HYDROGEOLOGIE DES MILIEUX FISSURES

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

TYPES HYDROCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU FISSURÉ DE SOCLE

B.R.G.M.
15. MAR. 1985
BIBLIOTHÈQUE

Département EAU

Rapport de D.E.A.
84 SGN 378 EAU

Octobre 1984

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

TYPES HYDROCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU FISSURÉ DE SOCLE

par

Dominique DARMENDRAIL

Département EAU
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

Rapport de D.E.A.

84 SGN 378 EAU

Octobre 1984

Réalisation : Département Applications Graphiques

AVANT-PROPOS

Ce travail constitue le rapport de stage industriel du Diplôme d'Etudes Approfondies, intitulé : "Matières premières énergétiques et minérales" de l'Institut de Géodynamique de Bordeaux III. Il a eu pour cadre le département EAU du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.).

Je tiens à remercier Monsieur J.J. COLLIN qui m'a donné la possibilité d'effectuer ce stage dans son service du 17 juillet au 21 septembre 1984. Mes remerciements vont aussi à Monsieur B. MOUSSIé pour son assistance matérielle, à Monsieur A. LANDREAU pour son encadrement scientifique, ainsi qu'à toutes celles qui ont collaboré à la collecte des données et à la dactylographie de ce document.

Je suis également reconnaissante à Madame C. MOUSSIé pour ses précieux conseils.

SOMMAIRE

pages

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I - L'ALTERATION DES ROCHES DU SOCLE 3

1. FACTEURS REGISSANT L'ALTERATION 5
   1.1. Facteurs internes 5
   1.2. Facteurs externes 5
2. LE FACTEUR MAJEUR : LE CLIMAT 11
   2.1. Le climat tropical humide 11
   2.2. Le climat tempéré océanique 12
   2.3. Le climat méditerranéen 12
   2.4. Le climat aride 12
   2.5. Le climat arctique 13
3. LES PROCESSUS ZONAUX RESULTANT DE L'ALTERATION DES ROCHES (Cycle alumino-silicique) 15 15
4. L'ALTERATION SOUS DIFFERENTS CLIMATS 17
   4.1. Climat tropical humide (Afrique Occidentale) 17
      4.1.1. Les granites 17
      4.1.2. Les roches cristallines basiques 23
      4.1.3. Les roches métamorphiques 27
   4.2. Le climat tempéré océanique 28
      4.2.1. Les granites 28
      4.2.2. Les roches cristallines basiques 30
      4.2.3. Les roches métamorphiques 31
      4.2.4. Conclusions sur les altérations en milieu tempéré océanique 31
   4.3. Le climat aride 32
   4.4. Le climat méditerranéen 32
   4.5. Le climat arctique 33
5. LES VARIATIONS DES CONDITIONS DE L'ALTERATION 35
   5.1. Influence de la roche mère 35
   5.2. Influence de la température 35
   5.3. Influence du milieu réducteur 36
   5.4. Influence de la pression partielle de CO_2 36
6. POSSITILITE DE DEPART DES IONS 37

CHAPITRE II - LES EAUX SOUTERRAINES 39
1. DEFINITION DES "TYPES HYDROCHIMIQUES" 41
1.1. Choix des critères de caractérisation 41
1.1.1. Choix et justification 41
1.1.2. Classifications existantes 42
1.1.3. Qualité de l'eau 44
2. LES TYPES HYDROCHIMIQUES DES EAUX 49
2.1. Origine de l'information et fiabilité 49
2.2. Les types hydrochimiques des eaux souterraines 49
2.2.1. Les eaux sous climat tropical humide 49
2.2.2. Les eaux sous climat tempéré océanique 60
2.2.3. Les eaux sous climat méditerranéen 66
2.2.4. Les eaux sous climat aride 70
2.2.5. Les eaux sous climat arctique 76
3. LES VARIATIONS SAISONNIERES ET HYDRAULIQUES 79
3.1. Les variations saisonnières des compositions chimiques 79
3.1.1. Le milieu tropical 79
3.1.2. Le milieu tempéré océanique 79
3.2. Les variations hydrauliques 81
3.2.1. Le climat tropical 81
3.2.2. Le climat aride 81
3.2.3. Le climat tempéré océanique 81

SYNTHESE 83

BIBLIOGRAPHIE 103

ANNEXE 1 117

ANNEXE 2 123

LISTE DES FIGURES

FIGURE n° 1 - Situation géographique des régions étudiées 7

FIGURE n° 2 - Eléments ou composés dominant dans les eaux souterraines et lacustres en pays de plaine

FIGURE n° 3 - Distribution potentielle des phénomènes d'altération à la surface du globe

FIGURE n° 4 - Possibilités d'exportation de la silice, de l'aluminium et du Fer 15

FIGURE n° 5a - Coupe-type de l'altération sur granites sous climat chaud et humide 18

FIGURE n° 5b - Coupe schématique de l'altération des granites 19
19

FIGURE n° 6 - Superposition théorique des horizons formés dans l'altération d'un granite 21

FIGURE n° 7 - Etapes de la formation d'un profil complet sur granites 22

FIGURE n° 8 - Evolution des minéraux primaires 24

FIGURE n° 9 - Répartition des niveaux d'accumulation le long d'une chaîne de sol 26

FIGURE n° 10 - Phénomènes essentiels de l'arénisation dans les différents niveaux 29

FIGURE n° 11 - Schéma des principaux cycles géochimiques dans des toposéquences de sols tropicaux 38

FIGURE n° 12 - Classification des eaux naturelles 43

FIGURE n° 13 - Diagramme d'analyse d'eau 45

FIGURE n° 14 - Diagramme de potabilité des eaux 46

FIGURE n° 15 - Classification selon différents besoins 47

FIGURE n° 16 - Eaux des granites 51

FIGURE n° 17 - Diagramme d'analyse d'eau, Schistes en milieu tropical 53
53

FIGURE n° 18 - Relations eaux-aquifères pour K 55

FIGURE n° 19 - Relations eaux-aquifères pour Mg/K 57

FIGURE n° 20 - Relations Mg/K - Cl 58

FIGURE n° 21 - Diagramme d'analyse d'eau, granites en Bretagne 59

FIGURE n° 22 - Diagramme d'analyse d'eau, schistes en Bretagne 60

FIGURE n° 23 - Diagramme d'analyse d'eau, Granites en Corse 67

FIGURE n° 24 - Diagramme d'analyse d'eau, Schistes en Corse 68

FIGURE n° 25 - Diagramme d'analyse d'eau, Granites en Arabie Saoudite 71 71

FIGURE n° 26 - Diagramme d'analyse d'eau, roches basiques en Arabie Saoudite 72

FIGURE n° 27 - Diagramme d'analyse d'eau, schistes en Arabie Saoudite 73

FIGURE n° 28 - Eaux bicarbonatées 75

FIGURE n° 29 - Variations saisonnières des compositions chimiques des eaux 80

FIGURE n° 30 - Variations saisonnières des compositions chimiques des eaux 82

FIGURE n° 31 - Variations du rapport SiO_2/bases dans les eaux des granites et des roches basiques 86

FIGURE n° 32 - Variations des rapports R_e et R_f dans les eaux des granites et des roches basiques 87

INTRODUCTION

Dans de nombreux pays, le milieu fissuré de socle constitue la seule possibilité de résoudre les problèmes d'alimentation en eau potable. Longtemps, il a été admis qu'il n'existait pas d'eau en quantité exploitable dans les granites et autres roches de socle. Cette hypothèse paraissait fondée sur le fait que le granite est une des roches les plus "dures". Depuis quelques années, il est prouvé que ce milieu peut fournir une eau relativement bonne et abondante, dans certaines conditions (de fracturation, par exemple). La prospection des terrains de socle fissuré s'est engagée sur une grande échelle, afin de résoudre d'épineux problèmes d'approvisionnement (pays arides, Afrique de l'Ouest).

La qualité des eaux rencontrées est en général bonne du fait de la faible solubilité des matériaux. De nombreux auteurs, tels que SILINE-BEKTCHOURINE (1952, 1956), SCHOELLER H. (dès 1941) et SCHOELLER M. (1963), ont abordé le complexe problème de l'acquisition de la minéralisation. De leurs travaux, résulte une zonation de la composition chimique des eaux, résultant de la combinaison de l'action de trois facteurs agissant à des degrés différents.

Au premier rang, on peut placer la première grande zonalité due au climat qui se traduit par une répartition, à l'échelle du globe terrestre, des "salinités" suivant une logique induite par la zonation climatique. Elle dépend principalement de l'indice d'aridité (pluviométrie plus ou moins importante et dispersée, évaporation plus ou moins forte, valeurs plus ou moins élevées de température, ...). Cela va se caractériser par des degrés de concentration ou de dilution.

Se superposant à cette zonalité, il est possible d'envisager un découpage à l'échelle plus grande, qui représente des variations de la composition chimique de l'eau due à la nature pétrographique des terrains encaissants et des différents processus d'altération mis en jeu.

Enfin, une troisième zonalité, verticale, est la réponse à des conditions d'ordres hydrologique et climatique, notamment le mode de circulation dans ces terrains fissurés. Plus les terrains aquifères, recouverts de formations superficielles (issues de leur propre décomposition

ou dues à des apports détritiques allochtones) sont profonds, moins ils sont lessivés et plus l'eau peut y séjourner. Cela se traduit par une augmentation de la teneur en sels dissous avec la profondeur.

L'étude suivante est basée sur ces hypothèses. Il s'agit de vérifier ces dernières sur un ensemble de climats (tropical humide, tempéré océanique, aride et méditerranéen, arctique),et sur trois catégories de roches du socle. Le choix s'est porté sur des roches cristallines acides (essentiellement les granites) et basiques (les diorites) et sur les schistes. Ce sont les trois types les plus étudiés après avoir écarté calcaires, grès et volcanites.

Dans un premier temps, l'étude portera sur l'altération de ces roches sous les cinq climats envisagés, l'altération étant essentiellement caractérisée par les possibilités de libération d'ions par hydrolyse, par leur aptitude à la migration (phase aqueuse), ou à leur degré de rétention dans le milieu (phase résiduelle). Puis les eaux rencontrées dans ces formations du socle seront étudiées dans leur contexte climatique et géologique.

CHAPITRE I

L'ALTERATION DES ROCHES DU SOCLE

1. FACTEURS REGISSANT L'ALTERATION

La nature et le degré d'avancement des réactions physiques et physicochimiques impliquées dans le phénomène de l'altération sont conditionnés par plusieurs facteurs :

1.1. Facteurs internes

* la composition minéralogique de la roche (abondance de feldspaths et micas noirs favorisant l'altération), sa texture, sa microporosité, la présence de joints constituent autant de facteurs influençant ;

* les propriétés physiques telles que le degré de fissuration du milieu (pénétration de l'eau en profondeur ...).

1.2. Facteurs externes

* hydrologiques : existence d'un niveau de percolation, amplitude des variations du niveau hydrostatique du milieu saturé, réservoir superficiel ;

* climatiques : hauteur de pluie, durée de la saison pluvieuse, nature du couvert végétal, température de l'air et de la solution, etc ...

* biologiques : racines (action mécanique), acides organiques (mise en solution de Al, Fe), bactéries et autres microorganismes (production de CO_2...).

Toutes ces conditions vont intervenir plus ou moins favorablement dans le rôle de solvant de l'eau. Les facteurs cardinaux sont principalement :

- la température (active les hydrolyses),
- l'humidité,
- l'acidité (pH),
- la nature ionique de la solution initiale (pluies),
- le renouvellement du milieu.

L'étude des différents paramètres aboutit à la prédominance d'un facteur climatique qui intègre toutes les variables citées. Il existe une étroide relation entre la zonéographie climatique et la répartition des différents types d'altération concrétisés par la nature minéralogique des roches résiduelles et la composition chimique des solutions naturelles. (cf figures 1, 2 et 3).

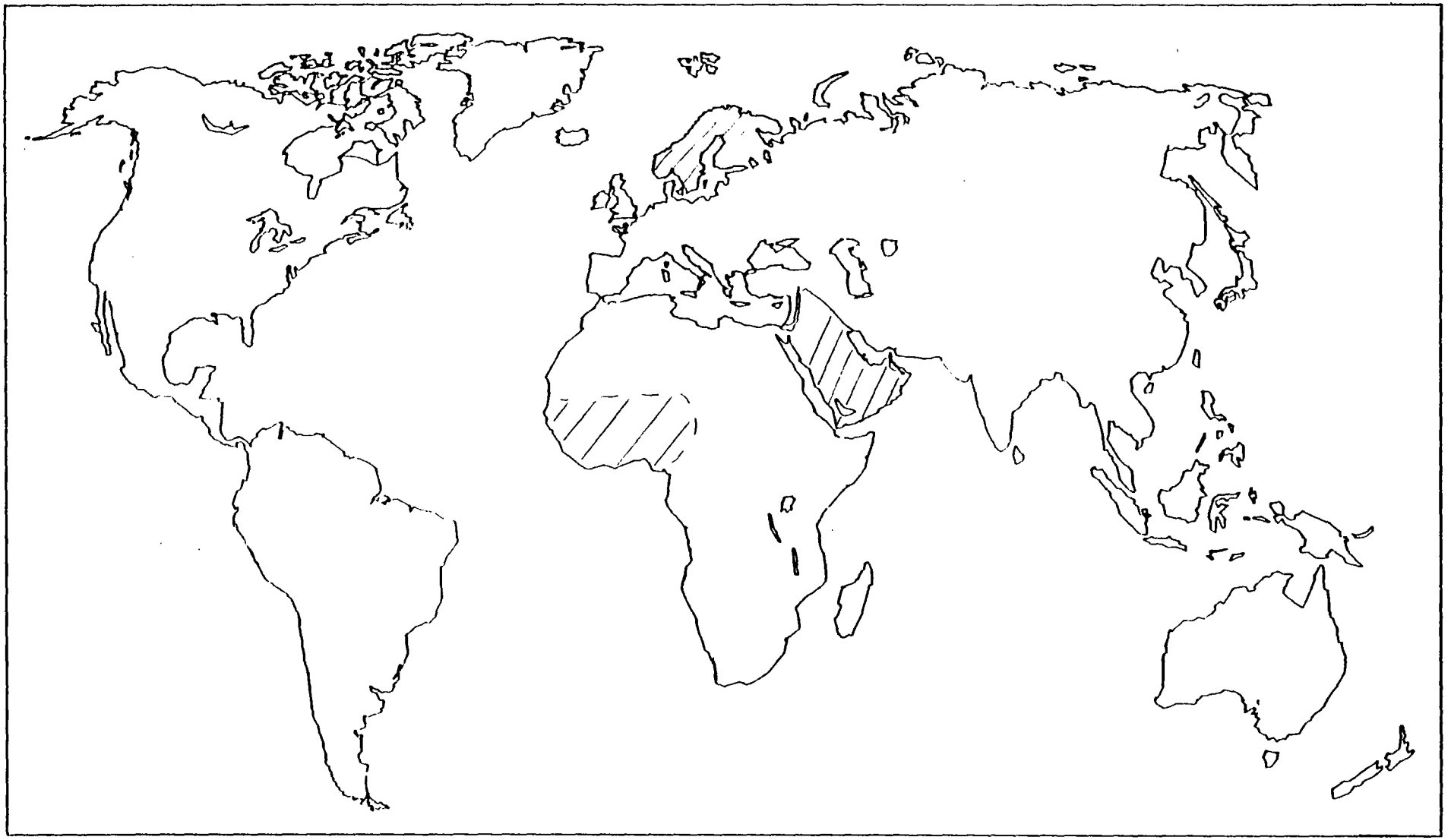


FIGURE n° 1 - Situation géographique des régions étudiées

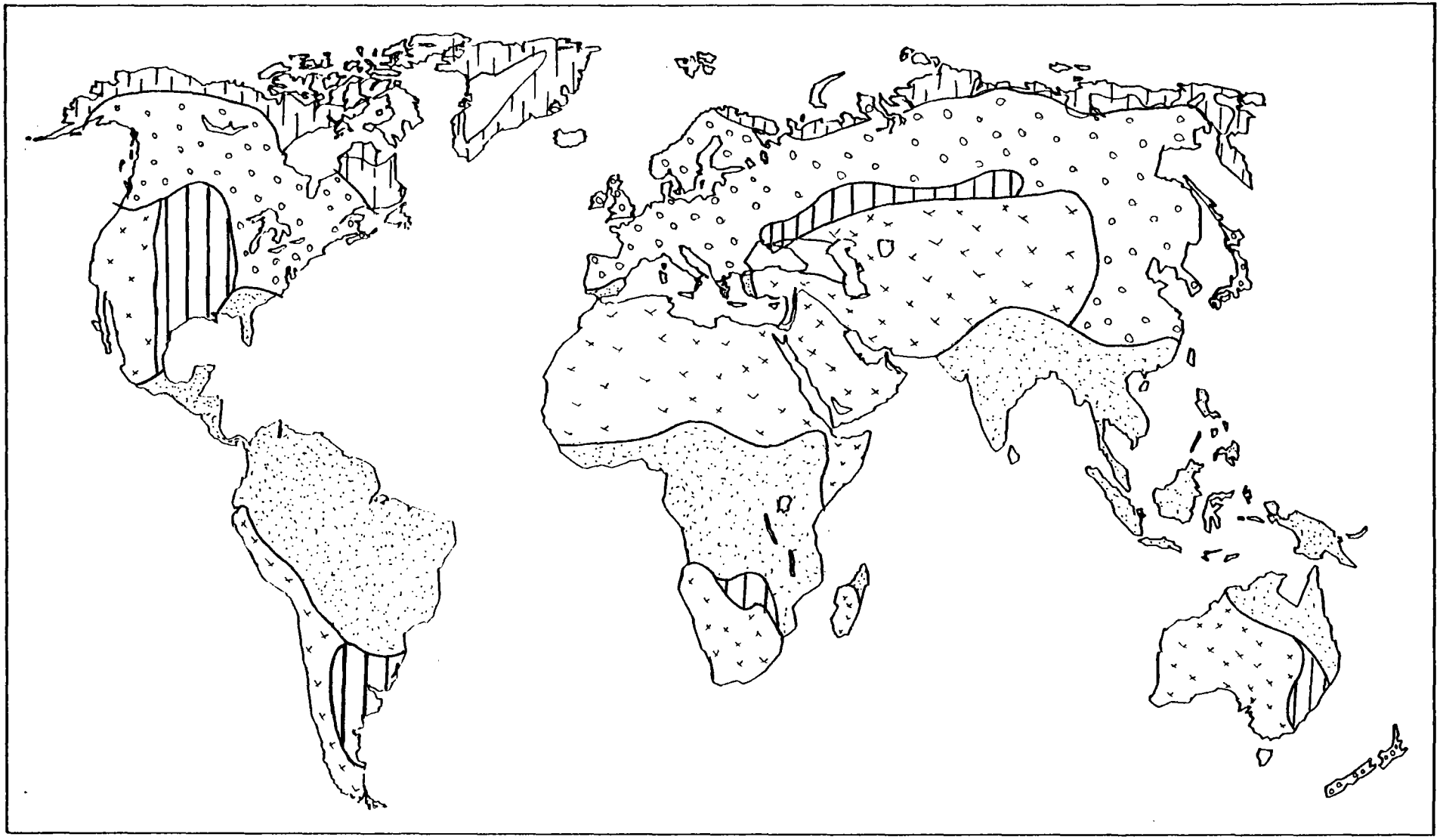


FIGURE n° 2 - Eléments ou composés dominant dans les eaux souterraines et lacustres en pays de plaine (d'aprés G.A. MAKSIMOVITCH).

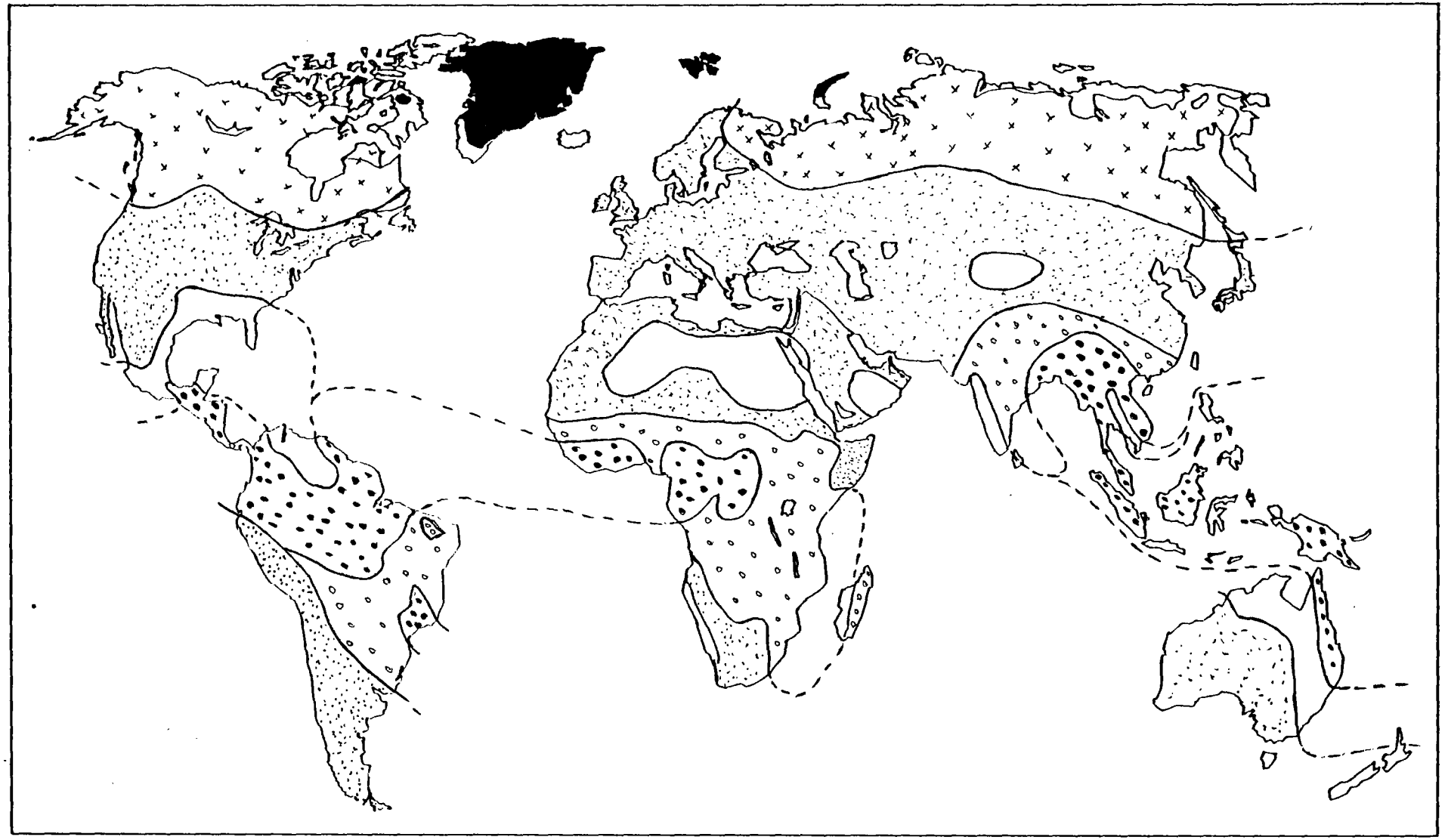


FIGURE n° 3 - Distribution potentielle des phénomènes d'altération à la surface du globe. (d'aprés PEDRO G, 1969).

2. LE FACTEUR MAJEUR : le climat

2.1. Le climat tropical humide (exemple : Afrique de l'Ouest)

Le cycle des saisons est déterminé par les déplacements en latitude du front inter-tropical qui résulte de la rencontre de l'air chaud et sec venant du N.E. avec de l'air humide (mousson) du S.W. De lui, va dépendre l'alternance saisonnière très marquée.

Dans la plus grande partie de ce domaine, se développent au cours du cycle annuel une et parfois deux saisons sèches de durée inégale : une longue période liée au solstice d'hiver, et une courte peu après le solstice d'été.

La durée de la saison pluvieuse globale est de 6 à 8 mois pluvieux (soit plus de 20mm/mois), soit des précipitations annuelles supérieures à 1000mm, sans toutefois dépasser 1600mm (climat équatorial).

Les températures sont toujours élevées : ainsi, la température moyenne du mois le plus froid est en général supérieure à 15°C. Les températures moyennes mensuelles se maintiennent au-dessus de 22° pendant au moins 6 mois. Le maximum est souvent supérieur à 40°C, ce qui donne une température moyenne annuelle comprise entre 24° et 28°C.

L'évaporation est forte pendant toute l'année : 2200 à 2800mm/an. La végétation sous ce climat va de la steppe chaude à la forêt dense en passant par la savane.

Le climat équatorial est caractérisé par des pluies abondantes et régulières, ainsi que par l'absence de contraste saisonnier de température (amplitude de l'ordre de 5 à 8°). Ceci ne représente que peu de différences par rapport au climat tropical humide décrit précédemment. On pourrait parler de climat "hypertropical" (PEGUY Ch., 1970). L'accentuation se traduira surtout au niveau du taux de minéralisation qui devrait être plus important du fait du lessivage encore plus intense. L'altération des roches donnera le même résultat.

2.2. Le climat tempéré océanique (exemple : Bretagne)

Ce domaine subit l'influence directe du voisinage immédiat de l'océan (action des masses d'air maritimes).

Le climat littoral présente des caractères spécifiques : un retard des minima et maxima thermiques (se localisant en Février et en Août), une amplitude de température inférieure à 15°, un minimum relatif des précipitations au printemps ou en début d'été et un maxima relatif en Décembre-Janvier, une fréquence élevée de vents forts.

Les précipitations annuelles sont fortes : plus de 1000mm/an. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 10°C. L'évaporation n'excède pas 700mm, en général. Il est à noter que le régime pluviométrique reste sensible aux conditions locales (relief, exposition aux vents ...).

2.3. Le climat méditerranéen (exemple : Corse)

Le climat méditerranéen se définit par un régime pluviométrique qui comporte, dans sa forme la plus nette, un maximum d'hiver et un minimum d'été. L'été est relativement court et sec. L'hiver, ou plus précisément la saison froide, est relativement longue et plus ou moins humide. Les précipitations peuvent se concentrer sur une courte période hivernale (décembre à janvier). Mais, au nord du 40e parallèle, le régime pluviométrique a deux maxima : l'automne et le printemps, l'hiver étant moins bien arrosé que les saisons qui l'encadrent.

La température moyenne annuelle est en général supérieure à 13°C, elle est due au régime homothermique de la Méditerranée.

De plus, l'humidité relative moyenne reste inférieure à 70 %.

La température assez élevée toute l'année permet à la végétation une activité quasi continue qui n'est limitée que par l'aridité plus ou moins marquée de l'été.

2.4. Le climat aride (exemple : Arabie Saoudite)

La caractéristique de ce climat est l'insuffisance des précipitations : elles sont inférieures à 250mm/an, avec une moyenne autour de 100mm/an.

Associée à ce déficit de pluies, l'évaporation est très importante : entre 2200mm et 5000mm. Quant à la température, elle accuse des écarts diurnes, et entre hiver et été, de plus de 60° :sans être régulier, le gel est partout possible.

Malgré les minima noctures, les moyennes mensuelles les plus élevées peuvent dépasser 35°, et la température moyenne annuelle se situe entre 22 et 28°.

Malgré cela, quatre saisons sont distinguées grâce aux différences de température (plus de 60° entre l'été et l'hiver) et aux différences d'humidité relative.

Ceci correspond au climat actuel auquel est soumis l'Arabie Saoudite. Mais il faut noter que ce pays n'a subi ce climat que depuis un million d'années ; une période plus humide l'a précédé (de -3,3 $\overline{MA}$ à 1 $\overline{MA}$). Il nous faudra en tenir compte pour l'étude des altérations dans ce domaine. En effet, les altérations actuelles ne sont que mécaniques et il faut remonter au Pliocène tardif pour trouver trace d'une intense érosion chimique (AL SAYARI S.S., ZOLT J.C.,.1978).

2.5. Le climat arctique (exemple : la Scandinavie)

Le climat arctique est caractérisé par une température moyenne annuelle ne dépassant pas 5°C : le mois le plus chaud n'atteint pas 12°C. L'amplitude thermique annuelle varie entre 13 et 28°C. Mais au cours d'une même journée les écarts de température peuvent dépasser 50°C.

Les mois les plus chauds (juillet-août) sont aussi les plus pluvieux. ils représentent près d'un tiers des précipitations annuelles, ces dernières sont très variables : entre 350 et 1100 mm, suivant la position géographique. A la continentalité, est associée une relative aridité. En fait, il existe un plafond atteint par les totaux pluviométriques mensuels en fonction de la température moyenne mensuelle. Le reste

Le reste des précipitations est constitué par la neige. Bien que peu abondante, elle persiste longtemps : entre 4 mois et demi et 220 jours par an, suivant la situation géographique (proximité de la mer). Elle entretient une infiltration acide pendant son séjour.

Une autre caractéristique de ce climat est la présence continuelle de vents violents.

3. LES PROCESSUS ZONAUX RESULTANT DE L'ALTERATION DES ROCHES (CYCLE ALUMINO-SILICIQUE) : d'après PEDRO G. (1966)

Les constituants majeurs des roches silicatées de la séquence alumineuse peuvent, du point de vue géochimique, se répartir en trois groupes d'éléments :

1) la silice SiO_2
2) les cations amphotériques : Al, Fe, Ti...
3) les cations basiques : alcalins (Na, K), alcalinoterreux (Ca, Mg).

à partir de ces trois types d'éléments, vont s'édifier les minéraux secondaires de néogénèse.
La nature de cette dernière et donc le type géochimique de l'altération vont dépendre essentiellement du comportement dynamique de ces trois groupes d'éléments.

SiO_2 et les bases sont toujours plus ou moins exportées par le lessivage : la vitesse d'extraction dépend seulement des facteurs climatiques comme nous l'avons vu précédemment*. La vitesse de migration dépend des conditions hydrologiques et topographiques. Au contraire, Al peut être retenu sur place suivant le pH du milieu. L'aluminium est donc le facteur limitant de l'évolution des roches.

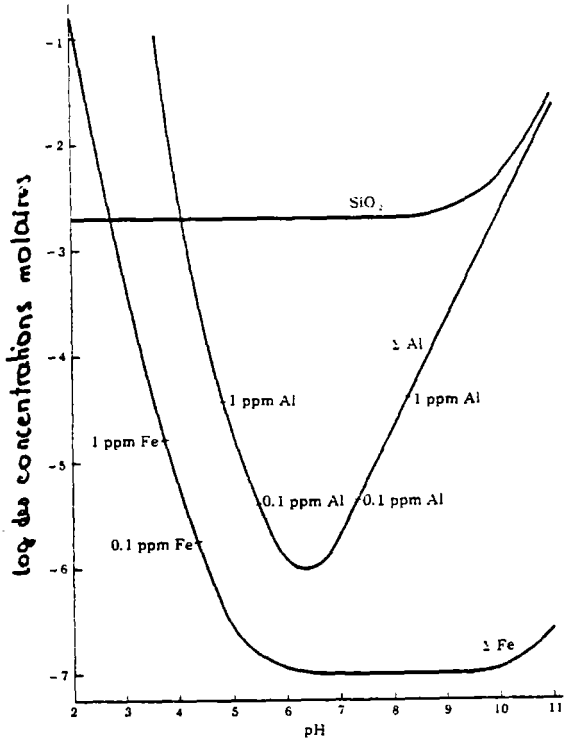


FIGURE n° 4

Possibilités d'exportation de la silice, de l'aluminium et du fer

* conditions topographiques : versants, plaines...

Al n'est exporté que si le milieu est acide (pH < 4). Dans ce cas, la silice est aussi évacuée mais à une vitesse moindre. Le milieu éluvial n'est, en fin d'évolution, constitué que par un résidu de silice (Processus de *podzolisation* des régions froides).

Dans les autres milieux, l'aluminium n'est pratiquement pas éliminé, de ce fait on a toujours une vitesse relative d'exportation de la silice plus grande que celle de Al. Il peut donc se former des minéraux phylliteux dont la nature va dépendre en particulier de la teneur en silice (couches tétraédriques) et des cations basiques (ions interfoliaires). Trois cas se présentent alors :

* le faible lessivage de la silice peut conduire à la formation de minéraux à deux couches de silice (illite-montmorillonite). Ceci se produit si :

$$\left(\frac{SiO_2 \text{ combinée}^{\circledast}}{\text{bases}}\right)_{\text{eau de drainage}} < 0{,}64 \left(\frac{SiO_2 \text{ combinée}^{\circledast}}{\text{bases}}\right)^{\circledast}_{\text{roche originelle}} \text{ sans le quartz}$$

$$L \qquad\qquad R$$

* un lessivage notable de silice ne permet plus que la formation de phyllite à une couche de silice (kaolinite). Le lessivage des cations basiques est alors total. Ceci n'intervient que si : $0{,}64\ R \leqslant L < R$.

* un lessivage intense de la silice laisse sur place l'aluminium sous forme d'hydroxydes ou d'oxyhydroxydes (gibbsite, boehmite). Il faut pour cela que $L \geqslant R$.

Dans le premier cas, le processus engendré correspond au phénomène de *bisiallitisation*, dans le deuxième cas à la *monosiallitisation* (ou *kaolinisation*) et dans le troisième à la *latéritisation* (ou *allitisation*).

Tableau d'après PEDRO G., 1966

Caractéristiques géochimique des eaux d'altérations	$q(Al_2O_3) < q(SiO_2)$.			$q(Al_2O_3) > q(SiO_2)$.
	$L \geq R$.	$0.64\ R \leq L < R$.	$L < 0.64\ R$.	
	$q(SiO_2) \geq q$ (Bases).	$0.64 \times q$ (Bases) $\leq q(SiO_2) < q$ (Bases).	$q(SiO_2) < 0.64 \times q$ (Bases).	
Composition minéralogique de l'horizon éluvial	Hydroxydes d'aluminium	Phyllosilicates 1/1	Phyllosilicates 2/1	-
	Gibbsite-Boehmite	Kaolinite	Illite-Montmorillonite	Silice libre
Processus d'altération	Allitisation (Latéritisation)	Monosiallitisation (Kaolinisation)	Bisiallitisation	Podzolisation

4. L'ALTERATION SOUS DIFFERENTS CLIMATS

Successivement, quatre climats seront étudiés : tropical humide (pour l'Afrique de l'Ouest), tempéré océanique (Bretagne), aride (Arabie Saoudite, Australie), arctique (Scandinavie).

Pour chaque climat, nous étudierons les différentes roches rencontrées en région de socle fissuré : ce seront les roches cristallines acides (essentiellement les granites) et basiques (diorites, gabbros), les roches métamorphiques (les schistes).

L'étude en climat arctique porte sur des granites.

4.1. Climat tropical humide (Afrique occidentale)

4.1.1. Les granites

4.1.1.1. Rappels sur la composition initiale

Ce sont des roches grenues dont les minéraux essentiels sont : le quartz, les feldspaths alcalins (orthose, microcline), les plagioclases (albite, oligoclase). Ils constituent au moins 80 % de la roche. Les minéraux secondaires sont variés mais les plus fréquents sont les micas et les amphiboles.

La composition chimique est en moyenne : $SiO_2 > 70$ % - Al_2O_3 = 13-16 % - $Na_2O + K_2O$ = 8-13 % - oxydes de fer, manganèse = 1-2 % - CaO + MgO = 1-2 %. Quelques rapports caractéristiques permettent une différenciation par rapport aux autres roches cristallines (annexe 1 : classification pétrographique des roches cristallines).

4.1.1.2. Altération

Les minéraux primaires vont évoluer séparément lors de l'altération car ils sont plus ou moins vulnérables : l'ordre croissant de vulnérabilité est :

muscovite < quartz < feldspaths potassiques < biotite + amphibole < plagioclases

Les transformations vont être très poussées : entre autres, à cause des eaux acides et chaudes (t° > 24°C). Les bases faibles vont être entraînées facilement. Silice et alumine sont mises en solution en quantités variables selon le pH, comme nous l'avons vu précédemment.

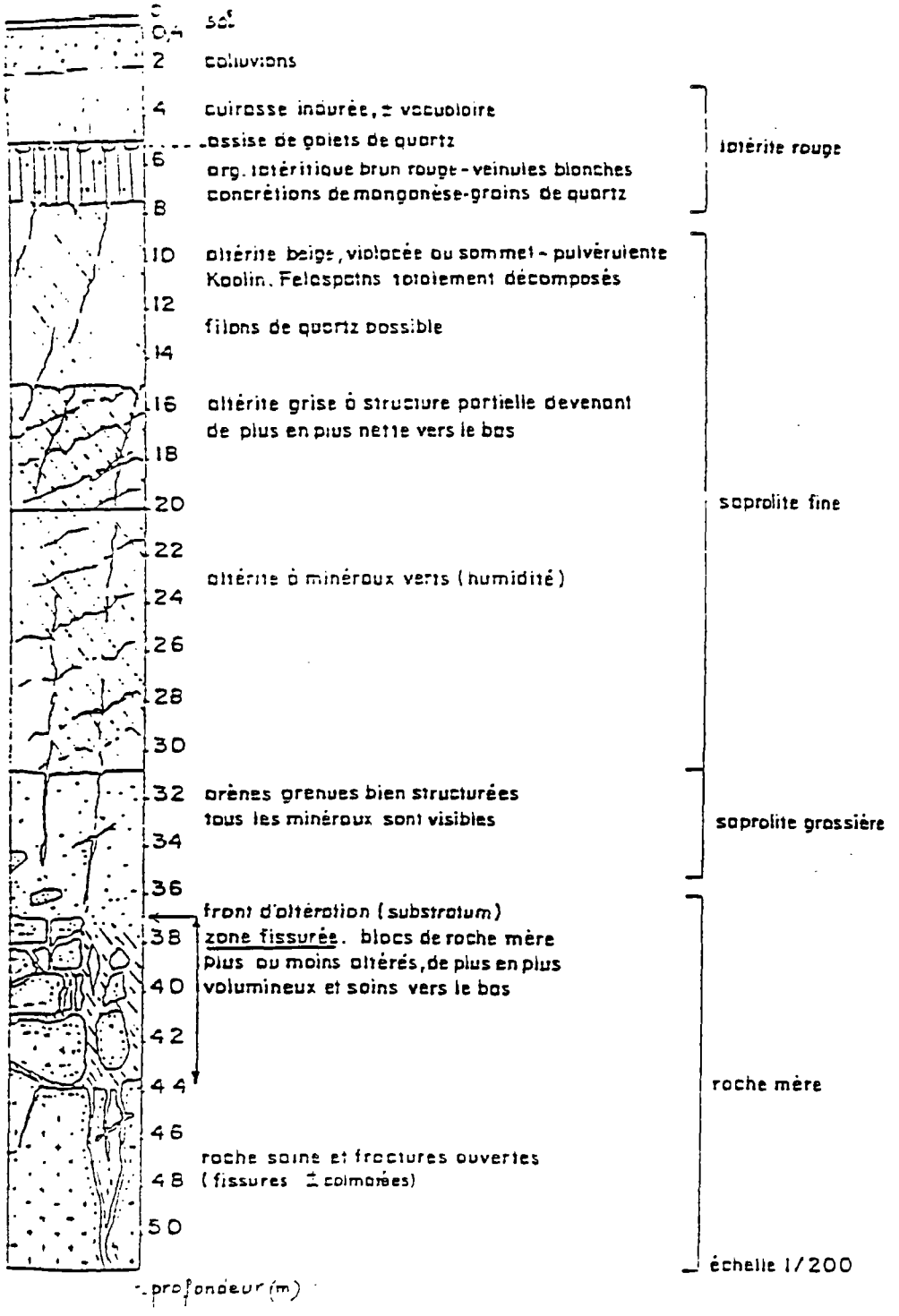
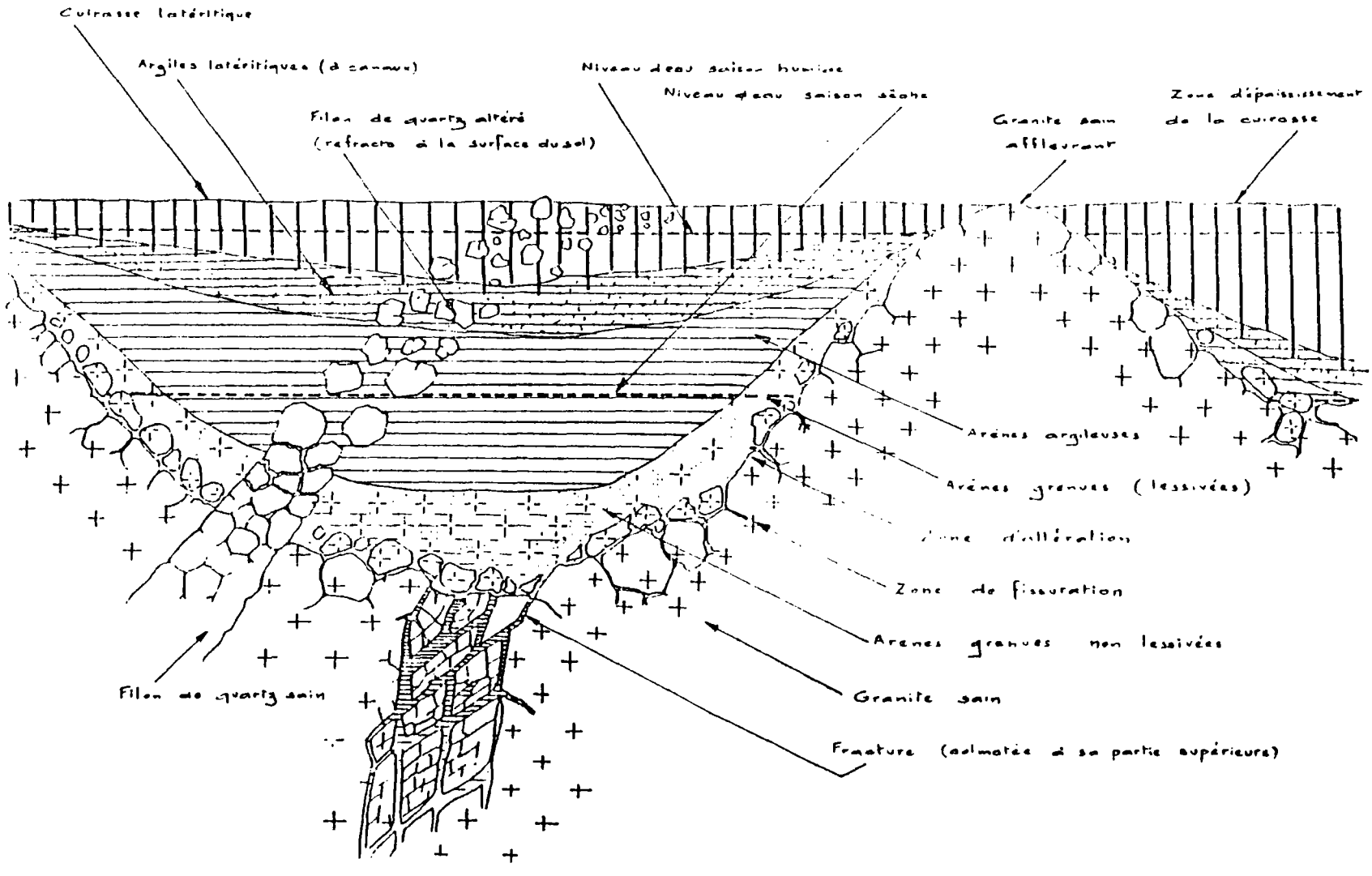


FIGURE n° 5a - Coupe type de l'altération sur granites sous climat chaud et humide (d'aprés ENGALENC M., 1978)

FIGURE n° 5b- Coupe schématique de l'altération des granites (d'aprés BISCALDI R., 1968).



On obtient :

plagioclases ⟶ gibbsite ⟶ kaolinite
biotite ⟶ vermiculite
feldspaths potassiques ⟶ kaolinite ⟶ silice

L'argile de néoformation est essentiellement la kaolinite. Le processus engendré correspond donc au phénomène de monosiallitisation : le départ de silice est relativement important. La présence de gibbsite laisse supposer un lessivage très intense de SiO_2 (allitisation associée à la monosiallitisation).

Un profil type de l'altération sur granites a été établi : voir page suivante (fig. n° 5). Au-dessus du granite sain, se trouve une zone de fissuration où les blocs de roche mère sont plus ou moins altérés (faible néogénèse de montmorillonite).

Au-dessus, au niveau des arènes grenues, la structure du granite est détruite, les grains s'individualisent. En progressant vers le haut du profil, les argiles deviennent de plus en plus importantes : tous les minéraux, sauf une partie du quartz et de la muscovite (s'il y en a),sont transformés en argiles (dans le niveau des argiles sableuses micacées).

La composition de ces altérites reste sous la dépendance des conditions de drainage, de pH et de la nature lithologique de la roche originelle. Cependant, le stade final est toujours la kaolinite : on parle de "zone des kaolins".

Sur ce niveau à kaolinite prépondérante, il existe un autre niveau d'argiles, latéritisées, qui peut donner naissance à une cuirasse si les conditions extérieures (hydrauliques en particulier) s'y prêtent.

Il est à noter qu'en milieu confiné (soit à la base), les quantités de minéraux primaires dissous sont plus faibles qu'en milieu drainé. Les seuls minéraux néoformés sont alors les montmorillonites (composition variable entre un pôle ferrifère et un pôle alumino-magnésien).et la calcite.

La séquence des minéraux secondaires, dans les conditions de pH et d'oxydoréduction courantes, est : goethite → goethite + gibbsite → goethite + kaolinite → kaolinite + montmorillonites → montmorillonites + calcite.

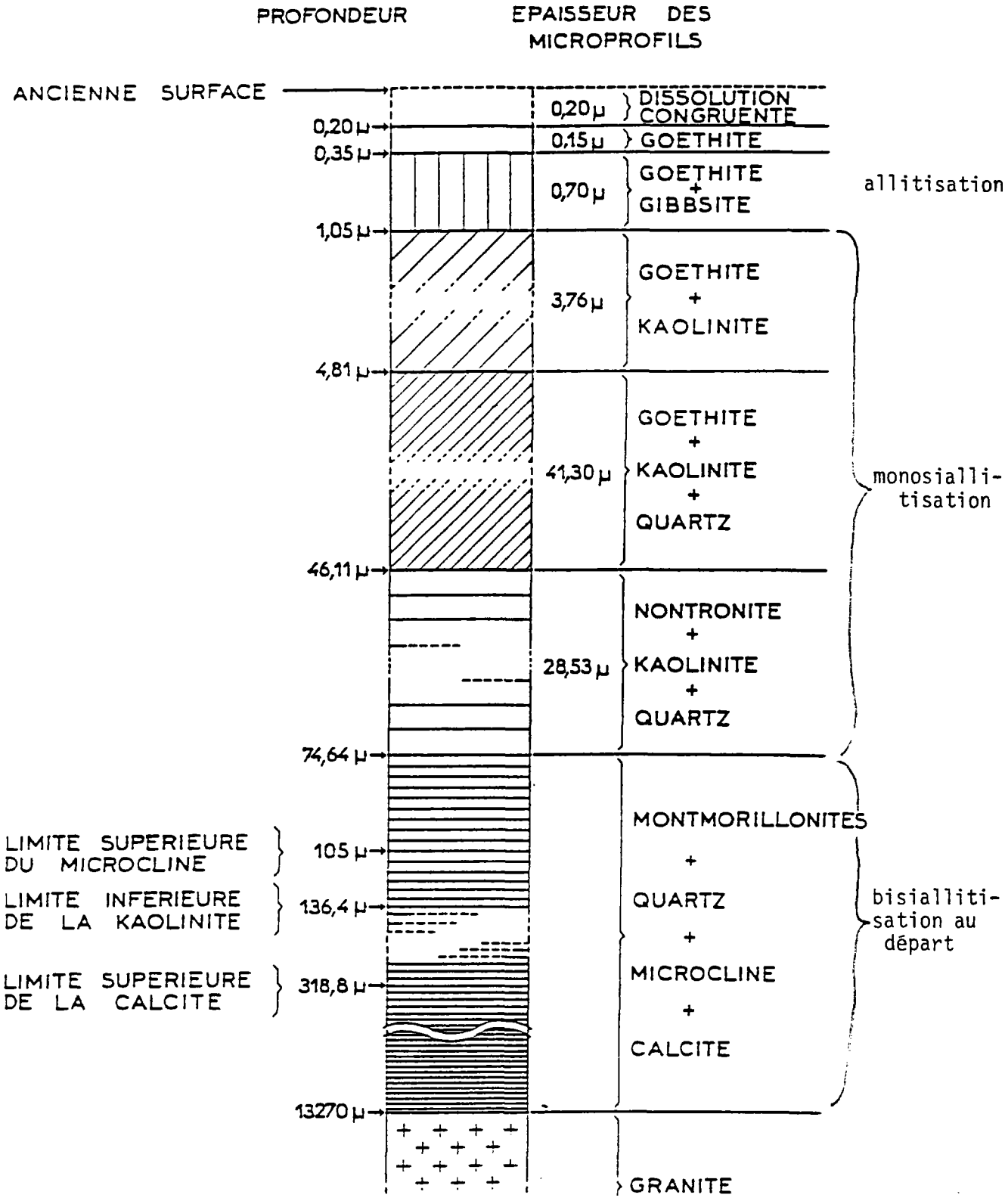


FIGURE n° 6 - Superposition théorique des horizons formés dans l'altération d'un granite (d'aprés FRITZ B., 1975)..

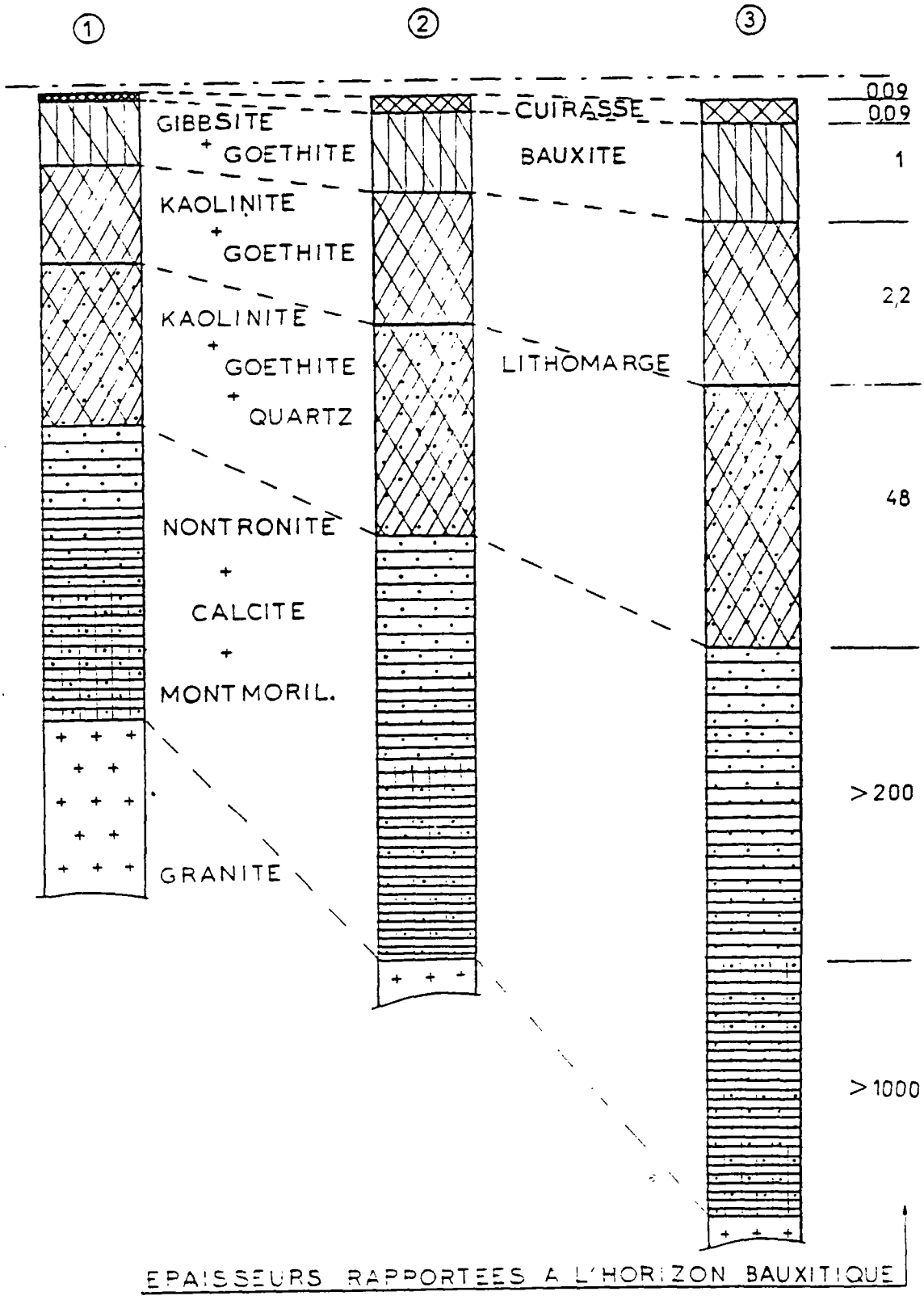


FIGURE n° 7 - Etapes de la formation d'un profil complet sur granites (d'aprés FRITZ B., 1975).

Lors de la formation d'un profil sous l'effet d'un lessivage *per descensum*, les horizons se succèdent, de haut en bas, dans l'ordre d'apparition des minéraux secondaires (et de saturation des minéraux primaires) : chaque horizon est détruit par le haut et réformé à sa base au détriment de l'horizon situé au-dessus (fig. n° 6).

En fait, tous les éléments de la séquence (altérations poussées jusqu'à leur terme) n'apparaissent que si le chemin parcouru par les solutions est très long. Aussi obtient-on rarement un profil complet. Souvent, un ou plusieurs niveaux manquent à la base. Les profils sont d'autant plus développés que le drainage régional est plus faible et que la fissuration est plus intense (zones fissurées préférentiellement altérées). (fig. n° 7).

4.1.2. Les roches cristallines basiques

4.1.2.1. Rappels

Sont dites basiques les roches pauvres en silice (45 → 52 %) d'où une absence de cristaux de quartz et riches en Ca, Mg, Fe (entre 20 et 35 %).

Elles sont essentiellement composées de plagioclases (oligoclase → anorthite) et de pyroxènes, d'amphiboles, de biotite. Le quartz est absent ou très rare.

La composition chimique moyenne est : SiO_2 (45 → 52 %) - Al_2O_3= 15-19 % - Na_2O + K_2O = 4-7 % - oxydes de fer-manganèse = 6-7 % - CaO + MgO = 14-25 %. Les mêmes rapports MgO/K_2O - SiO_2, K_2O - SiO_2, K_2O - TiO_2 que pour les granites sont utilisés pour les différencier des autres roches cristallines.

4.1.2.2. Altération

Là encore, les minéraux primaires vont évoluer séparément. L'ordre de vulnérabilité varie peu par rapport à celui défini pour les granites : les plagioclases sont toujours moins vulnérables que biotite, amphiboles et pyroxènes.

amphiboles - pyroxènes ⟶ chlorite ⟶ goethite ± kaolinite
↓
⟶ smectite

plagioclases ⟶ gibbsite ⟶ kaolinite
+ montmorillonitisation locale
+ néogénèse de quartz

biotite ⟶ vermiculite.

Les argiles de néoformation vont varier suivant les conditions de drainage : si ce dernier est médiocre, les phyllites smectitiques seront dominantes par rapport aux kaolinites. Et si le drainage est important (peut aussi être le cas d'une période humide longue), les mélanges argileux seront à kaolinites prédominantes (fig. n° 8).

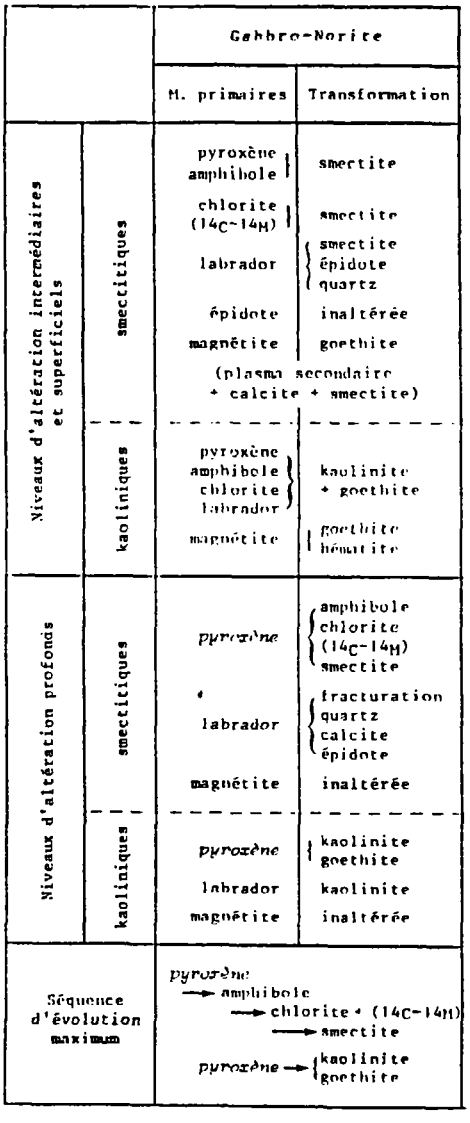


FIGURE n° 8

Evolution des minéraux primaires (d'après PION J.C., 1979)

En général, les profils rencontrés présentent une succession de niveaux "kaoliniques" surmontant des niveaux "smectitiques". L'altération devient de plus en plus forte vers le sommet. Le profil complet comprend :

- des niveaux cuirassés et carapacés,
- des niveaux d'argiles tachetées et bariolées,
- des niveaux d'altération kaolinique (accumulation de silice monomère) : altérations les plus évoluées des séquences,
- des niveaux d'altération smectitiques : la smectite est exclusive dans tous les niveaux où la structure de la roche mère est conservée.

Ce type de profil observé par PION J.C. (1979) et DELVIGNE J. (1967) correspond en grande partie à celui simulé , par FRITZ B. (1975), sur un granite mais qui prévoyait pour les roches basiques des épaisseurs plus importantes de niveaux smectitiques par rapport aux niveaux kaolinitiques.

Sur les massifs basiques, l'hypothèse d'une évolution continue de l'altération exige que la totalité du profil s'altère et s'approfondisse de manière homogène. Cela est le cas dans la zone tropicale humide : l'épaisseur des niveaux smectitiques sera donc faible en zone humide.

Le calcul approximatif des pertes en éléments chimiques a été effectué (PION J.C., 1979) :

Fe-Mn = 0 % ; Ti(-20 %), Al(-25 %), K(-30 %), Mg(-40 %), Si(-45 %), Ca(-50 %), Na(-75 %).

L'influence de la différence entre roches basiques et roches acides sur le type d'altération est donc faible (approximativement, le même profil). La kaolinite reste l'argile de néoformation prédominante. Nous sommes donc dans le domaine de la monosiallitisation.

Une grande différence avec les altérations sur roches basiques sous climat tropical sec ou semi-humide est la possibilité sous climat humide de lessivage latéral avec transport amont-aval, ce qui n'est pas du tout le cas en milieu tropical sec : les éléments chimiques exportés des parties amont des toposéquences ne s'accumulent pas en bas de pente. Ils sont éliminés du paysage.

Une répartition des niveaux d'accumulation le long d'un versant a été établi par J. DELVIGNE en Côte d'Ivoire (fig. n° 9).

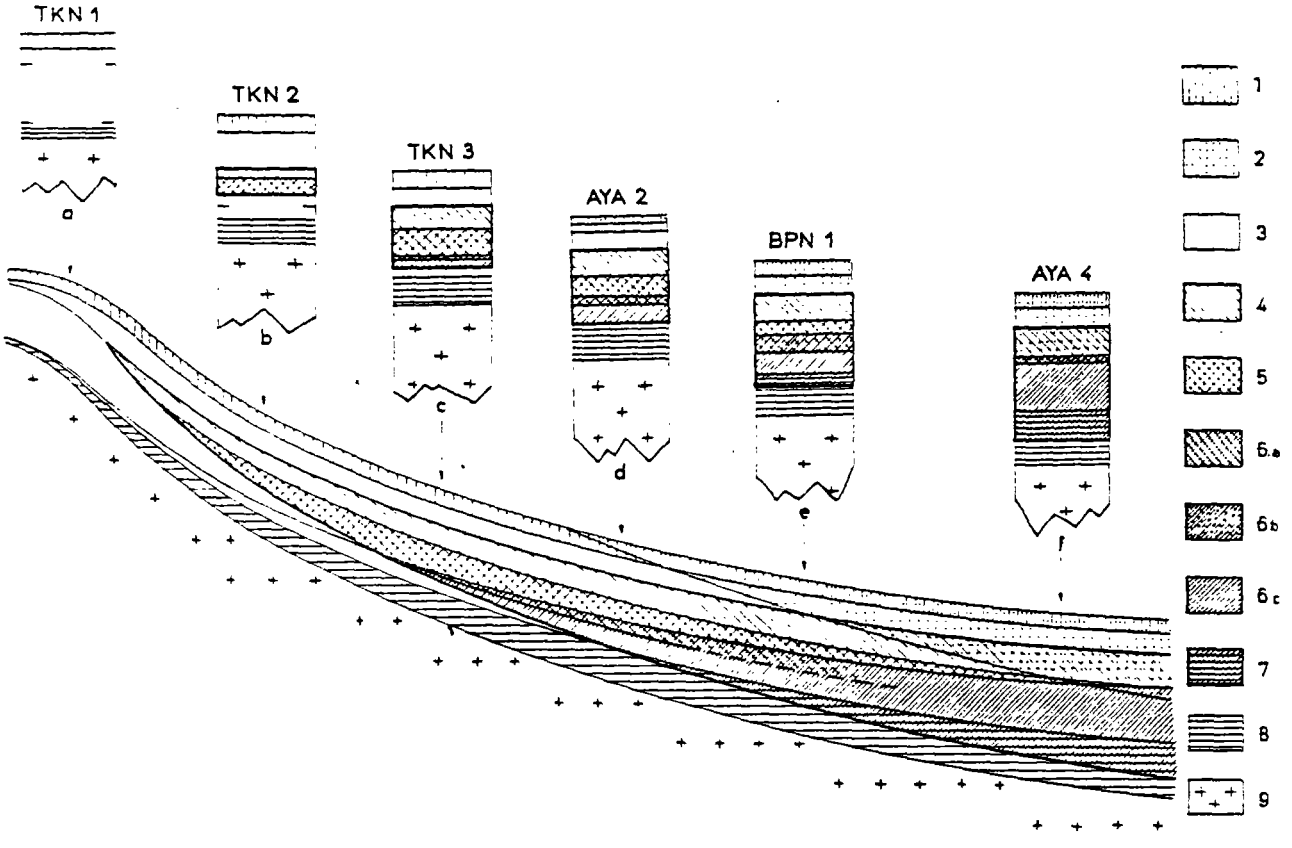


FIGURE n° 9 - **Répartition des niveaux d'accumulation le long d'une chaîne de sol.**

1 : Zone de départ superficielle des solutions acides de Al^{3+} et Fe^{3+}. — 2 : Colluvions argilo-sableuses. — 3 : Accumulation relative à l'aluminium (gibbsite) et du fer (gœthite). — 4 : Accumulation absolue du fer (gœthite secondaire). — 5 : Accumulation absolue de l'aluminium (gibbsite secondaire). — 6 : Accumulation absolue de silice monomère : formation de kaolinite aux dépens de la gibbsite. — 7 : Accumulation absolue de silice monomère : formation de kaolinite aux dépens des gels alumineux de la zone d'altération. — 8 : Niveau d'altération de la roche : départ des solutions alcalines de silice polymère et d'aluminate. Formation de gels. — 9 : Soubassement de roches fraîches.

Les traits forts figurés autour de certains cartouches, dans les profils et dans la coupe, entourent la zone d'accumulation absolue (Fer, Aluminium, Silice).

4.1.3. *Les roches métamorphiques (essentiellement les schistes)*

4.1.3.1. Rappels

Sous ce terme sont désignées les roches ayant acquis une schistosité sous l'influence d'un métamorphisme très faible (anchizonal) à faible (épizonal). Ils sont caractérisés par des alternances de lits sombres (micas - amphiboles...) et de lits clairs (quartz, feldspaths).

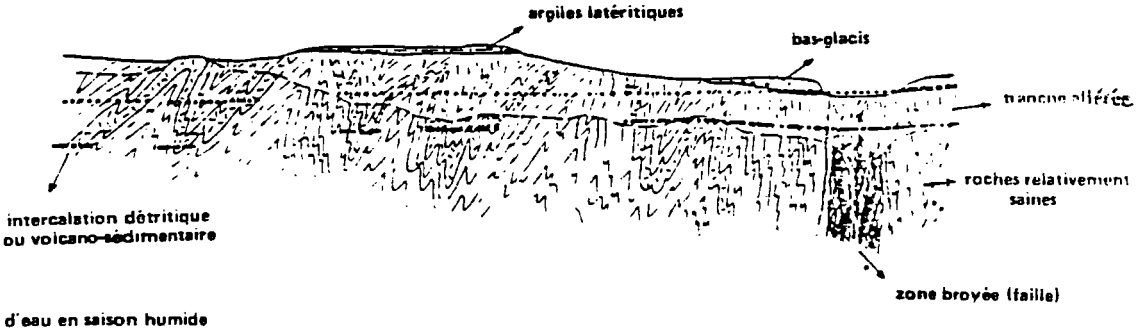
Leurs compositions minéralogiques peuvent être très variables. A titre d'exemple, nous donnerons la composition des schistes birrimiens rencontrés dans de nombreuses régions en Afrique occidentale :
SiO_2 = 54 %, Al_2O_3 = 16 %, $Na_2O + K_2O \simeq 6$ %,
oxydes de fer et manganèse = 8-9 %, CaO + MgO = 15-16 %.

4.1.3.2. Altération

Elle résulte principalement de la kaolinisation de ces roches. Les argiles reposent directement sur la roche mère saine, sans niveau intermédiaire arénitique. Malgré une porosité utile et une perméabilité faibles, l'épaisseur de la frange d'altération peut atteindre une centaine de mètres. L'altération se fait le long de discontinuités pétrographiques et tectoniques qui servent de drains : fracturation, schistosité (plus ou moins oblique).

Malgré la grande diversité des faciès lithologiques rencontrés, l'altération est relativement uniforme.

Une coupe schématique de l'altération en région schisteuse a été établie par GUIRAUD R. (1975).



COUPE SCHÉMATIQUE DE LA TRANCHE D'ALTÉRATION SUPERFICIELLE EN RÉGION SCHISTEUSE.

(d'aprés GUIRAUD R., 1975).

4.2. Le climat tempéré océanique (Bretagne, France)

4.2.1. Les granites

On constate que les granites se désagrègent en arènes, où les fragments de roche initiale ont subi de faibles modifications chimiques (apparition de minéraux gonflants susceptibles de faire exploser la roche). Ici encore, les minéraux primaires évoluent séparément :

quartz ⟶ silice
orthose ⟶ kaolinite ± montmorillonite
plagioclases ⟶ kaolinite ± montmorillonite
biotite ⟶ vermiculite + montmorillonite
hornblende commune ⟶ chlorite ⟶ kaolinite

dans les pays tempérés, l'hydrolyse est ménagée : biotite et feldspaths potassiques résistent plus longtemps que les plagioclases.

Le granite va se transformer en une arène rubéfiée à micas faisant place par la suite à une arène plus claire. La fraction argileuse ne représente qu'une très faible proportion du premier niveau arénisé (kaolinite dominante + cortège argileux varié). Le niveau arénisé blanchi correspond à un mélange kaolinite - chlorite - vermiculite - oxydes (voir profil d'après MEUNIER A.,1977, fig. n° 10).

La kaolinite est le minéral par rapport auquel la solution est en équilibre.

Cependant, elle peut très bien ne pas être le minéral le plus abondant dans le profil d'altération.Kaolinite et montmorillonite sont les minéraux les plus fréquents. Les pays tempérés se situent dans les domaines de la monosiallitisation et de la bisiallitisation. Le passage bisiallitisation → monosiallitisation se fait des eaux froides vers les eaux plus chaudes.

Par rapport aux altérations sous climat tropical humide, il est à noter que le soutirage global des éléments chimiques est bien moindre (inférieur à 50 % des éléments de la roche saine). Seules les bases et la silice sont éliminées. Les autres éléments sont bloqués : par exemple, Al voit sa solubilité limitée par la formation de la kaolinite (SARRAZIN G., FOUILLAC G., MICHARD G., 1976).

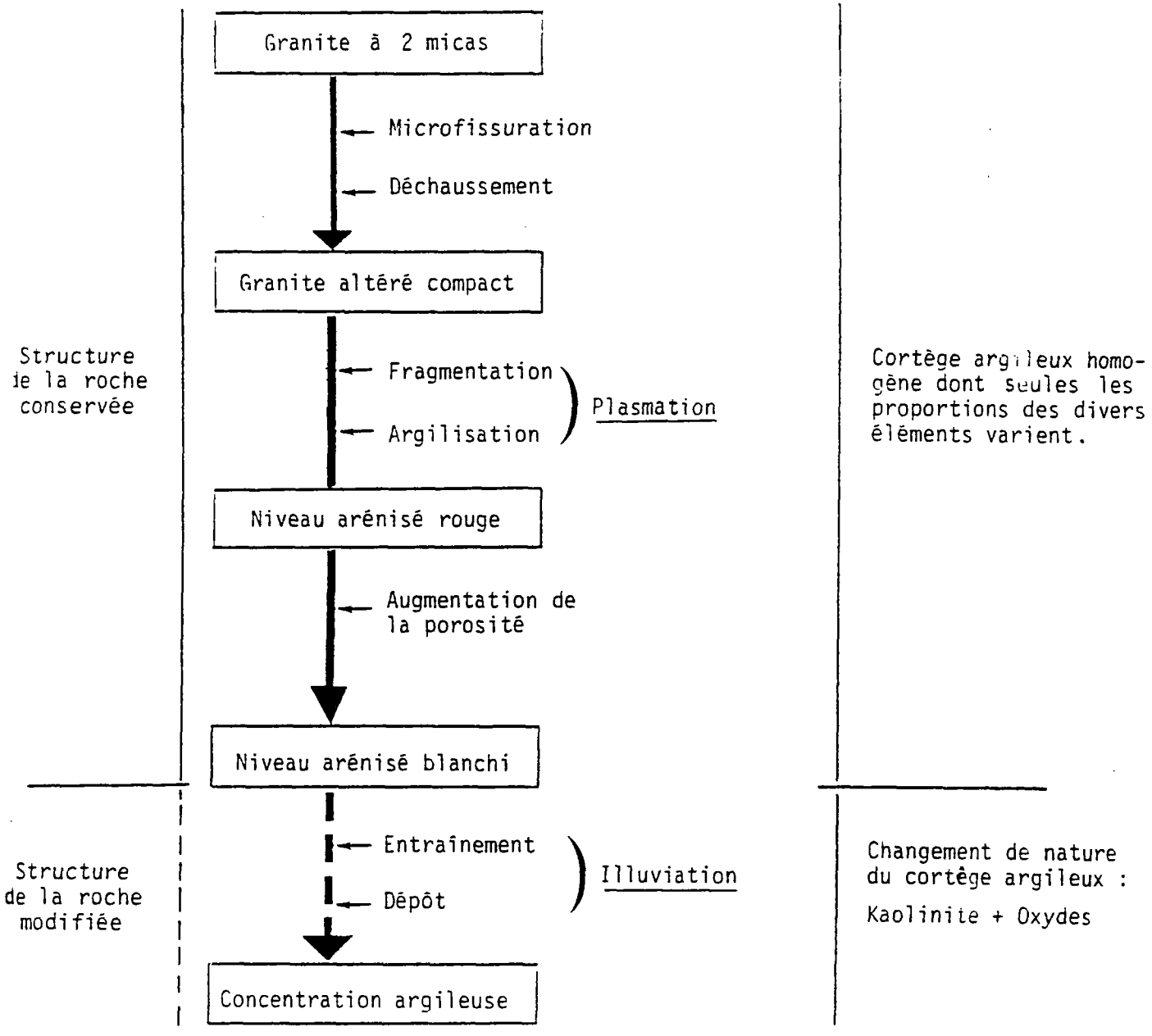


FIGURE n° 10 - *Phénomènes essentiels de l'arénisation dans les différents niveaux* (d'aprés MEUNIER A., 1977).

4.2.2. *Les roches cristallines basiques*

Ce type de roche est en général plus sensible aux altérations que les granites. Là encore, l'altération y est toujours ménagèe : feldspaths potassiques et pyroxènes sont plus résistants que les plagioclases calciques.

La roche non altérée voisine avec une zone altérée très riches en éléments fins : à la base, on trouve une arène à grandes plages blanches interrompues par des niveaux à taches rouges (hématite). Au-dessus, la roche altérée est brune et a parfois un aspect fibreux.

Les premiers stades d'altération consistent en une désagrégation en "boules" où la structure de la roche mère est bien conservée : feldspaths et pyroxènes sont encore frais. La fraction argileuse y est très peu développée et formée de vermiculite.

Entre les boules, la roche est transformée en argiles de néoformation (montmorillonites + traces de kaolinite).

Un stade plus avancé de l'altération montre la montmorillonite qui envahit toute la roche. Les boules disparaissent pour donner une arène homogène.

Enfin, la montmorillonite cède la place à la kaolinite qui est le terme le plus poussé de la transformation.

Sur l'ensemble du profil, la quasi totalité des produits d'altération sont des montmorillonites. Nous sommes donc dans le domaine de la bisiallitisation, qui est plus fréquente sur roches basiques sur sur roches acides.

La kaolinite est cependant omniprésente, mais en plus ou moins grandes quantités.

L'altération ménagée des pays tempérés océaniques peuvent avoir deux origines :

1) résultat de l'action d'un climat arénisant (climat tempéré du Pliocène),
2) départ fossilisé d'un profil latéritique datant du Paléogène, qui peut avoir précédé une arénisation.

Les deux phénomènes sont le plus souvent superposés.

4.2.3. Les roches métamorphiques

4.2.3.1. Les schistes

A partir de la roche mère saine, un début d'altération se produit alors que la schistosité est encore visible : à ce stade, les minéraux argileux sont représentés par une argile micacée et une chlorite associées à une petite quantité de kaolinite.

De bas en haut, la kaolinite prend de plus en plus d'importance aux dépens des autres minéraux (vermiculite, chlorite, illite) et elle devient prépondérante à proximité de la surface.

Cette altération est très irrégulière. Elle semble suivre les caprices de la circulation des eaux (diaclases, schistosité...). A l'affleurement, le passage des schistes sains à ceux qui sont altérés (entièrement kaolinisés) est parfois rapide.

Dans le plupart des cas, l'altération des schistes conduit à la formation massive de kaolinite, souvent associée à du mica. Nous sommes dans le domaine de l'altération monosiallitique.

Cependant, la base des coupes a permis d'observer des zones d'altération ménagée où apparaissent la chlorite, la montmorillonite et la vermiculite.

Il est à noter qu'il y a, dans certains profils, de la gibbsite pouvant provenir de l'altération de la biotite. Mais il semble que le processus d'allitisation soit plus discret que pour les granites.

4.2.4. Conclusions sur les altérations en milieu tempéré océanique

Cette étude montre que le minéral cardinal est la kaolinite. Quelle que soit la nature lithologique des roches mères, les processus d'altération aboutissent plus ou moins rapidement à un résultat constant : la formation de la kaolinite. Ce type d'altération est en relation avec le drainage par les eaux météoriques. On peut parler d'altération de type latéritique.

La zone favorable à la formation en abondance de cette kaolinite est celle occupée par une nappe permanente. Corrélativement à la formation de la kaolinite, il y a une évacuation intense des bases et d'une grande partie de la silice.

Il semblerait donc que la kaolinite soit un bon facteur climatique et que sa formation indique une hydrolyse totale des silicates.

4.3. Le climat aride (ex: Arabie Saoudite)

Toutes les roches, sous ce type de climat, subissent peu d'altération chimique : les eaux des précipitations sont en faible quantité et ne s'accumulent pas. Mais elles subissent une importante altération mécanique : on trouve ainsi des débris anguleux sur les lieux même de la fracturation. Cependant, les épaisseurs de ces altérations sont relativement faibles (décapage par le vent, les pluies occasionnelles...). La roche saine ou fracturée est subaffleurante.

Les infiltrations sont très nombreuses. Là où l'eau peut s'accumuler, on obtient un sable homométrique à éléments noirs (micas, pyroxènes...), qui retient l'humidité.

Néanmoins, ce climat correspond au climat actuel de l'Arabie Saoudite. Mais il n'est pas celui que la péninsule arabe subissait il y a 2 $\overline{M}A$. Une période plus humide s'est étalée entre -3,3 $\overline{M}$ et -1 $\overline{M}A$ et a produit latérites et saprolites.

Une période d'intense érosion chimique s'est produit au Pliocène tardif - début Quaternaire.

Il faut donc tenir compte de cette période plus humide. Mais les altérites produites alors ont été plus ou moins décapées par la suite. On considérera donc une faible épaisseur d'altérites ("reliques").

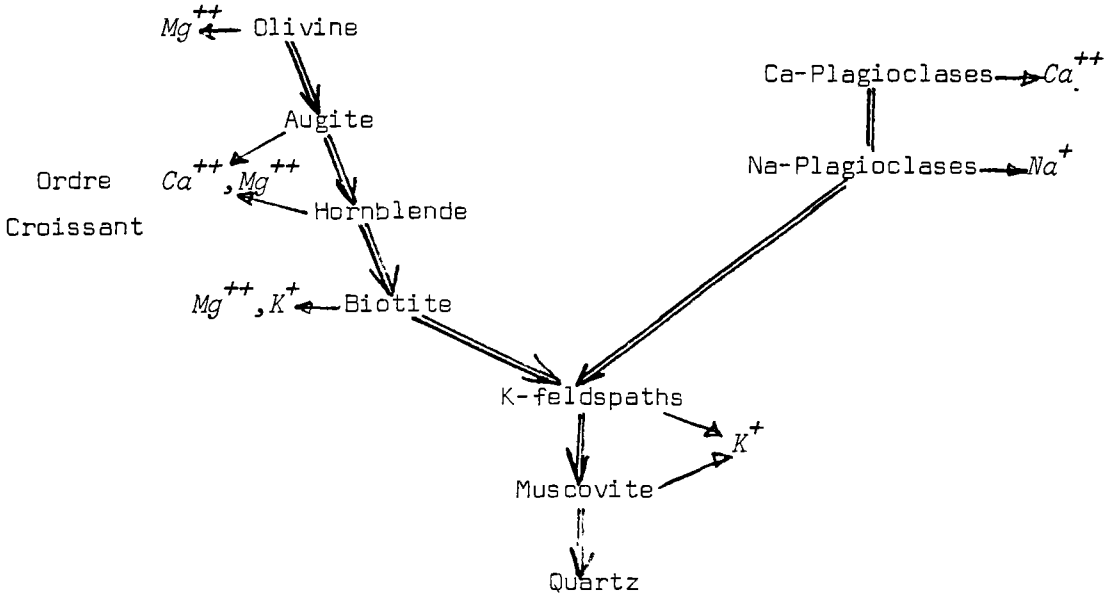
4.4. Le climat méditerranéen (ex: Corse)

Les faibles précipitations qui caractérisent ce type de climat ne permettent d'avoir que peu d'altérations chimiques. L'altération mécanique est prépondérante. Il n'y a donc pas de sols évolués sous ce climat. La roche mère saine est à l'affleurement, en contact direct avec les eaux de ruissellement.

4.5. Le climat arctique

Elle concerne essentiellement des granitogneiss.

Comme dans les quatre autres climats étudiés, l'ordre de vulnérabilité des minéraux des roches du socle reste inchangé :



Les eaux acides mais froides ($\theta° \simeq 2\text{-}3°C$) ne permettent pas d'obtenir des transformations poussées. Bien que l'altération de la zone froide puisse paraître importante, les quantités annuelles des différents éléments relachés sont souvent plus petites que celles des précipitations traversant les sols.

Les argiles de néoformation rencontrées sont essentiellement de deux types :

- illite (et parfois montmorillonite de type calcique) : minéraux argileux à deux couches de silice (peu lessivée),
- kaolinite : phyllites à une couche de silice.

Les processus engengrés correspondent donc aux phénomènes de bisiallitisation et de monosiallitisation (faible à moyen lessivage de la silice).

Le profil d'altération est en général constitué d'un sol de type podzolique surmontant la roche fissurée.

Le soutirage global des éléments chimiques est moindre que sous le climat tempéré. Seules les bases et une petite quantité de silice sont éliminées, les autres éléments sont bloqués. L'ordre de départ est de :

$$Fe < Mg < Ca < Na < K$$

5. LES VARIATIONS DES CONDITIONS DE L'ALTERATION

5.1. Influence de la roche mère

La composition minéralogique de la roche fixe les quantités des éléments qui passent en solution et par là, elle contrôle l'ordre de précipitation des minéraux secondaires conformément à l'ordre de saturation.

Comme pour les roches cristallines acides, les minéraux secondaires formés au cours de l'altération des roches basiques sont les mêmes :
goethite → goethite + gibbsite → goethite + kaolinite → kaolinite + montmorillonites → kaolinite + montmorillonites + calcite.
Mais la saturation se fera plus tôt pour les roches basiques :
c'est-à-dire que, par exemple, la calcite se formera plus tôt dans le profil (horizon plus haut).

Le caractère acide d'un granite se traduit par :

* un départ important de silice (plus de 50 % de la composition initiale) et de bases alcalines (surtout de sodium),

* la formation de montmorillonites proches du pôle aluminomagnésien.

Le caractère basique se traduit par :

* un départ moindre de silice,
* un départ important de fer et alcalinoterreux (surtout de calcium),
* la formation de montmorillonites plus ferrifères et plus magnésiennes.

Quant aux roches métamorphiques, l'altération varie suivant leur composition minéralogique. Mais le produit final est toujours la kaolinite. Cependant, la présence ou non de pyrite peut entrainer l'apparition de quantités très variables dans les solutions, notamment pour les sulfates et le fer (apports non négligeables).

5.2. Influence de la température

La température régit la cinétique des hydrolyses et, par là, les possibilités de formation des minéraux de néogénèse. Si la température passe de 25 à 0°C, la série des minéraux secondaires est, à peu près la même : seule, la gibbsite n'est plus présente tandis que de la silice amorphe apparaît momentanément.

A faible température, quartz et feldspaths potassiques cessent de se dissoudre pour une très faible altération de la roche mère. Globalement bloquées, à faible température, les hydrolyses sont moindres, d'où une altération peu importante.

A 0°C, l'allitisation est absente alors que monosiallitisation et bisiallitisation sont plus marquées : la bisiallitisation est néanmoins prédominante. Le passage de la bisiallitisation vers la monosiallitisation puis l'allitisation se fait progressivement des températures basses vers les plus élevées.

5.3. Influence du milieu réducteur

La teneur en fer ferrique (insoluble) sera d'autant plus faible que la solution sera plus réductrice au profit du fer ferreux évacué avec la solution drainante. Les minéraux ferrifères tels que goethite, nontronite, montmorillonite seront retardés par rapport à la kaolinite qui aura tendance à se former en plus grande quantité.

L'ordre d'apparition des minéraux secondaires sera : gibbsite, goethite (formation retardée), kaolinite (formation plus étendue dans le temps) associée à des montmorillonites qui seront d'autant moins ferrifères que la quantité produite sera plus grande.

5.4. Influence de la pression partielle de CO_2 (FRITZ B., 1975)

Quant l'altération se fait en milieu plus riche en CO_2 que l'atmosphère et tant que la dissolution n'épuise pas cette réserve acide, les quantités de roche dissoute, avant saturation par rapport aux minéraux primaires, sont plus importantes que dans les conditions atmosphériques ($pCO_2 \simeq 10^{-3,5}$ atm).

Une augmentation de pCO_2 par minéralisation de la matière organique va retarder l'alcalinisation des solutions, augmenter la solubilité des argiles et hydroxydes sans changer celles du quartz et de la silice amorphe.

6. POSSIBILITE DE DEPART DES IONS

Les quantités des éléments chimiques mis en solution sont fixées par la nature lithologique des roches mères. Mais l'ordre de lessivage est indépendant de cette dernière : il est entièrement régi par des facteurs internes Na - Ca - Sr - Sn - AS > K - Mg - Ba > Zn - CO - Ni - Cu - Pb - Si > Fe - Al - Ti - V - Cr - Ga.
Quelques légères variations dans cet ordre décroissant sont dues aux climats et aux compositions des roches mères.

Ces éléments vont pourvoir migrer sous différentes formes :

* en solution, pour les cations basiques formant des ions très solubles tels que Na, K, Ca, Mg, Si,
* après complexation avec des matières organiques,
* en suspension : ions amphotériques formant des hydroxydes peu ou non solubles (Fe, AL, Ti).

Al et Fe migreront dans les conditions particulières du climat tempéré. Mais la migration de ces éléments chimiques est contrecarrée par des phénomènes de piégeage dus à :

* l'adsorption sur des colloïdes,
* la fixation dans des horizons organiques,
* des précipitations chimiques (carbonates, sulfates, chlorures),
* la néoformation de minéraux (SiO_2, Al_2O_3, Fer, Mn, Mg) : soit par exemple dans des altérations sous climat tropical (d'après Karpoff A.M., Alii, 1973).

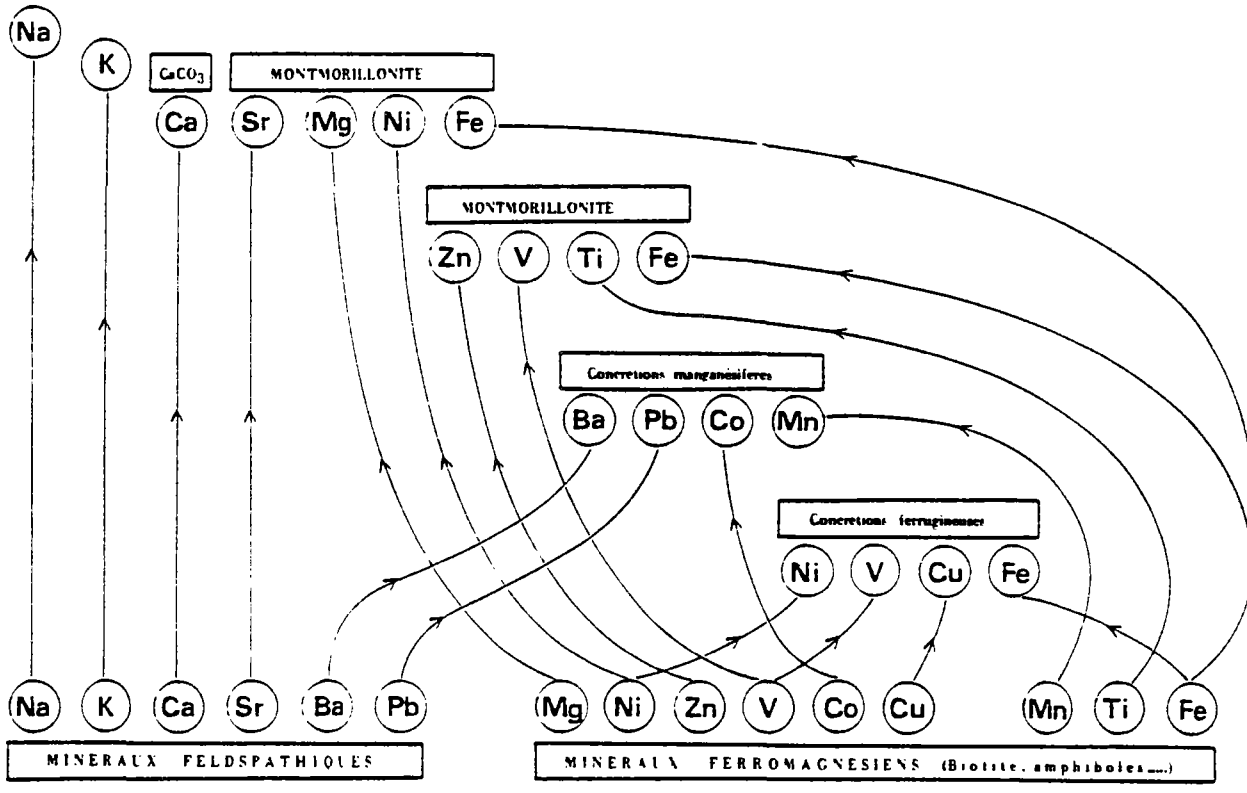


FIGURE n° 11 - Schéma des principaux cycles géochimiques dans des toposéquences de sols tropicaux (KARPOFF A.M. et al., 1973)

Selon le climat et la nature lithologique de la roche mère, les possibilités de mise en solution varient.

Quant à la silice qui pourrait servir de traceur du climat bien qu'une grande partie serve à la formation des minéraux argileux, une certaine quantité de SiO_2, en particulier sous forme d'ions SiO_3^{--}, pourra être entrainée par les eaux à pH > 5 et en quantités d'autant plus grandes que ces pH sont plus élevés. (voir graphique $SiO_2 = f(pH)$, fig. n° 4).

CHAPITRE II

LES EAUX SOUTERRAINES

1. DEFINITION DES "TYPES HYDROCHIMIQUES"

1.1. Choix des critères de caractérisation

1.1.1. *Choix et justification*

Le "type hydrochimique" doit être l'empreinte des principales caractéristiques présentées par un ensemble de solutions naturelles présentant une convergence de conditions de gisement, à savoir dans l'ordre où nous les avons citées : climatiques, lithologiques, hydrologiques. Il doit permettre une différenciation suffisamment poussée, offrir un caractère synthétique et porter à la connaissance des informations pouvant être intégrées dans une étude de prospection (à caractère sanitaire, agronomique, technologique...).

On peut distinguer deux sortes de critères :

* *Critère quantitatif* . ou taux de minéralisation qui est évaluable par :
  - le résidu sec (en mg/l ou g/l)
  - la résistivité ou la conductivité,
  - la "salinité" (pétroliers).

  On définit ainsi une classification des eaux :

  Eau douce ⟶ Saumâtre ⟶ Salée ⟶ Sursalée (saumure)

  (1 g/l) (25 g/l) (35 g/l)

  10 100

  Schoeller H. autres auteurs

* *Critères qualitatifs*.

  1 - NATURE DE LA MINERALISATION

  a) Anions : importance des concentrations absolues (taux de migrations ou de rétention) et relatives (définition du faciès hydrochimique selon Piper).
  Informations requises : alcalinité, chlorures, sulfates, silice.

  b) Cations : Importance des concentrations absolues et relatives (Piper).
  Informations requises : Ca + Mg (dureté), Na + K (indice d'échanges de bases*). Notamment Na/K et Ca/Na (degré hydrométrique, indice d'échange de bases)

Définition de l'INDICE D'ECHANGE DE BASE (ou indice chloroalcalin) : cet indice mesure le déséquilibre entre anions et cations provenant de sels d'acides forts et bases fortes fictifs (NaCl, KCl). Il peut être la conséquence d'un "échange de bases" impliqué dans les phénomènes d'altération plus ou moins poussés. C'est le rapport $\frac{(Cl) - ((Na)+(K))}{(Cl)}$

Informations requises : concentrations en Na, K, Ca, Mg et Fe.
Grâce à la quantité et à la nature de la minéralisation, la "qualité" de l'eau peut être définie.

2 - PROPRIETES ACIDOBASIQUES.

Le degré de "stabilité" vis à vis du calcaire permet de classer les eaux en trois catégories : eaux agressives, saturées ou sursaturées.
Informations requises : pH, température, alcalinité, Ca, CO_2 dissous...
On peut à partir de ces propriétés, définir le taux d'agressivité, parfois de corrosivité (par CO_2).

3 - ELEMENTS TRACES quand cela est possible

4 - TEMPERATURE.

En comparant la température de l'eau à celle de l'air, l'aquifère se situe en régime hypothermique, ortho ou hyperthermique suivant que celle de l'eau est inférieure, égale ou supérieure à celle de l'air.

Afin de pouvoir effectuer des comparaisons, nous nous situerons à une profondeur moyenne de 50 m. Normalement, l'aquifère est alors dans la zone homothermique (les variations diurnes et saisonnières n'y sont plus enregistrables).

1.1.2. *Classifications existantes*

* *Diagramme triangulaire* (LANGELLIER, 1942, PIPER 1944).

Selon l'anion prédominant, on distingue trois classes d'eau : eaux bicarbonatées à (HCO_3+CO_3) prédominant, eaux sulfatées et eaux chlorurées.

Chaque classe se divise en trois groupes selon le cation prédominant : eaux calciques, magnésiennes, ou calciques.

La combinaison anion-cation prédominants donne le faciès hydrochimique correspondant à l'analyse.

Cette représentation permet d'étudier un grand nombre d'eaux et de les comparer aisément entre elles (étude complète d'une nappe).
(figure n° 12).

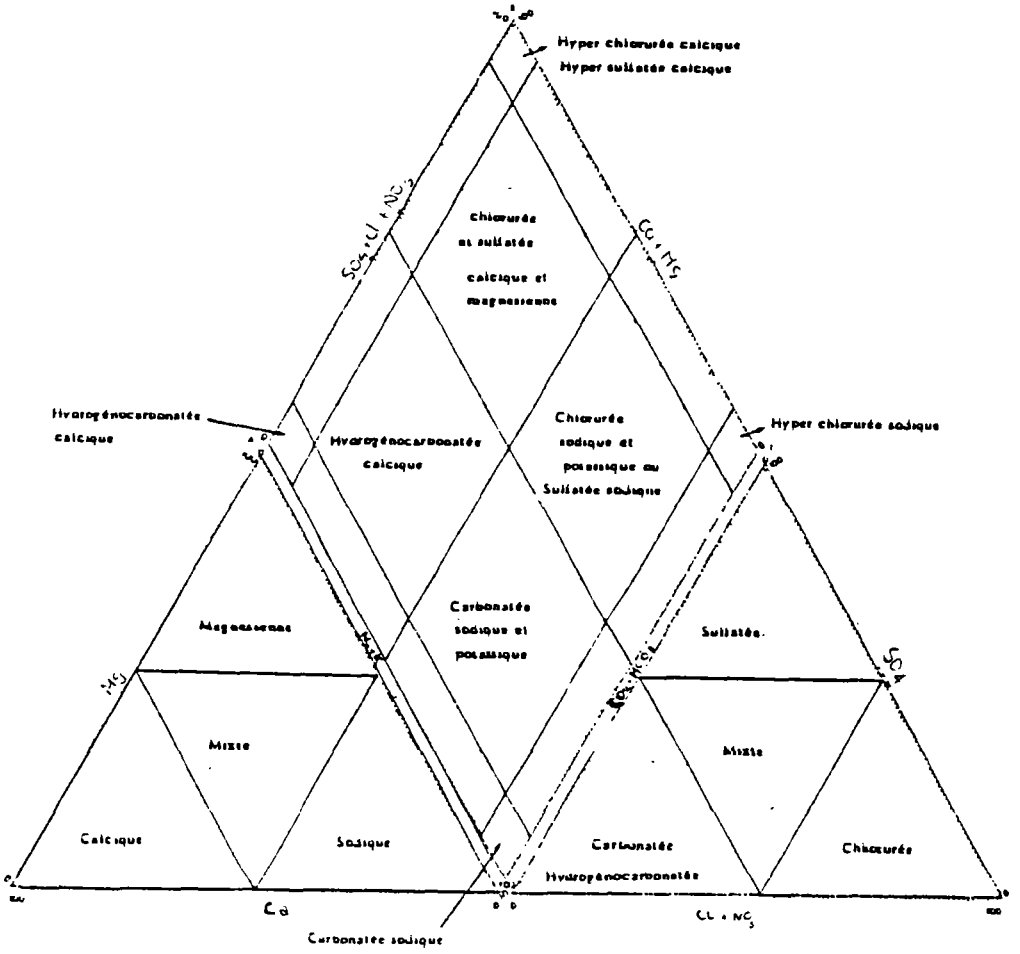


FIGURE n° 12 Classification des eaux naturelles (d'aprés PIPER A., 1944).

* *Diagrammes semi-logarithmiques* (SCHOELLER, 1935-1937)

Sur l'axe des abscisses, sont disposés à intervalles réguliers et successivement de gauche à droite, les radicaux rCa, rMg, rSO_4, $r(HCO_3\ rCO_3)$. On porte sur l'axe des ordonnées, gradué sur une échelle logarithmique, le nombre de milli-équivalents de chacun des radicaux, les points sont reliés par des droites. Grâce à l'inclinaison des traits, on peut définir les rapports des éléments entre eux (quelques rapports caractéristiques : rMg/rCa, rSO_4/rCl, $r\frac{Cl-(Na+K)}{Cl}$ ou indice chloroalcalin, rNa/rCa, rNa/rMg)

Un dérivé de cette représentation verticale est le diagramme Schoeller-Berkaloff qui reprend la représentation en milliéquivalents en lui associant celle en milligrammes par litre (voir figure n° 13).

1.1.3. Qualité de l'eau

Pour la Communauté Economique Européenne, des normes de potabilité des eaux de boisson ont été définies. Ailleurs, dans le monde, ce sont les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) qui sont appliquées plus ou moins strictement (voir tableau de l'annexe 2).

Cependant, beaucoup d'auteurs font encore appel à la définition de Schoeller H. (1937) pour les pays arides. Cette dernière est aussi utilisée dans les pays tropicaux (voir tableau ci-dessous).

Le tableau suivant peut se traduire par un diagramme qui permet de visualiser rapidement la potabilité d'une eau analysée (figure n° 14).

	Unité	Potabilité Permanente				Potabilité momentanée
		Bonne	Passable	Médiocre	Mauvaise	
Coloration		Incolore	Incolore			
Limpidité		Limpide	Limpide			
Odeur		Inodore	Inodore			
Saveur à 20°C		Agréable	Peu perceptible	Peu prononcée	Peu désagréable au plus	Désagréable
Résidu sec	mg/l	0 → 500	500 → 1000	1000 → 2000	2000 → 4000	4000 → 8000
Na	mg/l	0 → 115	115 → 230	230 → 460	460 → 920	920 → 1840
	mé	0 → 5	5 → 10	10 → 20	20 → 40	40 → 80
Mg + Ca	mg/l					
	mé	0 → 5	5 → 10	10 → 20	20 → 40	20 → 80
Degré hydrométrique	°F	0 → 25	25 → 50	50 → 100	100 → 200	200 → 400
Cl	mg/l	0 → 117,5	117,5 355	355 → 710	710 → 1420	1420 → 2840
	mé	0 → 5	5 → 10	10 → 20	20 → 40	40 → 80
SO_4	mg/l	0 → 144	144 → 288	288 → 576	576 → 1152	1152 → 2304
	mé	0 3	3 → 6	6 → 12	12 → 24	24 → 48

FIGURE n° 13

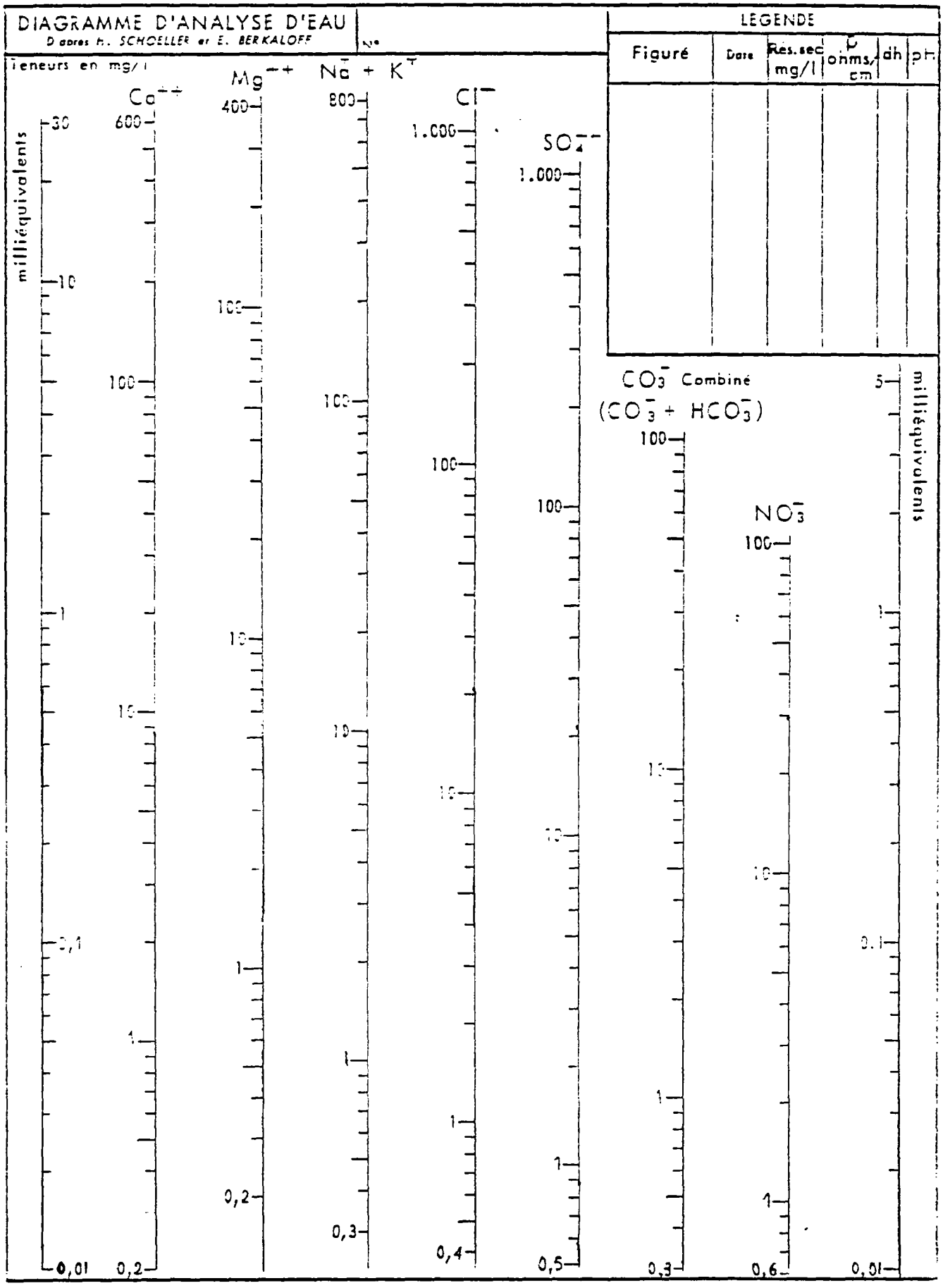


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D'après H. SCHOELLER et E. BERKALOFF
Teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3− Combiné
(CO3− + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents
LEGENDE
Figuré
Date
Rés. sec mg/l
Ω ohms/cm
dh
ph

FIGURE n° 14

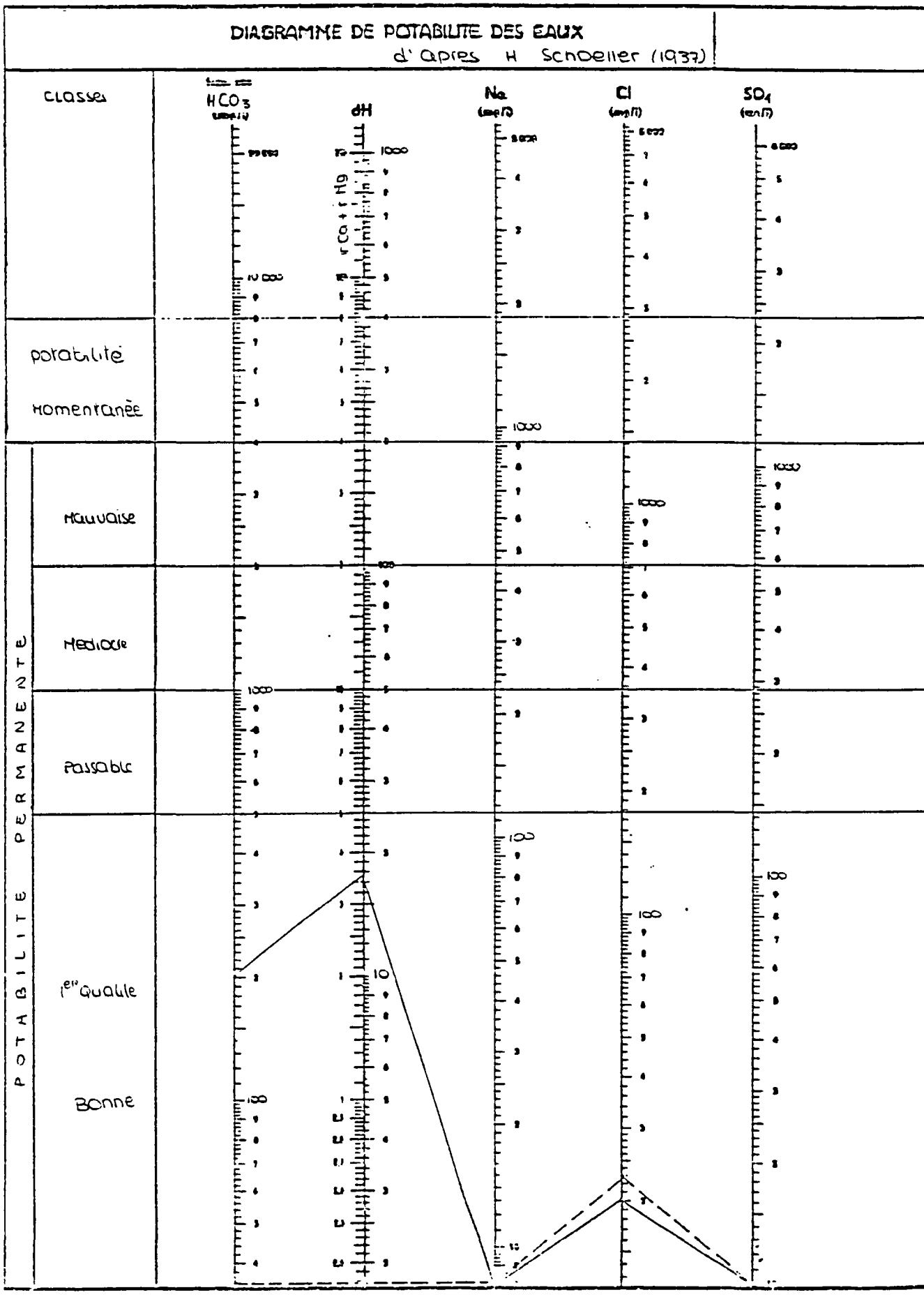


DIAGRAMME DE POTABILITE DES EAUX
d'après H Schoeller (1937)
classes
HCO3
dH
Na
Cl
SO4
potabilité momentanée
POTABILITE PERMANENTE
Mauvaise
Médiocre
Passable
1ère Qualité
Bonne

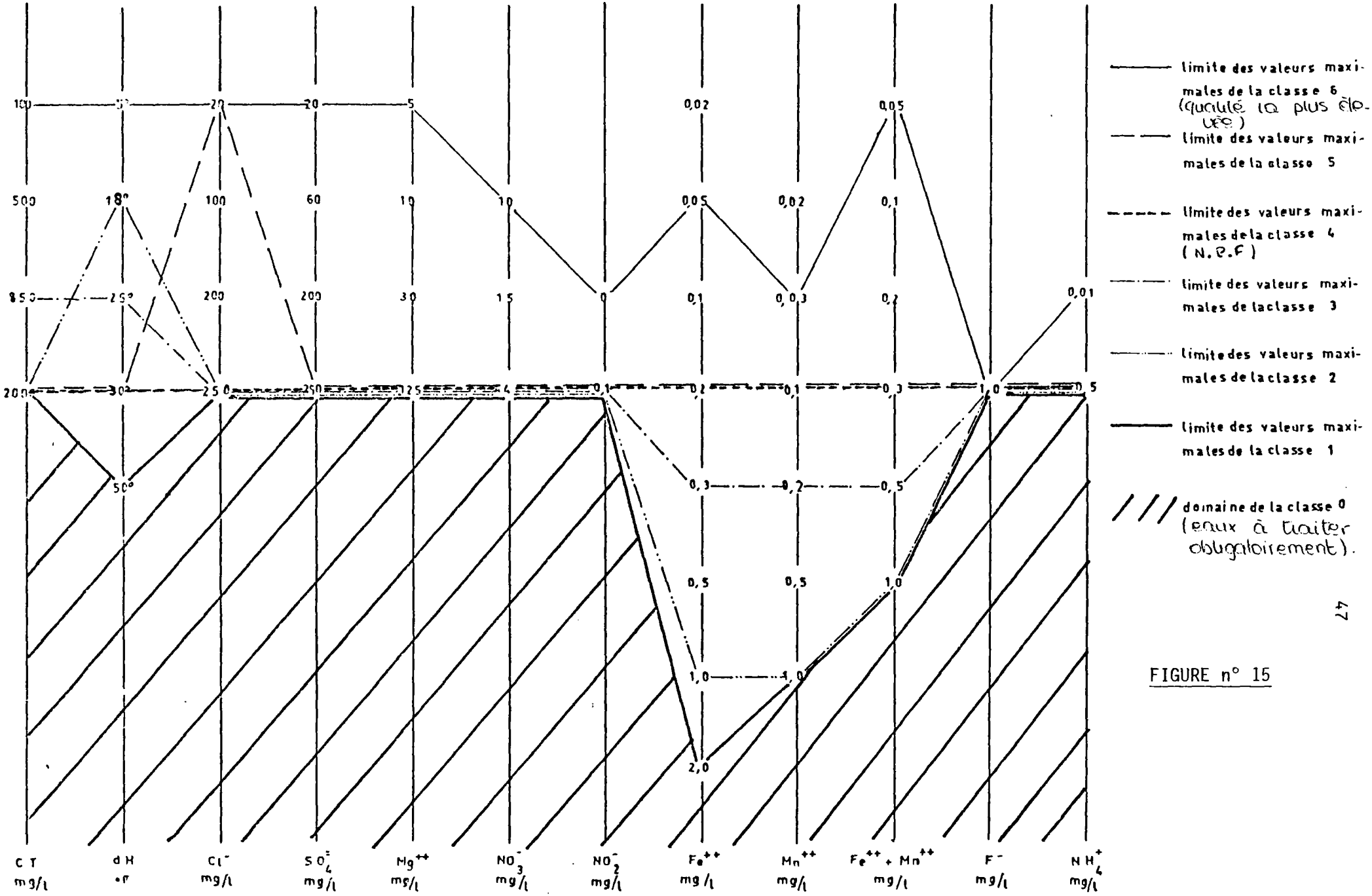

limite des valeurs maximales de la classe 6 (qualité la plus élevée)
limite des valeurs maximales de la classe 5
limite des valeurs maximales de la classe 4 (N.P.F)
limite des valeurs maximales de la classe 3
limite des valeurs maximales de la classe 2
limite des valeurs maximales de la classe 1
domaine de la classe 0 (eaux à traiter obligatoirement).
C T mg/l
d H °F
Cl⁻ mg/l
SO₄⁼ mg/l
Mg⁺⁺ mg/l
NO₃⁻ mg/l
NO₂⁻ mg/l
Fe⁺⁺ mg/l
Mn⁺⁺ mg/l
Fe⁺⁺ + Mn⁺⁺ mg/l
F⁻ mg/l
NH₄⁺ mg/l

FIGURE n° 15

D'autres méthodes de classification de la qualité de l'eau existent. Ainsi. B. LEMOINE (1975) utilise une classification suivant les besoins humains et industriels (sous la norme de potabilité française (type 4), ces eaux sont à traiter pour un ou plusieurs ions). Cette classification n'est basée que sur les taux en certains ions et non sur l'agressivité (figure n° 15).

2. LES TYPES HYDROCHIMIQUES DES EAUX

2.1. Origine de l'information et fiabilité

Les analyses proviennent dans un premier temps d'études réalisées dans un cadre de prospection et d'amélioration des ressources en eau. Il existe deux types d'analyses normalisées (type I, c'est-à-dire complète, ou type II) qui sont utilisées dans des buts différents : mise en exploitation ou contrôle de la qualité. Ces types d'analyse sont très souvent pratiqués dans les pays industrialisés.

Dans un deuxième temps, elles proviennent de recherches expérimentales, in situ. En général, elles sont "hors normes", suivant l'intérêt de l'étude. Elles comprennent en général les ions migrants. Mais très souvent, il manque un ou plusieurs critères de caractérisation : pH non mesuré (sur place), température de la solution rarement mesurée sur place, silice non dosée dans de nombreux cas...

Il est donc difficile de comparer des analyses provenant de pays ou de régions effectuées avec des buts différents. Les problèmes de ressources en eau sont très variables d'un pays à l'autre. Il est aussi très difficile d'imposer des normes de qualité ou de potabilité établies dans la C.E.E. à des pays où l'eau est moins abondante et souvent plus minéralisée. Une définition de la "qualité" de l'eau doit être envisagée pour chaque cas.

2.2. Les types hydrochimiques des eaux souterraines

Comme pour les altérations des roches du socle, l'étude suivante passera en revue les compositions des solutions rencontrées dans plusieurs types de roche et sous différents climats.

2.2.1. Les eaux sous climat tropical humide

En ce qui concerne les eaux captées en Afrique de l'Ouest, il est à noter que le milieu fissuré n'est exploité que depuis peu. Auparavant, c'était le milieu altéré qui était concerné. La littérature ne précise pas toujours le milieu exploité. Il en résulte une petite imprécision due à la différence de composition chimique des eaux issues de ces deux milieux.

Quant aux eaux équatoriales, seul le taux de minéralisation augmente. La nature ne varie pas ou peu.

2.2.1.1. Les eaux des granites

1. MINERALISATION. La minéralisation globale des eaux issues des roches du socle est toujours relativement faible (niveau de fissuration, non soumis au phénomène d'évaporation). Cependant, on rencontre des eaux très minéralisées dans les niveaux argileux (dont la profondeur varie suivant les conditions locales).

   Pour les granites, en milieu tropical humide, le résidu sec varie jusqu'à 3000 mg/l (soit $\rho_{moy} \simeq 5000$ Ω.cm). Les plus fortes concentrations sont celles de la silice, de Ca, Na et K.

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Les eaux sont bicarbonatées calciques à mixtes (Na, Ca, Mg) (voir figure n° 16).

   Nous citerons quelques rapports caractéristiques en exemple :

   SiO_2 / bases < 1

   (Mg/K) / Cl $< 0,77$

   Na / K toujours $\gtrsim 1$

   La dureté totale est toujours très faible (moins de 10°F).

   L'indice d'échange de base (ou indice chloroalcalin) est toujours négatif.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES
   - pH : toujours inférieur à 7.
   - eaux très agressives (eaux excédentaires en CO_2).

4. ELEMENT TRACE souvent rencontré : Ti.

5. TEMPERATURE moyenne annuelle de la solution : se situe entre 24° et 28°C (T_{air} : voir au chapitre "Altération").

6. QUALITE : bonne dans la plupart des cas.

7. REMARQUES. Il existe un gradient vertical de minéralisation (les eaux les plus concentrées sont proches de la surface), dû à une concentration par évaporation (très intense sous climat tropical).

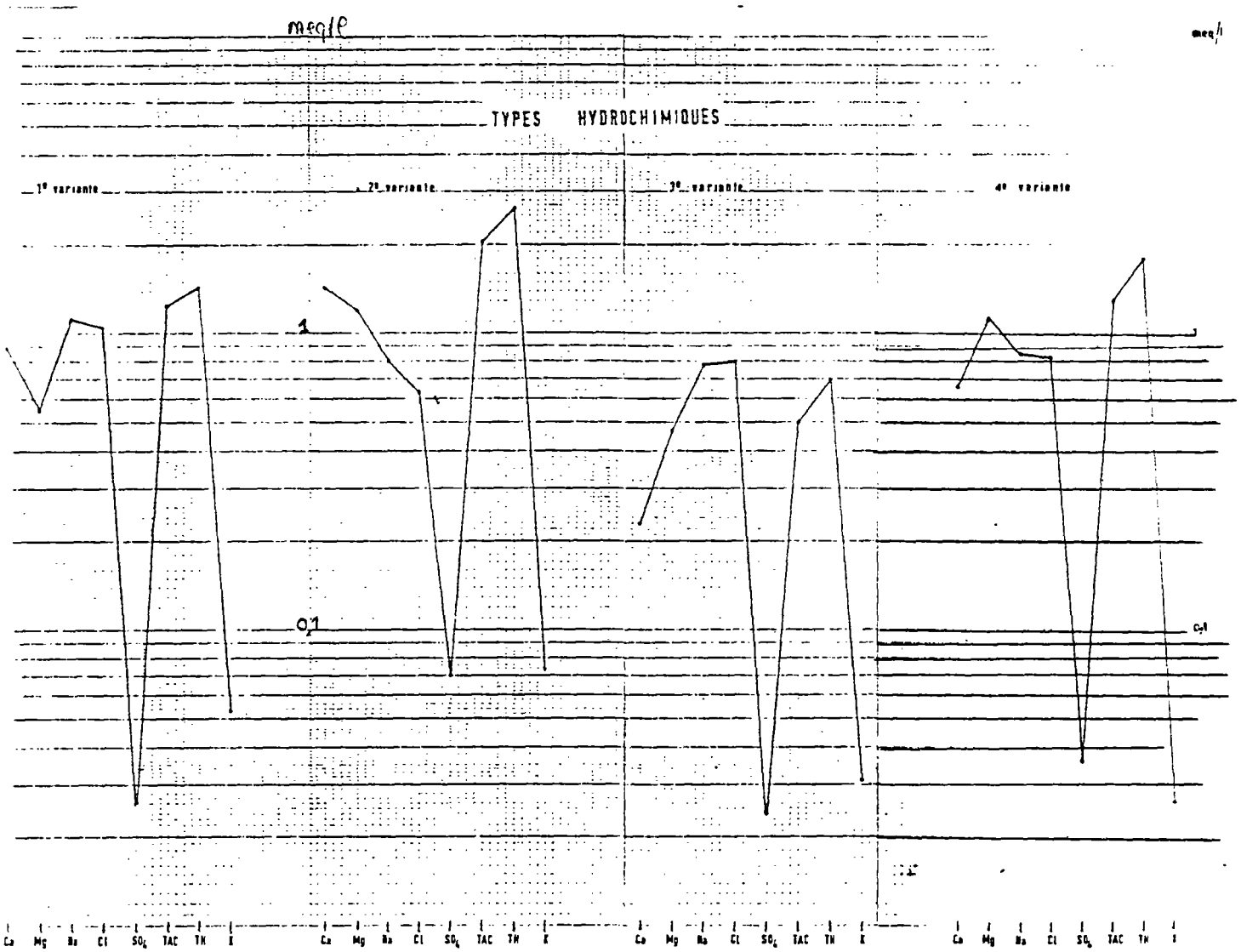


FIGURE n° 16 - Eaux des granites

2.2.1.2. Les eaux des roches cristallines basiques

1. MINERALISATION. Elle est plus grande que celle des granites. Cela se traduit par des résistivités bien plus faibles : 3000 Ω.cm au lieu de 5000 5000 Ω.cm.

Les ions prédominants sont en général : HCO_3 et Ca, Mg, Fe (toujours plus importantes que dans les eaux des granites).

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Ce sont des eaux bicarbonatées calciques à mixtes (Ca, Na, Mg).

Par rapport aux eaux issues des granites (figure n° 16), celles-ci correspondent aux variantes n° 2 et 4.

La dureté totale est toujours faible (moins de 10°F).

L'indice d'échange de base est toujours négatif. Cependant, le déséquilibre est plus grand que pour les granites (forte libération d'alcalins à partir de plagioclases).

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.
- pH : en général, supérieur à 7.
- Agressivité : les eaux sont toujours agressives, mais l'excédent en CO_2 libre est plus faible que pour les granites.

4. ELEMENTS TRACES.

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE. Pour une profondeur moyenne de 50 m, elle varie entre 24° et 30°C, suivant leur situation géographique (température de l'air : 24-28°C).

6. QUALITE. En général, bonne, mais elle peut évoluer localement vers les saumures (effet de l'évaporation).

7. REMARQUES. La nappe a encore un gradient vertical de concentration (les eaux les plus concentrées sont à proximité de la surface).

2.2.1.3. Les eaux des schistes

Malgré la très faible perméabilité du matériau, les séries schisteuses peuvent renfermer de l'eau, mais les ressources sont assez limitées.

1. MINERALISATION. Elle est en général relativement forte. Cela se traduit par des résistivités faibles (inférieures à 500 Ω.cm).

Ce sont des eaux très riches en sulfates, chlorures, ainsi qu'en sodium. Elles sont bien moins riches en silice (moitié moins que dans les eaux issues des granites).

FIGURE n° 17

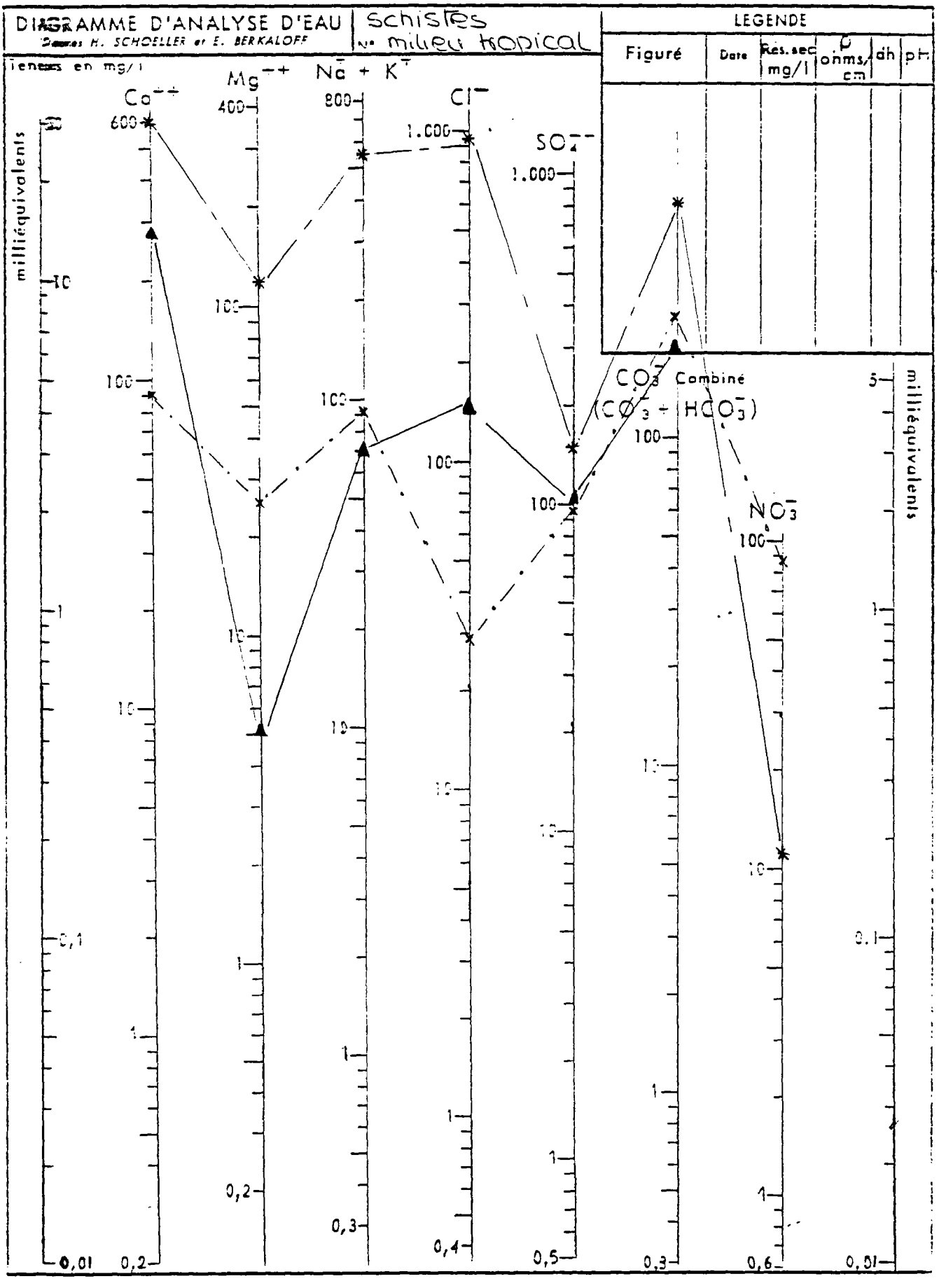


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
Schistes
N° milieu tropical
LEGENDE
Figuré
Date
Res. sec mg/l
ρ ohms/cm
dh
pH
Teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3 Combiné
(CO3 + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Elles appartiennent à la classe bicarbonatée calcique à mixte (Na, Ca, Mg). Mais elles se différencient des eaux des roches cristallines par des teneurs bien plus grandes en SO_4, Cl qui, dans quelques cas, peuvent devenir prédominantes (voir figure 17).

L'indice d'échange de bases est faiblement positif à très fortement négatif.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.
- pH : proche de la neutralité.
- agressivité : les eaux sont non agressives.

4. ELEMENTS TRACES

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE. Elle varie, suivant la région, entre 24° et 28°C.

6. QUALITE. Ces solutions sont très souvent saumâtres, avec, dans ce cas, évolution vers le type salin ($Cl + SO_4$ HCO_3).

2.2.1.4. Conclusions sur les eaux du milieu tropical humide

Quel que soit le type de la roche encaissante, les eaux sont bicarbonatées calciques à mixtes (Na, Ca, Mg). Il semble donc que la lithologie de la roche mère, source de la minéralisation, ne soit pas le facteur prépondérant dans l'acquisition des éléments dissous. C'est le climat qui régit la dynamique de l'altération et des phénomènes de concentrations des eaux.

Les altérations des différentes roches étudiées donnent toujours le même produit final : la kaolinite (niveaux kaoliniques toujours présents dans les profils, sur de plus ou moins grandes épaisseurs, seuls ou sur des niveaux arénitiques plus perméables).

Cela correspond à une évacuation intense des bases et d'une grande partie à la silice, que l'on retrouve dans les eaux de circulation.

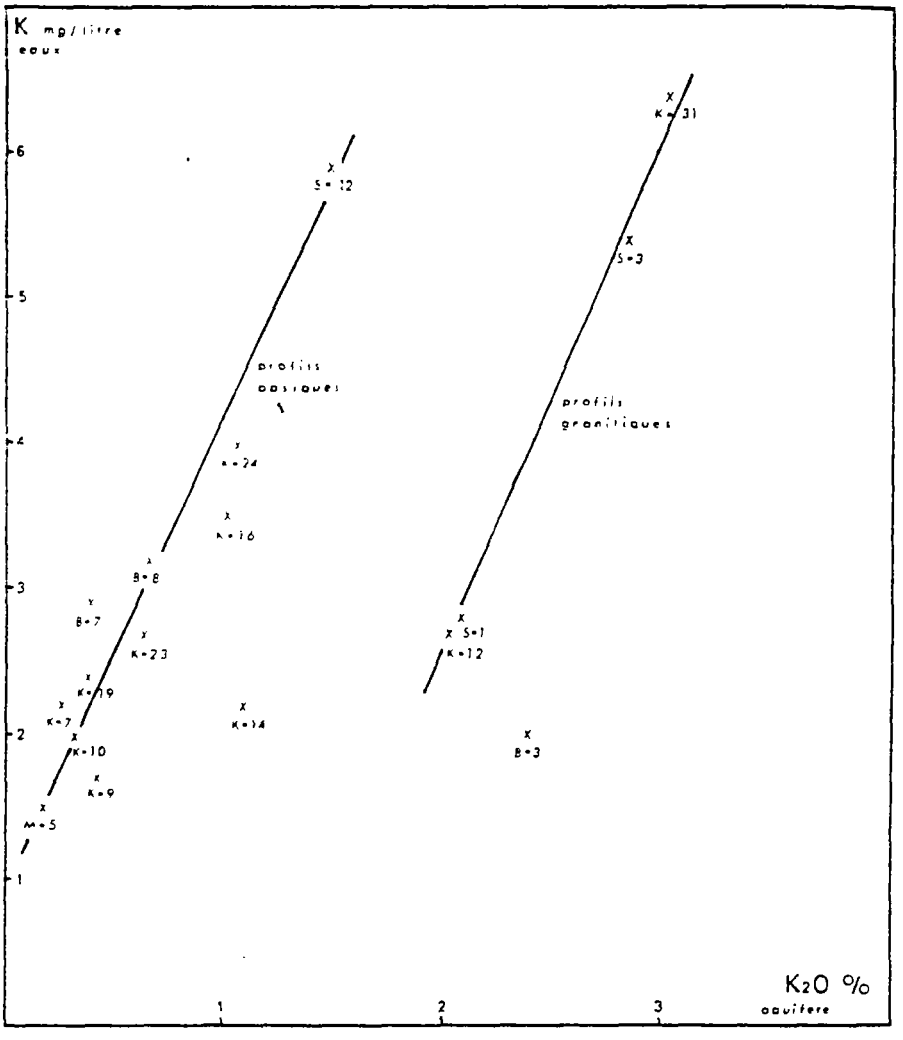


FIGURE n° 18 – Relations eaux-aquifères pour K

(d'aprés WACKERMANN, 1975)

Quant aux ions bicarbonatés, majoritaires dans les eaux, des travaux de SARAZIN-FOUILLAC-MICHARD (1976) ont montré que la plus grande partie de HCO_3 provenait du CO_2 associé à l'altération des plagio-clases, qui sont dans ce type de roches les plus vulnérables (de plus, les eaux sont agressives, le CO_2 excédentaire n'étant pas neutralisé entièrement).

On peut donc penser que le faciès hydrochimique dépendrait en premier lieu du type d'altération climatique, reléguant au deuxième rang la lithologie de la roche encaissante.

La composition chimique de la roche mère ne se retrouve que :

1. dans certaines concentrations ioniques : il existe une étroite corrélation entre les concentrations en K_2O de l'aquifère et celles en K^+ des eaux. Cette corrélation, grossièrement linéaire, varie suivant le type de roche : les roches acides ont leurs teneurs en K_2O liées aux micas, les roches basiques ont leur K_2O lié aux feldspaths (voir figure n° 18). L'existence de deux relations décalées interdit de recourrir aux teneurs en potassium des eaux pour caractériser de façon univoque les terrains aquifères.

La différence de comportement pourrait provenir de la moindre libération du potassium des micas.

Par contre le rapport Mg/K est fortement lié au rapport MgO/K_2O des niveaux aquifères correspondants. Il existe, comme nous le montre la figure n° 19 , une limite nette entre les eaux d'origine basique ($(Mg/K)_{eau} > 9$) et les eaux d'origine acide (< 9).

Le rapport Mg/K semble donc être un critère de caractérisation des eaux. Un classement des eaux en fonction des teneurs en Mg/K et en Cl est possible :

$$(Mg/K)_{granite} < (Mg/K)_{gabbro}$$

(voir figure n° 20).

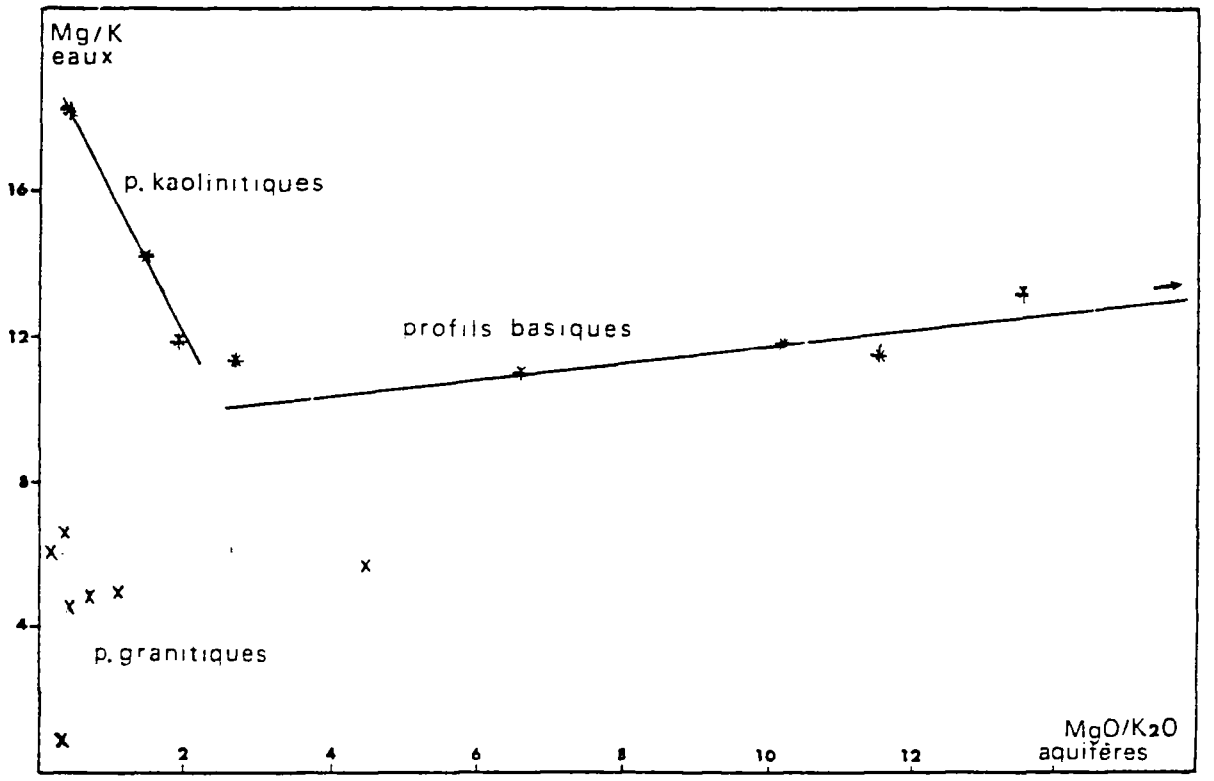
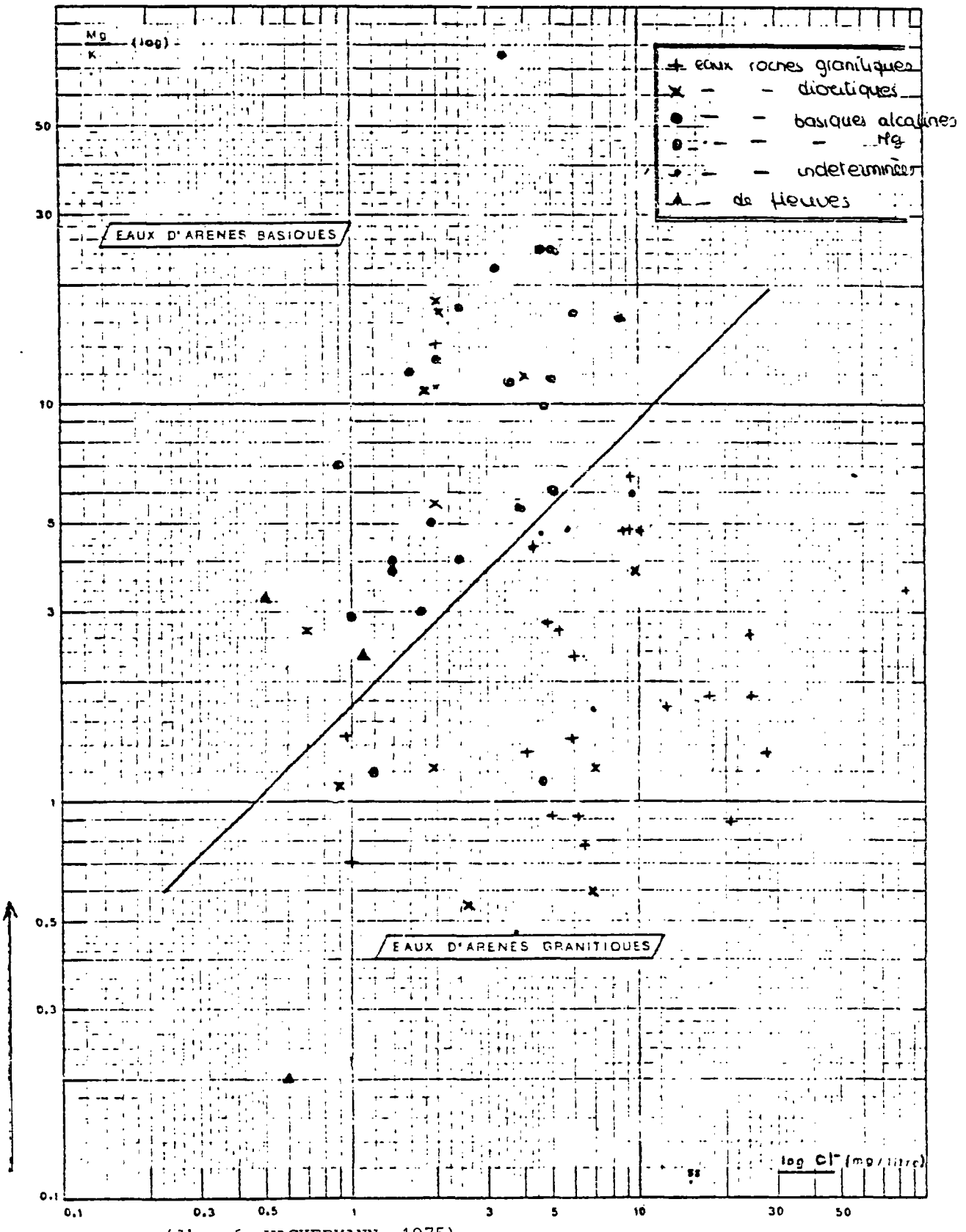


FIGURE n° 19 — Relations eaux-aquifères pour Mg-K.

(d'aprés WACKERMANN, 1975)

FIGURE n° 20



(d'aprés WACKERMANN, 1975).

FIGURE n° 21

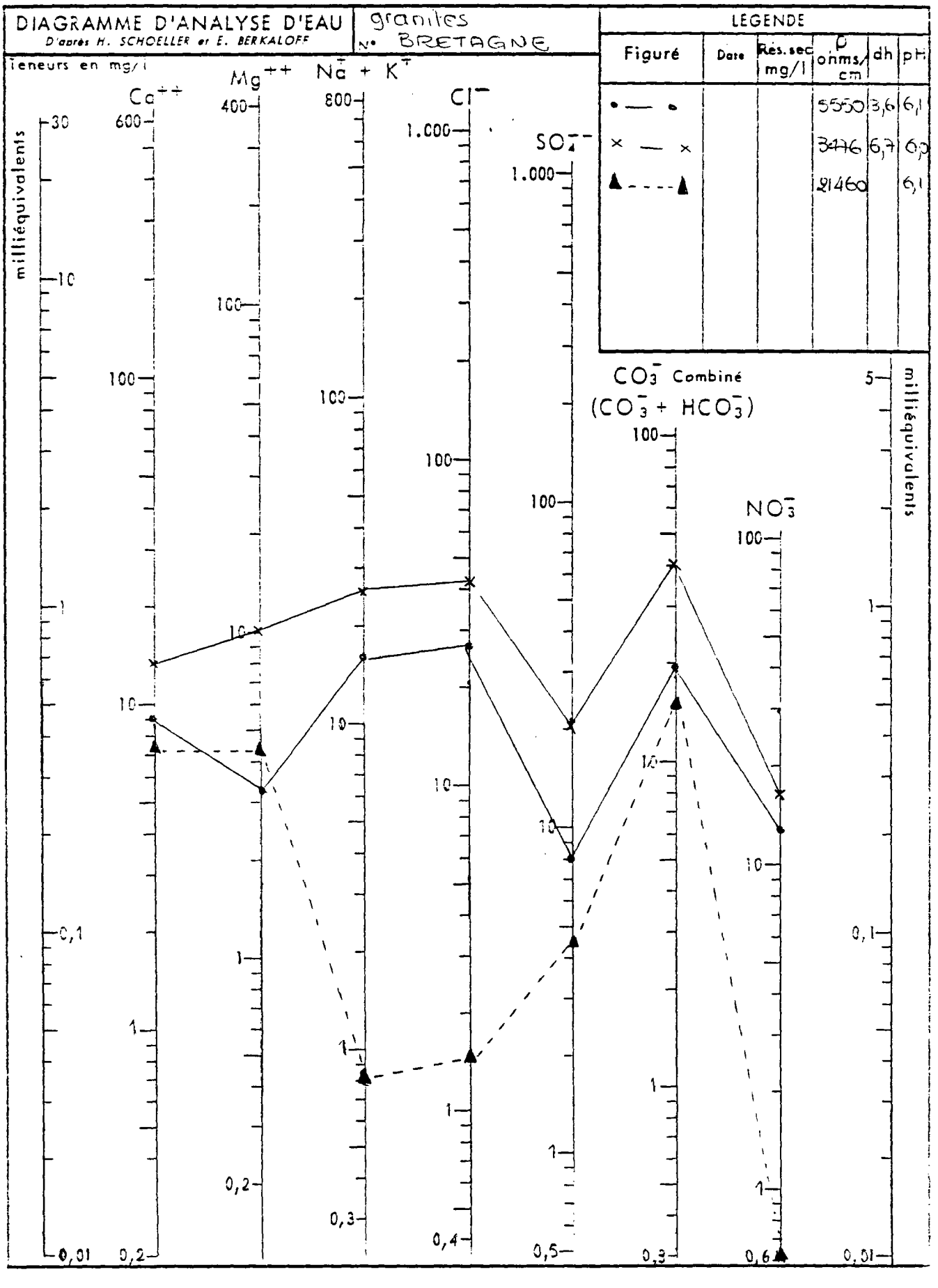


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D'après H. SCHOELLER et E. BERKALOFF
granites
N° BRETAGNE
LEGENDE
Figuré
Date
Rés. sec mg/l
ρ ohms/cm
dh
pH
5550 3,6 6,1
3476 6,7 6,9
21460 6,1
Teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3− Combiné
(CO3− + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents

Les teneurs en silice reflètent les caractéristiques du processus d'altération et, par là, du climat : les fortes concentrations en SiO_2 des eaux correspondent à la monosiallitisation et à l'allitisation caractéristiques des altérations sous climat tropical humide. Ces concentrations sont ensuite modulées par les conditions physicochimiques de l'altération (plus ou moins alcaline).

Quant aux schistes, les eaux circulent mal à cause de la faible perméabilité de ces matériaux. Le temps de parcours y est plus long, d'où une intensification :

1. des désorptions (Cl^-),
2. des hydrolyses et oxydations pour les sulfates (à partir des sulfures).

2.2.2. *Les eaux sous climat tempéré océanique (Bretagne)*

2.2.2.1. Les eaux des granites

1. MINERALISATION. Elle est faible à moyenne. Cela est traduit par des résistivités qui sont, en général, supérieures à 3000 Ω.cm.

   Les ions prédominants sont : HCO_3, Cl avec en général $HCO_3 > Cl$ et Na, Ca pour les cations.

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Ce sont des eaux appartenant à la classe mixte, bicarbonatée-chlorurée calcosodique (voir figure n° 21).

   Nous citerons en exemple quelques rapports caractéristiques :

   SiO_2 / bases $<$ 3

   Na / K $\simeq$ 12

   La dureté totale de la solution est toujours très faible, moins de de 10°F.

   L'indice d'échange de bases est, là encore, négatif.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES

   Les eaux sont très acides (pH variant de 7,5 à 6,0 : moyenne autour de 6,5) et présentent un caractère très agressif.

4. ELEMENTS TRACES

FIGURE n° 22

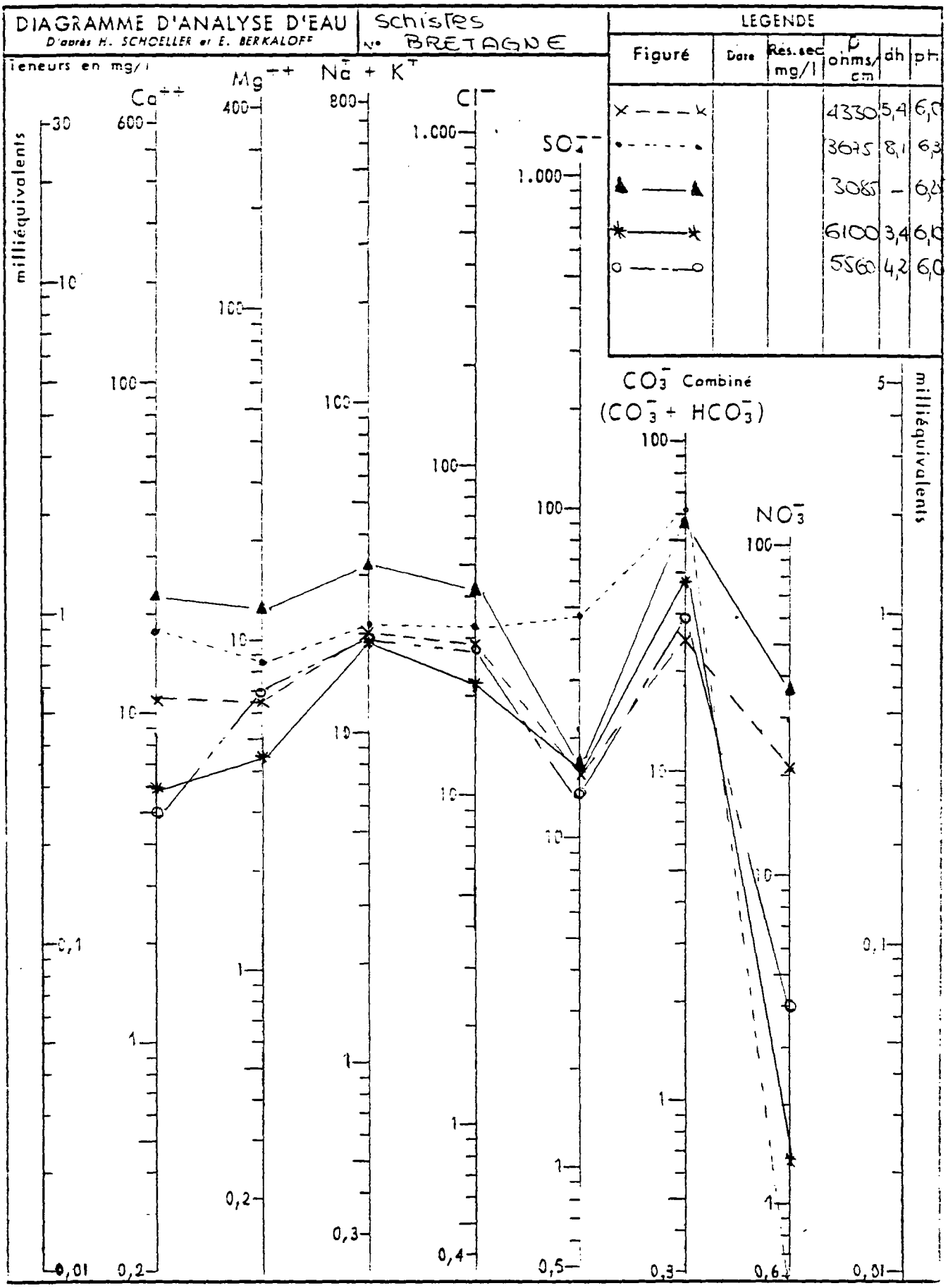


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D'après H. SCHOELLER et E. BERKALOFF
Schistes
N° BRETAGNE
LEGENDE
Figuré
Date
Rés. sec mg/l
P ohms/cm
dh
ph
4330 5,4 6,0
3675 8,1 6,3
3085 - 6,4
6100 3,4 6,0
5560 4,2 6,0
teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3− Combiné
(CO3− + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE. Entre 10° et 13°C (température de l'air : ≃ 10°C).

6. QUALITE. En général, elle est bonne. Cependant, du fait de l'acidité des eaux, il y a possibilité d'avoir des concentrations en ions gênants (Fe, Mn). C'est en général une eau douce faiblement minéralisée.

2.2.2.2. Les eaux des roches cristallines basiques

1. MINERALISATION. Moyenne.

Les plus fortes concentrations de cations sont celles de Na et Ca. Dans les études parcourues, les anions n'ont pas été dosés (sauf Cl^-).

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Les eaux sont calcosodiques.
De plus : $(SiO_2$ / bases$) < 2$.
L'indice d'échange de bases est négatif.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.
- pH : toujours acide, entre 6,1 et 7.
- agressivité : non déterminée.

4. ELEMENTS TRACES /

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE : entre 10 et 14°C.

6. QUALITE. Elle est, dans la plupart des cas, bonne. Cependant, fer et manganèse sont assez répandus.

2.2.2.3. Les eaux des roches métamorphiques

** *Les schistes*

1. MINERALISATION. En général, elle est faible, cela se traduit par des résistivités supérieures à 3000 Ω.cm. Les plus fortes concentrations sont celles de Na, Ca, Mg et HCO_3, Cl.

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Les eaux sont bicarbonatées chlorurées calcosodiques (voir figure 22).

Parmi les rapports caractéristiques :

$0,2 < Mg/Ca < 1$

Na/K moyen (autour de 12).

La dureté totale est toujours faible ($\simeq$ 10°F).

L'indice d'échange de bases est toujours négatif.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.
   - pH : en général acide (entre 6,0 et 7,5).
   - agressivité : --

4. ELEMENTS TRACES.

5. TEMPERATURE ANNUELLE MOYENNE. Elle varie entre 9° et 13°C.

6. QUALITE. Dans la plupart des cas, elle est bonne. Néanmoins, les teneurs en fer dans les eaux des schistes sont plus importantes que celles des eaux des granites (présence générale de pyrite : FeS_2).

** *Les gneiss.*

1. MINERALISATION. Moyenne, correspondant à des résistivités variant de 2000 à 5000 .cm.
   Les plus fortes concentrations sont celles des chlorures.

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Un trop petit nombre d'analyses issus de ce type de roche a été recueilli pour pouvoir définir une classe d'eau prédominante dans cette catégorie. Cependant, les fortes teneurs en chlorures semblent prédominer dans les forages étudiés, au coté des ions bicarbonatés.

   La dureté totale est comme pour les autres roches, inférieure à 10°F.

   L'indice d'échange de bases est proche de 0,20.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.
   - pH : compris entre 6,5 et 7,5
   - agressivité : --

4. ELEMENTS TRACES.

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE : entre 11 et 13°C

6. QUALITE : bonne. Dans quelques cas étudiés, il semblerait y avoir des teneurs moindres en fer.

2.2.2.4. *Conclusions sur les eaux des pays tempérés océaniques*

Sur les quatre types de roches étudiés, seuls deux d'entre eux ont pu permettre d'établir un bilan satisfaisant : ce sont les granites et les schistes. Ainsi, nous nous en tiendrons à ces deux types lithologiques, pour tirer des conclusions sur les eaux des pays tempérés humides. Les roches cristallines basiques et les gneiss devront faire l'objet d'une étude complémentaire avant de les rapprocher des deux autres catégories d'eaux.

Là encore, pour granites et schistes, les eaux rencontrées sont du même faciès. Il s'agit, cette fois-ci, d'une classe mixte : bicarbonatée-chlorurée calcosodique. Il semble donc que le type pétrographique soit masqué par la dynamique de l'altération.

Celle qui domine dans ces pays, est la bisiallitisation. La monosiallitisation fait parfois son apparition, mais elle est toujours discrète. La kaolinite serait le produit final, si l'altération était poussée à l'extrême, ce qui n'est pas toujours le cas.

Dans les eaux étudiées, les concentrations en ions (Na^+, Mg^{++}, Cl^- et $SO_4^=$) peuvent s'expliquer par la proximité de la mer. Les pluies et les embruns provenant de la mer (très chargés en ces ions) contamineraient les eaux souterraines (infiltrations directes) : ceci peut être traduit par le rapport Mg/Ca qui varie de 0,2 à près de 2 (eaux fortement polluées par ces embruns). Une partie du potassium pourrait également avoir une origine océanique.

Cependant, dans les schistes, les sulfates peuvent aussi bien provenir de la pyrite présente dans ces roches.

La pollution par la surface est un facteur important dans ces régions. Outre les fortes teneurs en Na, Cl, Mg, SO_4, il y a aussi les nitrates qui sont souvent très bien représentés (pollution humaine).

La silice est toujours relativement abondante dans ces eaux. Aussi, le rapport SiO_2/bases pourrait être utilisé pour caractériser le processus d'altération engendré sous le climat tempéré océanique. Dans ces régions, il est inférieur à 2,5 pour les granites, à 2 pour les roches basiques.

Les teneurs en SiO_2 ne sont pas analysées pour les eaux issues des schistes. Si l'on s'en tient à la remarque de plusieurs auteurs, ces concentrations sont voisines de celles issues des granites. Le rapport SiO_2/bases serait alors plus faible que pour les granites

Du fait que les concentrations en Mg, K, Cl, peuvent être, en grande partie, attribuées à l'influence océanique, il devient impossible de caractériser les eaux des différentes formations du socle, comme cela a été fait pour les eaux du milieu tropical.

Quant aux autres ions (Ca, HCO_3...), il n'y a pas de variations assez grandes pour qu'elles soient significatives d'une composition lithologique différente.

Cependant, une étude de rapports pendant la totalité d'une année fait apparaître des variations saisonnières contraires : deux rapports sont concernés : rNa/rCa et rK/rNa. En effet, rNa/rCa décroit de l'été vers l'hiver dans le cas des schistes, alors qu'il croit de l'automne vers l'hiver pour les granites. De même, rK/rNa décroit au cours de la même période pour les schistes et croit pour les granites (TRESIGNY M., 1973).

Il semble donc que la minéralisation des eaux souterraines des zones de socle sous climat tempéré océanique ne traduit pas les différences pétrographiques des formations géologiques dont elle est issue. Mais trois facteurs semblent être prédominants pour cette minéralisation :

1. la nature et l'épaisseur de la zone d'altération responsable de l'acquisition de la minéralisation (facteur d'ordre général),
2. la proximité de la mer qui apporte par les embruns et précipitations, les ions Na^+, Cl^-, $SO_4^=$, Mg^{++} (facteur local),
3. la pollution par la surface (facteur local n'influençant que certaines concentrations : fer nitrates).

2.2.3. Les eaux sous climat méditerranéen (Corse)

2.2.3.1. Les eaux des granites

1. MINERALISATION. Faible à très faible. Le résidu sec est souvent inférieur à 500 mg/l.

   Les ions prédominants sont : Na, Cl, SiO_2 (entre 10 et 30 mg/l).

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Les eaux appartiennent à la classe bicarbonatée-chlorurée sodique. Dans quelques cas, elles sont chlorurées sodiques (voir figure n° 23).

   Parmi les rapports, les plus caractéristiques sont :

   $Mg/Ca \ll 1$ $\quad Na/K > 40$ $\quad rNa+rK/rCa > 1$

   L'indice d'échange de bases est négatif pour les eaux de la première classe définie et positif pour la seconde.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.

   - pH : il varie entre 5,6 et 7,5, avec une moyenne autour de 6,4.
   - agressivité : elles sont agressives dans le cas où elles appartiennent au premier faciès.

4. ELEMENTS TRACES.

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE : inconnue

6. QUALITE. Bonne, mais il y a souvent pollution par la surface (apports de nitrates).

2.2.3.2. Les eaux des schistes

1. MINERALISATION. Elle est plus forte que dans les granites (résistivités de l'ordre de 1000 Ω.cm, au lieu de 3000 Ω.cm).

   Les plus fortes concentrations sont celles de Na, HCO_3, Cl, SiO_2 (autant que dans les granites).

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Les eaux sont bicarbonatées chlorurées sodiques à chlorurées sodiques (figure n° 24).

FIGURE n° 23

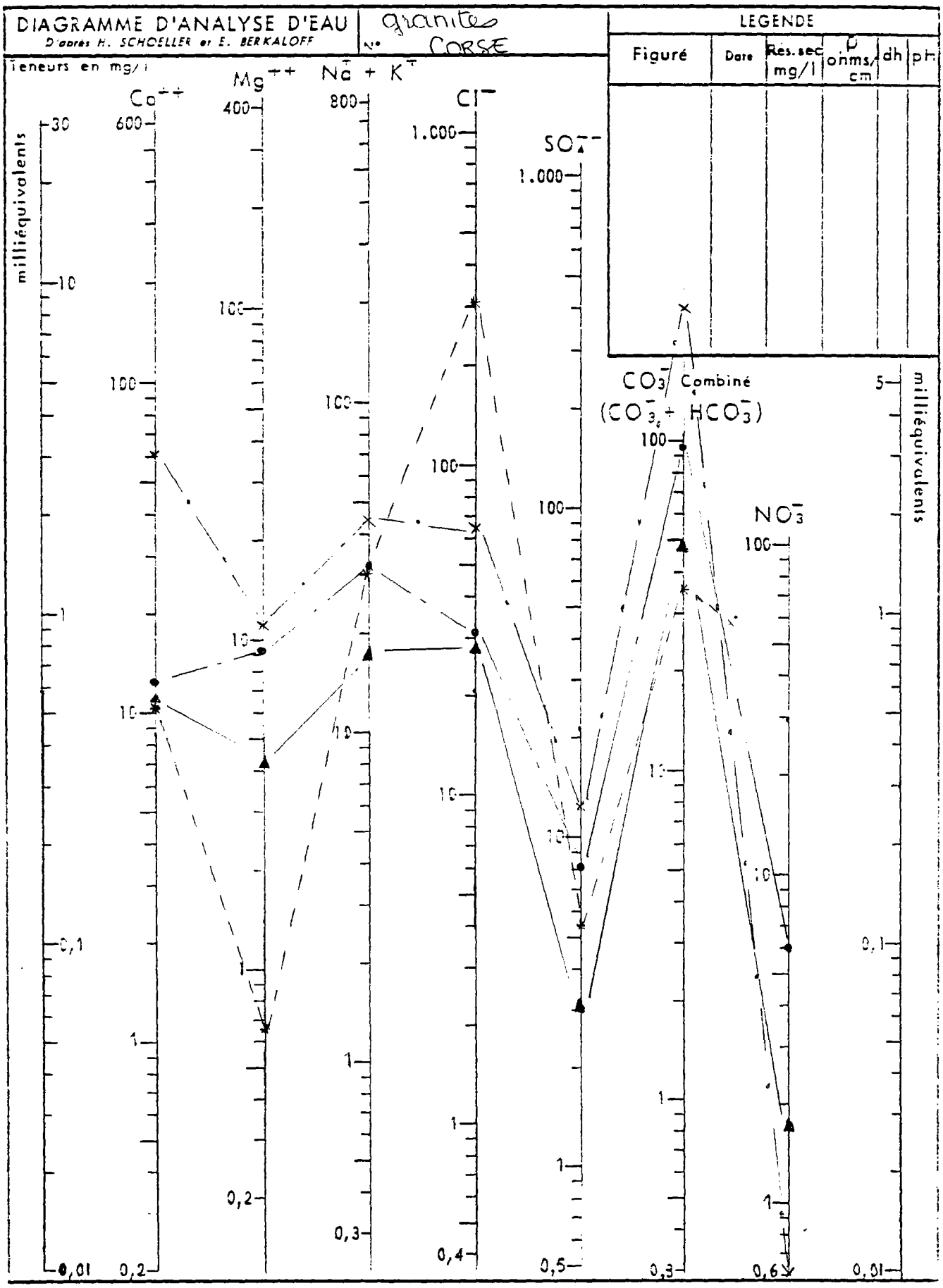


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D'après H. SCHOELLER et E. BERKALOFF
N° granite CORSE
LEGENDE
Figuré
Date
Rés. sec mg/l
ρ ohms/cm
dh
ph
Teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3− Combiné
(CO3− + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents

FIGURE n° 24

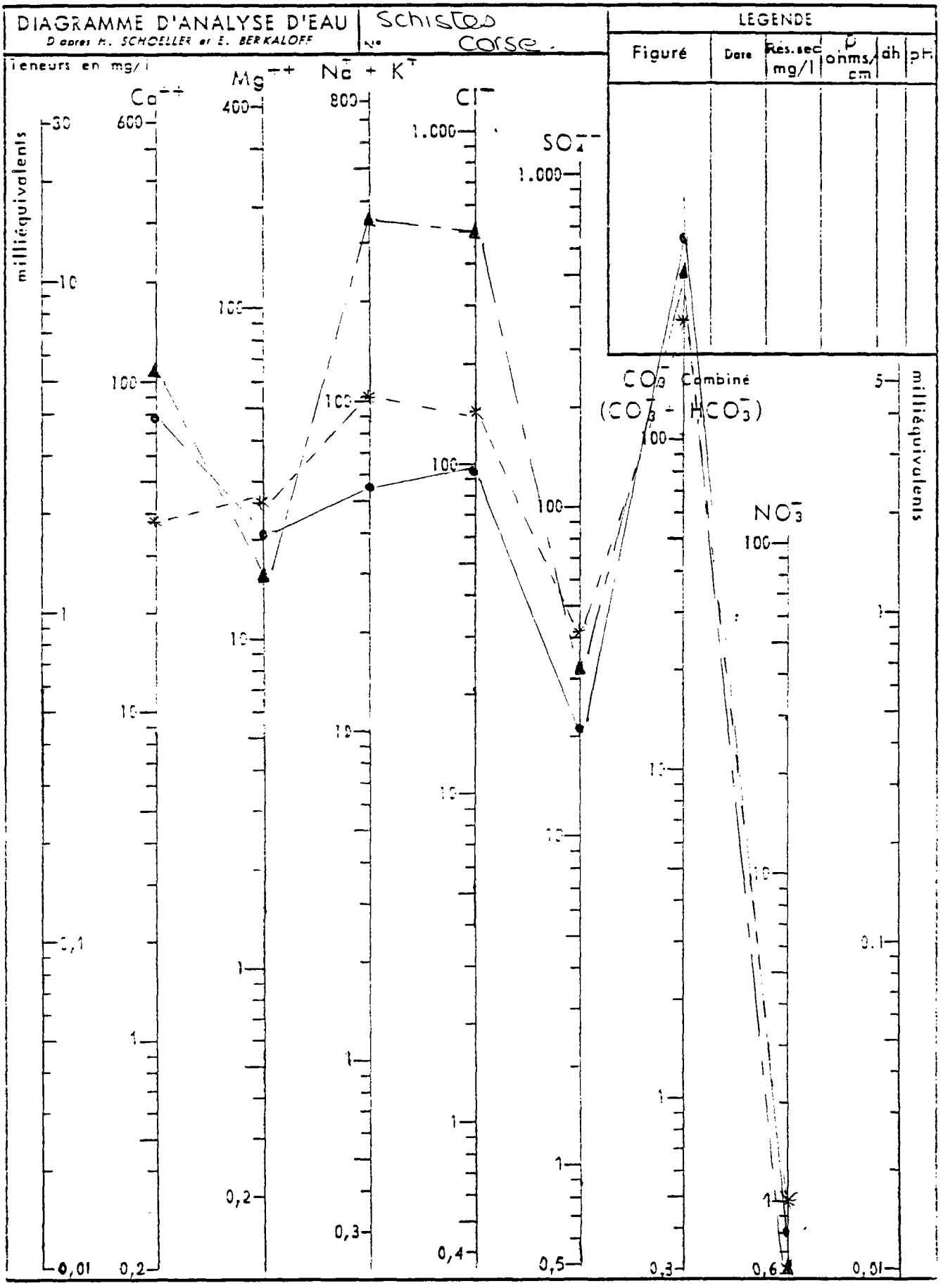


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D après H. SCHOELLER et E. BERKALOFF
Schistes
N° Corse.
Teneurs en mg/l
LEGENDE
Figuré
Date
Res. sec mg/l
ρ ohms/cm
dh
pH
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3H− Combiné
(CO3−− + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents

Quelques rapports caractéristiques :

Mg/Ca < 1 Na/K > 25 rNa+rK/rCa > 0,5

L'indice d'échange de bases, est, ici, proche de zéro (comme l'eau de pluie étudiée).

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.

- pH = entre 6,7 et 8,7, avec une moyenne proche de 7,5.
- agressivité : --

4. ELEMENTS TRACES. --

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE. Inconnue

6. QUALITE. Bonne, mais une pollution par la surface est toujours possible.

2.2.3.3. Conclusions sur les eaux du milieu méditerranéen

Schistes et granites présentent pratiquement le même type d'eau. La tendance chlorurée sodique leur est commune. Du fait qu'il n'y a que peu d'altérites qui surmontent la roche saine, l'eau garde la presque totalité du chimisme initial des eaux météoriques. Dans la plupart des cas, il n'y a pas d'acquisition de minéralisation au cours du trajet qui est très rapide. La contribution ionique de l'eau de pluie (aérosols marins) y est très importante.

L'altération de type bisiallitique y est rendue possible par les précipitations hivernales. Les premiers minéraux hydrolysés sont les plagioclases qui vont libérer les ions bicarbonatés. La plus grande partie de ces ions proviennent de ces feldspaths (travaux de SARRAZIN-FOUILLAC-MICHARD, 1976). Associée aux ions HCO_3, la silice est libérée au cours de ces hydrolyses. Les concentrations en silice dans ces eaux peuvent être fortes.

On peut toujours se servir du rapport SiO_2/bases pour caractériser le climat. Il est inférieur à 1 pour les roches granitiques, à 0,5 pour les roches basiques (TARDY Y., 1969).

2.2.4. *Les eaux sous climat aride* (Arabie Saoudite)

2.2.4.1. *Les eaux des granites*

1. MINERALISATION. Très variable suivant la situation géographique. Le résidu sec varie entre 400 et 4600 mg/L. Dans certains cas, il peut atteindre 13000 mg/l.

   Les ions les plus concentrés sont : Na^+, K^+, Cl^-, HCO_3^-, $SO_4^=$.

2. FACIES HYDROCHIMIQUES. Qaund les eaux sont peu à moyennement minéralisées, elles sont bicarbonatées sodiques. Quand elles sont très minéralisées, elles sont chlorurées sodiques (figure n° 25).
   Quelques rapports caractéristiques :
   $Na/K > 20$ - $Mg/Ca < 1$ - $SO_4^= + Cl > HCO_3$ - $rSO_4/rCl < 0,7$
   L'indice d'échange de bases est négatif.

3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.
   - pH = entre 7,8 et 8,3
   - agressivité : eaux non agressives.

4. ELEMENTS TRACES.

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE. Entre 26° et 30° suivant les régions.

6. QUALITE. Bonne à saumâtre. Dans tous les cas, des concentrations assez fortes en fer sont présentes.

2.2.4.2. *Les eaux des roches cristallines basiques*

1. MINERALISATION. Très variable. Le résidu sec s'étale entre 500 et 8100 mg/l selon la situation. Les ions prédominants sont : Na^+, Cl^- et Al, Fe, SiO_2 .

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Varie suivant la minéralisation. Les eaux les moins minéralisées sont bicarbonatées sodiques. Les eaux les plus minéralisées sont chlorurées sodiques. Localement, on rencontre des eaux sulfatées sodiques et magnésiennes (figure n° 26).

FIGURE n° 25

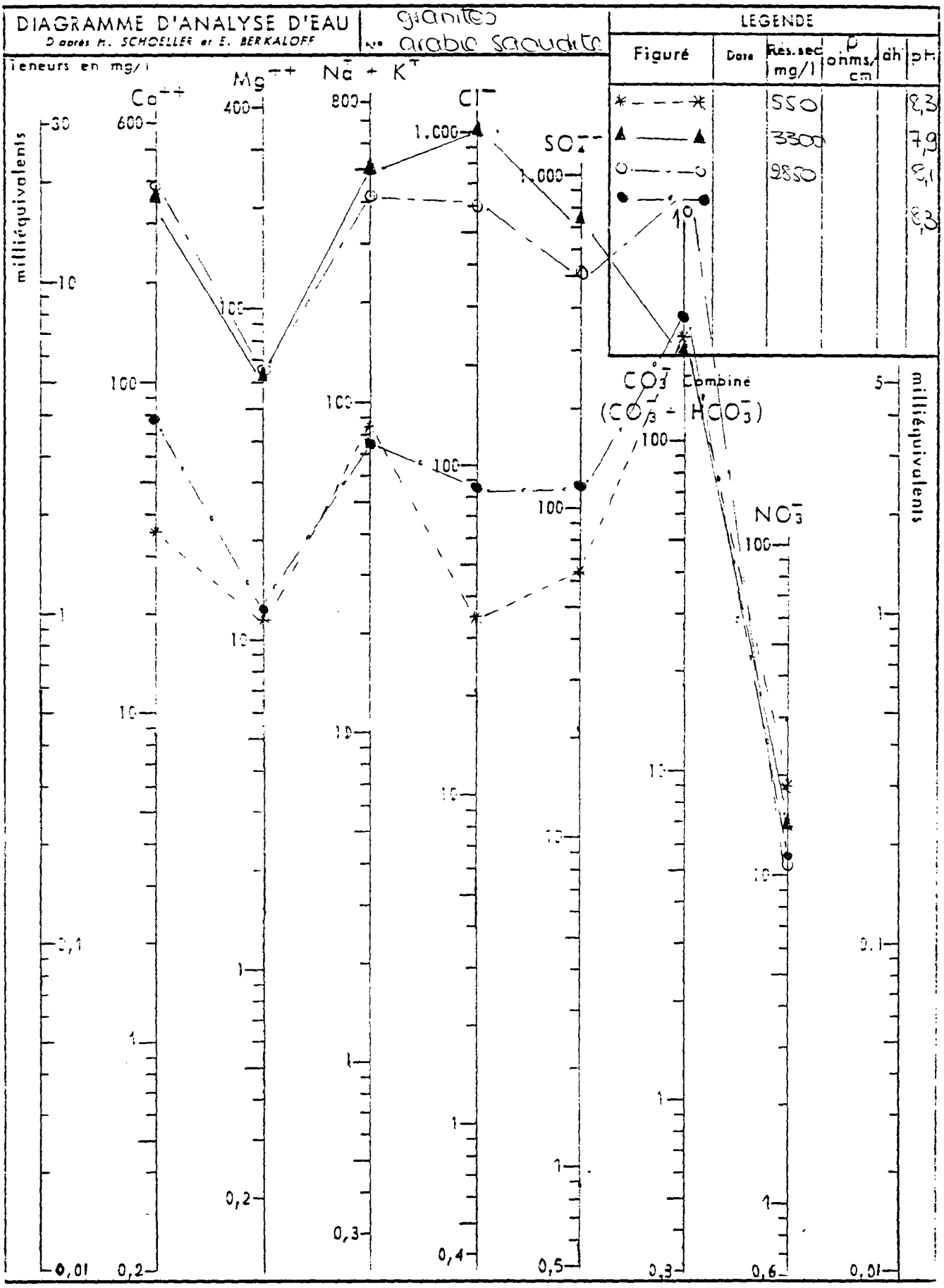


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D'après M. SCHOELLER et E. BERKALOFF
granites
arabie saoudite
LEGENDE
Figuré
Date
Res. sec mg/l
ρ ohms/cm
dh
pH
SSO
3300
9850
8,3
7,9
8,1
8,3
Teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3− Combiné
(CO3− + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents

FIGURE n° 26

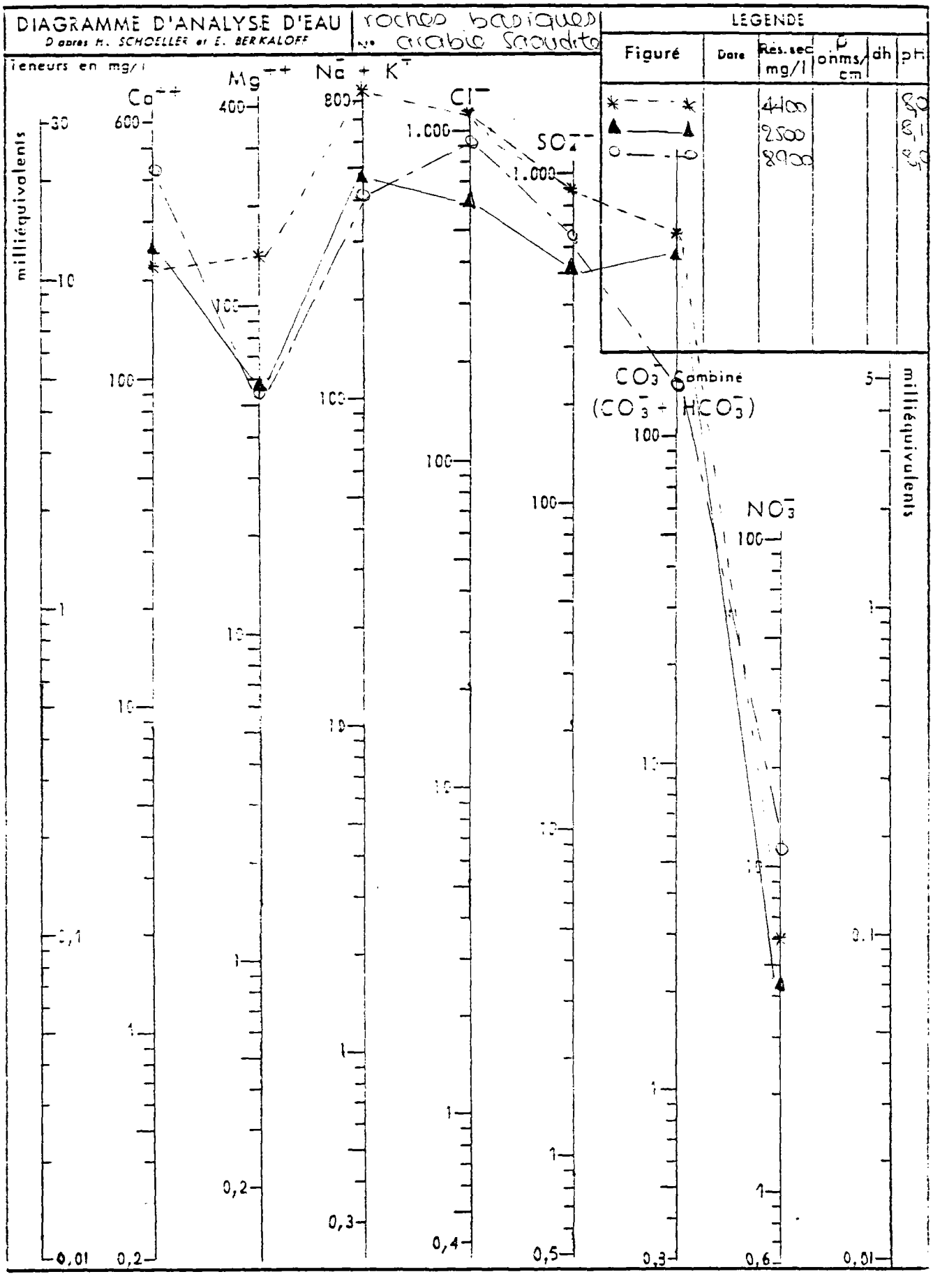


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D'après M. SCHOELLER et E. BERKALOFF
roches basiques
n° arable Saoudite
LEGENDE
Figuré
Date
Rés. sec mg/l
ρ ohms/cm
dh
pH
4400
2500
8900
Teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3 combiné
(CO3− + HCO3−)
NO3−
milliéquivalents

FIGURE n° 27

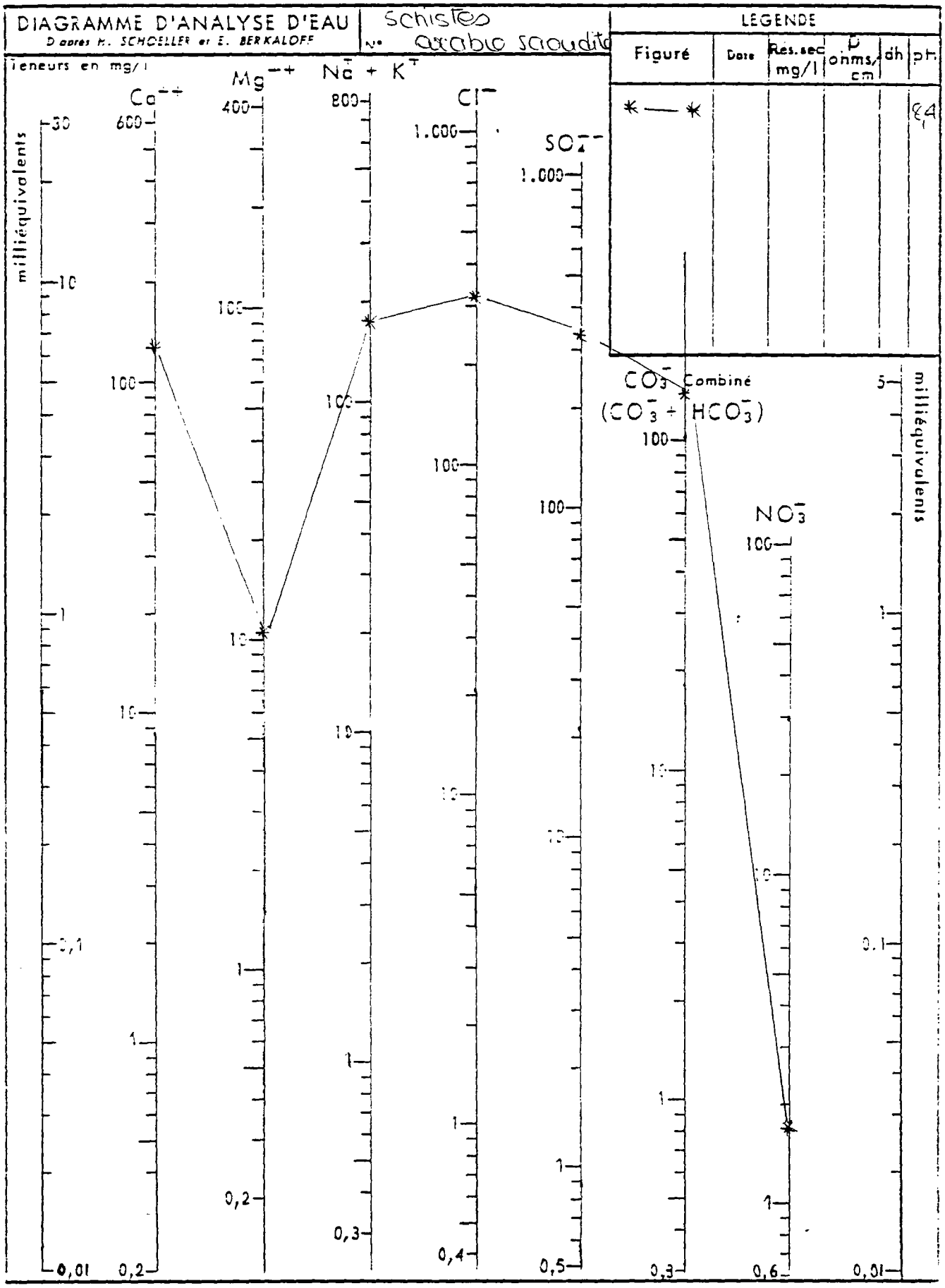


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
D'après M. SCHOELLER et E. BERKALOFF
N° schistes arabie saoudite
Teneurs en mg/l
milliéquivalents
Ca++
Mg++
Na+ + K+
Cl−
SO4−−
CO3−
Combiné
(CO3− + HCO3−)
NO3−
LEGENDE
Figuré
Date
Rés. sec mg/l
ρ ohms/cm
dh
pH
84

Quelques rapports caractéristiques : Na/autres bases > 1
Mg/Cl < 1 - Na/K = 0,5 à 10
L'indice d'échange de bases est faiblement négatif.

3. PRORPIETES ACIDOBASIQUES.
   - pH = entre 7,3 et 8,3
   - agressivité = eaux saturées voire sursaturées.

4. ELEMENTS TRACES = Tb

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE. Entre 27° et 29°C.

6. QUALITE. En général, passable

2.2.4.3. Les eaux des schistes

1. MINERALISATION. Moyenne. Le résidu sec est compris entre 1000 et 1500 mg/l. Les plus fortes concentrations correspondent à Na, Cl, SO_4.

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Il varie suivant la minéralisation : bicarbonatées calcosodiques pour les eaux les moins minéralisées, chlorurosulfatées pour les plus minéralisées (type salin) (figure n° 27).
   L"indice d'échange de bases est négatif.

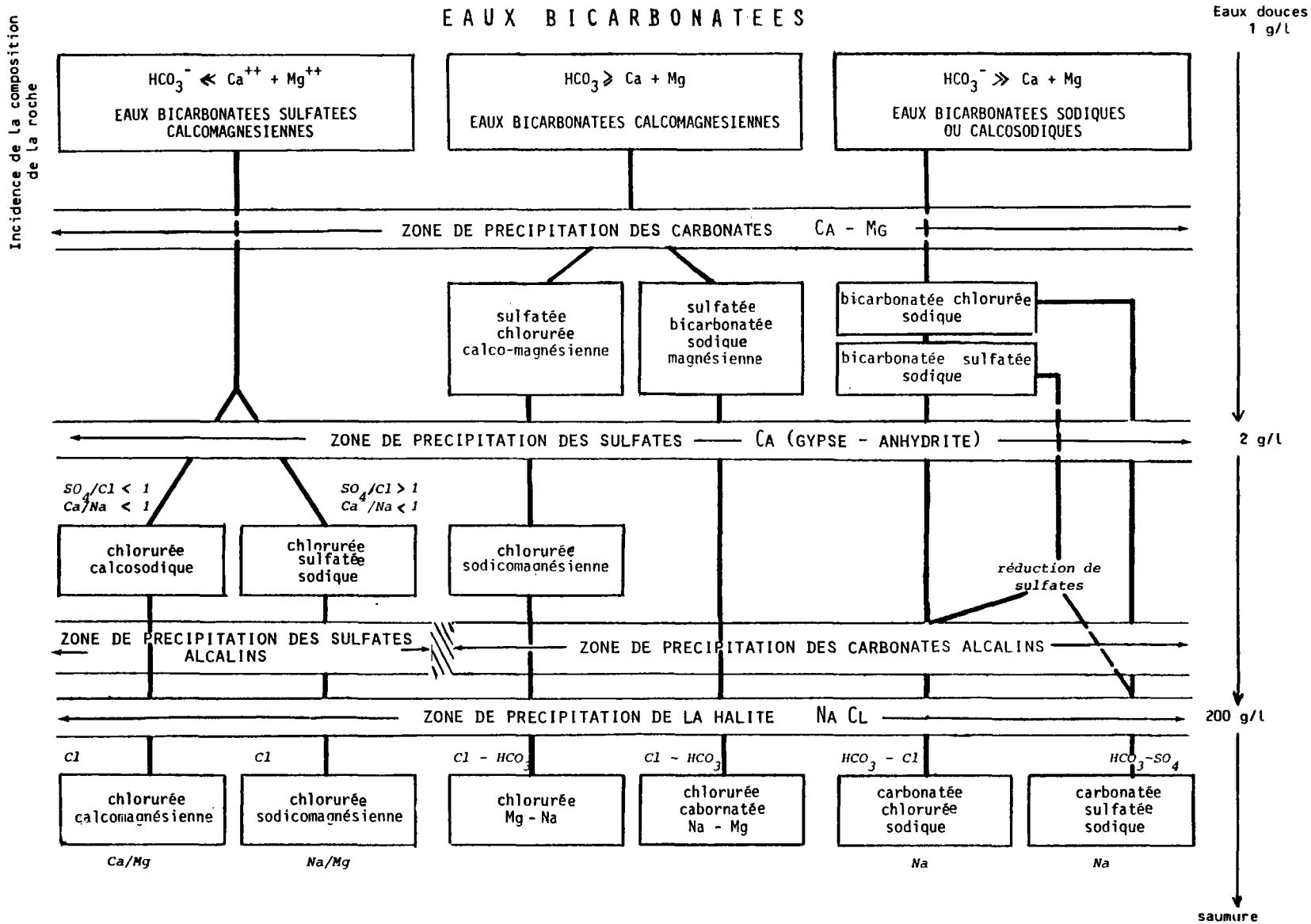
3. PROPRIETES ACIDOBASIQUES.
   - pH = en général, supérieur à 8.
   - agressivité = --

4. ELEMENTS TRACES = Mn, Zn

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE. Entre 28° et 32°C.

6. QUALITE. Dans la plupart des cas, eaux saumâtres

FIGURE n° 28


EAUX BICARBONATEES
Incidence de la composition de la roche
$HCO_3^- \ll Ca^{++} + Mg^{++}$
EAUX BICARBONATEES SULFATEES CALCOMAGNESIENNES
$HCO_3 \geqslant Ca + Mg$
EAUX BICARBONATEES CALCOMAGNESIENNES
$HCO_3^- \gg Ca + Mg$
EAUX BICARBONATEES SODIQUES OU CALCOSODIQUES
Eaux douces 1 g/l
ZONE DE PRECIPITATION DES CARBONATES Ca - Mg
sulfatée chlorurée calco-magnésienne
sulfatée bicarbonatée sodique magnésienne
bicarbonatée chlorurée sodique
bicarbonatée sulfatée sodique
ZONE DE PRECIPITATION DES SULFATES — Ca (GYPSE - ANHYDRITE)
2 g/l
$SO_4/Cl < 1$ $Ca/Na < 1$
$SO_4/Cl > 1$ $Ca/Na < 1$
chlorurée calcosodique
chlorurée sulfatée sodique
chlorurée sodicomagnésienne
réduction de sulfates
ZONE DE PRECIPITATION DES SULFATES ALCALINS
ZONE DE PRECIPITATION DES CARBONATES ALCALINS
ZONE DE PRECIPITATION DE LA HALITE Na Cl
200 g/l
Cl
Cl
Cl - HCO_3
Cl - HCO_3
HCO_3 - Cl
HCO_3-SO_4
chlorurée calcomagnésienne
chlorurée sodicomagnésienne
chlorurée Mg - Na
chlorurée cabornatée Na - Mg
carbonatée chlorurée sodique
carbonatée sulfatée sodique
Ca/Mg
Na/Mg
Na
Na
saumure
MINERALISATION CROISSANTE DES EAUX

2.2.4.4. Conclusions sur ces eaux

Il semble y avoir trois faciès hydrochimiques en milieu aride :

1. eaux bicarbonatées calcosodiques, les moins minéralisées,
2. eaux chlorurées sodiques,
3. eaux sulfatées sodiques et magnésiennes,

les deux dernières classes correspondent aux eaux les plus minéralisées.

L'acquisition de la composition chimique des eaux est contrôlée par :

1. le faciès cationique de l'eau dans le niveau d'altération (eaux toujours bicarbonatées) : les rapports entre les cations (Na, Ca, Mg) vont être déterminants pour la suite de l'altération.
2. l'ordre de précipitation des minéraux par saturation. (figure n° 28).

2.2.5. Les eaux sous climat arctique

2.2.5.1. Les eaux des granites (gneiss associés)

1. MINERALISATION. Dans la plupart des cas, elle est faible ($<$ 500 mg/l). Cependant, dans les zones où les mouvements hydrauliques sont lents, la minéralisation est forte. Il s'agit de séquelles de l'immersion de la Scandinavie avant les glaciations quaternaires (niveau marin à +90 m, 13000 avant). Suivant le taux de renouvellement de l'aquifère, la minéralisation sera plus ou moins forte.

   Les plus fortes concentrations sont celles des bases, parfois celles des sulfates (provenant essentiellement de l'atmosphère et de la dissolution de la pyrite).

2. FACIES HYDROCHIMIQUE. Les eaux sont plutôt calciques. En ce qui concerne les anions, HCO_3^{--} n'est pas analysé à chaque échantillon. Il est à noter cependant que les concentrations en sulfates sont toujours supérieures à celles des chlorures. L'indice d'échanges de base est toujours négatif.

3. PROPRIETES ACIDO-PHYSIQUES.
   . pH = inférieur à 7,5
   . agressivité = eaux agressives (pCO_2 importante et acides humiques présents).

4. ELEMENT-TRACE. Li

5. TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE de l'ordre de 2 à 3°C (soit 1 à 2° de plus que la température moyenne annuelle de l'air).

6. QUALITE. Bonne, sauf dans les zones à mouvements hydrauliques lents.

2.2.5.2. Conclusions sur ces eaux

L'altération de type mono à bisiallitique met en solution une quantité assez importante de silice. Mais les concentrations en SiO_2 des solutions sont faibles. Il semble donc que la Silice soit en grande partie reprise :

1er cas. Précipitation de silice amorphe si les eaux sont sursaturées en SiO_2 (ce qui est parfois le cas),

2me cas. Rétention pour former des montmorillonites calciques (phyllites à deux couches de silice). Le rapport SiO_2/bases (TARDY, 1969) est donc faible (0,7 à 1,2).

Dans les régions où les mouvements hydrauliques sont lents, les concentrations en (Cl^-) sont en général supérieures à 0,15 méq/l. Ceci est la trace d'eaux salées anciennes ayant envahi l'aquifère.

Mais les concentrations en calcium sont plus fortes que celles de l'eau de mer. Ceci est sans doute dû à des échanges d'ions (cations K, Na, Mg, Ca, H) sur des montmorillonites lors de la mise en équilibre entre l'eau et le niveau aquifère.

L'origine de la composition chimique des eaux scandinaves peut donc être résumée par :

1. Apport par l'atmosphère de cations (≃ de 0,3 à 1,1 méq/l).
2. Altération peu poussée,
3. Mélange avec des eaux salées antéglaciaires,
4. Processus biologiques (production de CO_2) ou chimique (échanges d'ions).

3. LES VARIATIONS SAISONNIERES ET HYDRAULIQUES

3.1. Les variations saisonnières des compositions chimiques

3.1.1. *Le milieu tropical*

On enregistre une modification de la minéralisation entre les deux saisons.

En saison sèche, il se produit une augmentation de la minéralisation qui peut être attribuée à l'incidence de l'évaporation. Les ions suivent des évolutions différentes : Na, Ca, SiO_2 se concentrent préférentiellement au Mg. L'ordre de mobilité est légèrement changé :

Na > Ca > K > Sr > Cu > Mg > Ti > Si > AL > Mn > Fe

Certains rapports en sont affectés : par exemple Na/K croit en période sèche, ainsi que Si/Ca. On assiste à une légère augmentation du pH.

Par contre, en saison humide, les mêmes rapports diminuent. D'autres rapports montrent alors des variations sensibles : Na/Ca croit ainsi que SiO_2/bases.

Tout ceci est modulé en fonction de certains paramètres tels que la localisation dans le profil, la profondeur du substratum sain sous le niveau piézométrique...

3.1.2. *Le milieu tempéré océanique*

On parlera ici de saisons froides et pluvieuses par rapport aux saisons chaudes et moins pluvieuses.

En période froide, certains rapports varient : rMg/rCa et rNa/rCa décroissent avec la température pour les eaux des schistes. C'est l'inverse qui se produit pour les eaux des granites (différence de vulnérabilité des minéraux primaires auxquels ces ions sont rattachés : ferromagnésiens ou leucocrates). De même rCa+rMg/rNa+rK croit dans les secteurs froids. Du fait que cette saison soit aussi pluvieuse, il y a une dilution globale de la solution, et renversement du rapport SO_4/Cl qui décroit : dû à l'apport par des eaux de pluie de chlorures (nous rappelons la situation littorale de la région étudiée).

CLIMAT	saison sèche	saison humide	généralités
TROPICAL	+ concentrations plus grandes ⇒ Na/K plus grand. + SiO_2/Ca plus grand. + pH plus fort. + ordre de mobilité: Ba-Ca-K-Sr-Cu-Mg-Ti-Si-Al-Mn-Fe.	+ plus de SiO_2. + Na/K plus petit. + SiO_2/bases plus grand. + ordre de mobilité: K-Ba-Sr-Cu-Ca-Si-Mg-Ti-Al-Mn-Fe.	+ pH augmentant légèrement des hautes eaux vers les basses eaux. + paramètres importants : distance à parcourir dans la nappe, profondeur du substratum sain sous le niveau piézométrique. + i.c.a. toujours négatif.
TEMPERE HUMIDE	+ saison chaude et basses eaux. + ph diminuant pour les schistes mais constant pour les granites. + HCO_3/anions $>$ 1 pour les schistes. + $[SO_4]$ augmentant. + rMg/rCa plus grand	+ saison froide et hautes eaux. + rCa + rMg/ rNa + rK plus grand. + $[HCO_3^-] > [SO_4]$. + rMg/rCa et rNa/rCa diminuent pour les schistes avec la température, invers pour les granites. + dilution. + rSO_4/rCl diminue avec les pluies	+ température moyenne annuelle de l'eau = température moyenne annuelle de l'air + i.c.a. toujours négatif. + température dépendant de l'altitude (-0,56° par 100 m.).

FIGURE n° 29 - Variations saisonnières des compositions chimiques des eaux

En période chaude et moins pluvieuse, la teneur en SO_4 croit et rMg/rCa croît. Par contre, le pH reste à peu près le même ou diminue légèrement.

3.2. Les variations hydrauliques

Nous ferons intervenir essentiellement les notions "d'ouverture" ou de "fermeture" de la nappe en distinguant les milieux drainants des confinés.

3.2.1. *Le climat tropical*

En milieu drainant, le rapport Na/K est faible. De l'amont vers l'aval, la teneur en SO_4 diminue : le rapport SO_4/Cl suit cette tendance, alors que Mg/Ca croît. De même le pH croît de l'amont vers l'aval.

Il y a échelonnement des ions de l'aval vers l'amont. En milieu confiné, Na/K est fort et il y a concentrations en éléments mobiles (Na, SiO_2, K...).

Il existe une relation directe entre :

- certaines teneurs telles que HCO_3, SiO_2, Na, K, Mg, Rb, Li, Ba, Sr, qui croissent alors que les teneurs en Al, Fe, Mn décroissent,
- et l'épaississement du profil.

De plus, le faciès hydrochimique aura tendance à évoluer suivant un développement connu :

$HCO_3^- \longrightarrow HCO_3^-$, $SO_4^= \longrightarrow SO_4^= \longrightarrow SO_4^=$, $Cl^- \longrightarrow Cl^-$, $SO_4^= \longrightarrow Cl^-$

3.2.2. *Le climat aride*

En milieu drainant, Na/K varie entre 0,5 et 7 (comme dans des nappes superficielles), alors qu'en milieu confiné, ce rapport est supérieur à 7. L'ordre d'évolution du faciès hydrochimique est le même que précédemment.

3.2.3. *Le climat tempéré océanique*

En milieu confiné, il y a augmentation des concentrations de toutes les bases (éléments les plus mobiles).

CLIMAT	Milieu drainant	Milieu confinant	Généralités
TROPICAL	+ Na/K faible. + prédominance de Al, Fe à l'amont et des cations basiques à l'aval. + SO_4/Cl diminue vers l'aval. + Mg/Ca augmente vers l'aval.	+ Na/K fort. + augmentation des concentrations en éléments trés mobiles (Na, SiO_2).	+ Ordre de mobilité: HCO_3-SiO_2-Na-K-Mg--Rb-Li-Ba-Sr-Al-Fe-Mn. + quand la solution se concentre, tendance au passage: HCO_3 -- HCO_3, SO_4 -- SO_4 -- SO_4,Cl -- Cl, SO_4 -- Cl. + pH augmentant légérement de l'amont piézométrique vers l'aval.
ARIDE	+ Na/K plus grand qu'en milieu tropical: compris entre 0,5 et 7 (comme les nappes superficielles).	+ Na/K 7.	
TEMPERE OCEANIQUE		+ augmentation des concentrations de toutes les bases.	

FIGURE n° 30 - Variations saisonnières des compositions chimiques des eaux

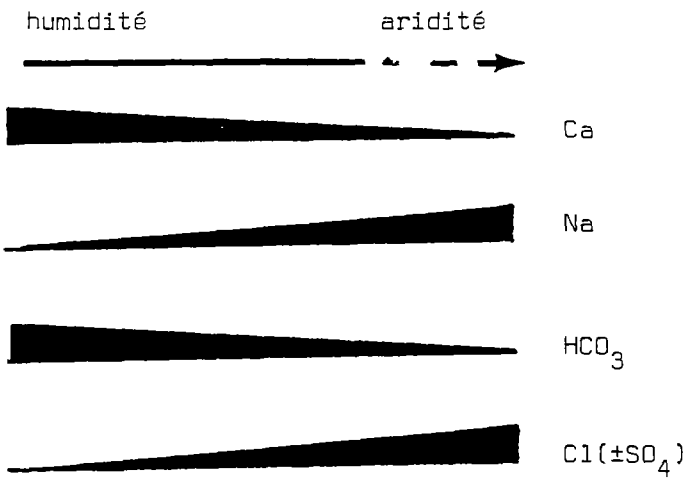
SYNTHESE

Cette étude a permis d'établir que le faciès hydrochimique des eaux rencontrées dans les roches fissurées de socle est fonction directe du type d'altération climatique subie par les matériaux : exportation des ions par voie aqueuse, et variété des argiles néoformées. Pour des conditions climatiques voisines, quelle que soit la roche encaissante originelle, les faciès hydrochimiques convergent vers un même type dominant (voir tableau 1).

Quel que soit le climat, la tendance bicarbonatée des eaux souterraines est commune à toutes les eaux. Ceci est dû au fait que ce sont toujours les plagioclases qui sont hydrolysés en premier, étant les plus vulnérables. 60 % des ions HCO_3 sont associés aux ions libérés lors de cette altération (peu représentés dans les eaux de pluie), les autres 20 % proviennent des autres feldspaths.

En étudiant les faciès, du climat tempéré (Nord) vers le milieu tropical humide (Sud), on remarque une évolution des compositions relatives :

- des cations, avec départ progressif du Ca (saturation en $CaCO_3$) au profit du Na,



- des anions : la prédominance des HCO_3 décroît au profit des ions Cl^- ($\pm$ $SO_4^=$).

CLIMATS	roches cristallines acides	roches cristallines basiques	roches métamorphiques
Tropical Humide	eaux bicarbonatées calciques à mixtes.	eaux bicarbonatées calciques à mixtes.	eaux bicarbonatées calciques à mixtes.
Tempéré Océanique	eaux bicarbonatées-chlorurées calcosodiques.	eaux calcosodiques.	eaux bicarbonatées-chlorurées calcosodiques.
Méditerranéen	eaux bicarbonatées chlorurées sodiques.	-	eaux bicarbonatées-chlorurées sodiques.
Aride	eaux bicarbonatées sodiques pour les moins minéralisées, sinon chlorurées sodiques.	eaux bicarbonatées sodiques pour les moins minéralisées sinon chlorurées sodiques.	eaux bicarbonatées sodiques pour les moins minéralisées, sinon chlorurées sodiques.

Cette tendance évolutive reflète le comportement géochimique des ions intéressés et de leurs sols.

De même le rapport SiO_2/bases est caractéristique du type d'altération : les travaux de TARDY (1969) le montrent pour les roches cristallines acides et basiques (cf figure 30).

Il semblerait, comme nous l'avons vu, que les schistes suivent aussi ce schéma, avec néanmoins des rapports plus faibles que ceux des roches cristallines.

Les rapports R_E et R_F (TARDY, 1969), semblent aussi être caractéristiques (cf figure 31).

La nature lithologique de l'encaissant n'intervient qu'au second degré, en faisant varier quelques teneurs en ions tels que K, Na, Mg, So_4 (cf chapitre II - Eaux des régions tropicales). Ceci n'est valable que pour des régions où l'influence marine ne se fait pas sentir (apports de ces mêmes ions par les embruns marins). Ainsi, sous climats tempéré océanique et méditerranéen (Bretagne, Corse), une différenciation des eaux issues des trois types de roches, par ces différences de concentrations est impossible à réaliser. Une étude des éléments mineurs et traces s'avérerait plus favorable pour l'établissement d'une discrimination. Quant au milieu aride, l'apport par les roches aquifères est masqué par le phénomène de concentration des solutions par évaporation.

Pour la troisième zonalité (verticale) étudiée par les anciens auteurs, il n'a pas été possible de vérifier leur hypothèse sur des exemples concrêts : une seule analyse par puits est effectuée. Comme le milieu fissuré est un aquifère discontinu, une comparaison entre analyses de profondeur différente (provenant de puits différents) ne permet plus une exploitation directe des données.

En résumé, il semble donc que le climat (en particulier, les températures et les précipitations) joue le rôle principal dans l'acquisition de la minéralisation des solutions. Si le facteur température est favorable à la libération des ions, il n'est efficace que lorsqu'il est accompagné d'une relative humidité, si bien que son influence en tant que facteur intrinsèque est difficile à quantifier.

FIGURE n°31 : variations du rapport SiO_2/ bases dans les eaux des granites et des roches basiques.

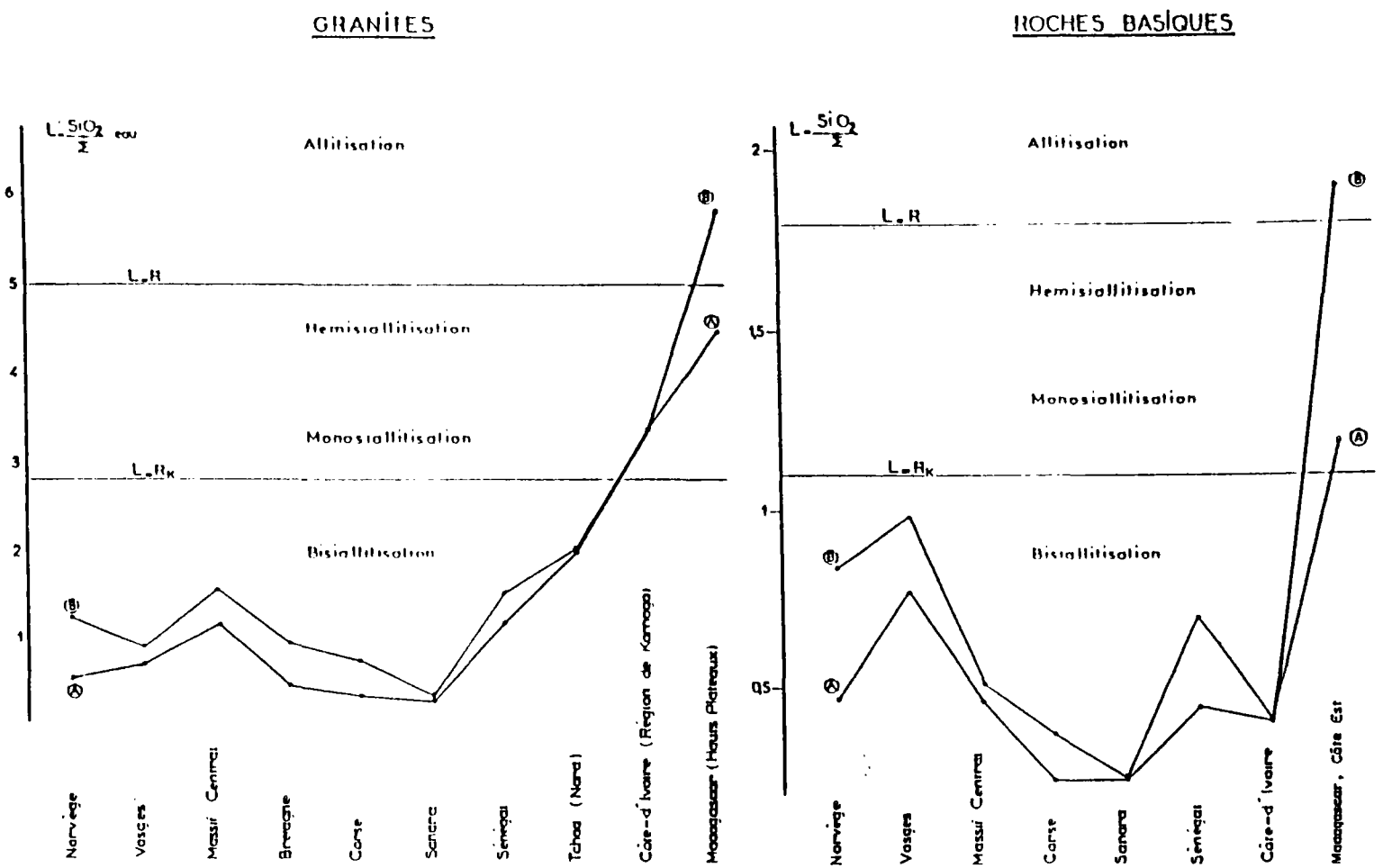
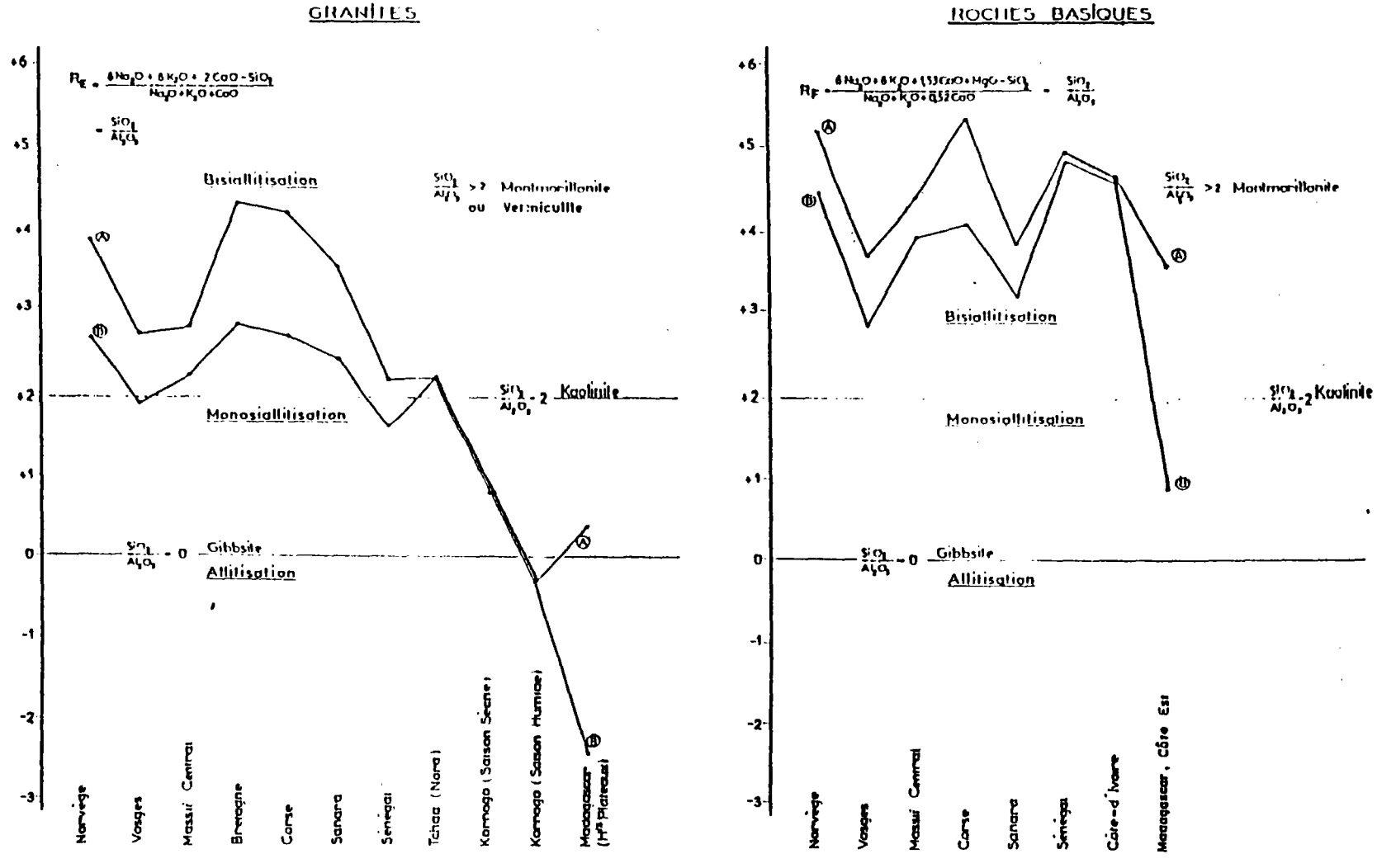


FIGURE n° 32: variations des rapports R_g et R_f dans les eaux des granites et des roches basiques.



Sachant que la multiplicité des facteurs entrant en jeu dans l'établissement de la température dans la zone homothermique (zone dans laquelle nous nous sommes vraisemblablement placés) :

1) température des eaux entrantes ;
2) distance entre la zone d'alimentation et la zone de mesure;
3) taux de renouvellement des solutions ;
4) gradient thermique de la région considérée ;
5) conductivité thermique des roches ;

il est surprenant de constater que les températures des eaux analysées sont voisines des températures moyennes annuelles. Nous nous trouvons dans un régime d'orthothermie ($T°eau \simeq T°air$)

S'agit-il d'une réelle relation ? Trop d'incertitudes et d'imprécisions liées à cette mesure (absence de mesures périodiques sur une même eau, ou sur un même profil, ou suivant une ligne de flux, etc...) ne permettent de donner une réponse satisfaisante à cette question.

Les variations saisonnières existantes semblent montrer que le faciès hydrochimique ne variera pas, mais que la composition globale changera.

La composition chimique, de part sa rapidité d'ajustement (les réactions d'hydrolyse et de mise en solution constituent des systèmes rapides) constitue un outil d'information intéressant.

EAUX de ces CLIMATS	GENERALITES
TROPICAL	+ la nappe est souvent stratifiée. + les concentrations en Al et Fe sont faibles dans la plupart des cas. + La concentration en Cl^- des eaux des granites est très supérieure à celle des eaux des basaltes. + " " " Mg^{++} " " " " " " inférieure " " " " " " . + " " " HCO_3^- " " " " " " " " " " " " " " . + ce sont en général des eaux bicarbonatées calciques à mixtes (Na, Ca, Mg). + l'indice d'échanges de bases est toujours négatif. + la silice est toujours très abondante. + quelques rapports intéressants : SiO_2/bases (altération climatique), Na/K (drainage), SO_4/Cl (drainage et alimentation). + les eaux sont dans la plupart des cas peu minéralisées et agressives. + La température moyenne annuelle de l'aquifère se situe entre 24° et 30°c.
ARIDE	+ les eaux très minéralisées sont toujours chlorurées sodiques. + les eaux moyennement minéralisées sont en général bicarbonatées calcosodiques. + les eaux mixtes sont peu minéralisées. + La température moyenne annuelle de l'aquifère varie entre 26° et 32°c. + les concentrations en Al et Fe sont très fortes. + toutes les concentrations sont très importantes mais elles sont inférieures à celles des chlorures. + l'indice d'échange de bases est toujours négatif. + seules les eaux des schistes sont saumâtres. + la concentration en Mg est toujours importante. + quand les eaux se concentrent, il y a tendance au passage: HCO_3 --> SO_4 --> Cl et Ca --> Mg --> Na. + le rapport SO_4/Cl est plus faible que partout ailleurs.
TEMPERE OCEANIQUE	+ la température moyenne annuelle de la solution se situe entre 9° et 14°c. + l'indice d'échange de bases est toujours négatif. + les eaux sont acides et agressives. + ce sont des eaux de type bicarbonaté calcique - chloruré sodique, quelque soit la roche mère. + la dureté totale est toujours très faible : moins de 10°F. + Le fer est toujours en concentration relativement forte, associé au manganèse. + le pH est toujours inférieur à 7,5, quelque soit le type de roche. + les différents apports peuvent être définis: par la pluie, Na et Cl, par les sols, NO_3, Ca et Mg, par les arènes, Na, SiO_2 et HCO_3. + Cas du massif d'AURIAT (Creuse): eaux très différentes de celles du massif armoricain: ce sont des eaux chlorurées sodiques (temps de transfert différent, réseau poreux différent....).

FICHE N° : 1

CLIMAT: TROPICAL HUMIDE.

ROCHE - MERE: Roches cristallines acides : granites.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ élluvions: argiles riches en matières humiques, quelques sables.

++ argiles sqbleuses souvent latéritisées: argiles kaoliniques.

++ argiles sableuses micacées gorgées d'eau:" zone des kaolins".

++ sables feldspathiques micacés peu argileux, destruction de la structure du granite et individualisation des grains.
++ granites altérés: uniquement perte de la cohésion et faibles néogénéses: montmorillonite et gibbsite.
++ granites sains.

+ argiles formées: surtout kaolinites.

+ soutirage global: important.

+ soutirage(s) le(s) important(s): alcalins et alcalinoterreux, fer et titane.

+ ordre de départ: K - Ba - Na - Ca - Mg > Mn-SiO_2.

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération: importante, entre 4 et 15 mm par 1000 ans.

+ évolution(s) : latérale, et aux verticale.

EAUX:

+ pH: entre 5,5 et 6,9.

+ résistivités: fortes par rapport aux eaux des roches sédimentaires, cependant moyennes pour ce type d'eau.

+ concentration totale: moyenne - résidu sec: inférieur à 3000 mg/l.

+ plus fortes concentrations: Na, K, SiO_2, Ca

+ ion prédominant: Ca, Na, HCO_3.

+ éléments les plus mobiles: ordre décroissant : Co, Mo, Mg, Cr, Cu, Ti, Li, Ca, V, Mn, Al, Fe, Ni.

+ température de l'eau: 24° à 30°.

+ type d'eau: bicarbonaté calcique à mixte (Na, Ca, Mg).

+ rapports caractéristiques: $(SiO_2/bases)_{eau} > (SiO_2/bases)_{roche}$. - $SiO_2/bases < 1$ -

- - - -

+ Indice d'échanges de bases: toujours négatif mais plus fort qu'en zone aride.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: HCO_3, Ti.

+ particularités de la nappe: nappe souvent stratifiée, gradient de concentration.

+ qualité de l'eau: bonne.

+ pollutions possibles: éventuelles.

+ variations saisonnières: ++ saison humide: SiO_2 plus abondante, K/Na plus grand, Na/Ca plus grand.

++ saison sèche: concentration des solutions, pH plus fort, SiO_2/Ca plus grand.

++ saison chaude: SiO_2/bases augmentant avec la température.

++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:

++ milieu drainant: Na/K faible, prédominance de Al à l'amont et des cations basiques à l'aval, SO_4 décroit vers l'aval et Mg/Ca croit.
++ milieu confiné: concentration en éléments mobiles (Na, SiO_2).

FICHE N° : 2

CLIMAT: TROPICAL HUMIDE.

ROCHE - MERE: Roches cristallines basiques.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ colluvions argilosableuses.

++ accumulation absolue de fer et d'alumine (goethite et gibbsite).

++ accumulation absolue de silice monomère: formation de kaolinite. Réseaux de diaclases conservés mais destruction de l'architecture de la roche mère.
++ niveau d'altération de la roche mère: structure conservée, transformation en smectites.
++ soubassement de roches saines.

++

+ argiles formées: goethite, gibbsite, kaolinite (prédominante), montmorillonite (locale), smectite (basse température et base des profils).
+ soutirage global: trés important, encore plus grand que pour les granites.

+ soutirage(s) le(s) important(s): alcalins et alcalinoterreux.

+ ordre de départ: Ca - Na - Mg - K - Si - Ti - Fe - Mn - Al.

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération:

+ évolution(s) : latérale, et/ou verticale.

EAUX:

+ pH: supérieur à 7.

+ résistivités: plus petites que pour les granites : autour de 3000 ohm. cm.

+ concentration totale: plus importantes. - résidu sec:

+ plus fortes concentrations: Ca - Mg - Fe - HCO_3.

+ ion prédominant: Ca, HCO_3.

+ éléments les plus mobiles: K, Ba, Na, Si, Sr.

+ température de l'eau: 24° à 30°.

+ type d'eau: bicarbonaté calcique à mixte (Na, Ca, Mg).

+ rapports caractéristiques: $K = f(K_r)$ - $(SiO_2/bases)_{eau}$ $(SiO_2/bases)_{roche}$ -

- - - -

+ Indice d'échanges de bases: négatif, mais plus faible que pour les granites.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques:

+ particularités de la nappe: nappe souvent stratifiée.

+ qualité de l'eau: bonne.

+ pollutions possibles:

+ variations saisonnières: ++ saison humide: K/Na plus grand.

++ saison sèche: pH plus grand.

++ saison chaude:

++ saison froide: SiO_2/bases n'augmente pas avec la température.

+ variations dues aux conditions hydrauliques:

++ milieu drainant: concentration en éléments les plus mobiles.

++ milieu confiné:

FICHE N° : 3

CLIMAT: TROPICAL HUMIDE.

ROCHE - MERE: Roches métamorphiques: les schistes.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ niveaux argileux plus ou moins épais: argiles kaoliniques.
++ substratum sain.
++
++
++
++

+ argiles formées: essentiellement, kaolinite.

+ soutirage global:

+ soutirage(s) le(s) important(s):

+ ordre de départ:

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération: relativement faible (faible perméabilité).

+ évolution(s) : latérale, et/ou verticale.

EAUX:

+ pH: faiblement acide à alcalin.

+ résistivités: faibles.

+ concentration totale: forte - résidu sec: supérieur à 500 mg/l.

+ plus fortes concentrations: SO_4, Cl, Na.

+ ion prédominant:

+ éléments les plus mobiles:

+ température de l'eau: 24° à 30°.

+ type d'eau: sulfaté-chloruré sodique.

+ rapports caractéristiques: - - -
- - - -

+ Indice d'échanges de bases: trés négatif.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: moitié moins de silice que dans les granites.

+ particularités de la nappe: nappe pouvant être stratifiée.

+ qualité de l'eau: passable à mauvaise à cause de la forte minéralisation.

+ pollutions possibles:

+ variations saisonnières: ++ saison humide:
++ saison sèche: pH plus fort.
++ saison chaude:
++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:
++ milieu drainant:
++ milieu confiné:

FICHE N° : 4

CLIMAT: TEMPERE HUMIDE (cas de la BRETAGNE).

ROCHE - MERE: Granites.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ horizons supérieurs remaniés: colluvions surmontées d'un sol brun acide.

++ niveau arénisé blanchi: structure de la roche modifiée, altération poussée, changement du cortège argileux: kaolinite et oxydes.
++ niveau arénisé rouge: perte de la cohésion mais structure conservée.

++ granite altéré, diaclases fréquentes, altération de tous les minéraux sauf des muscovites.
++ roche saine ou peu altérée (cristaux patinés, début de chloritisation).

++

+ argiles formées: montmorillonite, illite, vermiculite, interstratifiés formant le cortège de la kaolinite qui peut aussi être seule.
+ soutirage global: inférieur à 50%.

+ soutirage(s) le(s) important(s): alcalins, SiO_2, K.

+ ordre de départ: Ca - Na - K - Ba - Mg - Mn - Fe - Al, SiO_2 ayant la même mobilité que K.

+ ~~allitisation~~ - monosiallitisation - bisiallitisation. bisiallitisation dominante, monosiallitisation ménagée.

+ vitesse d'altération: 0,9 à 4 mm par 1000 ans.

+ évolution(s) : latérale, et ~~verticale~~ verticale.

EAUX:

+ pH: entre 6 et 7,5, avec une moyenne vers 6,5.

+ résistivités: moyennes à fortes.

+ concentration totale: faibles. - résidu sec:

+ plus fortes concentrations: HCO_3, Na, Ca , Cl;

+ ion prédominant: HCO_3, Na, Ca, Cl.

+ éléments les plus mobiles: Na - Ca - SiO_2 - Mg - K - Fe - Mn - Al (ordre décroissant).

+ température de l'eau: 10° à 14°.

+ type d'eau: bicarbonaté-chloruré calcosodique.

+ rapports caractéristiques: Na/K moyen (entre 7 et 12) - SiO_2/bases < 2. -

- - - -

+ Indice d'échanges de bases: toujours négatif.

+ eaux : agressives, ~~non agressives~~.

+ éléments caractéristiques: fortes teneurs en HCO_3 et en SiO_2.

+ particularités de la nappe: dureté totale faible (moins de 10°F), souvent fortes concentrations en fer.

+ qualité de l'eau: bonne s'il n'y a pas de trop fortes concentrations en fer, manganèse et nitrates.

+ pollutions possibles: par la surface: apports de Mg, SO_4 et surtout de nitrates.

+ variations saisonnières: ++ saison humide: dilution, baisse du rapport SO_4/Cl.

++ saison sèche: Mg/Ca plus grand.

++ saison chaude: concentration en SO_4 croissante.

++ saison froide: Mg/Ca augmentant, rCa + rMg / rNa + rK augmentant.

+ variations dues aux conditions hydrauliques:

++ milieu drainant:

++ milieu confiné: concentrations de toutes les bases augmentant.

FICHE N° : 5

CLIMAT: TEMPERE HUMIDE.

ROCHE - MERE: roches cristallines basiques.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ mélange de matières organiques, d'argiles et d'arénes.

++ arénes brunes entourées par de l'argile: montmorillonite.

++ arénes avec de l'argile: mélange d'illite et de kaolinite. riches en amphiboles noires.

++ roche altérée en boules.

++ roche saine.

++

+ argiles formées: montmorillonite, kaolinite, illite et parfois chlorite.

+ soutirage global: proche de 50% (de la roche originelle).

+ soutirage(s) le(s) important(s): alcalins.

+ ordre de départ: Fe - Na - Ca - K - Mg - SiO_2 - Al - Ti.

+ ~~xallitisation - x monosiallitisation~~ - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération: plus importante que pour les granites de cette même zone.

+ évolution(s) : latérale, et ~~xou~~ verticale.

EAUX:

+ pH: entre 6,1 et 7.

+ résistivités: moyennes.

+ concentration totale: - résidu sec:

+ plus fortes concentrations: Na,Ca.

+ ion prédominant: Na, Ca.

+ éléments les plus mobiles: Na - K - Ca - Mg - SiO_2 - Fe - Mn - Al - Ti.

+ température de l'eau: 9° à 14°.

+ type d'eau: eaux en général calcosodiques.

+ rapports caractéristiques: $(SiO_2/bases)_{eau} \leqslant (SiO_2/bases)_{roche}$ - $SiO_2/bases \leqslant 2$ -

- - - -

+ Indice d'échanges de bases: toujours négatif.

+ eaux : agressives, ~~non agressives~~.

+ éléments caractéristiques:

+ particularités de la nappe:

+ qualité de l'eau: en général, bonne.

+ pollutions possibles: par la surface.

+ variations saisonnières: ++ saison humide: dilution.

++ saison sèche:

++ saison chaude:

++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:

++ milieu drainant: concentration en éléments mobiles.

++ milieu confiné:

FICHE N° : 6

CLIMAT: TEMPERE HUMIDE.

ROCHE - MERE: schistes.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ sol brun acide à structure feuilletée.

++ niveau argileux à kaolinite prédominante.

++ niveau argileux à kaolinite + mica + chlorite.

++ niveau argileux à mica et chlorite prédominants, kaolinite déjà existante.

++ roche mère altérée mais schistosité encore visible, nombreuses diaclases.

++ roche saine.

+ argiles formées: chlorite et illite , et surtout kaolinite qui prend de l'importance en montant dans le profil.

+ soutirage global: plus important que pour les granites.

+ soutirage(s) le(s) important(s): alcalins.

+ ordre de départ: Al - Ti - SiO_2 - Mg - Fe_2O_3 - Na - FeO - Ca (ordre croissant).

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération:

+ évolution(s) : latérale, et ou verticale.

EAUX:

+ pH: acide (6,0) à alcalin (7,6).

+ résistivités: fortes, supérieures à 3000 cm.

+ concentration totale: faibles. - résidu sec:

+ plus fortes concentrations: Na, HCO_3, Mg, Ca.

+ ion prédominant: Na, Ca, HCO_3 , Cl.

+ éléments les plus mobiles: Na - Ca - Mg - Fe - K.

+ température de l'eau: 9 à 14°.

+ type d'eau: bicarbonaté-chloruré calcosodique.

+ rapports caractéristiques: Na/K moyen - Mg/Ca entre 0,2 et 1. -

- - - -

+ Indice d'échanges de bases: toujours négatif.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: plus de chlorures et de fer que dans les granites.

+ particularités de la nappe: dureté totale trés faible.

+ qualité de l'eau: bonne s'il n'y a pas trop de fer.

+ pollutions possibles: par la surface.

+ variations saisonnières: ++ saison humide: dilution.

++ saison sèche: Mg/Ca plus grand.

++ saison chaude: pH diminuant, HCO_3/somme des autres anion >1.

++ saison froide: Mg/Ca plus petit.

+ variations dues aux conditions hydrauliques:

++ milieu drainant:

++ milieu confiné:

FICHE N° : 6 b.

CLIMAT: tempéré humide.(BRETAGNE).

ROCHE - MERE: gneiss.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ gneiss altéré avec beaucoup de quartz et de micas.

++ gneiss plus grumeleux, avec présence de quartz millimètrique, d'éléments oxydés et de pyrite.

++ gneiss trés fracturé.

++ gneiss sain.

++

++

+ argiles formées:

+ soutirage global:

+ soutirage(s) le(s) important(s):

+ ordre de départ:

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération:

+ évolution(s) : latérale, et ou verticale.

EAUX:

+ pH: entre 6.8 et 7.5

+ résistivités: entre 1000 et 5000 ohm cm.

+ concentration totale: moyenne. - résidu sec:

+ plus fortes concentrations: Cl.

+ ion prédominant:

+ éléments les plus mobiles:

+ température de l'eau: 11 et 13°.

+ type d'eau: chlorurées.

+ rapports caractéristiques: - - -

- - - -

+ Indice d'échanges de bases: proche de 0.20.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: peu de sulfates et de fer, dureté faible (inférieure à 10°F).

+ particularités de la nappe:

+ qualité de l'eau: bonne.

+ pollutions possibles: par la surface.

+ variations saisonnières: ++ saison humide:

++ saison sèche:

++ saison chaude:

++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:

++ milieu drainant:

++ milieu confiné:

FICHE N° : 7

CLIMAT: MEDITERRANEEN (cas de la CORSE).

ROCHE - MERE: Granites.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ altération trés peu épaisse, en général, peu ou pas de sols évolués: eau de pluie en contact avec la roche saine.
++
++
++
++
++

+ argiles formées: kaolinite et illite quand il y a une altération.

+ soutirage global:

+ soutirage(s) le(s) important(s): HCO_3, SiO_2, Ca.

+ ordre de départ:

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération:

+ évolution(s) : latérale, et ou verticale.

EAUX:

+ pH: entre 5,6 et 7,5 avec une moyenne autour de 6,4.

+ résistivités: fortes.

+ concentration totale: faible - résidu sec: souvent inférieur à 500 mg/l.

+ plus fortes concentrations: Na, SiO_2.

+ ion prédominant: Na, Cl.

+ éléments les plus mobiles: Na - Ca - SiO_2 - Mg - K - Fe - Mn (ordre décroissant).

+ température de l'eau:

+ type d'eau: bicarbonaté-chloruré sodique.

+ rapports caractéristiques: $Mg/Ca \ll 1$ - $Na/K > 40$ - $rNa + rK / rCa > 1$ -
- - - -

+ Indice d'échanges de bases: négatif.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques:

+ particularités de la nappe: contribution ionique de l'eau importante (aérosols marins).

+ qualité de l'eau: bonne.

+ pollutions possibles: toujours possibles.

+ variations saisonnières: ++ saison humide:
++ saison sèche:
++ saison chaude:
++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:
++ milieu drainant:
++ milieu confiné:

FICHE N° : 6

CLIMAT: méditerranéen. (CORSE).

ROCHE - MERE: schistes.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++
++
++
++
++
++

+ argiles formées:

+ soutirage global:

+ soutirage(s) le(s) important(s):

+ ordre de départ:

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération:

+ évolution(s) : latérale, et ou verticale.

EAUX:

+ pH: entre 6,7 et 8.7, avec une moyenne autour de 7.5 .

+ résistivités: moyennes.

+ concentration totale: moyenne. - résidu sec:

+ plus fortes concentrations: SiO_2. Na.

+ ion prédominant: Na.

+ éléments les plus mobiles:

+ température de l'eau: vers 15°.

+ type d'eau: bicarbonatée chlorurée sodique.

+ rapports caractéristiques: Mg/Ca 1 - Na/K 25 - Na + K / Ca 0.5-
- Na + K / Cl ≠ 1 - - -

+ Indice d'échanges de bases: proche de 0.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: plus de sulfates que dans les granites.

+ particularités de la nappe:

+ qualité de l'eau: bonne.

+ pollutions possibles:

+ variations saisonnières: ++ saison humide:
++ saison sèche:
++ saison chaude:
++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:
++ milieu drainant:
++ milieu confiné:

FICHE N° : 9

CLIMAT: ARIDE.

ROCHE - MERE: Granites.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ roche subaffleurante, altérée mécaniquement mais pas ou peu chimiquement.
++ si accumulation d'eau, présence de sables fins homométriques.
++ décapage des altérites.
++
++
++

+ argiles formées:

+ soutirage global:

+ soutirage(s) le(s) important(s):

+ ordre de départ: Na - Ca - Mg - K (ordre décroissant).

+ ~~kaolinisation - monosiallitisation~~ - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération: 0,1 à 4 mm pour 1000 ans.

+ évolution(s) : latérale, et ou verticale.

EAUX:

+ pH: entre 7,6 et 8,3.

+ résistivités: moyennes.

+ concentration totale: moyenne. - résidu sec: entre 400 et 4600 mg/l; rarement très supérieur.

+ plus fortes concentrations: Na, Cl, SO_4, HCO_3, K.

+ ion prédominant: Na et pour les anions, Cl et HCO_3.

+ éléments les plus mobiles: Na - Ca - SiO_2 - K.

+ température de l'eau: 26° à 30°.

+ type d'eau: bicarbonaté sodique pour les eaux les moins minéralisées, chloruré sodique pour les eaux très minéralisées.

+ rapports caractéristiques: Na/K grand. - Mg/Ca $<$ 1 - $rSO_4/rCl < 0,7$ -
- - - -

+ Indice d'échanges de bases: négatif.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: concentrations en fer assez fortes.

+ particularités de la nappe: apports par la surface d'eaux de pluie très minéralisées (d'où beaucoup de chlorures).

+ qualité de l'eau: bonne.

+ pollutions possibles: toujours possibles, surtout des nitrates (jusqu'à plus d'1 g/l).

+ variations saisonnières: ++ saison humide:
++ saison sèche:
++ saison chaude:
++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:
++ milieu drainant: Na/K plus grand que dans d'autres zones: entre 0,5 et 7 (comme certaines nappes superficielles).
++ milieu confiné: Na/K supérieur à 7.

FICHE N° : 10.

CLIMAT: aride.

ROCHE - MERE: roches basiques (essentiellement basaltes).

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ décapage des altérites.
++ débris anguleux sur une trés faible épaisseur.
++ roche saine subaffleurante.
++
++
++

+ argiles formées:

+ soutirage global: moyen.

+ soutirage(s) le(s) important(s): alcalins et alcalinoterreux, mais soutirage partiel.

+ ordre de départ: Na - Ca - Mg - K.

+ [illegible] - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération: aussi importante que pour les roches acides.

+ évolution(s) : latérale, et ou verticale.

EAUX:

+ pH: entre 7.3 et 8.3.

+ résistivités:

+ concentration totale: importante. - résidu sec: compris entre 500 et 8100 mg/l.

+ plus fortes concentrations: Na.

+ ion prédominant: Na.

+ éléments les plus mobiles: Na - Ca - Mg - SiO_2 - K.

+ température de l'eau: 27° à 29°.

+ type d'eau: bicarbonatée sodique, chlorurée sodique pour les plus minéralisées et sulfatées sodiques magnésiennes.

+ rapports caractéristiques: Na/ Bases > 1. - Mg/Cl ≠ 1. - - -
- - - -

+ Indice d'échanges de bases: négatif.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: concentrations en Al et Fe importantes. concentration en Mg importante. SiO_2 abondante. élément trace caractéristique: Tb.

+ particularités de la nappe:

+ qualité de l'eau: passable.

+ pollutions possibles:

+ variations saisonnières: ++ saison humide:
++ saison sèche:
++ saison chaude:
++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:
++ milieu drainant: Na/K caractéristique de ce climat : entre 0.5 et 7;
++ milieu confiné: Na/K " " " " : supérieur à 7.

FICHE N° : 11

CLIMAT: aride.

ROCHE - MERE: schistes.

ALTERATION:

+ profil d'altération: ++ décapage des altérites.
++
++
++
++
++

+ argiles formées:

+ soutirage global:

+ soutirage(s) le(s) important(s):

+ ordre de départ:

+ allitisation - monosiallitisation - bisiallitisation.

+ vitesse d'altération:

+ évolution(s) : latérale, et ou verticale.

EAUX:

+ pH: supérieur à 8.

+ résistivités: autour de 4000 micromho/cm.

+ concentration totale: moyenne. - résidu sec: entre 1000 et 1500 mg/l.

+ plus fortes concentrations: Na, SO_4, Cl.

+ ion prédominant: Na, Cl.

+ éléments les plus mobiles: K, Mg.

+ température de l'eau: entre 28° et 32°.

+ type d'eau: chlorurosulfatée sodique pour les plus minéralisées, ou bicarbonatée calcique.

+ rapports caractéristiques: - - -
- - - -

+ Indice d'échanges de bases: négatif.

+ eaux : agressives, non agressives.

+ éléments caractéristiques: eaux très riches en SO_4, Cl, Na, assez riches en Ca, HCO_3. éléments traces: Zn, Mn. eaux plus alcalines et plus minéralisées.

+ particularités de la nappe: toujours aussi riches en SO_4, Cl même après une longue période de pluie et même dans des nappes profondes. moins de SiO_2, moins d'apports de pluie.

+ qualité de l'eau: eaux souvent saumâtres.

+ pollutions possibles: toujours possibles.

+ variations saisonnières: ++ saison humide:
++ saison sèche:
++ saison chaude:
++ saison froide:

+ variations dues aux conditions hydrauliques:
++ milieu drainant: rapport Na/K toujours caractéristique.
++ milieu confiné: " " " " ".

B I B L I O G R A P H I E

I - QUALITE DE L'EAU

O.M.S. 1962 .- Normes internationales pour l'eau de boisson.- 3° édition, Genéve.

C.E.E. 1980 .- Directive du 15 juillet 1980 concernant les normes de qualité des eaux.-

DILUCA (C) 1980 .- Qualité de l'eau dans les pays membres du C.I.E.H.- Bull. C.I.E.H., n°39-40.

HAMON (J.L) 1982 .- Nouvelles normes européennes relatives aux eaux alimentaires.- Techn. sci. munic.- Eau, n°6, p.301-310.

RODIER (J), VIDAL (J) 1982 .- Considérations sur l'établissement des normes de qualité des eaux.- Techn. Sci. munic. - Eau, n°7, p.371-376.

II - OUVRAGES GENERAUX

SCHOELLER (H) 1941 .- Influence du climat sur la composition des eaux souterraines vadoses.- Bull. Soc. géol. de France, novembre 1941.

SCHOELLER (H) 1950 .- Les variations de la teneur en gaz carbonique des eaux souterraines en fonction de l'altitude.- C.R. Acad. Sc. Paris, 230, D, p.560-561.

UNESCO, colloque Ankara, 1952 .- Hydrologie de la zone aride.-

SCHOELLER (H) 1959 .- Hydrologie des régions arides: progrés récents.- Unesco, Paris.

SCHOELLER (H) 1962 .- Les eaux souterraines.- Paris, Masson.

SCHOELLER (H) 1963 .- Classification des eaux.- A.I.H.S., pub. n°46, réunion de Berkeley.

A.I.H.S., UNESCO 1965 .- Hydrologie des roches fissurées.- Pub. n° 73-74.

GARRELS (R.M), CHRIST (C.L) 1965 .- Solutions, minerals and equilibria.- Harper International Student Reprint, 450 p.

PEDRO (G) 1966 .- Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique).- C.R. Acad. Sc. Paris, 262, D, p.1828-1831.

ROBERT (M) 1966 .- Sur la nature des phénomènes de désagrégation, d'arénisation et d'altération chimique; études expérimentales.- C.R. Acad. Sc. Paris, 262, D, p.1519-1522.

TARDY (Y) 1966 .- Mobilité relative des éléments au cours des phénomènes d'altération de quelques roches cristallines.- Bull. Serv. Cartes géologiques Alsace Lorraine, n°19, 3-4, p.255-270.

HILLWOOD (E.R) 1967 .- Problems of locating water supplies in hard rock areas.- Mining Review, 30th june 1967, n°126.

B.R.G.M. 1968 .- Hydrogéologie des roches éruptives et métamorphiques en zones tropicales et arides.- Bull. B.R.G.M. (2), section III, n°2.

LOGAN (R.F) 1968 .- Causes, climates and distribution of deserts.- in BROWN :"Desert biology", chap. II, p.21-50.

PEGUY (C.P) 1970 .- Précis de climatologie.- Paris, Masson.

FRITZ (B) 1975 .- Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales.- Sc. géol. mém. n°41, 152 p.

BESNUS (Y), MOSSER (C) 1976 .- Les groupes à intercorrélations positives: une méthode statistique pour déterminer la répartition des éléments chimiques entre les phases constitutives d'une roche.- C.R. Acad. Sc. Paris, 283, D, p.587-590.

FOUILLAC (C), MICHARD (G), BOCQUIER (G) 1976 .- Simulation de l'évolution des profils d'altération.- Gèochimica et cosmochimica acta, n°40.

MUXART (T), BIROT (P) 1977 .- L'altération météorique des roches.- Pub. Dépt. Géol. Univ. Sorbonne, Paris, 4, 279 p.

I.N.R.A. 1978 .- Le laboratoire de recherches de science du sol.- rapport d'activité d'I.N.R.A. Rennes.

GUIRAUD (R) 1979 .- Water in cristalline rocks.- Unesco Paris.

TEGGEY (M) 1979 .- Utilisation de la géochimie majeure pour la cartographie des terrains cristallins.- Documents B.R.G.M. n°12.

UNESCO, 1979 .- Water in cristalline rocks.

CEFIGRE, colloque de Sophia Antipolis, 1981 .- Cours international sur la planification des eaux en zones aride et semi-aride.-

B.R.G.M. 1982 .- Exploitation des réserves souterraines en zone aride et semi-aride.- Bull. B.R.G.M. (2), section III, n°2.

III - CLIMAT ARCTIQUE

De GEER (J) 1966 .- Some hydrological aspects on aquifers.- in "Ground water problems", International Symposium, Stockholm.

ERIKSSON- KHUNAKASEM 1966.- The chemistry of ground waters.- in "Ground water problems", international symposium, Stockholm.

LARSSON (I) 1966 .- Ground water in precambrian rocks in southern Sweden.- Proceedings of the I.H.S., Stockholm, p.23-41.

JACKS (G) 1973 .- Chemistry of some ground waters in silicate rocks.- Stockholm, (s.n.), 215 p.

IV - CLIMAT TEMPERE HUMIDE (OCEANIQUE)

ESTEOULE - CHOUX (J) 1970 .- Contribution à l'étude des argiles du massif armoricain.- Mém. Soc. géol. et minér. de Bretagne, 14, 319 p.

BAKALOWICZ (M) 1979 .- Contribution de la géochimie à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.- Thèse Paris VI.

DEJOU (J), GUYOT (J), ROBERT (M) 1977 .- Evolution superficielle des roches cristallines er cristallophylliennes dans les régions tempérées.- Publication I.N.R.A.

BROWN (M) 1974 .- Some aspects of the evolution of the St Malo migmatite belt, armorican massif, France.- Centenaire Soc. Géol. de Belgique: "géologie des domaines cristallins", p.361-362.

DEPAGNE (J) 1974 .- Hydrogéologie de la région des pays de la Loire.- Rapport B.R.G.M. n° 74 SGN 417 BPL.

LEMOINE (B) 1975 .- Essai de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines de la France à l'échelle du 1/1 000 000.- Rapport B.R.G.M. n° 75 SGN 050 AME, 124 p.

SARRAZIN (G), FOUILLAC (C), MICHARD (G) 1976 .- Etude de l'acquisition d'éléments dissous par les eaux de lessivage des roches granitiques sous climat tempéré.- Géochimica et Cosmochimica acta, n°40, p.1481-1486.

TALBO (H) 1976 .- Alimentation en eau du syndicat de MOntsurs (Mayenne): forage du Buron.- Rapport B.R.G.M. n° 76 SGN 408 BPL.

TALBO (H), VADON (J) 1976 .- Renforcement de l'alimentation en eau potable du syndicat de Guercy.- Rapport B.R.G.M. n° 76 SGN 459 BPL.

BODELLE (J), TIRAT (M) 1977 .- Utilisation des eaux souterraines en France.- Bull. B.R.G.M. (2), section III, n°4, p.415-432.

DUCHENE (R), TALBO (H), VADON (J) 1977 .- Recherches d'eau souterraine sur le territoire de la commune de Grand Fougeray.- Rapport B.R.G.M. n° 77 SGN 508 BPL.

DUCHENE (R), TALBO (H) 1978 .- Renforcement de l'alimentation en eau potable de Bain de Bretagne.- Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 357 BPL.

DUCHENE (R), TALBO (H) 1978 .- Recherches d'eau souterraine dans les schistes et poudingues du secteur de Meneu (commune de Pipriac) en vue d'augmenter les ressources en eau du S.I.A.E.P. des Bruyéres.- Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 048 BPL.

DUCHENE (R), TALBO (H) 1978 .- Pompage d'essai de longue durée à la Boutratais, commune de Grand Fougeray.- Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 002 BPL.

TALBO (H), VADON (J) 1978 .- Renforcement de l'alimentation en eau potable de la commune de Pont Main.- Rapport B.R.G.M. n°78 SGN 001 BPL.

TALBO (H) 1978 .- Etude hydrogéologique du secteur de Cosquéric, commune d' Elliant (Finistère).- Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 103 BPL.

VADON (J), TALBO (H) 1978 .- Recherches d'eau souterraine à Dompierre- du-Chemin (35): rapport de 2° phase.- Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 008 BPL.

VADON (J), TALBO (H) 1978 .- Syndicat du Val d'Ize: recherches d'eaux souterraines, réalisation de l'ouvrage de captage: compte-rendu des pompages d'essai.- Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 281 BPL.

TALBO (H), VADON (J) 1979 .- Etude hydrogéologique des grés et schistes du secteur de captage des Aunays, commune de St George Chesne.- Rapport B.R.G.M. n° 79 101 BRE.

TALBO (H), VADON (J) 1979 .- Recherches d'eau souterraine dans le secteur de Landal.- Rapport B.R.G.M. n° 79 SGN 044 BPL.

TALBO (H), VADON (J) 1979 .- Recherches d'eau souterraine à Pleudihen et La - Vicomte - Sur - Rance (22).- Rapport B.R.G.M. n° 79 SGN 259 BPL.

CAPDEVILLE (J.P) 1980 .- Prospections d'argiles kaoliniques dans la région nord de Parthenay (Deux-Sévres).- Rapport B.R.G.M. n° 80 SGN 482 POC.

GOGUEL (J) 1980 .- Les conditions hydrologiques profondes dans les granites pyrénéens et l'origine des sources thermales.- Jubilé CALEMBERT.

TALBO (H), VADON (J) 1980 .- Recherches d'eau souterraine au domaine de la Jaillère, commune de la Chapelle St Sauveur.- Rapport B.R.G.M. n° 80 SGN 043 PAL ou 80 SGN 001 BRE.

TALBO (H), VADON (J) 1981 .- Recherches d'eau souterraine dans la région de Plouigneau.- Rapport B.R.G.M. n° 81 SGN 001 BRE.

DELAY (J), ROCHE (P.A), TALBO (H) 1982 .- Etude des possibilités de recourir aux eaux souterraines en zone de socle pour les réseaux d'alimentation en eau potable.- Rapport d'avancement n°2, rapport B.R.G.M. inédit.

TALBO (H), VADON (J) 1982 .- Recherches d'eau souterraine dans les grés armoricains à Paimpont (35), quartier du Cannée.- Rapport B.R.G.M. n° 82 SGN 102 BRE.

DHEILLY - CARN (A) 1983 .- Contribution à l'étude hydrogéologique des volcanites du Trégor.- Thèse 3° cycle Montpellier.

CARN (A), TALBO (H) 1983 .- Recherche d'eau souterraine dans les grés armoricains du massif de Paimpont.- Rapport B.R.G.M. n° 83 SGN 015 BRE.

ROCHE (P.A), TALBO (H), THIERY (D) 1983 .- Aspects quantitatifs des ressources en eau en région de socle; méthodes récentes appliquées au cas de la Bretagne, en France.- Symposium Unesco Coblence.

TALBO (H) 1983 .- L'eau souterraine dans les formations anciennes de Bretagne: état des connaissances.- Rapport B.R.G.M. n° 82 SGN 196 BRE.

B.R.G.M. 1984 .- Hydrogéologie générale du massif granitique d'AURIAT (Creuse).- Rapport B.R.G.M. n° 84 SGN 133 STO.

COTTEZ (S), OUSTRIERE (P), THIERY (D) 1984 .- Hydrogéologie du massif granitique d'Auriat (Creuse).- Rapport B.R.G.M. n° 84 SGN 133 STO.

V - CLIMAT MEDITERRANEEN

ARNOUX (A) 1964 .- Etude géochimique du bassin hydrographique du Gapeau; rapports entre la composition chimique des eaux et la constitution minéralogique des gites aquifères.- Thèse Aix - Marseille.

PASQUIER (C), ROCHE (B) 1981 .- Les aquifères du socle en Corse.- Rapport S.R.A.E. Corse.

TRESIGNY (M) 1973 .- Etude hydrogéologique et hydrogéochimique des aquifères de la Can de l'Hospitalet et du substratum paléozoïque.- Thèse C.N.A.M. Paris.

VI - CLIMAT ARIDE

FROMMURZE (H.F) 1952 .- Recherches hydrologiques sur les régions arides de l'union Sud - Africaine et de l'Angola.- Unesco, Paris.

HILLS (E.S) 1952 .- L'hydrologie des zones arides et semi-arides d'Australie, particulièrement en ce qui concerne l'eau souterraine.- Unesco, Paris.

WHINCUP (P) 1968 .- Prospects for underground water supplies for CARNAMAH township.- Geol. Surv. west Australia, Annu. Rep., p.17-19.

CLISBY (R.L), Alii 1972 .- The investigations of the water resources of the south east of south Australia.- Civil Eng. Transactions, vol. 14, n°2.

HARPAZ, MARIANO, BARNER 1975 .-A study of the basalt aquifer of north eastern Sao Paulo.- Réunion Porto Alegre, mém. A.I.H., vol. XI, p.25-33.

REBOUCAS (A) 1973 .- Le problème de l'eau dans la zone semi-aride du Brésil.- Thèse état Strasbourg.

BLANKENNAGEL (R.K), WEIR (J.E) 1973 .- Geohydrology of the eastern part of Pahute Mesa, Nevada test site, Nye County Nevada.- Hydrology of nuclear test sites, p.515-659.

LANDERS (R.A), TURK (L.J) 1973 .- Occurence and quality of ground water in cristalline rocks of the Llano Area, Texas.- Ground Water, vol. XI, n°1.

AUDEN (J.B) 1950 .- Introductory report on the ground water resources of western Rajasthan.- Bull. Geol. Surv. of India.

DHIR (R.D) 1952 .- Recherhces hydrologiques dans les régions arides et semi-arides de l'Inde et du Pakistan.- Reviews of research on arid zone hydrology, Unesco, Paris.

MAHADEVAN (C) 1956 .- On semi arid tracts of south India: some aspects of geology, physicography and hydrology.- Congreso Geologico International, section IV, p.247-255.

VINCENT (W), Alii 1979 .- Hydrogeology of cristalline rocks: case studies of two areas in India.- Nordic Hydrology, vol. 10, p.287-308.

AL SAYARI (S.S), ZOLT (J.G) 1978 .- Quaternary period in Saudi Arabia.- Wien, New York, Springer Verlag.

ROCHON (J) 1981 .- Etude hydrochimique des eaux souterraines dans le quadrangle d'Al Hissu, feuille 24 E, royaume d'Arabie Saoudite.- Rapport B.R.G.M. inédit.

BOURG (A) 1982 .- Etude hydrochimique des eaux dans le quadrangle du Wadi Ar Rika, feuille 22 G, royaume d'Arabie Saoudite.- Rapport B.R.G.M. inédit.

BOURG (A), LELEU (M) 1982 .- Etude hydrochimique des eaux dans le quadrangle de Al Madinah, feuille 24 D, royaume d'Arabie Saoudite.- Rapport B.R.G.M. inédit.

FOURNIGUET (J) 1982 .- Compte-rendu de tournée de terrain, Arabie Saoudite, Mahdadahab.- Rapport B.R.G.M. n° 82 GEO EQ 11.

WHITNEY (J.W) 1982 .- Overview of the geomorphology of western Saudi Arabia and recommendations for future research.- Saudi Arabia, open-file report USGS : OF-02-6.

FOURNIGUET (J), Alii 1984 .- Continental evolution of the western and central part of Saudi Arabia during Neogene and Quaternary times.- Rapport B.R.G.M. en cours d'édition.

BOSCH (B), OUSTRIERE (P), ROCHON (P) .- Interprétation hydrogéochimique des eaux souterraines de Yanbu' al Barh, royaume d'Arabie Saoudite. - Rapport B.R.G.M. inédit.

VII - CLIMAT TROPICAL HUMIDE

DUCELLIER (J) 1963 .- Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du centre et du nord de la Haute Volta.- mém. B.R.G.M. n°10, 320 p.

TARDY (Y), MILLOT (G) 1966 .- Premiers résultats de l'étude géochimique de la nappe du bassin de Korhogo.- C.R. Acad. Sc. Paris, 263, D, p.753-755.

B.R.G.M. 1967 .- Etude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'ouest.- Bull. C.I.E.H. - B.R.G.M. Dakar.

TARDY (Y) 1967 .- Etude géochimique des eaux d'une nappe d'arénes en pays cristallin (Korhogo, Côte d'Ivoire).- Bull. Serv. cartes géologiques Alsace Lorraine, n°20, 4, p.235-256.

LENOIR (F) 1972 .- Exportation chimique d'un bassin intertropical: le Bandama, Côte d'Ivoire: influence des conditions hydrologiques.- Thèse doctorat Paris.

WACKERMANN (J.M) 1972 .- Corrélations géochimiques entre eaux phréatiques et niveaux aquifères dans les manteaux d'altération du Sénégal oriental.- Cahiers O.R.S.T.O.M., série géologie, vol. 4, n°1, p.77-89.

GUIRAUD (R) 1975 .- Eléments pour une nouvelle orientation de la recherche des eaux souterraines dans les régions à substratum métamorphique ou éruptif de l'Afrique occidentale.- Réunion Porto Alegre, Brésil, mém. A.I.H., vol. XI, p.15-19.

LENCK (P.P) 1977 .- Données nouvelles sur l'hydrogéologie des régions à substratum métamorphique ou éruptif en Côte d'Ivoire.- C.R. Acad. Sc. Paris, 285, D.

LENOIR (F) 1978 .- Relation entre la dynamique et la composition chimique d'une nappe d'arénes en Côte d'Ivoire.- Cahiers O.R.S.T.O.M., série géologie, vol. X, n°2, p.209-236.

OUSMANE (B) 1978 .- Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle du Sahel.- Thèse 3° cycle Montpellier.

B.R.G.M. 1980-1981 .- Hydrogéologie de l'Afrique de l'ouest.- Bull. B.R.G.M. (2), section III, n°4.

FAILLAT (J.P), LEBLOND (P) 1982 .- Premiers résultats des essais menés sur une station de pompage en Côte d'Ivoire.- Colloque CASTANY, Orléans, B.R.G.M.

LAVOIE (M.C), Alii 1982 .- Comparaison de la qualité de l'eau provenant de différents puits en Côte d'Ivoire.- 5° réunion PICG/PAOB, Accra.

SCHNEIDER (J.L) 1982 .- Programme d'hydraulique villageoise: étude et synthèse des résultats des forages.- Rapport B.R.G.M. n° 83 AGE 021, p.39-48.

CEFIGRE 1983 .- Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristallophyllien, et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'ouest.- Rapport CEFIGRE, série documents, 1983/3.

LABEY (D) 1983 .- Recherche et exploration de l'eau souterraine dans les terrains de socle ancien. Application à une étude statistique de forages hydrauliques réalisés dans diverses régions d'Afrique occidentale.- Thèse C.N.A.M Paris.

CORBEL (J) 1957 .- L'érosion des granites et silicates sous climat chaud.- Rev. Géomorph. Dyn., 1-2, p.4-8.

DEGALLIER (R), GUERIN-VILLEAUBREIL (G) 1961 .- Les recherches d'eau en arénes granitiques sous climat tropical.- A.I.H, réunion de Madrid, 1959, mém. t. III, p.81-85.

DELVIGNE (J) 1967 .- Bilans géochimiques de l'altération des roches basiques en Côte d'Ivoire ferralitique.- Rev. Géogr. Phys et Géol. Dyn., vol. n°9, n°4, p.311-320.

TARDY (Y) 1969 .- Géochimie des altérations, étude des arénes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique.- Mém. Serv. cartes géologiques Alsace Lorraine, n°31.

WACKERMANN (J.M) 1975 .- Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide: étude minéralogique et géochimique des arénes du Sénégal oriental.- Thèse Strasbourg.

PION (J.C) 1979 .- L'altération des massifs cristallins basiques en zone intertropicale séche.- Thèse 3° cycle Strabourg.

SAWADOGO (A.N) 1984 .- Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta: étude régionale du bassin versant de la Sissili.- Thèse doctorat Grenoble.

KARPOFF (A.M), BOCQUIER (G), ISNARD (P), TARDY (Y) 1973 .- Géochimie des sols tropicaux du Tchad. Utilisation des méthodes statistiques.- Sc. géol., Bull. Strasbourg, 26, 4, p.315-338.

TRESCASES (J.J) 1973 .- L'évolution géochimique supergéne des roches ultrabasiques en zone tropicale, et la formation des gisements nickelifères de Nouvelle Calédonie.- Thèse Strasbourg, mém. O.R.S.T.O.M. n°78.

ANNEXE 1

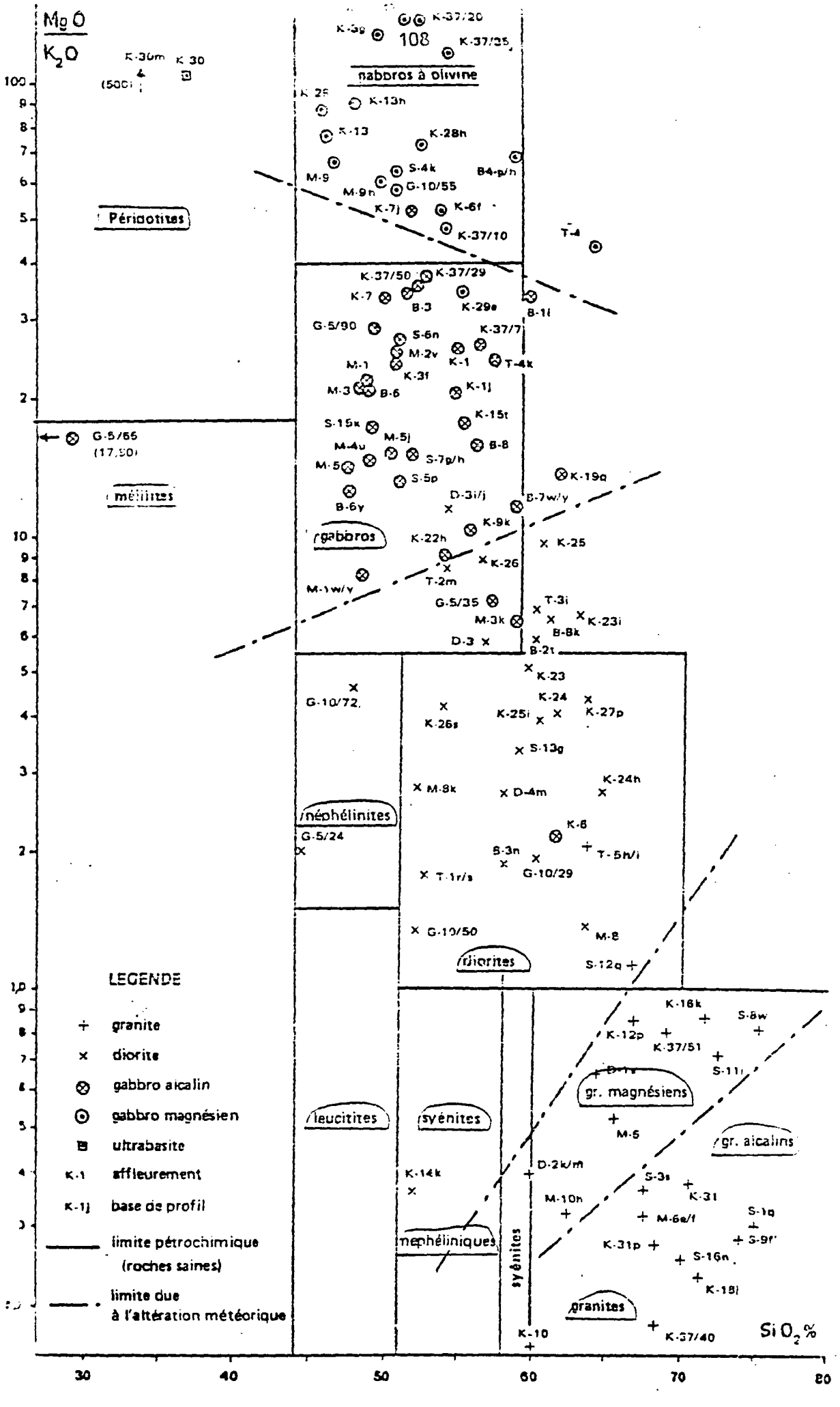
Classification des roches cristallines en fonction de:

figure A1: MgO/K_2O et SiO_2

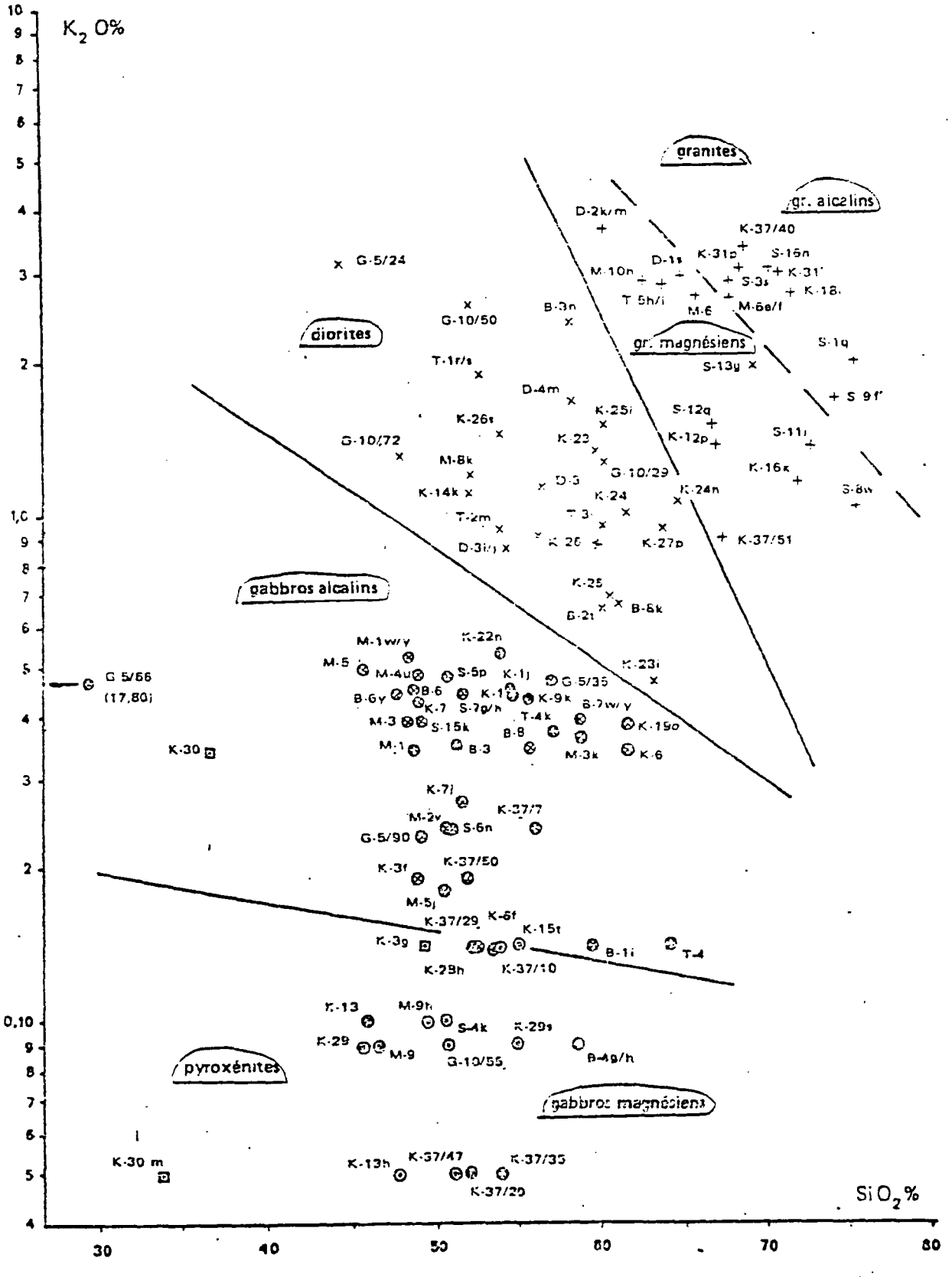
figure A2: K_2 et SiO_2

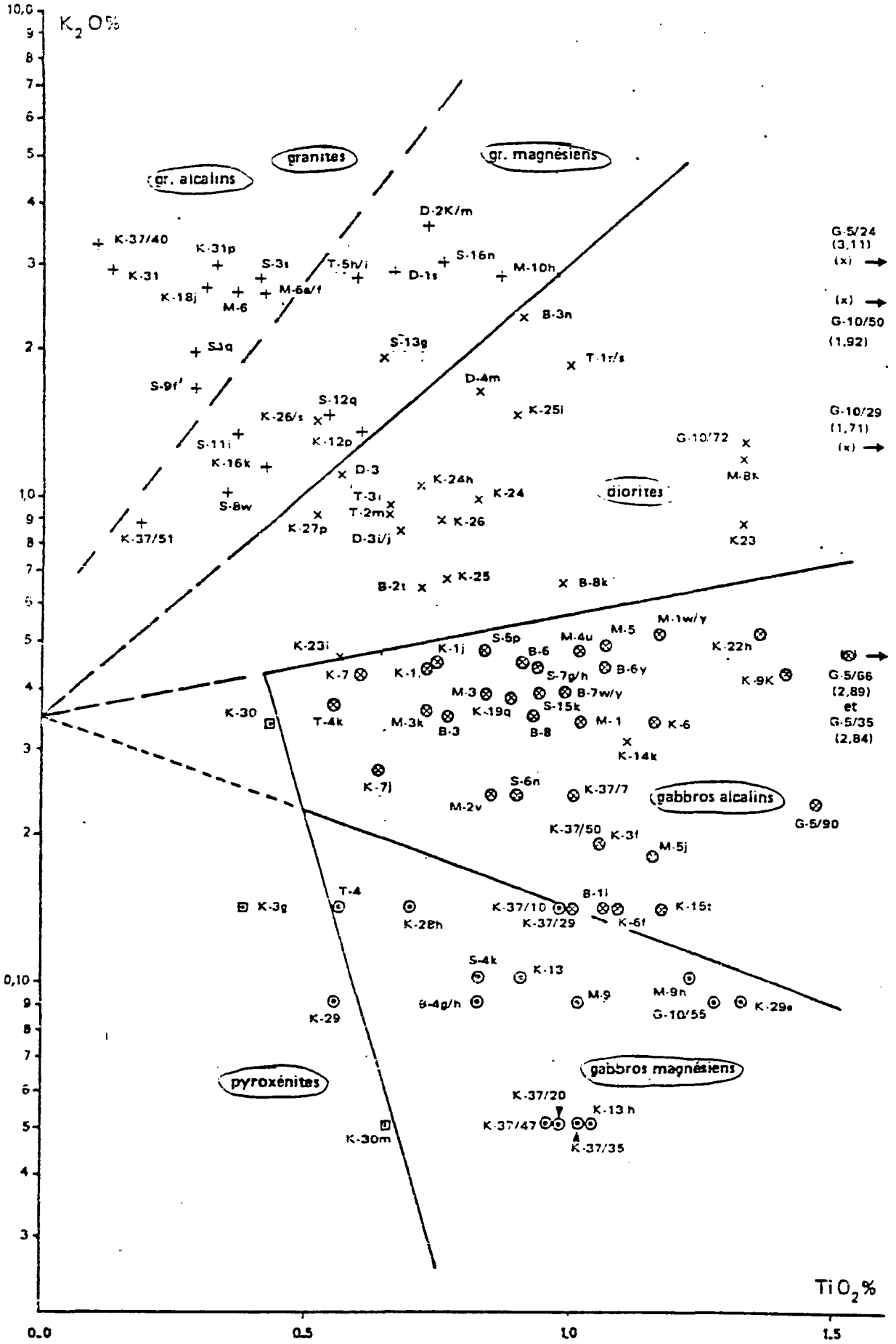
figure A3: K_2O et TiO_2.

(d'après WACKERMANN, 1975)



MgO / K2O
108
gabbros à olivine
Péridotites
mélilites
gabbros
néphélinites
diorites
leucitites
syénites
gr. magnésiens
gr. alcalins
néphéliniques
syénites
granites
LEGENDE
granite
diorite
gabbro alcalin
gabbro magnésien
ultrabasite
K-1 affleurement
K-1j base de profil
limite pétrochimique (roches saines)
limite due à l'altération météorique
SiO2 %
30
40
50
60
70
80


$K_2O\%$
granites
gr. alcalins
gr. magnésiens
diorites
gabbros alcalins
pyroxénites
gabbros magnésiens
$SiO_2\%$
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1,0
0,10
30
40
50
60
70
80


$K_2O\%$
$TiO_2\%$
granites
gr. alcalins
gr. magnésiens
diorites
gabbros alcalins
gabbros magnésiens
pyroxénites
K-37/40
K-31p
K-31
S-3s
T-5h/i
D-1s
S-16n
M-10h
K-18j
M-6
M-6a/f
D-2K/m
B-3n
S-13g
T-1r/s
S-3q
S-9f'
D-4m
K-25l
S-12q
K-26/s
K-12p
S-11i
K-16k
D-3
K-24h
K-24
T-3i
T-2m
S-8w
K-37/51
K-27p
D-3i/j
K-26
K23
B-2t
K-25
B-8k
K-23i
K-1j
S-5p
B-6
M-4u
M-5
M-1w/y
K-22h
K-7
K-1
S-7g/h
B-6y
K-9K
M-3
B-7w/y
K-30
T-4k
M-3k
K-19q
S-15k
M-1
K-6
B-3
B-8
K-14k
K-7j
S-6n
K-37/7
M-2v
K-37/50
K-3f
M-5j
G-5/90
T-4
B-1l
K-3g
K-28h
K-37/10
K-37/29
K-6f
K-15t
S-4k
K-13
K-29
B-4g/h
M-9
M-9n
G-10/55
K-29e
K-37/20
K-13 h
K-37/47
K-37/35
K-30m
G-5/24
(3,11)
(x)
(x)
G-10/50
(1,92)
G-10/29
(1,71)
(x)
G-10/72
M-8k
G-5/66
(2,89)
et
G-5/35
(2,84)
10,0
9
8
7
6
5
4
3
2
1,0
9
8
7
6
5
4
3
2
0,10
9
8
7
6
5
4
3
0.0
0.5
1.0
1.5

ANNEXE 2

EXTRAITS DES NORMES INTERNATIONALES DE QUALITE DES EAUX

PARAMETRES	UNITES	C.E.E. 1980		O.M.S. 1977	
		niveaux -guides	maximum autorisés	souhaitable	impérative
1. Couleur	mg/l Pt/Co	1	20	5	50
2. Turbidité	mg/l Si O_2	1	101	-	--
	unités Jackson	0.4	4	5	25
3. Odeur	taux de dilution à 12°	0	2	pas de limites	
	" à 25°	0	3		
4. Saveur	taux de dilution à 12°.	0	2	pas de limites	
	à 25°	0	3		
5. Température	°C	12	25		--
6. pH	unités pH à 20°	6,5 → 8,5	≤ 9,5	7 << 8,5	6,5 → 9,2
7. Conductivité	µS/cm à 20°	400			
8. Chlorures	mg/l Cl^-	25	effet à partir de 200	200	600
9. Sulfates	mg/l SO_4^{--}	25	250	200	400
10. Silice	mg/l Si O_2	-	--	--	--
11. Calcium	mg/l Ca	100	--	75	200
12. Magnésium	mg/l Mg	30	50	30 si bcp de sulfates (250)	150
13. Sodium	mg/l Ne	20	150 (percentile de 90)	--	--
14. Potassium	mg/l K	10	12	--	--
15. Aluminium	mg/l AL	0,05	0,20	--	--
16. Dureté totale	° français	minimale	15°	10	50
17. Résidu sec	mg/l à 180°C		1500	500	1500
18. O_2 dissous	--	--	--	--	--
19. CO_2 dissous	mg/l	eau non agressive			
20. Nitrates	mg/l NO_3^-	25	50	--	--
21. Nitrites	mg/l NO_2^{--}	--	0,1	--	--
28. Hydrocarbures dissous ou émulsionnées	mg/l	--	10	10	300
33. Fer	mg/l Fe	50	200	100	1000
34. Manganèse	mg/l Mn	20	50	50	5000
40. Matières en suspension	mg/l	absence	--	--	--
51. Plomb	mg/l pb	--	50	--	100
57. Coliformes totaux	/100 ml	--	0	--	0
59. Streptocoques féçaux	/100 ml	--	0	--	0