot \sigma^{-a} \quad \text{ou} \quad b_n = c \cdot \sigma^{-a_n} \quad (3)$$

Le calcul successif des rapports entre les valeurs  $b$  ou  $b_n$  calculées et les paramètres de référence des différentes espèces minérales répertoriées (tableaux I à III) permet la sélection des quotients les plus proches de l'unité. Les minéraux correspondants déterminent la composition minéralogique, primaire et secondaire, de l'arène.

Le calcul automatique est indiqué pour exécuter cette succession d'opérations. Des programmes de calcul ont été élaborés pour l'emploi d'une calculatrice programmable et d'un mini-ordinateur.

PROGRAMME DE CALCUL

Le programme présenté ci-dessous est destiné à l'utilisation d'une calculatrice programmable, alphanumérique, HEWLETT-PACKARD 41C, munie de deux mémoires additionnelles, d'une annexe imprimante et d'un lecteur de cartes magnétiques. Il utilise 11 mémoires pour la mémorisation des données analytiques et 4 mémoires pour le stockage des valeurs calculées intermédiaires. Le programme est conservé sur 11 pistes (6 cartes). Il est l'aboutissement de la recherche d'un équilibre optimum entre une vitesse d'exécution rapide et une économie de

TABEAU III

Minéraux en cours de néoformation

Paramètres relatifs aux ions majeurs des solutions :  $a_n$  = coefficient angulaire ;  $b_n$  = paramètre spécifique du minéral (mol.l<sup>-1</sup> x microS.cm<sup>-1</sup>) ;  $n$  = nombre d'atomes par molécule

minéral	$\underline{n}$	$\underline{b}_n$	minéral	$\underline{n}$	$\underline{b}_n$
$\underline{Ca^{++}} \quad \underline{a_n} = -2,04$			$\underline{SiO_2} \quad \underline{a_n} = -0,04$		
calcite	1,0	$4,323 \cdot 10^{+2}$	silice amorphe	4,0	$2,951 \cdot 10^{-3}$
			smectite	3,8	$2,389 \cdot 10^{-3}$
$\underline{Mg^{++}} \quad \underline{a_n} = -1,62$			smectite	3,6	$1,892 \cdot 10^{-3}$
magnésite	1,0	$2,218 \cdot 10^{+1}$	smectite	3,4	$1,478 \cdot 10^{-3}$
			intergrade	3,2	$1,138 \cdot 10^{-3}$
$\underline{HCO_3^-} \quad \underline{a_n} = -1,66$			kaolinite	2,0	$5,712 \cdot 10^{-4}$
calcite	1,0	$1,300 \cdot 10^{+2}$	serpentine	2,0	$4,420 \cdot 10^{-4}$
magnésite	1,0	$4,812 \cdot 10^{+1}$	allophane	1,8	$3,417 \cdot 10^{-4}$

« pas » (au moyen de sous-programmes et de boucles), en vue d'introduire un maximum d'espèces minérales.

L'organigramme de la figure 2 indique la succession des opérations d'entrée des valeurs, de calculs et d'impressions des résultats. Le tableau IV donne le détail des lignes de programme, dans le cas d'un traitement de données analytiques exprimées en

milligrammes par litres (label « BMGL »). Nous avons estimé qu'il est préférable d'élaborer un programme distinct pour le calcul à partir de données exprimées en milliéquivalents par litre, afin de réserver un maximum de lignes aux minéraux de référence. La transposition (label « BMEL ») s'obtient aisément en remplaçant les poids atomiques dans les lignes 48,

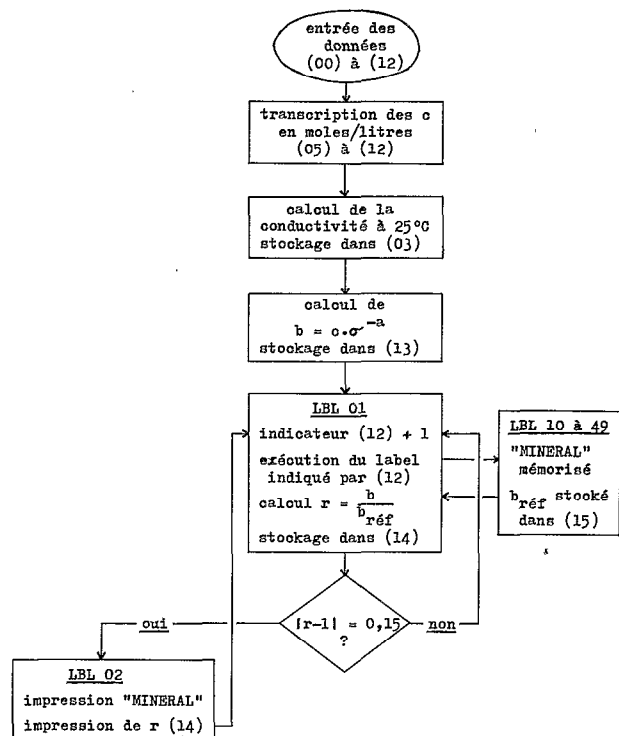


FIG. 2. — Organigramme du programme de calcul « BMGL ».

50, 52, 54 et 314 par 1000, et dans les lignes 44 et 46 par 2000, et en substituant dans la ligne 317 le sigle « MEL » à « MGL ».

La calculatrice imprime le nom d'un minéral de la liste de référence lorsque le quotient du paramètre  $b$  (ou  $b_n$ ) par le paramètre de référence, relatif à ce minéral, est compris entre 1,15 et 0,85. Dans ce cas, le quotient est imprimé sous le nom du minéral. Il constitue une expression du concept de sursatura-

tion (valeurs supérieures à 1) et de sous-saturation (valeurs inférieures à 1) dans le cas des néogènes.

Quand, pour un élément, aucun nom de minéral, primaire ou secondaire, n'est imprimé, la valeur de  $b$  (« B ») ou de  $b_n$  (« BN ») correspondante doit être comparée aux valeurs de référence indiquées dans les tableaux I à III. On peut ainsi définir les termes intermédiaires des séries isomorphes. Lorsque la valeur du paramètre est inférieure aux valeurs de référence, pour l'élément concerné, cet élément représente un composant à l'état de traces, ou mineur, dans les édifices cristallins présents.

## CONCLUSION

Ce programme de calculs a permis de traiter un grand nombre de données analytiques relatives à des inventaires d'eaux naturelles. Pour les eaux souterraines, les résultats sont généralement en bon accord avec la composition minéralogique des arènes drainées, lorsqu'elle est connue. A la limite de deux formations aquifères, de nature différente, des mélanges sont notés. Parmi les données publiées, des informations complètes sur les eaux et les arènes sont fournies par BLOT (1970), TRESCASES (1975), DEMOZ (1979) et AKITI (1980). Pour les eaux de surface, la liste des minéraux obtenue par ce mode de calcul est représentative des arènes du bassin versant amont (WACKERMANN, 1975 ; LE MARÉCHAL, 1976 ; DEVER, 1978, entre autres).

Les travaux en cours permettront de compléter les tableaux de paramètres, notamment en ce qui concerne les néoformations dans les solutions concentrées. Les paramètres peuvent aussi être calculés à partir des énergies libres de formation des minéraux en cours de dissolution et de néoformation.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.,  
le 22 avril 1982.

TABLEAU IV

Programme de calcul « BMGL »

<u>entrée des données:</u>	<u>conversion de la conductivité à 25°C:</u>
01+LBL "BMGL"	$\sigma_{25^\circ} = \frac{\sigma_t}{(t-25) \cdot 0,0197+1}$
02 "REF"	
03 AON	58 RCL 01
04 PROMPT	59 25
05 ASTO 00	60 -
06 AOFF	61 .0197
07 FIX 3	62 *
08 "TEMP"	63 1
09 PROMPT	64 +
10 STO 01	65 1/X
11 "PH"	66 RCL 03
12 PROMPT	67 *
13 STO 02	68 STO 03
14 "COND"	69 "COND 25 "
15 PROMPT	70 ARCL 03
16 STO 03	71 RVIEW
17 "CA"	
18 PROMPT	
19 STO 04	<u>b(pH)=pH-0,25.log(<math>\sigma</math>):</u>
20 "MC"	
21 PROMPT	72 LOG
22 STO 05	73 -.25
23 "NA"	74 *
24 PROMPT	75 RCL 02
25 STO 06	76 +
26 "K"	77 STO 13
27 PROMPT	78 "PH E "
28 STO 07	79 ARCL 13
29 "CL"	80 RVIEW
30 PROMPT	81 9
31 STO 08	82 STO 12
32 "HCO3"	
33 PROMPT	<u>sous-programme (exécution):</u>
34 STO 09	indicateur(12) - appel labels 1 à 49
35 "SI02"	calcul de r - test
36 PROMPT	83+LBL 01
37 STO 10	84 1
38 "CALCUL"	85 ST+ 12
39 PROMPT	86 XEQ IND 12
40 SF 12	87 RCL 13
41 VIEW 00	88 RCL 15
42 CF 12	89 /
43 ADV	90 STO 14
44 00000	91 1
45 ST/ 04	92 -
46 24312	93 ABS
47 ST/ 05	94 .15
48 22990	95 X>Y?
49 ST/ 06	96 GTO 02
50 39098	97 GTO 01
51 ST/ 07	<u>sous-programme (impression):</u>
52 35453	
53 ST/ 08	98+LBL 02
54 61017	99 RVIEW
55 ST/ 09	100 VIEW 14
56 60000	101 GTO 01
57 ST/ 10	

PROGRAMME DE CALCUL POUR LES EAUX D'ARÈNES

pH(x):

102\*LBL 10  
 103 \*CALCAI\*  
 104 7.9  
 105 STO 15  
 106 RTN  
 107\*LBL 11  
 108 \*SILICA\*  
 109 7.28  
 110 STO 15  
 111 RTN  
 112\*LBL 12  
 113 \*MONTMO\*  
 114 6.89  
 115 STO 15  
 116 RTN  
 117\*LBL 13  
 118 \*KAOLIN\*  
 119 5.44  
 120 STO 15  
 121 RTN  
 122\*LBL 14  
 123 \*DEFICI\*  
 124 4.98  
 125 STO 15  
 126 RTN

Ca(b):

127\*LBL 15  
 128 SCI 3  
 129 RCL 03  
 130 -1.2  
 131 YXX  
 132 RCL 04  
 133 \*  
 134 STO 13  
 135 \*CA B \*  
 136 ARCL 13  
 137 AVIEW  
 138 \*CALCIT\*  
 139 3.105 E-6  
 140 STO 15  
 141 RTN  
 142\*LBL 16  
 143 \*BYTO.8\*  
 144 1.004 E-6  
 145 STO 15  
 146 RTN  
 147\*LBL 17  
 148 \*LABR.6\*  
 149 9.009 E-7  
 150 STO 15  
 151 RTN  
 152\*LBL 18  
 153 \*ANDE.4\*  
 154 6.779 E-7  
 155 STO 15  
 156 RTN  
 157\*LBL 19  
 158 \*OLIG.2\*  
 159 4.189 E-7  
 160 STO 15  
 161 RTN

Ca(b<sub>n</sub>):

162\*LBL 20  
 163 RCL 03  
 164 2.04  
 165 YXX  
 166 RCL 04  
 167 \*  
 168 STO 13  
 169 \* BN \*  
 170 ARCL 13  
 171 AVIEW  
 172 \*CALCIT\*  
 173 4.323 E2  
 174 STO 15  
 175 RTN  
 176\*LBL 21  
 177 \* CALCITE R \*  
 178 ARCL 14  
 179 AVIEW

Mg(b):

180 RCL 03  
 181 -1.36  
 182 YXX  
 183 RCL 05  
 184 \*  
 185 STO 13  
 186 \*MG B \*  
 187 ARCL 13  
 188 AVIEW  
 189 \*FORI.8\*  
 190 8.106 E-7  
 191 STO 15  
 192 RTN  
 193\*LBL 22  
 194 \*SERPEN\*  
 195 5.737 E-7  
 196 STO 15  
 197 RTN  
 198\*LBL 23  
 199 \*OPYROX\*  
 200 3.565 E-7  
 201 STO 15  
 202 RTN  
 203\*LBL 24  
 204 \*CHLORI\*  
 205 2.624 E-7  
 206 STO 15  
 207 RTN  
 208\*LBL 25  
 209 \*BIOTIT\*  
 210 1.971 E-7  
 211 STO 15  
 212 RTN  
 213\*LBL 26  
 214 \*AMPHIB\*  
 215 1.224 E-7  
 216 STO 15  
 217 RTN

Na(b):

218\*LBL 27  
 219 RCL 03  
 220 -1.18  
 221 YTX  
 222 RCL 06  
 223 \*  
 224 STO 13  
 225 \*NA B \*  
 226 ARCL 13  
 227 AVIEW  
 228 \*NEPHEL\*  
 229 4.794 E-6  
 230 STO 15  
 231 RTH  
 232\*LBL 28  
 233 \*ALBITE\*  
 234 1.765 E-6  
 235 STO 15  
 236 RTH  
 237\*LBL 29  
 238 \*OLIG.8\*  
 239 1.202 E-6  
 240 STO 15  
 241 RTH  
 242\*LBL 30  
 243 \*ANDE.6\*  
 244 7.629 E-7  
 245 STO 15  
 246 RTH  
 247\*LBL 31  
 248 \*LABR.4\*  
 249 4.02 E-7  
 250 STO 15  
 251 RTH  
 252\*LBL 32  
 253 \*BYTO.2\*  
 254 1.24 E-7  
 255 STO 15  
 256 RTH

K(b):

257\*LBL 33  
 258 RCL 03  
 259 -.94  
 260 YTX  
 261 RCL 07  
 262 \*  
 263 STO 13  
 264 \*K B \*  
 265 ARCL 13  
 266 AVIEW  
 267 \*LEUCIT\*  
 268 1.958 E-6  
 269 STO 15  
 270 RTH  
 271\*LBL 34  
 272 \*ORT=MI\*  
 273 1.339 E-6  
 274 STO 15  
 275 RTH

K(b)-suite:

276\*LBL 35  
 277 \*MICAS\*  
 278 7.66 E-7  
 279 STO 15  
 280 RTH  
 281\*LBL 36  
 282 \*ILLI.7\*  
 283 4.712 E-7  
 284 STO 15  
 285 RTH

Cl(b):

286\*LBL 37  
 287 RCL 03  
 288 -1.46  
 289 YTX  
 290 RCL 08  
 291 \*  
 292 STO 13  
 293 \*CL B \*  
 294 ARCL 13  
 295 AVIEW  
 296 \*AMPHIB\*  
 297 1.519 E-7  
 298 STO 15  
 299 RTH  
 300\*LBL 38  
 301 \*MICAS\*  
 302 7.954 E-8  
 303 STO 15  
 304 RTH

HCO<sub>3</sub> (maximum-taux):

305\*LBL 39  
 306 \*HCO3 MAX\*  
 307 AVIEW  
 308 RCL 03  
 309 1.01  
 310 YTX  
 311 1.09 E-5  
 312 \*  
 313 STO 13  
 314 61017  
 315 \*  
 316 STO 14  
 317 \* MGL \*  
 318 ARCL 14  
 319 AVIEW  
 320 RCL 09  
 321 RCL 13  
 322 /  
 323 STO 14  
 324 \* TAUX \*  
 325 ARCL 14  
 326 AVIEW



HCO<sub>3</sub>(b<sub>n</sub>):

327 RCL 03  
 328 1.66  
 329 Y+X  
 330 RCL 09  
 331 \*  
 332 STO 13  
 333 \* BN  
 334 ARCL 13  
 335 AVIEW  
 336 \*CALCIT\*  
 337 1.3 E2  
 338 STO 15  
 339 RTH

Si(b):

340\*LBL 40  
 341 RCL 03  
 342 -.91  
 343 Y+X  
 344 RCL 10  
 345 \*  
 346 STO 13  
 347 \*SI B  
 348 ARCL 13  
 349 AVIEW  
 350 \*ALB=MI\*  
 351 1.159 E-5  
 352 STO 15  
 353 RTH  
 354\*LBL 41  
 355 \*AND=OP\*  
 356 7.116 E-6  
 357 STO 15  
 358 RTH  
 359\*LBL 42  
 360 \*CPYROX\*  
 361 6.510 E-6  
 362 STO 15  
 363 RTH

Si(b<sub>n</sub>):

364\*LBL 43  
 365 RCL 03  
 366 .04  
 367 Y+X  
 368 RCL 10  
 369 \*  
 370 STO 13  
 371 \* NEOGENESES\*  
 372 PRA  
 373 \* BN  
 374 ARCL 13  
 375 AVIEW  
 376 \*MON3.8\*  
 377 2.389 E-3  
 378 STO 15  
 379 RTH  
 380\*LBL 44  
 381 \*MON3.6\*  
 382 1.892 E-3  
 383 STO 15  
 384 RTH  
 385\*LBL 45  
 386 \*MON3.4\*  
 387 1.478 E-3  
 388 STO 15  
 389 RTH  
 390\*LBL 46  
 391 \*INTERG\*  
 392 1.138 E-3  
 393 STO 15  
 394 RTH  
 395\*LBL 47  
 396 \*KAOLIN\*  
 397 5.712 E-4  
 398 STO 15  
 399 RTH  
 400\*LBL 48  
 401 \*DEFICI\*  
 402 3.417 E-4  
 403 STO 15  
 404 RTH

appel du calcul suivant:

405\*LBL 49  
 406 BEEP  
 407 \*SUITE\*  
 408 PROMPT  
 409 ADV  
 410 GTO \*BMGL\*  
 411 .END.

## BIBLIOGRAPHIE

- AKITI (T. T.), 1980. — Étude géochimique et isotopique de quelques aquifères du Ghana. Thèse Sci., Paris-Sud, 232 p. *multigr.*
- BLOT (A.), 1970. — Les nappes phréatiques au Sénégal oriental. Données géochimiques sur les eaux. Rapp. O.R.S.T.O.M., Dakar, 34 p. *multigr.*
- DEMOZ (D. L.), 1979. — Studio idrogeologico del Massiccio del Monte Bianco. Tese Laurea, Torino, *multigr.*
- DEVER (L.), 1978. — Teneurs ioniques et isotopiques des eaux de surface en période d'hydraulicité exceptionnelle et mécanismes de décharge des nappes : cas du Bassin de la Seine en 1976-1977. Thèse Sci., Paris-VI, *multigr.*
- LE MARÉCHAL (A.), 1976. — Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun. *Trav. et Doc. O.R.S.T.O.M.*, 59, Paris, 175 p.
- TRESCASES (J. J.), 1975. — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 78, Paris, 259 p.
- WACKERMANN (J. M.), 1975. — L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Étude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse Sci., Strasbourg, 373 p. *multigr.*
- WACKERMANN (J. M.), 1980. — Modèles décrivant les variations de teneurs dans les arènes d'altération météorique tropicale et les nappes afférentes. *Sci. de la Terre, Sér. Informatique Géologique*, 14 : 201-217.
- WACKERMANN (J. M.), 1981. — Une méthode de calcul de la composition des eaux d'arènes météoriques basée sur leur conductivité électrique. 1st U.E.G. Meeting, Strasbourg, et Terra cognita, 1 : 122.