

**GÉOCHIMIE DES ALTÉRATIONS ET DES EAUX DE SURFACE
DANS LE MASSIF ULTRABASIQUE DU SUD
DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE**

par

Jean-Jacques TRESCASES

*Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
Centre de Nouméa (Nouvelle-Calédonie)*

GÉOCHIMIE DES ALTÉRATIONS ET DES EAUX DE SURFACE DANS LE MASSIF ULTRABASIQUE DU SUD DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE

Jean-Jacques TRESCASES

Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
Centre de Nouméa (Nouvelle-Calédonie)

RÉSUMÉ. — Les eaux drainant les péridotites de Nouvelle-Calédonie sont bicarbonatées, magnésiennes et siliceuses. La libération de magnésium est peu influencée par l'intensité du drainage, contrairement à celle de la silice. Le calcul de l'échelle de la mobilité relative des éléments donne :

Na > Ca > Sr > K > Cu > Mg \geq Si > Al > V > Ni > Mn \geq Ti \geq Co > Cr \geq Fe
Na > Ca > Sr > K > Cu > Si \geq Mg > Al > V > Ni > Mn \geq Ti \geq Co > Cr \geq Fe

Cette séquence correspond à une chromatographie des ions à travers le paysage. Les eaux traduisent la dynamique des types d'altération : la ferrallitisation intervient seulement aux périodes humides et sur les pentes faibles. Le climat subtropical de la Nouvelle-Calédonie provoque donc, sur les péridotites, l'alternance des phases de ferrallitisation et de simatisation, ce qui entraîne l'accumulation des silicates de nickel (garniérite).

La section de Géologie du Centre ORSTOM de Nouméa a entrepris l'étude du bilan géochimique du couple altération-sédimentation sur les roches ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Quelques aspects de l'évolution géochimique des altérations superficielles sont présentés ici.

L'altération météorique des roches conduit à l'individualisation de deux phases : une phase résiduelle constituée par les produits de néogenèse et par les minéraux hérités des roches-mères et une phase migratrice comprenant les ions en solution, évacués par les eaux des nappes, des sources et des rivières. L'étude de ces deux phases complémentaires permet d'appréhender la dynamique de l'altération.

Le problème des relations chimiques entre le sous-sol (roche, zone d'altération, sol) et l'eau a été abordé par de nombreux auteurs (CHATONIER, 1957; SCHOELLER, 1963; WHITE

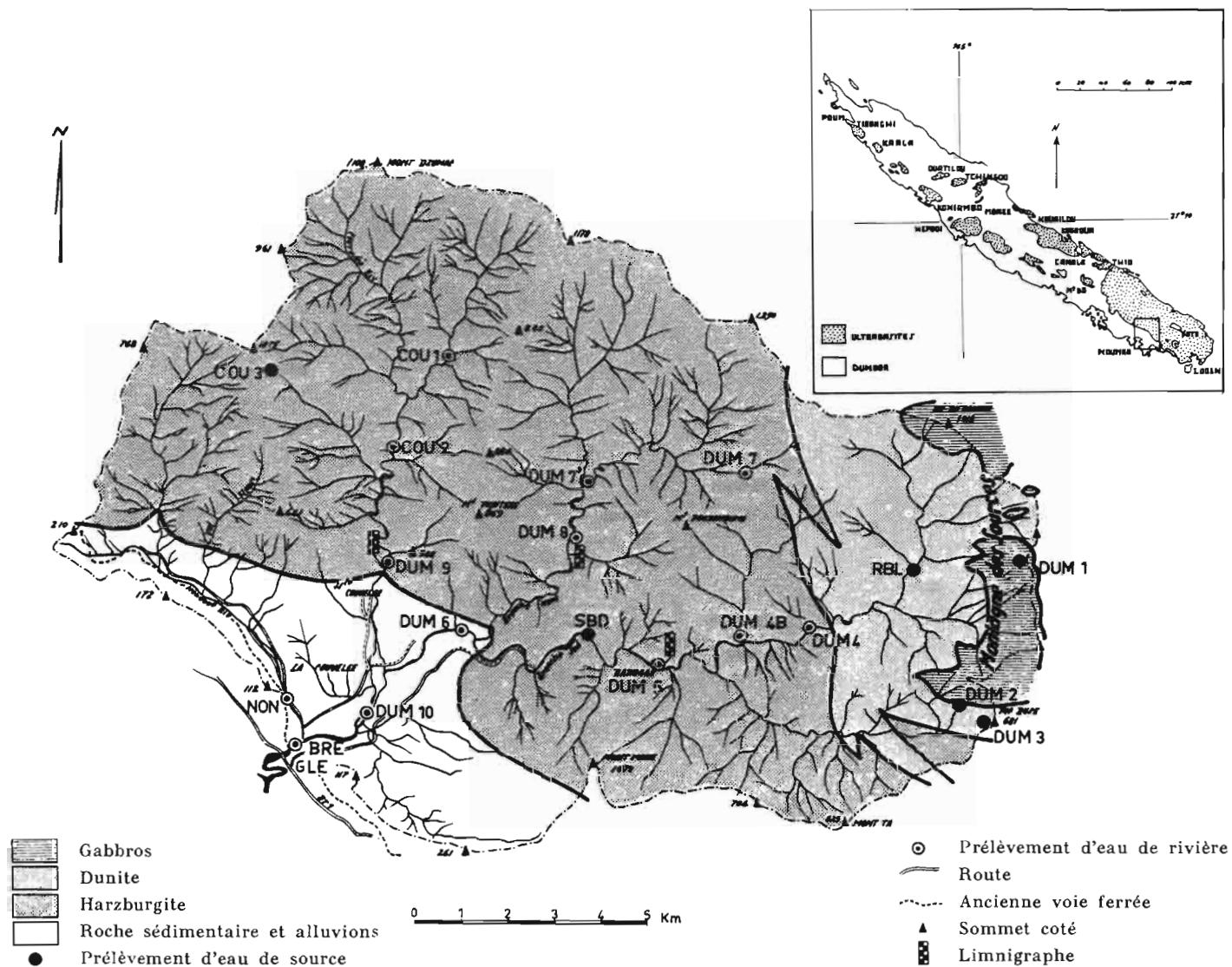


FIG. 1. — Le bassin de la Dumbéa : situation, géologie et position des points de prélèvement d'eau.

et al., 1963, par exemple). Mais les analyses d'eau permettent aussi d'évaluer les mobilités relatives des éléments au cours de l'altération (TARDY, 1966), de prévoir la nature des produits de néogenèse et de transformation et de connaître par là le type d'altération (PÉDRO, 1966; GAC, 1968; TARDY, 1969).

I. — LE MILIEU NATUREL

Les prélèvements d'eaux de surface ont été effectués pour la plupart dans le bassin versant de la rivière Dumbéa, situé sur le versant ouest de la Nouvelle-Calédonie, à une vingtaine de kilomètres au Nord de Nouméa, par 166° 30' E et 22° 5' S (fig. 1).

1. Le climat

Le climat de cette région est subtropical avec une température moyenne au niveau de la mer variant de 26 °C en février à 20 °C en août. La pluviométrie, qui n'est que de 1 000 mm en bordure de côte, dépasse 3 000 mm sur les massifs montagneux du bassin. On distingue quatre saisons : de décembre à mars, la période chaude et humide est aussi la période des cyclones tropicaux; d'avril à mai, l'alizé est établi, une saison plus fraîche et sèche s'installe; de juin à août, l'hiver austral connaît des précipitations d'intensité modérée; de septembre à novembre enfin, l'alizé de sud-est entretient un temps sec qui n'est pas encore chaud. Ce schéma varie toutefois d'une année à l'autre, et surtout en altitude où les températures hivernales peuvent approcher de zéro (la température moyenne du mois d'août atteint 13 °C environ).

2. Le relief

Le relief général du bassin de la Dumbéa est très montagneux, le point culminant atteignant 1 250 m. Les rivières sont profondément encaissées, et les pentes très fortes encadrant leur cours sont toutefois tronquées vers le haut, en lourdes croupes à surface sommitale presque tabulaire. En aval, la Dumbéa déroule ses méandres sur une petite plaine alluviale.

3. Pétrographie

Ce bassin, d'une superficie globale de 210 km² environ, est constitué à plus de 80 % par des roches cristallines. Seule la plaine alluviale et quelques crêtes basses de tufs et de grès crétacés qui la dominent, rompent à l'aval l'homogénéité géologique (fig. 1). 97 % des roches cristallines appartiennent à la famille des roches ultrabasiques, les 3 % complémentaires étant représentés par deux zones gabbroïques situées à la tête de la branche est de la Dumbéa. Les roches ultrabasiques comprennent des harzburgites (80 %), des dunites (20 %) et des petits affleurements de wehrlite et de pyroxénolite. La composition minéralogique de ces roches a été étudiée par GUILLON (1969a). Les gabbros sont mélancratiques, à grain moyen, et composés de plagioclases, de clinopyroxènes, et quelquefois d'orthopyroxènes et d'olivine. L'olivine, constituant essentiel des roches ultrabasiques, est très

magnésienne ($\text{SiO}_2\text{-MgO}_{1,9}$, $\text{FeO}_{0,1}$). La harzburgite contient en outre 10 % à 20 % de pyroxène orthorhombique (enstatite). L'olivine est presque toujours partiellement serpentiniisée. La composition chimique de ces roches est donnée dans le tableau I. Les analyses chimiques des gabbros ont été réalisées au Laboratoire de Géologie Appliquée de la Faculté des Sciences de Paris, les analyses de périclites par le Laboratoire de Géologie du Centre ORSTOM de Nouméa. Les éléments en traces figurent dans le tableau II. Leur dosage spectrographique a été effectué par les Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, à Bondy, dans le laboratoire de M. PINTA.

TABLEAU I
Analyses chimiques des roches du bassin versant

%	Gabbro	Gabbro à olivine	Wehrlite	Pyroxénolite	Harzburgite	Dunite	Harzburgite très serpentiniisée
Perte à 1100°	1,06	7,54	5,94	0,42	6,81	12,69	14,06
SiO_2	48,30	37,30	36,82	55,97	39,84	36,50	39,63
Fe_2O_3 total	11,60	9,20	8,57	11,45	8,04	6,61	7,14
Al_2O_3	17,50	1,00	2,03	3,05	0,38	0,40	0,51
CaO	9,24	1,96	0,07	0,35	0,12	0,07	0,17
MgO	8,70	41,30	43,25	28,98	44,23	43,05	36,08
Na_2O	2,70	0,12	0,12	—	0,10	0,09	—
K_2O	0,13	0,05	traces	—	traces	traces	—
Cr_2O_3	0,02	0,47	2,17	0,25	0,32	0,38	0,58
MnO_2	0,18	0,13	0,16	0,16	0,12	0,12	0,10
NiO	0,02	0,28	0,48	0,05	0,20	0,35	0,40
TiO_2	0,88	0,15	0,10	0,12	0,12	0,29	0,15
CoO	0,01	0,03	—	—	0,03	—	—
	100,34	99,53	99,71	100,80	100,31	100,55	98,82

4. Les sols

La répartition des sols semble étroitement contrôlée par la morphologie : les plateaux et croupes sommitales, à topographie subhorizontale, sont couverts de sols ferrallitiques profonds, et tous les bas de pentes s'envoient sous des dépôts de piedmonts, enrichis en silice et en argile; les pentes moyennes sont le siège d'un colluvionnement intense, alimenté par la destruction des surfaces ferrallitiques perchées, alors que les versants en pentes fortes

TABLEAU II
Eléments en traces dans les roches du bassin versant

ppm	Gabbro	Gabbro à Olivine	Wehrlite	Harzburgite	Dunite
Co	50	200	500	300	480
V	10	10	10	10	10
Cu	30	30	5	5	5
Zr	30	30	20	50	30
Ga	30	10	30	30	20
Cs	10	10	10	10	10
B	5	3	5	5	8
Sr	300	30	3	3	3
Zn	inférieur à 100 ppm				
Ba	inférieur à 30 ppm				
Pb – Sn – Rb – Mo Ge – Be – Bi	inférieurs à 10 ppm				
Li – Ag	inférieurs à 3 ppm				

évoluent en sols bruns eutrophes. La minéralogie de ces formations est variée : les sols ferrallitiques sont presque exclusivement constitués de goethite et d'hydroxyde ferrique amorphe, à l'exception de la zone de contact avec la roche où domine l'antigorite; les formations de piedmont renferment de notables quantités de nontronite, et les sols bruns eutrophes de l'antigorite, du talc et de la montmorillonite. On peut ainsi opposer les zones ferrallitiques constituant des lambeaux de diverses surfaces d'érosion, aujourd'hui en voie de démantèlement, aux altérations qui, sur les versants, conduisent au développement des phyllites 2/1. Le problème du caractère actuel ou fossile de l'altération ferrallitique se pose donc. L'étude géochimique des eaux de surface permet d'apporter une réponse.

II. — LES FAITS

Les échantillons d'eau ont été prélevés mensuellement entre août 1966 et octobre 1968 (*), en dix points du bassin de la Dumbéa, choisis en fonction de critères géologiques (contact pétrographique) ou hydrologiques (exutoire d'un bassin, présence d'un limnigraphé).

(*) Je remercie ici mon collègue J. LAUNAY, géologue au Centre ORSTOM de Nouméa, qui s'est chargé des prélèvements durant mon séjour en métropole, au cours de l'année 1968.

On a aussi sélectionné trois sources et sept prélèvements d'eaux de rivière (DUM 1 à 10, fig. 1). Quelques échantillons ont en outre été récoltés à l'occasion de tournées dans cette région d'accès difficile.

D'une manière générale, les eaux de surface du grand massif du Sud de la Nouvelle-Calédonie sont bicarbonatées magnésiennes. On observe cependant deux types de variations dans la composition des eaux de rivière : variations dans le temps et variations dans l'espace. Les tableaux III donnent la *composition moyenne* des eaux sur un profil en long de la branche est de la Dumbéa, aux diverses saisons (les moyennes sont établies entre août 1966 et janvier 1968).

1. Les anions : sulfates, chlorures, bicarbonates

A l'exception des sulfates qui résultent de l'oxydation des sulfures, inclus dans les pyroxènes (GUILLOU, 1969b), et dont la teneur maximum est d'une dizaine de mg/l, les anions ne proviennent pas de la roche. On les trouve en revanche dans l'eau de pluie. Voici l'analyse d'une eau de pluie :

SiO ₂	0,6 mg/l	Mg ⁺⁺	0 mg/l
		Ca ⁺⁺	0,5 mg/l
HCO ₃ ⁻	12,2 mg/l	Na ⁺	1,8 mg/l
Cl ⁻	4,3 mg/l	K ⁺	0,27 mg/l

Les tableaux III font apparaître en outre le comportement caractéristique des chlorures et du gaz carbonique (dissous sous forme bicarbonate dans cette gamme de pH) : les teneurs en chlorures varient peu le long du profil de la Dumbéa, mais diminuent en saison fraîche, quand les alizés soufflent le moins. Le gaz carbonique est sensiblement constant toute l'année, mais sa teneur est beaucoup plus importante en aval qu'à la source. Le gaz carbonique étant *d'origine atmosphérique*, un plus long parcours aérien de la rivière favorise une plus grande dissolution. Le comportement distinct du chlore s'explique par une *origine maritime* de cet élément, apporté par les alizés.

2. Les cations, la silice et les paramètres physico-chimiques

a) *Variations dans le temps*

La composition chimique des eaux varie dans le temps, c'est-à-dire en fonction des données climatiques. On a représenté figure 2 celles qui affectent les prélèvements DUM 5 (Dumbéa Est). Les variations saisonnières des autres points sont semblables à celles-ci. Le débit mensuel moyen est porté sur le graphique pour corrélation. Les quatre saisons se distinguent sur ces courbes, mais il faut noter l'extrême dissemblance entre 1967, année particulièrement humide et 1968, année très sèche. Deux crues exceptionnelles figurent également sur ce schéma à titre indicatif.

Les teneurs en potassium, trop faibles pour que des variations significatives apparaissent, n'ont pas été prises en considération. Deux paramètres sont sensiblement constants, le pH, toujours voisin de 8, et la teneur en sodium, qui diminue toutefois un peu en saison fraîche. Le comportement de ce dernier élément est donc voisin de celui du chlore, et le sodium, rare dans les roches du bassin, est d'origine maritime. Les variations du calcium sont trop faibles, par rapport à la sensibilité du dosage, pour qu'une interprétation se dégage du graphique. La résistivité montre une corrélation négative très nette avec le magnésium.

TABLEAUX III

Composition moyenne des eaux sur un profil en long de la Dumbéa (branche est)

III A. Saison chaude : décembre à mars

Prélèvements (cf. fig. 2)	1	2	3	4	5	6	10
Hydrologie	Source	Source	Source	Rivière	Rivière (barrage)	Confluent Branche nord	Point extrême atteint par la marée
Géologie	Gabbro	Wehrlite	Dunite	Contact Dunite Harzburgite	Harzburgite	Contact Péridotite- Sédimentaire	Sédimentaire
Altitude	850 m	650 m	560 m	180 m	120 m	10 m	2 m
pH	6,7	7,5	7,6	7,8	8,0	8,0	8,1
$\rho \Omega \text{cm}$	25 000	12 000	12 000	8 000	9 000	78 000	7 800
$\text{HCO}_3^- \text{ mg/l}$	15,0	50,0	50,0	62,2	60,0	77,0	90
Cl^-	6,0	6,0	6,0	6,2	7,0	9,0	9,8
SiO_2	5,3	12,3	11,6	11,8	15,3	15,6	18,5
MgO	3,4	12,4	14,0	16,7	18,1	20,3	23,4
CaO	1,8	1,5	0,9	1,4	1,4	1,0	0,7
Na_2O	4,0	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K_2O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

III B. Petite saison sèche : avril à juin

	1	2	3	4	5	6	10
pH	6,6	7,5	7,6	7,8	7,8	7,8	8,1
ρ	25 000	12 000	12 000	8 000	8 250	8 000	7 300
HCO_3^-	15,0	50,0	50,0	62,2	64,0	70,0	100
Cl^-	6,0	6,0	6,0	6,2	7,0	8,0	8,8
SiO_2	4,1	10,6	10,2	11,0	14,1	12,3	12,8
MgO	2,8	12,9	13,4	17,1	20,2	21,0	25,3
CaO	2,8	1,7	0,8	1,9	1,4	1,9	1,5
Na_2O	3,8	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K_2O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

III C. *Saison fraîche : juin à septembre*

	1	2	3	4	5	6	10
pH	7,0	7,5	7,6	7,8	7,8	8,0	8,0
ρ	25 000	12 000	12 000	8 000	9 000	8 400	7 900
HCO_3^-	15,0	50,0	50,0	62,2	61,0	80,0	105
Cl^-	6,0	6,0	6,0	6,2	5,8	7,0	8,5
SiO_2	4,05	11,3	11,4	12,1	12,9	14,3	15,6
MgO	2,4	12,8	13,7	15,65	18,7	19,5	23,3
CaO	2,4	1,5	1,5	1,8	1,4	1,2	1,4
Na_2O	4,0	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K_2O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

III D. *Saison sèche : septembre à novembre*

	1	2	3	4	5	6	10
pH	6,4	7,5	7,6	7,8	8,0	7,7	8,0
ρ	25 000	12 000	12 000	8 000	9 000	7 200	7 300
HCO_3^-	15,0	50,0	50,0	62,2	73,4	95	115
Cl^-	6,0	6,0	6,0	6,2	7,0	6,5	8,0
SiO_2	3,2	7,7	7,6	7,6	8,8	10,4	10,5
MgO	2,8	13,6	14,0	17,7	19,8	21,8	25,1
CaO	2,1	2,1	1,6	1,2	1,4	1,5	2,2
Na_2O	3,8	4,0	4,0	4,3	4,7	4,7	4,8
K_2O	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	0,20	0,19

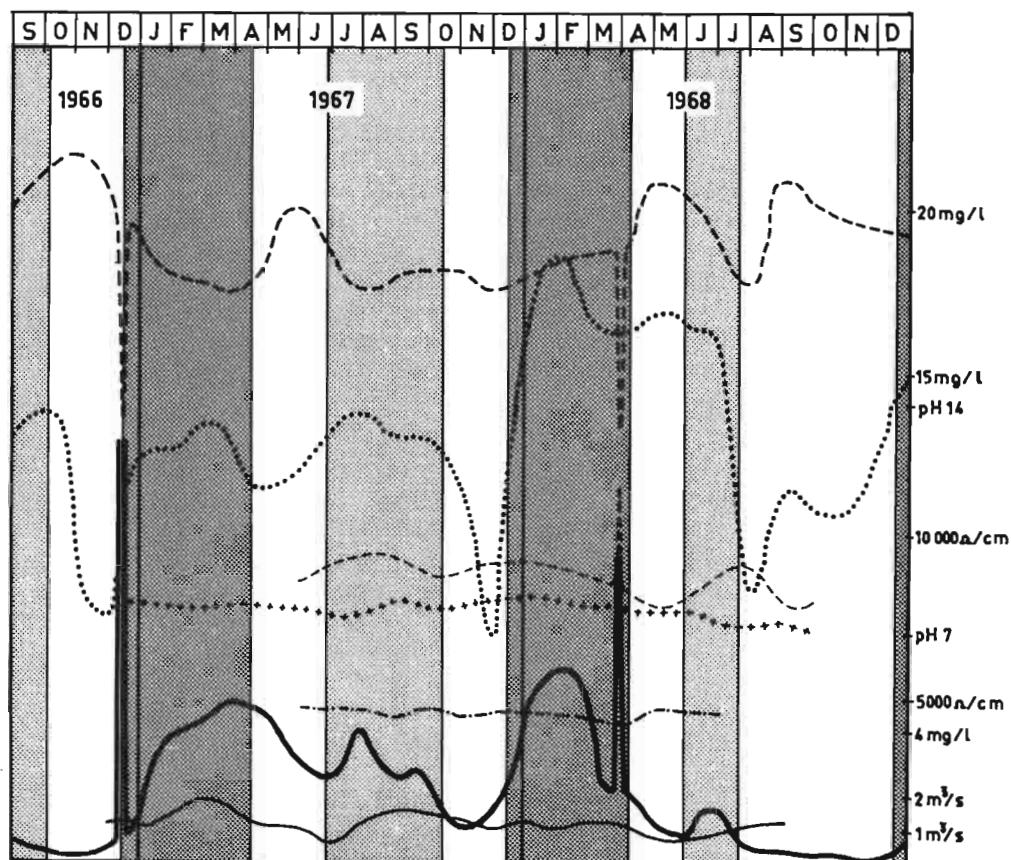


FIG. 2. — Evolution géochimique des eaux en fonction du temps. Dumbéa Est (Prélèvement DUM 5).

•••••	pH	■	Saison chaude
- - - - -	ρ (Ω/cm)	■	Petite saison sèche
—	Débit (m^3/s)	■	Saison fraîche
.....	SiO_2 (mg/l)	■	Saison sèche
- - - - -	MgO (mg/l)		
—	CaO (mg/l)		
- - - - -	Na_2O (mg/l)		

En définitive, les deux éléments dont la géochimie est la plus intéressante dans les eaux de la Dumbéa sont la silice et le magnésium, par ailleurs constituants essentiels des roches du bassin versant. Pour comparer plus commodément ces deux éléments entre eux, dans les roches et dans les eaux, le magnésium a été exprimé en oxyde.

Les teneurs en magnésie sont toujours élevées (20 à 30 mg/l , soit vingt fois plus de MgO que de CaO), mais présentent deux maximums correspondant aux deux périodes plus sèches. L'amplitude des variations est en outre peu élevée ($\pm 10\%$ de la valeur moyenne, sauf pour les crues exceptionnelles). La libération du magnésium semble donc peu influencée par le drainage, l'eau de pluie ruisselée diluant simplement les eaux souterraines aux périodes plus humides.

Le comportement de la silice est très différent; les teneurs sont élevées (15 mg/l en moyenne), ce qui se compare aux chiffres donnés pour la zone chaude : 18 mg/l dans l'Amazonie (CORBEL, 1957), 16 mg/l en Côte-d'Ivoire (ROUGERIE, 1958), 15 mg/l à Madagascar (HERVIEU, 1968) et dépasse les teneurs trouvées en zone tempérée : 3 mg/l dans les Vosges par exemple (ROUGERIE, 1965), 3 à 10 mg/l dans le Massif Central (TARDY, 1969). L'amplitude des variations est très grande puisqu'elle atteint $\pm 50\%$ de la valeur moyenne. A l'inverse du magnésium la teneur est plus élevée en période pluvieuse, et minimum en saison sèche. La libération de silice serait alors directement proportionnelle au drainage.

Ces comportements relatifs de la silice et du magnésium avaient été qualitativement définis par PÉDRO et BITTAR (1966) d'après les résultats d'essais d'altération de serpentinite en extracteur Soxhlet. Les courbes de la figure 2 permettent de vérifier quantitativement cette hypothèse. On peut en effet calculer la vitesse d'exportation V_e d'un élément exprimée en molécules/seconde en fonction du débit, D m^3/s :

$$V_e = \frac{t \cdot D}{M}$$

où t est la teneur de cet élément dans l'eau en mg/l et M la masse moléculaire de l'élément (ou de l'oxyde).

On a reporté sur la figure 3 les vitesses d'exportation de la silice et de la magnésie, observées sur la Dumbéa Est (point DUM 5), en fonction des débits mensuels moyens. Tant que le débit reste inférieur à 4,5 m^3/s , les relations $V_e = f(D)$ peuvent être considérées comme linéaires. Le calcul des droites de régression de V_e en D donne :

$$V_{\text{SiO}_2} = 0,24 D - 0,02$$

$$V_{\text{MgO}} = 0,43 D + 0,03$$

Le rapport moléculaire SiO_2/MgO est voisin de $\frac{1}{2}$ dans l'olivine, aussi utiliserons-nous les vitesses moléculaires *relatives* d'exportation V' : lorsque ces vitesses sont égales, le départ d'une molécule de silice correspond à celui de deux molécules de magnésie.

En se référant à la silice il vient alors :

$$V'_{\text{MgO}} = 0,215 D + 0,03 .$$

et	$D > 2 \text{ m}^3/\text{s}$	$V'_{\text{MgO}} < V_{\text{SiO}_2}$
	$D < 2 \text{ m}^3/\text{s}$	$V'_{\text{MgO}} > V_{\text{SiO}_2}$

En période de basses eaux (saisons sèches), le magnésium est donc plus rapidement exporté que la silice, alors qu'en période de hautes eaux le phénomène s'inverse, et l'exportation de silice est prépondérante.

b) *Variations dans l'espace*

L'évolution des eaux selon la géologie de la formation drainée, à une période climatique déterminée, est résumée dans les tableaux III qui ont servi à l'établissement des courbes des figures 4. Le profil topographique a été joint sur les courbes, pour mettre en évidence le rôle de la géomorphologie.

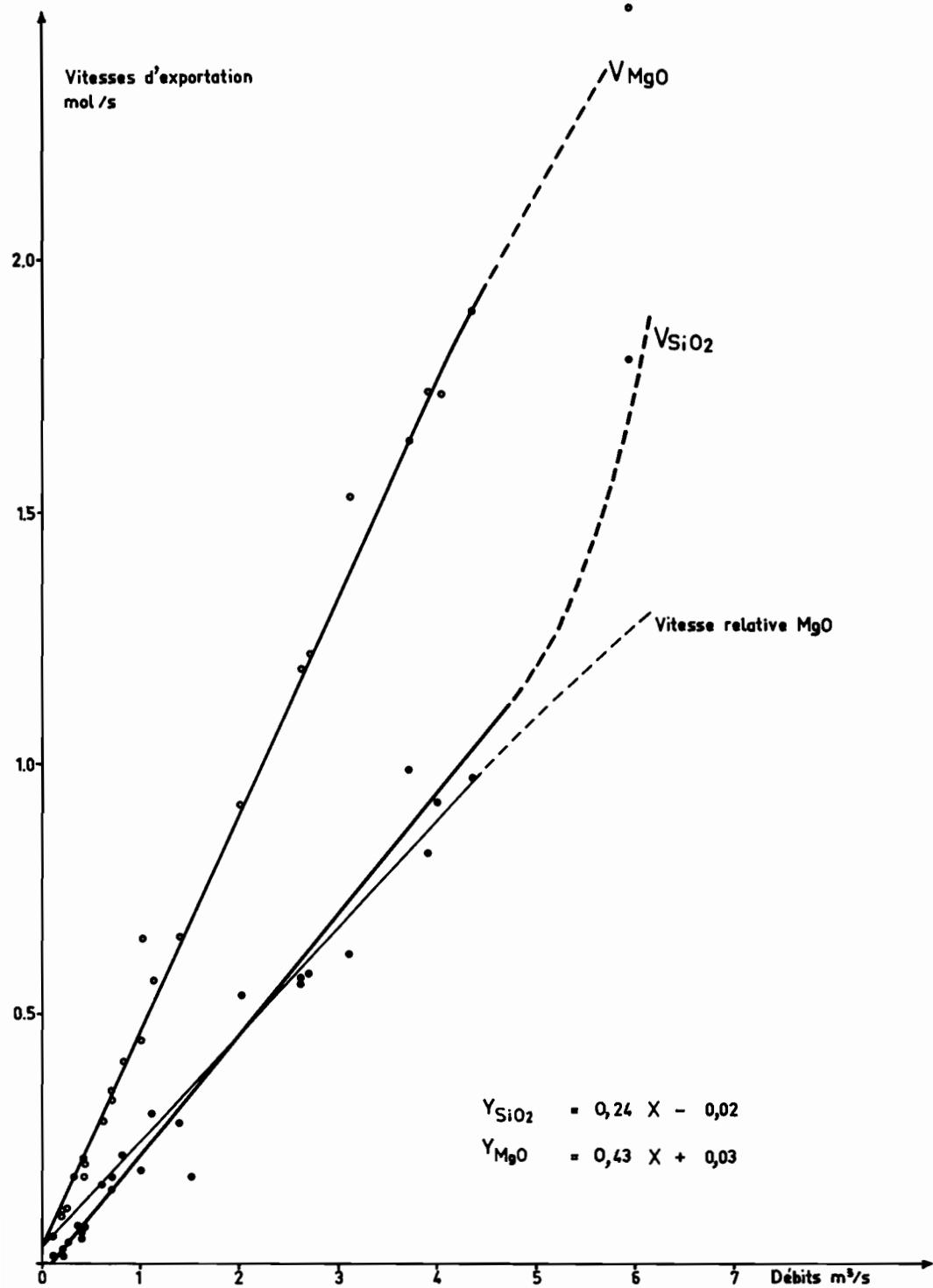


FIG. 3. — Vitesses relatives d'exportation de silice et magnésie dans le bassin de la Dumbéa Est.

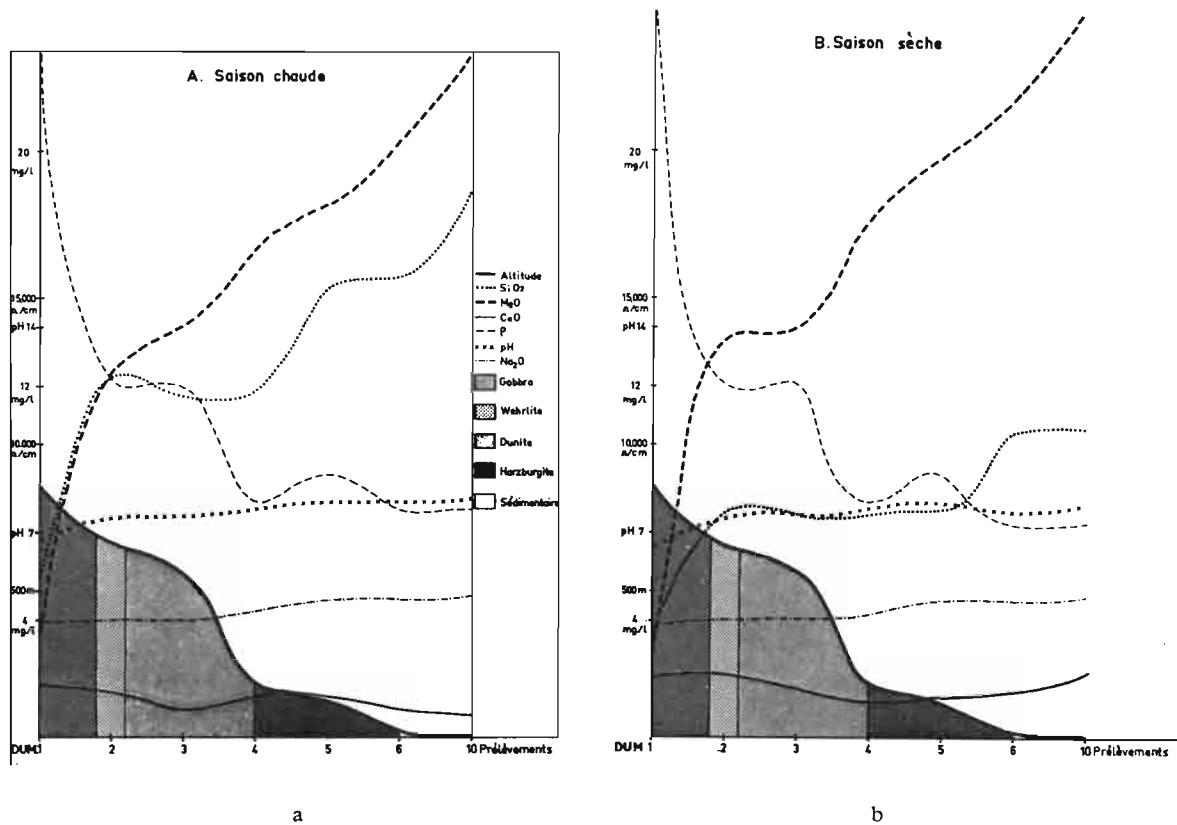


FIG. 4. — Evolution géochimique des eaux sur un profil en long.
A. Saison chaude. B. Saison sèche.

Comme sur la figure 2, les variations du pH sont faibles, puisqu'il passe de 7 à 8 entre la source et le point extrême atteint par la marée. Le sodium est le seul élément dont la teneur reste à peu près constante : tous les autres cations voient leur teneur augmenter avec la distance parcourue, à l'exception du calcium qui diminue dans les eaux, mais n'est présent que dans les gabbros, à la source. L'origine maritime du sodium, apporté par le vent et l'eau de pluie, est donc confirmée. La résistivité montre ici encore une corrélation négative avec le magnésium. Quant au comportement relatif du magnésium et de la silice, on retrouve les conclusions du paragraphe précédent sur le rôle du drainage : les teneurs en magnésium augmentent très régulièrement de la source à l'exutoire, ce qui montre que la libération de cet élément se produit de manière analogue dans tout le bassin, quelle que soit la morphologie, donc l'intensité du drainage.

Les teneurs en silice augmentent aussi vers l'aval, mais cet accroissement est nettement plus faible que celui du magnésium et semble dépendre de la morphologie. Ce point du comportement relatif de la silice et du magnésium est précisé plus loin.

TABLEAU IV
Eléments en traces dans les eaux de la Dumbéa (branche est)
 (en $\mu\text{g/l}$)

3. Eléments en traces. Mobilité relative des éléments

Les analyses spectrographiques disponibles sont encore très peu nombreuses, ce qui rend l'interprétation délicate. Le tableau IV rassemble cependant les teneurs moyennes des eaux (en $\mu\text{g/l}$) sur le profil en long de la Dumbéa Est, en saison sèche (fin 1966) et en saison chaude (début 1967).

En appliquant le calcul de TARDY (1966) aux tableaux I, II, III et IV (prélèvements 1, 3 et 5), et en considérant l'aluminium comme élément de référence, on calcule les échelles de mobilités relatives des éléments dans l'altération des gabbros, des dunites et des harzburgites. Cette échelle est reportée sur la figure 5. On constate que la séquence est sensiblement identique pour les trois roches.

Trois groupes d'éléments s'individualisent.

a) *Eléments lessivés*

On y rencontre les alcalins et alcalino-terreux et le cuivre dans l'ordre suivant : $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Sr} > \text{K} > \text{Cu}$, avec une seule exception : $\text{Sr} > \text{Ca}$, en saison chaude, pour la harzburgite. Ces éléments se retrouvent concentrés dans les zones très mal drainées, les marais à gypse, les mangroves, et dans l'océan.

b) *Position intermédiaire*

Il s'agit essentiellement de la silice et du magnésium. Le comportement relatif de ces deux éléments apparaît encore ici, quelle que soit la roche : en saison sèche $\text{Mg} > \text{Si}$ en saison humide $\text{Si} \geq \text{Mg}$
Ces éléments sont concentrés dans les argiles des sols et en bas de pente.

c) *Eléments résiduels*

La séquence, dans ce dernier groupe, est sensiblement différente de celle trouvée sur des roches acides ou moyennement basiques (TARDY, 1969) : c'est en particulier le cas de l'aluminium et du fer, dont le comportement est inversé. Les mobilités relatives se classent dans l'ordre suivant : $\text{Al} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Mn} \geq \text{Ti} \geq \text{Co} > \text{Cr} \geq \text{Fe}$.

Dans le paysage, cette séquence se vérifie (ROUTHIER, 1963; TRESCASES, 1969). Les plus résiduels, fer et chrome, sont les constituants des cuirasses, même des plus anciennes. Cobalt et manganèse sont concentrés dans la partie moyenne des sols ferrallitiques des croupes sommitales. Le nickel, qui les suit partiellement (AMMOU-CHOKROUM, 1969), est plus mobile et se retrouve à la base des profils d'altération, et dans les zones de piedmont. L'aluminium enfin est concentré dans les horizons ferrallitiques et les cuirasses, mais aussi dans les argiles des formations de piedmont.

Il apparaît ainsi une véritable chromatographie des ions dans le paysage (TARDY, 1969) ; les éléments qui s'étaient rassemblés dans les conditions de profondeur divergent selon les lois de la géochimie de la surface (MILLOT, 1964). Il semble cependant que cette répartition varie selon la roche-mère, le comportement relatif d'un élément étant en partie fonction de sa teneur dans la roche (TARDY, 1966). La figure 6 synthétise cette chromatographie des éléments des péridotites de Nouvelle-Calédonie selon les toposéquences théoriques sur le versant ouest (TRESCASES, 1969). La concordance avec l'échelle des mobilités relatives est très bonne.

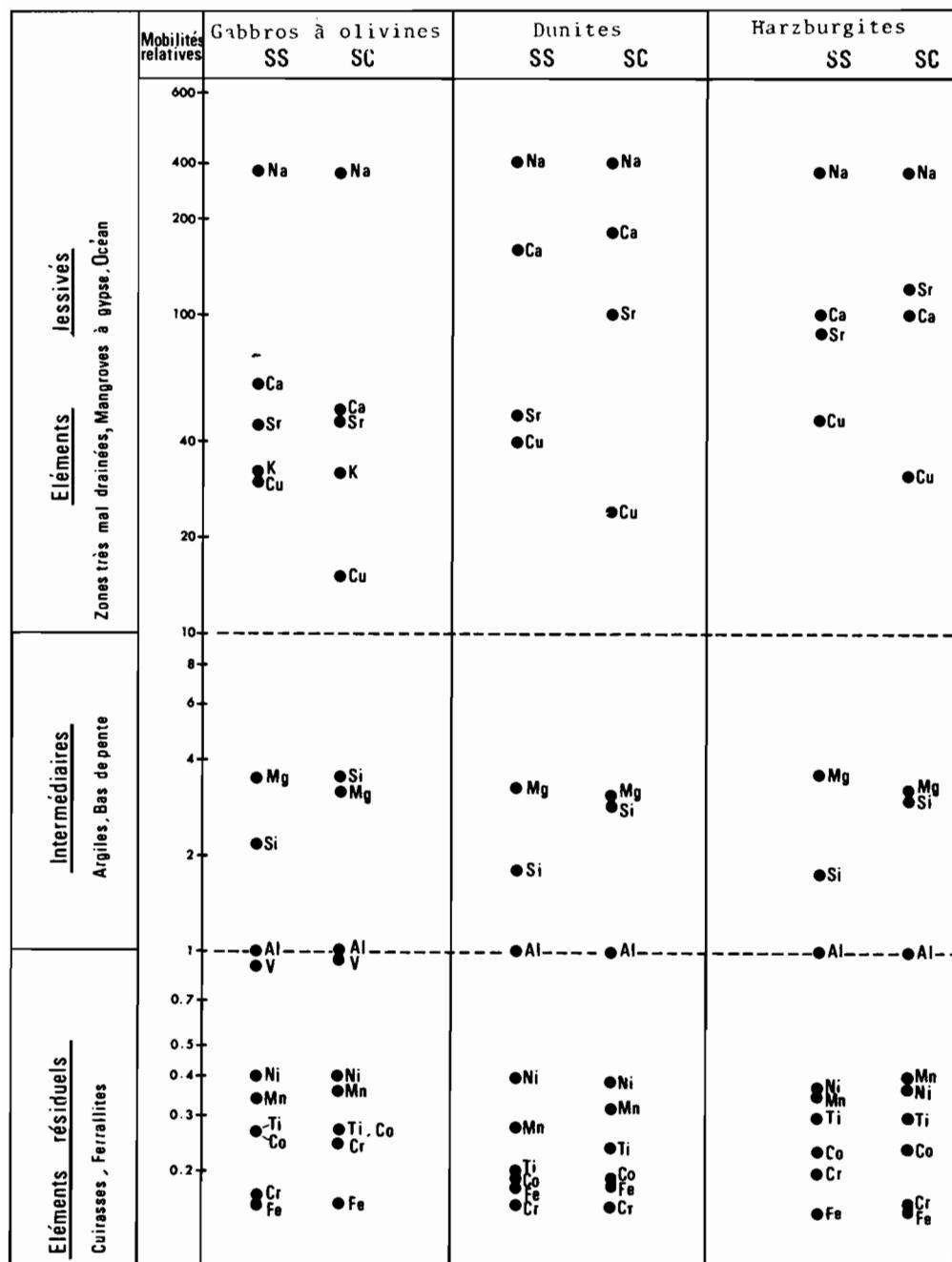


FIG. 5. — Mobilités relatives des éléments.

SS : Saison sèche. SC : Saison chaude.

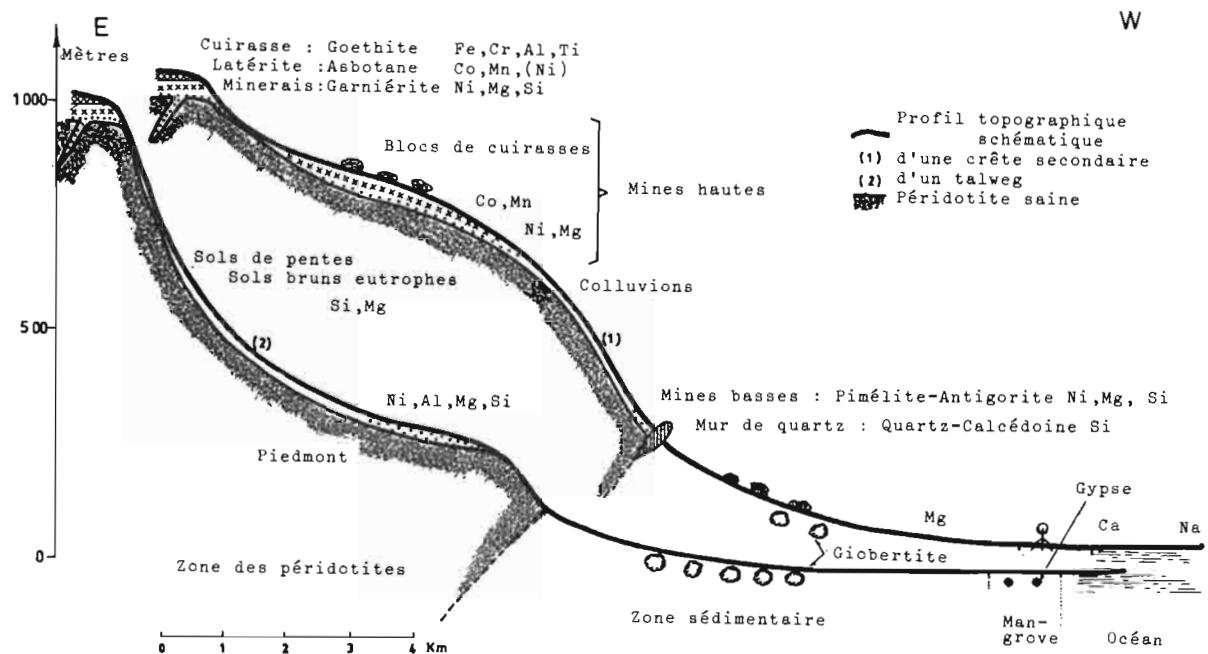


FIG. 6. — Evolution géochimique de surface des péridotites de Nouvelle-Calédonie.

III. — SYNTHÈSE. CONSÉQUENCES SUR LE TYPE D'ALTÉRATION

1. Principe de calcul

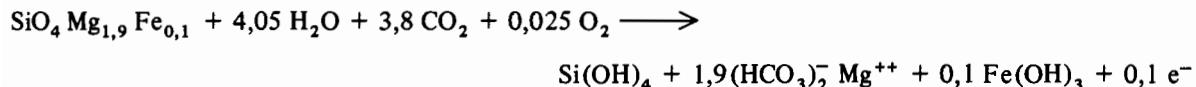
Le processus principal de l'altération est l'hydrolyse, suivie d'une dissolution et d'une oxydation. PÉDRO (1966 et 1968) a exposé le calcul applicable aux roches alumino-silicatées : l'aluminium, constituant essentiel des argiles de néoformation est sensiblement constant dans l'altération (en l'absence de chélivation) ; lorsque la silice est exportée au moins aussi vite que les cations basiques, le reliquat de l'altération ne comprend que des hydroxydes (gibbsite, goethite), caractéristique de l'allitisation ; si la silice est exportée moins vite que les bases, le reste de silice va se combiner avec l'alumine disponible, pour former de la kaolinite (monosiallitisation) ou de la montmorillonite (bisiallitisation).

On peut tenter d'appliquer ce raisonnement aux roches ultrabasiques. Ces dernières sont constituées essentiellement de silice et de magnésium : le magnésium est donc à la fois le cation basique, exporté, et le constituant des argiles résiduelles. Par analogie avec les processus d'utilisation, monosiallitisation et bisiallitisation, PÉDRO et BITTAR (1966) ont défini qualitativement les phénomènes de ferruginisation, serpentinitisation et stéatisation. L'étude précise de la mobilité relative de la silice et de la magnésie fera apparaître les types d'altération induits par les diverses combinaisons des facteurs climatiques, topographiques et pétrographiques.

L'olivine représente 90 % des harzburgites et près de 100 % des dunites. L'altération de ce minéral peut se schématiser en considérant, comme PÉDRO, pour les roches alumino-silicatées, que la silice et les carbonates basiques (ici de magnésium) ne peuvent précipiter ensemble, et que l'un des deux éléments ne subsiste dans la phase résiduelle que lorsque sa mobilité relative est moins grande (ce qui est vérifié dans les zones d'altération).

a) 1^{er} cas : MgO et SiO₂ sont libérés et exportés avec des vitesses relatives identiques :

$$V_{\text{SiO}_2} = V'_{\text{MgO}}$$



SiO₄Mg_{1,9}Fe_{0,1} olivine moyenne des périclites de Nouvelle-Calédonie

Si(OH)₄ soluble sous forme moléculaire

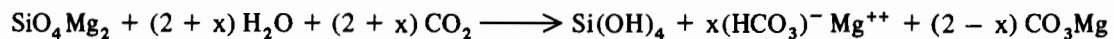
(HCO₃)₂Mg soluble sous forme ionique

Fe(OH)₃ gel ferrique, reste sur place, et évolue plus tard en goethite.

SiO₂/MgO eau = SiO₂/MgO roche = 1/1,9 (rapport moléculaire)

b) 2^e cas :

$$V_{\text{SiO}_2} > V'_{\text{MgO}}$$



Le comportement du fer restant identique on ne considérera plus que SiO₂ et MgO (cas d'une forstérite SiO₄Mg₂) pour simplifier.

$$x < 2$$

CO₃Mg concrétions

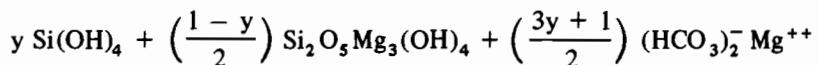
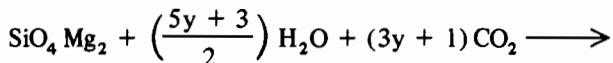
$$\text{SiO}_2/\text{MgO} \text{ eau} = 1/x > \text{SiO}_2/\text{MgO} \text{ roche} = \frac{1}{2}$$

c) 3^e cas :

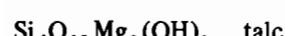
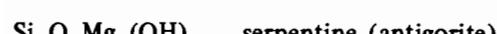
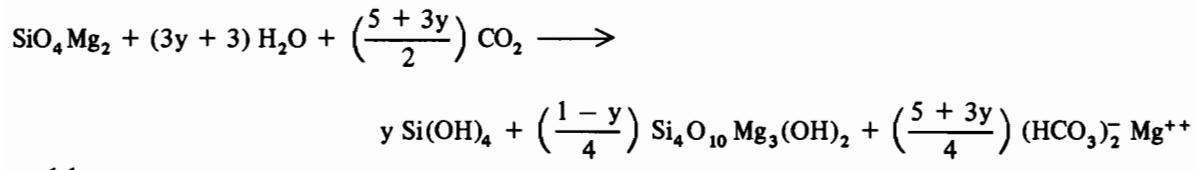
$$V_{\text{SiO}_2} < V'_{\text{MgO}}$$

Une partie seulement de la silice libérée par hydrolyse est en solution, l'autre, insoluble, se recombine avec des ions magnésium pour des néoformations argileuses :

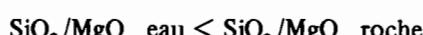
serpentinisation :



ou stéatisation :



Dans les deux cas :



d) *Formule générale de l'altération des péridotites*

En considérant en première approximation que cette altération ne provoque la solubilisation que de silice et de magnésie, on peut généraliser les formules précédentes pour toutes les péridotites et comparer les rapports SiO_2/MgO dans l'eau avec les produits résiduels de l'altération.

Les deux premiers cas ne se distinguent guère de l'altération des roches basiques : toute la silice libérée est dissoute, il n'y a pas de possibilité de néoformations argileuses. L'exportation de silice est prépondérante (mobilité relative plus grande).

Soit R le rapport moléculaire SiO_2/MgO dans la roche et L ce rapport dans l'eau. On a alors $L \geq R$. L'altération laisse un résidu de gel ferrique insoluble, et, éventuellement, des carbonates de magnésium. Des concrétions de carbonates de magnésium ont effectivement été observées en plusieurs sources. Le gel ferrique évolue ensuite en goethite; c'est le domaine de la *ferrallitisation*, puisque les petites quantités d'aluminium présentes dans la roche ont le même comportement global que le fer.

Si $L < R$: le magnésium est alors plus vite dissous et exporté. L'excédent de silice va alors se combiner avec une partie des ions Mg^{++} pour constituer des phyllites magnésiennes : antigorite (serpentinisation) ou talc (stéatisation).

Pour une unité de masse de péridotite altérée, on a :

x molécules de silice dissoute;

y molécules de silice résiduelle qui se recombinent, selon les conditions locales de drainage, avec $\frac{3}{2}y$ MgO pour la serpentinisation ou $\frac{3}{4}y$ MgO pour la stéatisation;

$\frac{1}{R}(x + y)$ de MgO libérées par l'altération.

Nous avons donc, par rapport au calcul de PÉDRO, une inconnue y supplémentaire, résultant de l'absence d'élément constant. En considérant, en sus des vitesses d'exportation, mesurables dans l'eau, les vitesses de *dissolution* V'' (vitesses relatives à celle de la silice), on a : $V''_{\text{SiO}_2} = x$ et $V''_{\text{MgO}} = x + y$

ce qui permet de définir un facteur

$$K = \frac{V''_{MgO}}{V''_{SiO_2}} = \frac{x + y}{x}$$

caractéristique du milieu ($K > 1$).

Les rapports limites L s'expriment alors :

$$L \text{ serpentinisation} = \frac{2R}{K(2 - 3R) + 3R}$$

$$L \text{ stéatisation} = \frac{4R}{K(4 - 3R) + 3R}$$

On note que pour un L donné, on peut avoir serpentinisation ou stéatisation selon la valeur de K . Lorsque le drainage est mauvais, la silice amorphe peut aussi se combiner avec le gel ferrique pour former des minéraux argileux ferrifères de type 2/1, de la série beidellite-nontronite. L'argile ferrifère 1/1 n'existant pas, on ne peut pas calculer le rapport $SiO_2/bases$ limite pour la néoformation de nontronite. Toutefois, par analogie avec les roches basiques voisines, les gabbros à olivine, où les rapports limites de ferrallisation et kaolinisation sont respectivement 0,65 et 0,40, la limite supérieure de néogenèse de nontronite a été estimée à 0,35 pour les roches ultrabasiques.

2. Application. Types d'altération actuels des roches du massif du Sud de la Nouvelle-Calédonie

On a reporté sur la figure 7 les variations du rapport moléculaire $SiO_2/bases$ (SiO_2/MgO pour les roches ultrabasiques; $SiO_2/MgO + CaO + Na_2O$ pour les gabbros) calculé d'après les valeurs moyennes données dans le tableau III, aux différentes saisons, pour les prélèvements effectués sur le bassin versant de la Dumbéa Est. La géomorphologie a été mise en évidence par le tracé schématique du profil topographique. Les valeurs en 1, 2 et 3, qui sont des prélèvements d'eaux de sources (fig. 2), ainsi que celles du point 4, représentatif de toute la fraction de bassin située à l'amont, ont été utilisées directement.

Par contre les valeurs en DUM 5 ont été corrigées de manière à ne tenir compte que de l'influence de la fraction de bassin située à l'aval de 4 et à l'amont de 5 (approximativement la zone de harzburgite). La teneur que l'on mesurerait dans ces conditions ($t 5^*$) s'exprime en effet en fonction des teneurs t mesurées en DUM 4 et DUM 5, et des quantités d'eau H ruisselées par chaque fraction de bassin :

$$t 5^* = t 5 \left(1 + \frac{H_4}{H_5} \right) - t 4 \frac{H_4}{H_5}$$

Pour les points 6 et 10 qui dépassent le cadre de la Dumbéa Est, ce calcul n'a pas été fait. Les valeurs correspondantes ne figurent qu'à titre indicatif.

On a porté en outre sur le graphique les valeurs du rapport $SiO_2/bases$ en deux points supplémentaires du bassin où des prélèvements moins systématiques ont été effectués : DUM 4B, et SDB.

Les valeurs limites d'allitisation et monosiallitisation (roches basiques), ferrallitisation et nontronitisation (roches ultrabasiques) définies au paragraphe précédent, partagent la figure 7 en zones d'existence des minéraux secondaires. Cette figure met parfaitement en évidence les rôles des facteurs morphologiques et climatologiques sur l'altération d'un type de roche donné : ces conclusions sur les types actuels de l'altération sont comparées aux observations pédologiques (TRESCASES, 1969) synthétisées sur la figure 8.

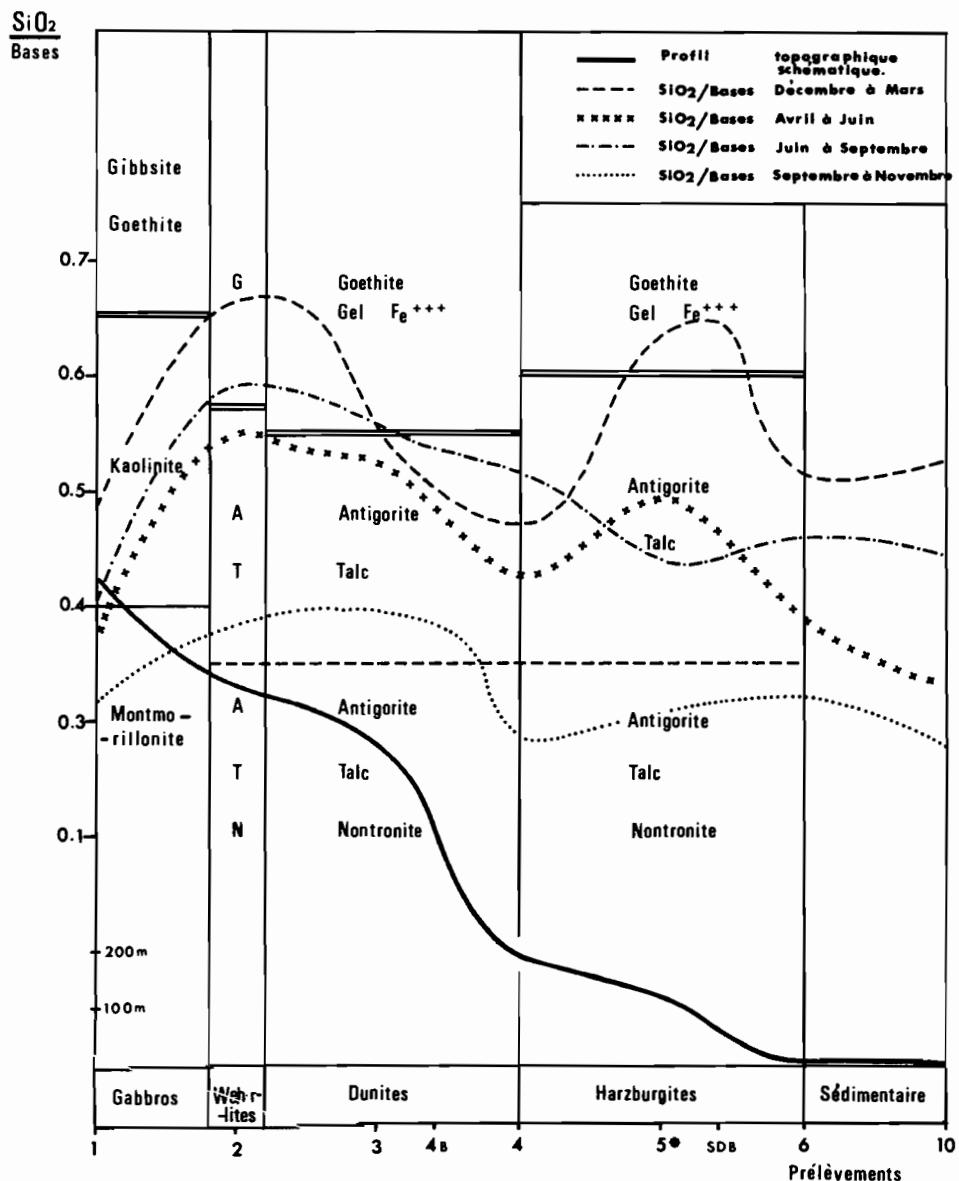


FIG. 7. — Evolution du paramètre géochimique silice/bases dans les eaux et conséquences sur le type d'altération.

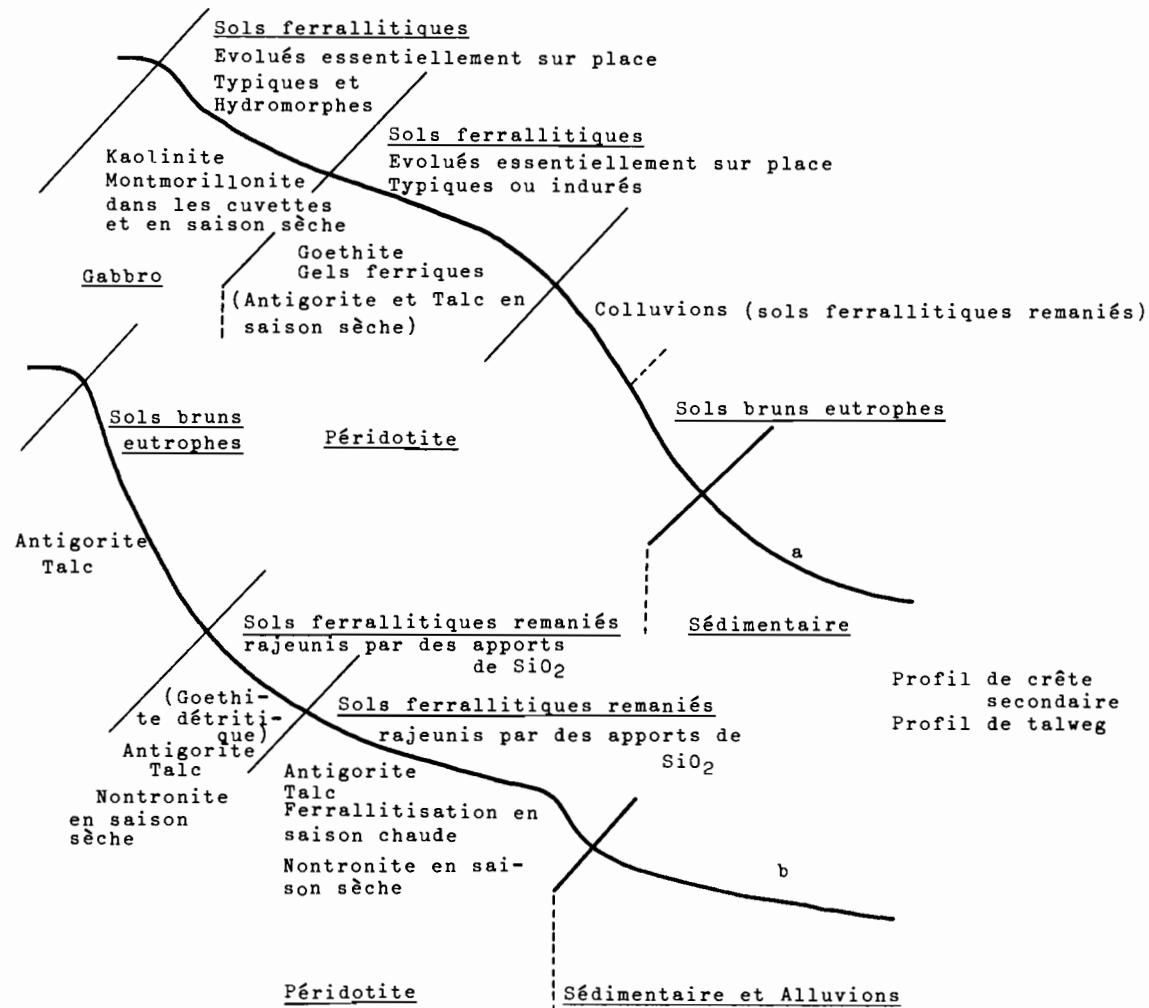


FIG. 8. — Toposequences théoriques du versant ouest de la Nouvelle-Calédonie (Dumbéa Est).

a) Les gabbros

Les gabbros, qui induisent une morphologie de plateau, donc à drainage moyen, avec des zones à mauvais drainages, s'altèrent le plus souvent en kaolinite, mais, du moins à l'heure actuelle, le lessivage de la silice n'est pas assez intense pour que la gibbsite apparaisse ($\text{SiO}_2/\text{bases}$ dans l'eau reste inférieur à 0,65). En saison sèche, il n'y a plus monosiallitisation mais bisiallitisation, avec synthèse de montmorillonite ($\text{SiO}_2/\text{bases}$ dans l'eau $< 0,40$).

L'observation de la phase résiduelle confirme ces déductions : les zones de départ sur gabbro sont kaoliniques, et on trouve de la montmorillonite dans les cuvettes. Notons que la gibbsite, rencontrée dans les horizons supérieurs des sols sur gabbro, en particulier dans la cuirasse, ne semble pas actuelle et correspondrait à un paléoclimat allitisant.

b) *Les roches ultrabasiques*

On rencontre essentiellement trois types de morphologie : plateau, versant en pente forte, piedmont (légèrement perché).

Plateau : prélèvements DUM 2 et 3. Le paramètre L des eaux montre que l'altération est ferrallitique, et conduit à l'individualisation de goethite et de gel ferrique, sauf en saison sèche (septembre à novembre) où du talc et de l'antigorite apparaissent dans les zones de départ.

Les sols de cette zone (fig. 8) sont ferrallitiques, évolués essentiellement sur place, typiques ou indurés. L'horizon C de roche altérée à structure conservée est très profond (parfois plus de 20 m : c'est la « latérite jaune » des mineurs), et constitué de goethite et de gel ferrique. Mais à sa base, on trouve un horizon à texture plus grossière, renfermant des minéraux de type antigorite et parfois du talc (« minérais terreux »). C'est dans ces minéraux que se rencontrent les plus fortes concentrations de nickel, dénommées communément *garniérites*. (CAILLÈRE, 1965).

Versant : prélèvements DUM 4B et 4. L'altération n'est jamais ferrallitique dans cette zone, le rapport $\text{SiO}_2/\text{bases}$ de l'eau restant toujours inférieur au rapport R de la roche (ici la dunite). En 4, c'est-à-dire en bas de pente, on note la possibilité de formation de nontronite durant la saison sèche.

L'étude pédologique confirme ces conclusions : les versants en pentes fortes évoluent en sols bruns eutrophes, géochimiquement et minéralogiquement proches des zones de départ des profils latéritiques, et constitués de talc et d'antigorite. Les versants convexes, toutefois, correspondant à certains interflus (crêtes secondaires du bassin), sont le siège d'un intense colluvionnement alimenté par l'érosion des niveaux supérieurs des profils latéritiques, topographiquement dominants. Ce processus, purement mécanique, ne peut donc être mis en évidence par l'étude des eaux.

Piedmont : prélèvements DUM 5* et SDB. L'amplitude des variations du paramètre géochimique $\text{SiO}_2/\text{bases}$ dans les eaux de drainage est ici maximum.

- En saison chaude et humide, l'altération est ferrallitique.
- D'avril à septembre (c'est-à-dire pendant la petite saison sèche précédant l'hiver austral, et pendant ce dernier) se forment des phyllites magnésiennes, talc et antigorite.
- Pendant la véritable saison sèche, les mêmes minéraux silico-magnésiens peuvent apparaître, accompagnés de nontronite.

Les observations pédologiques sont encore une fois en concordance rigoureuse avec ces déductions, les sols de piedmont, évolués, avec prédominance des phénomènes de remaniements colluviaux et alluviaux de matériaux ferrugineux, se trouvant rajeunis par des apports (lessivage oblique) de silice dissoute. C'est le piègeage de silice dans les phyllites magnésiennes et ferrigènes qui est décelé par la géochimie des eaux.

Remarque : La figure 7 fait aussi apparaître le rôle du troisième facteur de l'altération : la nature de la roche-mère. L'altération ferrallitique d'une roche ultrabasique est atteinte dans les conditions climatiques et morphologiques qui permettent seulement la monosiallisation des roches basiques ou acides. C'est dans ce sens qu'on peut parler d'une plus grande *facilité* de la ferrallitisation des roches lorsqu'elles sont plus basiques.

Une nuance dans l'*altérabilité* peut encore se déceler à l'intérieur même du groupe ultrabasique : les valeurs du rapport R précisent la *séquence d'altération* : dunite > harzburgite > serpentinite > pyroxénite, ce qui découle de la séquence minéralogique d'altération : péridot > serpentine > pyroxène.

CONCLUSIONS

L'étude géochimique des eaux drainant les périclites de Nouvelle-Calédonie nous a permis d'appréhender la *dynamique actuelle* de l'altération.

L'échelle des mobilités relatives des éléments dans les conditions de surface s'est révélée en excellente concordance avec la disposition dans le paysage des différentes concentrations supergénées des constituants des périclites. Cette répartition géochimique, qui constitue une chromatographie en phase liquide à travers les toposéquences de sols et de sédiments, et qui est la manifestation la plus éclatante du processus d'altération, est donc actuelle et correspond aux conditions climatologiques et morphologiques présentes.

L'étude du paramètre silice/bases dans les eaux a apporté une réponse, d'ailleurs nuancée, à la question du caractère actuel ou paléoclimatique de l'altération ferrallitique :

— sur les versants en pentes fortes, l'altération n'est jamais ferrallitique, et conduit à la synthèse de phyllites magnésiennes 1/1 et 2/1;

— sur les zones à topographie sub-horizontale ou de pentes faibles, l'altération *actuelle* est ferrallitique, mais seulement en saison humide (de décembre à mars en général); sur les plateaux, en altitude, l'altération ferrallitique intervient aussi en saison fraîche. Bien que cette saison se distingue surtout en montagne par sa température, il faut remarquer que la pluviosité est beaucoup plus importante en montagne qu'en plaine. Le paramètre pluviosité semble donc prépondérant pour déterminer le type d'altération, la température ne semble ici qu'accessoire. En saison sèche et sur roches basiques, le processus d'altération est celui de la bisallitisation.

Le rôle des facteurs climatiques, morphologiques et pétrographiques est ainsi mis en évidence : la ferrallitisation intervient d'autant plus aisément que la roche est plus basique, que la pente est plus faible, que la pluviométrie est importante. Dans un contexte géomorphologique favorable, on observe une périodicité des phases d'altération : ferrallitique en saison humide, elle conduit à la synthèse de phyllites 1/1 et 2/1 en saison sèche. La périodicité des phénomènes avait été signalée par BERTHOIS (1964) qui compare les eaux de Guyane et de Guinée à celles de la Loire, par TARDY et MILLOT (1966) et TARDY (1969), qui notent, en Côte-d'Ivoire, l'alternance monosallitisation en saison humide, bisallitisation en saison sèche.

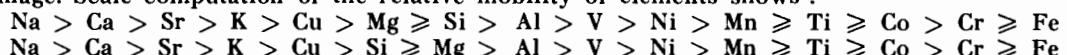
En Nouvelle-Calédonie, un paléoclimat franchement tropical est responsable des cuirasses gibbsitiques sur roches basiques, et des concentrations relatives d'hydroxydes de nickel, cobalt et manganèse, dans les niveaux latéritiques. Le climat subtropical actuel continue l'altération ferrallitique, par conséquent la libération d'importantes quantités de nickel; mais il provoque aussi la synthèse de phyllites magnésiennes dans les zones de départ, ainsi que la déstabilisation des concrétions de nickel oxydé; le nickel préconcentré est alors lessivé et piégé dans les minéraux silicatés (talc et antigorite essentiellement) de la base du profil d'altération, pour former la *garnérite*.

L'altération des roches ultrabasiques en climat tropical ou équatorial provoque partout la formation de puissantes couches latéritiques souvent décrites : à Cuba (DE VLETER, 1955), au Venezuela (JURKOVIC, 1963), en Guinée (BONIFAS, 1959), par exemple. Le nickel est concentré dans ces latérites à l'état oxydé, la garnérite restant une curiosité sous ces climats, et les gisements restent à faible teneur (1 à 1,5 % Ni). En Nouvelle-Calédonie par contre, et aussi en Californie (CHACE et col., 1969), les gisements sont plus riches, une partie du

nickel étant concentrée en valeur absolue dans les silicates secondaires. C'est donc aux particularités de son climat subtropical que la Nouvelle-Calédonie doit son exceptionnelle richesse minière.

Abstract

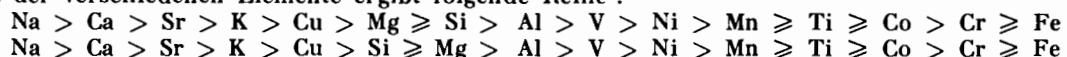
Waters draining the peridotites of New-Caledonia includes bicarbonates, magnesium and silica. The releasing of magnesium, contrarily to that of silica, is little controlled by the strength of drainage. Scale computation of the relative mobility of elements shows :



This sequence tallies with an ion chromatography through the landscape. Waters reveal the dynamics of weathering types : feralitisation only occurs during wet periods and upon gentle slopes. The sub-tropical climate of New-Caledonia thus causes, upon the peridotites, the alternation of feralitisation and simatisation phases which gives rise to the accumulating of nickel silicates (garnierite).

Zusammenfassung

Die Abflusswässer der Peridotite von Neukaledonien sind bikarbonat-, magnesium- und kieselsäurehaltig. Das Freiwerden von Magnesium wird, im Gegensatz zu dem der Kieselsäure, nur in geringem Mass durch die Stärke des Abflusses bestimmt. Die Berechnung der relativen Beweglichkeit der verschiedenen Elemente ergibt folgende Reihe :

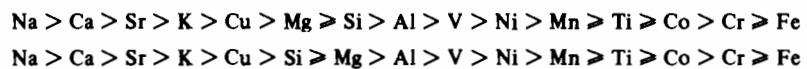


Diese Abfolge entspricht einer Chromatographie der Ionen durch die Landschaft. Die Wässer sind der dynamische Ausdruck der Verwitterungstypen : die Ferralitisation erfolgt lediglich während der humiden Zeiträume auf den flachen Hängen. Das subtropische Klima von Neukaledonien bedingt demnach auf den Peridotiten alternierend Ferralitisations- und Simatisationsphasen, was eine Anhäufung von Nickelsilikaten (Garnierit) zur Folge hat.

РЕЗЮМЕ

Геохимическое исследование поверхностных вод в ультраосновном массиве на юге Новой Каледонии

Воды, дренирующие перидотиты Новой Каледонии – бикарбонатные, магнезиальные и кремнеземные. В противоположность к кремнию, вынос магния слабо поддаётся действию дренажа. Расчет шкалы относительной подвижности элементов даёт :



Эта последовательность соответствует хроматографии ионов по ландшафту. Воды выражают динамику типов выветривания : ферраллитизация осуществляется только в гумидные периоды и на слабых склонах. Следовательно, субтропический климат Новой Каледонии производит на перидотитах чередование фаз ферраллитизации с симатизацией, что приводит к накоплению силикатов никеля (гарниерита).

BIBLIOGRAPHIE

- AMMOU-CHOKROUM M. (1969). — Contribution à l'étude de la distribution du nickel et des ferrallites de Nouvelle-Calédonie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 268 D, p. 1563-1566.
- BERTHOIS L. (1964). — Etude comparative du lessivage des cations dans les zones tropicales et tempérées. *Rev. gén. Sci. Pures appl.*, 71, 5-6, p. 143-149.
- BONIFAS M. (1959). — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.*, 17, 159 p.
- CAILLÈRE S. (1965). — Composition minéralogique des différents types de minéraux de nickel de la Nouvelle-Calédonie. *Mém. Mus. Nat. d'Hist. Nat.*, C XII, 3, p. 105-124.
- CHACE F. M., CUMBERLIDGE J. T., CAMERON W. L. et VAN NORT S. D. (1969). — Applied geology at the Nickel Mountain mine, Riddle, Oregon. *Econ. Geol.*, 64, 1, p. 1-16.
- CHATONIER D. (1957). — Contribution à l'étude de la minéralisation des eaux en rapport avec la composition chimique du sous-sol. Thèse Fac. Pharmacie et Médecine, de Bussac éd., Clermont-Ferrand, 172 p.
- CORBEL J. (1957). — L'érosion chimique des granites et silicates sous climats chauds. *Rev. Géom. Dynam.*, VIII, 1-2, p. 4-8.
- DE VLETTER D. R. (1955). — How cuban nickel ore was formed; a lesson in laterite genesis. *Eng. and Min. J.*, New-York, 156, 10, p. 84-87.
- GAC J. Y. (1968). — Les altérations de quelques roches cristallines des Vosges. Etude minéralogique et géochimique. Thèse 3^e cycle, Fac. Sci. Strasbourg, 77 p.
- GUILLON J. H. (1969 a). — Données nouvelles sur la composition et la structure du grand massif périclinal du sud de la Nouvelle-Calédonie. *Cahiers ORSTOM, sér. Géologie*, 1, 1, p. 7-25.
- GUILLON J. H. (1969 b). — Sur la présence des sulfures métalliques dans les massifs périclinaux de la Nouvelle-Calédonie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 268 D, p. 3013-3014.
- HERVIEU J. (1968). — Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. Mémoire ORSTOM, 24, 465 p.
- JURKOVIC I. (1963). — Some geochemical aspects about the genesis of the nickel deposit Loma de Hierro (Venezuela). *Geoloski vjesnik*, 17, p. 102-112.
- MILLOT G. (1964). — Géologie des argiles. Masson éd., Paris, 499 p.
- PÉDRO G. (1966). — Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 262 D, p. 1828-1831.
- PÉDRO G. (1968). — Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, 10, 5, p. 457-440.
- PÉDRO G. et BITTAR K. E. (1966). — Contribution à l'étude de la genèse de sols hypermagnésiens : recherches expérimentales sur l'altération chimique des roches ultrabasiques (serpentinites). *Ann. Agron.*, 17, 6, p. 611-657.

- PÉDRO G. et BITTAR K. E. (1966). — Sur l'influence du type chimique de la roche-mère dans le développement des phénomènes d'altération superficielle : recherches expérimentales sur l'évolution des roches ultrabasiques (serpentinites). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 263 D, p. 313-316.
- ROUGERIE G. (1958). — Acidité des eaux en milieu tropical. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 248 D, p. 447-449.
- ROUGERIE G. (1965). — Mobilisation des débris et pertes de substance dans la région du Ballon d'Alsace. *Rev. géogr. de l'Est*, 4, p. 483-497.
- ROUTHIER P. (1963). — Les gisements métallifères. Masson éd., Paris, p. 208-215.
- SCHOELLER M. (1963). — Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines. Drouillard éd., Bordeaux, 231 p.
- TARDY Y. et MILLOT G. (1966). — Premiers résultats de l'étude chimique de la nappe du bassin versant de Korhogo (Côte-d'Ivoire). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 263 D, p. 753-755.
- TARDY Y. (1966). — Mobilité relative des éléments au cours des phénomènes d'altération de quelques roches cristallines. *Bull. Serv. Carte géol. Als-Lorr.*, 19, 3-4, p. 255-270.
- TARDY Y. (1969). — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.* (à paraître).
- TRESCASES J. J. (1965). — Méthodes d'analyses des eaux drainant les massifs de péridotites en Nouvelle-Calédonie. Rapport ORSTOM, Centre de Nouméa, 50 p.
- TRESCASES J. J. (1969). — Premières observations sur l'altération des péridotites de Nouvelle-Calédonie. Pédologie. Géochimie. Géomorphologie. *Cahiers ORSTOM, sér. Géologie*, 1, 1, p. 27-57.
- WHITE D. E., HEM J. D. et WARING G. A. (1963). — Chemical composition of subsurface waters. *Data of Geochemistry. U.S. Geol Surv. Prof. Paper*, 440 F, 67 p.